

实用 模具材料与热处理 速查手册

王邦杰 编

分类 牌号 性能 应用 选材
热处理 表面强化 进口模具钢
数据—方法—实例

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



实用模具材料与热处理 速查手册

王邦杰 编



机械工业出版社

从模具材料使用入手,遵照最新现行国家标准、专业技术标准,结合相关技术经验,汇编成这本实用型工具书。

全书内容包括:模具及模具材料的分类、模具钢的性能要求、模具材料的选择、冷作模具钢、热作模具钢、塑料模具钢、其他模具材料的性能与应用,模具材料与模具零件的热处理、模具表面强化技术和进口模具钢的性能与应用等,附录收录了模具材料常用汉英词汇、黑色金属材料硬度及强度换算。对常用模具材料逐一从性能到材料应用进行了系统的介绍,并用实例重点介绍模具材料的使用性能、热加工工艺、热处理工艺及模具选材原则与方法。

本书可供从事模具设计、制造的工程技术人员、生产管理人员、模具材料市场采购销售人员使用,也可供高等院校及大、中专职业院校工科专业师生阅读或模具材料生产企业应用参考。

图书在版编目(CIP)数据

实用模具材料与热处理速查手册/王邦杰编. —北京:机械工业出版社, 2013. 11

ISBN 978-7-111-44385-8

I. ①实… II. ①王… III. ①模具钢—热处理—技术手册

IV. ①TG162.4-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 244357 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:李万宇 责任编辑:李万宇 吕芳

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:姚毅 责任印制:李洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·41.5 印张·2 插页·928 千字

0 001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-44385-8

定价:98.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

策划编辑:(010) 88379732

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

在现代工业生产中，模具已成为一种优质、高效、低消耗、低成本的工艺装备，作为现代制造业的重要手段，广泛应用于机械、电子、汽车、信息、航空、航天、轻工、军工、交通、建材、医疗、生物、能源等制造领域，对我国经济运行中的节能降耗起着重要作用，是国民经济中各工业部门发展的重要基础之一。

模具材料是模具制造业的物质基础和技术基础，其品种、规格、质量对模具的性能、使用寿命和模具制造周期起着决定性的作用。模具材料的发展必须适应模具向现代化发展的要求，推动模具工业向高级化、多样化、个性化和高附加值的方向发展。因此，模具材料技术在经济发展、国防现代化和高端技术领域起到了十分重要的支撑作用，成为衡量一个国家制造业水平高低的重要标志，也是一个国家的工业产品保持国际竞争力的重要保证之一。

为了适应模具材料工业日益发展的需要，从模具材料研究入手，以材料为主线，按照现行国家标准、专业技术标准，汇编成本书，以飨读者。全书内容包括：模具及模具材料的分类、模具钢的性能要求、模具材料的选择、冷作模具钢、热作模具钢、塑料模具钢、其他模具材料的性能与应用、模具材料与模具零件的热处理、模具表面强化技术和进口模具钢的性能与应用等。对常用模具材料逐一从性能到材料应用进行了系统的介绍，并用实例重点介绍模具材料的使用性能、热加工工艺、热处理工艺及模具选材原则与方法。对于旧的材料名称、规格及性能、用途等，都按照现行国家标准进行了对照补正。具有较全的技术参数，并有不同方案的比较数据。本书侧重于实用性，集模具选材、制造工艺、热处理及表面强化技术于一体，具有知识的可操作性、实用性，内容的规范性、广泛性，是一部权威的实用工具书，且填补了模具类图书的空白。

本书资料翔实，信息量大，虽然内容涉及面广，但表述简明，且分类明晰，便于速查，实用性强，使用方便，可供从事模具设计、制造的工程技术人员、生产管理人员、模具材料市场采购销售人员使用，也可供高等院校及大、中专职业院校工科专业师生阅读或模具材料生产企业应用参考。

在编写过程中，借鉴了大量资料，引用了一些单位的科研、试验数据，由于使用面广，恕不能一一道谢。在此向原书作者、科研部门、出版单位表示衷心的感谢。鉴于手册体例，或有雷同之处，敬请见谅。由于编者水平所限，书中不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 模具及模具材料的

分类 1

1.1 模具的分类 1

1.1.1 现代模具的特点 1

1.1.2 模具的分类方法 1

1.1.3 模具的失效及影响因素 2

1. 模具的失效形式 2

2. 模具失效的影响因素 3

1.2 模具材料的分类 3

1.2.1 常用模具材料 3

1.2.2 模具钢的分类 4

1. 模具钢常用的分类方法 4

2. 模具钢的品牌 5

第 2 章 模具钢的性能要求 7

2.1 模具钢的使用性能 7

2.1.1 模具钢的力学性能 7

1. 强度 7

2. 硬度 7

3. 塑性 8

4. 韧性 9

5. 疲劳强度 9

2.1.2 模具钢的物理化学性能 10

1. 耐磨性 10

2. 粘着性 10

3. 耐热性能 10

4. 脱碳敏感性 10

5. 耐蚀性 11

6. 镜面性 11

7. 蚀刻性 11

2.2 模具钢的工艺性能 11

2.2.1 冷加工工艺性能 11

1. 切削加工性能 12

2. 抛光性能 12

3. 冷挤压成形 12

2.2.2 热加工工艺性能 12

1. 可锻性 12

2. 铸造工艺性能 13

3. 焊接性 13

2.2.3 热处理工艺性能 13

1. 淬硬性和淬透性 14

2. 淬火变形和开裂倾向 14

2.3 模具钢的冶金质量控制 14

2.3.1 模具钢的冶金质量标准 14

1. 化学成分的均匀性与偏析 14

2. 有害元素硫和磷含量 15

3. 钢中非金属夹杂物 15

4. 碳化物的不均匀度 16

5. 钢中的氧含量 16

6. 疏松与白点 17

2.3.2 国内外合金模具钢技术

标准比较 17

1. 钢号系列 17

2. 化学成分 17

3. 低倍组织 17

4. 脱碳 18

5. 高倍组织 18

6. 交货状态及硬度 19

7. 钢材的表面质量 21

8. 特殊要求 22

2.3.3 国产模具钢的冶金质量 22

1. 国产模具钢的主要差距 22

2. 模具钢冶金质量对模具使用寿命的影响 24

2.3.4 提高模具钢质量水平的

主要措施 25

1. 减少钢中的非金属夹杂物 25

2. 提高钢的锻造质量 26

3. 保证钢的组织稳定性	29	4.2 冷作模具钢的性能与应用	80
4. 提高钢的力学性能	31	4.2.1 碳素工具钢	80
2.4 现代模具钢的生产技术	31	1. T7 钢	80
2.4.1 模具钢电弧炉冶炼技术	32	2. T8 钢	83
1. 电弧炉冶炼的一般特点	32	3. T9 钢	86
2. 电弧炉炼钢的基本过程	32	4. T10 钢	88
2.4.2 模具钢电渣重熔工艺	36	5. T11 钢	91
1. 电渣重熔的基本原理	36	6. T12 钢	93
2. 电渣重熔的特点	37	7. T13 钢	96
3. 电渣重熔的工艺要素	37	4.2.2 高碳低合金冷作模具钢	98
4. 电渣重熔的意义	38	1. 9SiCr 钢	98
2.4.3 粉末冶金模具钢的生产	39	2. 9Mn2V 钢	102
2.4.4 模具钢的锻造和轧制	40	3. 9CrWMn 钢	103
2.4.5 模具钢的退火	41	4. CrWMn 钢	106
1. 模具钢钢锭的退火	41	5. 6CrNiWMoV (DS) 钢	108
2. 模具钢材的退火	42	6. GCr15 钢	109
2.4.6 模具钢的无损检测	42	7. Cr2 钢	112
2.4.7 钢材的深度加工	43	8. 60Si2Mn 钢	115
第3章 模具材料的选择	44	9. 8Cr2MnWMoVS (8Cr2S) 钢	117
3.1 模具材料的选用原则	44	10. 6CrNiMnSiMoV (GD) 钢	119
1. 满足使用性能原则	44	11. Cr2Mn2SiWMoV 钢	122
2. 考虑工艺性能原则	44	12. W 钢	123
3. 注重经济性原则	45	13. 4CrW2Si 钢	125
3.2 模具材料的选择方法与实例	48	14. 5CrW2Si 钢	127
3.2.1 冷作模具材料的选择	48	15. 6CrW2Si 钢	128
1. 常用冷作模具材料的性能比较	48	16. Cr06 钢	130
2. 常用冷作模具材料的选择	49	17. 8MnSi 钢	131
3. 冷作模具材料的选用实例	51	18. 7CrSiMnMoV (CH1) 钢	133
3.2.2 热作模具材料的选择	58	19. 6CrMnSi2Mo1 钢	136
1. 热作模具材料的性能	58	20. 5Cr3Mn1SiMo1V 钢	137
2. 常用热作模具材料的选择	60	21. 5CrNiMnSiMoWV 钢	138
3. 热作模具材料的选用实例	61	22. 6Cr3VSi 钢	139
3.2.3 塑料模具材料的选择	71	4.2.3 高耐磨冷作模具钢	140
1. 塑料模具的失效形式	71	1. Cr4W2MoV 钢	141
2. 塑料模具钢的性能	72	2. Cr5Mo1V 钢	143
3. 塑料模具成型零件选材方法	73	3. Cr6WV 钢	145
第4章 冷作模具钢	77	4. 9Cr6W3Mo2V2 (GM) 钢	147
4.1 常用冷作模具钢	77	5. 7Cr7Mo2V2Si (LD) 钢	149
		6. 7Cr7Mo3V2Si (LD2) 钢	152

7. Cr8MoWV3Si (ER5) 钢	154	5. 45Cr2NiMoVSi 钢	215
8. Cr12 钢	156	6. 5Cr2NiMoVSi 钢	217
9. Cr12MoV 钢	159	7. 3Cr2MoWVN 钢	219
10. Cr12V 钢	162	5.2.2 中耐热性热作模具钢	220
11. Cr12Mo 钢	164	1. 4Cr5MoSiV (H11) 钢	221
12. Cr12Mo1V1 (D2) 钢	165	2. 4Cr5MoSiV1 (H13) 钢	225
4.2.4 冷作模具用高速工具钢	168	3. 4Cr5W2VSi 钢	228
1. W18Cr4V (W18) 钢	169	4. 4Cr4WMoSiV 钢	231
2. W12Mo3Cr4V3N (V3N) 钢	172	5. 8Cr3 钢	232
3. W9Mo3Cr4V (W9) 钢	174	6. 4Cr3Mo2MnVB (ER8) 钢	235
4. W6Mo5Cr4V2 (M2) 钢	176	7. 4Cr3Mo3SiV (H10) 钢	236
5. 6W6Mo5Cr4V (6W6) 钢	179	8. 3Cr3Mo3W2V (HM1) 钢	239
4.2.5 基体钢	180	9. 3Cr3Mo3VNb (HM3) 钢	242
1. 5Cr4Mo3SiMnVA1		10. 3Cr3Mo2WVSi (ZDM2) 钢	245
(012Al) 钢	181	11. 42Cr9Si2 钢	246
2. 5Cr4W5Mo2V (RM2) 钢	182	12. 40Cr10Si2Mo 钢	247
3. 6Cr4W3Mo2VNb (65Nb) 钢	184	5.2.3 高耐热性热作模具钢	249
4. 6Cr4Mo3Ni2WV (CG2) 钢	186	1. 3Cr2W8V (H21) 钢	249
5. 6W8Cr4VTi (LM1) 钢	188	2. 4Cr3Mo3W4VNb (GR) 钢	253
6. 6Cr5Mo3W2VSiTi (LM2) 钢	189	3. 4Cr3Mo2MnVNB (Y4) 钢	255
4.2.6 无磁模具钢	190	4. 4Cr5Mo2MnVSi (Y10) 钢	256
1. 7Mn15Cr2Al3V2WMo		5. 4Cr3Mo2VNiNb (HD) 钢	258
(7Mn15) 钢	190	6. 4Cr3Mo2WVMn (TM) 钢	260
2. 1Cr18Ni9Ti 钢	193	7. 5Cr4Mo2W2VSi 钢	261
3. 5Mn15Cr8Ni5Mo3V2		8. 4SiMnW3Mo2VN 钢	263
(5Mn15) 钢	197	5.2.4 奥氏体型热作模具钢	265
4. 7Mn10Cr8Ni10Mo3V2		1. 奥氏体型热作模具钢的类型	265
(7Mn10) 钢	199	2. 典型铬镍系奥氏体型热作 模具钢	265
第5章 热作模具钢	201	5.2.5 析出硬化型热作模具钢	267
5.1 热作模具钢的分类	201	1. 析出硬化型热作模具钢的 特点	267
5.1.1 热作模具钢标准钢号	201	2. 典型析出硬化型热作模具钢	267
5.1.2 热作模具钢的分类方法	201	5.2.6 高速工具钢型耐热钢	269
5.1.3 常用热作模具钢	202	5.2.7 冷热兼用基体钢	269
5.2 热作模具钢的性能与应用	205	5.2.8 马氏体时效型耐热钢	270
5.2.1 低耐热高韧性热作模具钢	205	1. 马氏体时效型耐热钢的性质	270
1. 5CrNiMo 钢	205	2. 马氏体时效型耐热钢的应用	271
2. 5CrMnMo 钢	210	第6章 塑料模具钢	272
3. 4CrMnSiMoV 钢	212		
4. 5SiMnMoV 钢	214		

6.1 塑料模具钢的分类	272	2. SM1Ni3Mn2CuAlMo (PMS) 钢	341
6.1.1 现行塑料模具用钢牌号	272	3. 06Ni6CrMoVTiAl (06Ni) 钢	344
6.1.2 塑料模具的工作条件及其用钢 的分类方法应用特点	273	4. 25CrNi3MoAl 钢	346
1. 塑料模具的工作条件	273	5. 18Ni 系列钢	348
2. 塑料模具钢的分类方法	273	6. 0Cr16Ni4Cu3Nb (PCR) 钢	350
3. 塑料模具钢的应用特点	278	7. 05Cr17Ni4Cu4Nb 钢	351
6.2 塑料模具钢的性能与应用	279	8. 07Cr17Ni7Al 钢	353
6.2.1 碳素塑料模具钢	279	9. 07Cr15Ni7Mo2Al 钢	354
1. SM45 钢	280	10. 1Cr14Co13Mo5V (AFC-77) 钢	355
2. SM50 钢	283	6.2.6 耐蚀性塑料模具钢	356
3. SM55 钢	286	1. SM2Cr13 钢	356
6.2.2 渗碳型塑料模具钢	289	2. 30Cr13 钢	361
1. SM1CrNi3 钢	290	3. SM4Cr13 钢	363
2. 20 钢	294	4. 95Cr18 钢	366
3. 20Cr 钢	296	5. 102Cr17Mo 钢	368
4. 20CrMnTi 钢	299	6. 14Cr17Ni2 钢	371
5. 12CrNi3 钢	301	7. SM3Cr17Mo 钢	374
6. 12CrNi2 钢	305	8. Cr14Mo4V 钢	376
7. 12Cr2Ni4 钢	307	6.2.7 淬硬型塑料模具钢	377
8. 20Cr2Ni4 钢	308	6.2.8 非调质塑料模具钢	378
9. 0Cr4NiMoV (LJ) 钢	310	1. B20 系列钢	378
6.2.3 预硬型塑料模具钢	312	2. B30 系列钢	379
1. SM3Cr2Mo (P20) 钢	313	3. F45V 和 YF45V 钢	381
2. SM3Cr2MnNiMo (718) 钢	315	4. YF45MnV 钢	383
3. 40Cr 钢	317	5. GF40MnSiVS 钢	385
4. 42CrMo 钢	320	第7章 其他模具材料的性能与 应用	387
5. 30CrMnSiNi2A 钢	323	7.1 铸铁材料	387
6. 38CrMoAl 钢	326	7.1.1 模具常用铸铁材料	387
7. 20CrNi3AlMnMo (SM2) 钢	327	1. 铸铁材料的分类	387
6.2.4 易切削预硬型塑料模具钢	328	2. 模具常用铸铁材料的 力学性能	388
1. 5CrNiMnMoVSCa (5NiSCa) 钢	329	7.1.2 铸铁模具材料的性能与 应用	388
2. 8Cr2MnWMoVS (8Cr2S) 钢	333	1. 灰铸铁	388
3. 4CrNiMnMoVSCa (4NiSCa) 钢	335	2. 球墨铸铁	391
4. Y55CrNiMnMoVS (SM1) 钢	337	3. 蠕墨铸铁	393
6.2.5 时效硬化型塑料模具钢	338		
1. SM2CrNi3MoAl1S 钢	339		

4. 可锻铸铁	394	4. 其他低熔点合金模具材料	427
5. 合金铸铁	396	5. 低熔点合金的应用	428
7.2 铸钢	404	7.4.2 锌合金	428
7.2.1 铸钢模具材料	404	1. 锌合金的特点	428
1. 常用铸钢模具材料的 性能和应用	404	2. 锌合金的化学成分和性能	429
2. 美国专用铸造模具钢的 化学成分	405	3. 锌合金的超细化处理工艺	430
3. 我国几种陶瓷型精铸模具钢材料 的力学性能	405	4. 锌合金的应用	430
7.2.2 铸钢的分类	405	7.4.3 超塑性合金	430
1. 铸造碳钢	405	1. 超塑性合金的化学成分与 性能	430
2. 铸造低合金钢	406	2. 实现超塑性的主要条件	431
3. 合金铸钢	407	3. 超塑性成形工艺的类型	431
7.2.3 铸钢的工艺特点	409	4. 超塑性成形工艺的应用	432
1. 铸钢的铸造工艺	409	7.4.4 其他非铁金属合金	432
2. 铸钢的热处理工艺	410	1. 铜合金	432
3. 铸钢在模具中的应用	411	2. 铝合金	434
7.3 硬质合金和钢结硬质合金	412	3. 高温合金	438
7.3.1 硬质合金	412	7.5 其他模具材料	440
1. 硬质合金的种类	412	7.5.1 环氧塑料	440
2. 硬质合金的特点	412	1. 环氧塑料的主要成分	440
3. 硬质合金的化学成分	413	2. 环氧塑料的主要技术指标	441
4. 硬质合金的性能	413	3. 环氧塑料的基本性能	443
5. 硬质合金的应用	415	4. 环氧塑料的应用	444
7.3.2 钢结硬质合金	417	7.5.2 聚氨酯橡胶	444
1. 钢结硬质合金的分类	417	1. 聚氨酯橡胶的特点	444
2. 钢结硬质合金的化学成分	418	2. 国产聚氨酯橡胶的力学性能	445
3. 钢结硬质合金的物理性能	419	3. 聚氨酯橡胶的应用	445
4. 钢结硬质合金的锻造 工艺性能	419	7.5.3 陶瓷材料	445
5. 钢结硬质合金的力学性能	420	1. 陶瓷材料的分类	446
6. 钢结硬质合金的应用	422	2. 特种陶瓷的性能	446
7.4 非铁金属及合金	424	3. 陶瓷材料在模具中的应用	447
7.4.1 低熔点合金	425	第8章 模具材料与模具零件的 热处理	448
1. 低熔点合金模具材料的特点	425	8.1 钢的热处理	448
2. 常用低熔点合金模具材料的 化学成分	425	8.1.1 钢的热处理原理	448
3. 低熔点合金模具材料的性能	426	1. 钢在加热时的组织转变	448
		2. 钢在冷却时的组织转变	451
		3. 钢在回火时的组织转变	454
		8.1.2 钢的热处理分类	455

8.2 模具钢热处理基本工艺	455	1. 碳素工具钢的特点	481
8.2.1 钢的退火	455	2. 碳素工具钢的热处理工艺	481
1. 完全退火	456	3. 碳素工具钢热处理应用实例	482
2. 不完全退火	456	8.3.4 低合金冷作模具钢的 热处理	483
3. 等温退火	456	1. 铬钨锰钢热处理	483
4. 球化退火	457	2. 锰钒钢热处理	484
5. 均匀化退火	458	3. 高碳铬钢热处理	485
6. 中间退火	458	4. 铬硅钢热处理	487
7. 再结晶退火	459	5. 硅锰钢热处理	488
8. 去应力退火	459	8.3.5 高合金冷作模具钢的 热处理	489
8.2.2 钢的正火	459	1. 高碳高铬钢热处理	489
1. 正火工艺的特点	459	2. Cr6WV 钢热处理	490
2. 正火与退火工艺比较	460	3. Cr4W2MoV (120) 钢热处理	490
8.2.3 钢的淬火	461	4. Cr5Mo1V 钢热处理	491
1. 钢的淬火加热	461	8.3.6 火焰淬火型冷作模具钢的 热处理	491
2. 淬火冷却介质	464	1. 常规热处理工艺规范	492
3. 淬火冷却方法	467	2. 热处理应用实例	492
4. 淬火操作程序	468	8.3.7 模具用基体钢的热处理	492
5. 钢的淬硬性和淬透性	469	1. 6Cr4W3Mo2VNb (65 Nb) 钢热处理	492
8.2.4 钢的回火	470	2. 5Cr4W5Mo2V (RM2) 钢热处理	493
1. 回火的目的	471	3. 7Cr7Mo2V2Si (LD) 钢热处理	494
2. 回火的分类	471	4. 5Cr4Mo3SiMnVA1 (012Al) 钢热处理	495
3. 回火保温时间	471	8.3.8 模具用高速工具钢的 热处理	496
4. 钢的回火脆性	471	1. W18Cr4V (W18) 钢热处理	496
8.2.5 钢的冷处理	473	2. W12Mo3Cr4V3N (V3N) 钢热处理	497
1. 冷处理的目的	473	3. W9Mo3Cr4V (9341) 钢热处理	498
2. 冷处理介质	474	4. W6Mo5Cr4V2 (M2) 钢热处理	499
3. 冷处理工艺	474	5. 6W6Mo5Cr4V (6W6)	
4. 冷处理在工、模具上的应用	474		
8.2.6 模具真空热处理	475		
1. 真空热处理工艺特点	475		
2. 模具真空热处理工艺	475		
3. 模具真空热处理应用	479		
8.3 冷作模具钢的热处理	479		
8.3.1 冷作模具钢的 合金化特点	479		
8.3.2 冷作模具钢的热处理 特点	480		
8.3.3 碳素冷作模具钢的热处理	481		

钢热处理	499	要求	517
8.4 热作模具钢的热处理	500	2. 渗碳型塑料模具钢的热	
8.4.1 热作模具钢的合金化特点	500	处理工艺	517
8.4.2 热作模具钢的热处理		8.5.6 时效硬化型塑料模具钢的	
特点	501	热处理	518
8.4.3 低合金热作模具钢的		1. 马氏体时效硬化钢	518
热处理	502	2. 析出硬化型时效硬化钢	519
1. 5CrNiMo 钢热处理	502	8.5.7 耐蚀塑料模具钢的热处理	520
2. 5CrMnMo 钢热处理	503	8.6 模具零件的热处理	521
3. 4CrMnSiMoV 钢热处理	505	8.6.1 模具零件的热处理特点	521
8.4.4 中合金热作模具钢的		8.6.2 模具零件热处理实例解析	522
热处理	506	8.6.3 新型模具钢应用示例	525
1. 4Cr5MoSiV1 (H13)		8.7 其他模具材料的热处理	527
钢热处理	506	8.7.1 铸铁材料的热处理	527
2. 4Cr5MoSiV (H11)		1. 灰铸铁的热处理	527
钢热处理	507	2. 球墨铸铁的热处理	528
3. 4Cr5W2VSi 钢热处理	509	3. 蠕墨铸铁的热处理	529
8.4.5 高合金热作模具钢的		4. 可锻铸铁石墨化退火	530
热处理	509	8.7.2 铸钢材料的热处理	530
1. 3Cr2W8V (H21) 钢热处理	510	1. 铸钢材料的特点	530
2. 3Cr3Mo3W2V (HM1)		2. 常用铸造模具用钢的热处理	531
钢热处理	511	8.7.3 锌合金模具材料及热处理	532
8.5 塑料模具钢的热处理	512	1. 锌合金模具材料的特点	532
8.5.1 塑料模具钢的合金化特点	512	2. 锌合金的超细化处理	532
8.5.2 预硬型塑料模具钢的		8.7.4 铜合金模具材料及热处理	533
热处理	513	1. 铜合金的性能及类型	533
1. 预硬型钢的特点	513	2. 铜合金的热处理	533
2. 模具材料市场的供货状况	513	8.7.5 铝合金模具材料及	
8.5.3 易切削塑料模具钢的		热处理	533
热处理	514	1. 铝合金的性能及类型	533
1. 8Cr2MnWMoVS (8Cr2S)		2. 铝合金的热处理	534
钢热处理	514	8.7.6 钢结硬质合金的热处理	534
2. 5CrNiMnMoVSCa (5NiSCa)		1. 钢结硬质合金的热处理工艺	534
钢热处理	515	2. DT 大负荷碳化钨钢结硬质合金	
8.5.4 非合金中碳塑料模具钢的		及其热处理	536
热处理	516	第9章 模具表面强化技术	537
8.5.5 渗碳型塑料模具钢的		9.1 模具的化学热处理	537
热处理	517	9.1.1 模具零件的渗碳	538
1. 渗碳型塑料模具钢的应用与		1. 气体渗碳	539

2. 离子渗碳	542	2. 高频感应淬火的类型	570
3. 真空渗碳	543	3. 高频感应淬火的特点	570
4. 碳氮共渗	544	9.2.2 火焰淬火	571
9.1.2 模具零件的渗氮	545	1. 火焰淬火的工艺特点	572
1. 渗氮的基本原理	545	2. 火焰淬火的工艺控制	572
2. 渗氮的特点	546	3. 火焰淬火工艺的应用	573
3. 气体渗氮	546	9.2.3 电解液淬火	573
4. 离子渗氮	549	1. 电解液淬火的特点	574
5. 真空渗氮	551	2. 电解液淬火的原理与工艺	574
9.1.3 模具零件的渗钒	552	3. 电解液淬火的应用	574
1. 盐浴渗钒	552	9.3 模具的表面涂覆强化	575
2. 铬钒共渗	554	9.3.1 模具表面的热喷涂	575
9.1.4 模具零件的盐浴渗钨	555	1. 热喷涂技术的分类	575
1. 盐浴渗钨的特点	555	2. 热喷涂技术的特点	575
2. 盐浴渗钨渗剂、设备及工艺	555	3. 热喷涂常用的材料	576
9.1.5 模具零件的渗硼	556	4. 热喷涂技术的应用	576
1. 渗硼工艺的特点	556	9.3.2 模具表面的火焰喷涂	577
2. 渗硼质量的影响因素	556	1. 火焰喷涂的方法	577
3. 固体渗硼	557	2. 火焰喷涂的特点	578
4. 盐浴渗硼	559	3. 火焰喷涂的应用	578
5. 膏剂渗硼	559	9.3.3 模具表面的等离子喷涂	579
6. 真空渗硼	560	1. 等离子体的形成过程	579
7. 气体渗硼	561	2. 等离子喷涂的工作原理	579
8. 电解渗硼	561	3. 等离子弧的基本形式	580
9. 硼氮复合渗	562	4. 等离子喷涂的设备	581
10. 渗硼工艺的应用	563	5. 等离子喷涂工艺	581
9.1.6 模具零件的渗铬	564	6. 等离子喷涂的特点及应用	583
1. 固体渗铬	564	7. 等离子喷涂新技术	583
2. 盐浴渗铬	565	9.3.4 模具的金属堆焊技术	584
3. 气体渗铬	566	1. 金属堆焊的特点	584
9.1.7 电火花表面强化处理	567	2. 金属堆焊材料	584
1. 电火花表面强化处理的特点	567	3. 金属堆焊在模具中的应用	585
2. 电火花表面强化处理的原理与过程	567	9.4 模具的表面电镀强化	585
3. 电火花表面强化处理在模具制造上的应用	569	9.4.1 电镀强化技术	585
9.2 模具的表面热处理	569	1. 电镀镀层的分类	585
9.2.1 高频感应淬火	570	2. 电镀技术的基本原理	586
1. 高频感应淬火的原理	570	3. 模具电镀工艺	587
		4. 电镀工艺的应用	589
		9.4.2 模具电刷镀表面强化技术	589

1. 电刷镀的工作原理	589	9.6.1 激光表面强化技术	610
2. 电刷镀的主要设备	590	1. 激光的特点	610
3. 模具电刷镀的工艺过程	591	2. 激光与材料的关系	611
4. 电刷镀的技术特点	591	3. 激光热处理的特点	611
5. 电刷镀技术的应用	592	4. 激光热处理工艺	612
9.4.3 模具电镀合金技术	592	5. 激光表面合金化和表面涂覆	612
1. 电镀合金的特点	592	6. 激光表面强化的特点与应用	612
2. 合金共沉积的条件	592	9.6.2 电子束表面强化技术	613
3. 实现合金共沉积的方法	592	1. 电子束表面强化的特点	613
4. 电镀合金在模具中的应用	593	2. 电子束表面相变强化处理	614
9.4.4 化学镀表面强化技术	594	3. 电子束表面强化的应用	614
1. 化学镀的条件	594	9.6.3 离子注入技术	615
2. 化学镀的特点	594	1. 离子注入的特点	615
3. 化学镀在模具制造中的应用	594	2. 离子注入的工作原理	615
9.4.5 复合镀表面强化技术	595	3. 离子注入在模具工业中的 应用	616
1. 复合镀层的沉积机理	595	9.7 模具的表面形变强化	617
2. 复合镀的条件	596	1. 喷丸强化的特点	617
3. 复合镀层的性能特点	596	2. 喷丸强化工艺	617
4. 复合镀在模具中的应用	596	3. 喷丸强化的应用效果	618
9.5 模具的表面镀膜	597	9.8 稀土元素表面强化与复合 表面技术	618
9.5.1 物理气相沉积 (PVD)	598	9.8.1 稀土元素表面强化	618
1. 物理气相沉积的基本过程	598	1. 稀土元素的性质与应用	619
2. 真空蒸发镀膜	599	2. 稀土元素在模具表面强化中的 应用	619
3. 阴极溅射镀膜	600	9.8.2 复合表面技术的创新及 运用	620
4. 离子镀膜	603	1. 表面技术的创新	620
5. 物理气相沉积的特点及应用	605	2. 复合表面技术的运用	621
9.5.2 化学气相沉积 (CVD)	605	第10章 进口模具钢的性能与 应用	622
1. 化学气相沉积的特点	606	10.1 我国模具钢与国外各种工具钢 钢号对照	622
2. 化学气相沉积的原理	606	10.1.1 碳素工具钢钢号 近似对照	622
3. 化学气相沉积的应用	608	1. 我国与亚太各国以及国际标准的 碳素工具钢钢号近似对照	622
4. 物理气相沉积与化学气 相沉积比较	609	2. 我国与西欧、北欧各国以及欧	
9.5.3 等离子化学气相沉积 (PCVD)	609		
1. 等离子化学气相沉积的 工作原理	609		
2. 等离子化学气相沉积的特点	610		
3. 等离子化学气相沉积的应用	610		
9.6 模具的表面高能强化	610		

洲标准化委员会标准的碳素 工具钢钢号近似对照	623
3. 我国与东欧、中欧、南欧各国的 碳素工具钢钢号近似对照	623
10.1.2 合金工具钢钢号 近似对照	624
1. 我国与亚太各国以及国际标准的 合金工具钢钢号近似对照	624
2. 我国与西欧、北欧各国以及欧 洲标准化委员会标准的合金工具 钢钢号近似对照	625
3. 我国与东欧、中欧、南欧各 国的合金工具钢钢号 近似对照	626
10.1.3 高速工具钢钢号近似 对照	627
1. 我国与亚太各国以及国际标 准的高速工具钢钢号近似对照	627
2. 我国与西欧、北欧各国以及欧 洲标准化委员会标准的高速工具 钢钢号近似对照	628
3. 我国与东欧、中欧、南欧各国的 高速工具钢钢号近似对照	629
10.1.4 硬质合金牌号近似对照	629
10.2 国内进口模具钢的钢号、特性及 应用	630
10.2.1 进口冷作模具钢的钢号、 特性及应用	630
10.2.2 进口热作模具钢的钢号、 特性及应用	632
10.2.3 进口塑料模具钢的钢号、 特性及应用	634
10.2.4 进口高速工具钢的钢号、 特性及应用	640
10.2.5 进口硬质合金的牌号、 特性及应用	641
附录	642
附录1 模具材料常用汉英 词汇	642
附录2 黑色金属材料硬度及 强度换算	646
参考文献	649

第 1 章 模具及模具材料的分类

模具是用以限定生产对象的形状和尺寸的装置，是一种高效率的加工设备。模具性能和使用效果的好坏、使用寿命的长短，直接影响模具的工作质量和经济效益。模具材料的性能会影响模具质量、加工的难易程度和加工费用等，因此在模具设计时，除了合理的模具结构外，还应选用合适的模具材料及热处理方法，才能使模具获得良好的工作性能和长的使用寿命。

1.1 模具的分类

1.1.1 现代模具的特点

1) 模具是一种重要的工艺装备，广泛应用于机械、电子、汽车、信息、轻工、军工、交通、建材等制造领域。在我国经济发展、工业现代化和高端技术领域中起到了十分重要的支撑作用，因此，模具工业水平已经成为衡量一个国家制造业水平高低的重要标志，也是一个国家的工业产品保持国际竞争力的重要保证之一。

2) 在现代工业生产中，产品加工普遍采用模具冲压成形、锻压成形、压铸成形、挤压成形、塑料注射成型等加工方法，逐步取代或部分取代传统的切削加工成形工艺，实现少切削或无切削加工，是机械制造业中发展的一个方向。因此，模具已成为一种优质、高效、低消耗、低成本的工艺设备，为现代制造业的重要手段，在我国经济运行中对节能降耗起了重要作用，是国民经济中各工业部门发展的重要基础之一。

3) 模具技术正在向深度研究发展，如国内外的制造业采用精密冲压、精密锻造及等温超塑性成形等新技术，对模具的精度、表面粗糙度等提出了更高要求，形状更复杂、工作温度更高、服役条件更苛刻，而且更新换代速度快，加工对象也由原来的金属材料扩大到橡胶、陶瓷、玻璃、纸张等许多领域，模具需求量更大，品种繁多，这就要求不断地开发模具新材料，改进热处理工艺和表面强化技术。

1.1.2 模具的分类方法

模具分类的方法很多，根据成形材料、成形方法和成形设备不同，可分为冲压模具、压铸模具、锻造成型模具、铸造用金属模具、粉末冶金模具、玻璃制品模具、塑料成型模具、橡胶制品成型模具、陶瓷模具和经济模具等。这种分类方法虽然较为严密，但与模具材料的选用缺乏联系，常用分类方法见表 1-1。

表 1-1 模具常用的分类方法

分类方法		工作特点
按模具所加工材料的再结晶温度分	冷变形模具	变形在再结晶温度以下进行，产生加工硬化，使塑性变形抗力增大，模具承受的载荷增加。它又可分为冷冲模、冷挤压模、冷锻模、冷拔模四类。制品的精度、表面质量、生产率、力学性能均较高，材料利用率高
	热变形模具	加工坯料时，变形在再结晶温度以上，加工硬化和再结晶软化两种过程同时进行，因为加工的同时可消除加工硬化，所以塑性变形抗力较小，模具承载相应减轻，但工作温度高，受高温的影响较大。它主要分为热锻模、热锻模、热冲模、压铸模等
	温变形模具	变形在冷、热变形之间，既比冷变形温度高，降低了塑性变形抗力，减少了模具的承载，又低于再结晶温度，使制品保留了加工硬化，有较高的力学性能
按模具材料分	金属成形模具	指用碳素钢、合金钢、铸铁、硬质合金和钢结硬质合金及铜、铝、锌、钛等非铁金属及其合金为材料制造的模具工艺装备
	非金属成形模具	主要指用有机高分子材料、无机非金属材料、天然或人造金刚石和陶瓷、石膏、石蜡、型砂及复合材料等制造的模具工艺装备
按模具工作条件分	冷作模具	主要指在室温下完成对金属或非金属材料进行塑性变形加工的工艺装备，包括冷冲模、冷挤压模、冷锻模、冲裁模、弯曲模、拉深模、滚丝模、成形模等
	热作模具	必须将坯料加热到一定温度再进行加工，包括热锻模、热精锻模、热挤压模、热冲裁模、压铸模、热锻模等
	塑料模具	包括热固性塑料模（如压制成型模）和热塑性塑料模（如注射成型模、挤出成型模、压延成型模等）
按模具的成形方法分	压力成形模具	可分为锻造模具、冲压模具、挤压模具、拉拔模具、压铸模具等
	型腔模具	塑料模具、橡胶模具、陶瓷模具、玻璃模具、粉末冶金模具等
按加工对象分	加工金属的模具	包括冲模（如冲裁模、弯曲模、拉深模、翻孔模、缩孔模、起伏模、胀形模、整形模等）、锻模（如模锻模、锻锻模等）以及挤压模和压铸模等
	加工非金属和粉末冶金的模具	包括塑料模（如注射成型模、压制成型模和挤出成型模等）、橡胶模、陶瓷模、玻璃模和粉末冶金模等

1.1.3 模具的失效及影响因素

1. 模具的失效形式

模具的失效是指模具工作部分发生严重磨损或损坏而不能用一般修复方法（刃磨、抛磨等）使其重新服役的现象。其失效形式比较复杂，根据模具零件破坏的特点、所受载荷的类型以及外在条件，其主要失效形式可归纳为变形失效、断裂失效和表面损伤失效，见表 1-2。

表 1-2 模具的主要失效形式

失效类型	失效模式	失效机理
变形失效	弹性变形失效	弹性变形
	塑性变形失效	塑性变形
	翘曲变形失效	弹性变形 + 塑性变形
断裂失效	韧性断裂失效	塑性变形
	低应力断裂失效	断裂韧度
	疲劳断裂失效	疲劳
	蠕变断裂失效	蠕变断裂
	介质加速断裂失效	应力腐蚀
表面损伤失效	磨损失效	磨粒磨损 + 粘着磨损
	表面疲劳失效	疲劳
	腐蚀失效	氧化 + 电化学

2. 模具失效的影响因素

模具失效的影响因素很多，主要影响因素见表 1-3。

表 1-3 模具失效的影响因素

影 响 因 素	产 生 原 因
模具结构设计因素	模具结构包括几何形状、模具间隙、端面倾斜角、过渡角大小等，热作模具中开设冷却水路、装配结构等。不合理的模具结构可能引起严重的应力集中或过高的工作温度，缩短使用寿命
模具制造材料因素	如材料种类、化学成分、金相组织、硬度、韧性和低倍体组织等综合因素，是导致失效的重要原因。模具材料必须满足模具对塑性变形抗力、断裂抗力、疲劳抗力、硬度、耐磨性、冷热疲劳抗力等性能要求，如不能满足，在循环载荷下，则会萌发模具早期失效或引起事故
模具制造工艺因素	工件在锻造时产生夹层、冷热裂纹；焊接过程未焊透、偏析、冷热裂纹；铸造过程的疏松、夹渣；机械加工过程中的尺寸偏差和表面粗糙度不合适；热处理工艺产生缺陷，如淬火裂纹、硬度不足、回火脆性、硬化层硬度梯度过大；精加工中产生磨削裂纹等
模具安装使用因素	安装未达到要求的质量指标，例如啮合部位的间隙不合适，连接工件必要的防松零部件不可靠，铆合或焊合不牢或焊缝未进行无损检测，润滑、密封、装配不良，安装后未按规定进行逐级加载。运转工况参数（载荷、速度等）评价是否正确，检修制度是否合理、执行，润滑条件是否保证，加热、冷却是否正常等。例如，热作模具在工作之前应进行预热，中途停工应保温，以防止热应力引起开裂；有些模具使用中积累了大量内应力，应进行中间退火消除应力、提高模具的使用安全性

1.2 模具材料的分类

1.2.1 常用模具材料

制造模具及其零件的原材料很多，如钢、铸铁、非铁金属及其合金、高温合金、硬

质合金、钢结硬质合金、有机高分子材料、无机非金属材料、天然金刚石等。广义而言，像木材、陶瓷、石膏、型砂等也是制造模具的原材料。常用模具材料的分类如图 1-1 所示。

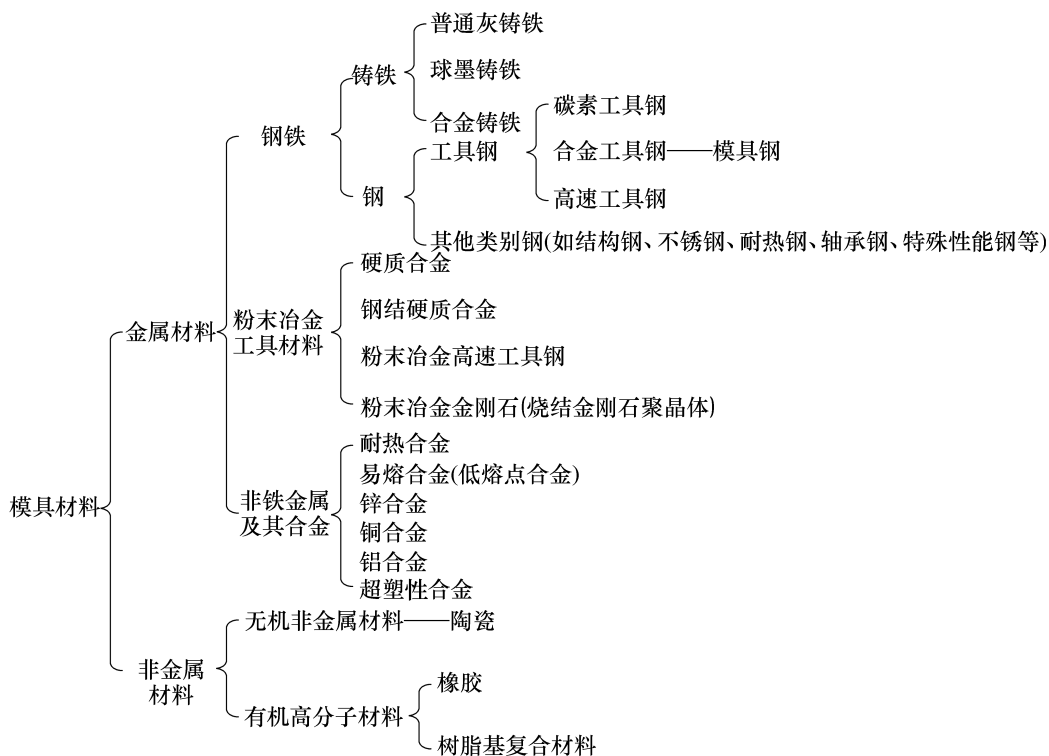


图 1-1 常用模具材料的分类

1.2.2 模具钢的分类

模具制造的原材料中，模具钢是最主要的材料。其用量大、应用面广，价廉易得，且可通过热处理来改变它的诸多性能，软硬刚韧均可采用适当工艺进行调整来满足不同的需求。由于分类的方法、目的不同或分类的依据（标准）不同，可以有不同的划分。不同国家的分类标准、习惯、结果也不尽相同。

1. 模具钢常用的分类方法

（1）按合金元素含量分

钢的分类我国已有了明确的标准，据 GB/T 13304.1—2008 和 GB/T 13304.2—2008 规定，按化学成分分类，有非合金钢、低合金钢、合金钢三类。按合金元素含量分有碳素工具钢、低合金模具钢、中合金模具钢、高合金模具钢、高碳高铬型模具钢等。按合金主加元素分为 Cr 系、Cr - Ni 系、Mo 系、Cr - Mo 系等，高速工具钢系列有 W 系、W - Mo 系、Co 系等。

(2) 按用途不同分

我国钢分为四大类，即结构钢、工具钢、特殊性能钢和专业用钢。模具其实是一种工具，主要采用工具钢类。工具钢是制造各种刀具、模具、量具、冲击工具、手工工具等的一系列高品质钢种。其中制作模具主要零件的合金工具钢属于特殊质量钢。工具钢按化学成分特点，又可分为碳素工具钢、合金工具钢和高速工具钢三大类。合金工具钢据 GB/T 1299—2000 标准，又可分为量具刀具用钢、耐冲击工具用钢、冷作模具钢、热作模具钢、塑料模具钢和无磁模具钢几个主要类别。

(3) 按热处理工艺分

可分为水淬模具钢、油淬模具钢、空冷模具钢、易切削模具钢、火焰淬火模具钢、渗碳型模具钢、预硬型模具钢、时效硬化型模具钢等。

(4) 按使用性能分

为突出钢的特性、使用性能和工艺性能，模具钢可分为高耐磨模具钢、高强韧性模具钢、高耐热性模具钢、抗冲击模具钢、耐腐蚀模具钢等。

(5) 按模具工作条件分

为了便于模具材料的选用，通常按照工作条件将模具钢分为冷作模具钢、热作模具钢和塑料模具钢三大类，如图 1-2 所示。



图 1-2 模具钢的分类

2. 模具钢的品牌

模具钢的分类通常依附于钢的分类，因此随意性很大。为了完善模具钢材料体系，规范模具材料市场，我国已开始制定有关模具钢分类的国家规范，并已付诸实施。这对一个发达的机械制造工业大国很有必要，这项工作正在逐步完善之中。

(1) 规范的模具钢品牌正在形成

1) 我国已开始实行钢铁产品及合金牌号统一数字代号体系。每一个钢号有它的钢

类归属和名称, 又有一个统一的数字代号, 如 Cr12MoV 钢的数字代号为 T21201; 5CrNiMo 钢的数字代号为 T20103; 9CrWMn 钢的数字代号为 T20110 等, 这在信息化时代是很有必要的。

2) 我国模具钢生产企业为树立自己的品牌, 有了自己企业的牌号并注册商标。如上海宝钢的非调质塑料模具钢 B20、B30 等, 商标为草书“红”字。

3) 我国模具钢研制或生产单位, 在研制时为了朗读、书写简便, 或者为了保密及其他原因, 材料均采用代号, 如 Y10、LJ、LD、GM 等。但一旦投放市场进入流通领域后, 应按照国家标准正式命名钢号。

(2) 目前模具材料市场的无序现象依然存在

1) 不规范的材料市场阻碍生产力的发展。我国模具市场模具钢的分类、命名和表示方法不规范、不遵循标准的现象比较严重, 甚至混乱, 严重地阻碍生产力的发展与科技进步。目前模具钢生产和流通中一物多名、同物异名、异物同名现象较多。有资料表明, 以常用的 4Cr5MoSiV1 钢为例, 在我国模具市场上出现有 6 种情况数十种牌号。

① 我国国家标准钢号为 4Cr5MoSiV1 钢, 行业标准钢号为 SM4Cr5MoSiV1。

② 我国模具钢生产企业的牌号为 FT413, 抚顺特殊钢股份有限公司生产的为 4Cr5MoSiV1, 上海五钢设备工程有限公司生产的为 SW(Q)4Cr5MoSiV1。

③ 我国参照国外钢种研制成的钢号为 SW(P)H13、XFH113A (雄峰牌), 相当于美国 H13 钢。

④ 国外标准钢号为 H13(AISI)、SKD61(JIS)。

⑤ 国外企业牌号为 DHAI (日本大同特殊钢公司, 等同于 4Cr5MoSiV1 钢) 和 ORVAR [瑞典乌德霍姆 (UDDEHOLM) 公司]。

⑥ 外国模具钢经销商的牌号为 8402 和 8407 [瑞典一胜百 (ASSAB) 公司的牌号]、GS-344 [蒂森克虏伯 (Siegen Krapp) 集团、德胜]、W302 (乐嘉文洋行) 等。

2) 尽快建立模具材料标准化体系。我国模具钢的分类和细分类有待进一步完善。不少专家指出, 这种不规范和混乱现象, 不利于我国模具钢的科研开发、生产应用、学术交流和国内外贸易。科研单位和生产企业研制的新钢种, 或者引进国外先进技术、采用国际标准和国外标准的新钢种, 在保证质量和生产水平的前提下, 应主动申请纳标, 以填补我国模具材料市场的空白, 不得引起牌号混乱, 影响模具新材料的推广应用, 破坏我国标准化体系的完善发展。

第2章 模具钢的性能要求

模具的工作环境和条件对模具钢的性能和内部冶金质量、生产的性价比有很高的要求。模具钢的生产方法和采用的工艺路线均与模具钢的性能和质量有密不可分的联系。国内外的冶金部门都在不断地研究新的生产方法与工艺路线，以提高模具钢的质量和性能。模具钢的质量水平一般从使用性能、工艺性能和冶金质量三个方面来评价。

2.1 模具钢的使用性能

金属材料在模具制造中获得广泛应用是由于其具有优良的性能。模具的工作条件复杂，工作温度高低不一，承受高压、冲击、振动、摩擦、弯曲和拉伸等载荷，经受着磨损、变形、疲劳、断裂的作用，因此对模具制造材料的性能要求较一般机械零件高。

2.1.1 模具钢的力学性能

1. 强度

1) 金属材料在外力作用下抵抗永久变形和断裂的能力称为强度，是衡量零件本身承载能力（即抵抗失效能力）的重要指标。模具在工作过程中承受着巨大的冲击、扭曲等载荷。尤其是随着高速冲压、高速精密锻造和液态成形等技术以及一次成形技术的发展，模具承受着更大的载荷。往往由于钢材的强度不够，造成型腔边缘或局部塌陷、崩刃或裂开等早期失效。因此模具在成形及热处理后应具有较高的强度，这是模具零部件首先应满足的基本要求。

2) 反映冷作模具材料的断裂抗力指标是室温下的抗拉强度、抗压强度和抗弯强度等。冷作模具钢的塑性变形抗力主要是指常温下的屈服强度。为确保模具在使用过程中不发生过量塑性变形而失效，模具材料的屈服强度必须大于模具的工作应力。

3) 热作模具的工作对象是高温软化状态的坯料，故所受的工作应力要比冷作模具小得多。但热作模具与高温坯料接触的部分会受热而软化，因此模具的表面层需要有足够的高温强度，在工作温度下能保持模具形状和尺寸的稳定性。

4) 影响强度的因素很多，钢的碳含量、晶粒大小、金相组织，碳化物的类型、形状、大小及分布，残留奥氏体量、内应力状态等都对强度有显著影响。因此，根据使用条件合理地选择模具材料的化学成分、组织状态和适当的热处理工艺，能获得最佳的强度、硬度和韧性配合。

2. 硬度

1) 硬度是衡量材料软硬程度的性能指标。它是表征材料的弹性、塑性、形变强化率、强度和韧性等一系列不同物理量组合的一种综合性能指标。另一方面，因为要直接

测得实际模具零件的各种力学性能指标较困难,所以一般是利用硬度和强度之间存在的一定关系,通过硬度来间接地表征材料的强度、塑性、韧性、疲劳抗力和耐磨性等性能。

2) 作为成形用的模具(尤其是高精度模具),一般应有较高的硬度,才能确保其使用性能。冷作模具的硬度一般选择在 58 ~ 60HRC;而热作模具尤其是要求具有高的抗热疲劳性能的模具,通常硬度在 45 ~ 50HRC;普通的塑料模具,一般硬度要求在 35HRC 左右。多数热作模具和某些冷作模具以及塑料模具,常常还要求具有较高的热硬性,即在高温条件下,保持组织和性能稳定的能力,这是热作模具和重载冷作模具的重要性能指标,一般要求在 500 ~ 600℃ 条件下,仍然保持足够的硬度。

3) 钢的硬度是最基本的性能,其大小主要取决于钢的化学成分和组织。例如,钢的淬火硬度取决于碳含量,而合金元素的影响不大。

4) 最常用的硬度试验法是布氏硬度试验法、洛氏硬度试验法和维氏硬度试验法。

① 布氏硬度试验数据准确、稳定,但测试较麻烦;因压痕大,不宜测试薄件或成品件;因球形压头会产生变形或损坏,不宜测试硬度高的材料。主要用来测定铸铁、非铁金属以及经退火、正火调质处理的钢材的硬度。

② 洛氏硬度试验是最常用的一种方法,操作简便、迅速、压痕小、可测试成品表面及较硬、较薄的工件。因压痕小,对于组织和硬度不均匀的材料,硬度值波动较大,准确性不如布氏硬度高。常用于测定钢铁、非铁金属、硬质合金等材料的硬度。

③ 维氏硬度试验法因试验力小(常用 49.03N)、压痕浅、轮廓清晰、数值准确、试验力选择范围大(49.03 ~ 980.7N),所以可测量从很软到很硬材料的硬度,其硬度值能直接进行比较。常用来测试薄片材料、金属镀层及零件表面硬化层的硬度。但维氏硬度测试较麻烦,不宜用于成批生产的常规检验。

各种硬度试验法测得的硬度值不能进行直接比较,必须通过硬度换算表换算成同一种硬度值后,方能比较硬度高低,参见附录 2、附录 3。

3. 塑性

塑性是材料在某种给定载荷下产生不可逆永久变形的能力。对于大多数的工程材料,当其应力低于比例极限(弹性极限)时,应力-应变关系是线性的,表现为弹性行为,也就是说,当移走载荷时,其应变也完全消失。而当应力超过弹性极限后,发生的变形包括弹性变形和塑性变形两部分,塑性变形不可逆。常用的评价金属材料塑性的指标有断后伸长率(延伸率)和断面收缩率。

(1) 断后伸长率

断后伸长率是指拉伸试样拉伸变形和拉断后标距的伸长与原始标距的长度百分比,用符号 A 表示。断后伸长率数值越大,表明钢材塑性越好。热作模具的塑性明显高于冷作模具的塑性。

(2) 断面收缩率

断面收缩率是指拉伸试样拉断后,缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的

百分比,用符号 Z 表示。塑性材料有明显的缩颈,说明塑性好,而脆性材料没有缩颈产生或很少产生缩颈,说明塑性差。

材料的 A 与 Z 的数值越大,表示材料塑性越好,可用锻压、挤压等压力加工方法成形,模具使用中稍有超载,也会因其塑性变形而不致突然断裂,提高了材料使用的安全可靠性能。

4. 韧性

韧性是指金属在断裂前吸收变形能量的能力,反映了模具材料的脆断抗力。韧性的判据通过冲击试验来测定。常以冲击吸收能量或冲击韧度 a_K 来评定。

1) 对于受强烈冲击载荷的模具,如冷作模具的冲头、锤用热锻模具、冷锻模具、热锻模具等,制造模具材料的韧性是十分重要的因素,它是模具钢的一个重要性能指标。材料的韧性越高,脆断危险性越小,热疲劳强度也越高。

2) 模具零件在实际使用中,很少受一次大能量冲击而破坏,一般是受多次小能量重复冲击后才破坏的。金属材料抵抗小能量多次冲击的能力称为多冲抗力。多冲抗力可用一定冲击能量下冲断周次 N 表示。试验证明,材料的多冲抗力取决于材料强度与韧性的综合力学性能,冲击能量高时,主要决定于材料的韧性;冲击能量低时,主要决定于强度。

3) 模具材料的化学成分、晶粒度、碳化物,夹杂物的组成、数量、形态、尺寸和分布情况,金相组织以及微观偏析等都会对材料的韧性带来影响。模具材料的韧性往往和耐磨性、硬度是互相矛盾的。因此,应根据模具的具体工作情况选择合适的模具材料,并采用合理的热加工和热处理、表面强化工艺使模具材料得到耐磨性和韧性等综合力学性能。

5. 疲劳强度

1) 模具是在大小和方向变化的应力循环作用下工作的,承受着机械冲击的交变载荷。零件在循环应力作用下,常在远小于该材料的抗拉强度甚至小于屈服强度的情况下发生断裂。零件在循环应力作用下,在一处或几处产生局部永久积累损伤,经一定循环次数后产生裂纹或突然发生完全断裂的过程,称为金属疲劳。由于疲劳断裂前无明显的塑性变形,断裂是突然发生的,危险性很大。

2) 材料能承受的交变应力(σ)与断裂应力循环次数 N 之间的关系曲线,称为疲劳曲线。材料经 N 次循环应力作用而不断裂的最高应力值称为疲劳强度。光滑试样对称弯曲疲劳强度用 σ_{-1} 表示。在工程上,疲劳强度是指在一定的应力循环次数下不发生断裂的最大应力。一般钢铁材料的应力循环次数取 10^7 ,非铁金属取 10^8 。疲劳强度在专门的疲劳试验机上测定。

3) 金属疲劳强度的影响因素很多,如钢的化学成分、钢材的冶金缺陷、模具的表面质量、受力状态及周围介质等。因此,注重模具材料的选择、合理设计模具结构避免应力集中、降低表面粗糙度值(进行表面滚压、喷丸处理)、进行表面热处理等,可以提高模具的疲劳强度。

2.1.2 模具钢的物理化学性能

1. 耐磨性

1) 零件成形时材料与模具型腔表面产生相对运动, 型腔表面产生了磨损, 使模具的尺寸精度、形状和表面粗糙度发生了变化而失效。在模具中常遇到的磨损形式有磨料磨损、粘着磨损和疲劳磨损等。

2) 磨损是一种复杂的过程, 影响因素很多, 除取决于模具的外部条件外, 还在很大程度上决定于所采用模具钢的化学成分均匀性、组织状态和力学性能等。因此, 为了改善模具材料的耐磨性, 就要采取合理的加工工艺和热处理工艺, 既使模具材料具有高硬度, 又使材料中的碳化物等硬化相的组成、形貌分布合理。当然模具工作过程中的润滑情况和模具材料的表面强化处理, 也对改善模具的耐磨性能有很大的影响。

2. 粘着性

模具零件的表面由于两金属原子相互扩散或单相扩散的作用, 往往会有一些被加工金属微粒粘附着, 从而使一些切削、剪切工具和冲压工具的表面产生粘附或结疤现象。这会影响到刃口的锋利程度和导致局部组织、化学成分的改变, 使刃口部分崩裂或粘附金属的脱落划伤模具, 使工件表面粗糙。粘着性与材料及工作条件有关, 例如高速工具钢易产生粘着, 模具工作时润滑不良, 也易产生粘着。

3. 耐热性能

冷作模具在强烈摩擦时, 局部的温升可达 400°C 以上 (冷挤压模)。而热作模具对加热到高温的固体或液体材料进行加工时, 模具的温度升得更高, 例如压铸模可达 $300 \sim 1000^{\circ}\text{C}$, 热挤压模可达 $800 \sim 850^{\circ}\text{C}$, 锤锻模可达 $500 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 。由于经常受到高温作用, 因此要求模具材料有一定的耐热性能。耐热性能包括以下两个方面。

(1) 热稳定性

热稳定性表示钢在受热过程中保持金相组织和性能稳定的能力。通常钢的热稳定性用回火保温 4h、硬度降到 45HRC 时的最高加热温度表示。这种方法与材料的原始硬度有关。对于因耐热不足而堆积、塌陷失效的热作模具, 可以根据热稳定性预测模具的寿命水平。

(2) 耐回火性

耐回火性指随回火温度升高, 模具材料的强度和硬度下降快慢的程度, 也称回火抗力或抗回火软化能力。通常以钢的回火温度 - 硬度曲线来表示, 硬度下降慢, 则表示耐回火性高或回火抗力大。耐回火性也是与回火时组织变化相联系的, 它与钢的热稳定性共同表示钢在高温下的组织稳定程度, 表示模具在高温下的变形抗力。

4. 脱碳敏感性

模具钢在锻造、退火或淬火时, 在无保护气氛下加热, 其表面会产生氧化脱碳等缺陷, 这会改变模具的性能, 影响模具的硬度、耐磨性和使用寿命, 导致模具早期失效。

模具脱碳除了与热处理工艺、设备有关外, 就材料本身而言, 主要取决于钢的化学成分、特别是碳含量, 在含有较高的硅、钼等元素时, 也会加剧脱碳。因此有些钼含量

高的模具钢，由于容易氧化、脱碳，应采用特种热处理工艺，如真空热处理、可控气氛热处理、盐浴热处理等，防止氧化、脱碳。

5. 耐腐蚀性

模具特别是塑料模和压铸模在工作时受到被加工材料的腐蚀，会加剧型腔表面磨损，所以这些模具材料应具有相应的耐蚀性。合金化或进行表面处理（如渗氮、电镀等）是提高模具零件耐蚀性的主要方法。

6. 镜面性

塑料制品的表面粗糙度主要取决于模具型腔的表面粗糙度。一般塑料模型腔的表面粗糙度 Ra 值为 $0.08 \sim 0.16 \mu\text{m}$ ，当 Ra 值低于 $0.5 \mu\text{m}$ 时可呈镜面光泽。用于透明塑料制品的模具，大都对模具材料的抛光性能要求很高，甚至有些模具要求超镜面性。低的表面粗糙度值可保证生产率及制品的质量，可以减轻腐蚀，减小开裂的倾向，提高模具的使用寿命。

7. 蚀刻性

1) 模具蚀刻又称蚀纹、咬花、晒纹、烂纹、烂花，是将材料通过化学反应或物理撞击作用而移除的技术，分为湿蚀刻和干蚀刻两类。有幼纹、细纹、粗纹、皮纹等纹路粗细种类，常用于模具零件精密蚀刻产品的加工。特别在塑料模具上，蚀刻更是不可或缺的技术，如汽车、摩擦车、空调、冰箱等的蚀纹及电器外壳各类花纹滚筒咬花。

2) 要获得精细蚀刻的高质量塑料模皮纹、木纹、布纹、立体纹，其关键因素就是确保材料表面的化学成分、组织结构、硬度及碳化物分布均匀性。钢中不能含有未变形的大的氧化物夹杂或偏析，因而必须严格控制冶炼和脱氧工艺。真空电弧重熔、电渣重熔能减少氧化物夹杂或偏析，可以改变夹杂物类型，提高模具钢的蚀刻性。

2.2 模具钢的工艺性能

在模具的总成本中，特别是小型精密复杂模具，模具材料费用往往只占总成本的 $10\% \sim 20\%$ ，有时甚至低于 10% ，而机械加工、热加工、热处理及表面处理、装配、管理等费用要占总成本的 80% 以上，所以模具材料的工艺性能就成为影响模具成本的一个重要因素，也是提高模具质量和使用寿命的关键。模具材料在工艺性能方面的要求主要在如下方面。

2.2.1 冷加工工艺性能

冷加工工艺性能主要包括切削、冷挤压、磨削、抛光、冷拉等工艺性能。模具零件有时要求有很高的表面质量、低的表面粗糙度值和良好的抛光性能。这些性能取决于钢的化学成分、冶金生产的内部质量和热处理后的组织。这就对钢材的质量有更高的要求，要求模具钢杂质少、组织均匀、无纤维方向等。并通过采取一些措施，改善钢的成形性能，降低模具的制造成本。

1. 切削加工性能

1) 切削加工金属材料的难易程度称为切削加工性能。一般由工件切削后的表面粗糙度及刀具寿命等方面来衡量。影响切削加工性能的因素主要有工件的化学成分、组织状态、硬度、塑性等。铸铁比钢切削加工性能好，一般碳素钢比高合金钢切削加工性能好。

2) 为了改善模具钢的切削加工性能和磨削性能，在模具钢精炼的后期对钢液进行变质处理，通过加入变质剂（如 Si、Ca、稀土元素等），形成富钙硫化物或稀土硫化物，使硫化物球化，抑制了硫对钢力学性能的不利影响，保留和发挥了其对钢切削加工性能和磨削性能的有利影响。

3) 有些模具钢，如高钒高速工具钢、高钒高合金模具钢的磨削性能很差、磨削比很低，不便于磨削加工。采用粉末冶金生产，可以使钢中的碳化物细小、均匀，完全消除了普通工艺生产的高钒模具钢中的大颗粒碳化物，不但使这类钢的磨削性能大为改善，而且改善了钢的塑性、韧性等性能。

2. 抛光性能

当模具要求很低的表面粗糙度值时，如要求镜面抛光的塑料模具和一些冷作模具，就要求选用通过精炼得到的高纯净度钢材，以适应镜面抛光的要求。钢材中任何未闭合的孔洞都会影响其抛光性能，在热加工中压合疏松等冶金缺陷并保持组织的致密是十分必要的。因此，在抛光前，必须通过现代的成形加工技术对材料进行处理，例如反复锻造技术、旋转锻造技术、高温等静压工艺等可细化原始铸态组织，减少树枝晶内空隙。电渣重熔、真空电弧重熔精炼工艺，对钢材的均匀性十分有利。在热处理和表面硬化中应尽量避免硬度不均匀的脱碳，保证良好的抛光性能。

3. 冷挤压成形

为了简化工艺，提高模具的制造效率，对批量生产的模具，可以采用冷挤压工艺压制型腔，即用淬硬的凸模将模具的型腔直接压制出来。这就要求模具材料具有良好的冷变形性能，如塑料模具中的低碳钢、低硅钢就具有良好的冷变形性能。

2.2.2 热加工工艺性能

热加工包括锻造、铸造、焊接等。热加工工艺性能包括热塑性和热加工温度范围等。根据模具制造工艺的不同可提出不同加工性能要求，这些性能受模具材料的化学成分、冶金质量、组织状态等因素的影响。在生产过程中必须严格控制热加工的工艺参数。

1. 可锻性

金属材料用锻压加工方法成形的适应能力称为可锻性。可锻性主要取决于金属材料的塑性和变形抗力。塑性越好，变形抗力越小，金属的可锻性越好。铜合金和铝合金在室温状态下就有良好的可锻性。碳素钢在加热状态下可锻性较好。其中低碳钢最好，中碳钢次之，高碳钢较差。低合金钢的可锻性接近于中碳钢，高合金钢的较差。铸铁可锻性差，不能锻造。

锻造不仅减小了模具材料的机械加工余量、节约钢材，而且改善了模具材料的内部组织缺陷，如碳化物偏析等，所以锻造质量的好坏直接影响模具的质量。

2. 铸造工艺性能

为了简化生产工艺，近年国内致力于发展采用铸造工艺生产出接近模具形状的铸造毛坯的技术。如我国已经研究采用铸造工艺，生产一些冷作模具、热作模具和玻璃成形模具，并相应地研发了一些铸造模具钢。这类材料要求具有良好的铸造性能，如流动性、收缩率等。

1) 流动性：熔融金属的流动能力称为流动性。流动性好的金属容易充满铸型，从而获得外形完整、尺寸精确、轮廓清晰的铸件。

2) 收缩性：铸件在凝固和冷却过程中，其体积和尺寸减小的现象称为收缩。铸件收缩不仅影响尺寸，还会使铸件产生缩孔、疏松、内应力、变形和开裂等缺陷。故铸造用金属材料的收缩率越小越好。

3) 偏析：金属凝固后，铸锭或铸件化学成分和组织的不均匀现象称为偏析。偏析大，会使铸件各部分的力学性能有很大的差异，降低铸件的质量。

几种金属材料铸造性能的比较见表 2-1。

表 2-1 几种金属材料铸造性能的比较

材料	流动性	收缩性		偏析倾向	其他
		体收缩	线收缩		
灰铸铁	好	小	小	小	铸造内应力小
球墨铸铁	稍差	大	小	小	易形成缩孔、疏松，白口化倾向小
铸钢	差	大	大	大	易发生冷裂
铸造黄铜	好	小	较小	较小	易形成集中缩孔
铸造铝合金	尚好	小	小	较大	易吸气、易氧化

3. 焊接性

有些模具要求在工作条件最苛刻部分堆焊上特种耐磨和耐蚀材料，有些模具希望在使用过程中采用堆焊工艺进行修复后能够重新使用，这些模具就要选用焊接性好的模具材料，以简化焊接工艺。焊接性好可以避免焊前预热和焊后处理工艺。为了更好地适应焊接工艺的需要，相应地发展了一些焊接性良好的模具材料。

2.2.3 热处理工艺性能

热处理工艺性能实际上也是一种热加工工艺性能。在模具早期失效的案例中，热处理不当造成的失效占总失效的 40% 左右。热处理工艺性能的好坏对模具的质量有较大影响，它要求材料热处理后有足够的淬硬性和淬透性，而且变形小、淬火温度范围宽、过热敏感性小、脱碳敏感性低等。

1. 淬硬性和淬透性

淬硬性主要取决于钢的碳含量，淬透性主要取决于钢的化学成分、合金元素含量和淬火前的组织状态。模具对两种性能的要求根据工作条件的不同是各有侧重的。对于大部分冷作模具（要求高硬度），淬硬性要求较高；对于大部分要求整个截面的硬度均匀性高的热作模具如锤锻模具和塑料模具，为了使模具的心部也能得到良好的组织和均匀的硬度，就要选用淬透性好的模具钢；另外对于形状复杂，要求精度高、硬度高又容易产生热处理变形的模具钢，为了减少其热处理变形，往往采用冷却能力弱的淬火冷却介质（如油冷、空冷、加压淬火或盐浴等温淬火等），这就需要采用淬透性好的模具材料，以得到满意的淬火硬度和淬硬层深度而且变形量较小。

2. 淬火变形和开裂倾向

模具在热处理时要求其变形程度要小，特别是一些形状复杂的精密模具，淬火后难以修整，更要求淬火、回火后的变形小。模具零件的淬火开裂倾向与模具材料的成分、原始组织状态、零件几何形状以及热处理工艺有很大关系。一般选用微变形模具钢。

2.3 模具钢的冶金质量控制

2.3.1 模具钢的冶金质量标准

高的冶金质量才能发挥钢的基本特性，冶金质量高的钢才能生产高质量的模具。模具钢的内部冶金质量与它的基本性能具有同等的重要意义，在研究模具钢基本性能时，必须研究冶金质量影响因素。一般模具钢的内在冶金质量问题有如下方面。

1. 化学成分的均匀性与偏析

1) 模具钢通常是含有多种元素的合金钢，钢在锭模中从液态凝固时，由于选向结晶的缘故，钢液中各种元素在凝固的结构中分布不均匀而产生偏析，这种化学成分的偏析将造成组织和性能的差异，它是影响模具钢质量的重要因素之一。因此降低钢的偏析度可有效地提高钢的性能。近年来，国内外一些冶金企业都在致力于研究和生产成分均匀、组织细化的模具钢材。

2) 偏析是钢的成分与组织不均匀性的表现，是模具钢低倍组织检验中常存在的一种缺陷。偏析是钢锭在凝固过程中形成的，与钢的化学成分和浇注温度等有关。一般分为树枝状偏析、方形偏析、点状偏析或区域偏析、密度偏析等。

① 树枝状偏析是合金元素在枝晶臂上不均匀的分布。当液态金属进入锭模后，锭模的温度升高，液态金属的冷却速度降低，过冷度减小，形核速率降低，但此时长大速率受到的影响较小，优先长大方向与散热最快方向（向外垂直模壁方向）向液体内部平行长大形成柱状晶。由于液态金属中溶质元素含量高于先形成的树枝状晶，所以造成枝晶偏析。枝晶间距越大，元素的偏析程度越大。树枝状偏析的存在，使钢在各个不同方向的力学性能表现出明显的差异。

② 方形偏析是由于铸锭结晶时，在柱状晶的末端与锭心等轴晶区之间，聚集了较

多的杂质和孔隙而形成的。严重的方形偏析，对钢材质量的影响是显著的，特别是切削加工量很大的零件或心部受力的模具零件。偏析除了影响模具钢力学性能的等向性外，对模具的抛光性能也有一定的影响。因此，国外相关的标准中对偏析有严格的规定。

③ 点状偏析是钢中较为常见的一种低倍缺陷，点状偏析是由于结晶条件不良，钢液在凝固过程中冷却较慢产生的成分偏析，是钢中大量气体在黏稠钢液中枝晶间富集低熔点组元和夹杂的糊状钢液回填而成的。气体与夹杂物含量较高，呈现不同形状和大小的暗色斑点。如果斑点分散在整个截面上，则称为一般点状偏析；如果斑点集中在边缘，则称为边缘点状偏析。点状偏析易引起钢材的脆断。

④ 区域性偏析是在较大范围内化学成分不均匀的现象。这种偏析与浇注温度、浇注速度等有关，一旦出现，退火无法将该情况消除，因此应尽量避免。

⑤ 密度偏析是合金凝固时析出的初晶与余下的液体存在较大的密度差，最终导致材料出现分层、化学成分不均匀的情况。可采用降低浇注温度、加大冷却速度、加入微量元素等方法防止。

2. 有害元素硫和磷含量

1) 硫和磷在凝固过程中形成硫化物和磷化物而在晶界沉淀，因而产生晶界脆性，使钢的塑性降低。硫以硫化铁（FeS）存在于钢中，FeS 与 Fe 形成低熔点的共晶体（熔点只有 985℃），分布在奥氏体晶界上，当钢加热到 1100 ~ 1200℃ 进行热压力加工时，晶界处共晶体熔化，晶粒间结合被破坏，使钢在加工过程中沿晶界开裂，使钢变得极脆（称为热脆）。磷能全部溶解于铁素体中，可提高钢的强度、硬度，但会使钢的塑性、韧性显著降低，在低温时变脆（称为冷脆）。

2) 过高的硫、磷含量，会使钢在轧制和加工使用时产生裂纹，并大大降低钢的力学性能。据资料报道，日本的松田幸纪等研究了 S、P 含量对 $w_{Cr} = 5\%$ 的热作模具钢（H13）的韧性和热疲劳性能的影响，结果表明，如将 w_p 、 w_s 分别从 0.025% 和 0.010% 降到 $w_p = 0.005\%$ 、 $w_s = 0.001\%$ 时，其热疲劳裂纹的长度和数量将减少一半。日立金属公司将 SKD61 钢中的 w_p 从 0.03% 降到 0.001% 时，可使钢在 45HRC 时的冲击韧度由 39.2J/cm² 提高到 127.5J/cm²。此外，降低钢中的 S、P 含量还可以有效地提高钢的等向性。

3. 钢中非金属夹杂物

1) 质量优良的模具钢中的非金属夹杂物的含量要尽可能的少。钢中常见的非金属夹杂物主要有氧化物、硫化物、氮化物及这些夹杂物的复合产物。通常是指铁及合金元素与氧、硫、氮等作用所形成的化合物，如 FeO、MnO、Al₂O₃、SiO₂、FeS、MnS、AlN、VN 等，以及在炼钢的浇注时带入的耐火材料，后者的成分也主要是 Si、Al、Fe、Cr、Ca、Mg 等的氧化物。钢中的非金属夹杂物按其来源，可以分为内在夹杂物和外来夹杂物，外来夹杂物是从原材料中附带进来的，内在夹杂物是钢在液态及凝固过程中形成的化合物。

2) 这些非金属夹杂物虽然在钢中所占的体积很小，但对钢的性能影响很大。不仅性脆，而且与基体（铁素体）的结合力很弱，破坏了基体组织的连续性，使钢的冷、

热加工性能及某些物理、化学性能变坏。它们都会降低钢的力学性能，特别是降低钢的塑性、韧性及疲劳强度。钢中的非金属夹杂物在某种意义上来说可以视为一定尺寸的裂纹，它破坏了金属组织的连续性，引起应力集中，在外界应力的作用下，裂纹延伸很容易发展扩大而导致性能降低。塑性夹杂物随着锻轧过程延展变形，致使钢材产生各向异性。同时夹杂物抛光过程中的剥落，增大了模具的表面粗糙度值。因此对于大型和重要的模具来说，提高钢的纯净度是十分重要的。

4. 碳化物的不均匀度

1) 碳化物是钢的必然组分，除可溶于奥氏体的碳化物外，还会有部分不能溶于奥氏体的残留碳化物。碳化物的尺寸、形状、分布对模具钢的性能有十分重要的影响，且与钢的冶炼方法、钢锭的凝固条件以及热加工变形条件等有关。过共析钢的碳化物可能在晶界形成网状碳化物或是在加工变形中被拉长而形成带状碳化物或二者兼之；莱氏体模具钢中，存在一次碳化物和二次碳化物，在热变形的过程中，网状的共晶碳化物大多可以破碎，碳化物先沿变形方向延伸，产生带状，随着变形程度的增加，碳化物变得均匀、细小，从而提高综合力学性能。

2) 碳化物的不均匀性可引起淬火变形、开裂，会降低钢材的使用性能。碳化物偏析严重时，对模具的使用寿命产生极大影响。莱氏体钢的尺寸越大，碳化物的不均匀度越严重，在淬火后，力学性能更差，其中横向性能下降最多，抗弯强度为纵向的 1/2。碳化物的不均匀度对重载和带尖齿的模具的寿命影响极大。例如，用 Cr12MoV 钢制搓丝板，如碳化物的不均匀度为 5~6 级，使用寿命很短；采用 Cr12MoV 钢制造 M12 六角头螺栓切边模，锻后碳化物不均匀度为 1 级时，模具使用寿命为 2 万次；碳化物不均匀度为 1.5~2 级时，模具使用寿命为 1.1 万次；碳化物不均匀度为 3 级时，模具使用寿命只有 0.1 万次。因此，需把改善碳化物不均匀度作为挖掘高碳高合金模具钢材料潜力的重大技术措施。这需要通过提高冶金质量和规范锻造、热处理工艺三方面共同来实现。Cr12 钢中碳化物偏析对冲击韧度的影响见表 2-2。

表 2-2 Cr12 钢中碳化物偏析对冲击韧度的影响

碳化物不均匀度的等级	无缺口冲击韧度 a_K / (J/cm ²)			
	1	2	3	平均值
2 级	24.5	35.8	37.2	32.5
4 级	27.0	30.5	31.9	29.6
6 级	19.9	20.2	20.2	20.7

注：试样尺寸 10mm × 10mm × 55mm，1025℃ 淬火，250℃ 回火，硬度 58~60HRC。

5. 钢中的氧含量

模具钢一般都未规定钢中允许的气体含量。随着氧含量的增加，氧化物的颗粒尺寸和数量都随之增加，钢的疲劳性能降低，热裂纹也容易产生。根据对 4Cr5MoSiV1 钢进行试验的资料表明，氧的体积分数最好不超过 1.5×10^{-5} 。如日本山阳特殊钢公司规定高纯净度钢氧的体积分数不大于 1.0×10^{-5} 。因此，近年来，为了提高模具的制造质量，

国内外的模具钢逐渐在向低氧含量的方向发展。

6. 疏松与白点

(1) 疏松是钢不致密性的表现

1) 疏松是钢的组织不致密性的表现, 是钢坯中一种常见的缺陷。疏松多数出现在钢锭的上部及中部, 因为是在这些区域集中了较多的杂质和气体造成的。疏松缺陷的存在, 降低了钢的强度和韧性, 也严重地影响了加工后的表面粗糙度。

2) 在一般的模具钢中影响不是特别大, 但对冷轧辊、大型模块、冲头和塑料成型模具零件等都有较严格的要求。如深型腔的锻模和冲头要求疏松不超过1级或2级, 用于表盘或透光件等的塑料模具用钢, 要求疏松不超过1级。

(2) 白点是热轧钢坯和大型锻件中常见的缺陷

1) 产生白点的主要原因是钢中含有过量的氢, 在较快的冷却速度下, 在钢的局部区域(如位错、亚晶界等)发生氢原子的偏聚, 使这些区域完全脆化。当这些脆化区中的氢原子转变为氢分子时产生的压力以及由于相变而引起的组织应力, 超过金属原子之间的结合力时, 就在钢中形成银亮白色粗晶状的圆形或椭圆形的斑点。

2) 白点的存在对钢的性能有极为不利的影响, 主要表现在使钢的力学性能降低, 热处理时工件淬火开裂, 或在使用时发展成为更严重的破坏事故。因此, 白点是钢中不允许存在的缺陷, 在炼钢时一定要注意脱气和加强大锻件的锻后缓冷或预防白点退火。

3) 不同的钢对白点的敏感程度不同, 一般易发生白点的钢有铬钢、铬钼钢、锰钢、锰钼钢、铬镍钼钢、铬钨钢等。其中, $w_{Cr} > 1\%$ 、 $w_{Ni} > 2.5\%$ 的马氏体铬镍钢及铬镍钼钢对白点敏感性最大。5CrNiMo、5CrMnMo 钢最容易发生白点, 增加碳化物形成元素 Cr、Mo、V 后可以降低白点的敏感性。

2.3.2 国内外合金模具钢技术标准比较

目前, 我国的合金工具钢已形成了比较完整的标准系列。现行的国家标准 GB/T 1299—2000, 是在 GB/T 1299—1985 国家标准的基础上, 主要参照了美国 ASTM A681—1994 合金工具钢标准进行修订的。

1. 钢号系列

在 GB/T 1299—2000 标准中, 共纳入合金工具钢 37 个钢号, 其中冷作模具钢 11 个, 热作模具钢 12 个, 塑料模具钢 2 个, 无磁模具钢 1 个, 量具刃具用钢 6 个, 耐冲击工具用钢 5 个。与美国的 ASTM A681—1994 标准相比, 美国的合金工具钢牌号共 57 个, 系列比较完整, 我国有 14 个比较通用的钢号与之相对应。

2. 化学成分

成品的化学成分偏差只有我国与日本的标准有规定。尤其规定残余 Cu 质量分数应不大于 0.30%, Cu + Ni 质量分数应不大于 0.55%。对钢的有害元素的规定, 日本的标准规定较严, 我国与美国标准规定相类似, 比德国的标准规定严格。

3. 低倍组织

在标准中规定, 低倍组织为必检项目。标准规定, 钢材应检验低倍组织, 在酸浸低

倍试片上不得有目视可见的缩孔、夹杂、分层、裂纹、气泡和白点。中心疏松及锭型偏析应按 GB/T 1299—2000 标准第三级别图评定，并符合表 2-3 规定。

表 2-3 GB/T 1299—2000 标准中规定的低倍组织合格级别

钢材直径/mm	一组		二组	
	中心疏松/级	锭型偏析/级	中心疏松/级	锭型偏析/级
	不大于			
≤50	4.0	6.0	3.0	6.0
>50 ~ 75	4.5	6.0	3.5	6.0
>75 ~ 100	4.5	6.0	4.5	6.0
>100 ~ 125	5.0	6.0	4.5	6.0
>125 ~ 155	5.0	6.0	5.0	6.0
>155	供需双方协商			

注：1. 一组指的钢序号为 1-1~1-6、2-1~2-3、3-4~3-8、3-11、4-1~4-2、4-7~4-12、6-1~6-2，其余为二组。分组参见表 2-6 序号。

2. 上述标准中的指标比国外同类标准低，实际上近些年来生产模具钢的冶金实际质量水平已经大大超过此级别的规定，并且制定了相应的企业内控标准，用户也提出了更高的要求。

4. 脱碳

1) 中国、美国、日本都将脱碳列为必检项目，德国只有脱碳的检验方法，但没有作规定。我国标准规定对脱碳层深度采用线性公式，美国标准和日本标准都是按钢材截面尺寸分组距作出不同规定，显然我国所用线性公式较为科学合理。

2) 我国 GB/T 1299—2000 对脱碳层的规定见表 2-4。热轧和锻制钢材一边总脱碳层（铁素体+过渡层）应符合规定。根据需方的要求，可以双方协商，在合同中说明可按 I 组供应。

表 2-4 GB/T 1299—2000 对脱碳层的规定

钢材直径或边长/mm	总脱碳层深度 ≤	
	I 组	II 组
5 ~ 150	$0.25 + 1\% D$	$0.20 + 2\% D$

注：D 为钢材截面公称尺寸。

3) 冷拉钢材一边总脱碳层，除含硅合金钢外应不大于其公称尺寸的 1.5%，含硅合金钢不应大于其公称尺寸的 2%。银亮钢表面不允许有脱碳层。扁钢和直径（边长）大于 150mm 的钢材的总脱碳层按供需双方协议。

5. 高倍组织

GB/T 1299—2000 标准中规定了珠光体组织、网状碳化物和共晶碳化物不均匀度三套金相评级标准与合格级别。美国标准未作规定，日本与德国标准将此作为双方协议项目。我国 GB/T 1299—2000 标准规定对珠光体组织、网状碳化物、共晶碳化物不均匀度进行检验。

(1) 珠光体组织

退火状态交货的 9SiCr、Cr2、CrWMn、9CrWMn、Cr06、W 和 9Cr2 钢应检验珠光体组织，并按 GB/T 1299—2000 标准所附第一级别图评定，合格级别为 1~5 级。制造螺纹刀具用的 9SiCr 退火钢材，其珠光体组织合格级别为 2~4 级。

(2) 网状碳化物

退火状态交货的 CrWMn、Cr2、Cr06 和 9SiCr 等钢应检验网状碳化物，并按 GB/T 1299—2000 标准所附第二级别图评定。截面尺寸不大于 60mm 的 CrWMn、Cr2、Cr06 和 9SiCr 钢材，其合格级别不大于 3 级。制造螺纹刀具用的尺寸不大于 60mm 的 9SiCr 钢材，其网状碳化物的合格级别为不大于 2 级。

(3) 共晶碳化物

退火状态交货的 Cr12、Cr12MoV、Cr12Mo1V1、6W6Mo5Cr4V 和 6Cr4W3Mo2VNb 钢应检验共晶碳化物不均匀度，并按 GB/T 14979 标准的第四评级图评定，其合格级别应符合表 2-5 的规定。

表 2-5 GB/T 1299—2000 标准中对共晶碳化物合格级别的规定

钢材直径或边长/mm	共晶碳化物不均匀度合格级别/级 不大于	
	I 组	II 组
≤50	3	4
>50 ~ 70	4	5
>70 ~ 120	5	6
>120	6	协议

6. 交货状态及硬度

除了美国标准规定交货状态为退火、淬火或回火外，其他工业先进国家的标准规定以退火状态交货。但是，在塑料模具钢方面用户已经要求以预硬化状态交货。模块要求以六面进行机械加工状态交货。我国一般规定以退火状态交货。

交货状态钢材和试样的硬度值见表 2-6。

表 2-6 GB/T 1299—2000 标准规定的交货状态钢材和试样的退火硬度和淬火回火硬度^②

序号	钢组	牌号	交货状态	试样淬火		
			布氏硬度 HBW10/3000	淬火温度/℃	冷却剂	洛氏硬度 HRC≥
1-1	量具刀具用钢	9SiCr	241 ~ 197	820 ~ 860	油	62
1-2		8MnSi	≤229	800 ~ 820	油	60
1-3		Cr06	241 ~ 187	780 ~ 810	水	64
1-4		Cr2	229 ~ 179	830 ~ 860	油	62
1-5		9Cr2	217 ~ 179	820 ~ 850	油	62
1-6		W	229 ~ 187	800 ~ 830	水	62

(续)

序号	钢组	牌号	交货状态	试样淬火		
			布氏硬度 HBW10/3000	淬火温度/℃	冷却剂	洛氏硬度 HRC≥
2-1	耐冲击工具用钢	4CrW2Si	217 ~ 179	860 ~ 900	油	53
2-2		5CrW2Si	255 ~ 207	860 ~ 900	油	55
2-3		6CrW2Si	285 ~ 229	860 ~ 900	油	57
2-4		6CrMnSi2Mo1V	≤229	(677 ± 15)℃ 预热, 885℃ (盐浴) 或 900℃ (炉控气氛) ± 6℃ 加热, 保温 ^① 5 ~ 15min 油冷, 58 ~ 204℃ 回火		58
2-5		5Cr3Mn1SiMo1V		(677 ± 15)℃ 预热, 941℃ (盐浴) 或 955℃ (炉控气氛) ± 6℃ 加热, 保温 ^① 5 ~ 15min 油冷, 58 ~ 204℃ 回火		56
3-1	冷作模具钢	Cr12	269 ~ 217	950 ~ 1000	油	60
3-2		Cr12Mo1V1	≤255	(820 ± 15)℃ 预热, 1000℃ (盐浴) 或 1010℃ (炉控气氛) ± 6℃ 加热, 保温 ^① 10 ~ 20min 空冷, (200 ± 6)℃ 回火		59
3-3		Cr12MoV	255 ~ 207	950 ~ 1000	油	58
3-4		Cr5Mo1V	≤255	(790 ± 15)℃ 预热, 940℃ (盐浴) 或 950℃ (炉控气氛) ± 6℃ 加热, 保温 ^① 5 ~ 15min 空冷, (200 ± 6)℃ 回火		60
3-5		9Mn2V	≤229	780 ~ 810	油	62
3-6		CrWMn	255 ~ 207	800 ~ 830	油	62
3-7		9CrWMn	241 ~ 197	800 ~ 830	油	62
3-8		Cr4W2MoV	≤269	960 ~ 980, 1020 ~ 1040	油	60
3-9		6Cr4W3Mo2VNb	≤255	1100 ~ 1160	油	60
3-10		6W6Mo5Cr4V	≤269	1180 ~ 1200	油	60
3-11		7CrSiMnMoV	≤235	淬火: 870 ~ 900 回火: 150 ± 10	油冷或 空冷 空冷	60
4-1	热作模具钢	5CrMnMo	241 ~ 197	820 ~ - 850	油	
4-2		5CrNiMo	241 ~ 197	830 ~ 860	油	
4-3		3Cr2W8V	≤255	1075 ~ 1125	油	

(续)

序号	钢组	牌号	交货状态	试样淬火		
			布氏硬度 HBW10/3000	淬火温度/℃	冷却剂	洛氏硬度 HRC≥
4-4	热作模具钢	5Cr4Mo3SiMnVA1	≤255	1090 ~ 1120	油	
4-5		3Cr3Mo3W2V	≤255	1060 ~ 1130	油	
4-6		5Cr4W5Mo2V	≤269	1100 ~ 1150	油	
4-7		8Cr3	255 ~ 207	850 ~ 880	油	
4-8		4CrMnSiMoV	241 ~ 197	870 ~ 930	油	
4-9		4Cr3Mo3SiV	≤229	(790 ± 15)℃ 预热, 1010℃ (盐浴) 或 1020℃ (炉控气氛) ± 6℃ 加热, 保温 ^① 5 ~ 15min 空冷, (550 ± 6)℃ 回火		
4-10		4Cr5MoSiV	≤235	(790 ± 15)℃ 预热, 1000℃ (盐浴) 或 1010℃ (炉控气氛) ± 6℃ 加热, 保温 ^① 5 ~ 15min 空冷, (550 ± 6)℃ 回火		
4-11		4Cr5MoSiV1	≤235	(790 ± 15)℃ 预热, 1000℃ (盐浴) 或 1010℃ (炉控气氛) ± 6℃ 加热, 保温 ^① 5 ~ 15min 空冷, (550 ± 6)℃ 回火		
4-12		4Cr5W2VSi	≤229	1030 ~ 1050	油或空	
5-1	无磁模具钢	7Mn15Cr2Al3V2WMo	—	1170 ~ 1190 固溶 650 ~ 700 时效	水空	45
6-1	塑料模具钢	3Cr2Mo	—			
6-2		3Cr2MnNiMo	—			

- ① 保温时间是指试样达到加热温度后保持的时间。
- a. 试样在盐浴中进行, 在该温度保持时间为 5min, 对 Cr12Mo1V11 钢保温 10min。
- b. 试样在炉控气氛中进行, 在该温度保持时间为 5 ~ 15min, 对 Cr12Mo1V1 钢是 10 ~ 20min。
- ② 美国钢种退火硬度一般均比我国低, 德国和我国的基本相同, 日本同我国相比则有高有低; 美国试样的淬火硬度一般均比我国的高, 德国、日本与我国基本相当。我国冶金厂能够保证热作模具钢的淬火硬度, 故未作规定。

7. 钢材的表面质量

1) 供压力加工用的热轧和锻制钢材, 表面不得有目视可见的裂纹、折叠、结疤和夹杂。如有上述缺陷必须清除, 清除深度从钢材实际尺寸算起应符合表 2-7 的规定, 清除宽度不小于深度的 5 倍。深度在公差之半范围内的其他轻微表面缺陷可不清除。美

国、日本等国的标准均有相应的规定。如日本标准规定，钢材应加工良好，不得有影响使用的缺陷。德国标准规定，表面状态应按加工余量不同的等级交货，在加工余量范围内允许存在表面缺陷和边缘脱碳。

表 2-7 GB/T 1299—2000 标准中热轧和锻制钢材表面缺陷允许清除的深度

钢材直径或边长/mm	同截面允许清除深度
<80	公差之半
80 ~ 140	公差
> 140	钢材截面尺寸的公差值

2) 供切削加工用的热轧和锻制钢材，表面允许有从钢材公称尺寸算起深度不大于规定的局部缺陷，见表 2-8。

表 2-8 GB/T 1299—2000 标准规定切削用钢材表面局部缺陷允许深度

钢材截面尺寸/mm	局部缺陷允许的深度
<80	公差之半
≥80	公差

3) 冷拉钢材表面应洁净、光滑，不应有裂纹、折叠、结疤、夹杂和氧化皮。经热处理的冷拉钢材表面允许有氧化色或轻微氧化层。9 级和 10 级精度的冷拉钢材表面，不得有任何缺陷。11 级和 12 级精度的冷拉钢材表面，允许有深度不大于从实际尺寸算起的该公称尺寸公差的麻点、个别划痕、发纹、凹面、黑斑，拉裂和润滑剂痕迹等轻微表面缺陷。根据需方要求，缺陷深度可不大于从钢材实际尺寸算起的该公称尺寸公差之半。银亮钢应符合 GB/T 3207 的规定。在冷拉材方面，美国的标准规定较严，即表面缺陷在允许公差范围内清除之后才符合要求。

8. 特殊要求

特殊要求是根据需方的要求，供需双方签订协议。协议中的要求必须切实可行，一旦签订，必须履行。例如，合金模具钢由双方协商可以增加其他的检验项目，如对非金属夹杂物、晶粒度、淬透性等的评价，其试验方法、试验个数、评级标准和合格级别等均按供需双方协议，并在合同中注明。近些年来，随着模具工业的发展，对模具钢提出了更高的要求，非金属夹杂物的检验已经非常普遍，对锻材可协议规定进行无损检测。

2.3.3 国产模具钢的冶金质量

1. 国产模具钢的主要差距

与国外先进水平相比，主要有以下几个方面的差距。

(1) 钢材的外观质量

我国合金模具钢产品的质量差距主要是钢材的外观质量差，尺寸精度低，钢材的弯曲度大，热轧材的弯曲度达到 6mm/m，拔材有的达 3mm/m；普通轧机轧制的扁钢侧弯

较严重；模块大多以黑皮状态交货，尺寸精度差，磨削加工量大；另外，黑皮状态交货的钢材时有裂纹。

(2) 化学成分控制

我国大型冶金厂冶炼的模具钢化学成分控制较好，一般均能控制在技术标准范围之内。但是其主要成分的波动性较大，对热处理后的性能有一定影响。对于有害元素硫、磷，一般 w_s 为 0.003% ~ 0.015%，一般 w_p 为 0.012% ~ 0.025%，与国外先进水平的高质量模具钢相比，仍然偏高。

(3) 钢材的退火硬度

在我国，目前冶金厂的模具钢一般均以退火状态交货（预硬化塑料模具钢除外）。大多数均能在合格范围内交货。但是由于工艺和设备原因，退火硬度和组织的均匀性较差，如 4Cr5MoSiV1 是目前生产量最大的热作模具钢，规定退火硬度 $\leq 235\text{HBW}$ ，一般为 187 ~ 220HBW，而瑞典乌德霍姆公司的 ORYAR2（即 ASSAB 的 8407）钢，其整个截面的退火硬度均为 187HBW，十分均匀，而且球化组织均匀细小。

(4) 预硬化塑料模具钢的组织 and 硬度

近些年来，我国的塑料模具工业发展十分迅速，对塑料模具钢提出了更高的要求，尤其是对抛光性能有影响的硬度与组织的均匀性。由于部分冶金厂热处理工艺和装备水平的局限性，因此硬度与组织与国际先进水平相比有一定的差距。我国生产的较高水平的 SM3Cr2Mo、SM3Cr2NiMnMo 钢的硬度分布情况见表 2-9。

表 2-9 锻制预硬化塑料模具钢硬度分布情况

钢种	尺寸/mm × mm	截面测试点	硬度 HBW
SM3Cr2NiMnMo	500 × 200	45	298 ~ 329
SM3Cr2Mo	400 × 200	25	285 ~ 321

(5) 5CrNiMo 类型模块的淬透性

热锻模块的淬透性是该类钢的一个重要指标，但目前我国该类钢（主要有 5CrNiMo、5CrMnMo）的生产与国外先进水平有一定的差距。国内外 5CrNiMo 钢热锻模块产品质量水平对比见表 2-10。

表 2-10 国内外 5CrNiMo 钢热锻模块产品质量水平对比

检验项目	国内产品的水平		国外同类产品的先进水平
	先进水平	一般水平	
等向性（纵向/横向）	> 0.8	0.40 ~ 0.60	一般 0.70 ~ 0.80
有害元素的质量分数（%）	≤ 0.20	0.40 ~ 0.50	≤ 0.20
淬透性	400mm 可淬透	单面 20 ~ 40mm	400mm 可淬透

(6) 钢材的纯净度

非金属夹杂物在 GB/T 1299—2000 标准中是没有规定的检验项目，但近几年来，

由于出口和国内模具企业的要求，均要求检验非金属夹杂物，大多数按美国 ASTM 标准检验。电渣重熔工艺生产的 3Cr2Mo、3Cr2MnNiMo 钢的非金属夹杂物水平见表 2-11。

表 2-11 电渣重熔工艺生产的 3Cr2Mo、3Cr2MnNiMo 钢的非金属夹杂物水平

钢种 (电渣)	A		B		C		D	
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系
3Cr2Mo	1.0	0	1.0	0	0	0	0.5	0
3Cr2MnNiMo	1.0	0	1.0	0	0	0	0.5	0

(7) 冷作模具钢的共晶碳化物水平

Cr12 型冷作模具钢的共晶碳化物不均匀度是该类钢的重要质量指标。碳化物不均匀度级别的高低是钢材质量水平的直接表现，也是影响模具使用寿命的重要因素。Cr12 型钢的共晶碳化物水平见表 2-12。

表 2-12 Cr12 型钢的共晶碳化物水平

钢种	尺寸 ϕ /mm	国内生产水平/级别		国际先进水平
		先进水平	一般水平	
Cr12	≤ 50	1.0	2.0	小规格钢材基本相同，大中规格比我国低 0.5 ~ 1 级
	$> 50 \sim 70$	1.5	3.0	
	$> 70 \sim 120$	3.0	4.5	
	> 120	3.0	5	
D2	220	4	6	

2. 模具钢冶金质量对模具使用寿命的影响

(1) 夹杂物含量的影响

钢中的夹杂物是模具零件内部产生裂纹的起源。尤其是脆性氧化物和硅酸盐等夹杂物，在热加工时不发生塑性变形，从而引起脆性碎裂而形成微裂纹。在进一步的热处理和使用中，该裂纹进一步引起模具的开裂。例如，采用 Cr4W2MoV 钢制造的冲压手表零件用的冲模，其冲头经粗加工、热处理并磨削加工后，由于钢中含有大量的呈链状分布的硅酸盐夹杂物，经机械加工后剥落会造成许多小孔洞，出现质量问题，影响模具零件的使用寿命。

(2) 碳化物分布不均匀引起的失效

Cr12、Cr12MoV、Cr12Mo1V1 等莱氏体型模具钢，具有大量共晶碳化物，当锻造比小或浇注温度控制不当时，在钢材中易出现带状或网状碳化物偏析，使模具零件在淬火时常常沿着带状或网状碳化物严重的部分出现裂纹，或在使用过程中内部裂纹进一步扩展而引起失效。例如，采用 $\phi 50\text{mm}$ 的共晶碳化物不均匀度超过 4 级的钢材制造冲头在使用过程中易发生断裂。

(3) 锻造质量引起的失效

钢材锻造质量的好坏,直接影响模具的使用寿命。锻造的加热速度与变形工艺不当,会引起钢材产生过烧、表面裂纹、内裂、角裂等缺陷。这些会降低模具的使用寿命,甚至直接报废。对于高碳高铬的莱氏体钢,由于导热性较差,若锻造加热时加热速度过快,保温时间不足,则会造成锻造时钢坯内外温差大,产生内部裂纹,产生质量问题而引起失效。

(4) 材料表面质量的影响

合金模具钢如果表面脱碳严重,在机械加工后,仍有残留脱碳层,那么在模具最终的热处理时,会由于内外层组织不同而造成明显的组织应力,从而导致模具的淬火裂纹;另一方面,淬火后模具表面层的硬度偏低,且截面硬度分布不均匀,降低了模具的使用寿命。

2.3.4 提高模具钢质量水平的主要措施

1. 减少钢中的非金属夹杂物

(1) 电炉冶炼时采取的工艺措施

1) 选用优质的原材料。模具钢在冶炼时应尽量选用优质原材料,回收废钢中不仅S、P含量要低,而且应严格控制其他元素如As、Sn、Pb和Cu等。若要使用废钢,则应尽量多采用本组的返回料和优质生铁。用氧化法冶炼时,应尽量保证氧化期的脱碳量。

2) 选用优质的耐火材料。在用电炉冶炼模具钢时,应选用优质耐冲刷的耐火材料。如炉衬可选用优质镁碳砖,钢包一般选用高铝或镁碳砖,包括浇注等用的耐火材料同样要注意。

3) 冶炼中采用吹氩搅拌。模具钢在冶炼时,采用吹氩搅拌,可加快夹杂物的上浮速度,而且可使较小的夹杂物通过碰撞、聚合形成较大的夹杂物而易于上浮,但吹氩量要控制适当,如吹氩流量太大或吹氩时间太长,则会引起钢渣卷入钢液中,从而带来更多的夹渣或夹杂物,同时使钢液的温度降低太多。

4) 采用合成渣。向钢液中加入专门配置的熔渣,可强化有害杂质向熔渣中的转变过程,合成渣的配方有多种,加入的方式也较多,当需要去除某种成分的非金属夹杂物时,选择相应的合成渣。

5) 采用复合脱氧剂。模具钢的冶炼一般采用复合脱氧剂,可使夹杂物更易从金属中分离出来。如Si-Mn合金、Al-Mn-Si合金、Ca-Si合金等,均可作为复合脱氧剂。

6) 采用稀土元素。稀土金属元素是很强的脱氧剂,可以选用含稀土(质量分数)30%~50%的合金,加入钢液中形成稀土氧化物、稀土硫化物,并能成为结晶时的晶核,其分布在晶体内而不在晶界,对钢材性能有害作用可降至最小,并提高模具钢的等向性。

(2) 模具钢的炉外精炼

1) 真空精炼。合金工具钢常用的真空精炼方法有VHD、VD、RH、VAD和

ASEA-SKF等,经过真空精炼的模具钢 w_o 可降低40%~60%, w_s 降低40%以上,使钢液中的夹杂物显著减少。

2) 喷粉精炼。即使采用吹氩搅拌、真空脱气等技术措施,钢液中还会存在一些氧化铝夹杂物。若把以氧化钙为主的精炼剂喷入钢液中,氧化钙对氧化铝具有较高的亲和力,可形成铝酸钙盐类,铝酸钙熔点较低,易凝聚长大而上浮,使钢液中的夹杂物明显减少,显著改善钢的纯净度。大多数夹杂物的尺寸均小于 $50\mu\text{m}$ 。在钢液中喷入 $\text{CaO}-\text{CaF}_2$ 能脱硫,也可喷入 $\text{Ca}-\text{Si}$ 粉,以改变硫化物的形态,或喷入 CaC_2 粉剂达到脱氧脱硫的目的。

3) 电渣重熔。利用电渣重熔可以大量去除钢中的夹杂物并改善钢材的低倍组织,从而有效地改善了钢材的性能。近些年来,开始大量使用电渣重熔法生产高质量的模具钢。

(3) 合金模具钢的浇注

合金模具钢的浇注主要是防止钢液的二次氧化和带入夹杂物,从而提高模具钢的纯净度,一般应采取以下工艺措施:

1) 气体保护浇注。钢液在钢锭模内上升时与锭模和大气接触(如电炉出钢—钢包、钢包—锭模等过程),都需要用惰性气体保护(通常用氩气),以防止钢液的二次氧化。

2) 真空浇注。将钢液在真空状态下浇注,对防止钢液的二次氧化十分有效。

3) 控制合理的浇注工艺。模具钢一般采用下注法,并采用合理的浇注温度、浇注速度,应使钢液在钢锭模内平衡上升,避免钢液翻腾。这不仅对钢锭表面质量有利,也避免钢渣卷入钢液中形成夹渣,影响钢材的纯净度,甚至报废。

4) 模具钢的连铸。为了在连铸时减少钢液中的总夹杂物的含量,必须保证在整个过程中没有产生夹杂物的来源,消除钢液的再氧化,避免钢液与空气的接触,并使用性能稳定的耐火材料。在连铸过程中操作的要点是使产生夹杂物的量小于去除夹杂物的量。钢包和中间包适度搅拌、铸型液面的稳定控制、耐火砖套埋入深度的控制、模具维护、注流控制等均是获得清洁钢的必要条件。

2. 提高钢的锻造质量

锻造质量的好坏与多种因素有关,一般说选用具有良好表面质量的钢锭、精坯,提高整个工序的操作质量,是改善锻造质量的重要环节。

(1) 清理钢锭或钢坯的原始缺陷

合金模具钢的钢锭或钢坯表面往往存在着裂纹、发纹、夹杂、折叠、结疤等缺陷。为了减少缺陷和防止这些缺陷发展,以避免这些缺陷在加热和锻造时进一步扩大,加热前必须将这些缺陷清理干净,以改善表面质量。常用的清理方法有风铲清理或专用工具清理、火焰切割清理、磨削清理、剥皮清理等。

(2) 避免氧化和脱碳

钢锭或钢坯在锻前加热过程中可能产生氧化、脱碳、过热、过烧及内部裂纹。这些缺陷会在不同程度上影响钢材的质量。氧化造成金属的烧损,降低钢材的成材率,增大

钢材的表面粗糙度值,甚至在钢材的表面形成麻点等缺陷,从而降低钢材的尺寸精度;脱碳将使钢材的表面硬度和强度降低,影响零件的使用性能。为了防止氧化和脱碳,应尽量采用快速加热,缩短在高温下的停留时间,炉气保持不大的正压,炉内形成中性或弱氧化性气氛,而还原性气氛会加速脱碳。

(3) 防止过热和过烧

1) 过热是钢在稍低于过烧温度的高温下长期保温晶粒过分长大的现象。过热使金属在锻造时塑性下降,降低了钢材的力学性能。对于未锻造或轧制的过热钢材,为了改善过热造成的粗晶组织,一般可采用冷却后重新加热重结晶后锻造或轧制的方法来解决。锻后也可通过热处理的方法来细化晶粒。但并不是所有的过热钢都能通过上述方法获得解决,重要的是防止过热。

2) 过烧是由于加热温度过高,致使钢中熔点较低的组成物熔化而导致不可挽回的缺陷。一般钢锭具有很薄的致密细小的等轴晶保护层,在加热过程中可以防止氧化性炉气侵入钢锭内部。而钢锭在冷却过程中形成的晶间裂纹可穿过致密的表面结晶层和大气相通,具有这种晶间裂纹的钢锭是最容易过烧的,这种裂纹就是炉气向钢锭内侵入的通道。渗入晶粒边界的氧化性气体,使晶间的氧化物变脆。

预先剥皮的钢锭在加热时就要特别注意,因为剥皮时把所有可防止裂纹与炉气相通的很致密的表面结晶层去掉了,所以就有可能暴露大量的裂纹缺陷。晶间裂纹的存在不仅使氧化性炉气容易向钢锭内渗入,而且也造成了过热时促使易熔晶间物质渗出的条件,晶间空隙的产生又引起新的通道的形成,炉气便沿该通道进入钢锭内部。

过烧现象一般都是从表面沿晶界开始的,并向钢锭的内部发展,开始形成不大的空隙,其后进一步扩大,若晶间空隙的表面氧化过程得到充分发展,则由于失掉晶间联系而使钢锭在锻造或轧制时碎裂。

3) 过热、过烧和内裂是不可挽回的废品缺陷,所以在加热和锻轧过程中应尽量避免此类缺陷。为了使钢锭或钢坯在热加工过程中防止过热或过烧,应根据钢的化学成分和尺寸制定正确合理的加热规范,并严格执行。

① 选择合理的炉型并采用计算机控制是提高加热质量的重要保证。尽量减少炉内的过剩空气量,高温下应调节成弱氧化性气氛。

② 在火焰炉内加热时,钢料应离开烧嘴一定的距离,避免钢料与火焰直接接触,以防钢料局部过热和过烧,如因锻压设备发生故障而长时间停锻时,必须降低炉温和采取其他措施。

(4) 减少角裂与表面裂纹等缺陷

锻造时制订正确的锻造工艺,采用先进的锻造设备,熟练地掌握操作技术是减少角裂、表面裂纹、表面结疤的关键。

1) 采用多次小变形的锻造方法。例如,锻造 Cr12 模具钢,就必须采用多次小变形的锻造方法,型砧的圆角半径不能太小,进料量要进行控制,一般 $L/H = 0.6 \sim 0.8$,要注意倒棱,观测锻造料的温度变化,尤其是角部,以防棱角处温度下降,而造成角裂。一旦出现裂纹应及时清除,否则裂纹在随后的锻造中将进一步扩大。

2) 应控制钢料的进给量、加热温度和锤击的速度和力度。表面裂纹的种类很多,在 Cr12 型钢的锻造中时常发现三角形或人字形的裂纹,这种裂纹的形成原因较多,控制钢料的进给量、加热温度和锤击的速度和力度,采用适宜的操作方法可控制裂纹的发展。

3) 采用先进的锻造设备是提高产品质量的重要途径。快速锻造机和精密锻造机代表着当今锻造设备的先进水平。

① 快速锻造机的特点:在空程和回程的速度快,锻压次数可达 90 ~ 100 次/min 的前提下,实现了锻造操作车的联合动作。由于液压机还装有电子闭路系统,可严格控制锻造压下量,因此锻件的尺寸精度可达到 $\pm (1 \sim 2\text{mm})$ 。这样一方面适应了高合金钢在短时间内的变形,另一方面可提高贵重金属的收得率,此外由于锻造力大,便于钢锭的锻粗,从而提高了模具钢的质量。

② 精密锻造机的特点:

a. 变形方式优越。精密锻造过程是多锤头高速径向锻造压缩过程,锻件在变形过程中始终承受径向压力,应变形式则是沿圆周的径向压缩和轴向延伸,不存在自由扩展,避免了锻件心部产生裂纹。

b. 锻造速度快。在精密锻造过程中,每一锤头的一次变形量很小而道次变形量大,高合金钢可达 20% ~ 40%,碳素工具钢可以更大一些。

c. 火次变形量大。锤头的高速锻造使锻件的辐射热损失较小,锤头与锻件的接触时间短,热损失也较少,高速变形使锻件的变形温升较高,使锻件可以进行多次往复锻造。

d. 锻造方式多变。锻造方式有圆→方、方→圆等多种变形方式,防止了由于温度不均而造成的角裂及其他表面缺陷。

e. 生产的自动化程度高,产品的尺寸精度高。实践表明,精密锻造机在工艺技术上先进的,尤其是在高合金钢方面的锻造,有一定的优势,与快速锻造机配合进行高合金钢的小批量、多品种的开坯及成材生产,优势比较突出,尤其是锻后产品的力学性能和表面质量很好,是冶金厂锻造设备改进的方向。但是由于精密锻造机本身的锻造变形的工艺特点,即表面变形、锻透深度不够,容易形成孔洞锻造缺陷,在使用时应注意在变形工艺等方面进行深入研究,不断创新工艺技术路线。

(5) 保证尺寸精度

尺寸精度是衡量钢材外观质量的重要指标之一,同时也影响到零件机械加工的切削率和成本等。尺寸精度主要取决于工艺装备。国内目前的锻材除几个大的特殊钢厂用快速锻造机生产外,大多数用水压机和气锤生产,因此钢材的外形较差,且尺寸精度较低。采用快速锻造机和精密锻造机的企业生产的锻材,其产品尺寸精度可控制在 $\pm (0.1\% \sim 0.2\%)$ 的范围内,其外形也比较规整,而且产品的内在质量好,生产率高,成材率也高,近几年来,有部分模具钢使用单位提出更严格的尺寸精度要求,因此,需要机械加工后交货。快速锻造机生产模块与日本模块的尺寸精度比较见表 2-13。

表 2-13 快速锻造机生产模块与日本模块的尺寸精度比较

日本 SKT4	生产尺寸/mm × mm × mm	350 × 410 × 280		
	实测偏差/mm	+ (9 ~ 11)	+ (10 ~ 12)	+ (10 ~ 12)
国内快速锻造机生产 5CrNiMo 模块	生产尺寸/mm × mm × mm	350 × 450 × 280		
	实测偏差/mm	+ (8 ~ 10)	+ (8 ~ 10)	+ (8 ~ 10)

(6) 采用大的变形率以减小钢的共晶碳化物的不均匀度

高碳高铬型冷作模具钢常用的钢种有 Cr12、Cr12MoV 和 Cr12Mo1V1 等，属于莱氏体钢，在铸态组织中存在鱼骨状的共晶碳化物。共晶体（奥氏体 + 碳化物）沿着已形成的晶界呈网状凝固，共晶体的析出即使在高速冷却的条件下也难以避免。在钢的冷却过程中，二次碳化物从过饱和的奥氏体中析出，并沉淀在共晶碳化物上，从而使网状碳化物量增加，网状加厚。在铸态下由于网状碳化物的存在，铸态钢变得很脆且强度很低。在钢的热加工过程中，共晶碳化物被破碎，呈网状分布的碳化物变成颗粒状碳化物并沿着变形方向延伸产生了带状碳化物。钢在铸态下的原始组织对使用性能影响很大，其中碳化物分布的不均匀性起着重要作用。为了消除和改善莱氏体钢网状共晶碳化物，减少粗大碳化物的带状组织，必须在钢的热加工过程中采用很大的变形率才能获得分布比较均匀的碳化物。在变形时，当钢的横截面变形至 1/15 ~ 1/12 时（相当于变形率达到 90%），网状碳化物才能消失，即使在如此大的变形量的情况下，仍保留着粗大的共晶碳化物，只有变形截面至 1/40 ~ 1/30 时（变形为 98% 左右），碳化物才能趋于均匀。

3. 保证钢的组织稳定性

(1) 降低表面脱碳的措施

1) 为了降低合金模具钢表面脱碳和氧化，在热加工过程中，钢坯加热多利用加热炉高温段采用强化加热和控制炉内气氛的措施，也可在高温段采用电感应快速加热工艺，这样可基本上避免钢坯在加热过程中的氧化和脱碳现象。

2) 在钢材的热处理方面，为了避免氧化和脱碳，广泛采用连续式可控气氛退火炉，用吸热式可控气氛控制碳势。对于小型轧材和线材的热处理，常采用大型真空热处理炉进行真空退火。由于真空热处理的钢材质量好，损失小和易于控制等，使这类装备得到迅速发展。

(2) 改善高碳低合金模具钢带状组织

高碳低合金冷作模具钢 CrWMn、9CrWMn、9Mn2V、Cr2 等钢种属于过共析钢，在铸态组织中存在一定数量的 M_3C 型碳化物，但与莱氏体钢的共晶碳化物相比，碳化物颗粒均匀和细小，如 9SiCr 钢在淬火组织中碳化物体积分数为 3% ~ 4%，回火后组织中碳化物体积分数为 10% ~ 12%，钢中的碳化物在热加工后或热加工过程中二次析出并沿晶界分布。产生该类缺陷，可以采用 860 ~ 900℃ 正火处理消除。一般来说，钢的碳化物在热加工过程中沿变形方向拉长而呈现带状分布，随着变形率的增大，碳化物的分

布更加细小均匀。碳化物网或带对模具性能有较大影响，主要表现在降低钢的横向强度和韧性，对模具钢的抛光性能也有大的影响。此外，碳化物的不均匀性还与钢的成分有关，当钢中的碳的质量分数在1%左右和含有一定量的钨元素（ $w_w \geq 1\%$ ）时，碳化物的不均匀性较高，即使采用较大的锻造比，仍有一定量的碳化物带或网。改善模具钢带状碳化物的有效工艺措施有：

1) 改善钢锭的结晶组织，在满足一定锻造比的情况下，尽量采用小的锭型，以提高钢液在结晶区内的冷却速度，减小碳化物的铸态组织偏析。

2) 在可能的情况下，应尽量采用低温浇注。

3) 采用电弧炉 + 电渣重熔工艺冶炼，充分改善钢锭的原始铸态组织，使碳化物细化。

4) 选用大的锻造比和大的变形率有利于破碎碳化物，改善碳化物的颗粒度。

5) 对存在碳化物不均匀的钢，可采用高温扩散处理，进行均匀化处理，一般采用1180 ~ 1200℃，保温5 ~ 8h。

6) 轧后或锻后进行强化冷却，可以采用风冷、雾冷等工艺措施。一般轧后或锻后冷却到650 ~ 700℃，然后进行缓冷，快冷是为了防止形成网状碳化物，缓冷是为了防止形成白点和裂纹。

(3) 改善高合金冷作模具钢共晶碳化物不均匀性

高合金冷作模具钢如Cr12钢等属于莱氏体钢，在铸态组织中存在共晶碳化物不均匀现象，常采用以下几种有效措施进行改善：

1) 选择合理的锭型。在满足锻造比的情况下，应尽量选择较小的锭型，一般截面尺寸 $\leq 150\text{mm}$ 的钢材，应选择1.5t以下的钢锭。对于大截面的钢材，应选用较大的钢锭，对于同一种规格的钢材，大型钢锭的碳化物级别偏低，但是由于钢锭较大，钢锭凝固冷却条件差，易产生严重的偏析、疏松等缺陷，因此在能满足锻造比的情况下，应尽量选择较小的钢锭。

2) 在条件允许的情况下，加大锻造比，改善碳化物的不均匀度。在Cr12型莱氏体钢的铸态组织中存在着数量相当大的树枝状和板条颗粒聚集的复合碳化物，为了使这些碳化物破碎，应采用大的锻造比以增加变形程度。

3) 采用多次镦拔，可使碳化物的分布进一步均匀。多次镦拔是使碳化物分布均匀的重要措施之一，但要防止在镦粗过程中产生裂纹。

4) 采用电渣重熔工艺。电渣重熔工艺可以改善钢的低倍组织，降低钢中非金属夹杂物的含量，改善碳化物不均匀度，使共晶碳化物细小、均匀。

5) 浇注前加入稀土元素，进行变质处理。在浇注前加入稀土元素，进行变质处理，使铸态组织得到细化，有利于网状共晶碳化物的消除，并使碳化物的颗粒尺寸减小。

6) 优化冶炼浇注工艺参数。Cr12型模具钢熔点低，液相线的温度约为1360℃。应严格控制各期的温度，要严防还原期钢液温度过热，且在凝固过程中容易形成碳化物偏析，要严格控制出钢温度和浇注温度，一般出钢温度为1480 ~ 1510℃。在浇注时一定

要控制浇注速度。

4. 提高钢的力学性能

提高模具钢材的等向性能,改善横向韧性和塑性,可以提高模具的使用寿命,常采用的方法有:

1) 钢的纯净度对钢材的等向性能有很大的影响,采用二次精炼技术(包括真空精炼、ESR 和钢包喷粉等),可以提高钢材的纯净度,尤其是降低钢中有害杂质的含量,对提高性能十分有益。

2) 利用 Ca、稀土等微量元素对夹杂物的变质作用,改变钢中夹杂物的结构形貌和物性,使钢中的夹杂物球化、细化,从而提高钢材的力学性能。

3) 在热加工方面,对钢锭进行反复的锻拔和多向轧制,增大变形量,可降低钢中碳化物偏析的级别,有利于改善钢材的各向异性。

4) 对钢锭进行高温扩散热处理,可以改善钢锭的成分不均匀性,从而提高钢材的横向性能。

2.4 现代模具钢的生产技术

1) 现代模具钢生产采用了先进技术装备。自 20 世纪 80 年代以来,把模具钢作为重点技改项目。国内部分特殊钢厂先后引进了炉外精炼(主要是 RH、LF + VD、VAD 或 VHD)和电渣重熔、真空自耗、快速锻造机、精密锻造机、削皮机和连续退火炉等先进的冶炼、加工和热处理设备,并应用于模具钢的生产,使模具钢的生产技术装备有了较大进步。国内部分特殊钢厂把模具钢作为重点技改项目,引进国外先进的模具扁钢轧制专业化生产线,并对一些厚板轧机进行改造。这些技改工程,大大促进了我国模具钢的发展,但是由于我国模具钢的发展起步较晚,很多设备还需要完善和配套。近几年来,国外 VAR 炉大量用于工模具钢的生产,进一步降低了钢中气体和夹杂物的含量,并减小偏析,进而提高了模具钢的使用性能。国内设备与世界先进设备还有一定的距离。我国的冶金厂在钢材精整工序、热处理设备、在线质量检测等方面还需进一步完善。

2) 模具钢的生产技术有了较大提高。目前国内在模具钢的冶炼工艺方面,引进和研制了一批先进的技术设备和先进的生产工艺,取得了可喜的成果。为了提高模具钢的质量和性能,一般采用电炉冶炼 + 炉外精炼技术,即 EF + VHD (VAD) 或 UHF + LF + VD 或 EF + ESR 工艺生产,有的企业采用 EF + VHD (VAD) + ESR 工艺,并在电炉初炼、精炼和钢锭浇注等工艺过程中进行科研攻关,取得了一定效果,大大降低了钢材中气体和夹杂物的含量,提高了钢材的纯净度,减少了钢材的白点、夹杂、缩孔等严重的冶金缺陷。

3) 在热加工方面采用以轧代锻工艺。国内近几年来,利用初轧机进行 Cr12 系列莱氏体钢模铸钢锭热送、直接加热开坯(即所谓的“以轧代锻工艺”)取得了成功,并且成材率达到 85% 的较高水平,不仅提高了材料质量,还大大降低了生产成本。采用高

温均匀化退火、多向轧制、多向锻造等技术，提高了模具的等向性和组织均匀性。

4) 在热处理方面向国外先进水平靠拢。已能进行塑料模具钢的扁钢和板材的预硬化处理，并能满足一般用户的使用要求，取得了一定效果；在钢材的退火方面，还仅限于满足简单的硬度和脱碳层的要求。与国外先进水平相比，钢材的纯净度、冷作模具钢碳化物的不均匀度水平、热作模具钢预硬化的硬度与组织均匀性和稳定性等均有一定差距。因此，国产模具钢的质量水平要赶上国外先进水平，模具钢的生产工艺研究和装备水平的改造，还有待于进一步提高。

5) 向微细化的方向发展。瑞典、日本等模具钢技术先进的国家，对模具钢的组织微细化进行了研究。通过改善冶炼、热加工方法及后续的热处理等一系列的综合工艺技术（即微细工艺），开发出微细工具钢，使钢材的韧性得到显著提高，成功地生产出非常接近等向性（ $T/L=0.8\sim0.9$ ，一般为 $T/L=0.4\sim0.6$ ）的模具钢，从而大大提高了模具的使用寿命。我国正在进行模具钢生产工艺方面的微细工艺研究，以赶上国际先进水平。

2.4.1 模具钢电弧炉冶炼技术

模具钢的冶炼可以用转炉、电弧炉、电渣重熔、感应炉或真空感应炉等设备，由于模具钢的批量小、规格品种繁多，并且有的钢种合金含量较高，广泛采用的还是电弧炉和感应炉冶炼，模具钢的冶炼一般采用 50t 以下的电弧炉为宜。

1. 电弧炉冶炼的一般特点

1) 热效率高。钢液温度可根据钢种和工艺操作要求来调整，而且容易控制。目前我国特殊钢厂大多数采用碱性电弧炉冶炼生产模具钢，可以用氧化法和不氧化法进行冶炼。

2) 冶金过程容易控制。通过控制物理化学反应过程，去除钢中的气体和夹杂物，获得比较纯净的钢液。

3) 设备相对比较简单。大都采用氧化法冶炼，投产快，可以冶炼各种合金钢，品种变化的适应性较强。

2. 电弧炉炼钢的基本过程

电弧炉炼钢的基本过程是向熔池供氧，把炉料中的碳氧化到规定范围；造渣去除原料中的 S、P、O 以及钢中的气体如 H、N 及非金属夹杂物，以保证钢的质量；调整合金成分，调整温度符合出钢的温度要求。其过程可以归纳为“四脱（脱 C、O、S、P）、二去（去气、去夹杂）、二调整（调整成分、温度）”。采用的主要技术手段为供氧、造渣、升温、加脱氧剂、合金化操作。

1) 配料。采用氧化法冶炼时，模具钢的冶炼要尽量配一些好料，尤其是对于要求较高的合金模具钢。为了保证去气和除杂的效果，应保证氧化期沸腾的脱碳量，碳应比成品规格高 0.6%~0.7%（质量分数），其他元素可以不特殊配入；但含 Mo 的钢应在中限。对于高 Cr 的合金工具钢，炉料可使用低 Si、低 Mn 的返回钢和铁合金。

2) 装料。钢铁料装入之前，可加入适量石灰或碎矿石，以利于前期提前造渣和脱

磷操作，装炉时以能使钢铁料熔化形成熔池为原则，将部分小料装在底部，中间装入大料和废料，上层放入剩余小料，不易氧化的铁合金可以随炉装入，但不要放在电极下面。要装入的铁合金等应经过烘烤。

3) 熔氧期。大部分的电炉钢厂都采用强化冶炼，即在还原期之前强化用氧，将熔化期和氧化期合并为熔氧期。因此，应根据炉料中的磷含量于装料前预先在炉底加入一定数量的石灰和矿石（尽量不用或少用矿石），争取在炉料熔化 90% 时，造成适当碱度的氧化渣，在温度还不太高的时候以自动流渣方式将 70% 的磷去除，即在熔化期完成去磷任务。与此同时，在适当的脱碳速度下，一般 $\geq 0.2\%$ （质量分数）的碳量，就能保证熔氧期结束时钢中具有较低的氢含量。我国大多数钢厂在采用氧化法冶炼时，熔氧期的脱碳量（质量分数）大于 0.2%。熔氧初期，炉温较低，这时力争在氧化渣下脱去大部分的磷。后期则利用大变压器快速升温脱碳去气，以便熔氧期的温度能符合要求。

4) 还原期。除氧化渣后就进入还原期。主要是脱氧、去硫、合金化，最后调整成分及温度，使之达到规定的要求。完成氧化渣后，应立即加入稀薄渣料（一般用氧化钠、石灰、和火砖，按 1:4:1）以防止进气。加入量为钢液质量的 3% 左右。薄渣料加入后，根据钢种的要求加入 Mn-Si 合金和 Al（一般为每吨钢 0.5 ~ 1kg）进行预脱氧。薄渣形成后，加入 Fe-Si 粉和 C 粉进行脱氧，加入第一批料应保持 15min 以上，加 2 ~ 3 批，每批间隔时间 5min。在还原期要勤测温，勤搅拌，促使温度和成分均匀，控制好渣量和渣况，保证足够的碱度和良好的流动性，保证白渣出钢。还原期应保持适当高的温度，一般高出钢种的熔点 80 ~ 120℃。为有效地提高钢的质量和纯净度，还原精炼阶段一般移到钢包中进行，可采用炉外二次精炼工艺，如日本 1991 年电炉冶炼的特殊钢采用炉外二次精炼的比例达到 94.5%。

5) 出钢。在出钢前 2 ~ 3min，向钢液中插 Al 进行终脱氧，以进一步降低钢中的氧含量，每吨合金模具钢约为 0.5kg。出钢过程常采用钢渣混出，以增加钢液和渣的进一步接触，继续脱硫，同时使钢液减少二次氧化。当采用炉外精炼时，应采用挡渣出钢。目前国外发展最快的是偏心炉低出钢，可避免钢渣进入钢包。出钢温度对于模具钢十分重要，一般模具钢的电炉出钢温度控制在 1550 ~ 1620℃，与钢种、钢是否精炼等有关。

6) 模具钢浇注。在设备条件一定和冶炼钢种确定时，浇注工艺是十分重要的，浇注工艺中最重要的两个工艺参数就是浇注温度与浇注速度。它们决定钢锭的表面质量，如冒口的收缩，气体逸出与夹杂物的上浮，钢的偏析、疏松、缩孔等质量问题。

浇注温度一般采用如下公式确定：

$$T_{\text{浇注}} = T_{\text{熔点}} + T_{\text{过热}}$$

式中 $T_{\text{浇注}}$ ——钢种的液相线温度；

$T_{\text{熔点}}$ ——包括根据钢种确定的浇注最小过热量，因浇注方法和锭型等因素要求增减的温度以及整个浇注过程中钢液的温度下降值；

$T_{\text{过热}}$ ——开浇时钢液温度。

尤其是一些高合金模具钢的浇注，一般都采用低温快注的原则，以减少钢中的偏析和疏松，出钢温度控制在高于钢的熔点 80 ~ 100℃，根据钢种、锭型和钢包的大小而

定。浇注速度是与浇注温度密不可分的，通常用“高温慢注”与“低温快注”来概括浇注速度与浇注温度的关系。因此必须根据浇注温度调节浇注速度，如浇注速度过快，则相当于提高了浇注温度，因为同一时间内带入钢锭模内的热量增加，整个钢锭的凝固时间延长，成分偏析严重，夹杂物增加，气体也不易排出，还可能出现翻皮缺陷。另外，在模具钢的浇注过程中，一定要注意补缩，补缩的时间与锭型、钢种等有关系。

7) 锭模。模铸常采用带保温帽和整体的锭模系统，材质一般是铸铁。为了减少钢锭在凝固时的缩孔和疏松，钢锭应保持一定的锥度，锥度的大小选择应考虑生产的钢种、锭重和以后的加工方式，对于模具钢钢锭，锥度应大于3%，其计算方法是： $\alpha_{\text{锥}} = (D_{\text{大}} - D_{\text{小}}) / 2H \times 100\%$ 。解剖锥度小于3%的钢锭，发现其冒口线下100mm左右比较致密，而下部则疏松比较严重，尤其像A2（Cr5Mo1V）、A8等钢，则中心疏松与缩孔更严重。锭身锥度一般应选用3%~5%，锭模的壁厚常选用下部较上部厚些，以便快速凝固。

钢锭模的断面形状可分为方形、矩形、圆形、多边形等。多边形钢锭散热面大且均匀，钢锭不易产生热裂纹。矩形锭（扁锭）存在的问题是在浇注中宽边散热比窄边慢，容易产生热裂纹，所以采用外弧形锭模，将宽边模壁加厚，强化冷却。方形锭模使用最多，它又分直边、凸边、凹边和波浪形边四种。钢锭模的另一个重要参数，就是高宽比（ H/D ），模具钢钢锭的高宽比不应过大，否则会增加钢锭的中心疏松、二次缩孔和热裂的倾向；同时因钢液面过高，静压力增大，对钢中气体和夹杂物的排出不利。

8) 连铸。由于连铸具有铸件成品率高、成本低和节约能源及工艺流程短等优点，近年来随着连铸技术的发展，为了提高钢的成材率和降低能耗，国外一些钢厂已采用连铸工艺生产模具钢。低合金钢（主要是塑料模具钢）已正式采用连铸工艺，高合金工具钢连铸工艺正在试验研究。由于模具钢的大截面材的比例较多，一般采用大截面连铸机，机型多采用水平、立式或大半径连铸机。如日本大同特殊钢公司采用双流弧型大方坯连铸机，铸坯尺寸为370mm×380mm；德国蒂森公司增设了立式双流连铸机，结晶器的截面尺寸为340mm×475mm。为了保证质量，一般都采用保护浇注、液面控制和多级电磁搅拌等技术。

德国蒂森克虏伯集团采用的工艺路线为：UHP钢包处理（真空冶炼、气体搅拌、合金化）→连铸→连轧→热处理→去氧化皮、剥皮→矫直、修磨→检验。

用大板坯连铸机生产出的大型板坯直接轧制成中厚板制造各种塑料模具，代替模铸锻造或轧制成形，在国外已普遍应用，大大降低了生产成本。近些年来，国内也开始采用连铸工艺生产塑料模具钢。

9) 精炼。

① 真空炉外精炼。真空炉外精炼技术是冶金工业技术的重大进步，精炼钢的质量水平较高。真空处理的方法很多，实际就是将初炼钢液倒入钢包中，移到真空室内，通过吹Ar搅拌，钢液在真空条件下激烈沸腾，随着Ar气泡流，钢液被驱动而形成环流，使钢液中的气体随Ar气排出，夹杂物上浮，并进行脱硫，通过补加合金使成分控制准确、均匀。

真空精炼设备很多，一般有 LF + VD、VAD、VOD、AOD、DH、RH、VHD 等。国内目前生产模具钢的冶金厂较多采用 LF + VD 或 VHD、VAD 等精炼工艺装置。VD 装置真空度一般保持在 40 ~ 100Pa 的水平，由于在处理过程中无加热装置，处理时钢液温度下降，因而进入钢包的钢液温度要比规定温度高 80 ~ 120℃，处理时间不宜过长。通过精炼，钢中的气体含量、硫含量及夹杂物的含量进一步降低，钢的韧度有所改善。电解法测定用不同冶炼工艺生产的 H13 钢氧化物的含量（质量分数）见表 2-14。

表 2-14 电解法测定用不同冶炼工艺生产的 H13 钢氧化物的含量（质量分数）

（%）

氧化物种类	电弧炉冶炼	电弧炉 + VHD 精炼
氧化物总量	0.0084	0.0046
SiO ₂	0.0010	0.0010
MnO	痕	痕
FeO	0.0001	痕
Cr ₂ O	痕	痕
CaO	无	无
Al ₂ O ₃	0.0050	0.0028
MgO	0.0012	0.0030

另一类精炼设备是增加加热装置，如 VAD、VHD 法、瑞典的真空钢包精炼 ASEA - SKF 法。设备的工艺操作基本相同，先除去初炼炉的熔渣重新造渣，在生产要求低 S 的模具钢时采用高碱度渣。VAD 法与 ASEA - SKF 法在加热操作时真空度不同，VAD 法真空度为 $(2.0 \sim 2.4) \times 10^4 \text{ Pa}$ ，ASEA - SKF 法的真空度约为 53Pa，它主要是通过电磁感应搅拌而产生钢液上下流动。经过这类精炼的钢材其氢体积分数可降到 20×10^{-6} 以下，氧体积分数比不精炼时降低 40% ~ 60%，脱 S 率一般在 40% 以上。

VHD 炉也是一种附有加热装置的精炼设备，是由钢包、加热和搅拌装置以及加热和真空系统构成的。钢液进入钢包后通过造新渣进一步脱硫，并在 $(2 \sim 5) \times 10^4 \text{ Pa}$ 的真空度下加热，调整钢液温度和吹氩搅拌脱气，促进非金属夹杂物上浮排除，并使钢液的成分均匀化，同时降低气体的含量。在合金工具钢的生产中，也采用 LFV 炉精炼技术，它是钢包炉（Ladle Furnace）+ 真空（Vacuum）的炉外精炼法。这种集电弧加热、气体搅拌、真空脱气（或真空吹氧）于一体的精炼法，通过强化热力学和动力学条件，使钢液在短时间内得到高度净化和均匀，从而达到了各种冶金目的。LF 炉是在大气下利用电弧加热调整钢液温度，较长时间的吹 Ar（一般吹 Ar 量达 $50 \sim 100 \text{ m}^3/\text{min}$ ）搅拌使成分和温度均匀，使夹杂物充分上浮而排除。

② 钢包喷粉精炼。钢包喷粉是炉外精炼方法之一，其特点是用气体（最好是惰性气体）作载体，将粉状精炼剂通过浸入式喷枪，穿过渣层直接喷入钢包的熔池深处，对钢液进行气 - 粉混合吹炼、洗涤、净化，可以快速脱硫、脱氧和脱磷，获得纯净的优

质模具钢。喷射系统由喷射罐、喷枪、气体输送装置、控制系统和钢包组成。根据工艺要求和喷射粉末品种将喷粉罐制成用途不同的各种容器，如增碳用喷粉罐、脱磷或脱硫用喷粉罐以及合金化用的喷粉罐。

喷粉精炼的工艺过程是向经电弧炉熔炼的钢液深处喷入 Ca-Si 粉或 CaC_2 粉，并进行吹氩、脱硫、脱气净化钢液的工艺。每吨钢液的喷粉量为 $2.5 \sim 3.0 \text{ kg}$ ，喷粉时间一般不长于 10 min 。采用 $\text{CaF}_2 - \text{CaC}_2$ 系混合粉末精炼脱磷，喷粉量为 $20 \sim 40 \text{ kg/min}$ 。

喷粉精炼可以提高钢的纯净度，也改善了钢的某些性能。冶炼工艺对钢中夹杂物含量的影响见表 2-15。

表 2-15 冶炼工艺对钢中夹杂物含量的影响

冶炼工艺	夹杂物总含量 (质量分数, %)	各类夹杂物含量 (质量分数, %)					
		Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	FeO	Cr_2O_3	MnO
电弧炉	0.0127	0.0089	0.0012	0.0001	0.0003	0.0004	痕
电弧炉 + 喷粉	0.0015	0.0001	0.0012	0.0001	0.0001	0.0002	痕

喷粉工艺的影响主要表现在以下几个方面：

a. 喷粉脱硫。一般来说，高碱度渣的渣量在 $2\% \sim 3\%$ 时能使钢中硫的质量分数下降到 0.005% 以下，可以达到良好的脱硫效果。如在冶炼 5CrNiMo 钢中喷入 Si-Ca 粉后，钢中硫的质量分数可低于 0.004% ，钢中硫化物夹杂由细长密集的硫化锰变成球形分散的硫化物或复合硫化物。

b. 喷粉脱磷。喷吹 $\text{CaC}_2 - \text{CaF}_2$ 粉后，钢中磷形成 $4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 或 Ca_3P_2 进入炉渣中。在高 Cr 模具钢中喷粉后平均脱磷率为 27.3% ，在 GCr15 钢中平均脱磷率达 53% 。

c. 提高钢的力学性能。喷粉后钢中磷和硫的含量降低，夹杂物形态和分布改善，从而改善了钢材的力学性能，特别是改善了钢材的韧性和塑性。对 5CrNiMo 钢喷粉精炼后，其断面收缩率和冲击韧度显著提高。

2.4.2 模具钢电渣重熔工艺

电渣重熔是金属及其合金的一种特殊的冶炼方法，虽然电渣冶金可划分出多种技术方法和应用于不同的领域，但其基本和核心的技术是电渣重熔 (Electroslag Remelting, 简称 ESR)。

1. 电渣重熔的基本原理

在铜制水冷结晶器中加入固态或液态的炉渣，将自耗电电极的端部插入其中。当自耗电电极、炉渣和底水箱通过短网与变压器形成供电回路时，有电流从变压器输出通过液态熔渣。由于在上述供电回路中熔渣的电阻相对较大，占据了变压器二次电压的大部分压降，从而在渣池中产生大量的热，使其处于高温的熔融状态，由于渣池的温度远高于金属的熔点，从而使自耗电电极的端部逐渐加热熔化，熔化的金属汇聚成液滴，在重力的作用下金属熔滴从电极的端头脱落，穿过渣池进入金属熔池，由于水冷结晶器的强制冷

却,液态金属逐渐形成钢锭。

2. 电渣重熔的特点

模具钢电渣重熔属于二次模具钢精炼方法,自耗电极为原料,自耗电极可由其他模具钢冶炼方法获得,如采用电弧炉、感应炉、真空感应炉和真空自耗炉等制备。模具钢电渣重熔的目的是在初炼的基础上进一步提纯钢、合金和改善钢锭的结晶组织,从而获得高质量的金属产品。

1) 金属的熔化、浇注和凝固在一个较纯净的环境中实现,减少了钢液的污染。且在低压条件下,氧、氢等有害气体含量少,可防止融化的金属氧化或进入有害气体,从而提高了铸件的质量。

2) 具有良好的冶金反应热力学和动力学条件。电渣重熔过程中,渣池温度通常在1750℃以上,电极下端至金属熔池中心区域的熔渣温度可达1900℃左右,钢液的过热度可达450℃,高温熔池促进了冶金物理化学反应。其良好的动力学条件表现在电渣重熔过程中钢渣能进行充分接触,同时由于电磁力的搅拌作用,不断更新了钢渣的接触面,强化了冶金反应,促进了有害杂质和非金属夹杂物的去除。

3) 自上而下的顺序凝固条件保证了重熔金属锭结晶组织均匀致密。在电渣重熔过程中,电极的熔化和熔融金属的结晶是同时进行的。钢锭上端始终有液态金属熔池和发热的渣池,既保温又有足够的液态金属填充凝固过程中因收缩而产生的缩孔。同时金属液中的气体和夹杂物也易于上浮,所以钢锭的组织致密、均匀。

4) 液相转入固相是在水冷结晶器(铜坩埚)内强制冷却完成的,水冷结晶器与钢锭之间形成薄而均匀的渣壳,没有氧化条件,没有耐火材料等的污染,从而保证了模具钢重熔钢锭的表面光洁和材质的纯净度。

5) 电渣重熔自耗冶炼可获得大尺寸大吨位的金属铸材,最大铸材可达60~70t,其直径可超过2m,以适合大型产业的需要。

3. 电渣重熔的工艺要素

由于电渣重熔的独特优势,近些年来,在合金模具钢的生产中被大量应用。但在其生产工艺方面,应注意以下几个方面:

1) 电力制度。重熔时电流大小的变化将影响熔化速度和电力消耗,也直接影响钢锭的结晶状态。这三个因素是相互关联的,如增大充填比后,为避免熔速过快,使熔池过深而影响冶金质量,就应降低输入功率。但为保证稳定的熔炼过程,一般均采用较低的工作电压。正确地选用电力制度十分重要。

2) 渣系及渣量。炉渣在电渣冶金中十分重要,炉渣不但能起到发热剂的作用和精炼作用,而且在电极熔化末端,熔滴形成和下落在渣池与金属熔池界面上,熔渣与金属液之间要发生一系列的物理化学反应,如脱硫、去气和吸收非金属夹杂物,钢中活泼元素的氧化或某些氧化物的还原等反应,从而对钢的纯净度和化学成分的控制产生重要的影响。在模具钢冶炼中大部分的品种采用二元系,即 $\text{CaF}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 系,这也是电渣重熔中常用的渣系,一般比例为70%/30%。也有用 $\text{CaF}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$ 三元渣系和 $\text{CaF}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO}$ 四元渣系的。渣的用量一般视锭重而定。

3) 充填比。所谓充填比是指电极截面积和结晶器截面积之比。充填比与电渣熔炼时的熔池大小、深度和形状等有很大关系, 从而影响电渣钢的质量。加大充填比会降低电耗, 加深熔池的深度, 但过大会带来操作的不便。小的充填比有利于夹杂物的去除, 并且有利于获得钢锭良好的结晶组织。

4. 电渣重熔的意义

电渣重熔后, 模具钢的组织 and 性能有显著提高, 主要表现在以下几个方面:

1) 改善钢的低倍组织。

① 在电渣重熔时, 由于钢液快速凝固, 其结晶的方向发生了变化, 与普通的模铸钢锭相比有明显的改善。重熔时树枝状晶的晶间距离缩小了, 资料报道, 4Cr5MoSiV1 (H13) 钢的中心部分检查发现, 模铸钢锭为 750 μm , 而电渣锭生产时为 490 μm , 细化的枝晶有利于组织和成分的均匀化。

② 经电渣重熔后, 钢的低倍组织有很大改善, 比同样锻造比的模铸模具钢的中心疏松和偏析均能改善 0.5 级以上, 电渣钢的低倍组织中心致密, 一般均小于 I 级 (按 ASTM 标准评定)。尤其是对于钢锭易出现疏松和缩孔的钢, 例如 Cr5Mo1V (A2) 钢, 效果十分明显, 见表 2-16。在塑料模具钢生产中, 由于改善了钢的组织均匀性和致密度, 从而可以显著提高钢的抛光性能和耐蚀性。

表 2-16 Cr5Mo1V 钢电渣冶炼与电炉模铸钢锭的低倍组织

冶炼方法	锭型	成品尺寸/mm	低倍组织/级别		
			一般疏松	中心疏松	锭型偏析
电炉 + VHD	5t	300	1	2.0	0.5
电炉 + ESR	$\phi 600\text{mm}$	300	0.5	0.5	0.5

2) 降低钢中的非金属夹杂物的含量。经电渣重熔后, 钢中非金属夹杂物的含量显著降低, 尤其是硫化物夹杂在形态和数量上都有明显的变化和减少, 硅酸盐夹杂也大量被去除, 氧化物多为 Al_2O_3 , 但数量也明显减少。日本 JIS 标准的 SKD61 (相当于 4Cr5MoSiV1), 用不同的冶炼方法生产的钢材的夹杂物水平见表 2-17。从表中可以得知, 电渣重熔后钢的纯净度明显提高。

表 2-17 炼钢方法与非金属夹杂物级别 (SKD61)

铸锭方法	锻造比	JIS 法 $d(60 \times 400) / \text{mm}$			ASTM E45							
		A	B + C	A + B + C	A		B		C		D	
					细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系
大气	4	0.004	0.035	0.039	1	0.5	1.5	0.5	0	0	1	0
	6	0.008	0.032	0.040	0.5	0.5	1.5	0.5	0	0	0.5	0
	8	0.004	0.025	0.029	0.5	0.5	1	0.5	0	0	0.5	0
ESR	4	0.004	0.013	0.017	0.5	0	1.0	0	0	0	0.5	0
	6	0	0.017	0.017	0.5	0	1.5	0.5	0	0	0.5	0
	8	0	0.017	0.017	0.5	0	1	0	0	0	0.5	0

3) 改善碳化物不均匀度。电渣重熔后,改善了钢锭的结晶组织,尤其是高 C 高 Cr 的冷作模具钢,碳化物不均匀度有明显改善,在同样锻造比的情况下,能提高 0.5 级,尤其是心部组织。由于碳化物细化,使钢淬火后基体中合金含量提高,提高了二次硬化效应和耐回火性。另外,电渣重熔后,改善了钢的热塑性和钢的韧性。

4) 改善力学性能。经电渣重熔后钢锭的微区偏析和夹杂物得到改善,钢材的组织均匀、致密,从而提高了钢的力学性能,特别是钢材的纵、横向以及中心和边缘的性能差异有明显改善。如 4Cr5MoSiV1 钢经电渣重熔后,钢的抗拉强度和塑性的纵、横向性能之比达到 0.90 以上,冲击韧度之比也达到 0.78 以上。

2.4.3 粉末冶金模具钢的生产

1) 1909 年美国库利吉 (W. D. Coolidge) 发明用粉末冶金方法制造灯泡用钨丝,奠定了现代粉末冶金的基础,成为近代粉末冶金技术的开端。随着粉末冶金技术的发展,近些年来,采用粉末冶金法直接成形的含 Cr、W、Mo、V 等的难变形的莱氏体钢,如高速工具钢,是理想的模具材料,因此,近年来粉末冶金技术得到了迅速发展成为生产高性能材料的重要手段之一。美国、日本和瑞典等工业先进国家,要求高的冷作模具钢和塑料模具钢(主要是高 C、V 钢)已用粉末冶金法生产,工艺已经成熟。例如,日本大同特殊钢公司的 DEX 系列 DEX40、DEX60、DEX80 等,日立金属的 HAP 系列,不二越的 FAX 系列,乌德霍姆公司的 ASP 系列,百禄(BOHLER)公司的 S700 系列,美国熔炉斯伯(CRUCIBLE)公司的粉末冶金工模具钢发展较快,形成 CPM1V、CPM3V、CPM10V、CPM15V 等,已形成了一系列的粉末冶金工模具钢。

2) 粉末冶金生产铸态组织为莱氏体钢,其碳化物尺寸细小、分布均匀。碳化物的面积百分比为一般模具钢的 2 倍,它的耐磨性、等向性、电加工性等都比普通模具钢好。利用 CIP(冷等静压)和 HIP(热等静压)的粉末冶金模具钢,很容易把碳化物控制在 $1 \sim 5\mu\text{m}$ 之内。其主要的生产原理就是把钢液在雾珠状态下迅速凝固,冷速高达 $10^4 \sim 10^5^\circ\text{C} / \text{s}$,碳化物来不及聚集长大,然后将凝固颗粒状的钢粉在高温、高压下烧结压制成坯料,再经热加工形成制品或钢材。其耐磨性和韧性比普通工艺制造的模具钢有明显提高,从而显著延长了模具的使用寿命。

3) 熔化钢液雾化制粉的方法有水雾法和气雾法(通常是氩气和氮气)两种,对于用水雾法生产的钢粉,由于氧含量高,一般先通过真空处理来降低钢中的氧含量。雾化制成的粉末经过筛选焙烧成毛坯或装桶抽真空密封,经过热等静压或冷等静压后制成毛坯,也可以用精密锻造或热挤压制成毛坯,然后经锻轧成材。常用的生产工艺流程有:

① HIP 成形工艺流程为原料→熔炼→雾化→粉末充填密封容器→真空脱气→热等静压→钢锭→锻造或轧制→热处理→检验。

② 英日共同推出的 MIM(金属粉末喷射成形法),取粉末烧结和等静压两法的优点,工艺流程为粉末→粘结剂→混合→喷射成形→脱脂→烧结。

2.4.4 模具钢的锻造和轧制

(1) 模具钢的开坯

浇注成的钢锭或电渣锭一般要经过锻造或轧制成坯（也有直接锻造或轧制成材的），再采用冷、热变形加工制成各种规格尺寸的钢材（或模坯）来满足用户的需求。

1) 高、中合金模具钢一般采用锻造开坯，如 Cr12 型冷作模具钢常采用锻造开坯。

2) 低合金模具钢可以采用初轧制开坯，如塑料模具钢 SM3Cr2Mo（P20）、SM3Cr2NiMnMo（718）等一般采用初轧制开坯，也可根据需要采用锻造开坯。

(2) 模具钢的开坯要点

为了提高锻造效率和锻造的尺寸精度，一般采用液压快速锻造机或精密锻造机进行模具钢的生产。在锻造开坯时应考虑的生产工艺要点有：

1) 保证足够的压缩比。从钢锭到坯、材的加工比，称为压缩比或锻造比，一般用 $k = F_0/F$ （ F_0 为钢锭平均截面积， F 为坯或材料截面积）。如果分步加工，则总锻造比是各步的锻造比的总和，这是模具钢在热加工过程中最主要的工艺参数，在有些钢种的技术条件中有明确的规定，一般不应小于 4。尤其是模块，对锻造比、镦粗比的要求更为严格。

2) 加热温度和升温速度。钢锭的加热温度是模具钢热加工最重要的工艺参数，一般与钢种的特性有关，主要取决于钢的化学成分。加热温度过高，会引起过热、过烧、晶粒粗大等缺陷，尤其是 Cr12 型冷作模具钢。加热温度过低，难以加工，也易出现裂纹，影响生产设备和效率。因此应严格规定钢的加热温度。为保证钢锭表面和中心部位的温度梯度小和减小热应力、组织应力，防止裂纹的产生，应缓慢升温，并分几段预热保温，然后逐渐升温到加热温度，中、高合金模具钢的冷锭一般不要高于 600℃ 装炉。

3) 终锻温度的选择。在锻造过程中，在确保钢材不出现裂纹的情况下，应尽量用较低的终锻温度，这样会获得更细小的晶粒。此外，对于某些莱氏体钢，在锻造时应避免终锻温度过低，否则会使工件产生角裂和边裂。

4) 变形工艺与锻造比。模具钢的变形可以使用多种变形方式，冶金厂一般以拔长为主，对于大断面的材料或模块，为了保证质量，有时采用镦拔，即根据需要进行镦粗或拔长，这是增加锻造比的主要方式。在变形过程中，应注意变形量的控制。对于如 Cr12 型的冷作模具钢，每次的变形量不宜过大，以免出现裂纹。用精密锻造机生产开坯时，尤其要注意变形道次和每道次变形量的设计，并对钢锭（钢坯）的加热温度进行控制，以免发生孔洞缺陷，因为精密锻造机锤击力小且高频锻打，这对变形抗力大的难变形钢种十分有利，但由此造成钢材的表面变形，从而易形成孔洞。

5) 钢坯的冷却条件。大多数模具钢锻后或轧后要求缓冷或红送退火，在缓冷坑中缓冷时，注意入坑的温度和缓冷坑的保温性能，一般钢种在锻后入坑，保温时间不少于 48h。常用工模具钢的热加工参数见表 2-18。

表 2-18 常用工模具钢的热加工参数

钢种	加热温度 / °C		始锻温度 / °C		终锻温度 / °C		冷却方式	
	钢锭	钢坯	钢锭	钢坯	钢锭	钢坯	钢锭	钢坯
9SiCr	1150 ~ 1210	1100 ~ 1150	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	800 ~ 850	800 ~ 850		缓冷
9Cr2	1170 ~ 1200	1120 ~ 1180	1130 ~ 1150	1100 ~ 1130	≥850	≥850		
5CrW2Si	1180 ~ 1200	1150 ~ 1170	1150 ~ 1180	1120 ~ 1150	≥850	≥850		
Cr12	1140 ~ 1160	1120 ~ 1140	1110 ~ 1140	1080 ~ 1100	900 ~ 920	880 ~ 900		缓冷或 红送退火
Cr12MoV	1140 ~ 1170	1100 ~ 1140	1110 ~ 1140	1000 ~ 1060	850 ~ 920	850 ~ 900		
Cr12Mo1V1	1140 ~ 1160	1100 ~ 1140	1110 ~ 1140	1000 ~ 1060	850 ~ 900	850 ~ 900		
9Mn2V	1140 ~ 1180	1080 ~ 1120	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	800 ~ 850	850 ~ 800		缓冷
CrWMn	1150 ~ 1200	1100 ~ 1150	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	800 ~ 850	800 ~ 850		
6W6Mo5Cr4V	1100 ~ 1180	1100 ~ 1140	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	≥900	≥850		缓冷或 红送退火
5CrMnMo	1150 ~ 1180	1100 ~ 1150	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	800 ~ 880	800 ~ 850		
5CrNiMo	1150 ~ 1180	1100 ~ 1150	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	800 ~ 880	800 ~ 850		
4CrMnSiMoV	1160 ~ 1180	1100 ~ 1150	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	≥850	≥850		
3Cr2W8V	1150 ~ 1200	1130 ~ 1160	1100 ~ 1150	1080 ~ 1120	850 ~ 900	850 ~ 900		
4Cr5MoSiV	1150 ~ 1180	1120 ~ 1150	1100 ~ 1150	1070 ~ 1100	≥900	900 ~ 850		
4Cr5MoSiV1	1150 ~ 1180	1120 ~ 1150	1100 ~ 1150	1070 ~ 1100	≥900	900 ~ 850		
5Cr4Mo2W2VSi	1150 ~ 1180	1130 ~ 1160	1100 ~ 1140	1080 ~ 1100	≥900	≥850		
3Cr3Mo3W2V	1170 ~ 1200	1150 ~ 1180	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	≥900	≥850		
W6Mo5Cr4V2	1170 ~ 1190	1140 ~ 1160	1080 ~ 1100	1040 ~ 1080	≥950	≥900		
3Cr2Mo	1160 ~ 1200	1150 ~ 1180	1100 ~ 1160	1100 ~ 1150	≥820	≥820		
3Cr2MnNiMo	1160 ~ 1200	1150 ~ 1180	1100 ~ 1160	1100 ~ 1150	≥820	≥820		

2.4.5 模具钢的退火

1. 模具钢钢锭的退火

1) 大多数模具钢的钢锭除红送锻造或轧制外,一般均进行退火处理,可以防止由于组织应力和热应力产生裂纹,对于那些易产生白点的钢种,可以预防白点的产生,另外,还可以通过退火处理改善钢锭凝固时的偏析和清除钢锭表面的缺陷。常用模具钢钢锭的退火方法有:去应力退火、完全退火和不完全退火、预防白点退火、高温均匀化退火等。

2) 均匀化退火处理是近些年来比较实用的改善钢锭显微偏析的方法。均匀化需要较长的时间,退火的温度与钢种有关系。通常在 A_{c3} (A_{cm}) 以上 $150 \sim 360^\circ\text{C}$ 进行,温度过高时莱氏体钢很容易过烧。一般合金钢的均匀化温度为 $1200 \sim 1280^\circ\text{C}$ 。

3) 对于大多数模具钢钢锭,退火的目的是消除组织应力和热应力,以防止钢锭在

较长时间的放置或热加工时产生裂纹,因此,只需要普通退火处理即可。但很多模具钢钢锭在浇注后经缓冷,不能完全消除内应力,在存放的过程中容易发生炸裂,尤其是高淬透性的钢种和莱氏体钢,例如 4Cr5MoSiV1、Cr5Mo1V、Cr12Mo1V1、Cr12 等。所以钢锭脱模后,均应及时退火,否则易发生炸裂,尤其是在寒冷地区的冬季。

2. 模具钢材的退火

经过锻造或轧制的模具钢材,一般都以退火状态交货。钢材退火是为了获得良好的内部组织和状态,以便于模具零件的加工和热处理。所以模具钢除对退火硬度有要求外,对模具钢退火后的珠光体球化级别、碳化物网和带等也均有较严格的要求。对钢材的退火温度、冷却速度和保温时间都应仔细研究。

1) 球化退火是模具钢材最常用的退火工艺方法。其工艺特点是通过控制加热温度、保温时间和冷却速度等工艺参数,使碳化物球状化,得到球状珠光体组织,降低硬度、提高塑性和韧性,以改善材料的力学性能。退火后的组织一般由铁素体基体和粒状碳化物组成,其性能是两种机械混合物的综合。铁素体本身的硬度取决于合金元素的固溶强化、晶界强化和位错强化。而碳化物在基体上的分布、数量、形态对性能会产生重要作用,钢中碳含量的升高、碳化物数量的增加、碳化物弥散分布都相应提高钢的退火硬度。

2) 冶金厂一般采用等温退火或连续退火。从本质上讲,没有区别。但在等温时,一定要注意等温温度。连续退火时一般冷却速度不要超过 $30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。

2.4.6 模具钢的无损检测

模具属于重要工艺装备,用模具成形的产品精度高、一致性好、外形美观,体现出技术密集、资金密集和高社会效益的特点,制造模具的模具钢必须充分保证质量,才能生产出合格的模具。无损检测 (NDT) 就是在不损伤构件性能和完整性的前提下,检测构件金属的某些物理性能和组织状态,以及查明构件金属表面和内部各种缺陷所有技术手段的总称。即是利用声、光、磁和电等特性,在不损害或不影响被检对象使用性能的前提下,检测被检对象中是否存在缺陷或不均匀性,给出缺陷的大小、位置、性质和数量等信息,进而对被检对象所处技术状态,如合格与否、剩余寿命等进行判定。

1) 模具钢生产厂普遍对钢材和钢坯进行在线无损检测,对模具钢的钢坯和钢材进行检测。一般对钢坯和大型钢材的表面缺陷,采用磁粉检测;小于 $\phi 30\text{mm}$ 的小直径钢材的表面缺陷采用涡流法检测,可以自动记录缺陷和进行分选,通过速度可达 $40\text{m}/\text{min}$ 。

2) 对于非磁性材料和不规则形状的合金工模具钢钢材 (如模块、轧辊等),采用渗透着色法检验表面缺陷;对于内部缺陷,则采用超声波检测。在检测前,钢材都经过清理,除盘条外,一般都采用自动喷丸设备去除氧化皮,对盘条则采用酸洗法。

3) 对于高合金模具钢为了保证质量,在无损检测以前,钢坯都经过砂轮机剥皮。一般钢坯、钢材检验以后,采用高效修磨机进行局部缺陷清除。

2.4.7 钢材的深度加工

1) 为了增加高附加值模具钢精料和制品的生产,以及满足用户的要求,模具钢生产厂都应有设备完善的精料工厂或制品车间。热轧材要求两端切齐并进行倒角。各厂一般都配备高精度、高效率的连续拉拔机和高效无心磨床、辊光机、倒角机、精密矫直机等装备,生产不同要求的模具钢精料,甚至直接供应经过粗加工热处理后的模块。

2) 有的企业还专门成立了模具钢制品公司,配备了各种机械加工中心、精密数控机床、电加工机床、热处理设备,批量生产供应经机械加工和淬、回火处理的模具钢模块、标准模架和各种模具用标准件等高附加值制品。

第3章 模具材料的选择

在模具及其零件的设计、制造过程中，选择原材料是至关重要的内容。模具设计时，如果材料不确定，就无法安排制造的加工路线和成形工艺方法，也无法估算制造成本。材料影响着模具产品的功能适用性、耐用度（寿命）、可靠性（安全）。应根据模具的生产条件和工作环境的需要，结合模具材料的基本性能和相关因素，来选择适合模具要求、经济合理、技术上先进的模具材料。

3.1 模具材料的选用原则

1. 满足使用性能原则

使用性能包括力学性能、物理性能和化学性能。对于模具零件，一般是在分析其工作条件和失效形式的基础上，提出力学性能要求。

1) 对于承受冲击载荷、循环冲击载荷的模具及零件，如锤杆、锻模等，失效形式主要是过量变形与疲劳断裂，要求选用综合力学性能较高的材料。

2) 对于承受交变载荷的模具及零件，其失效形式主要是疲劳破坏，要求疲劳强度高。承载较大的零件常选用淬透性较高的合金钢材料，进行调质处理；也可进行表面淬火、喷丸、滚压等处理，提高疲劳强度。

3) 对于承受载荷不大、摩擦较大的模具及零件，失效形式主要是磨损，要求耐磨性好。可选用高碳钢和高碳合金钢，进行淬火和低温回火，获得高硬度、高耐磨性。

4) 对于承受交变载荷且摩擦力较大的模具及零件，失效形式主要是磨损与断裂，要求外硬内韧，有较好的耐磨性，较高的疲劳强度。可选用中碳钢或中碳合金钢，经正火或调质后再进行表面淬火、低温回火。

5) 对于承受大冲击载荷和要求耐磨性高的模具及零件，要有较高的变形抗力和表面硬度。可选用低碳钢、低碳合金钢，经渗碳后进行淬火、低温回火；对于要求硬度、耐磨性更高，热处理变形小的精密零件，可选用专门的氮化用钢，进行渗氮处理。

2. 考虑工艺性能原则

工艺性能包括铸造性能、可锻性、焊接性、切削加工性能和热处理性能等。

(1) 铸造性能

常用材料的高温流动性和冷却成形后的收缩性来衡量。同种材料成分接近共晶点的合金铸造性能好。铸造铝合金、铸造铜合金和铸铁的铸造性能好，优于铸钢。铸铁中灰铸铁的铸造性能最好。

(2) 可锻性

常用材料的塑性、变形抗力等来衡量。通常低碳钢可锻性优于高碳钢，碳素钢比合

金钢可锻性好。

(3) 焊接性

常用形成焊接裂纹、气孔的倾向和焊接强度来衡量。铝合金、铜合金焊接性较差，灰铸铁基本上不能焊接。焊接材料主要是钢材，碳当量小的材料（ $<0.4\%$ ）焊接性较好；碳含量和合金元素含量越高，焊接性越差。

(4) 切削加工性能

常用允许的最高切削速度、切削抗力、切削后零件的表面粗糙度等衡量。碳素钢、合金钢、铸铁等具有一般的切削加工性能；铝合金切削加工性能好；奥氏体不锈钢、高速工具钢和耐热钢最差；加入易切削元素的材料，切削加工性能会改善。一般材料硬度为170~230HBW时，切削加工性能好。

(5) 热处理性能

常用淬透性、淬火变形与开裂倾向、过热敏感性、氧化脱碳倾向来衡量。碳素钢淬透性较差，淬火易变形开裂；合金钢淬透性优于碳素钢；铝合金固溶加热温度要求较严，铜合金中只有很少的几种可用热处理强化。

3. 注重经济性原则

模具零件材料选择，首先要满足使用性能要求和工艺性能要求。在这个前提下，还有一个较大的选择空间，因为能满足要求的材料有多种，最终选择哪一种，决定于经济性。不计成本，必然导致产品缺乏市场竞争力。一个企业的一切技术经济活动，它的最终的现实目标就是盈利。无利可图的产品及企业必然被淘汰，所以经济性原则为一重要原则。

经济性原则不仅考虑选用材料价格相对便宜，还应考虑加工费用及管理费、采购费等构成的零件的制造总成本。对于一些重要、精密、加工复杂的零件及使用周期长的工模具，还应考虑其使用寿命，综合比较其经济性。

经济性有广义和狭义之分。狭义而言是以最低的价格获得满意的原材料。一般选材应从广义经济性或称综合经济性着手，即除了材料的采购价格外，还包括它的包装、运输、保管、特殊要求等附加费用。更进一步，还包括由于“用料考究”而使模具寿命延长及制品质量提高，使制造成本降低、生产率提高等所创造的经济效益。就是说，一套模具，由于选材的正确，可以使从设计、制造、生产、使用、维修，直到失效所产生的全部经济效益收益高。在选材时应注意如下方面。

(1) 模具材料的价格

1) 不同的品位（质）、不同的尺寸、不同的包装、不同的运输等都有附加费用，也应计算在内。如以模具钢4Cr5MoSiV1（H13）为例，经过电渣重熔精炼的钢，比一般电炉熔炼的模具钢，要提高价格34%左右；高级优质钢要加价6%；钢材定尺，加价14%。一般加价项目有十余项，有些还需要供需双方协议定价，可见同一钢号不同质量、尺寸、热处理、锻造的价格相差很大。若是不同国家、不同地区、不同生产厂其价格差异就更大了。国外有些国家通过模具行业协会，统计出两个指标，一个称为价格比，即同一性能、用途相近的钢，以某一通用材料为基准，相互比较，可排列出价格高

低次序, 价格高低就可比较出来, 虽然是个相对数据, 但价格高低一目了然, 利于用户选择。另一个指标为市场性, 其意为市场供应状况, 采购 (或订购) 是否方便 (采购费用高低)。在市场经济条件下, 模具材料的价格是随市场供求关系的变化而波动的。所以, “价格比” 参数和 “市场性” 参数也只是在某一地区、某一时段有效。

2) 在模具制造中, 材料费用占模具总成本的 10% ~ 15%, 而加工费用占 80% 以上。材料对加工费用影响极大, 因为加工的难易取决于材料的工艺性, 选材不当工艺性差或加工周期长, 则加工费用明显提高。在计算成本时可以分开计算, 但在评估成本时, 两者是不可分割的。因此, 往往在选材提到经济性原则时, 提出经济上合理, 这比单纯追求廉价更明智。合理即综合经济性好。若采用优质材料, 虽然材料名义价格高, 但加工性能好, 工艺成本大大降低, 其创造的经济效益好, 就是合理了。

(2) 模具材料的品质

我国钢的分类按品质分有普通钢、优质钢、高级优质钢 (牌号中带 A)、特级优质钢 (牌号中带 E) 和超级优质钢 (牌号中带 C) 等。模具重要零件 (工作零件或成形零件) 的原材料, 主要是合金工具钢和高速工具钢等特殊质量钢。特殊质量钢是在生产过程中需要特别严格控制质量和性能的钢, 其质量控制的指标在其所属的标准中有规定, 在钢号的表示上用代表符号标明, 如 A、E、C 等。外国钢号不标质量等级, 而标注所用精炼方法或作了某种改进、改良, 如 ESR 表示经电渣重熔, VAM 表示真空自耗重熔, VTM 表示真空感应炉熔炼, MOD 表示作某种改进的等。质量越高, 价格越高。在选材时, 要掌握 “恰如其分, 用得其所”。

(3) 注重标准和标准化

在模具设计、材料制造等诸方面已经建立了一系列的标准。在选材时可以参照标准推荐的材料, 结合自身条件和经济性要求, 从中选择合适的、最经济的、符合自身生产条件的模具零件材料。我国已制定实施模具用钢及热处理技术条件行业标准, 选材时可参考。

① JB/T 6057—1992 《塑料模具成型部分用钢及其热处理 技术条件》。

② YB/T 129—1997 《塑料模具钢模块技术条件》

③ JB/T 6058—1992 《冲模用钢及其热处理 技术条件》。

④ JB/T 7715—1995 《冷锻模具用钢及热处理 技术条件》。

⑤ JB/T 8431—1996 《热锻成形模具钢及其热处理 技术条件》。

选材时, 不仅要注意钢号, 而且要查阅它属于哪个标准。如我国的 SM3Cr2Mo 钢是源于美国的 P20。我国的合金工具钢标准与美国不完全相同, 即使化学成分完全相同, 也不能等同看待。凡已注册的中国标准钢号应按国家的标准选材。

不仅选择原材料时应尽可能选择标准材料, 模具中的许多零件, 尤其是结构零件, 其尺寸和结构特征也被标准化了, 如模架部件、导柱和定位零件、浇口系统的套类零件。推出系统的推杆、推管、脱模板等以及紧固件, 甚至型芯或镶件等也已经被标准化形成标准零件了。以压铸模为例, 其标准零件用材可参见 GB/T 4678.1 ~ 19—2003 《压铸模零件》。设计时应优先选用标准件。

选用标准零件的优越性,除降低设计成本外,还可提高模具零件的通用性、互换性;大大缩短制造周期、降低制造成本、减少制造工作量;不需要昂贵的仓储费用、管理费用;失效模具可以分拆,其中部分零件可再次利用;便于计算成本,专业制造厂容易对外报价等。

(4) 选用“近终形”型材和制品

现代模具零件制造可以采用铸造成形、挤压成形和切削加工成形等多种方法。目前切削加工成形仍然是主要方法,模具制造费用占模具总费用(成本)的80%以上。所以如何简化加工、减少加工量是制造者所关注的。为了使模具制造厂减少切削加工量,缩短生产周期,模具材料供应企业为用户提供“近终形产品”,即钢厂提供各种规格尺寸的板材、丝材、扁钢,模块或经过精加工(扒皮)的模块而且是经过严格检测的精加工品等;或者提供易切削的或者预硬化的模具钢;或者提供微合金化非调质钢,免去或减少用户自己热处理工序。1997年我国制定了《塑料模具钢模块技术条件》(YB/T 129—1997)、《塑料模具用热轧厚钢板》(YB/T 107—1997)和《塑料模具用扁钢》(YB/T 094—1997)三个标准,就是向这个方向发展的结果。今后还会有更多的“近终形”产品供应模具制造业,降低模具制造成本。

(5) 选用通用性材料

模具材料的通用性是指该材料具备多种性能和用途,适合于不同的模具零件,因而市场供应量充足,市场性好,价格也相对便宜。从单项特性看与具有特性的专门用钢相比可能逊色些,但也能满足基本要求。模具材料一般用量不大,如果一个企业采用的材料品种、规格太多太杂,在管理上很不方便,利用率不高。如果量大面广,则会库存积压,采购成本增加。通用性材料一般应用历史悠久,积累了较多的生产和使用经验,性能数据比较丰富和完整,因此比较成熟,有利于借鉴,为己所用。

(6) 根据模具生产制品的数量与材质特性选材

1) 模具生产制品的数量对选材经济性有一定影响。如某些塑料生活用品,其款式、品种、花样变化很快,不断地在更新换代,因此不一定需要有很长的使用寿命,可选用低档便宜的材料制造。反之,生产批量很大时,要求模具有长寿命,维修周期也要长,此时用高档材料也是节约的,直观的材料费用虽然大,但综合经济效益好。

2) 模具生产制品的材质和特性对选材也有影响。如受腐蚀作用的塑料模具零件,当然要用耐蚀钢或可渗氮、镀铬(但要无公害工艺)等钢种。又如钢铁、铜合金的压铸模,铜合金、钴及镍合金的热挤压模具,由于工作温度很高,一般的热作模具钢难以胜任,只能采用昂贵的钨基、镍基高温合金制造。生产磁性塑料制品时,要求使用在强磁场中不产生磁感应的冷作模具、塑料模具,就应采用无磁模具钢制造。

3) 根据模具大小选材。小型模具零件重量很轻,材料费用所占总成本的比例相对要小很多,可以选用高档的工艺性好的材料以节约制造费用;反之大尺寸大重量的零件(一个零件有几吨或几十吨重),则要选用经济型的材料。

3.2 模具材料的选择方法与实例

模具材料是模具制造的基础,合理地选择模具材料,正确采用加工方法和热处理工艺,是保证模具质量、提高使用寿命、降低制造成本的关键。

3.2.1 冷作模具材料的选择

冷作模具是指在冷态(室温)条件下完成对金属或非金属进行塑性变形的模具。如冲模、拉深模、剪切模、冲裁模、冷挤压模、冷镦模、拉丝模、滚丝模、压印模和粉末压制模等。冷作模具因材料因素失效主要是磨损,其次是因强度、韧度不够而导致的开裂、折断、崩刃等。

1. 常用冷作模具材料的性能比较(表 3-1)

表 3-1 常用冷作模具材料的性能比较

钢号	工作硬度 HRC	耐磨性	韧度	淬火 不变形性	淬硬深度	可加工性	脱碳 敏感性
Cr12	58 ~ 64	好	差	好	深	较差	较小
Cr12MoV	55 ~ 63	好	较差	好	深	较差	较小
9Mn2V	58 ~ 62	中等	中等	较好	较浅	较好	较大
CrWMn	58 ~ 62	中等	中等	中等	较浅	中等	较大
9SiCr	57 ~ 62	中等	中等	中等	较浅	中等	较大
Cr4W2MoV	58 ~ 62	较好	较差	中等	深	较差	中等
6W6Mo5Cr4V	56 ~ 62	较好	较好	中等	深	中等	中等
W18Cr4V	60 ~ 65	好	较差	中等	深	较差	小
W6Mo5Cr4V2	58 ~ 64	好	中等	中等	深	较差	中等
5CrW2Si	54 ~ 58	较好	较好	中等	深	中等	中等
T10A	56 ~ 62	较差	中等	较差	浅	好	大
Cr2	58 ~ 62	中等	中等	中等	较浅	较好	较大
6Cr4W3Mo2VNb (65Nb)	57 ~ 61	较好	较好	中等	深	较差	较小
7Cr7Mo2V2Si (LD)	57 ~ 62	较好	较好	中等	深	较差	较小
7CrSiMnMoV (CH1)	57 ~ 61	较好	较好	好	较深	中等	中等
6CrNiMnSiMoV (GD)	57 ~ 62	较好	较好	好	较深	中等	中等
8Cr2MnWMoVS (8Cr2S)	58 ~ 62	较好	中等	好	较深	较好	中等
5CrNiMo	47 ~ 51	中等	好	较好	较深	好	中等
60Si2Mn	47 ~ 51 57 ~ 61	中等	中等	较差	较深	较好	较大
65Mn	47 ~ 61 57 ~ 61	中等	中等	较差	较深	较好	较小
40Cr	45 ~ 50	差	中等	中等	中等	好	小
5Cr4Mo3SiMnVAI (012Al)	52 ~ 54	较好	较好	好	深	较差	较大

2. 常用冷作模具材料的选择（表 3-2）

表 3-2 常用冷作模具材料的选择

类别	模具名称	使用条件	推荐使用钢号	代用钢号	工作硬度 HRC
剪 切 模	直剪刀 (长剪刀)	薄板（<3mm）	MnCrWV ^①	T8A、9CrWMn	57~60
		中板（3~10）mm	9SiCr	T10A、5CrWMn	56~58
		厚板（>10mm）	5CrW2Si	5SiMnMoV	52~56
		硅钢片及不锈钢、耐热钢薄板	Cr12MoV	—	57~59
	圆剪刀 (圆盘剪)	薄板	9SiCr	Cr12MoV	57~60
		中板	5CrW2Si	—	52~56
		硅钢片	Cr12MoV	—	57~60
	成形形刃	普通圆钢（一般）	T8A	8Cr3、Cr12MoV	54~58
		圆钢（小型高寿命）	6W6Mo5Cr4V	—	58~60
		型钢	5CrW2Si	5CrNiMo	52~56
			5CrWnMo	5CrMnMoV	48~53
冲 裁 模	轻载冲裁模 (<2mm)	薄板、中板	T10A	T8A、60Si2Mn	54~58
		厚板	5CrW2Si	6CrW2Si	52~56
		奥氏体钢薄板	Cr12MoV	W18Cr4V	58~60
		高强度钢板	65Nb	6W6Mo5Cr4V	58~60
		偏心载荷	55NiMoV	5SiMnMoV	57~60
		<0.3mm 软料箔带	T10A	T8A	56~60（凸模） 37~40（凹模）
		硬料箔带	MnCrWV ^①	CrWMn	62~64（凹模）
		小批量、简单形状	T10A	Cr2	48~52（凸模）
		中批量、复杂形状	MnCrWV	9Mn2V	58~62
		高精度要求	Cr2	CrWMn	(易脆折件 56~68)
成 形 模	轻载拉深模	大批量生产	MnCrWV	9CrWMn	
		高硅钢片(小型)	Cr12MoV		
		(中型)	Cr6WV	Cr4W2MoV	
		各种易损小冲头	Cr12		
			Cr12MoV	Cr12MoV	
			W6Mo5Cr4V2	W18Cr4V	59~61
		中厚钢板及高强度薄板	C12MoV		54~56（复杂）
			Cr4W4MoV		56~58（简单）
		易损小尺寸凸模	W6Mo5Cr4V2	W18Cr4V	68~61
		简单圆筒拉深	T10A	Cr2	60~62
成 形 模	轻载拉深模	成形浅拉深	MnCrWV ^①	9Mn2V	
		大批量用落料或拉深复合模	Cr12MoV	CrWMn	60~62
		(普通材料薄板)		Cr6WV	58~60

(续)

类别	模具名称	使用条件		推荐使用钢号	代用钢号	工作硬度 HRC
成形模	重载拉深模	大批量小型拉深模 大批量大、中型拉深模 耐热钢、不锈钢拉深模		SiMnMo Ni ~ Cr 合金铸铁 Cr12MoV (大型) CrW5 (小型)	Cr12 球墨铸铁 GT15	60 ~ 62 45 ~ 50 65 ~ 67 (渗氮) 64 ~ 66
	弯曲模、 翻边模	轻型、简单 简单易裂 轻型、复杂 大量生产用 高强度钢板及奥氏体钢板		T10A T7A MnCrWV ^① Cr12MoV Cr12MoV	9CrWMn	57 ~ 60 54 ~ 56 57 ~ 60 67 ~ 60 65 ~ 67 (渗氮)
	大中型变板机 通用模具	互换性要求严格、 形状复杂		5CrMnMo	5CrNiMo	42 ~ 48
冷精压模	刻印精压模	非铁金属 钢件 不锈钢等高强度材料		V Cr6WV 6W6Mo5Cr4V 6Cr4W3Mo2VNB	9Cr2 Cr12WMoV 5CrW2Si	58 ~ 60
	平面精压模	非铁金属 钢件		T10A Cr12MoV	Cr2	59 ~ 61 59 ~ 61
	立体精压模	浅型腔 复杂型腔		Cr2 Cr6WV 5CrNiMo 9Cr2	GCr15、9Cr2 5CrW2Si 5CrMnMo	60 ~ 62 56 ~ 58 64 ~ 56 67 ~ 60
冷挤压模	轻载冷挤压模	铝合金 (单位压力 < 1500MPa)		Cr2 (小型) Cr12MoV (中型)	MnCrWV ^① Cr12MoV	60 ~ 62 56 ~ 58
	重载冷挤压模	钢件 (单位压力 1500 ~ 2000MPa) 钢件 (单位压力 2000 ~ 2500MPa)		6W6Mo5Cr4V (凸模) Cr12MoV (凹模) W6Mo5Cr4V2 (凸模)	W6Mo5Cr4V2 65Nb、CrWMn W18Cr4V	60 ~ 62 58 ~ 60 61 ~ 63
	模具型腔 冷挤压凸模	一般中、小型 大型复杂件 复杂精密件 成批压制用 高单位压力 (> 2500MPa)		9SiCr 5CrW2Si Cr12MoV 6Cr4W3Mo2VNB W6Mo5Cr4V2	Cr2、T10A Cr6WV 6W6Mo5Cr4V W18Cr4V Cr12	59 ~ 60 59 ~ 61 (渗碳) 59 ~ 61 59 ~ 61 61 ~ 63
冷锻模	切料刀片	整体式	小规格 大、中规格	T10A、GCr15 9SiCr	W18Cr4V Cr12MoV	58 ~ 60 56 ~ 58
	切料模	整体式	小规格 大、中规格	9SiCr GCr15、T10A	W18Cr4V Cr12MoV	58 ~ 60 56 ~ 58
	光冲	整体式	小规格 大、中规格	T10A	W18Cr4V 9Cr2	59 ~ 61 57 ~ 59
	压球模	整体式	小规格 大、中规格	YG20 GCr15、Cr12MoV	YG20C 65Nb	— 57 ~ 59
	切边模	整体式	小规格 大、中规格	Cr12MoV 9SiCr	65Nb W6Mo5Cr4V2	
	凹模	整体式	< M6 > M6	9SiCr、Cr12MoV T10A	— MnSi、9Cr2	59 ~ 61 56 ~ 69

(续)

类别	模具名称	使用条件		推荐使用钢号	代用钢号	工作硬度 HRC
冷 镦 模	凹模	组合式	模芯 > M10	Cr12MoV W6Mo5Cr4V2	65Nb、YG20C	52 ~ 59 57 ~ 61
			模芯 < M10	YG20	GT35、TLMW50	
			模套	T10A、GCr15 60Si2Mn	5CrNiMo	48 ~ 52 (内) 44 ~ 48 (外)
	成形冲头	凹穴冲头 (中、小型规格)		60Si2Mn 5CrMnMo	Cr2	57 ~ 59 57 ~ 59
		外六角冲头 (大、中规格)		Cr12MoV Cr6WV	6W6Mo5Cr4V	57 ~ 59 52 ~ 56
		内六角冲头	中、小规格 大规格	60Si2Mn W6Mo5Cr4V2 W18Cr4V W18Cr4V	Cr2 6W6Mo5Cr4V	52 ~ 57 59 ~ 61
		十字冲头	小规格 大规格	W6Mo5Cr4V2 60Si2Mn	Cr12 6W6Mo5Cr4V	59 ~ 61 55 ~ 57
冷 滚 压 模	冲孔冲头	强烈磨损和断裂		W18Cr4V	W6Mo5Cr4V2	59 ~ 61
	搓丝板	≤ M20		9SiCr	Cr12MoV	58 ~ 61
	滚丝模及 滚齿纹模	一般 螺距 > 3mm		Cr12MoV	Cr6WV 9SiCr	58 ~ 61 56 ~ 58
		梯形螺纹、齿纹				54 ~ 58
拉 拔 模	成形滚压模	型材校直辊, 无缝金属管轧辊等		9Cr2	Cr2	61 ~ 63
	钢管、圆钢 冷拔模	强烈磨损、咬合及张应力作用, 特殊形状规格		T10、Cr2、45 Cr12MoV	石墨钢 Cr12	(碳氮共渗淬火) 61 ~ 63 (渗碳淬火) 40 ~ 45 (心部) 61 ~ 63 (表面)
粉 末 压 制 模	粉末冶金压模	简单凹模		Cr12MoV	W18Cr4V	62 ~ 64
		复杂凹模		3Cr2W8V		64 ~ 66 (渗氮)
		简单凸模		Cr12MoV	MnCrWV ^①	58 ~ 62
		复杂凸模		Cr6WV	Cr2	54 ~ 56
	耐火材料压模	一般型芯 模板		W6Mo5Cr4V2 20Cr (渗碳) Cr12MoV	W18Cr4V	60 ~ 62 60 ~ 62
塑 料 模	陶瓷压模	简单		Cr2	T10	
		复杂		Cr12MoV	CrWMn、Cr12	58 ~ 62
	胶木模	冷压型腔 小型切断型腔		20Cr T10A、9Mn2V 12CrNi3A	20、40Cr T7A、MnCrWV ^①	52 ~ 56 (渗碳) 54 ~ 58
		大、中型模具		5CrMnMo	5CrNiMo	52 ~ 56
	注射模	冷压型腔 高强度塑料		20Cr T10A、9Mn2V 12CrNi3A	20、40Cr T7A、MnCrWV ^①	52 ~ 56 (渗碳) 54 ~ 58
		软质塑料		5CrMnMo T7A、40Cr	5CrNiMo 12CrNi3A	52 ~ 56 28 ~ 32
	强磨损塑料模	玻璃云母粉、石英砂填料		Cr12MoV	Cr12	60 ~ 62

① MnCrWV 美国钢号 O1 (AISI)。

3. 冷作模具材料的选用实例

(1) 冲模材料的选择

冲模材料应根据被加工工件的材料种类、厚度、生产批量、尺寸和形状复杂程度、工作载荷大小、失效形式、模具成本等因素，合理地进行选择，见表 3-3。

表 3-3 冲模材料的选用举例及硬度要求

模具类型		工作条件	推荐选用的材料牌号		硬度 HRC	
			中、小批量生产	大量生产	凸模	凹模
冲裁模	硅钢片冲模	形状简单，冲裁硅钢薄板厚度≤1mm的凸、凹模	CrWM、Cr6WV、(C12)、(Cr12MoV)	YG15、YG20 或 YG25 硬质合金；YE50 或 YE65 钢结硬质合金（另附模套，模套材料可采用中碳钢或 T10A）	60 ~ 62	60 ~ 64
		形状复杂，冲裁硅钢薄板厚度≤1mm的凸、凹模	Cr12、Cr4W2MoV、Cr12MoV			
	钢板落料、冲孔模	形状简单，冲裁硅钢薄板厚度≤4mm的凸、凹模	T10A、9Mn2V、9SiCr、GCr15	YG15、YG20 或 YG25 硬质合金；YE50 或 YE65 钢结硬质合金（另附模套，模套材料可采用中碳钢或 T10A）	薄板（≤4mm）58 ~ 60；厚板 < 56	薄板（≤4mm）60 ~ 62；厚板 < 56
		形状复杂，冲裁硅钢薄板厚度≤4mm的凸、凹模	CrWMn、9CrWMn、9Mn2V、Cr6WV			
		冲裁材料厚度>4mm，载荷较重的凸、凹模	Cr12、Cr12MoV、Cr4W2MoV、Cr2Mn2SiWMoV、5CrW2Si	同上，但模套材料需采用中碳合金钢		
	冲头	轻载荷（冲裁薄板，厚度≤4mm）	T7A、T10A、9Mn2V		φ<5mm，56 ~ 52； φ>10mm，52 ~ 56，56 ~ 60	—
		重载荷（冲裁薄板，厚度>4mm）	W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、6W6Mo5Cr4V			
	剪刀（切断模）	剪切薄板（厚度<4mm）	T10A、T12A、9Mn2V、GCr15		45 ~ 50	—
		剪切薄板的长剪刀	CrWMn、9CrWMn、9Mn2V、GCr15、Cr2Mn2SiWMoV		54 ~ 58	
		剪切薄板（厚度>4mm）	5CrW2Si、Cr4W2MoV、Cr12MoV		60 ~ 64	
	修（切）边模	形状简单	T10A、T12A、9Mn2V、GCr15		56 ~ 60	58 ~ 62
		形状较复杂	CrWMn、9Mn2V			
弯曲模	弯曲模（压弯模）	一般弯曲的凸、凹模	T7A、T10A、9Mn2V、GCr15		54 ~ 58	56 ~ 61
		载荷较重、要求高度耐磨的凸、凹模	Cr6WV、Cr12、Cr12MoV、CrW2MoV			

- 注：1. 当加工低硬度的纸板，软质塑料板，铝、镁、铜等非铁金属，且生产批量不大时，可选用碳素工具钢或低合金冷作模具钢作为模具材料；生产批量、模具尺寸较大时，可选用中高合金模具钢制造。
2. 对于大中型模具，制造工艺复杂，加工成本高，材料成本高，可选用高耐磨、高淬透性、变形小的高碳中铬钢、高铬钢、高速工具钢、基体钢、高强度低合金冷作模具钢制造。
3. 对于大量生产的冲模，要求使用寿命高的可选用硬质合金或钢结硬质合金制造。

(2) 冷镦模材料的选择

根据冷镦模的工作条件及硬化层不能过浅也不能整个截面淬硬的特点，冷镦模材料

的选择，应根据模具零件不同部位的受力情况、截面大小、硬化层深度要求以及生产批量的大小等因素来决定。冷镦模的材料选用举例及工作硬度要求见表 3-4。

表 3-4 冷镦模材料选用举例及硬度要求

模具类型及零件名称			推荐选用的材料牌号		硬度 HRC
			中、小批量生产 (<10 万件)	大量生产 (>20 万件)	
冷作 镦头 (凹模)	开口模 整体模块	轻载荷、小尺寸	T10A	T10A	表面 59 ~ 62 心部 40 ~ 50
		轻载荷、较大尺寸	CrWMn、GCr15	CrWMn、GCr15	表面 > 62 心部 < 55
	整体模块	轻载荷、小尺寸	T10A	—	表面 59 ~ 62 心部 40 ~ 50
		轻载荷、较大尺寸	CrWMn、GCr15	—	表面 > 62 心部 < 55
	闭合模 嵌镶、 模块、 模芯	重载荷，形状复杂的大、中型模具	Cr6WV、Cr4W2MoV	YG15、YG20 或 YG25、 YG65、YE50	58 ~ 62
			(Cr12MoV)		58 ~ 62
			W18Cr4V、 W6Mo5Cr4V2		> 62
			6Cr4Mo3Ni2WV 6Cr4W3Mo2VNb		58 ~ 62
			4Cr5MoSiV、 4Cr5MoSiV1		
	嵌镶 模块、 模套	重载荷，形状复杂的大、中型模具	42CrMo、40CrMnMo、 4Cr5W2VSi、 4Cr5MoSiV、 4Cr5MoSiV1	六角螺母冷镦模 T7A、T10A	48 ~ 52
				钢球、滚子冷镦模 GCr15、CrWMn	
冷作冲头 (凸模)		轻载荷、小尺寸	T10A	—	58 ~ 60
		轻载荷、较大尺寸	CrWMn、GCr15		60 ~ 61
	重载荷		Cr6WV、Cr4W2MoV	YG15、YG20、YG25、 YG65、YE50 (另附模套)	56 ~ 64
			Cr12MoV		56 ~ 64
			W6Mo5Cr4V2		56 ~ 64
			6Cr4Mo3Ni2WV、 6Cr4W3Mo2VNb		56 ~ 64
切裁工具			T10A Cr4W2MoV、 Cr12MoV、 W6Mo5Cr4V2	—	切 60 ~ 62 滚 60 ~ 61 断 61 ~ 63 刀 64 ~ 65 刀 片 63 ~ 65 片 62 ~ 64
顶杆		冲击载荷较大，要求 韧性高	W6Mo5Cr4V2	—	57 ~ 59
		中等冲击载荷，要求 韧性和耐磨性都好	基体钢		58 ~ 60
		冲击载荷不大，但 要求高耐磨性	W6Mo5Cr4V2		62 ~ 63

- 注：1. 对于轻载荷的小型凹模，大都采用表面具有一定硬化层的整体模块。当要求硬化层深度不大时，可选用 T10A 钢（淬硬层 1.5 ~ 2mm）制造；如要求较深些的硬化层，则可选用低合金模具钢。
2. 对于载荷较重和形状较复杂的凹模，可选用高碳中铬钢或者用高速工具钢、基体钢制作的嵌镶模块，这种嵌镶模块可以用压入法或热套法嵌入用韧性较好的材料制成的内模套。产量较大时（如超过 20 万件）可选用钨钴类硬质合金制成的嵌镶模块，这类材料耐磨性高，且公差小，使用寿命长，足以补偿其高的成本费用。
3. 用于制作冷镦凸模（冷作冲头）的材料，应当有好的减摩性和耐磨性，还要有足够的硬度，以免在受冲击的地方塌陷。轻负荷时，大多数采用碳素工具钢（T10A 等）或低合金工具钢（GCr15、CrWMn）制造。在模具尺寸较大和重载时，采用与凹模相同的材料制成模块镶拼模具。
4. 切裁工具必须硬而耐磨，并需要一定的热硬性。顶杆要有好的韧性，同时也要求耐磨，选择这类辅助材料时，可根据具体情况来决定。

(3) 拉深模材料的选择

拉深模将室温的金属薄板在凸模和凹模之间拉深变形，形成近似于凸模形状的杯形工件。对拉深模的主要性能要求是具有高的强度和耐磨性，在工作中不发生粘附和划伤。根据工作条件推荐选择的拉深模材料见表 3-5。

表 3-5 拉深模材料的选用举例及硬度要求

零件名称	工作条件		推荐选用的材料牌号			硬度 HRC
	制品类别	拉深材料	小量生产 (<1 万件)	中批量生产 (<10 万件)	大量生产 (100 件)	
凹模	小型	铝合金或铜合金、 深冲用钢	T10A、GCr15、 CrWMn、 9CrWMn	CrWMn、 9CrWMn、 Cr6WV	Cr6WV、 Cr4W2MoV、 Cr12MoV	62 ~ 64
		奥氏体不锈钢	T10A (镀铬)、 铝青铜 QA19-4	铝青铜 QA19-4、 Cr6WV (渗氮)	Cr4W2MoV (渗氮)、 Cr12MoV (渗氮)、 YG 类硬质合金 ^⑥ 、 钢结硬质合金 ^⑥	
	大、中 型	铝合金或铜合金、 深冲用钢	低合金铸铁 ^①	低合金铸铁 ^④ 嵌镶模块：Cr6WV ^④ 、 Cr4W2MoV4 ^④	嵌镶模块： Cr6WV ^④ 、 Cr4W2MoV4 ^④ 、 Cr12MoV ^④	—
		奥氏体不锈钢	低合金铸铁 嵌镶模块： 铝青铜 ^④ QA19-4	嵌镶模块： Cr6WV (渗氮) ^④ 、 Cr4W2MoV4 (渗氮) ^④ 、 铝青铜 QA19-4 ^④	嵌镶模块： Cr6WV (渗氮) ^④ Cr4W2MoV (渗氮) ^④ Cr12MoV (渗氮) ^④ W18Cr4V (渗氮) ^④	
冲头 ^③ (凸模)	小型	—	T10A、 40Cr (渗碳)	T10A、 Cr6WV	Cr6WV、 Cr4W2MoV、 Cr12MoV	58 ~ 62
	大、 中型 ^⑤		低合金铸铁 ^②	CrWMn、 9CrWMn	Cr6WV、 Cr4W2MoV、 Cr12MoV	
压边圈	小型	—	T10A、 CrWMn、 9CrWMn	T10A、 CrWMn、 9CrWMn	T10A、 CrWMn、 9CrWMn	54 ~58
	大、 中型 ^⑤		低合金铸铁 ^①	低合金铸铁 ^①	CrWMn、 9CrWMn	

① 合金铸铁成分 (质量分数)：C 3%、Si 1.6%、Cr 0.4%、Mo 0.4%，摩擦面进行火焰淬火。
② 合金铸铁成分同①，仅是摩擦面火焰淬火到 <420HBW。
③ 冲头材料，除合金铸铁外，最好镀铬。
④ 嵌镶于经火焰淬火的低合金铸铁中。
⑤ 大、中型制品是指外径及高度 >200mm 者。
⑥ 硬质合金模胚外面必须镶套，模套材料可采用中碳钢或中碳合金钢。

(4) 冷挤压模材料的选择

冷挤压是在常温下利用模具在压力机上对金属以一定的速度施加相当大的压力，使金属产生塑性变形，从而获得所需形状和尺寸的工件（或产品）。因此冷挤压模具必须有高的强韧性，良好的耐磨性，一定的热疲劳性和足够的耐回火性。冷挤压模的材料选用举例及硬度要求见表 3-6。

表 3-6 冷挤压模的材料选用举例及硬度要求

模具名称	工作条件	推荐选择的模具材料		硬度 HRC
		中、小批量生产（<5 万件）	大批量生产（10~20 万件）	
凸模	冷挤压纯铜、软铝或锌合金	60Si2Mn、CrWMn、 Cr6WV、Cr5Mo1V、 Cr4W2MoV、Cr12MoV、 W18Cr4V	Cr4W2MoV（渗氮）、 Cr12MoV（渗氮）、 W6Mo5Cr4V2（渗氮） 基体钢、钢结硬质合金	60~64
	冷挤压硬铝、黄铜或铜件	Cr4W2MoV、Cr12MoV、 W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、 6W6Mo5Cr4V、7CrSiMnMoV、 7Cr7Mo3V2Si、6CrNiMnSiMoV、 基体钢	W6Mo5Cr4V（渗氮）、 基体钢（渗氮）、 钢结硬质合金、 YG15、YG20、YG25	60~64
凹模	冷挤压纯铜、软铝或锌合金	Ti10A、9SiCr、9Mn2V、 CrWMn、GCr15、 Cr6WV、Cr5Mo1V、 Cr4W2MoV	Cr4W2MoV、Cr12MoV、 W18Cr4V、钢结硬质合金、 YG15、YG20、YG25	60~64
	冷挤压硬铝、黄铜或铜件	CrW4Mn、Cr6WV、Cr5Mo1V、 Cr12MoV、Cr4W2MoV、 6W6Mo5Cr4V、7Cr7Mo3V2Si	Cr4W2MoV（渗氮）、 Cr12MoV（渗氮）、 W18Cr4V 或 6W6Mo5Cr4V（渗氮）、 基体钢（渗氮）钢结硬质合金、 YG15、YG20、YG25	58~60
顶杆		CrWMn、Cr6WV、Cr5Mo1V、 7Cr7Mo3V2Si	Cr4W2MoV、Cr12MoV、 6W6Mo5Cr4V、 基体钢	58~62

注：钢结硬质合金应外附模套，模套材料可采用中碳钢或中碳合金钢，如 45、50、40Cr 钢等。

(5) 拉丝模材料的选择

拉丝模属于变形量小的冷作压力加工模具，刃口部分承受强烈的摩擦力和径向弯曲力，因此要求高的硬度和耐磨性以及良好的抗粘附性能。其材料选择，主要是根据被加工材料的类别、线径大小、生产批量等因素和力求经济适用的原则来决定。拉丝模材料的选用举例及硬度要求见表 3-7。

(6) 螺纹压制模具材料的选择

压制螺纹的模具，常用的有搓丝板与滚丝轮。常用高速工具钢 W6Mo5Cr4V2、W18Cr4V 或中合金空淬冷作模具钢 Cr5Mo1V 制造。

1) 推荐的压制螺纹模具材料与淬火、回火硬度（表 3-8）。

表 3-7 拉丝模材料的选用举例及硬度要求

被加工材料类别	线径 / mm	推荐选择的模具材料				硬度 HRC
		圆形截面材料		异形截面线材		
		小量生产	大量生产	小量生产	大量生产	
碳素钢或合金钢	≤0. 20	Cr4W2MoV、 Cr12MoV	金刚石	W6Mo5Cr4V2	YG 类或钢 结硬质合金	58 ~ 64
	>0. 20	T10A、CrWMn	YG 类或钢结 硬质合金			
不锈钢	≤0. 30	Cr4W2MoV、 Cr12MoV	金刚石	W6Mo5Cr4V2	YG 类或钢结 硬质合金	
	>0. 30	T10A、CrWMn	YG 类或 钢结硬质合金			
铜	≤0. 60	Cr4W2MoV、 Cr12MoV	金刚石	Cr4W2MoV、 Cr6WV、 Cr12MoV	YG 类或钢结 硬质合金	
	>0. 60	T10A、CrWMn	YG 类或 钢结硬质合金			
铜合金或铝合金	≤0. 30	Cr12MoV、 Cr4W2MoV	金刚石	Cr4W2MoV、 Cr6WV、 Cr12MoV	YG 类或钢 结硬质合金	
	>0. 30	T10A、CrWMn	YG 类或钢 结硬质合金			
镁合金	≤0. 60	Cr4W2MoV、 Cr12MoV	金刚石	Cr4W2MoV、 Cr6WV、 Cr12MoV	YG 类或钢 结硬质合金	
	>0. 60	T10A、CrWMn	YG 类或钢 结硬质合金			

注：为防止金刚石和硬质合金制作的模块破裂，模坯外面必须镶套。模套材料可选用 45 或 50 钢，也可选 T7A、T10A 或 T12A 钢。拉丝模的工作应力很大时，应选用合金钢，常用钢号有 9SiCr、30CrMnSi、40Cr 或 4Cr5W2Si、4Cr5MoSiV。

表 3-8 推荐的压制螺纹模具材料与淬火、回火硬度

模具材料	推荐的淬火、回火硬度 HRC	
	搓丝板	滚丝轮
压制铝、铜合金或软钢材料		
Cr5Mo1V	57 ~ 60	56 ~ 58
Cr12Mo1V1	60 ~ 62	58 ~ 60
W6Mo5Cr4V2	58 ~ 60	58 ~ 60
压制高硬度钢（≥95HRB）或奥氏不锈钢坯料		
Cr5Mo1V	57 ~ 59	56 ~ 58
Cr12Mo1V1	59 ~ 61	58 ~ 60
W6Mo5Cr4V2	59 ~ 61	58 ~ 60

注：在压制螺纹过程中，搓丝板和滚丝轮反复受到很大的压应力和弯曲应力，在大批量生产中，特别是当压制高强度材料的工件时，载荷进一步增加，而且受到强烈的摩擦磨损。这要求制造压制螺纹模具的材料具有高强度、高耐磨性、良好的韧性和疲劳强度。为此，对于采用的模具钢淬火、回火硬度，就要兼顾钢的综合性能，一般采用较低的硬度。对于高速工具钢一般采用降低温度淬火的工艺，以适应模具对材料韧性的要求，在淬火后要求及时进行 2 ~ 3 次回火。

2) 压制螺纹模具用钢的选择（表 3-9）。

表 3-9 压制螺纹模具用钢的选择

搓丝板用钢选择		
工件材料	生产批量 / 件	
	5 × 10 ⁵	10 × 10 ⁵
铜、铝合金、软钢（ <95HRB）	Cr5Mo1V	Cr12MoV、Cr12Mo1V1
钢（硬度 ≥95HRB）	Cr5Mo1V、Cr12Mo1V1	Cr12Mo1V1
不锈钢	W6Mo5Cr4V2	W6Mo5Cr4V2
滚丝轮用钢选择		
工件材料	生产批量 / 件	
	5 × 10 ⁵	10 × 10 ⁵
铜、铝合金、软钢（ ≤95HRB）	Cr5Mo1V	Cr5Mo1V、Cr12Mo1V1、W6Mo5Cr4V2
钢（ ≥95HRB） 不锈钢	Cr5Mo1V、Cr12MoV	Cr12Mo1V1、W6Mo5Cr4V2 9Cr6W3Mo2V2

- 注：1. 压制螺纹的模具，常用的有扁平状的搓丝板和圆形的滚丝轮。最常用 W6Mo5Cr4V2、W18Cr4V 高速工具钢和 Cr12MoV、Cr12Mo1V1 高碳高铬型冷作模具钢及 Cr5Mo1V 中合金空淬冷作模具钢制造。工作条件比较苛刻的大直径和大螺纹工件，一般选用 W6Mo5Cr4V2、Cr12MoV、Cr12Mo1V1 高碳高铬型冷作模具钢制造。当压制软钢（ <95HRB）、铝合金、铜合金工件，生产批量不大时，搓丝板可选用 Cr5Mo1V、Cr12MoV、Cr12Mo1V1 等钢种，滚丝轮则采用 Cr5Mo1V。当压制硬度 ≥95HRB 的钢或不锈钢工件时，或生产批量较大时，搓丝板和滚丝轮都可采用 Cr12MoV、Cr12Mo1V1、W6Mo5Cr4V2 等钢种。
2. 当压制螺纹的工件坯料硬度达到 40 ~ 42HRC，生产高强度螺栓时，应用高韧性、高耐磨性的 9Cr6W3Mo2V2 钢，平均使用寿命可以达到 5000 件，是 Cr12MoV 钢（平均寿命 350 件）模具的十几倍。
3. 当模具采用淬火、回火再磨制螺纹的工艺流程时，为了防止磨削裂纹的产生，最好不采用高碳、高铬型模具钢，而采用 W6Mo5Cr4V2 钢较好，因为后者对磨削裂纹的敏感性要低一些。

(7) 精密冲裁（简称精冲）模具材料的选择

根据模具的使用性能，具有较高的制造精度要求，应选用金相组织良好、加工工艺性能 and 热处理工艺性能优良的材料制造。精冲模材料的选用举例及硬度要求见表 3-10。

表 3-10 精冲模材料的选用举例及硬度要求

零件名称	推荐选用材料	硬度 HRC
冲孔凸模	Cr12Mo1V1、Cr12MoV、W6Mo5Cr4V2	60 ~ 62
凹模	Cr12Mo1V1、Cr12MoV、W6Mo5Cr4V2	62 ~ 64
压边圈及压板	Cr12MoV、CrWMn	58 ~ 60
顶杆、定位销传力杆	T10A、T8A、9Mn2V	58 ~ 58
垫板	9Mn2V、9SiCr	56 ~ 60
导柱、导套	GCr15	58 ~ 62

(8) 新型冷作模具钢的选择

在选用冷作模具材料时，应重视新型模具材料的应用。新型冷作模具钢在冲裁模方面的应用效果比较见表 3-11。

表 3-11 新型冷作模具钢在冲裁模方面的应用效果比较

模具名称	钢号	平均寿命对比
簧片凹模	Cr12、CrWMn、 6CrNiMnSiMoV (GD)	总寿命：15 万件 60 万件
接触簧片级进模凸模	W6Mo5Cr4V2、 6CrNiMnSiMoV (GD)	总寿命：0.1 万件 2.5 万件
球面圆柱头螺钉光冲模	60S12Mn、 7Cr7Mo2V2Si (LD)	总寿命：1.0 ~ 1.2 万件 4.0 ~ 7.2 万件
中厚 45 钢板落料模	Cr12MoV、T10A、 7CrSiMnMoV (CH1)	刃磨一次寿命：600 件 1300 件
转子片复式冲模	Cr12、Cr12MoV、 9Cr6W3Mo2V2 (GM)、 Cr8MoWV3Si (ER5)	总寿命：20 ~ 30 万件 100 ~ 120 万件 250 ~ 360 万件
印制电路板冲裁模	T10A、CrWMn、 8Cr2MnWMoVS (8Cr2S)	总寿命：2 ~ 5 万件 15 ~ 20 万件
高速冲模	W12Cr4Mo2VRE	总寿命：200 ~ 300 万件 (模具费用比 YC20 大大降低)

3.2.2 热作模具材料的选择

热作模具是指对加热到再结晶温度以上的金属材料进行压力加工的工艺装备。根据工作条件，热作模具可分为热锻模、热挤压模、压制模和热冲裁模等。热作模具在工作中既受压应力的作用，又受热应力的作用，从而使模具的服役条件非常复杂。热作模具的失效形式主要是断裂、早期龟裂、堆塌、冲蚀、变形、热磨损、热熔损、热疲劳损伤等。

1. 热作模具材料的性能

热作模具的工作条件相当复杂，为了满足其使用要求，对制造模具的材料要求较高。如较高的高温强度和硬度，良好的韧性，高的热硬性，高温耐磨性，优良的耐热疲劳性，高的热稳定性、热熔损性和抗氧化性以及良好的加工工艺性能（包括可加工性、热处理工艺性、可锻性）等。常用热作模具钢性能比较见表 3-12。

表 3-12 常用热作模具钢性能比较

钢号	热处理 后硬度 HRC	室温力学性能			高温冲击韧度		高温硬度		抗氧化			热稳 定性	可锻性	切削加 工性能
		R_m	Z	K_{IC}	600℃	700℃	600℃	700℃	600℃	700℃	1000℃			
5CrNiMo	41 ~ 41.6	较差	较好	好	一般	较好	较差	较差	较差	较差	一般	较差	好	好

(续)

钢号	热处理 后硬度 HRC	室温力学性能			高温冲击韧度		高温硬度		抗氧化			热稳定性	可锻性	切削加工性能
		R_m	Z	K_{IC}	600℃	700℃	600℃	700℃	600℃	700℃	1000℃			
5CrMnMo	41 ~ 42.3	较差	较好	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5CrMnSi MoV	39.8 ~ 40.3	较差	较好	好	较好	好	较差	较差	较差	较差	较好	较差	好	—
5Cr2NiMo VSi	38.8 ~ 40.2	较差	好	好	好	好	较差	一般	较差	较差	较好	较好	较好	一般
3Cr2MoW VNi	40.5 ~ 41.2	较差	好	好	好	好	较差	一般	较差	一般	较好	较好	一般	好
4Cr5MoSi V1	43.7 ~ 44.2	较差	好	好	好	好	一般	一般	好	好	好	一般	好	较好
	47 ~ 48	较好	较好	较好	较好	较好	较好	差	好	好	好	一般	好	较好
4Cr5MoSiV	49.2 ~ 50	好	较好	一般	一般	较好	较好	一般	好	好	好	一般	好	一般
4Cr5W2VSi	48.5 ~ 49.2	较好	较好	一般	较好	较好	较好	较差	较好	较好	好	一般	好	较好
4Cr5Mo2Mn SiV	44.2 ~ 45	好	一般	较好	较好	较好	较好	较差	好	较好	好	较差	较好	一般
4Cr3Mo3 W2V	44 ~ 44.2	一般	一般	一般	一般	一般	较好	一般	好	较好	好	较好	较差	一般
	48.2 ~ 48.5	较好	较差	差	较差	较差	较好	较差	好	较好	好	较好	差	较差
4Cr3Mo3 SiV	47 ~ 48.8	较好	较好	较差	较好	较好	好	较差	较差	较差	较好	较差	—	—
3Cr3MoVNb	40.5 ~ 41.2	差	好	较差	好	好	较差	较差	较差	较差	差	较差	好	较好
	47.5 ~ 48	较差	好	差	较好	较好	较好	较差	较差	较差	差	较差	好	较好
4Cr3Mo3 W4VNb	49.0 ~ 49.5	好	较差	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4Cr3Mo2 NiVNb	42.2 ~ 44.2	较差	好	较好	一般	一般	一般	较好	较好	一般	较差	好	一般	较好
	47 ~ 47.5	较好	较好	一般	一般	较差	较好	较好	较好	一般	较差	好	一般	较好
4Cr3Mo2Mn SiVNbB	43.5 ~ 44.2	一般	一般	较好	一般	一般	一般	较好	较好	一般	较差	好	一般	一般
	49 ~ 49.5	一般	较好	一般	一般	一般	较好	好	较好	一般	较差	好	一般	一般
4Cr3Mo2 MnB	42.2 ~ 43	较差	好	一般	较好	较好	一般	一般	较好	较好	较差	较好	一般	较好
	48 ~ 48.3	较好	较好	一般	一般	较好	较好	一般	较好	较好	较差	较好	一般	较好

(续)

钢号	热处理 后硬度 HRC	室温力学性能			高温冲击韧度		高温硬度		抗氧化			热稳 定性	可锻性	切削加 工性能
		R_m	Z	K_{IC}	600℃	700℃	600℃	700℃	600℃	700℃	1000℃			
3Cr2W8V	42 ~ 43	较差	一般	一般	较好	一般	一般	一般	一般	一般	较好	较好	一般	一般
	48.8 ~ 49	好	较好	较差	较好	一般	好	较好	一般	一般	较好	较好	一般	一般
5Cr4W5Mo2V	43.5 ~ 44	较差	较差	一般	一般	较差	较好	较好	较好	较好	好	好	较好	较差
	49 ~ 49.5	较好	较差	较差	较差	较差	好	好	较好	较好	好	好	较好	较差
5Cr4Mo3SiMnVAl	42.1 ~ 43	较差	较差	一般	一般	较差	较好	较好	好	好	好	好	好	一般
	46.2 ~ 46.8	较好	较差	较差	一般	较差	较好	较好	好	好	好	好	好	一般
6Cr4Mo3Ni2WV	47 ~ 48	较好	较差	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2Cr3Mo2NiVSi	44.2 ~ 44.5	较差	好	较好	一般	较一般	一般	较差	好	较好	较好	一般	较好	—
8Cr3	49 ~ 51	好	一般	—	—	—	—	—	较差	较差	一般	—	—	—

2. 常用热作模具材料的选择

热作模具材料应根据模具在工作中的受力、受热和冷却情况，模具的形状和尺寸，压制件的材质，变形方式，变形量，变形速度以及润滑条件等进行选择，选材时，应充分考虑这些因素的影响，合理选用，确保其使用寿命。常用热作模具材料的选择见表 3-13。

表 3-13 常用热作模具材料的选择

模具类型	工 作 条 件		推 荐 钢 号
锤锻模	整体模具	最小边长为 200 ~ 400mm	5CrMnMo、5CrNiMo、4CrMnSiMoV
		最小边长 > 400mm	5CrNiMo、4CrMnSiMoV、5Cr2NiMoV
	镶块		4Cr5MoSiV1、3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V、4CrMnSiMoV
压力机锻模	整体模具		5CrNiMo、5CrMnMo、4CrMnSiMoV、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi、3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V、5Cr4Mo2W2SiV
	镶拼模具	镶块	4Cr5MoSiV1、4Cr5MoSiV、4Cr5W2VSi、3Cr2W8V、5Cr4Mo2W2SiV
		模体	5CrMnMo、5CrNiMo、45Mn2、4MnSiMoV
热顶锻模			3Cr2W8V、5Cr4Mo2W2SiV、4Cr4W5Mo2V、4Cr5MoSiV、4Cr5W2VSi、5CrNiMo

(续)

模具类型	工作条件		推 荐 钢 号
高速锤 锻模			5CrNiMo、5CrMnMo、3Cr2W8V、4Cr5W2VSi、 4Cr5W2SiV1、4Cr3Mo2W2VTiNb
压铸模	锌及其合金		4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi
	铝、镁及其合金		4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi、3Cr2W8V、 4Cr5Mo3W2V
	铜及其合金		3Cr2W8V、4Cr3Mo3W2V
热挤 压模	凹模	轻金属及其合金	4Cr5MoSiV1、3Cr2W8V、4Cr3Mo3W2V、4Cr5MoSiV
		铜及其合金	3Cr2W8V、4Cr3Mo3W2V、5Cr4Mo2W2SiV、4Cr14Ni14W2Mo、 5Mn15Cr8Ni5Mo3V2
	冲头	轻金属及其合金	5CrNiMo、4CrMnSiMoV、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1
		铜及其合金	4CrMnSiMoV、4Cr5MoSiV1、3Cr2W8V
	冲头 头部	轻金属及其合金	4Cr5MoSiV1、3Cr2W8V
		铜及其合金、钢	3Cr2W8V、Cr14Ni25Co2V
	管材挤压芯棒 (直径小于50mm)	轻金属及其合金	3Cr2W8V、4Cr3Mo3W2V
		铜及其合金、钢	3Cr2W8V、4Cr3Mo3W2V
	穿孔芯棒 (直径大 于50mm)	轻金属及其合金	4Cr5MoSiV1、3Cr2W8V
		铜及其合金、铜	3Cr2W8V、4Cr3Mo3W2V
温热挤 压模			W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、6W6Mo5Cr4V、 6Cr4W3Mo2VNb
压铸模	压铸锌、锡和铝的模板、模板 镶块、模芯和阀门等		4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、3Cr2W8V
	压铸锌合金模具		4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi
	压铸铝、镁合金模具		4Cr5MoSiV1、3Cr2W8V、4Cr3Mo3W2V
	压铸铜合金模具		3Cr2W8V、4Cr3Mo3W2V
热剪 切模			6CrW2Si、5CrNiMo、4CrMnSiMoV、4Cr5MoSiV1、3Cr2W8V、 6W6Mo5Cr4V、W6Mo5Cr4V2

3. 热作模具材料的选用实例

(1) 热锻模材料的选择

热锻模在使用过程中,各个部位将承受到复杂的应力,如拉伸应力、压缩应力、弯曲应力等,还受到反复的冲击载荷,特别是锤用模具,受到很强的冲击载荷,随着模锻吨位的增加,冲击载荷进一步加大,同时还承受剧烈的急冷急热循环。在选择热锻模材料和确定其工作硬度时,主要根据热锻模种类、锻模大小、模具形状复杂程度、生产批量及受力和受热等情况来确定。

1) 锤锻模用钢及硬度要求(表3-14)。

表 3-14 锤锻模用钢及硬度要求

锻模种类	锻模或零件名称	锻模材料		锻模硬度			
		主要材料	代用材料	模膛表面		燕尾部分	
				HBW	HRC	HBW	HRC
锻钢 锻模	小锻模（<1t 锤用）	5CrNiMo	5CrMnMo	387 ~ 444 ^①	42 ~ 47 ^①	321 ~ 363	35 ~ 39
	中小锻模（1 ~ 2t 锤用）			364 ~ 415 ^②	39 ~ 44 ^②		
	中型锻模（3 ~ 5t 锤用）			364 ~ 415	39 ~ 44	302 ~ 340	32 ~ 37
	大型锻模（>5t 锤用）	5Cr2NiMoV	4CrMnSiMoV	340 ~ 387	37 ~ 42		
	校正模	5Cr2NiMoV	4CrMnSiMoV	321 ~ 364	35 ~ 39	286 ~ 321	30 ~ 35
		4CrMnSiMoV	5Cr2NiMoVSi ^③	302 ~ 340	32 ~ 37	269 ~ 321	28 ~ 35
镶块 锻模	模体	ZG40Cr		390 ~ 460	42 ~ 47	302 ~ 340	32 ~ 37
	镶块	5CrNiMo 4CrMnSiMoV 3Cr2W8V	5CrMnMo 4Cr3Mo3W2V 4Cr5MoSiV1	硬度要求与锻钢锻模相同			
铸钢 堆焊 锻模	模体	ZG45Mn2	—	硬度要求与锻钢锻模相同			
	堆焊材料	5CrNiMo、 5Cr2MnMo	—				

- ① 用于模膛浅而形状简单的锻模。
② 用于模膛深、形状复杂的锻模。
③ 模块截面 <300mm × 300mm 时 375 ~ 429HBW；模块截面 >300mm × 300mm 时 350 ~ 388HBW。

2) 高速锤锻模用钢及硬度要求（表 3-15）。

表 3-15 高速锤锻模用钢及硬度要求

材料	硬度 HRC	备注
5CrNiMo	43 ~ 48	—
3Cr2W8V	48 ~ 52	—
4Cr5W2VSi	48 ~ 52	推荐使用的模具材料

3) 热模锻曲柄压力机锻模用钢及硬度要求（表 3-16）。

表 3-16 热模锻曲柄压力机锻模用钢及硬度要求

锻模零件名称	钢号		硬度 HBW	锻模零件名称	钢号		硬度 HBW
	主要材料	代用材料			主要材料	代用材料	
终锻型 槽镶块	3Cr3Mo3VNb	5CrMnMo	444 ~ 495	预锻型 槽镶块	3Cr3Mo3VNb	5CrMnMo	444 ~ 495
	5CrNiMoV		368 ~ 415		5CrNiMoV		368 ~ 415
	5CrNiMo		461 ~ 514		5CrNiMo		461 ~ 514
	4Cr5W2VSi				4Cr5W2VSi		
				锻件顶杆	3Cr2W8V	GCr15	477 ~ 555

4) 热模锻压力机用锻模用钢及硬度要求（表 3-17）。

表 3-17 热模锻压力机用锻模用钢及硬度要求

模具零件名称	模具材料		硬度 HBW
	主要材料	代用材料	
模锻型槽镶块	5CrNiMo	5CrMnMo、4Cr5MoSiV、 4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi、 5Cr2NiMoVSi ^①	388 ~ 444
制坯型槽镶块	5CrNiMo	5CrMnMo	363 ~ 415
下顶杆	3Cr2W8V	—	48 ~ 52HRC
上顶杆	3Cr2W8V	—	48 ~ 52HRC
下镶块支承板	40Cr	40MnB、45	444 ~ 388
上镶块支承板	40Cr	40MnB、45	444 ~ 388
型槽镶块紧固件	45		321 ~ 285
挺杆	45		363 ~ 321
杠杆与支承板	45		363 ~ 321
上下摸座	5CrNiMo	40Cr	321 ~ 285

① 模块或镶块截面 < 300mm × 300mm 时，429 ~ 450HBW；模块或镶块截面 > 300mm × 300mm 时，400 ~ 420HBW。

5) 螺旋压力机锻模用钢及硬度要求（表 3-18）。

表 3-18 螺旋压力机锻模用钢及硬度要求

锻模零件 名称	钢号		硬度 HBW	锻模零件 名称	钢号		硬度 HBW
	主要材料	代用材料			主要材料	代用材料	
凸模镶块	3Cr3Mo3VNb	5CrNiMo	444 ~ 495	凸模、凹模体	45Cr	—	349 ~ 390
	4Cr5W2VSi	5CrMnMo	390 ~ 490	整体凸、凹模	5CrMnMo	8Cr3	369 ~ 422
	3Cr2W8V	5CrNiSi	461 ~ 514	上、下压紧圈	45	—	349 ~ 390
凹模镶块	3Cr3Mo3VNb	5CrNiMo 5CrMnMo	444 ~ 495	上、下垫板	T8A、T7A	—	369 ~ 422
	3Cr2W8V		68 ~ 415	上、下顶杆	T8A、T7A	—	369 ~ 422
	4Cr5W2VSi		461 ~ 514	导柱、导套	T8A	—	56 ~ 58HRC

6) 平锻模用钢及硬度要求（表 3-19）。

表 3-19 平锻模用钢及硬度要求

模具或零件名称		钢号		硬度	
		主要材料	代用材料	HBW	HRC
整体凹模	< 800t	8Cr3	5CrNiMo	354 ~ 390	39 ~ 42
	> 800t	8Cr3	5CrNiMo	322 ~ 364	35 ~ 40

7) 胎模锻用钢及硬度要求（表 3-20）。

表 3-20 胎模锻用钢及硬度要求

胎模或零件名称		主要材料	代用材料	硬度 HRC
棒子、扣模 和弯曲模	上、下模	45、40Cr	—	37 ~ 41
		T7	—	40 ~ 44
	模把	45	Q235	—
垫模、套模	模套	5CrMnMo、5CrNiMo 4CrMnSiMoV	45、40Cr 45Mn2	38 ~ 42
	垫模、冲头、模垫	同模套	T7A、45Mn2	40 ~ 44
合模	小型	5CrMnMo、5CrNiMo	T7A、40Cr、45Mn2	40 ~ 44
	中型	4CrMnSiMoV	40Cr、45Mn2	40 ~ 44
	大型	40Cr	40Cr、45Mn2	38 ~ 42
	导销		—	38 ~ 42
冲切模	热切冲头	8Cr3、5CrMnMo	T7A、T8A	42 ~ 46
	热切凹模	45	T7A、T8A	42 ~ 46
	冷切冲头、冷切凹模	T8A	—	46 ~ 50
热态工作繁重的胎模零件（垫模、冲头、模垫、拼分模镶块等）		3Cr2W8V	5CrMnMo、 5CrNiMo	46 ~ 50

8) 摩擦压力机锻模材料及硬度要求（表 3-21）。

表 3-21 摩擦压力机锻模材料及硬度要求

锻模零件 名称	锻模材料		硬度 HBW	锻模零件 名称	锻模材料		硬度 HBW
	主要材料	代用材料			主要材料	代用材料	
凸模镶块	4Cr5W2VSi、 3Cr2W8V	5CrNiMo、 5CrMnMo	390 ~ 490	整体凸、凹模	5CrMnMo	8Cr3	369 ~ 422
				上、下压紧圈	45	40、35	349 ~ 390
凹模镶块	3Cr2W8V	5CrNiMo、 5CrMnMo	390 ~ 440	上、下垫板	T7A、T8A	—	369 ~ 422
				上、下顶杆	T7A、T8A	—	369 ~ 422
凸模、 凹模模体	45Cr	45	349 ~ 390	导柱、导套	T7A、T8A	—	56 ~ 58HRC

9) 热锻锻模用材料的选择（表 3-22）。

表 3-22 热锻锻模用材料的选择

锻模材料	生产批量/件					
	1×10^2		$1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$		$\approx 5 \times 10^4$	
	夹持模	冲头	夹持模	冲头	夹持模	冲头
碳素结构钢和 合金结构钢	40CrNi2Mo 或 5CrNiMo 镶块 38 ~ 42HRC	T8 镶块 42 ~ 46HRC 或 40CrNi2Mo 镶块 38 ~ 42HRC	5CrNiMo 或 4Cr5MoSiV 镶块 46 ~ 50HRC	5CrNiMo 或 4Cr5MoSiV 镶块 44 ~ 48HRC	5CrNiMo 或 4Cr5MoSiV 镶块 46 ~ 50HRC	4Cr3Mo3SiV、 4Cr5MoSiV 46 ~ 50HRC 5CrNiMo 52 ~ 56HRC
不锈钢或 耐热钢	5CrNiMo 镶块 38 ~ 42HRC	5CrNiMo 镶块 42 ~ 46HRC	5CrNiMo 镶块 42 ~ 46HRC	4Cr5MoSiV、 3Cr3Mo3W2V 46 ~ 50HRC	4Cr5MoSiV、 4Cr5MoSiV1、 3Cr3Mo3W2V、 3Cr3Mo3VNb、 44 ~ 48HRC	4Cr5MoSiV、 4Cr3Mo3SiV、 3Cr3Mo3W2V、 3Cr3Mo3VNb、 48 ~ 52HRC

(2) 热挤压模材料的选择

热挤压模与高温坯料长时间接触，凹模、芯棒、挤压缸内套等承受高温、高应力和强烈摩擦，要求模具材料必须在高温下具备高的强度、耐磨性、耐回火性，并具有良好的抗冷热疲劳性能，芯棒材料还必须有良好的韧性。热挤压模具材料的选择依据主要是被挤压金属材料及其在该温度下的强度，其次是被挤压金属的化学成分、挤压加工的成品形状、挤压加工的挤压比、挤压速度和润滑条件等因素，以提高模具的使用寿命。

1) 热挤压模材料选用举例及硬度要求（表 3-23）。

表 3-23 热挤压模材料选用举例及硬度要求

被挤压金属		钢、钛及镍合金 挤压温度 1100 ~ 1200℃	铜及铜合金 挤压温度 650 ~ 1000℃	铝、镁及其合金 挤压温度 350 ~ 510℃
模具名称		推荐选用材料		
挤压模	凹模 (整体模块或 镶嵌模块)	4Cr5MoSiV1 4Cr5W2VSi 3Cr2W8V 5Cr4Mo2WVSi 5Cr4W5Mo2V 4Cr3W4Mo2VTiNb 高温合金 (43 ~ 51HRC)	4Cr5MoSiV1 4Cr5W2VSi 3Cr2W8V 4Cr4Mo2WVSi 5Cr4W5Mo2V 4Cr3W4Mo2VTiNb 高温合金 (40 ~ 48HRC)	4Cr5MoSiV1 4Cr5W2VSi (46 ~ 50HRC)
		4Cr5MoSiV1 4Cr5W2VSi (42 ~ 46HRC)	5CrMnMo (45 ~ 48HRC)	5CrMnMo、4Cr5MoSiV1 4Cr5W2VSi (48 ~ 52HRC)
		4Cr5MoSiV 4Cr5MoSiV1 (42 ~ 46HRC)	5CrMnMo (42 ~ 46HRC)	5CrMnMo 4Cr5MoSiV1 (44 ~ 50HRC)
	模垫			
	模座			
挤压筒	内衬套	4Cr5MoSiV 4Cr5MoSiV1 3Cr2W8V 4Cr4Mo2WVSi 5Cr4W5Mo2V 4Cr3W4Mo2VTiNb 高温合金 (400 ~ 475HBW)	4Cr5MoSiV1 4Cr5W2VSi 3Cr2W8V 4Cr4Mo2WVSi 5Cr4W5Mo2V 4Cr3W4Mo2VTiNb 高温合金 (400 ~ 475HBW)	4Cr5MoSiV1 4Cr5W2VSi (400 ~ 475HBW)
	外套筒	5CrMnMo、4Cr5MoSiV1 (300 ~ 350HBW)		5CrMnMo、4Cr5MoSiV1 (300 ~ 350HBW)
挤压垫		4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi、3Cr2W8V 4Cr4Mo2WVSi、5Cr4W5Mo2V 4Cr3W4Mo2VTiNb、高温合金 (40 ~ 44HRC)		4Cr5MoSiV1 4Cr5W2VSi (40 ~ 44HRC)

注：热挤压模具一般由凹模、凹模垫块及凹模环、芯棒、芯棒头及镶块、挤压缸及挤压缸内套、挤压杆垫等组成。其中凹模、芯棒及芯棒头和镶块受高温应力和高温磨损最为严重，对抗冷热疲劳性能要求比较高，是经常发生失效需要更换的模具零件。挤压缸内套和垫块受热情况比较严重，但是承受的应力比较单一。挤压缸工作温度不高，主要承受拉伸应力。

2) 热挤压模材料选择及硬度要求 (表 3-24)。

表 3-24 热挤压模材料的选择及硬度要求

被挤压材料	铝、镁合金		铜及铜合金		钢	
模具名称	模具材料	硬度 HRC	模具材料	硬度 HRC	模具材料	硬度 HRC
凹模	4Cr5MoSiV1 4Cr5MoSiV	47 ~ 51	4Cr5MoSiV1 4Cr3Mo3SiV 5Cr4W2Mo2SiV 3Cr2W8V 4Cr4W4Co4V2Mo	42 ~ 44	4Cr5MoSiV1 4Cr3Mo3SiV1 3Cr2W8V	44 ~ 48
芯棒	4Cr5MoSiV1 4Cr5MoSiV	46 ~ 50	4Cr5MoSiV1 4Cr3Mo3SiV 4Cr4W4Co4V2Mo	46 ~ 50	4Cr5MoSiV1 3Cr2W8V 4Cr3Mo3SiV 4Cr4W4Co4V2Mo	46 ~ 50
芯棒头镶块	W6Mo5Cr4V2 6W6Mo5Cr4V	55 ~ 60	6W6Mo5Cr4V 高温合金 GH761	55 ~ 60	W6Mo5Cr4V2 6W6Mo5Cr4V 高温合金 GH761	55 ~ 60
挤压缸内套	4Cr5MoSiV1 4Cr5MoSiV	42 ~ 47	4Cr5MoSiV1 4Cr5MoSiV 铁基高温合金	42 ~ 47	4Cr5MoSiV1 高温合金 GH761	42 ~ 47
挤压缸外套	5CrMnMo 4Cr5MoSiV	32 ~ 38	5CrMnMo 4Cr5Mo3SiV	32 ~ 38	5CrMnMo 4Cr5MoSiV	32 ~ 38
模座	4Cr5MoSiV1 4Cr5MoSiV	42 ~ 46	5CrMnMo	42 ~ 46	5CrMnMo 4Cr3Mo3SiV	44 ~ 50
垫块、挤压杆	4Cr5MoSiV1 4Cr5MoSiV	40 ~ 44	4Cr5MoSiV1 4Cr3Mo3SiV	40 ~ 44	4Cr5MoSiV1 4Cr3Mo3SiV	40 ~ 44

注：1. 对于高温条件下磨损极为严重的热挤压模具，特别是挤压难变形的、形状复杂的、挤压比很大的高温坯料，可采用奥氏体型高温热作模具钢、硬质合金、钢结硬质合金等高热强性、高耐磨性材料制成的模具镶块。

2. 凹模用模具材料要求较高，传统的模具材料是 4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1 和 3Cr2W8V 钢，工作条件苛刻的可选用 5Cr4W2Mo2SiV、4Cr3Mo3SiV、4Cr4W4Co4V2Mo (H19) 等钢种，工作条件更为苛刻的可选用一些奥氏体型热作模具钢如 5Mn15Cr8Ni5Mo3V2 钢等及铁基耐热合金制造。芯棒材料主要选择铬系中合金模具钢，如 4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5MoSiV 钢，也可选择钼系模具钢 4Cr3Mo3SiV。工作温度较高、挤压比较大时芯棒的头部可选择 W6Mo5Cr4V2、6W6Mo5Cr4V 钢或选用高温合金材料制作镶块。挤压缸内套一般用 4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr3Mo3SiV 等钢，高温工作时也可采用铁基高温合金内套。挤压缸一般选择合金含量不高的中碳铬钼钢。

(3) 压铸模材料的选择

1) 常用压铸模用材料。压铸工艺具有生产率高，节约原材料，降低生产成本，生产的铸件性能较好，尺寸精度较高等特点，在模具制造中得到广泛应用。目前常用于压铸的金属材料主要有：锌合金、铝及铝合金、铜及铜合金等。由于压铸模的工作表面直接与液态金属接触而承受高温、高压和高速流动的液态金属冲蚀，在铸件脱模以后，又急速冷却。因此压铸模必须具有耐冷热疲劳性能和耐液态金属冲蚀性能以及一定的强

度、韧性和耐磨性。在选择压铸模材料时应考虑压铸金属的化学成分、压铸温度、压铸工件的形状复杂程度以及生产工件批量的多少。

常用压铸模用材料的选择及硬度要求见表 3-25。

表 3-25 常用压铸模用材料的选择及硬度要求

压铸材料	生产批量/件		
	5 × 10 ⁴	25 × 10 ⁴	100 × 10 ⁴
锌合金 (铸件尺寸 25 ~ 50mm)	3Cr2Mo (35 ~ 40HRC)	3Cr2Mo (35 ~ 40HRC)	4Cr5MoSiV1 (42 ~ 46HRC)
锌合金 (铸件尺寸 50 ~ 100mm)	3Cr2Mo (35 ~ 40HRC)	3Cr2Mo (35 ~ 40HRC)	4Cr5MoSiV1 (42 ~ 46HRC)
铝、镁合金	4Cr5MoSiV1、4Cr5MoSiV 4Cr5W2VSi (42 ~ 46HRC)	4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi (42 ~ 46HRC)	4Cr5MoSiV1、4Cr3Mo3SiV (42 ~ 46HRC)
铜合金	H20、H21 (AISI) 4Cr4W4Co4V2Mo (H19) (35 ~ 40HRC) 3Cr2W8V (H21) (35 ~ 40HRC)	4Cr3Mo2MnVNbB (Y4) 3Cr2W8V (H21) 3Cr3Mo3W2V (HM - 1) H21 (AISI)	4Cr3Mo2MnVNbB (Y4) GH761

- 注：1. 锌合金的熔点很低，其压铸模工作表面的温度一般不超过 400℃，可选用一般的合金结构钢制造模具，也可以采用预硬型塑料模具钢，如 3Cr2Mo 等作为锌合金压铸模用钢。如果生产批量很小，也可以选用 45 钢。如果压铸的锌合金批量很大，形状比较复杂，或者尺寸精度要求较高时，可选用热作模具钢，如 5CrNiMo、5CrMnMo、4Cr5MoSiV 等钢种。
2. 铝、镁合金的熔点一般为 600 ~ 750℃，压铸模的工作表面温度一般可达 500 ~ 600℃。型腔、喷嘴和芯棒的表面都承受剧烈的温度波动。模具的表面容易产生疲劳裂纹。在压铸过程中，容易粘附在模具的表面，影响压铸生产的连续运行。液态铝对模具表面有较强的冲蚀作用，可选用 4Cr5MoSiV 和 4Cr5MoSiV1 钢。为了改善铝合金粘附的情况，采用渗氮和氮碳共渗比较有效。
3. 液态铜合金的温度一般高达 900 ~ 1100℃，模具型腔表面温度也高达 750 ~ 850℃，所以铜合金压铸模的工作条件要比铝合金压铸模更苛刻。因此铜合金压铸模用材料必须具备较高的抗冷热疲劳性能，高的热强性，高的导热性，一定的韧性，高的耐冲蚀性能和抗氧化性能，良好的工艺性能。一般选用 3Cr2W8V、4Cr3Mo3SiV 钢等。为了进一步提高模具使用寿命，采用热强性更好的模具钢如 4Cr4W4Co4V2Mo (H19)、3Cr3Mo3Co3V 等钢种。4Cr3Mo2MnVNbB (Y4) 钢是针对铜合金压铸模研制的新型热压铸模具钢，在铜合金压铸模的应用方面取得明显成效，值得推广应用。

2) 压铸模成形部分零件材料选择（表 3-26）。

表 3-26 压铸模成形部分零件材料选择

零件名称		型腔、型芯与浇口镶块	分流锥	浇口套	扁顶杆、 形状复杂的顶杆
合金					
铝合金	选用	5CrNiMo、3Cr2W8V	T8A	T8A	T8A
锡合金	代用	T10A、5CrMnMo、GCr15	T10A、球墨铸铁	T10A	T10A
锌合金	热处理	精加工后热处理	48 ~ 50HRC	50 ~ 55HRC	45 ~ 50HRC

(续)

零件名称 合金		型腔、型芯与浇口镶块	分流锥	浇口套	扁顶杆、 形状复杂的顶杆
铝合金 镁合金	选用	3Cr2W8V	—	—	5CrMnMo
	代用	4Cr5MoSiV1	—	—	T8A
	热处理	1. 热处理不易变形的压铸模，精加工后热处理；型腔 42 ~ 46HRC，型芯 44 ~ 48HRC 2. 热处理易变形的压铸模，精加工前调质，31 ~ 35HRC，精加工试型后渗氮	44 ~ 48HRC	48 ~ 50HRC	45 ~ 50HRC
铜合金	选用	3Cr2W8V	—	—	—
	热处理	精加工后热处理：镶块型腔 42 ~ 44HRC，型芯 38 ~ 42HRC	42 ~ 44HRC	44 ~ 46HRC	44 ~ 46HRC

3) 压铸模其他零件用材料选择（表 3-27）。

表 3-27 压铸模其他零件用材料选择

零件名称	压铸模用材料		热处理后硬度 HRC
	选用	代用	
动定型座板	35 45	球墨铸铁	调质后硬度 28 ~ 32
动定型套板		Q235	
顶杆固定板		球墨铸铁	
顶杆板			
垫板、底板			
导柱	9Mn2V、T8A	T10A	52 ~ 57
导套	T8A	T10A	47 ~ 52
复位杆	9Mn2V、T8A	—	50 ~ 55
顶杆	5CrNiMo、T8A	T10A	45 ~ 50
斜销	5CrMnMo、T8A	T10A	45 ~ 50
滑块		60	
压紧块		60	
滑块延长板		60、45	
齿杆齿条	45、40Cr	—	—
定位销	45、T8A	—	45 ~ 50
弹簧	T8A	45	42 ~ 47
挡销		45	
吊钩	Q235	45	
管接嘴	45	—	42 ~ 47

4) 挤压铸造铸型零件材料选择 (表 3-28)。

表 3-28 挤压铸造铸型零件材料选择

铸型零件名称	型腔零件选材			
	锌合金铸件用铸型	铝合金、镁合金 铸件用铸型	铜合金铸件用铸型	钢铁材料铸件 用铸型
凹型镶块	5CrNiMo	4Cr5MoSiV1	3Cr2W8V	3Cr2W8V
	5CrMnMo	3Cr2W8V	4Cr5W2VSi	4Cr2W8Co5V
	4Cr5MoSiV1	4Cr5MoSiV	4Cr5MoSiV1	4Cr5MoSiV1
	4Cr5MoSiV	4Cr5W2SiV		
冲头、型芯、 芯轴	4Cr5MoSiV1	3Cr2W8V	3Cr2W8V	难熔金属 718
	5CrNiMo	4Cr5MoSiV1		3Cr2W8V
顶杆 卸料套筒	5CrMnMo	5CrNiMo	3Cr2W8V	3Cr2W8V
	T8A、T10A	4Cr5MoSiV1	4Cr5W2VSi	4Cr5MoSiV1
		3Cr2W8V	4Cr5MoSiV1	

(4) 热冲裁模材料的选择

在热作模具中, 热冲裁模的工作温度较低, 因此对材料的性能要求也相对放宽。除了模具应具有的高耐磨性、良好的强韧性以及加工工艺性能外, 一般热作模具钢均能满足热冲裁模的工作条件要求。热冲裁模在进行剪切时, 刃口与锻件飞边摩擦, 而且承受一定的冲击载荷。冲裁模的刃口还会被锻件和飞边加热。切边模的主要失效形式是刃部磨损、崩刃等, 所以冲裁模刃口处的耐高温磨损性能及韧性成为决定模具使用寿命的主要因素。

热冲裁模材料的选用及硬度要求见表 3-29。

表 3-29 热冲裁模材料的选用及硬度要求

模具类型		推荐选用的材料	可代用材料	硬度 HRC
热切边模	凸模	8Cr3、4Cr5MoSiV	5CrMnMo、5CrNiMo	35 ~ 40
	凹模	5Cr4W5Mo2V	4CrMnSiMoV	43 ~ 45
热冲孔模	凸模	8Cr3	3Cr2W8V、6CrW2Si	40 ~ 44
	凹模	8Cr3	—	35 ~ 40

(5) 陶瓷型精铸锻造模具钢

陶瓷型精铸锻造模具钢是在 5CrMnMo、5CrNiMo 和 CrWMn 钢的基础上调整化学成分和工艺而成的热作模具新材料。常用的陶瓷型精铸模具钢有 ZG5CrMnMo、ZG5CrNiMo、ZG4Cr3Mo2WV 和 ZG5CrMnMoV 等。

陶瓷型精铸锻造模具材料应用情况见表 3-30。

(6) 新型热作模具钢的选择

新型热作模具钢与 3Cr2W8V 钢应用对比见表 3-31。

表 3-30 陶瓷型精铸锻造模具材料应用情况

锻件名称	数量 /副	设备压力/MN	锻件 材料	原锻模材料	寿命对比	
					一般寿命/件	陶瓷型精铸锻模/件
突缘机锻模锻件	10	24517（机锻模）	45	5CrNiMo	9000	22800
前拖沟机锻模锻件	2	24517（机锻模）	45	5CrNiMo	3500	平均 6130
十字轴机锻模锻件	1	24517（机锻模）	40Cr	5CrNiMo	5000	13000
WH130 连杆体	30	2942（摩擦压力机）	40Cr	5CrNiMo	平均 900	平均 3000
WH130 转向节	150	3923 ~ 6178（摩擦压力机）	40Cr	5CrNiMo	平均 800	平均 1200 以上
5t 吊钩	6	5492（空气锤）	20CrMo	5CrNiMo	2000	4500
CA-10 前蹄臂	4	2942（摩擦压力机）	45	3Cr2W8V	仅几件破裂	3000
CA-10 后蹄臂	4	2942（摩擦压力机）	45	3Cr2W8V	仅几件破裂	3000
万向节叉机锻模锻件	10	3923（摩擦压力机）	45	5CrNiMo	4500	3800 件后型腔完好
CA-10 转向臂轴	3	3923（摩擦压力机）	45	5CrNiMo	平均 800	3000

表 3-31 新型热作模具钢与 3Cr2W8V 钢应用对比

模具名称	模具材料	硬度 HRC	使用寿命/万件	提高倍数
201 轴承外圈凹模	3Cr2W8V	48 ~ 52	1	3
	GR	—	> 3	
201 轴承外圈切边模	3Cr2W8V	48 ~ 52	> 2	3.5
	GR	—	> 7	
308 轴承穿孔凸模	3Cr2W8V	51	0.4	5
	RM2	55	2.07	
2270 轴承穿孔凸模	3Cr2W8V	51	0.4	3
	RM2	50	1.22	
310 轴承挤压凸模	3Cr2W8V	—	0.3	7
	012Al	—	2.0	
208 轴承塔形凸模	3Cr2W8V	—	0.3	7
	012Al	—	2.0	
7204 轴承凸模	3Cr2W8V	50	0.2	> 10
	CG2	53	3.5	
207 轴承凸模	3Cr2W8V	51	0.2	5
	HM1	51 ~ 52	1.0	
轴承套圈热 X 形凸模	3Cr2W8V	48 ~ 51	0.3	3
	HM1	50 ~ 52	1.0	
轴承套圈热 X 形凹模	3Cr2W8V	—	0.2 ~ 0.3	6 ~ 10
	HD	—	2	

(续)

模具名称	模具材料	硬度 HRC	使用寿命/万件	提高倍数
铜管挤压底模	3Cr2W8V	—	150 件	2.8
	HD	—	420 件	
热挤压凸模（低碳钢）	3Cr2W8V	—	150 件	2.8
	HD	—	420 件	

3.2.3 塑料模具材料的选择

1) 塑料模具零件可分两类，即工作（成型）零件和结构零件。工作零件是指对塑料制品的几何形状、尺寸及其精度起决定性作用的零件，所以也称为成型零件或零件的成型部分，如凹模、型芯、镶块、成型杆、成型环等。它们的服役条件相当复杂，技术要求很高。尤其是成型零件工作面的表面质量，是影响塑料制品外观和质量以及模具寿命的主要因素。

2) 塑料模具发展的初级阶段，一般采用优质结构钢和工具钢制造。如 45 钢、T10A、40Cr、20Cr、12CrNi3A、9CrWMn、9Mn2V 等。现在我国已初步建立起塑料模具钢系列，如 SM45 ~ SM55 系列等，其冶金质量比 GB/T 699—1999、GB/T 3077—1999、GB/T 1299—2000 的钢号要高。

3) 相当部分的塑料模具钢经过如电渣重熔（ESR）、自耗电极真空电（弧）炉重熔（VAR）、真空除气、良好热加工等精炼，纯净度、碳化物均匀度高，具有各向同性等高品质，所以价格也相应高。如经电渣重熔的 SM4Cr5MoSiV1（即 H13）比 4Cr5MoSiV1 的价格要高 30% 左右，体现了优质优价的原则。

4) 过去我国模具钢的原材料是圆形棒料，其尺寸公差等级很宽。用户购进后需要改锻、热处理，切削加工余量也很大。现在我国增加了《塑料模具用扁钢》（YB/T 094—1997）、《塑料模具用热轧厚钢板》（YB/T 107—1997）和《塑料模具钢模块技术条件》（YB/T 129—1997）三种形式。

5) 预硬型塑料模具钢和非调质贝氏体塑料模具钢是热处理状态供货，用户在制造过程中省去了热处理工序，避免了热处理加工带来的变形、开裂、脱碳等缺陷，节约能源，缩短生产周期。钢材供应商为用户着想，尽量方便用户，降低用户的制造成本，这是一个很大的进步。

1. 塑料模具的失效形式

塑料模具的主要失效形式是磨损、腐蚀、塑性变形、断裂、疲劳及热疲劳等，但由于对塑料制品的表面粗糙度及精度要求较高，故因表面磨损造成的模具失效比例较大。

(1) 型腔表面的磨损和腐蚀失效

1) 塑料熔体以一定压力在型腔内流动，凝固的塑件从模具中脱出，对模具成型表面造成摩擦，引起磨损。当塑料中含有较硬的固体填料如石英砂、钛白粉、玻璃纤维等时，则磨损更为剧烈。在压缩模中，塑料原料多以粉末状态加入型腔，且多含有木粉等

填料, 它们在加热加压、熔融流动的过程中, 对压缩模型腔的磨损也很严重。磨损的结果是使型腔的表面粗糙度值增大。而当表面被拉毛、产生划痕, 造成塑件表面质量不合格时, 模具暂时失效, 须经重新抛光才能继续使用。反复地磨损、抛光导致模具尺寸超差而最终失效。

2) 模具在加工某些含有氯原子或氟原子的塑料时, 由于塑料受热产生少量的分解, 所释放的 HCl 、 HF 等气体将会腐蚀型腔表面, 从而导致失效。如果在腐蚀的同时又有磨损损伤, 使型腔表面的镀层或其他防腐蚀层遭到破坏, 则将促进腐蚀过程。两种损伤交叉作用, 加速了腐蚀 + 磨损失效。

(2) 塑性变形失效

模具在持续受热、受压力作用下, 发生局部塑性变形失效。以渗碳钢或碳素工具钢制造的胶木模小型模具在大吨位压力机上超载使用时, 容易产生表面凹陷、麻点、棱角堆塌等现象, 特别是在棱角处更容易产生塑性变形。其失效原因, 主要是由于模具型腔表面的硬化层过薄, 变形抗力不足; 或是模具在热处理时回火不足, 在服役时, 工作温度高于回火温度, 继续发生组织转变而发生相变超塑性流动, 使模具早期失效。为防止塑性变形, 需将模具处理到足够的硬度及硬化层深度, 如对于碳素工具钢加工的塑料模具, 硬度应达到 $52 \sim 56\text{HRC}$, 渗碳钢的渗碳层厚度应大于 0.8mm 。

(3) 断裂失效

断裂失效是一种危害性较大的快速失效形式。塑料制品成型模具形状复杂, 存在许多棱角、薄壁等部位, 在这些位置会产生应力集中而发生断裂。为此, 在设计制造中除热处理时要注意充分回火外, 主要应选用韧性较好的模具钢制造塑料模具, 对于大、中型复杂型腔胶木模, 应采用高韧性钢 (渗碳钢或热作模具钢) 制造。

(4) 疲劳和热疲劳失效

在一般情况下, 压缩模受力较大, 易产生疲劳开裂; 注射模的温度变化较急剧, 易产生热疲劳裂纹。

1) 塑料模的机械载荷是循环变化的。例如, 注射模在充模和保压阶段, 型腔承受高压塑料熔体的很大张力, 而在冷却和脱模阶段, 外加载荷则完全解除。这样重复循环作用, 使型腔表面承受脉动拉伸应力作用, 从而引起疲劳破坏。

2) 塑料模的热载荷也是循环变化的。例如, 进入注射模型腔的熔料温度一般为 200°C 左右或更高, 而冷却硬化后的温度为 50°C 左右。型腔表面反复受热和冷却, 可导致应力集中处萌生热疲劳裂纹。再加上型腔表面上的脉动拉伸应力, 有可能使热疲劳裂纹向纵深扩展, 成为断裂或疲劳断裂的裂源。

2. 塑料模具钢的性能

(1) 塑料模具钢的基本性能要求

塑料模具钢必须具有较高的硬度、较好的耐磨性, 并要有一定的硬化层深度, 心部要有足够的强韧性, 良好的热硬性和耐蚀性, 导热性好, 模具在工作时有良好的尺寸稳定性, 纯净度高且内部组织均匀, 材料的各向异性低; 可加工性能好, 包括磨削性、切削加工性能、抛光性, 电加工性, 蚀刻性能等; 热处理性能好, 包括热处理工艺和组织

的稳定性等。塑料模具钢的基本性能要求见表 3-32。

表 3-32 塑料模具钢的基本性能要求

性能要求		特 征
使用性能	耐磨性	磨损会导致模具丧失精度而失效
	耐蚀性	受腐蚀性介质的侵害而失效
	韧性	受冲击载荷的零件的要求
	导热性	使零件不因工作时温升过高而导致性能改变
	硬度	是综合特性指标，是耐磨性、强度的表征
	纯净度和组织均匀性	保证材料各向异性降低到最低，镜面性好
工艺性能	可加工性	包括切削加工性能、磨削性、研磨性、抛光性能（镜面性）、电加工性、花纹加工（蚀刻）性能等
	热处理工艺性	包括淬透性，淬硬性，热处理变形和过热、脱碳、开裂倾向性，接受渗碳、渗氮的能力等
	焊接性	堆焊、模具零件修正、修复再利用的可能性

(2) 常用塑料模具钢性能比较（表 3-33）

表 3-33 常用塑料模具钢性能比较

钢号		使用硬度 HRC	耐磨性	抛光 性能	淬火后 变形倾向	硬化深度	可加工性	脱碳敏感性	耐蚀性
类别	牌号								
渗碳型	20	30 ~ 45	差	较好	中等	浅	中等	较大	差
	20Cr	30 ~ 45	差	较好	较小	浅	中等	较大	较差
淬硬型	45	30 ~ 50	差	差	较大	浅	好	较小	差
	40Cr	30 ~ 50	差	差	中等	浅	较好	小	较差
	CrWMn	58 ~ 62	中等	差	中等	浅	中等	较大	较差
	9SiCr	58 ~ 62	中等	差	中等	中等	中等	较大	较差
	9Mn2V	58 ~ 62	中等	差	小	浅	较好	较大	尚可
预硬型	5CrNiMnMoVSCa	40 ~ 45	中等	好	小	深	好	较小	中等
	3Cr2NiMnMo	32 ~ 40	中等	好	小	深	好	中等	中等
	3Cr2Mo	40 ~ 50	中等	好	较小	较深	好	较小	较好
	8Cr2MnWMoVS	40 ~ 42	较好	好	小	深	好	较小	中等
耐蚀性	2Cr13	30 ~ 40	较好	较好	小	深	中等	小	好
	1Cr18Ni9	30 ~ 40	较好	较好	小	深	中等	小	好

3. 塑料模具成型零件选材方法

(1) 根据塑料制品的种类和特性选材

塑料的品种有热塑性塑料和热固性塑料两大类，通常又可分为几个小类：即通用型

塑料和橡胶,如ABS、聚乙烯、聚丙烯、热塑性橡胶和合成橡胶等;流体塑料,如尼龙、聚氨酯等;一般用途、耐高压及耐腐蚀塑料,如醇酸树脂、三聚氰胺、聚甲醛等;耐腐蚀和耐高温热塑性塑料,如聚氯乙烯;需要在高温下固化的塑料;热固性塑料;低压塑料,如环氧树脂、聚酯等。由于塑料模具的结构和形状比较复杂,品种规格多,要求低的表面粗糙度值,制造难度大。综合考虑其工作条件、失效、性能等情况,合理地选用材料以提高塑料模具使用寿命就显得极其重要。根据塑料制品品种选择模具材料举例见表3-34。

表 3-34 根据塑料制品品种选择模具材料举例

用途		代表性塑料及制品		性能要求	选择材料
通用型热塑性、 热固性塑料	普通塑料 制品	ABS、聚乙烯	电视机壳、音响设备、 电扇扇叶、容器	高强度、耐磨损	SM55、40CrMn、 3Cr2Mo、 3Cr2NiMnMo、 SM2CrNi3MoAl1S、 8Cr2MnWMoVS、 5CrNiMnMoVSCa
	表面 有花纹	ABS	汽车仪表板、 化妆品容器	高强度、耐磨损、 蚀刻性	PMS、SM2、P20
	透明体	有机玻璃	唱机罩、仪表罩、 汽车灯罩等	高强度、耐磨损、 抛光性	5NiSCa、SM2、 PMS、P20
增强塑料(热塑性)		POM PC	工程塑料制件、电动工具 外壳、汽车仪表板	高耐磨性	8Cr2S、65Nb、 PMS、SM2
阻燃型塑料		ABS 加阻燃剂	显像管罩等	耐蚀性	PCR
增强塑料(热固性)		酚醛 环氧树脂	齿轮、零件等	高耐磨性	65Nb、06Ni6CrMoVTiAl、 8Cr2S
日用品		PVC	电话机、阀门管件、 门手把等	强度、耐蚀性	PCR、38CrMoAlA
光学透镜		有机玻璃、 聚苯乙烯	照相机镜头、放大镜	抛光性、耐蚀性	PMS、8Cr2S、PCR

- 注: 1. 对于型腔表面要求耐磨性好、心部要求韧性好,但形状并不复杂的塑料注射模,可选用低碳结构钢和低碳合金结构钢。这类钢在退火状态下塑性好、硬度低,变形抗力小,可用冷挤压成形,大大减少了切削加工量,如20钢、20Cr钢均属于此类钢。对于大、中型且型腔复杂的模具,可选用LJ钢和12Cr2Ni4A、12CrNi3A等优质渗碳钢。这类钢经渗碳、淬火、回火处理后,型腔表面有很好的耐磨性,模体又有很好的强度和韧性。
2. 对于聚氯乙烯、氟塑料及阻燃ABS塑料制品,所用模具材料必须有较好的耐蚀性。因为这些塑料在熔融状态会分解出氯化氢(HCl)、氟化氢(HF)和二氧化硫(SO₂)等气体,对模具型腔有一定的腐蚀性。这类模具中的成型件常用耐蚀塑料模具钢,例如PCR、AFC-77、18Ni、2Cr13及4Cr13等。
3. 生产玻璃纤维作增强材料的塑料制品的注射模或压缩模,要求有高的硬度、高的耐磨性、高的抗压强度和较高的韧性,以防止塑料模具型腔表面过早磨损,或因模具受高压而发生局部变形,故常用淬硬模具钢制造并经淬火、回火后得到所需的力学性能。例如T8A、T10A、Cr6WV、Cr12、Cr12MoV、9Mn2V、9SiCr、CrWMn、GCr15、65Nb等淬硬型模具钢。
4. 制造透明制品的模具,要求模具钢材有良好的抛光性能和高耐磨性,所以采用预硬化型钢制造,如P20、PMS、5NiSCa、8Cr2S等。用不同的塑料原料制造大小及形状不同的塑料制品时,应选用不同的塑料模具钢。

(2) 根据塑料制品的生产批量选材

选择模具钢种类与塑料制品的生产批量有关。生产批量小，对模具的耐磨性及使用寿命要求不高，为了降低模具造价，不必选用高级优质模具钢，只选用普通模具钢即可满足使用要求。当生产批量大时，要求模具使用寿命长，则选用高级优质模具钢。按塑料制品生产批量选择模具材料见表 3-35。

表 3-35 按塑料制品生产批量选择模具材料

生产批量/件	选择材料
20 万以下	SM45、SM50、SM55、40Cr
>20 ~ 30 万	P20、3Cr2Mo、5CrNiMnMoVSCa、8Cr2MnWMoVS
>30 ~ 60 万	3Cr2Mo、P20、SM2、5CrNiMnMoVSCa
>60 ~ 80 万	SM3Cr2NiMo、5CrNiMnMoVSCa、SM1
>80 ~ 150 万	SM2CrNi3MoAl1S、PMS
200 万件以上	65Nb、06Ni6CrMoVTiAl、SM2CrNi3MoAlS 渗氮

(3) 根据塑料制品的尺寸大小及精度要求选择模具材料

对于大型的、高精度的注射模具，当塑料制品的生产批量大时，采用预硬化钢。由于模具型腔大，模具壁厚加大，因此对钢的淬透性要求高，热处理后要求变形小。预硬型模具钢在机械加工前进行了预硬化热处理，机械加工后不再进行热处理，大大减少了热处理引起的变形。预硬处理后的模具钢既有较高的硬度和耐磨性，又有高的强度和韧性。例如 SM3Cr2Mo、SM3Cr2NiMo、8Cr2S、SM4Cr5MoSiV、SM1、PMS、42CrMo、40Cr、P4410 等模具钢都可选择。

(4) 根据塑料制品形状的复杂程度选用模具材料

对于形状复杂的注射模具，为了减少模具热处理后产生变形和开裂的情况，应选用加工性能好、热处理后变形小的模具材料，如 Cr12、SM3Cr2Mo、SM4Cr5MoSiV、SM2、PMS 钢等。如果塑料制品的生产批量小，可以选用 SM45、SM50、SM55 钢，经调质处理后，使用效果较好。

(5) 塑料模具中其他零件的材料选用

塑料模具的其他零件，如导柱、导套、衬套、推杆、拉料杆、各种模板、推板、固定支架等，其抛光性、耐蚀性等要求较成型零件本身的要求低，一般可选择比成型零件材料稍低的模具材料，经过合理的热处理即可，这样即能达到使用要求，又能降低模具成本。上述零件已有标准件的应选用标准件，可缩短模具的制作周期，降低生产成本，提高标准化水平。

(6) 塑料模具材料选择的有关标准推荐选材

1) 我国机械行业标准 JB/T 6057—1992 推荐的塑料模具成型部分（零件）用钢见表 2-36。

表 3-36 塑料模具成型零件用钢

类别	渗碳型	淬硬型	预硬型	耐蚀型
钢号	20、 20Cr	45、40Cr、 T10A、CrWMn、 9SiCr、9Mn2V	5CrNiMnMoVSCa、 3Cr2Mo、 3Cr2NiMnMo、 8Cr2MnWMoVS	2Cr13、4Cr13、 1Cr18Ni9、 3Cr17Mo

2) 我国冶金行业标准 YB/T 094—1997 推荐的塑料模具钢的用途见表 3-37。

表 3-37 冶金行业标准推荐的塑料模具钢的用途

钢号	特性和用途
SM45	价格低廉、机械加工性能好，用于日用杂品、玩具等塑料制品模具
SM50	硬度比 SM45 高，用于性能要求一般的塑料模具
SM55	淬透性强度比 SM50 高，用于较大型的、性能要求一般的塑料模具
SM1CrNi3	塑性好，用于冷挤压反印法压出型腔的塑料模具制作
SM3Cr2Mo	预硬化钢，用于型腔复杂、要求镜面抛光的模具
SM3Cr2NiMo	预硬化钢，淬透性比 SM3Cr2Mo 高，用于大型精密塑料模具
SM2CrNi3MoAl1S	析出硬化钢，用于型腔复杂的塑料模具
SM4Cr5MoSiV	强度高、韧性好，用于玻璃纤维、金属粉末等复合强化塑料成型用模具
SM4Cr5MoSiV1	热稳定性、耐磨性比 SM4Cr5MoSiV 高，用于工程塑料、键盘等模具制作
SMCr12Mo1V1	硬度高、耐磨，用于齿轮、微型开关等精密模具
SM2Cr13	耐腐蚀，用于耐蚀母模、托板、安装板等模具
SM3Cr17Mo	耐腐蚀，用于 PVC 等腐蚀性较强的塑料成型模具
SM4Cr13	耐腐蚀、耐磨、抛光性好，用于唱片、透明罩等精密模具

第 4 章 冷作模具钢

冷作模具是指在冷态（室温）条件下对金属或非金属进行塑性变形的模具。如冲模、拉深模、剪切模、冲裁模、冷挤压模、冷墩模、拉丝模、滚丝模、压印模和粉末压制模等。冷作模具钢是制造冷作模具的主要材料。

4.1 常用冷作模具钢

常用冷作模具钢主要有碳素工具钢、高碳低合金钢、冷作模具钢、高耐磨冷作模具钢、冷作模具用高速工具钢、基体钢和无磁模具钢。

常用冷作模具钢的分类及化学成分见表 4-1。

表 4-1 常用冷作模具钢的分类及化学成分（质量分数）（%）

钢号	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	P	S	其他
碳素工具钢										
T7	0.65 ~ 0.74	≤0.35	≤0.40	—	—	—	—	≤0.035	≤0.030	—
T8	0.75 ~ 0.84	≤0.35	≤0.40	—	—	—	—	≤0.035	≤0.030	—
T9	0.85 ~ 0.94	≤0.35	≤0.40	—	—	—	—	≤0.035	≤0.030	—
T10	0.95 ~ 1.04	≤0.35	≤0.40	—	—	—	—	≤0.035	≤0.030	—
T11	1.05 ~ 1.14	≤0.35	≤0.40	—	—	—	—	≤0.035	≤0.030	—
T12	1.15 ~ 1.24	≤0.35	≤0.40	—	—	—	—	≤0.035	≤0.030	—
T13	1.25 ~ 1.35	≤0.35	≤0.40	—	—	—	—	≤0.035	≤0.030	—
高碳低合金冷作模具钢										
9SiCr	0.85 ~ 0.95	1.20 ~ 1.60	0.30 ~ 0.60	0.95 ~ 1.25	—	—	—	≤0.030	≤0.030	—
9Mn2V	0.85 ~ 0.95	≤0.40	1.70 ~ 2.00	—	—	—	0.10 ~ 0.25	≤0.030	≤0.030	—
9CrWMn	0.85 ~ 0.95	≤0.40	0.90 ~ 1.20	0.50 ~ 0.80	0.50 ~ 0.80	—	—	≤0.030	≤0.030	—
CrWMn	0.90 ~ 1.05	0.15 ~ 0.35	≤0.40	0.90 ~ 1.20	1.20 ~ 1.60	—	—	≤0.030	≤0.030	—
6CrNiWMoV (DS)	0.60	0.65	0.85	1.15	0.50	0.10 ~ 0.40	0.10 ~ 0.30	≤0.030	≤0.030	—
GCr15	0.95 ~ 1.05	0.15 ~ 0.35	0.25 ~ 0.45	1.40 ~ 1.65	—	—	—	≤0.030	≤0.025	—

(续)

钢号	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	P	S	其他
高碳低合金冷作模具钢										
Cr2	0.95 ~ 1.10	≤0.40	≤0.40	1.30 ~ 1.65	—	—	—	≤0.030	≤0.030	—
60Si2Mn	0.56 ~ 0.64	1.60 ~ 2.00	0.70 ~ 1.00	≤0.35	—	—	—	≤0.035	≤0.035	Ni ≤0.35 Cu ≤0.25
8Cr2MnW MoVS (8Cr2S)	0.75 ~ 0.85	≤0.40	1.30 ~ 1.70	2.30 ~ 2.60	0.70 ~ 1.10	0.50 ~ 0.80	0.10 ~ 0.15	≤0.030	0.08 ~ 0.15	—
9Cr2	0.80 ~0.95	≤0.40	≤0.40	1.30 ~ 1.70	—	—	—	≤0.030	≤0.030	—
6CrNiMnSiMoV (GD)	0.64 ~ 0.74	0.50 ~ 0.90	0.70 ~ 1.00	1.00 ~ 1.30	—	0.30 ~ 0.60	0.20	≤0.030	≤0.030	Ni: 0.70 ~1.00
Cr2Mn2SiWMoV	0.95 ~ 1.05	0.60 ~ 0.90	1.80 ~ 2.30	2.30 ~ 2.60	0.70 ~ 1.10	0.50 ~ 0.80	0.10 ~ 0.25	≤0.030	≤0.030	—
W	1.05 ~ 1.25	≤0.40	≤0.40	0.10 ~ 0.30	0.80 ~ 1.20	—	—	≤0.030	≤0.030	—
4CrW2Si	0.35 ~ 0.45	0.80 ~ 1.10	≤0.40	1.00 ~ 1.30	2.00 ~ 2.50	—	—	≤0.030	≤0.030	—
5CrW2Si	0.45 ~ 0.55	0.50 ~ 0.80	≤0.40	1.00 ~ 1.30	2.00 ~ 2.50	—	—	≤0.030	≤0.030	—
6CrW2Si	0.55 ~ 0.65	0.50 ~ 0.80	≤0.40	1.10 ~ 1.30	2.20 ~ 2.70	—	—	≤0.030	≤0.030	—
8MnSi	0.75 ~ 0.85	0.30 ~ 0.60	0.80 ~ 1.10	—	—	—	—	≤0.030	≤0.030	—
6SiMnV	0.55 ~ 0.65	0.80 ~ 1.10	0.90 ~ 1.20	—	—	—	0.15 ~ 0.30	≤0.030	≤0.030	—
TCrSiMnMoV (GH1)	0.65 ~ 0.75	0.85 ~ 1.15	0.65 ~ 1.05	0.90 ~ 1.20	—	0.20 ~ 0.50	0.15 ~ 0.30	≤0.030	≤0.030	—
6CrMnSi2Mo1	0.50 ~ 0.65	1.75 ~ 2.25	0.60 ~ 1.00	0.10 ~ 0.50	—	0.20 ~ 1.35	0.15 ~ 0.35	≤0.030	≤0.030	—
5Cr3Mn1Si Mo1V	0.45 ~ 0.55	0.20 ~ 1.00	0.20 ~ 0.90	3.00 ~ 3.50	—	1.30 ~ 1.80	≤0.35	≤0.030	≤0.030	—
Cr06	1.30 ~ 1.45	≤0.40	≤0.40	0.50 ~ 0.70	—	—	—	≤0.030	≤0.030	—
高耐磨冷作模具钢										
7Cr7Mo2V2Si (LD)	0.70 ~ 0.80	0.70 ~ 1.20	≤0.50	6.70 ~ 7.50	—	2.00 ~ 2.50	1.70 ~ 2.20	≤0.030	≤0.030	—
7Cr7Mo3V2Si (LD2)	0.70 ~ 0.80	0.70 ~ 1.20	≤0.50	6.50 ~ 7.50	—	2.00 ~ 3.00	1.70 ~ 2.20	≤0.030	≤0.030	—
Cr12	2.00 ~ 2.30	≤0.40	≤0.40	11.50 ~ 13.00	—	—	—	≤0.030	≤0.030	—
Cr12Mo1V1	1.40 ~ 1.60	≤0.60	≤0.60	11.00 ~ 13.00	—	0.70 ~ 1.20	0.50 ~ 1.10	≤0.030	≤0.030	Co ≤1.00

(续)

钢号	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	P	S	其他
高耐磨冷作模具钢										
Cr12MoV	1.45 ~ 1.70	≤0.40	≤0.40	11.00 ~ 12.50	—	0.40 ~ 0.60	0.15 ~ 0.30	≤0.030	≤0.030	—
Cr12Mo	2.05 ~ 2.40	0.10 ~ 0.60	0.10 ~ 0.60	11.00 ~ 13.00	—	0.70 ~ 1.20	—	≤0.030	≤0.030	—
Cr4W2MoV	1.12 ~ 1.25	0.40 ~ 0.70	≤0.40	3.50 ~ 4.00	1.90 ~ 2.60	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.10	≤0.030	≤0.030	—
Cr6WV	1.00 ~ 1.15	≤0.40	≤0.40	5.50 ~ 7.00	1.10 ~ 1.50	—	0.50 ~ 0.70	≤0.030	≤0.030	—
Cr12V	1.20 ~ 1.40	≤0.40	≤0.35	11.00 ~ 12.50	—	—	0.70 ~ 0.90	≤0.030	≤0.030	—
Cr8MoWV3Si (ER5)	0.95 ~ 1.10	0.90 ~ 1.20	0.30 ~ 0.60	7.00 ~ 8.00	0.80 ~ 1.20	1.40 ~ 1.80	2.20 ~ 2.70	≤0.030	≤0.030	—
9Cr6W3Mo2V2 (GM)	0.86 ~ 0.96	≤0.40	≤0.40	5.60 ~ 6.40	2.80 ~ 3.20	2.00 ~ 2.50	1.70 ~ 2.20	≤0.030	≤0.030	—
Cr5Mo1V	0.95 ~ 1.05	≤0.50	≤1.00	4.75 ~ 5.50	—	0.90 ~ 1.40	0.15 ~ 0.50	≤0.030	≤0.030	—
Cr12W	2.00 ~ 2.30	≤0.40	≤0.40	11.00 ~ 12.50	0.60 ~ 0.90	—	—	≤0.030	≤0.030	—
冷作模具用高速工具钢										
W18Cr4V	0.73 ~ 0.83	0.20 ~ 0.40	0.10 ~ 0.40	3.80 ~ 4.50	17.20 ~ 18.70	—	1.00 ~ 1.20	≤0.030	≤0.030	—
W6Mo5Cr4 V2	0.80 ~ 0.90	0.20 ~ 0.45	0.15 ~ 0.40	3.80 ~ 4.40	5.50 ~ 6.75	4.50 ~ 5.50	1.75 ~ 2.20	≤0.030	≤0.030	—
W9Mo3Cr4V	0.77 ~ 0.87	0.20 ~ 0.40	0.20 ~ 0.40	3.80 ~ 4.40	8.50 ~ 9.50	2.70 ~ 3.30	1.30 ~ 1.70	≤0.030	≤0.030	—
W12Mo3Cr4 V3N (V3N)	1.15 ~ 1.25	≤0.40	≤0.40	3.50 ~ 4.10	11.00 ~ 12.50	2.70 ~ 3.70	2.50 ~ 3.10	≤0.030	≤0.030	N: 0.04 ~0.10
6W6Mo5Cr4V (6W6)	0.55 ~ 0.65	≤0.40	≤0.60	3.70 ~ 4.30	6.00 ~ 7.00	4.50 ~ 5.50	0.70 ~ 1.10	≤0.030	≤0.030	—
基体钢										
6Cr4W3Mo2 VNb (65Nb)	0.60 ~ 0.70	≤0.40	≤0.40	3.80 ~ 4.40	2.50 ~ 3.50	1.80 ~ 2.50	0.80 ~ 1.20	≤0.030	≤0.030	Nb: 0.20 ~0.35
5Cr4Mo3SiMn VAl (012Al)	0.47 ~ 0.57	0.80 ~ 1.10	0.80 ~ 1.10	3.80 ~ 4.30	—	2.80 ~ 3.40	0.80 ~ 1.20	≤0.030	≤0.030	Al: 0.30 ~0.70
6Cr4Mo3Ni2 WV (CG2)	0.55 ~ 0.64	≤0.40	≤0.40	3.80 ~ 4.30	0.90 ~ 1.30	2.80 ~ 3.30	0.90 ~ 1.30	≤0.030	≤0.030	Ni: 0.90 ~1.30
6W8Cr4VTi (LM1)	0.40 ~ 0.70	≤0.40	≤0.40	4.20 ~ 4.80	7.50 ~ 8.50	—	0.80 ~ 1.20	≤0.030	≤0.030	Ti: 0.10 ~0.30
6Cr5Mo3W2 VSiTi (LM2)	0.60 ~ 0.70	≤0.40	≤0.40	4.50 ~ 5.20	1.60 ~ 2.30	2.80 ~ 3.40	1.00 ~ 1.40	≤0.030	≤0.030	Ti: 0.10 ~0.30

(续)

钢号	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	P	S	其他
无磁模具钢										
7Mn15Cr2Al3V2 WMo (7Mn15)	0.65 ~ 0.75	≤0.80	14.50 ~ 16.50	2.00 ~ 2.50	0.50 ~ 0.80	0.50 ~ 0.80	1.50 ~ 2.00	≤0.030	≤0.030	Al: 2.30 ~3.30
5Mn15Cr8Ni5 Mo3V2 (5Mn15)	0.45 ~ 0.55	≤1.00	14.50 ~ 16.00	7.50 ~ 8.50	—	2.50 ~ 3.00	1.50 ~ 2.00	≤0.040	≤0.030	Ni: 4.50 ~5.50
1Cr18Ni9Ti	≤0.12	≤1.00	≤2.00	17.00 ~ 19.00	—	—	—	≤0.035	≤0.030	Ti: 0.80 Ni: 8.00 ~11.00
7Mn10Cr8Ni10Mo 3V2 (7Mn10)	0.65 ~ 0.75	≤1.00	9.00 ~ 11.00	7.50 ~ 8.50	—	2.50 ~ 3.50	1.50 ~ 2.00	≤0.030	≤0.030	Ni: 9.00 ~11.00

4.2 冷作模具钢的性能与应用

冷作模具钢按成分和性能可分为碳素工具钢、高碳低合金冷作模具钢、高耐磨冷作模具钢、冷作模具用高速工具钢、基体钢、无磁模具钢。

4.2.1 碳素工具钢

碳素工具钢碳的质量分数为 0.7% ~ 1.3%，价格便宜，原材料来源方便，加工性能良好，淬火温度低，热处理后具有较高的表面硬度和较好的耐磨性。该类钢是传统的经典的优质钢的代表，也是合金工具钢的基础。但其淬透性低，淬火温度范围窄，淬火变形大，较大的模具不能淬透，表面淬硬层和中心部分之间的硬度值相差很大，容易使模具在淬火时开裂，因此很少用来制造精度要求高、形状复杂、承载力较大的冷作模具。常用于制造尺寸不大、形状简单、受轻载荷的模具零件，在模具制造中仍然保持着重要的地位。世界各国都有碳素工具钢系列，如美国的 W1 系列（ASTM、AISI），俄罗斯的 y 系列 y7 ~ y13（ГОСТ），日本的 SK 系列 SK1 ~ SK7（JIS），韩国的 STC 系列 STC1 ~ STC7（KS），欧盟的 CT 系列（EN），国际标准化组织的 TC 系列（ISO）等。国外该类钢的质量等级分类较细，与我国钢号不能完全一一对应。

1. T7 钢

(1) 化学成分

T7 钢的化学成分（GB/T 1298—2008）见表 4-2。

表 4-2 T7 钢的化学成分（质量分数）

（%）

钢号	C	Si	Mn	P	S
T7	0.65 ~ 0.74	≤0.35	≤0.40	≤0.035	≤0.030
T7A	0.65 ~ 0.74	≤0.35	≤0.40	≤0.030	≤0.020

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 4-3)。

表 4-3 T7 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	Ar_1	M_s
温度 (近似值) /℃	730	770	700	280

2) 线膨胀系数 (表 4-4)。

表 4-4 T7 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	11.8	12.6	13.3	14.0

3) 热导率 (表 4-5)。

表 4-5 T7 钢热导率

温度/℃	20	100	300
热导率 $\lambda / [\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})]$	44.0	44.0	41.9

(3) 热加工

T7 钢锻造工艺规范见表 4-6。

表 4-6 T7 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1100 ~ 1150	1080 ~ 1120	750 ~ 850	空冷
钢坯	1050 ~ 1100	1020 ~ 1080	750 ~ 800	空冷

(4) 热处理

1) 预备热处理。

① 预备热处理规范 (表 4-7)。

表 4-7 T7 钢预备热处理规范

预备热处理方案	加热温度/℃	保温时间/h	等温温度/℃	冷却方式	退火后硬度 HBW
锻后等温退火 ^①	将工件加热至 790 ~ 810℃, 保温 1 ~ 2h, 炉冷至 650 ~ 680℃等温 1 ~ 2h, 炉冷至 500℃以下出炉空冷				≤187
锻后不完全退火	740 ~ 760	3 ~ 4	—	炉冷至 600℃以下出炉空冷,	≤187
球化退火 ^②	将工件以 ≥100℃/h 的速度加热, 至 680 ~ 700℃保温一定时间, 继续升温至 730 ~ 750℃。在 600 ~ 700℃进行第一次保温 8 ~ 10h; 升温至 730 ~ 750℃, 第二次保温 0.5 ~ 1h; 再次升温至 730 ~ 750℃, 保温 0.5 ~ 1h, 以 10 ~ 20℃/h 的速度炉冷, 至 500℃出炉空冷				≤187
正火 ^③	800 ~ 820	—	—	空冷	229 ~ 285
高温回火 ^④	650 ~ 700	2 ~ 3	—	炉冷或空冷	≤187

- ① 退火的目的是细化组织。
- ② 球化退火的目的是获得球化组织。
- ③ 正火的目的是细化晶粒, 消除网状碳化物。
- ④ 高温回火用于消除冷变形后的冷作硬化和淬火前、切削加工后的内应力。

② T7 钢退火前后的硬度和组织（表 4-8）。

表 4-8 T7 钢退火前后的硬度和组织

硬度				相成分（质量分数，%）			显微组织	
未退火		退火后		铁素体	碳化物	碳化物形式	未退火	退火后
压痕直径/mm	HBW	压痕直径/mm	HBW					
3.6 ~ 4.0	285 ~ 229	≥4.4	≤187	88.9 ~ 90.3	9.7 ~ 11.1	Fe ₃ C	P + F	P 球 + F

2) 淬火。推荐的淬火规范见表 4-9。

表 4-9 T7 钢推荐的淬火规范

方案	加热温度/℃	冷却				硬度 HRC
		淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	延续	冷却至 20℃	
I	800 ~ 830	水	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	61 ~ 63
II		质量分数为 5% 的食盐水溶液	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	61 ~ 63
III		质量分数为 5% ~ 10% 的碱水溶液	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	61 ~ 63
IV	810 ~ 840	锭子油或变压器油	20 ~ 40	至 20 ~ 40℃	—	60 ~ 63
V		熔融硝酸盐	170 ~ 200	3 ~ 5min	空冷	60 ~ 63
VI		熔碱中加质量分数为 4% ~ 6% 的水	170 ~ 200	3 ~ 5min	空冷	60 ~ 63

注：1. 方案 III 用于防止淬火时形成软点。

2. 方案 IV 和 V 用于直径和厚度小于 6 ~ 8mm 的工件。

3. 方案 VI 用于直径或厚度达 10 ~ 12mm 的工件。

4. 熔融硝酸盐可用 KNO₃ 55% + NaNO₂ 45%，熔碱可用 NaOH20% + KOH80% + H₂O4% ~ 6% 或 NaOH40% ~ 50% + KOH50% ~ 60% + H₂O4% ~ 6%（配比均为质量分数）。

3) 回火

① 推荐的回火规范（表 4-10）。

表 4-10 T7 钢推荐的回火规范

方案	回火目的	加热温度/℃	加热介质	硬度 HRC
I	消除应力，稳定组织	140 ~ 160	油、硝酸盐、碱	60 ~ 62
		160 ~ 180		58 ~ 61
		180 ~ 200		56 ~ 60
II	消除应力，降低硬度	按硬度要求	硝酸盐、碱、空气炉	—

注：1. 高精度（1 ~ 2 μm）工件，应在粗磨加工后再进行回火（时效）。

2. 高于 250℃ 温度回火，可保证工件的尺寸稳定性。

② 硬度与回火温度的关系（表 4-11）。

表 4-11 T7 钢硬度与回火温度的关系

回火温度/℃	100	200	300	400	500	550	600
硬度 HRC	62	60	51.5	43	33	28	22

(5) 力学性能

T7 钢具有较好的韧性和硬度，淬火温度低，热处理后具有较高的强度、表面硬度及较好的耐磨性。但其淬透性低，淬火温度范围窄，表面淬硬层和中心部分之间的硬度值相差很大，形成内韧外刚的表里不一的综合组织结构，具有一定的综合力学性能。

(6) 材料应用

T7 钢有较好的韧性和一定的强度、硬度及耐磨性，但可加工性较差，多用来制造同时需要有较大韧性和一定硬度且对切削加工性能要求不高的工具、模具，如冲头、大锤锤头、錾子、木工用锯、小尺寸风动工具、钳工工具、锻模、压模、铆钉冲模及热固性塑料压缩模等。

2. T8 钢

(1) 化学成分

T8 钢的化学成分 (GB/T 1298—2008) 见表 4-12。

表 4-12 T8 钢的化学成分 (质量分数) (%)

钢号	C	Si	Mn	P	S
T8	0.75 ~ 0.84	≤0.35	≤0.40	≤0.035	≤0.030
T8A	0.75 ~ 0.84	≤0.35	≤0.40	≤0.030	≤0.020
T8Mn ^①	0.80 ~ 0.90	≤0.35	0.40 ~ 0.60	≤0.035	≤0.030

① T8Mn 钢性能与 T8、T8A 钢相似，但淬透性好，可获得较深的淬硬层。

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 4-13)。

表 4-13 T8 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	M_s
温度 (近似值) / °C	730	750	700	230

2) 线膨胀系数 (表 4-14)。

表 4-14 T8 钢线膨胀系数

温度 / °C	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	11.5	12.3	13.0	13.8

3) 热导率 (表 4-15)。

表 4-15 T8 钢热导率

温度 / °C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200
热导率 $\lambda / [\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})]$	49.83	48.15	45.22	41.45	38.10	35.17	32.66	30.15	24.28	26.8	30.15

4) 比热容 (表 4-16)。

表 4-16 T8 钢比热容

温度/℃	50 ~ 100	150 ~ 200	200 ~ 250	250 ~ 300	300 ~ 350	350 ~ 400	450 ~ 500	550 ~ 600	650 ~ 700	750 ~ 800
比热容 c_p / [J/ (kg · K)]	489.8	531.7	548.4	565.2	586.2	607.1	669.9	711.8	770.4	615.5

(3) 热加工
锻造工艺规范见表 4-17。

表 4-17 T8 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	750 ~ 850	空冷
钢坯	1050 ~ 1100	1020 ~ 1080	750 ~ 800	空冷

(4) 热处理
1) 预备热处理。
① 预备热处理工艺规范（表 4-18）。

表 4-18 T8 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 690 ~ 710℃，保温 4 ~ 5h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷（或炉冷），硬度≤187HBW
锻后等温退火工艺	加热温度为 740 ~ 760℃，保温 1 ~ 2h；等温温度为 650 ~ 680℃，保温 1 ~ 2h；炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度≤187HBW
正火	加热温度为 760 ~ 780℃，空冷，硬度为 241 ~ 302HBW。目的为细化晶粒，消除网状碳化物
高温回火工艺	加热温度为 650 ~ 700℃，保温 2 ~ 3h，炉冷或空冷，硬度≤187HBW。高温回火用于消除冷变形后的冷作硬化及淬火前、切削加工后的内应力

② 退火前后的硬度和组织（表 4-19）。

表 4-19 T8 钢退火前后的硬度和组织

硬度				相成分（质量分数,%）			显微组织	
未退火		退火后		铁素体	碳化物	碳化物形式	未退火	退火后
压痕直径/mm	HBW	压痕直径/mm	HBW					
3.5 ~ 3.9	302 ~ 241	≥4.4	≤187	87.4 ~ 88.8	11.2 ~ 12.6	Fe ₃ C	P	P + P 球

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 4-20。

表 4-20 T8 钢推荐的淬火工艺规范

方案	加热温度 /℃	冷却				硬度
		淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	延续	冷却至 20℃	HRC
I	750 ~ 800	水	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 64
II		质量分数为 5% 的食盐水	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 65
III		质量分数为 5% ~ 10% 的碱水溶液	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 64
IV	800 ~ 820	锭子油或变压器油	20 ~ 40	至 20 ~ 40℃	—	60 ~ 63
V		熔融硝酸盐	170 ~ 200	3 ~ 5min	空冷	60 ~ 63
VI		熔碱中加质量分数为 4% ~ 6% 的水	170 ~ 200	3 ~ 5min	空冷	60 ~ 63

- 注：1. 方案Ⅲ用于防止淬火时形成软点。
2. 方案Ⅳ和Ⅴ用于直径和厚度小于 6 ~ 8mm 的工件。
3. 方案Ⅵ用于直径或厚度达 10 ~ 12mm 的工件。
4. 熔融硝酸盐可用 KNO₃55% + NaNO₂45%，熔碱可用 NaOH20% + KOH80% 另加 H₂O4% ~ 6% 或用 NaOH40% ~ 50% + KOH50% ~ 60% + H₂O4% ~ 6%（配比均为质量分数）。

3) 回火。

① 推荐的回火规范（表 4-21）。

表 4-21 T8 钢推荐的回火规范

方案	回火目的	回火温度/℃	加热介质	硬度 HRC
I	消除应力，稳定组织	140 ~ 160	油	60 ~ 62
		160 ~ 180	硝酸盐	58 ~ 62
		180 ~ 200	碱	56 ~ 60
II	消除应力，降低硬度	按硬度要求选择回火温度	硝酸盐、碱、空气炉	—

- 注：1. 高精度（1 ~ 2μm）工件，应在粗磨加工后再进行回火（时效）。
2. 高于 250℃ 温度回火，可保证工件的尺寸稳定性。

② 回火温度与硬度的关系（表 4-22）。

表 4-22 T8 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	150	200	300	400	500	550	600
硬度 HRC	62	60.5	60	53	44	38	31	27

注：保温 2h。

(5) 力学性能

T8 钢为共析成分碳素工具钢。淬火加热时容易过热，变形大，塑性及强度较低，但热处理温度低，热处理后有较高的硬度及耐磨性。其淬透性低，淬火温度范围窄，淬火变形大，较大的模具不能淬透，而且表面淬硬层和中心部分之间的硬度值相差很大，容易使模具在淬火时开裂。

(6) 材料应用

T8 钢淬火加热时容易过热，变形大，塑性、强度较低，不宜制造承受较大冲击的

工具、模具。因此多用来制造切削刃口在工作时不变热的工具，如錾子、钳工工具、冲头等；小尺寸风动工具、大锤锤头、木工用锯；形状简单的冷作模具，如锻模、压模、铆钉冲模、中心孔冲模、铅锡合金压铸板与型芯及热固性塑料压缩模等。

3. T9 钢

(1) 化学成分

T9 钢的化学成分（GB/T 1298—2008）见表 4-23。

表 4-23 T9 钢的化学成分（质量分数）（%）

钢号	C	Si	Mn	P	S
T9	0.85 ~ 0.94	≤0.35	≤0.40	≤0.035	≤0.030
T9A	0.85 ~ 0.94	≤0.35	≤0.40	≤0.030	≤0.020

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-24。

表 4-24 T9 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	Ar_1	M_s
温度（近似值）/℃	730	760	700	190

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-25。

表 4-25 T9 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	750 ~ 850	空冷
钢坯	1050 ~ 1100	1020 ~ 1060	750 ~ 800	空冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 4-26）。

表 4-26 T9 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 690 ~ 710℃，保温 4 ~ 5h；炉冷至 550℃ 以下出炉空冷（或炉冷），硬度 ≤ 187HBW
锻后等温退火工艺	加热温度为 740 ~ 760℃，保温 1 ~ 2h；等温温度为 650 ~ 680℃，保温 1 ~ 2h；炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度 ≤ 187HBW
正火工艺	加热温度为 760 ~ 780℃，空冷，硬度为 241 ~ 302HBW。目的为细化晶粒，消除网状碳化物
高温回火工艺	加热温度为 650 ~ 700℃，炉冷或空冷，硬度 ≤ 187HBW。高温回火用于消除冷变形后的冷作硬化及淬火前、切削加工后的内应力

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 4-27。

表 4-27 T9 钢推荐的淬火工艺规范

方案	加热温度 /℃	冷却				硬度 HRC
		淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	延续	冷却至 20℃	
I	770 ~ 790	水	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 64
II		质量分数为 5% 的食盐水溶液	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 65
III		质量分数为 5% ~ 10% 的碱水溶液	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 64
IV	790 ~ 810	锭子油或变压器油	20 ~ 40	至 20 ~ 40℃	—	62 ~ 64
V		熔融硝酸盐	150 ~ 180	3 ~ 5min	空冷	62 ~ 64
VI		熔碱中加质量分数为 4% ~ 6% 的水	150 ~ 180	3 ~ 5min	空冷	62 ~ 64

- 注：1. 方案 III 用于防止淬火时形成软点。
2. 方案 IV 和 V 用于直径或厚度 ≤ 6 ~ 8mm 的工件。
3. 方案 VI 用于直径或厚度达 10 ~ 12mm 的工件。
4. 冷却介质：熔融硝酸盐可用 KNO₃ 55% + NaNO₃ 45%，熔碱可用 NaOH 20% + KOH 80% 另加 H₂SO₄ 4% ~ 6% 或用 NaOH 40% ~ 50% + KOH 50% ~ 60% + H₂O 4% ~ 6%（配比均为质量分数）。

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 4-28）。

表 4-28 T9 钢推荐的回火工艺规范

回火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
160 ~ 180	空冷	59 ~ 62

② 回火温度与硬度的关系（表 4-29）。

表 4-29 T9 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	150	200	300	400	500	550	600
硬度 HRC	62	61	60	55	46	36	31	27

注：保温 2h。

(5) 力学性能

T9 钢淬火后硬度比 T7、T8 钢高，淬透性较差，且容易过热，淬火变形较大，塑性及强度较低，热处理后有较高的硬度及耐磨性。但采用双介质淬火等热处理工艺，可获得表层有较高的硬度及耐磨性、心部有强韧性的良好的综合力学性能。

(6) 材料应用

T9 钢淬火硬度较高，但淬火变形较大，塑性及强度较低，该钢价格便宜，热处理后有一定的硬度和耐磨性，一般适宜制造承受冲击力不大的工具和形状简单的冷作模具，不宜制造承受较大冲击载荷的工具、模具。但利用钢的低淬透性，采用不同的热处理工艺，可获得良好的综合力学性能，常用于制造受一定冲击力的冷锻模零件。

4. T10 钢

(1) 化学成分

T10 钢的化学成分 (GB/T 1298—2008) 见表 4-30。

表 4-30 T10 钢的化学成分 (质量分数) (%)

钢号	C	Si	Mn	S	P
T10	0.95 ~ 1.04	≤0.35	≤0.40	≤0.030	≤0.035
T10A	0.95 ~ 1.04	≤0.35	≤0.40	≤0.020	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 4-31)

表 4-31 T10 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{cm}	A_{r1}	M_s	M_f
温度 (近似值) /℃	730	800	700	200	100

2) 线膨胀系数 (表 4-32)。

表 4-32 T10 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 500	20 ~ 600	20 ~ 700	20 ~ 800	20 ~ 900
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	11.5	13.0	14.3	14.8	15.1	16.0	15.8	32.1	32.4

3) 热导率 (表 4-33)。

表 4-33 T10 钢热导率

温度/℃	20	100	300	600	900
热导率 $\lambda / [\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})]$	40.20	43.96	41.03	38.10	33.91

4) 其他物理性能 (表 4-34)。

表 4-34 T10 钢其他物理性能

密度 / (g/cm^3)	磁导率/mH/m	矫顽力 / (A/m)	饱和磁感/T
7.81	0.88	477.48 ~ 1273.28	1.93 ~ 1.97

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-35。

表 4-35 T10 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	750 ~ 850	空冷
钢坯	1050 ~ 1100	1020 ~ 1080	750 ~ 800	空冷

(4) 热处理

1) 预备热处理。

① 预备热处理工艺规范（表 4-36）。

表 4-36 T10 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 750 ~ 770℃，保温 1 ~ 2h；炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，退火后硬度 ≤ 197HBW
锻后等温退火工艺	加热温度为 750 ~ 770℃，保温 1 ~ 2h；等温温度为 680 ~ 700℃，保温 1 ~ 2h；炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度 ≤ 197HBW
再结晶退火工艺	加热温度为 650 ~ 700℃，保温 2 ~ 3h；空冷（或炉冷），硬度 ≤ 197HBW
正火工艺	加热温度为 800 ~ 850℃，空冷，硬度为 255 ~ 321HBW。目的是细化过热钢的晶粒和消除网状渗碳体
球化退火工艺	将工件在 680 ~ 700℃ 预热一定时间，升温至 730 ~ 750℃，至 680 ~ 700℃ 保温，升温至 730 ~ 750℃，这样反复 3 次，以 50℃/h 炉冷至 500℃，出炉空冷，硬度 ≤ 197HBW
调质处理	加热温度为 780 ~ 800℃，油冷；回火温度为 640 ~ 680℃，炉冷或空冷，硬度为 183 ~ 207HBW。目的是提高在退火状态硬度低于 183HBW 钢材的切削加工性能，以改善加工后的表面粗糙度

② T10 钢退火前后的硬度和组织（表 4-37）。

表 4-37 T10 钢退火前后的硬度和组织

硬度				相成分（质量分数，%）			显微组织	
未退火		退火后		铁素体	碳化物	碳化物形式	未退火	退火后
压痕直径 /mm	HBW	压痕直径 /mm	HBW					
3.4 ~ 4.8	321 ~ 255	≥ 4.3	≤ 197	84.4 ~ 85.8	14.2 ~ 15.6	Fe ₃ C	P + Fe ₃ C	球化体

2) 淬火。

① 推荐的淬火规范（表 4-38）。

表 4-38 T10 钢推荐的淬火规范

方案	加热温度 /℃	冷 却				硬度 HRC
		淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	延续	冷却至 20℃	
I	770 ~ 790	水	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 64
II		5% 食盐水溶液	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 65
III		5% ~ 10% 碱水溶液	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 64
IV	790 ~ 810	锭子油或变压器油	20 ~ 40℃	至 20 ~ 40℃	—	62 ~ 64
V		熔融硝酸盐	150 ~ 180	3 ~ 5min	空冷	62 ~ 64
VI		熔碱中加 4% ~ 6% 水	150 ~ 180	3 ~ 5min	空冷	62 ~ 64

注：1. 方案 III 用于防止淬火时形成软点。

2. 方案 IV 和 V 用于直径和厚度小于 6 ~ 8mm 的工件。

3. 方案 VI 用于直径或厚度达 10 ~ 12mm 的工件。

4. 方案 IV、V、VI 先在盐水中冷却，时间按 0.3 ~ 0.45s/mm 计算，然后转入 150 ~ 170℃ 分级槽中延续 5 ~ 10min。

② 等温淬火工艺（表 4-39）。

表 4-39 T10 钢等温淬火工艺

加热温度 /℃	等温工艺	淬火后硬度 HRC	工艺特点	应用
780 ~ 800	250 ~ 280℃ 等温 5min 后空冷	53.5 ~ 55	降低硬度，改善韧性	小型精密模具

3) 回火。

① 推荐的回火规范（表 4-40）。

表 4-40 T10 钢推荐的回火规范

方案	回火目的	加热温度/℃	加热介质	硬度 HRC
I	消除应力，稳定组织	140 ~ 160	油、硝酸盐、碱	62 ~ 64
		160 ~ 180		60 ~ 62
		180 ~ 200		59 ~ 61
		200 ~ 250		56 ~ 60
II	消除应力，降低硬度	100 ~ 200	硝酸盐、碱、空气炉	≤56
		300 ~ 400		
		450 ~ 500		

注：1. 高精度（1 ~ 2μm）工件，应在粗磨加工后再进行回火（时效）。

2. 高于 250℃ 温度回火，可保证工件的尺寸稳定性。

② 回火温度与硬度的关系（表 4-41）。

表 4-41 T10 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	150	200	250	300	350	400	500	600
硬度 HRC	63	62	61	58	54	50.5	47	38.5	28

注：1. 保温 2h。

2. 回火硬度与回火延续时间也有关系，回火时间延长，硬度略有降低。

4) 冷处理（表 4-42）。

表 4-42 T10 钢冷处理工艺规范

淬火方案	冷却温度/℃	用 途	硬度增量 HRC
I ~ IV	-50	高精度、有工作尺寸稳定性要求的工件	1 ~ 2

注：冷处理应在淬火后不超过 1h 进行。碳素工具钢冷处理经济效益不高。

(5) 力学性能

T10 钢热处理温度低，在淬火加热时不致过热，淬火后钢中有未溶的过剩碳化物，经适当热处理后具有较高的硬度及高耐磨性，有较高的强度和一定的韧性。但由于钢的淬透性差，常规淬火后硬化层浅，通常只有 1.5 ~ 5mm，淬火变形收缩明显。一般采取 220 ~ 250℃ 回火时综合性能较好。

(6) 材料应用

T10 钢是工模具行业应用最多的碳素工具钢。适合制作切削刃口在工作时不变热的工具和形状简单的冷作模具及塑料成型模具，如机用细木工具，麻花钻，钳工刮刀，锉刀，拉丝模，冲模，冷镦模，小尺寸、断面均匀的切边模和冲孔模、低精度、形状简单的卡板等。

5. T11 钢

(1) 化学成分

T11 钢的化学成分（GB/T 1298—2008）见表 4-43。

表 4-43 T11 钢的化学成分（质量分数）（%）

钢号	C	Si	Mn	S	P
T11	1.05 ~ 1.14	≤0.35	≤0.40	≤0.030	≤0.035
T11A	1.05 ~ 1.14	≤0.35	≤0.40	≤0.020	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-44。

表 4-44 T11 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{cm}	A_{r1}	M_s
温度（近似值）/℃	730	810	700	200

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-45。

表 4-45 T11 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	750 ~ 850	缓冷（坑冷或砂冷）
钢坯	1050 ~ 1100	1020 ~ 1080	750 ~ 800	缓冷（坑冷或砂冷）

注：高温加热时间不要过长，终锻温度不要过高，以防脱碳；700℃ 以上宜快冷，以免网状碳化物析出；700℃ 以下宜缓冷，以免产生裂纹。

(4) 热处理

1) 预备热处理。

① 预备热处理工艺规范（表 4-46）。

表 4-46 T11 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 750 ~ 770℃，保温 1 ~ 2h；炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，退火后硬度 ≤207HBW
锻后等温退火工艺	加热温度为 750 ~ 770℃，保温 1 ~ 2h；等温温度为 680 ~ 700℃，保温 1 ~ 2h；炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度 ≤207HBW

(续)

预备热处理方案	工 艺 参 数
高温回火工艺	加热温度为 650 ~ 700℃, 保温 1 ~ 2h; 炉冷或空冷, 硬度 ≤ 207HBW。目的是消除冷变形后的加工硬化及淬火前因切削加工所产生的内应力, 用于因热处理后硬度过低而需进行二次淬火的零件
正火工艺	加热温度为 840 ~ 860℃, 空冷, 硬度为 269 ~ 345HBW。目的是细化过热钢的晶粒和消除网状渗碳体
调质处理	加热温度为 790 ~ 800℃, 油冷; 回火温度为 640 ~ 680℃, 炉冷或空冷, 硬度为 183 ~ 207HBW。目的是提高切削加工性能, 改善工件的表面粗糙度

② T11 钢退火前后的硬度和组织 (表 4-47)。

表 4-47 T11 钢退火前后的硬度和组织

硬 度				相成分 (质量分数, %)			显微组织	
未退火		退火后		铁素体	碳化物	碳化物形式	未退火	退火后
压痕直径 /mm	HBW	压痕直径 /mm	HBW					
3.3 ~ 3.7	341 ~ 269	≥ 4.2	≤ 207	84.3 ~ 82.9	15.7 ~ 17.1	Fe ₃ C	P + Fe ₃ C	球化体

2) 淬火。推荐的淬火规范见表 4-48。

表 4-48 T11 钢推荐的淬火规范

方案	加热温度 /℃	冷 却				硬度 HRC
		淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	延续	冷却至 20℃	
I	770 ~ 790	水	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 64
II		质量分数为 5% 的食盐水溶液	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 65
III		质量分数为 5% ~ 10% 的碱水溶液	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 64
IV	790 ~ 810	锭子油或变压器油	20 ~ 40	至油温	空冷	62 ~ 64
V		熔融硝酸盐或熔碱	150 ~ 180	3 ~ 5min	空冷	62 ~ 64
VI		熔碱中加质量分数为 4% ~ 6% 的水	150 ~ 180	3 ~ 5min	空冷	62 ~ 64

注: 1. 方案 III 用于防止淬火时形成软点。

2. 方案 IV 和 V 用于直径和厚度小于 6 ~ 8mm 的工件。

3. 方案 VI 用于直径或厚度达 10 ~ 12mm 的工件。

3) 冷处理。冷处理在淬火后 1h 内进行, 其工艺规范见表 4-49。

表 4-49 T11 钢冷处理工艺规范

淬火方案	冷却温度/℃	用途	硬度增量 HRC
I ~ IV	-50	稳定工具、模具尺寸	1 ~ 2

注: 碳素工具钢冷处理经济效益不高。

4) 回火。

① 推荐的回火规范（表 4-50）。

表 4-50 T11 钢推荐的回火规范

方案	回火目的	加热温度/℃	加热介质	硬度/HRC
I	消除应力，稳定组织	140 ~ 160	油、硝酸盐、碱	62 ~ 64
		160 ~ 180		61 ~ 63
		180 ~ 200		60 ~ 62
		200 ~ 250		56 ~ 61
II	消除应力，降低硬度， 提高韧性、塑性	按硬度要求选择回火 温度	硝酸盐、碱、空气炉	≤56

注：1. 高精度（1~2μm）工件，应在粗磨加工后再进行回火（时效）。

2. 高于 250℃ 温度回火，可保证工件的尺寸稳定性。

② 回火温度与硬度的关系（表 4-51）。

表 4-51 T11 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	未回火	150	175	200	225	250	300	350	400	500	600
硬度 HRC	64	62.5	62	61	60	58	54	50.5	47	38.5	28

注：780℃ 水淬，回火 2h。

(5) 力学性能

T11 钢碳含量高，淬火后钢中有未溶的过剩碳化物，形成硬化相，对晶粒长大和形成碳化物网的敏感性较小，热处理后表面有较高的硬度和耐磨性，而心部韧性较好，形成内柔外刚的复合性组织，具有较好的综合力学性能。

(6) 材料应用

T11 钢综合力学性能好，适宜制造在工作时切削刃口不变热的工具、刀具和尺寸不大、截面无急剧变化的冲模、冷镦模、冲孔模、软材料切边模等模具。

6. T12 钢

(1) 化学成分

T12 钢的化学成分（GB/T 1298—2008）见表 4-52。

表 4-52 T12 钢的化学成分（质量分数）（%）

钢号	C	Si	Mn	S	P
T12	1.15 ~ 1.24	≤0.35	≤0.40	≤0.030	≤0.035
T12A	1.15 ~ 1.24	≤0.35	≤0.40	≤0.020	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度（表 4-53）。

表 4-53 T12 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	$A_{c_{cm}}$	A_{r1}	M_s
温度（近似值）/℃	730	820	700	200

2) 线膨胀系数（表 4-54）。

表 4-54 T12 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 500	20 ~ 700	20 ~ 900
线膨胀系数 $\alpha \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	11.5	13.0	14.3	15.1	15.8	32.4

3) 比热容 (表 4-55)。

表 4-55 T12 钢比热容

温度/℃	300	500	700	900
比热容 $c_p / [\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})]$	548.4	728.5	649.0	636.4

4) 其他物理性能 (表 4-56)。

表 4-56 T12 钢其他物理性能

密度/ (g/cm^3)	磁导率/ (mH/m)	矫顽力/ (A/m)	饱和磁感/T
7.81	0.85	636.6 ~ 759.8	1.88 ~ 1.92

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-57。

表 4-57 T12 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	750 ~ 850	700℃后砂冷
钢坯	1050 ~ 1100	1020 ~ 1080	750 ~ 800	700℃后缓冷

- 注: 1. 工件加热时间不要过长, 以防止脱碳; 工件成形时, 最后一次终锻温度不宜太高。
2. 在 700℃以前要快冷, 以免网状碳化物析出; 在 700℃以下宜缓冷, 以免因热应力产生裂纹。

(4) 热处理

1) 预备热处理。

① 预备热处理工艺规范 (表 4-58)。

表 4-58 T12 钢预备热处理工艺规范

预处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 750 ~ 770℃, 保温 1 ~ 2h; 炉冷至 550℃以下出炉空冷, 退火后硬度 $\leq 207\text{HBW}$
锻后等温退火工艺	加热温度为 750 ~ 770℃, 保温 1 ~ 2h; 等温温度为 680 ~ 700℃, 保温 1 ~ 2h; 炉冷至 550℃以下出炉空冷, 硬度 $\leq 207\text{HBW}$
正火工艺	加热温度为 850 ~ 870℃, 空冷, 硬度为 269 ~ 341HBW。目的是细化过热钢的晶粒和消除网状渗碳体
高温回火工艺	加热温度为 650 ~ 700℃, 保温 2 ~ 3h; 炉冷或空冷, 硬度 $\leq 207\text{HBW}$ 。用于消除冷变形加工硬化, 消除淬火前因切削加工所产生的残留内应力, 二次淬火前的模具, 也需经高温回火
调质处理	加热温度为 800 ~ 820℃, 油冷; 回火温度为 640 ~ 680℃, 炉冷或空冷, 调质后硬度为 183 ~ 207HBW

② T12 钢退火前后的硬度和组织（表 4-59）。

表 4-59 T12 钢退火前后的硬度和组织

硬度				相成分（质量分数，%）			显微组织	
未退火		退火后		铁素体	碳化物	碳化物形式	未退火	退火后
压痕直径 /mm	HBW	压痕直径 /mm	HBW					
3.3 ~ 3.7	341 ~ 269	≥4.2	≤207	83.0 ~ 81.5	17.0 ~ 18.5	Fe ₃ C	P + Fe ₃ C	P 球 + 碳化物

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 4-60。

表 4-60 T12 钢推荐的淬火工艺规范

方案	加热温度 /℃	冷 却				硬度 HRC
		淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	延续	冷却至 20℃	
I	770 ~ 790	水	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 64
II		5% 食盐水溶液	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 65
III		5% ~ 10% 碱水溶液	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 64
IV	790 ~ 810	锭子油或变压器油	20 ~ 40	至油温	空冷	62 ~ 64
V		熔融硝酸盐	150 ~ 180	3 ~ 5min	空冷	62 ~ 64
VI		熔碱中加 4% ~ 6% 水	150 ~ 180	3 ~ 5min	空冷	62 ~ 64

- 注：1. 方案Ⅲ用于防止淬火时形成软点。
2. 方案Ⅳ和Ⅴ用于直径和厚度小于 6 ~ 8mm 的工件。
3. 方案Ⅵ用于直径或厚度达 10 ~ 12mm 的工件。

3) 回火。

① 推荐的回火规范（表 4-61）。

表 4-61 T12 钢推荐的回火规范

方案	回火目的	加热温度/℃	加热介质	硬度 HRC
I	消除应力，稳定组织	140 ~ 160	油、硝酸盐、碱	62 ~ 64
		160 ~ 180		61 ~ 63
		180 ~ 200		60 ~ 62
		200 ~ 250		56 ~ 61
II	消除应力，降低硬度	按硬度要求	硝酸盐、碱、空气炉	≤56

- 注：1. 高精度（1 ~ 2μm）工件，应在粗磨加工后再进行回火（时效）。
2. 高于 250℃ 温度回火，不用冷处理即可保证工件的尺寸稳定性。

② 回火温度与硬度的关系（表 4-62）。

表 4-62 T12 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	150	175	200	250	300	350	400	450	500
硬度 HRC	64	62.5	61.5	60	58	54	50	48	44	38

注：780℃ 水淬，回火 2h。

4) 冷处理工艺规范 (表 4-63)。

表 4-63 T12 钢冷处理工艺规范

淬火方案	冷却温度/℃	用途	硬度增量 HRC
I ~ VI	- 50	高精度模具尺寸稳定化	1 ~ 2

注：冷处理应在淬火后 1h 内进行。

(5) 力学性能

T12 钢由于碳含量高，淬火后有较多的过剩碳化物，形成硬化相。热处理后具有较高的硬度和耐磨性，但因钢中碳化物过多且分布难以均匀，虽然硬度和耐磨性高，但塑性、韧性下降明显。

(6) 材料应用

T12 钢根据其耐磨性和硬度，适宜制造工作时不受冲击载荷、切削速度不高、切削刃口不变热的工具、刀具，如车刀、铣刀、钻头、铰刀、丝锥、板牙和尺寸不大、截面无急剧变化的冲模、冷镦模、软材料切边模及断面尺寸小的切边模、冲孔模、拉丝模、塑料成型模等模具。

7. T13 钢

(1) 化学成分

T13 钢的化学成分 (GB/T 1298—2008) 见表 4-64。

表 4-64 T13 钢的化学成分 (质量分数) (%)

钢号	C	Si	Mn	P	S
T13	1. 25 ~ 1. 35	≤0. 35	≤0. 40	≤0. 035	≤0. 030
T13A	1. 25 ~ 1. 35	≤0. 35	≤0. 40	≤0. 030	≤0. 020

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-65。

表 4-65 T13 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{cm}	A_{r1}	M_s
温度 (近似值) /℃	730	830	700	190

(3) 热加工

T13 钢锻造工艺规范见表 4-66。

表 4-66 T13 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1050 ~ 1100	1020 ~ 1080	750 ~ 850	700℃ 以下砂冷
钢坯	1020 ~ 1080	1000 ~ 1050	750 ~ 800	700℃ 以下砂冷

(4) 热处理

1) 预备热处理。预备热处理工艺规范见表 4-67。

表 4-67 T13 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火	加热温度为 750 ~ 770℃，保温 1 ~ 2h；炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，退火后硬度 ≤207HBW
锻后等温退火	加热温度为 750 ~ 770℃，保温 1 ~ 2h；炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度 ≤207HBW
正火	加热温度为 860 ~ 880℃，空冷，硬度为 269 ~ 341HBW。目的是细化晶粒，消除碳化物网
高温回火	加热温度为 650 ~ 700℃，保温 2 ~ 3h；炉冷或空冷，硬度 ≤207HBW。目的是消除冷变形加工硬化，消除淬火前因切削加工所产生的残余应力，二次淬火前，模具需经高温回火
调质处理	加热温度为 800 ~ 820℃，油冷；回火温度为 640 ~ 680℃，炉冷或空冷，硬度为 183 ~ 207HBW。用于降低退火状态硬度 <183HBW 钢材切削加工后的表面粗糙度值

2) 淬火。推荐的淬火规范见表 4-68。

表 4-68 T13 钢推荐的淬火规范

方案	加热温度 /℃	冷 却				硬度 HRC
		淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	延续	冷却至 20℃	
I	770 ~ 790	水	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 64
II		5% 食盐水溶液	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 65
III		5% ~ 10% 碱水溶液	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油冷	62 ~ 64
IV	790 ~ 810	锭子油或变压器油	20 ~ 40	至油温	空冷	62 ~ 64
V		熔融硝酸盐	150 ~ 180	3 ~ 5min	空冷	62 ~ 64
VI		熔碱中加 4% ~ 6% 水	150 ~ 180	3 ~ 5min	空冷	62 ~ 64

- 注：1. 方案Ⅲ用于防止淬火时形成软点。
2. 方案Ⅳ和Ⅴ用于直径和厚度小于 6 ~ 8mm 的工件。
3. 方案Ⅵ用于直径或厚度达 10 ~ 12mm 的工件。

3) 冷处理工艺规范（表 4-69）。

表 4-69 T13 钢冷处理工艺规范

淬火方案	冷却温度/℃	用途	硬度增量 HRC
I - VI	- 50	高精度模具尺寸稳定化	1 ~ 2

注：冷处理应在淬火后 1h 内进行。

4) 回火。

① 推荐的回火规范（表 4-70）。

表 4-70 T13 钢推荐的回火规范

方案	回火目的	加热温度/℃	加热介质	硬度 HRC
I	消除应力，稳定组织	140 ~ 160	油、硝酸盐、碱	62 ~ 64
		160 ~ 180		61 ~ 63
		180 ~ 200		60 ~ 62
		200 ~ 250		56 ~ 61
II	消除应力，降低硬度	按硬度要求	硝酸盐、碱、空气炉	≤56

注：1. 高精度（1 ~ 2μm）工件，应在粗磨加工后再进行回火（时效）。
2. 高于 250℃ 温度回火，不用冷处理即可保证工件的尺寸稳定性。

② 回火温度与硬度的关系（表 4-71）。

表 4-71 T13 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	200	300	400	450	500
硬度 HRC	64	60	54	48	44	38

注：780℃ 水淬，回火 2h。

(5) 力学性能

T13 钢碳含量较高，淬火后有较多的碳化物，形成硬化相，淬火后的硬度和耐磨性较其他碳素工具钢高，但因钢中碳化物过多且分布难以均匀，虽然硬度和耐磨性高，但塑性、韧性下降明显。

(6) 材料应用

T13 钢碳含量较高，淬火后有较多的碳化物，淬火后的硬度和耐磨性高，但韧性、塑性较差。适于制造形状简单、硬度要求高的冷作模具，如截面无急剧变化的冲模、冷镦模、软材料切边模和断面尺寸不大的冲孔模、拉丝模、塑料成型模等。

4.2.2 高碳低合金冷作模具钢

高碳低合金钢是在碳素工具钢的基础上加入适量的 Cr、Ni、Mo、Ti、W、V、Si、Mn 等合金元素冶炼而成的。钢中碳的质量分数一般都较高（ $w_c \geq 0.6\%$ ），合金元素总的质量分数在 5% 以下。合金元素的加入提高了过冷奥氏体的稳定性和钢的淬透性，降低了淬火冷却速度，减少了淬火热应力和组织应力，降低了淬火变形及开裂倾向。经淬火、低温回火后，模具具有较高的强韧性和耐磨性，其使用寿命可大幅提高。因此高碳低合金钢被广泛用来制作形状复杂、截面较大、承受高载荷、变形较小的中、小型冷作模具。

1. 9SiCr 钢

(1) 化学成分

9SiCr 钢的化学成分（表 4-72）

表 4-72 9SiCr 钢的化学成分（质量分数）（%）

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	P	S
中国（GB ^① ）	9SiCr	0.85 ~ 0.95	1.20 ~ 1.60	0.30 ~ 0.60	0.95 ~ 1.25	≤0.030	≤0.030
德国（DIN）	90CrSi5 W – Nr. 1.2108	0.85 ~ 0.95	1.05 ~ 1.25	0.60 ~ 0.80	1.05 ~ 1.30	≤0.035	≤0.035
俄罗斯（ГОСТ）	9XC	0.85 ~ 0.95	1.20 ~ 1.60	0.30 ~ 0.60	0.95 ~ 1.25	≤0.030	≤0.030

① GB/T 1299—2000。

（2）物理性能

1) 临界点温度（表 4-73）。

表 4-73 9SiCr 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	$A_{c_{cm}}$	A_{r1}	M_s
温度（近似值）/℃	770	870	730	160

2) 其他物理性能（表 4-74）。

表 4-74 9SiCr 钢其他物理性能

密度/（g/cm ³ ）	矫顽力/（A/m）	饱和磁感/T
7.80	795.8	1.78 ~ 1.82

（3）热加工

锻造工艺规范见表 4-75。

表 4-75 9SiCr 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1150 ~ 1200	1100 ~ 1150	880 ~ 800	缓冷（砂冷或坑冷）
钢坯	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	850 ~ 800	缓冷（砂冷或坑冷）

（4）热处理

1) 预备热处理。

① 预备热处理工艺规范（表 4-76）。

表 4-76 9SiCr 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 790 ~ 810℃，保温 1 ~ 2h；炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 197 ~ 241HBW
锻后等温退火工艺	加热温度为 790 ~ 810℃，保温 1 ~ 2h；等温温度为 700 ~ 720℃，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度为 197 ~ 241HBW

(续)

预备热处理方案	工 艺 参 数
高温回火工艺	加热温度为 600 ~ 700℃，保温 2 ~ 4h；炉冷或空冷，硬度为 197 ~ 241HBW。用于消除冷变形加工硬化
正火工艺	加热温度为 900 ~ 920℃，空冷，硬度为 321 ~ 415HBW。用于细化过热钢的晶粒和消除网状碳化物
调质处理	加热温度为 880 ~ 900℃，回火温度为 680 ~ 700℃，保温 2 ~ 4h；炉冷或空冷，硬度为 197 ~ 241HBW

② 9SiCr 钢退火前后的硬度和组织（表 4-77）。

表 4-77 9SiCr 钢退火前后的硬度和组织

硬度				相成分（质量分数，%）			显微组织	
未退火		退火后		铁素体	碳化物	碳化物形式	未退火	退火后
压痕直径/mm	HBW	压痕直径/mm	HBW					
3.0 ~ 3.4	415 ~ 321	3.9 ~ 4.3	241 ~ 197	87.3 ~ 85.8	12.7 ~ 14.2	Fe ₃ C	托氏体 + 索氏体	球化体

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 4-78。

表 4-78 9SiCr 钢推荐的淬火工艺规范

方案	淬火温度/℃	冷 却				硬度 HRC
		淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	延续	冷却到室温	
I	860 ~ 880	油	20 ~ 40	至油温	空气	62 ~ 65
II	860 ~ 880	油	80 ~ 140	至 150 ~ 200℃	空气	62 ~ 65
III	860 ~ 880	熔融的硝酸盐或碱	150 ~ 200	3 ~ 5min	空气	61 ~ 63
IV	860 ~ 880	熔融的硝酸盐或碱	150 ~ 200	30 ~ 60min	空气	59 ~ 62

注：形状复杂以及要求变形量小的工件，采用方案Ⅲ和Ⅳ。

3) 冷处理规范（表 4-79）。

表 4-79 9SiCr 钢冷处理规范

淬火方案	冷却温度/℃	用途	硬度增量 HRC
I ~ III	- 70	高精度工具、模具尺寸稳定化	0 ~ 1

注：冷处理应于淬火后 1h 内进行。

4) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 4-80）。

表 4-80 9SiCr 钢推荐的回火工艺规范

方案	回火目的	加热温度/℃	加热介质	硬度 HRC
I	消除应力，稳定组织	140 ~ 160	油、硝酸盐、碱	62 ~ 65
		160 ~ 180		61 ~ 63
		180 ~ 200		60 ~ 62
		200 ~ 220		58 ~ 62
II	消除应力，降低硬度	按硬度要求	硝酸盐、碱、空气炉	≤58

注：1. 高精度（1~2μm）工件，应在粗磨加工后再进行回火（时效）。

2. 高于 250℃ 温度回火，不用冷处理即可保证工件的尺寸稳定性。

② 回火温度与硬度的关系（表 4-81）。

表 4-81 9SiCr 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600
硬度 HRC	64	63	62	60	59	58	55	51	47	40

注：870℃ 油淬，回火 2h。

(5) 力学性能

9SiCr 钢中含有 Si 和 Cr 元素，具有高的淬透性、淬硬性和较高的耐回火性，有利于提高耐磨性和塑性变形抗力。在 300~400℃ 回火时，硬度可保持在 60HRC 左右，具有较好的耐磨性和强韧性。但该钢容易脱碳，淬火加热时应采取措施防止氧化脱碳的发生。不同温度条件下的力学性能见表 4-82。

表 4-82 9SiCr 钢不同温度条件下的力学性能

温度 /℃	拉 伸				压缩	扭转			冲击韧度 $a_{KV}/\left(J/cm^2\right)$	硬度 HBW
	R_{eL}	R_m	A	Z	抗压强度 /MPa	T /N·m	$\phi\left(^{\circ}\right)$	$l\left(\%\right)$		
	/MPa		(%)							
20	456	805	26.2	54.2	3610	155	435	7.7	40	243
200	330	722	21.9	47.7	2660	141	396	6.9	90	218
400	335	635	32.0	63.4	1830	144	332	6.6	100	213
600	176	207	51.5	76.8	1900	64	1990	32.9	90	172
700	85	100	58.0	77.2		27	2270	39.5	150	53
750	73	102	59.3	68.4	223 ^①				370	44.6
800	67	87	70.6	62.5	265 ^①	12	3300	57.4	360	29.3
850	46	67	51.0	48.3	230 ^①				320	33.6
900	42	52	39.7	30.2	265 ^①	11.5	2250	39.2	280	22.7
1000	24	30	22.0	26.7		7.5	935	16.3	222	19.0
1100	15	20	41.5	53.0		4	1390	24.2	158	7.4
1200	6	11	87.0	100					106	4.2
1250	7	9.7	56.5	100					77	
1300	6	7	46.5	87.0						

① 未发现裂纹。

(6) 材料应用

9SiCr 钢为低合金刀具钢。具有高的淬透性和淬硬性，且耐回火性好，适于分级淬火或等温淬火。通常用于制造耐磨性要求高的低速切削刀具和形状复杂、要求变形小、耐磨性高的冷作模具，如手动铰刀、剪刀片、搓丝板、冷轧辊、校正辊、滚丝模、拉深模、冲模、冷镦模、压印模等。

2. 9Mn2V 钢

(1) 化学成分 9Mn2V 钢的化学成分（表 4-83）

表 4-83 9Mn2V 钢的化学成分（质量分数）（%）

国家	钢号	C	Si	Mn	V	P	S	其他
中国（GB ^① ）	9Mn2V	0.85 ~ 0.95	≤0.040	1.70 ~ 2.00	0.10 ~ 0.25	≤0.030	≤0.030	—
美国 AISI	O2	0.85 ~ 0.95	0.20 ~ 0.40	1.40 ~ 1.80	(0.20)	—	—	Cr: 0.35 Mo: 0.30

① GB/T 1299—2000。

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-84。

表 4-84 9Mn2V 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_{cm}	Ar_1	Ar_3	M_s
温度（近似值）/℃	730	760	655	690	125

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-85。

表 4-85 9Mn2V 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1140 ~ 1180	1100 ~ 1150	800 ~ 850	坑冷或热砂缓冷
钢坯	1080 ~ 1120	1050 ~ 1100	800 ~ 850	坑冷或热砂缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理（表 4-86）。

表 4-86 9Mn2V 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 750 ~ 770℃，保温 2 ~ 8h；以冷速 < 30℃/h 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，硬度 ≤ 229HBW
锻后等温退火	加热温度为 760 ~ 780℃，保温 3h；以冷速 < 30℃/h 至 680 ~ 700℃，保温 4 ~ 5h；以冷速 < 30℃/h 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，硬度 ≤ 229HBW

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 4-87。

表 4-87 9Mn2V 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
780 ~ 820	油冷	≥62

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 4-88）。

表 4-88 9Mn2V 钢推荐的回火工艺规范

加热温度/℃	保温时间 / h	冷却方式	硬度 HRC
150 ~ 200	2 ~ 3	空冷	60 ~ 62

② 回火温度与硬度的关系（表 4-89）。

表 4-89 9Mn2V 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	未回火	100	200	250	250	300	350	400	500	600
硬度 HRC	62	61.5	60	58	58	55	52	48	40	32

注：790℃油淬，回火 2h。

(5) 力学性能

9Mn2V 钢淬透性较好，淬火变形小，易于实现微变形。低温回火后有高的硬度和耐磨性。由于钢中含有一定量的 V 元素，细化了晶粒，减小了钢的过热敏感性，同时碳化物较细小和分布较均匀，故综合力学性能好。但钢的耐回火性差，回火温度超过 250℃，硬度明显下降，热处理时应尽量避开这一区间。

(6) 材料应用

9Mn2V 钢淬火变形小，易于实现微变形，综合力学性能好，适于制造各种精密量具、样板，也用于制造碳素工具钢不能满足要求、尺寸比较小的冲模、冷压模、雕刻模、落料模等冷作模具零件和塑料模具零件。

3. 9CrWMn 钢

(1) 化学成分

9CrWMn 钢的化学成分见表 4-90。

表 4-90 9CrWMn 钢的化学成分（质量分数）（%）

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	W	P	S	其他
中国（GB ^① ）	9CrWMn	0.85 ~ 0.95	≤0.40	0.90 ~ 1.20	0.50 ~ 0.80	0.50 ~ 0.80	≤0.030	≤0.030	—
美国（AISI）	O1	0.85 ~ 0.95	0.20 ~ 0.40	1.00 ~ 1.30	0.40 ~ 0.60	0.40 ~ 0.60	—	—	V：0.20

(续)

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	W	P	S	其他
德国 (DIN)	W - Nr. 1. 2510	0. 90 ~ 1. 05	0. 15 ~ 0. 35	1. 00 ~ 1. 20	0. 50 ~ 0. 70	0. 50 ~ 0. 70	—	≤0. 035	V: 0. 05 ~ 0. 15 P≤0. 035
英国 (BS)	BO1	0. 85 ~ 0. 95	≤0. 40	1. 10 ~ 1. 35	0. 40 ~ 0. 60	0. 40 ~ 0. 60	—	—	Ni≤0. 40 V≤0. 25
日本 (大同)	GOA	0. 90	0. 30	1. 20	0. 50	0. 50	—	—	Mo: 0. 13

① GB/T 1299—2000。

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-91。

表 4-91 9CrWMn 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	$A_{c_{cm}}$	A_{r1}	M_s
温度 (近似值) /℃	750	900	700	205

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-92。

表 4-92 9CrWMn 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1150 ~ 1200	1100 ~ 1150	≥850	缓冷
钢坯	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	≥850	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理。锻后等温退火工艺见表 4-93。

表 4-93 9CrWMn 钢锻后等温退火工艺

工艺	加热		等 温			硬度 HBW
	加热温度 /℃	保温时间 /h	等温温度 /℃	等温时间 /h	冷却方式	
锻后等温退火	780 ~ 800	2 ~ 3	670 ~ 720	2 ~ 3	炉冷至 550℃ 以下出炉空冷	197 ~ 241

2) 淬火。

① 推荐的淬火规范 (表 4-94)。

表 4-94 9CrWMn 钢推荐的淬火规范

预热温度 /℃	加热温度 /℃	冷 却			硬度 HRC
		介质	介质温度/℃	冷却至	
650	820 ~ 840	油	20 ~ 60	油温	64 ~ 66

② 等温淬火（表 4-95）。

表 4-95 9CrWMn 钢等温淬火工艺

加热温度/℃	等温温度/℃	等温时间/h	淬 火 组 织
800 ~ 840	260 ~ 300	≤1	基体组织为马氏体 + 残留奥氏体 + 剩余碳化物，适量的下贝氏体分布在高强度的马氏体基体上

3) 超细化处理工艺。超细化处理的目的是获得超细化的碳化物和被细化了的晶粒，故又称为双细化工艺。这项工艺已在模具制造业中得到广泛应用，使模具寿命成倍提高，其工艺过程见表 4-96。

表 4-96 9CrWMn 钢超细化处理工艺

工艺过程	固 溶 淬 火	最终热处理
工艺参数	温度为 1050℃，热油冷却或 300℃ 左右等温处理，回火温度为 700 ~ 720℃	淬火温度为 800 ~ 820℃（应比常规淬火温度低 20 ~ 40℃）

4) 回火

① 推荐的回火规范（表 4-97）。

表 4-97 9CrWMn 钢推荐的回火规范

加热温度/℃	加热介质	冷却介质	硬度 HRC
160 ~ 180	油	空气	61
170 ~ 230	油	空气	60 ~ 62
230 ~ 275	油或碱水	空气	56 ~ 60

② 回火温度与硬度的关系（表 4-98）。

表 4-98 9CrWMn 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	200	300	400	500	550	600	650
硬度 HRC	62	60	56	52	47	43	39	35

注：830℃ 油淬，回火保温 2h。

(5) 力学性能

9CrWMn 钢为低合金冷作模具钢，其淬透性较高。由于 W 元素形成的碳化物形成钢中的硬化相，故钢在淬火和低温回火后，具有高的硬度和耐磨性，并具有较好的韧性。该类钢在 800℃ 淬火时，抗弯强度和韧性最高，在 300℃ 左右回火时，冲击韧度值最低，因此应避免在 300℃ 左右回火。该钢对形成网状碳化物比较敏感，因此，在机械加工时，应进行合理锻压，并宜采用碳化物超细化处理。

(6) 材料应用

9CrWMn 钢淬火变形小，特别是经碳化物超细化处理后，具有高的综合力学性能，

主要用于制造各种量规、量具和碳素工具钢不能满足要求的截面尺寸较大、形状复杂、要求淬火变形小的冲模等模具零件。

4. CrWMn 钢

(1) 化学成分

CrWMn 钢的化学成分 (GB/T 1299—2000) 见表 4-99。

表 4-99 CrWMn 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	W	S	P
0.90 ~ 1.05	0.15 ~ 0.35	≤0.40	0.90 ~ 1.20	1.20 ~ 1.60	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 4-100)。

表 4-100 CrWMn 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	$A_{c_{cm}}$	A_{r1}	M_s
温度 (近似值) /℃	750	940	710	255

2) 其他物理性能 (表 4-101)。

表 4-101 CrWMn 钢其他物理性能

电阻率/ $\times 10^{-6} \Omega \cdot m$	饱和磁感/T
0.24	1.82 ~ 1.86

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-102。

表 4-102 CrWMn 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1150 ~ 1200	1100 ~ 1150	880 ~ 800	先空冷, 然后缓冷
钢坯	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	800 ~ 850	先空冷, 然后缓冷

注: 为了减轻碳化物网的形成, 锻造后尽可能快地冷至 650 ~ 700℃, 然后缓冷 (坑冷、砂冷或炉冷)。

(4) 热处理

1) 预备热处理。

① 预备热处理工艺规范 (表 4-103)。

表 4-103 CrWMn 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 770 ~ 790℃, 保温 1 ~ 2h; 炉冷至 550℃ 以下出炉空冷, 硬度为 207 ~ 255HBW

(续)

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后等温退火工艺	加热温度为 770 ~ 790℃，保温 1 ~ 2h；等温温度为 680 ~ 700℃，以冷速 < 30℃/h 炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度为 207 ~ 255HBW
高温回火工艺	又称低温退火。加热温度为 600 ~ 700℃，炉冷或空冷，硬度为 207 ~ 255HBW。目的为消除冷变形加工硬化（或称为再结晶退火），消除切削加工内应力。二次淬火的模具也需先经高温回火
正火工艺	加热温度为 970 ~ 990℃，空冷，硬度为 388 ~ 514HBW。目的为细化过热钢的晶粒和消除网状碳化物
调质处理	加热温度为 840 ~ 860℃，油冷；回火温度为 660 ~ 680℃，保温 2 ~ 3h；炉冷或空冷，硬度为 207 ~ 255HBW。目的为降低切削加工后的表面粗糙度值

② 退火前后的硬度和组织（表 4-104）。

表 4-104 CrWMn 钢退火前后的硬度和组织

硬度				相成分（质量分数，%）			显微组织	
未退火		退火后		铁素体	碳化物	碳化物形式	未退火	退火后
压痕直径 /mm	HBW	压痕直径 /mm	HBW					
2.7 ~ 3.1	514 ~ 288	3.8 ~ 4.2	255 ~ 207	84 ~ 86	14 ~ 16.2	Fe ₃ C	托氏体 + S	球化体

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范（表 4-105）。

表 4-105 CrWMn 钢推荐的淬火工艺规范

方案	淬火温度 /℃	冷却				硬度 HRC
		淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	延续	冷却到 20℃	
I	820 ~ 840	油	20 ~ 40	至油温	空冷	63 ~ 65
II		油	90 ~ 140	至 150 ~ 200℃	空冷	63 ~ 65
III	830 ~ 850	熔融硝酸盐或碱	150 ~ 160	3 ~ 5min	空冷	62 ~ 64

注：1. 方案 II 和 III 用于形状复杂、要求变形小的工件。

2. 直径和厚度大于 50mm 的工件，淬火温度可提高至 850 ~ 870℃。

3) 双细化热处理工艺（表 4-106）。

表 4-106 CrWMn 钢的双细化热处理工艺

热处理工艺	工 艺 参 数
双细化热处理	固溶（淬火）温度为 1050℃，热油冷却或 300℃ 左右等温处理，回火温度为 700 ~ 720℃，最终热处理淬火温度比常规淬火工艺低 20 ~ 40℃

4) 冷处理工艺规范（表 4-107）。

表 4-107 CrWMn 冷处理工艺规范

淬火方案	冷却温度/℃	用途	硬度增量 HRC
I ~ III	-70	高精度工具、模具尺寸稳定化	0 ~ 1

注：冷处理宜于淬火后立即进行。

5) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 4-108）。

表 4-108 CrWMn 钢推荐的回火工艺规范

方案	回火目的	加热温度/℃	加热介质	硬度 HRC
I	消除应力，稳定组织	140 ~ 160	油、硝酸盐、碱	62 ~ 65
		170 ~ 200		60 ~ 62
		230 ~ 280		55 ~ 60
II	消除应力，降低硬度	按要求	硝酸盐、碱、空气炉	-

注：1. 高精度（1 ~ 2μm）工件，应在粗磨加工后再进行回火（时效）。

2. 高于 250℃ 温度回火，不用冷处理即可保证工件的尺寸稳定性。

② 回火温度与硬度的关系（表 4-109）。

表 4-109 CrWMn 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	150	200	250	300	350	400	450	500	600
硬度 HRC	62	61	58	56	53.5	52.5	50	47	39

注：830℃ 油冷，回火 2h。

(5) 力学性能

CrWMn 钢具有高淬透性，淬火后，碳化物形成高的硬度及耐磨性，由于 W 还有助于细化晶粒，从而使钢获得较好的韧性。但这种钢对网状碳化物比较敏感，由于网状碳化物的存在，使模具刃部有剥落的危险，从而缩短工具、模具的使用寿命。可通过改锻后正火或进行碳化物超细化处理工艺予以改善。

(6) 材料应用

CrWMn 钢具有良好的综合力学性能，常用于制作长丝锥、长铰刀、专用铣刀、切削非金属软材料的刀具等切削刀具，以及要求变形小、形状复杂、耐磨性好的高精度冲模等冷作模具。

5. 6CrNiWMoV（DS）钢

(1) 化学成分

6CrNiWMoV 钢的化学成分见表 4-110。

表 4-110 6CrNiWMoV 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	P	S
0.60	0.65	0.85	1.15	0.10 ~ 0.40	0.50	0.10 ~ 0.30	≤0.030	≤0.030

(2) 热加工

锻造工艺规范见表 4-111。

表 4-111 6CrNiWMoV 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1170 ~ 1200	1150 ~ 1180	800 ~ 850	缓冷
钢坯	1150 ~ 1170	1100 ~ 1140	800	缓冷

(3) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-112)。

表 4-112 6CrNiWMoV 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后普通退火	加热温度为 840 ~ 860℃, 保温 2 ~ 4h; 炉冷至 550℃ 以下出炉空冷
锻后等温退火	加热温度为 820 ~ 840℃, 保温 1 ~ 3h; 等温温度为 680 ~ 700℃, 保温 1 ~ 3h, 炉冷至 550℃ 以下出炉空冷

2) 淬火与回火。推荐的淬火、回火工艺规范见表 4-113。

表 4-113 6CrNiWMoV 钢推荐的淬火、回火工艺规范

淬 火 规 范			回 火 规 范	
加热温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	加热温度/℃	硬度 HRC
860 ~ 920	油冷	≥62	160 ~ 200	58 ~ 62

(4) 力学性能

6CrNiWMoV (DS) 钢为一种耐冲击低合金冷作模具钢。淬火温度低, 淬透性好, 热处理后畸变小。W 元素可以有效地细化晶粒, 具有较高的耐磨性和强韧性, 冲击韧度优于常用的高韧性钢。

(5) 材料应用

6CrNiWMoV (DS) 钢由于具有良好的综合力学性能, 热处理性能和加工工艺性能好, 通常用于制造承受冲击载荷而又要求耐磨性高的工具模具。

6. GCr15 钢

(1) 化学成分

GCr15 钢的化学成分见表 4-114。

表 4-114 GCr15 钢的化学成分 (质量分数) (%)

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	P	S	V
中国 (GB ^①)	GCr15	0.95 ~ 1.05	0.15 ~ 0.35	0.25 ~ 0.45	1.40 ~ 1.65	≤0.025	≤0.025	—
美国 (AISI)	L3	1.00	≤0.50	0.25 ~ 0.50	1.10 ~ 1.70	—	—	0.10 ~ 0.30
德国 (DIN)	W - Nr. 1.2067	0.95 ~ 1.10	0.15 ~ 0.35	0.25 ~ 0.40	1.40 ~ 1.70	≤0.030	≤0.030	—

① GB/T 18254—2002。

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-115。

表 4-115 GCr15 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	$A_{c_{cm}}$	A_{r1}	M_s
温度（近似值）/℃	745	900	700	246

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-116。

表 4-116 GCr15 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1150 ~ 1200	1100 ~ 1150	800 ~ 880	先空冷至 700℃ 后坑冷
钢坯	1080 ~ 1120	1050 ~ 1100	800 ~ 850	先空冷至 700℃ 后坑冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 4-117）。

表 4-117 GCr15 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后等温退火工艺	缓慢加热至 770 ~ 790℃，保温 1 ~ 2h；炉冷到 680 ~ 700℃，保温 3 ~ 4h 后炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度为 180 ~ 229HBW
高温回火工艺	加热温度为 600 ~ 700℃，保温 2 ~ 3h；炉冷或空冷，硬度为 187 ~ 229HBW。主要用于消除淬火前切削加工应力
正火工艺	加热温度为 930 ~ 950℃，空冷，硬度为 302 ~ 388HBW。用于细化过热钢的晶粒和消除网状碳化物
调质处理	淬火温度为 840 ~ 860℃，油冷；回火温度为 660 ~ 680℃，炉冷或空冷，硬度为 197 ~ 217HBW

2) 淬火。

① 淬火工艺规范（表 4-118）。

表 4-118 GCr15 钢淬火工艺规范

淬火工艺方案	工 艺 参 数
常规淬火工艺	加热温度为 830 ~ 850℃，油冷，硬度为 62 ~ 65HRC
等温淬火工艺	加热温度为 830 ~ 850℃，240 ~ 300℃ 等温淬火。回火温度为 180 ~ 200℃，硬度为 58 ~ 62HRC

注：为了节能省时，可用锻造余热进行等温淬火工艺代替固溶热处理。

② 碳化物超细化处理（表 4-119）。

表 4-119 GCr15 钢碳化物超细化处理工艺

热处理工艺	工 艺 参 数
超细化处理	固溶温度为 1050℃，淬入 300 ~ 350℃ 的等温槽中进行等温处理，使之获得下贝氏体组织。回火温度为 720℃ 左右，回火时间为 2h，但硬度偏高加工困难。可以改用短时等温球化工艺，720℃ 加热，保温 1h，再升温到 780℃ 保温 1h，然后冷却到 720℃ 再保温 1h，最后炉冷到 500℃ 出炉，可以获得超细化的球状碳化物

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 4-120）。

表 4-120 GCr15 钢推荐的回火工艺规范

加热温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
150 ~ 190	油冷或空冷	58 ~ 62

② 回火温度与硬度的关系（表 4-121）。

表 4-121 GCr15 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	未回火	200	300	400	500	550	600	650
硬度 HRC	62	61	56	49	40	36	31	28

注：830℃ 油淬，回火 2h。

(5) 力学性能

GCr15 钢为轴承专用钢，其淬透性、硬度和耐磨性好，接触疲劳强度高，在淬火、回火时尺寸稳定性好，低温回火后的工具、模具有较高的强韧性和耐磨性，使用寿命可大幅度提高。淬火温度与组织和性能的关系见表 4-122。

表 4-122 GCr15 钢淬火温度与组织和性能的关系

淬火温度 /℃	马氏体中碳的质量分数 (%)	残留奥氏体量 (体积分数, %)	硬度 HRC	抗弯强度 σ_{bb} /MPa	冲击韧度 a_K / (J/cm ²)
820	0.41，板条马氏体为主	—	62.8	3234	6.67
835	0.49，板条马氏体为主	10.40	63.7	2724	5.19
845	0.52，板条、孪晶混合马氏体	14.70	64.1	3420	5.19
855	0.55，板条、孪晶混合马氏体	—	64.9	3263	3.53
865	0.59，板条、孪晶混合马氏体	16.90	65.1	2960	3.43
875	0.67，孪晶马氏体为主	21.20	65.4	2739	2.55
885	0.67，孪晶马氏体为主	—	65.3	2450	2.45

注：采用 160℃ 回火。

(6) 材料应用

GCr15 钢为轴承专用钢，主要用于制造轴承、切削刀具。在模具制造中多用于形状复杂、具有较高的强韧性、耐磨性好、接触疲劳强度高、尺寸稳定性好的拉丝模和冷镦

模等冷作模具及塑料成型模具。

7. Cr2 钢

(1) 化学成分

Cr2 钢的化学成分 (GB/T 1299—2000) 见表 4-123。

表 4-123 Cr2 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	P	S
0.95 ~ 1.10	≤0.40	≤0.40	1.30 ~ 1.65	≤0.30	≤0.30

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 4-124)。

表 4-124 Cr2 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	M_s
温度 (近似值) /℃	745	900	700	240

2) 线膨胀系数 (表 4-125)

表 4-125 Cr2 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 500	20 ~ 600	20 ~ 700	20 ~ 900
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	13.29	13.63	13.76	14.97	15.33	15.49	14.85

3) 热导率 (表 4-126)。

表 4-126 Cr2 钢热导率

温度/℃	20 (退火后)	20 (淬火后)
热导率 $\lambda / [\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})]$	40.20	37.26

4) 比热容 (表 4-127)。

表 4-127 Cr2 钢比热容

温度/℃	50	500
比热容 $c_p / [(\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K}))]$	510.8	787.2

5) 电阻率 (表 4-128)。

表 4-128 Cr2 钢电阻率

温度/℃	20	100	200	300
电阻率 $\rho / \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$	0.22	0.39	0.47	0.52

6) 弹性模量 (表 4-129)。

表 4-129 Cr2 钢弹性模量

温度/℃		28	150
弹 性 模 量 (退火状态)	E/MPa	211680	205800
	G/MPa	82467	89670

7) 其他物理性能 (表 4-130)。

表 4-130 Cr2 钢其他物理性能

密度/ (g/cm ³)	饱和磁感/T
7.83	1.86 ~ 1.90

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-131。

表 4-131 Cr2 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1150 ~ 1200	1100 ~ 1150	800 ~ 880	先空冷后坑冷
钢坯	1080 ~ 1120	1050 ~ 1100	800 ~ 850	先空冷后坑冷

注：终锻温度勿高，宜接近下限，锻后先快速冷却，达到 700℃ 然后进行缓冷。Cr2 钢有脱碳倾向，应加以注意。

(4) 热处理

1) 预备热处理。

① 预备热处理工艺规范 (表 4-132)。

表 4-132 Cr2 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 770 ~ 790℃，以冷速 <30/h 炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度为 187 ~ 229HBW
锻后等温退火工艺	加热温度为 770 ~ 790℃，保温 1 ~ 2h；等温温度为 680 ~ 700℃，保温 1 ~ 2h，以冷速 <30/h 炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度为 187 ~ 229HBW
高温回火工艺	加热温度为 600 ~ 700℃，保温 2 ~ 3h；炉冷或空冷，硬度为 187 ~ 229HBW。主要用于消除冷变形加工硬化，消除淬火前的切削加工内应力。二次淬火前也应先进行高温回火
正火工艺	加热温度为 930 ~ 950℃，空冷，硬度为 302 ~ 388HBW。用于细化过热钢的晶粒和消除碳化物网
调质处理	淬火加热温度为 840 ~ 860℃，油冷；回火温度为 660 ~ 680℃，炉冷或空冷，硬度为 197 ~ 217HBW

② 退火前后的硬度和组织 (表 4-133)。

表 4-133 Cr2 钢退火前后的硬度和组织

硬 度				相成分（质量分数,%）			显微组织	
未退火		退火后		铁素体	碳化物	碳化物形式	未退火	退火后
压痕直径/ mm	HBW	压痕直径/ mm	HBW					
3.1 ~ 3.5	388 ~ 302	4.0 ~ 4.4	229 ~ 187	83.5 ~ 85.8	14.2 ~ 16.5	Fe ₃ C	托氏体 + S	球化体

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 4-134。

表 4-134 Cr2 钢推荐淬火工艺规范

方案	淬火温度 /℃	冷 却				硬度 HRC
		淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	延续	冷却到 20℃	
I	830 ~ 850	油	20 ~ 40	至油温	空冷	62 ~ 65
II	840 ~ 860	油、熔融硝酸盐 或熔碱	150	3min	空冷	63
III			170			61
IV			250			61
V			300			47

注：1. 方案 II、III、IV、V 用于厚度为 15mm 以内的工件。

2. 各种厚度的零件，其分级淬火的加热温度分别为 3mm，835℃；6mm，840℃；12mm，845℃；15mm，850℃。

3. 工件厚度大于 80mm 时，将淬火温度提高到 860 ~ 880℃。

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 4-135）。

表 4-135 Cr2 钢推荐的回火工艺规范

方案	回火目的	加热温度/℃	加热介质	硬度 HRC
I	消除应力，稳定组织	130 ~ 150	油、硝酸盐、碱	62 ~ 65
		150 ~ 170		60 ~ 62
		170 ~ 190		58 ~ 60
		200 ~ 220		56 ~ 60
II	消除应力，降低硬度，	按硬度要求	硝酸盐、碱、空气炉	≤56

注：1. 高精度（1 ~ 2μm）工件，应在粗磨加工后再进行回火（时效）。

2. 高于 250℃ 温度回火，不用冷处理即可保证工件的尺寸稳定性。

② 回火温度与硬度的关系（表 4-136）。

表 4-136 Cr2 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600
硬度 HRC	62	61	59	57	54	52	49	45	41	31

4) 冷处理工艺规范 (表 4-137)。

表 4-137 Cr2 钢冷处理工艺规范

淬火方案	冷却温度/℃	用途	硬度增量 HRC
I ~ III	-70	稳定高精度工具、模具的尺寸	1 ~ 2

注：冷处理理应在淬火后 1h 内进行。

(5) 力学性能

Cr2 钢为国家定型的标准钢号。其淬透性好，硬度高，耐磨性和接触疲劳强度高，热处理淬火变形小，耐回火性好，具有良好的综合力学性能。

(6) 材料应用

Cr2 钢具有良好的综合力学性能，尺寸稳定性好，广泛应用于制造工具、量具、刀具，如样板、卡板、样套、量规等，也用于制造中、小尺寸的拉丝模、冷镦模等冷作模具零件。

8. 60Si2Mn 钢

(1) 化学成分

60Si2Mn 钢的化学成分见表 4-138。

表 4-138 60Si2Mn 钢的化学成分 (质量分数) (%)

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	P	S
中国 (GB ^①)	60Si2Mn	0.56 ~ 0.64	1.50 ~ 2.00	0.70 ~ 1.00	≤0.35	—	—	≤0.35	≤0.25	≤0.035	≤0.035
中国 GB ^①	60Si2MnA	0.56 ~ 0.64	1.60 ~ 2.00	0.70 ~ 1.00	≤0.35	—	—	≤0.35	≤0.25	≤0.025	≤0.025
美国 (AISI)	S5	0.50 ~ 0.60	1.20 ~ 2.20	0.60 ~ 0.90	(0.30)	0.30 ~ 0.50	(0.25)	—	≤0.020	≤	≤0.025

① GB/T 1222—2007。

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-139。

表 4-139 60Si2Mn 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	M_s
温度 (近似值) /℃	755	810	770	305

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-140。

表 4-140 60Si2Mn 钢锻造工艺规范

项 目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷 却
钢 锭	1150 ~ 1200	1100 ~ 1150	850 ~ 950	堆冷
钢 坯	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	850 ~ 900	堆冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范表 4-141。

表 4-141 60Si2Mn 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
常规球化退火	不易使钢中的片状珠光体球化，因此很少使用
快速球化退火	加热温度为 850℃，按 20s/mm 进行等温，油冷淬火；等温球化温度为 790℃，保温 25min，急冷至 680℃，保温 1h，炉冷到 500℃ 出炉。退火后硬度≤229HBW，组织为均匀细小的点状和粒状珠光体
等温球化退火	加热温度为 790℃，保温 25min；急冷到 680℃，保温 1h；炉冷至 500℃ 出炉。可获得球化珠光体
正火	加热温度为 830 ~ 860℃，空冷，硬度≤254HBW
高温回火	加热温度为 830 ~ 860℃，空冷

2) 淬火。

① 淬火工艺规范（表 4-142）。

表 4-142 60Si2Mn 钢淬火工艺规范

淬火工艺	工 艺 参 数
常规淬火	加热温度为 840 ~ 870℃，油冷，硬度为 60 ~ 62HRC
等温淬火	加热温度为 870℃，250 ~ 350℃ 等温淬火；回火温度为 180 ~ 200℃，硬度为 58 ~ 62HRC

② 不同等温淬火温度的性能（表 4-143）。

表 4-143 60Si2Mn 钢不同等温淬火温度的性能

热处理工艺	组织	硬度 HRC	σ_{bb}/MPa	R_{eL}/MPa	$a_K/(J/\text{cm}^2)$
870℃ 油淬，250℃ 回火	回火 M	58	4645	2303	73.5
870℃ 加热，210℃ 等温处理	M + A	61	4116	2254	98
870℃ 加热，270℃ 等温处理	M + B _F + A	55	4606	1960	274
870℃ 加热，290℃ 等温处理	M + B _F + A	54	4253	1862	372
870℃ 加热，310℃ 等温处理	M + B _F + A	50	4067	1705	401.8
870℃ 加热，350℃ 等温处理	M + B _上 + B _下 + A	38	2940	1470	—

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 4-144）。

表 4-144 60Si2Mn 钢推荐的回火工艺规范

回火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
200 ~ 350	油冷或空冷	< 60

② 回火温度与硬度的关系（表 4-145）。

表 4-145 60Si2Mn 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	200	300 ^①	400	500	550	600	650
硬度 HRC	60	58	56	51	43	38	33	29

注：860℃油淬，回火 2h。

① 应避开此温度回火。

（5）力学性能

60Si2Mn 钢为弹簧专用钢种。有较好的耐回火性，屈服强度高，有较高的疲劳极限和弹性极限，较高的强韧性和优良的塑性。但耐磨性稍低，淬透性不高，由于含硅量高，因此，有石墨化倾向，脱碳敏感性也较高。

（6）材料应用

60Si2Mn 弹簧钢由于具有较高的屈服强度和较高的疲劳极限和弹性极限，较高的强韧性和优良的塑性，且价格低廉，热处理工艺简单，常用来制造承受重载荷的大型弹簧和板簧、卷簧，也可制造耐热弹簧。在模具制造中常用于制造冲击工具、模具。如在标准件中多用来制造冷镦模冲头、螺母冷镦模具、冲孔模具等。

9. 8Cr2MnWMoVS（8Cr2S）钢

（1）化学成分

8Cr2MnWMoVS 钢的化学成分见表 4-146。

表 4-146 8Cr2MnWMoVS 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	S	P
0.75 ~ 0.85	≤0.40	1.30 ~ 1.70	2.30 ~ 2.60	0.70 ~ 1.10	0.50 ~ 0.80	0.10 ~ 0.15	0.08 ~ 0.15	≤0.030

（2）物理性能

临界点温度见表 4-147。

表 4-147 8Cr2MnWMoVS 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{cm}	$A_{r_{cm}}$	A_{r1}	M_s
温度（近似值）/℃	770	820	710	660	165

（3）热加工

锻造工艺规范见表 4-148。

表 4-148 8Cr2MnWMoVS 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	≥900	砂冷或坑冷

（4）热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 4-149）。

表 4-149 8Cr2MnWMoVS 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后一般退火	加热温度为 790 ~ 810℃，保温 4 ~ 6h；炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度约为 240HBW
锻后等温退火	加热温度为 790 ~ 810℃，保温 2h；炉冷至 700 ~ 720℃，保温 6 ~ 8h；炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度为 207 ~ 229HBW

2) 淬火与回火。

① 推荐的淬火、回火工艺（表 4-150）。

表 4-150 8Cr2MnWMoVS 钢推荐的淬火、回火工艺

工 艺	淬 火	回 火
常规淬火（用于冷作模具）	加热温度为 860 ~ 900℃，油淬或空冷，硬度为 62 ~ 64HRC	回火温度为 160 ~ 200℃，硬度为 60 ~ 64HRC
预硬钢淬火（用于塑料模具）	加热温度为 860 ~ 880℃，油淬或空冷，硬度为 62 ~ 63HRC	回 火 温 度 为 620℃，硬 度 为 44 ~ 46HRC

② 在不同淬火温度下于盐浴炉加热后淬火硬度与加热系数的关系（表 4-151）。

表 4-151 8Cr2MnWMoVS 钢淬火温度下淬火硬度与加热系数的关系

加热系数 $\alpha/(\text{min/mm})$	淬火温度下的硬度 HRC			
	860℃	880℃	900℃	920℃
0.6	56.6	59.0	61.3	64.5
1.0	57.5	60.5	63.5	
1.5	58.5	61.0	—	—
2.0	62.0	62.0	—	—

③ 不同淬火温度、不同冷却方式的淬火硬度（表 4-152）。

表 4-152 8Cr2MnWMoVS 钢不同淬火温度、不同冷却方式的淬火硬度

冷却方式	不同淬火温度下的硬度 HRC			
	860℃	880℃	900℃	920℃
空冷	62.0	63.2	63.5	64.5
热油冷（130℃）	62.3	63.6	64	64.5
240 ~ 260℃ 硝盐等温淬火 40min	60.2	64.8	—	—

注：试样尺寸为 $\phi 15\text{mm} \times 13\text{mm}$ 。

④ 回火温度与硬度的关系（表 4-153）。

表 4-153 8Cr2MnWMoVS 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	未回火	150	200	300	400	500	550	600
860℃空冷硬度 HRC	62	60	58.5	56.5	54	51	48	45.5
880℃空冷硬度 HRC	64	62	60	57	55	53	51	47

注：回火 2h。

(5) 力学性能

8Cr2MnWMoVS (8Cr2S) 钢含碳量较高，淬火硬度高，耐磨性好，磨削时可取得较高的光亮度，淬透性较好，热处理变形小，但横向冲击性能较低，具有一定的综合力学性能，且切削加工性能好。

(6) 材料应用

8Cr2MnWMoVS (8Cr2S) 钢，加入易切削元素 S 而形成 MnS 易切削相，可采用常规机械加工方法，进行车、刨、铣、镗、钻、铰、攻螺纹等切削工艺，模具加工后可直接使用，这对于制造外形复杂、尺寸精度和表面粗糙度要求严格的工具、模具特别适用。常用于制作精密的拉深模、复合精冲模等精密冲模和精密塑料成型模、压塑模等。

10. 6CrNiMnSiMoV (GD) 钢

(1) 化学成分

1) 6CrNiMnSiMoV 钢的化学成分 (表 4-154)。

表 4-154 6CrNiMnSiMoV 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S
0.64 ~ 0.74	0.50 ~ 0.90	0.70 ~ 1.00	1.00 ~ 1.30	0.70 ~ 1.00	0.30 ~ 0.60	0.20	≤0.030	≤0.030

2) GD 钢与国外类似钢号及化学成分比较 (表 4-155)。

表 4-155 GD 钢与国外类似钢号及化学成分 (质量分数) 比较 (%)

钢 号	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	W
6CrNiMnSiMoV (GD)	0.64 ~ 0.74	0.50 ~ 0.90	0.70 ~ 1.00	1.00 ~ 1.30	0.30 ~ 0.60	0.20	0.70 ~ 1.00	—
美国 L6	0.65 ~ 0.75	0.10 ~ 0.50	0.25 ~ 0.80	0.60 ~ 1.20	≤0.50	—	1.25 ~ 2.00	—
俄罗斯 7XT2BMΦ	0.68 ~ 0.76	0.20 ~ 0.40	1.80 ~ 2.30	1.50 ~ 1.80	1.50 ~ 0.80	0.10 ~ 0.25	≤0.350	0.50 ~ 0.90
德国 75CrMoNiW6	0.70 ~ 0.80	0.15 ~ 0.30	0.15 ~ 0.53	1.40 ~ 1.60	0.60 ~ 0.80	—	0.40 ~ 0.60	0.20 ~ 0.40

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-156。

表 4-156 6CrNiMnSiMoV 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r3}	A_{r1}	M_s
温度（近似值）/℃	705	740	605	580	172

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-157。

表 4-157 6CrNiMnSiMoV 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
1080 ~ 1120	1040 ~ 1060	≥850	缓冷

注：此钢锻造温度区间宽，热塑性好，变形抗力小，可以一火成形。锻后应缓冷，并立即进行退火。

(4) 热处理

1) 预备热处理。推荐采用的等温球化退火工艺见表 4-158。

表 4-158 6CrNiMnSiMoV 钢等温球化退火工艺

加热温度/℃	保温时间/h	等温温度/℃
760 ~ 780	2	680℃ × 6h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷

注：该钢属于空冷微变形模具钢，退火不易软化。采用等温球化退火工艺，可以取得较好的工艺效果。

2) 淬火与回火。

① 推荐的淬火、回火工艺规范（表 4-159）。

表 4-159 6CrNiMnSiMoV 钢推荐的淬火、回火工艺规范

工艺	工 艺 参 数
常规淬火、回火工艺	淬火温度为 870 ~ 930℃，油冷，硬度为 62 ~ 64HRC。回火温度为 175 ~ 230℃，硬度为 60 ~ 62HRC
等温淬火工艺	淬火温度为 870℃，等温温度为 260℃，时间为 1.5h，可获得体积分数为 15% 的下贝氏体 + 马氏体基体；然后在 180 ~ 200℃ 回火 2h。马氏体基体上分布适量的下贝氏体，能起到抑制裂纹扩展、提高强韧性的良好效果，是进一步挖掘材料潜力的有效途径

② 不同淬火温度淬火后的硬度、晶粒度和残留奥氏体量（表 4-160）。

表 4-160 6CrNiMnSiMoV 钢淬火后的硬度、晶粒度和残留奥氏体量的关系

淬火温度/℃	840	870	900	930	960	1000
油冷硬度 HRC	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0	65.0
晶粒度/级	12	12	10 ~ 11	10 ~ 11	9 ~ 10	6 ~ 7
残留奥氏体体积分数（%）	11.4	13.5	13.8	16.6	20.2	—

③ 回火温度对钢硬度的影响（表 4-161）。

表 4-161 6CrNiMnSiMoV 钢回火温度对硬度的影响

硬度 HRC 淬火温度/℃	回火温度/℃						
	810	840	870	900	930	960	1000
150	62.0	63.0	63.5	64.0	64.0	64.5	64.0
175	61.0	61.5	62.0	62.0	62.5	63.0	63.0
200	59.0	60.0	61.0	61.0	61.0	60.5	61.0
230	59.5	60.0	90.5	60.5	60.0	60.0	60.0
260	59.0	60.0	60.0	59.5	59.5	60.0	60.0
300	59.5	59.5	59.0	58.5	58.0	60.0	59.0
350	59.0	58.5	58.0	57.5	58.0	58.0	58.0
400	57.0	57.0	56.5	56.5	56.5	56.5	57.0

(5) 力学性能

6CrNiMnSiMoV (GD) 钢属于低合金高强韧性冷作模具钢，在 CrWMn 钢的基础上降低碳含量，增加了 Ni、Si、Mo 元素，以减少碳化物偏析，细化晶粒，加强基体的强度和韧性，提高淬透性和耐磨性，提高耐回火性。通过最佳的热处理工艺，可以获得较多的板条状马氏体，强度和韧性好，耐磨性高。

1) 6CrNiMnSiMoV 钢与 CrWMn 钢和 Cr12MoV 钢力学性能对比 (表 4-162)。

表 4-162 6CrNiMnSiMoV 钢与 CrWMn 钢和 Cr12MoV 钢力学性能对比

钢号	热处理工艺	硬度 HRC	抗弯强度 σ_{bb} /MPa	挠度 f /mm	压缩屈服强度 R_{eLc} /MPa	C 型缺口试样冲击 韧度 a_K / (J/cm ²)	多冲周次 (2.15J)/次
6CrNiMnSiMoV (GD)	900℃油淬， 200℃回火	61	4388	3.06	2674	149.1	8895
CrWMn	840℃油淬， 200℃回火	61	3777	2.90	2668	76.5	6413
Cr12MoV	1020℃油淬， 200℃回火	61	2580	2.30	2667	44.1	4105

2) 采用不同热处理工艺后的力学性能 (表 4-163)。

表 4-163 6CrNiMnSiMoV 钢采用不同热处理工艺后的力学性能

性能 淬火、回火	840℃油淬， 200℃回火	870℃油淬			900℃油淬			930℃油 淬，200℃回火	960℃油 淬，200℃回火
		175℃回火	200℃回火	230℃回火	175℃回火	200℃回火	230℃回火		
硬度 HRC	60.0	62.0	61.0	60.0	62.0	61.0	60.0	61.0	60.5
抗弯强度 σ_{bb} /MPa	4027	3758	4054	4591	3625	4338	4480	4258	3589
压缩屈服强度 R_{eLc} /MPa	2346	2533	2468	2387	2560	2493	2360	2387	2333

(续)

性能 \ 淬火、回火	840℃油淬, 200℃ 回火	870℃油淬			900℃油淬			930℃油 淬, 200℃ 回火	960℃油 淬, 200℃ 回火
		175℃ 回火	200℃ 回火	230℃ 回火	175℃ 回火	200℃ 回火	230℃ 回火		
弯曲屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	3218	3093	3154	3476	3026	3408	3356	2861	3190
冲击韧度 $a_K/(J/\text{cm}^2)$	101	104	131	138	96	148	152	160	53
断裂韧度 $K_{IC}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	21.2	20.3	25.4	24.2	—	25.3	—	25.2	23.0
多冲周次 (能级为 3.249J) $R10\text{mm}$ 圆弧缺口/ $\times 10^4 \text{N}$	2.136	3.225	3.750	4.305	—	3.876	3.248	3.045	3.275

(6) 材料应用

6CrNiMnSiMoV (GD) 钢属于低合金高强韧性冷作模具钢, 通过最佳的热处理工艺, 可以获得较多的板条状马氏体, 强度和韧性好, 耐磨性高。钢的淬火温度较低, 温度区间宽, 尤其适合中小企业的热处理条件。它可以替代 CrWMn、9Mn2V 钢和部分取代 Cr12MoV 钢, 制造冷作模具, 模具的使用寿命大幅度提高, 具有显著的经济效益。

11. Cr2Mn2SiWMoV 钢

(1) 化学成分

Cr2Mn2SiWMoV 钢的化学成分见表 4-164。

表 4-164 Cr2Mn2SiWMoV 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	P	S
0.95 ~ 1.05	0.60 ~ 0.90	1.80 ~ 2.30	2.30 ~ 2.60	0.70 ~ 1.10	0.50 ~ 0.80	0.10 ~ 0.25	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-165。

表 4-165 Cr2Mn2SiWMoV 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{r1}	M_s
温度 (近似值)/℃	770	640	190

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-166。

表 4-166 Cr2Mn2SiWMoV 钢锻造工艺规范

项 目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷 却
钢锭	1140 ~ 1160	1040 ~ 1060	≥900	缓冷
钢坯	1120 ~ 1140	1020 ~ 1400	≥850	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-167)。

表 4-167 Cr2Mn2SiWMoV 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后等温退火	加热温度为 780 ~ 800℃, 保温 2 ~ 3h; 等温温度为 700 ~ 720℃, 保温 8h, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷, 硬度 ≤ 269HBW
锻后周期退火	加热温度为 790 ~ 810℃, 保温 2h; 炉冷至 670 ~ 690℃, 保温 6h, 再升温至 700 ~ 720℃, 保温 6h, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷, 硬度 ≤ 269HBW

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 4-168。

表 4-168 Cr2Mn2SiWMoV 钢推荐的淬火工艺规范

淬火方案	淬火温度/℃	冷却介质	硬度 HRC
I	850 ~ 870	空气	60 ~ 63
II	830 ~ 850	油	60 ~ 63

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范 (表 4-169)。

表 4-169 Cr2Mn2SiWMoV 钢推荐的回火工艺规范

回火温度/℃	回火介质	回火次数/次	回火时间/h	硬度 HRC
180 ~ 200	油	1	1 ~ 1.5	60 ~ 62
180 ~ 200	油	1	1 ~ 1.5	60 ~ 62

② 回火温度与硬度的关系 (表 4-170)。

表 4-170 Cr2Mn2SiWMoV 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	200	300	350	400	500	600
硬度 HRC	62	61	60	57	56	51	42

注: 860℃ 油淬, 回火 2h。

(5) 力学性能

Cr2Mn2SiWMoV 属于空冷微变形冷作模具钢。其淬透性好, 硬度高、耐磨性高, 热处理变形小, 尺寸稳定性好, 碳化物颗粒小、分布均匀, 具有较高的力学性能。但该钢的退火工艺较复杂, 退火后硬度偏高, 脱碳敏感性较大。

(6) 材料应用

Cr2Mn2SiWMoV 钢是一种空冷微变形冷作模具钢。其综合力学性能优良, 主要用于制造有尺寸稳定性要求的精密量具、高耐磨细长杆状零件和机床导轨、要求热处理变形小的精密量具, 制造要求热处理变形小的冷作模具。此外还用于制造冲铆钉孔的凹模、落料冲孔的复合模、硅钢片的单槽冲模等模具。

12. W 钢

(1) 化学成分

1) W 钢的化学成分 (GB/T 1299—2000) (表 4-171)。

表 4-171 W 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	W	P	S
1.05 ~ 1.25	≤0.40	≤0.40	0.10 ~ 0.30	0.80 ~ 1.20	≤0.030	≤0.030

2) 国外 W 钢的化学成分 (表 4-172)。

表 4-172 国际市场 W 钢化学成分 (质量分数) (%)

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	W	P	S	V
德国 (DIN)	120W4	1.15 ~	0.15 ~	0.20 ~	0.15 ~	0.90 ~	≤0.035	≤0.035	—
	W - Nr1.2414	1.25	0.30	0.35	0.25	1.10			
美国 (AISI)	F1	0.95 ~ 1.20	≤0.50	≤0.50	—	1.00 ~ 1.75	—	—	—
英国 (BS)	BF1	1.15 ~ 1.35	≤0.40	≤0.40	0.25 ~ 0.50	1.30 ~ 1.60	—	—	≤0.30
法国 (NF)	105WCr5	1.10 ~ 1.15	0.10 ~ 0.40	0.70 ~ 1.00	0.18 ~ 1.10	01.00 ~ 1.60	—	—	—
俄罗斯 (ГОСТ)	B2Φ	1.05 ~ 1.22	0.10 ~ 0.40	0.15 ~ 0.45	0.20 ~ 0.40	1.60 ~ 2.00	≤0.030	≤0.030	—
意大利 (UNI)	IIW4KV	0.95 ~ 1.25	≤0.40	≤0.35	≤0.25	0.90 ~ 1.20	—	—	—

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-173。

表 4-173 W 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}
温度 (近似值) /℃	740	820	710

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-174。

表 4-174 W 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	850	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-175)。

表 4-175 W 钢预备热处理工艺规范

工艺名称	工 艺 参 数
锻后等温退火	加热温度为 770 ~ 790℃, 保温 1 ~ 2h; 等温温度为 680 ~ 700℃, 保温 1 ~ 2h; 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷

2) 淬火及回火。

① 淬火、回火工艺 (表 4-176)。

表 4-176 W 钢淬火、回火工艺

热处理项目	淬 火 规 范	回 火 规 范
工艺参数	加热温度为 800 ~ 820℃, 水冷, 硬度为 62 ~ 64HRC	回火温度为 160 ~ 180℃, 保温 2h, 硬度为 59 ~ 61HRC

② 回火温度与硬度的关系 (表 4-177)。

表 4-177 W 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬火后	150	200	250	300	350
硬度 HRC	63	61	59	56	52	48

注: 810℃ 水淬, 回火 2h。

(5) 力学性能

W 钢是在碳素工具钢的基础上适当添加 W 元素而成的高碳低合金钢, 具有高硬度和耐磨性。由于 W 元素所形成的碳化物的作用, 在淬火和低温回火后具有更高的硬度和耐磨性, 而且过热敏感性较小, 热处理时的变形也较小, 水淬时不易产生裂纹, 耐回火性较好。

(6) 材料应用

W 钢具有高硬度和耐磨性, 且过热敏感性较小, 热处理时的变形也较小, 水淬时不易产生裂纹, 耐回火性较好。常用来制造小型麻花钻头、丝锥、铰刀、板牙以及温度不高、切削速度不高的一些工具、刀具, 也用于制造热处理变形小的冲模冲头、冷剪切模具等。

13. 4CrW2Si 钢

(1) 化学成分

4CrW2Si 钢的化学成分 (GB/T 1299—2000) 见表 4-178。

表 4-178 4CrW2Si 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	W	P	S
0.35 ~ 0.45	0.80 ~ 1.10	≤0.40	1.00 ~ 1.30	2.00 ~ 2.50	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-179。

表 4-179 4CrW2Si 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	M_s
温度 (近似值) /℃	780℃	840℃	315℃

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-180。

表 4-180 4CrW2Si 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1180 ~ 1220	1150 ~ 1180	≥850	缓冷
钢坯	1150 ~ 1180	1100 ~ 1140	≥800	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 4-181）。

表 4-181 4CrW2Si 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后一般退火	加热温度为 800 ~ 820℃，保温 3 ~ 5h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 197 ~ 217HBW，组织为粒状珠光体 + 少量碳化物
高温回火	加热温度为 710 ~ 740℃，保温 3 ~ 4h，炉冷或空冷。目的为改善切削加工性能

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 4-182。

表 4-182 4CrW2Si 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	冷却至	硬度 HRC
860 ~ 900	油	20 ~ 40	油温	≥53

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 4-183）。

表 4-183 4CrW2Si 钢推荐的回火工艺规范

用途	回火温度/℃	加热介质	冷却介质	硬度 HRC
消除内应力和稳定组织	200 ~ 250	油或熔融硝酸盐	空气	53 ~ 58
降低硬度和消除内应力	430 ~ 470	空气炉、硝酸盐或熔融碱	空气	45 ~ 50

② 硬度与回火温度的关系（表 4-184）。

表 4-184 4CrW2Si 钢硬度与回火温度的关系

回火温度/℃	100	200	300	400	500	550	600
硬度 HRC	54	52	50	46	40	36	32

注：880℃油淬，回火 2h。

(5) 力学性能

4CrW2Si 钢回火状态下可获得较高的韧性和一定的高温强度。该钢的含碳量低、淬硬性低，但渗碳淬火后，表面硬度和热稳定性会显著上升，综合力学性能良好，具有外硬内韧的特点，承载能力及耐磨性均超过低淬透性冷作模具钢。但该钢属于铬钨硅系钢，脱碳敏感性较高，淬火变形难以控制，在磨粒磨损条件下的耐磨性不足，其冲击韧度低于含 Mo、Ni 的抗冲击钢种。

(6) 材料应用

4CrW2Si 钢综合力学性能较优良,多用于制造在高冲击载荷下操作的工具、模具,主要用来制造高冲击载荷的风动工具、冷切用剪刀和大中型重载冷镦冲头、冲模、精压模、冲裁切边复合模及部分小型热作模具。

14. 5CrW2Si 钢

(1) 化学成分

5CrW2Si 钢的化学成分 (GB/T 1299—2000) 见表 4-185。

表 4-185 5CrW2Si 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	W	P	S
0.45 ~ 0.55	0.50 ~ 0.80	≤0.40	1.00 ~ 1.30	2.00 ~ 2.50	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 4-186)。

表 4-186 5CrW2Si 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	M_s
温度 (近似值) /℃	775	860	295

2) 线膨胀系数 (表 4-187)。

表 4-187 5CrW2Si 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 500	20 ~ 600	20 ~ 700	20 ~ 900
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	13.29	13.63	13.76	14.97	15.33	15.49	14.85

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-188。

表 4-188 5CrW2Si 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1180 ~ 1200	1150 ~ 1180	≥850	缓冷
钢坯	1150 ~ 1180	1120 ~ 1150	≥800	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-189)。

表 4-189 5CrW2Si 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后一般退火	加热温度为 800 ~ 820℃, 保温 3 ~ 5h, 炉冷至 550℃ 以下出炉空冷, 退火后硬度为 207 ~ 255HBW, 组织为粒状珠光体 + 少量碳化物
高温回火工艺	加热温度为 710 ~ 740℃, 保温 3 ~ 6h, 炉冷或空冷。目的为改善切削加工性能

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 4-190。

表 4-190 5CrW2Si 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	冷 却			硬度 HRC
	淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	冷却至	
860 ~ 900	油	20 ~ 40	油温	≥55

3) 回火。

① 回火工艺规范（表 4-191）。

表 4-191 5CrW2Si 钢回火工艺规范

用 途	回火温度/℃	加热介质	冷却介质	硬度 HRC
消除内应力和稳定组织	200 ~ 250	油或熔融碱	空气	53 ~ 58
降低硬度和消除应力	430 ~ 470	空气炉或熔融碱、硝酸盐	空气	45 ~ 50

② 硬度与回火温度的关系（表 4-192）。

表 4-192 5CrW2Si 钢硬度与回火温度的关系（880℃油淬）

回火温度/℃	100	200	300	400	500	600
硬度 HRC	55	53.5	51	47	41	33

(5) 力学性能

5CrW2Si 钢的含碳量较低、淬硬性不太高，但经渗碳淬火后，表面硬度和热稳定性显著上升，综合力学性能良好。在 300 ~ 350℃回火时有轻微的回火脆性；在 250℃左右回火，硬度可达 54 ~ 56HRC；在 450℃左右回火硬度可达 50 ~ 52HRC，并可获得较高的冲击韧度。铬钨硅系钢脱碳敏感性较高，淬火变形难以控制，在磨粒磨损条件下的耐磨性不足，其冲击韧度低于含 Mo、Ni 的抗冲击钢。

(6) 材料应用

5CrW2Si 钢综合力学性能好，应用最广，主要用于制造木工工具、冷剪金属的刀片、铲搓丝板的铲刀、大型重载冷镦冲头、中载钢板穿孔冲头、风动工具及精压模、冲裁和切边用模具等。

15. 6CrW2Si 钢

(1) 化学成分

6CrW2Si 钢的化学成分（GB/T 1299—2000）见表 4-193。

表 4-193 6CrW2Si 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	W	P	S
0.55 ~ 0.65	0.50 ~ 0.80	≤0.40	1.10 ~ 1.30	2.20 ~ 2.70	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-194。

表 4-194 6CrW2Si 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	M_s
温度（近似值）/℃	775	810	280

(3) 热加工
锻造工艺规范见表 4-195。

表 4-195 6CrW2Si 钢锻造工艺规范

项 目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷 却
钢 锭	1170 ~ 1200	1150 ~ 1180	≥850	缓冷
钢 坯	1150 ~ 1170	1100 ~ 1140	≥800	缓冷

(4) 热处理
1) 预备热处理工艺规范（表 4-196）。

表 4-196 6CrW2Si 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后一般退火	加热温度为 800 ~ 820℃，保温 3 ~ 5h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度为 229 ~ 285HBW，组织为粒状珠光体 + 少量碳化物
高温回火工艺	加热温度为 700 ~ 730℃，保温 2 ~ 4h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，其目的是改善钢的切削加工性能

2) 推荐的淬火工艺规范（表 4-197）。

表 4-197 6CrW2Si 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	冷却至	硬度 HRC
860 ~ 900	油	20 ~ 40	油温	≥57

3) 回火。
① 回火工艺规范（表 4-198）。

表 4-198 6CrW2Si 回火工艺规范

用 途	回火温度/℃	加热介质	冷却介质	硬度 HRC
消除内应力和稳定组织	200 ~ 250	油或熔融碱	空气	53 ~ 58
降低硬度和消除应力	430 ~ 470	空气炉或熔融碱、硝酸盐	空气	45 ~ 50

② 硬度与回火温度的关系（表 4-199）。

表 4-199 6CrW2Si 钢硬度与回火温度的关系

回火温度/℃	未回火	100	200	300	400	500	550	600
硬度 HRC	59	58	56	53	49	42	38	35

注：880℃ 油淬。

(5) 力学性能

6CrW2Si 钢具有较高的韧性，高的淬火硬度，一定的高温强度，高的疲劳强度。在 300 ~ 350℃ 回火时有轻微的回火脆性。在 250℃ 回火硬度可达 54 ~ 56HRC，在 450℃ 回火硬度可达 50 ~ 52HRC。该钢耐回火性、耐磨性稍高于 5CrW2Si 钢，但韧性较差。铬

钨硅系钢脱碳敏感性较高，淬火变形难以控制，在磨粒磨损条件下耐磨性不足，其冲击韧度低于含 Mo、Ni 的抗冲击钢。

(6) 材料应用

6CrW2Si 钢常用于制造失效形式为磨损和塌陷的重载冲模、冷压模，或用于制造承受冲击载荷而又要求耐磨性高的工模具，如风动工具、冲击模具、冷剪机刀片、冲裁切边用凹模、空气锤用工具等。

16. Cr06 钢

(1) 化学成分

Cr06 钢的化学成分（GB/T 1299—2000）见表 4-200。

表 4-200 Cr06 钢的化学成分（质量分数） (%)

C	Si	Mn	Cr	P	S
1.30 ~ 1.45	≤0.40	≤0.40	0.50 ~ 0.70	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-201。

表 4-201 6CrW2Si 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}
温度（近似值）/℃	730	950	700

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-202。

表 4-202 Cr06 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	850	缓冷
钢坯	1050 ~ 1100	1000 ~ 1070	810	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 4-203）。

表 4-203 Cr06 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后等温退火	加热温度为 780 ~ 800℃，保温 2 ~ 4h，炉冷至 680 ~ 700℃，保温 2 ~ 4h，500℃ 以下出炉空冷，硬度 ≤207HBW
正火	加热温度为 860 ~ 880℃，空冷，硬度为 269 ~ 341HBW。目的为细化晶粒，消除网状碳化物
高温回火	加热温度为 650 ~ 700℃，炉冷或空冷，硬度为 229 ~ 285HBW。高温回火用于消除冷变形后的冷作硬化及淬火前切削加工后的内应力

2) 淬火。淬火工艺规范见表 4-204。

表 4-204 Cr06 钢淬火工艺规范

方案	淬火温度/℃	淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	延续	冷却到 20℃	硬度 HRC
I	780 ~ 800	水 质量分数为 3% 的 Na ₂ CO ₃ 溶液或质量分数为 5% 的 NaCl 溶液油	20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油	62 ~ 64
II	780 ~ 800		20 ~ 40	至 200 ~ 250℃	油	62 ~ 64
III	800 ~ 820		20 ~ 40	至油温	空气	62 ~ 64

注：方案 I、II 用于有效厚度 > 15mm 的工件，方案 III 用于有效厚度 ≤ 15mm 的工件。

3) 冷处理。冷处理规范见表 4-205。

表 4-205 Cr06 钢冷处理规范

淬火方案	冷却温度/℃	用 途	硬度增量 HRC
I ~ III	-50	高精度工具、模具尺寸稳定化	1 ~ 2

注：冷处理应在淬火后 1h 内进行。

4) 回火。

① 回火工艺规范（表 4-206）。

表 4-206 Cr06 钢回火工艺规范

回火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
160 ~ 180	油冷或空冷	60 ~ 62

② 回火温度与硬度的关系（表 4-207）。

表 4-207 Cr06 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	150	200	250	300	400	500
硬度 HRC	63	62	61	58	56.5	48	38

注：800℃水淬。

(5) 力学性能

Cr06 钢是在碳素工具钢的基础上加入适量 Cr 元素，淬透性好，其硬度、耐磨性较高，接触疲劳强度高。冷加工塑性变形和切削加工性能较好，淬火变形小，尺寸稳定性好，具有一定的综合力学性能。

(6) 材料应用

Cr06 钢具有较好的综合力学性能，冷加工塑性变形以及切削加工性能较好，常用于制造形状简单的中、小尺寸冷作工、模具零件。如各种冲模、冲孔模、冷锻模、冷挤压模、落料模等。

17. 8MnSi 钢

(1) 化学成分

8MnSi 钢的化学成分（GB/T 1299—2000）见表 4-208。

表 4-208 8MnSi 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	P	S
0.75 ~ 0.85	0.30 ~ 0.60	0.80 ~ 1.10	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-209。

表 4-209 8MnSi 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	M_s
温度 (近似值) /℃	760	865	708	240

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-210。

表 4-210 8MnSi 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1120 ~ 1180	1100 ~ 1150	800 ~ 880	缓冷 (坑冷或砂冷)
钢坯	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	800 ~ 850	缓冷 (坑冷或砂冷)

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-211)。

表 4-211 8MnSi 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后一般退火	加热温度为 740 ~ 760℃, 保温 2 ~ 3h, 炉冷至 550℃ 以下出炉空冷, 硬度 ≤229HBW
锻后等温退火	加热温度为 740 ~ 760℃, 保温 2 ~ 3h, 炉冷至 680 ~ 700℃, 保温 3 ~ 4h, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷, 退火后硬度 ≤229HBW

2) 淬火。淬火工艺规范见表 4-212。

表 4-212 8MnSi 钢淬火工艺规范

方案	淬火温度/℃	冷 却				硬度 HRC
		淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	延续	冷却至 20℃	
I	780 ~ 800	水	20	160 ~ 180	油	62 ~ 65
II	800 ~ 820	油	20 ~ 40	—	空冷	62 ~ 64
III	800 ~ 820	熔融硝酸盐	160 ~ 180	—	空冷	62 ~ 64

3) 回火。回火工艺规范见表 4-213。

表 4-213 8MnSi 钢回火工艺规范

方案	回火温度/℃	回火次数	冷却介质	硬度
I	160 ~ 180	1	空气	60 ~ 62
II	360 ~ 400	1	空气	56 ~ 58
III	510 ~ 520	1	空气	42 ~ 46

(5) 力学性能

8MnSi 钢是在碳素工具钢 T8 的基础上加入一定量的 Si、Mn 合金元素而形成的低合金工具钢。由于 Si 的作用, 钢的强度特别是疲劳强度显著提高, 耐回火性较高; Si、Mn 元素主要是提高钢的淬透性、耐磨性, 热处理变形也较碳素工具钢小。

(6) 材料应用

8MnSi 低合金工具钢为一种经济型利用性能高的冷作模具钢。适合制造冷加工用的模具, 如冷锻模、冲孔模、冷挤压模、落料模等。

18. 7CrSiMnMoV (CH1) 钢

(1) 化学成分

7CrSiMnMoV 钢的化学成分 (GB/T 1299—2000) 见表 4-214。

表 4-214 7CrSiMnMoV 钢化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
0.65 ~ 0.75	0.85 ~ 1.15	0.65 ~ 1.05	0.90 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50	0.15 ~ 0.30	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 4-215)。

表 4-215 7CrSiMnMoV 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	Ar_1	Ar_3	M_s
温度 (近似值) /℃	776	834	694	732	211

2) 线膨胀系数 (表 4-216)。

表 4-216 7CrSiMnMoV 钢线膨胀系数

温度/℃	11 ~ 100	11 ~ 200	11 ~ 300	11 ~ 400	11 ~ 500	11 ~ 600
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	12.7	13.2	13.5	14.0	14.3	14.6

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-217。

表 4-217 7CrSiMnMoV 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1150 ~ 1200	1100 ~ 1150	800 ~ 850	缓冷
钢坯	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	800 ~ 850	缓冷

注: 锻造前, 需预热至 800 ~ 900℃。

1) 预备热处理工艺规范（表 4-218）。

表 4-218 7CrSiMnMoV 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后普通退火	加热温度为 840 ~ 860℃，保温 3 ~ 4h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度为 217 ~ 241HBW
锻后等温退火	加热温度为 820 ~ 840℃，保温 2 ~ 4h，炉冷至 680 ~ 700℃，保温 3 ~ 5h，然后炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度为 217 ~ 241HBW

2) 淬火与回火。

① 推荐的淬火与回火工艺规范（表 4-219）。

表 4-219 7CrSiMnMoV 钢推荐的淬火与回火工艺规范

工艺方案	工 艺 参 数
整体淬火	淬火温度为 860 ~ 920℃，油冷；回火温度为 180 ~ 200℃，硬度为 58 ~ 62HRC
火焰淬火	淬火前模具必须经过 180 ~ 200℃ 预热 2h，再用乙炔火焰进行淬火。加热温度为 900 ~ 1000℃，空冷淬火；回火温度为 180 ~ 200℃

② 淬火温度和冷却方式对硬度的影响（表 4-220）。

表 4-220 7CrSiMnMoV 钢淬火温度和冷却方式对硬度的影响

加热温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
820	油冷	47
	空冷	27
840	油冷	61
	空冷	50
860	油冷	62
	空冷	59
880	油冷	62
	空冷	61
900	油冷	63
	空冷	61
920	油冷	63
	空冷	62
940	油冷	64
	空冷	63

③ 不同淬火加热温度淬火后马氏体的等级（表 4-221）。

表 4-221 7CrSiMnMoV 钢不同淬火加热温度淬火后马氏体的等级

淬火温度/℃	金相组织	马氏体等级
820	隐针马氏体 + 少量托氏体	1
840	隐针马氏体 + 少量托氏体	1.5
860	细针马氏体 + 少量托氏体	2
880	细针马氏体	2
900	细针马氏体	3
920	细针马氏体	3
940	细针马氏体	3.5

④ 淬火温度与奥氏体含量的关系（表 4-222）。

表 4-222 7CrSiMnMoV 钢淬火温度与奥氏体含量的关系

淬火温度/℃	850	900	950	1000
奥氏体体积分数 φ (%)	3.35	4.58	4.95	5.35

⑤ 淬火加热温度、保温系数与奥氏体晶粒度的关系（表 4-223）。

表 4-223 7CrSiMnMoV 钢淬火加热温度、保温系数与奥氏体晶粒度的关系

加热温度/℃	保温系数/ (s/mm)	奥氏体晶粒度/级
860	30	6 ~ 6.5
940	30	5 ~ 6.0
880	20	6
880	50	6 ~ 5.5
940	60	5

⑥ 淬火温度与力学性能的关系（表 4-224）。

表 4-224 7CrSiMnMoV 钢淬火温度与力学性能的关系

淬火温度/℃	抗拉强度/MPa	冲击韧度 a_K / (J/cm ²)	硬度 HRC
820	3380	85	47 ~ 48
840	3410	87	60 ~ 61
880	3520	94	62 ~ 63
880	3560	105	62 ~ 63
920	3480	98	63 ~ 64
960	3320	89	62 ~ 63

3) 回火。

① 回火工艺规范（表 4-225）。

表 4-225 7CrSiMnMoV 钢回火工艺规范

回火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
160 ~ 200	空气	58 ~ 62

② 回火温度和力学性能的关系（表 4-226）。

表 4-226 7CrSiMnMoV 钢回火温度和力学性能的关系

回火温度/℃	σ_{bb}/MPa	$a_K \text{ (J/cm}^2\text{)}$	硬度 HRC
180	3560	105	62
200	3510	102	62
250	3200	116	61
300	3110	118	59
350	3020	128	57
400	2860	139	54
450	2670	151	52
500	2600	163	50

(4) 力学性能

7CrSiMnMoV（CH1）钢，又称火焰淬火锅。淬透性好，淬火温度范围宽，空冷即可淬硬，过热敏感性低，其硬度可达 62~64HRC，且空冷淬火后变形小，强度高、韧性好，热处理后有较高的耐磨性，具有良好的综合力学性能。

(5) 材料应用

7CrSiMnMoV（CH1）钢宜用于制造各类冷作模具，如薄板冲孔模、整形模、切边模、冷挤压模等。该钢可以火焰淬火，对于多孔位的冲模或复杂型腔零部件、刃口，采用火焰淬火，其型腔和孔腔变形小，简化制造工艺，制造成本降低。对于强韧性要求高的冷作模具，可用 7CrSiMnMoV（CH1）取代 T10A、9Mn2V、Cr12MoV 等钢来制造，模具寿命可以提高 1 倍。这种钢特别适宜制造尺寸小、截面厚、淬火变形小的冷作模具。

19. 6CrMnSi2Mo1 钢

(1) 化学成分

6CrMnSi2Mo1 钢的化学成分（GB/T 1299—2000）见表 4-227。

表 4-227 6CrMnSi2Mo1 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
0.50~0.65	1.75~2.25	0.60~1.00	0.10~0.50	0.20~1.35	0.15~0.35	≤0.030	≤0.030

(2) 热加工

锻造工艺规范见表 4-228。

表 4-228 6CrMnSi2Mo1 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1120~1180	1100~1150	850~900	缓冷
钢坯	1100~1150	1050~1100	800~900	缓冷

(3) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-229)。

表 4-229 6CrMnSi2Mo1 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
普通退火	加热温度为 760 ~ 780℃, 保温 2 ~ 4h, 炉冷至 550℃ 以下出炉空冷, 硬度 ≤229HBW
等温球化退火	加热温度为 760 ~ 780℃, 保温 2 ~ 4h; 炉冷到 680 ~ 700℃, 保温 2 ~ 4h; 炉冷到 550℃ 以下出炉空冷, 硬度 ≤229HBW

2) 淬火及回火。推荐的淬火、回火工艺规范见表 4-230。

表 4-230 6CrMnSi2Mo1 钢推荐的淬火、回火工艺规范

淬 火 规 范	回 火 规 范
淬火温度为 885 ~ 900℃, 油淬, 硬度 ≥58HRC	回火温度为 160 ~ 180℃, 硬度为 58 ~ 60HRC

(4) 力学性能

6CrMnSi2Mo1 钢为一种碳化物偏析小而淬透性高的高强韧钢。其淬透性好, 硬度、耐磨性较高, 耐回火性好, 具有较高的强韧性、高温强度和疲劳强度。

(5) 材料应用

6CrMnSi2Mo1 低合金高强韧性冷作模具钢, 其淬火温度较低, 模具使用过程中很少发生崩刃和断裂现象。适合制造在高冲击载荷下操作的工具、冲模、冲裁切边用凹模等。

20. 5Cr3Mn1SiMo1V 钢

(1) 化学成分

5Cr3Mn1SiMo1V 钢的化学成分 (GB/T 1299—2000) 见表 4-231。

表 4-231 5Cr3Mn1SiMo1V 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
0.45 ~ 0.55	0.20 ~ 1.00	0.20 ~ 0.90	3.00 ~ 3.50	1.30 ~ 1.80	≤0.35	≤0.030	≤0.030

(2) 热加工

锻造工艺规范见表 4-232。

表 4-232 5Cr3Mn1SiMo1V 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1120 ~ 1150	1150 ~ 1200	900	缓冷
钢坯	1150 ~ 1200	1000 ~ 1150	850	缓冷

(3) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-233)。

表 4-233 5Cr3Mn1SiMo1V 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后等温退火	加热温度为 800 ~ 820℃，保温 2 ~ 3h，等温温度为 700 ~ 720℃，保温 3 ~ 5h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，退火后硬度 ≤229HBW
锻后一般退火	加热温度为 800 ~ 820℃，保温 2 ~ 3h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，退火后硬度 ≤229HRC

2) 淬火与回火。推荐的淬火、回火工艺规范见表 4-234。

表 4-234 5Cr3Mn1SiMo1V 钢推荐的淬火、回火工艺规范

淬 火 规 范			回 火 规 范	
淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度/℃	硬度 HRC
940 ~ 955	空冷或油冷	56	160 ~ 180	56 ~ 58

(4) 力学性能

5Cr3Mn1SiMo1V 钢为一种耐冲击工具钢，钢中含 Cr 量较高，淬透性较好；Si、Mn 元素提高了钢的强度和耐回火性；Mo、V 元素可以细化晶粒，提高钢的淬透性，使钢的综合性能提高。同时，该钢中 Cr 的质量分数大于 2.5%，具有良好的抗氢侵蚀性和中温抗氧化性。

(5) 材料应用

5Cr3Mn1SiMo1V 钢具有较高的韧性和中温抗氧化性，适合制造在较高温度、高冲击载荷下工作的工具、冲模，也适合制造锤锻模具等。

21. 5CrNiMnSiMoWV 钢

(1) 化学成分

5CrNiMnSiMoWV 钢的化学成分见表 4-235。

表 4-235 5CrNiMnSiMoWV 钢的化学成分

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	S	P
0.54 ~ 0.64	0.50 ~ 0.60	0.70 ~ 1.10	1.00 ~ 1.30	0.70 ~ 1.00	0.10 ~ 0.40	0.30 ~ 0.70	0.10 ~ 0.30	≤0.030	≤0.030

(2) 热加工

锻造工艺规范见表 4-236。

表 4-236 5CrNiMnSiMoWV 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1080 ~ 1120	1040 ~ 1060	≥850	锻后炉冷

(3) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 4-237）。

表 4-237 5CrNiMnSiMoWV 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后等温退火	加热至 780℃，保温 2h，等温温度为 680℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 550℃ 出炉空冷，硬度为 210 ~ 220HBW

2) 淬火、回火工艺规范（表 4-238）。

表 4-238 5CrNiMnSiMoWV 钢淬火、回火工艺规范

淬 火 规 范			回 火 规 范
淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	
880 ~ 900	油冷	61 ~ 63	加热至 180℃，保温 2h，硬度为 58 ~ 60HRC；350℃，保温 2h，硬度为 53 ~ 55HRC；200 ~ 220℃，保温 2h，硬度为 56 ~ 58HRC

(4) 力学性能

5CrNiMnSiMoWV 钢属于低合金高强韧性耐冲击工具钢。钢中 Mo、W、V 元素形成的碳化物，提高了钢的强度、硬度与耐磨性，并可细化晶粒，改善钢的强韧性，消除钢的回火脆性，提高钢的淬透性。室温下存在于马氏体组织中强化组织，提高钢的耐回火性。由于碳元素与 Cr、Mn、Mo、W、V、Fe 元素形成碳化物，作为组织中的强化相，使得淬火所得的基体组织多为复合马氏体组织，具有很高的强韧性。故该钢具有高的强度、高的强韧性与较高的弹性极限，较高的硬度与耐磨性。

(5) 材料应用

5CrNiMnSiMoWV 钢常用于制造冲击性冷作模具，如制造冲模、冷挤压模、重载剪切模、推杆筒下料模、160t 压力机上由定刀片和动刀片组成的剪切下料模和电位弹簧片凸模等。5CrNiMnSiMoWV 模具钢与 CrWMn 钢等的应用比较见表 4-239。

表 4-239 5CrNiMnSiMoWV 模具钢与 CrWMn 钢等的应用比较

模 具 名 称	原 用 钢		5CrNiMnSiMoWV 钢 寿命 / 件	寿命提 高倍数
	钢号	寿命/件		
φ20 ~ φ48mm20Mn 钢剪切模	CrWMn 钢	8000	20 000	2.5
推杆筒下料模	Cr12MoV 钢	2000	40 000	20
电位弹簧片凸模	W18Cr4V 钢	1000	24 000	24
导向筒冷挤压模	Cr12MoV 钢	10 ~ 100	8000 ~ 11 000	100
导向筒冷挤压模	W18Cr4V 钢	100 ~ 200	8000 ~ 11 000	40

22. 6Cr3VSi 钢

(1) 化学成分

6Cr3VSi 钢的化学成分见表 4-240。

表 4-240 6Cr3VSi 钢的化学成分

C	Si	Mn	Cr	V	S	P
0.55 ~ 0.65	0.50 ~ 0.80	≤0.40	2.60 ~ 3.20	0.15 ~ 0.30	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-241。

表 4-241 6Cr3VSi 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}	M_s	M_f
温度 (近似值)	800	875	730	840	275	90

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-242。

表 4-242 6Cr3VSi 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1150 ~ 1170	1100 ~ 1150	≥850	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-243)。

表 4-243 6Cr3VSi 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
等温退火	加热温度为 820 ~ 840℃, 保温时间为 1.2 ~ 1.5min/mm, 炉冷至 680 ~ 700℃ 等温, 保温时间为 1.5 ~ 1.8min/mm, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷

2) 淬火及回火工艺规范 (表 4-244)。

表 4-244 6Cr3VSi 钢淬火及回火工艺规范

淬 火 规 范	回 火 规 范
预热 600 ~ 620℃, 保温时间为 1.2 ~ 1.5min/mm, 加热温度为 950 ~ 970℃, 保温时间为 1 ~ 1.2min/mm, 油冷至 150 ~ 200℃, 出油后立即回火。淬火硬度为 60 ~ 62HRC	回火温度为 410 ~ 430℃, 保温 2h, 回火两次, 回火后硬度为 48 ~ 52HRC

(5) 力学性能

6Cr3VSi 钢中的 Si 元素改善碳化物分布与形态, 提高弹性极限; V 元素形成的碳化物, 阻止奥氏体晶粒长大, 起到细化晶粒作用, 提高钢的强韧性。该钢具有高的硬度、耐磨性和耐回火性, 强韧性好。

(6) 材料应用

6Cr3VSi 钢属于中等韧性的非热稳定性工具钢, 其含碳量低于 8Cr3 钢, 所以韧性优于 8Cr3 钢。主要用于承受动载荷但压力不大的模具, 如棒料剪切模的镶块等。

4.2.3 高耐磨冷作模具钢

高耐磨冷作模具钢一般是高碳高铬钢, 是一种高合金冷作模具钢, 应用量最多最广

泛,代表钢号有:Cr12、Cr12MoV、Cr12Mo1V1、Cr12W、Cr12V、Cr4W2MoV、Cr5Mo1V、Cr6WV、7Cr7Mo2V2Si (LD)、Cr8MoWV3Si (ER5)、9Cr6W3Mo2V2 (GM)等。这类钢大部分是莱氏体钢,组织中有大量共晶碳化物,淬火后有大量共晶碳化物存在,同时含有大量残留奥氏体,因此热处理后变形小、耐磨性高、承载力大,经常用于制造在高耐磨、微变形、高负荷条件下工作的冷加工用模具。但是由于高碳高铬莱氏体钢中有大量共晶碳化物不均匀分布,因此该类钢韧性较差,易出现崩刃、脆裂现象。新研制的耐磨钢LD、ER5、GM,因含多种碳化物形成元素,碳化物弥散均匀分布,其耐磨性、强韧性、加工性能均优于传统的莱氏体钢,属于高强韧性、高耐磨性冷作模具钢。应用这类钢提高了模具的使用寿命。

1. Cr4W2MoV 钢

(1) 化学成分

Cr4W2MoV 钢的化学成分 (GB/T 1299—2000) 见表 4-245。

表 4-245 Cr4W2MoV 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	S	P
1.12 ~ 1.25	0.40 ~ 0.70	≤0.40	3.50 ~ 4.00	1.90 ~ 2.60	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.10	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-246。

表 4-246 Cr4W2MoV 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	Ar_1	M_s
温度 (近似值) /℃	795	900	760	142

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-247。

表 4-247 Cr4W2MoV 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1150 ~ 1180	1060 ~ 1100	≥900	坑冷、热砂缓冷或炉冷
钢坯	1130 ~ 1150	1040 ~ 1060	≥850	坑冷或热砂缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-248)。

表 4-248 Cr4W2MoV 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后等温退火	加热温度为 850 ~ 870℃, 保温 3 ~ 6h, 炉冷至 750 ~ 770℃, 保温 6 ~ 8 h, 炉冷至 600℃ 以下出炉空冷, 退火后硬度 ≤269HBW
锻后一般退火	加热温度为 850 ~ 870℃, 保温 3 ~ 6h, 炉冷至 600℃ 以下出炉空冷, 退火后硬度 ≤269HBW

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 4-249）。

表 4-249 Cr4W2MoV 钢推荐的淬火工艺规范

方案	加热温度/℃	淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	硬度 HRC
I	960 ~ 980	油或空气	油温 20 ~ 40	≥62
II	1020 ~ 1040	油或空气	油温 20 ~ 40	≥62

② 淬火温度对硬度、残留奥氏体量、晶粒度的影响（表 4-250）。

表 4-250 Cr4W2MoV 钢淬火温度对硬度、残留奥氏体量、晶粒度的影响

淬火温度/℃	900	940	980	1000	1020	1060	1100	1140	1200	1240
硬度 HRC	61	64	66	65	63	59	57	52	51	51
残留奥氏体量 (体积分数, %)	8	12	20	28	31	48	53	62	—	—
晶粒度/级	12	12	12	12	12	12	11 ~ 10	10 ~ 9	8 ~ 7	7 ~ 6

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 4-251）。

表 4-251 Cr4W2MoV 钢推荐的回火工艺规范

淬火方案	用途	回火温度/℃	加热介质	回火次数 × 保温时间	硬度 HRC
I	消除应力、	280 ~ 300	油或熔融硝酸盐	3 次 × 1h	60 ~ 62
II	稳定组织	500 ~ 540	熔融硝酸盐、空气炉	3 次 × 1h	60 ~ 62

② 回火温度与硬度的关系（表 4-252）。

表 4-252 Cr4W2MoV 钢回火温度与硬度的关系

硬度 HRC 淬火条件	回火温度/℃								
	200	250	300	350	400	450	500	550	
960℃ 油淬	60.3	60.1	59	59.5	59.1	—	—	—	
1020℃ 油淬	58.5	58.1	57.8	58	56.5	59	60.2	58	

(5) 力学性能

Cr4W2MoV 钢具有较高的淬透性、淬硬性，较好的耐磨性和尺寸稳定性，淬火时体积变化量小，可实现微变形淬火，是性能良好的冷作模具用钢。该钢采用淬火、回火工艺不同，钢的性能有很大的不同。采用高温淬火、回火，模具具有高耐磨性和热硬性；采用较低温度淬火、回火，模具具有良好的韧性，但钢的热加工温度范围较窄，变形抗力较大。

(6) 材料应用

Cr4W2MoV 钢具有良好的综合力学性能，可以制作形状复杂、经受较大冲击的各种冲模、冷镦模、落料模、滚边模、拉丝模、冷挤凹模和搓丝板等工、模具。

2. Cr5Mo1V 钢

(1) 化学成分

Cr5Mo1V 钢的化学成分见表 4-253。

表 4-253 Cr5Mo1V 钢的化学成分 (质量分数) (%)

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
中国 (GB ^①)	Cr5Mo1V	0.95 ~ 1.05	≤0.50	≤1.00	4.75 ~ 5.50	0.90 ~ 1.40	0.15 ~ 0.50	≤0.030	≤0.030
美国 (AISI)	A2	0.95 ~ 1.05	0.20 ~ 0.40	0.45 ~ 0.75	4.75 ~ 5.50	0.90 ~ 1.40	(0.40)	≤0.025	≤0.025
英国 (BS)	BA2	0.95 ~ 1.05	≤0.40	0.30 ~ 0.70	4.75 ~ 5.50	0.90 ~ 1.10	0.15 ~ 0.45	—	—

① GB/T 1299—2000。

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 4-254)。

表 4-254 Cr5Mo1V 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	$A_{c_{cm}}$	M_s
温度 (近似值) /℃	795	—	168

2) 线膨胀系数 (表 4-255)。

表 4-255 Cr5Mo1V 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 300	20 ~ 500	20 ~ 700
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	8.2	11.3	12.4	12.9

3) 其他物理性能 (表 4-256)。

表 4-256 Cr5Mo1V 钢其他物理性能

密度 / (g/cm^3)	弹性模量 E (室温) /MPa	比热容 c_p / [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
7.84	203000	460.55

(3) 热加工

锻压工艺规范见表 4-257。

表 4-257 Cr5Mo1V 钢锻压工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	850 ~ 900	高温退火、坑冷或砂冷
钢坯	1050 ~ 1100	1000 ~ 1050	850 ~ 900	坑冷或砂冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-258)。

表 4-258 Cr5Mo1V 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后一般退火	加热温度为 840 ~ 870℃，保温 2 ~ 3h；炉冷到 550℃ 以下出炉空冷，硬度 ≤248HBW
锻后等温退火	加热温度为 830 ~ 850℃，保温 2h；等温温度为 710 ~ 730℃，保温 2 ~ 4h，炉冷至 500℃ 出炉空冷或炉冷至室温，退火后硬度 ≤248HBW

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 4-259）。

表 4-259 Cr5Mo1V 钢推荐的淬火工艺规范

方案	一次预热温度/℃	二次预热温度/℃	淬火温度/℃	冷却	硬度 HRC
I	300 ~ 400	800 ~ 850	940 ~ 960	空冷或油冷	62 ~ 63
II	300 ~ 400	800 ~ 850	980 ~ 1010	空冷或油冷	62 ~ 65

② 淬火温度对硬度的影响（表 4-260）。

表 4-260 Cr5Mo1V 钢淬火温度对硬度的影响

淬火温度/℃	875	900	960	980	1020	1050
硬度 HRC	46. 5	54	64. 5	64. 5	63	58

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 4-261）。

表 4-261 Cr5Mo1V 钢推荐的回火工艺规范

淬火方案	回火温度/℃	回火次数/次	硬度 HRC
I	180 ~ 220	1	60 ~ 64
II	510 ~ 520	2	57 ~ 60

② 回火温度对硬度的影响（表 4-262）。

表 4-262 Cr5Mo1V 钢回火温度对硬度的影响

硬度 HRC 淬 火 条 件	回火温度/℃	100	200	300	400	450	500	520	580
954℃ 淬火		64. 5	62	58	57	56	59	56	51
982℃ 淬火		65	62	58	58	56	58	57	51. 5

(5) 力学性能

Cr5Mo1V 钢属于空淬硬化钢，具有高的空淬硬化性能，淬火变形相对较小，硬度较高，耐磨性好，且有一定的韧性，具有优良的综合力学性能，见表 4-263。

表 4-263 Cr5Mo1V 钢回火后的力学性能

回火温度/℃	硬度 HRC	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率 (%)	断面收缩率 (%)
530	54.1	1849	—	—	—
593	46.7	1596	576	5.0	13.9

注：980℃空冷。

(6) 材料应用

Cr5Mo1V 钢综合力学性能好，特别适于制造既要求具备好的耐磨性，同时又要求具有好的韧性和尺寸稳定性的工、模具，如轧辊、冲头、下料模、成形模、压延模、拉丝模、滚丝模等，也用于某些类型的剪刀片。

3. Cr6WV 钢

(1) 化学成分

Cr6WV 钢的化学成分见表 4-264。

表 4-264 Cr6WV 钢的化学成分（质量分数） (%)

C	Si	Mn	Cr	W	V	S	P
1.00 ~ 1.15	≤0.40	≤0.40	5.50 ~ 7.00	1.10 ~ 1.50	0.50 ~ 0.70	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度（表 4-265）。

表 4-265 Cr6WV 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	$A_{c_{cm}}$	A_{r1}	$A_{r_{cm}}$	M_s	M_f
温度（近似值）/℃	815	845	625	775	150	-100

2) 线膨胀系数（表 4-266）。

表 4-266 Cr6WV 钢线膨胀系数

温度/℃	100 ~ 250	250 ~ 350	350 ~ 600
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	10.3	11.0	12.8

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-267。

表 4-267 Cr6WV 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1100 ~ 1160	1050 ~ 1120	850 ~ 900	缓冷
钢坯	1060 ~ 1120	1000 ~ 1080	850 ~ 900	缓冷

注：加热温度不宜过高。因钢的导热性差，故必须进行缓慢加热以保证烧透时间。锻后必须缓冷，以免产生裂纹。

(4) 热处理

1) 预备热处理。

① 预备热处理工艺规范（表 4-268）。

表 4-268 Cr6WV 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后一般退火	加热温度为 830 ~ 850℃，保温 3 ~ 5h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，退火后硬度 ≤229HBW，组织为细粒状珠光体 + 碳化物
锻后等温退火	加热温度为 830 ~ 850℃，保温 2 ~ 4h；等温温度为 700 ~ 720℃，保温 2 ~ 4h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷。退火后硬度 ≤229HBW，组织为细粒状珠光体 + 碳化物

② 退火前后的硬度和组织（表 4-269）。

表 4-269 Cr6WV 钢退火前后的硬度和组织

硬度				相成分（质量分数，%）			合金元素含量（质量分数，%）						显微组织	
未退火		退火后		铁素体	碳化物	碳化物形式	碳化物中				铁素体中		未退火	退火后
压痕直径/mm	HBW	压痕直径/mm	HBW				C	Cr	W	V	Cr	W		
2.55 ~ 2.65	578 ~ 555	3.8 ~ 4.0	≤229	86 ~ 88	12 ~ 14	Cr ₇ C ₃	8	46	8	1.5	0.2	0.02	马氏体 + 碳化物	球化体 + 碳化物

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 4-270）。

表 4-270 Cr6WV 钢推荐的淬火工艺规范

方案	加热温度/℃			冷 却				硬度 HRC
	一次预热	二次预热	淬火加热	淬火冷却介质	温度/℃	延续	冷却至 20℃	
I	300 ~ 400	800 ~ 850	950 ~ 970	油	20 ~ 60	到 20 ~ 60℃	空冷	62 ~ 64
II	300 ~ 400	800 ~ 850	990 ~ 1010	硝酸盐、碱	400 ~ 450	3 ~ 10min	空冷	62 ~ 64

② 淬火状态组织比例（表 4-271）。

表 4-271 Cr6WV 钢淬火状态组织比例

淬火方案	淬火温度/℃	碳化物体积分数（%）	马氏体体积分数（%）	奥氏体体积分数（%）
I	950 ~ 970	6	85 ~ 83	9 ~ 11
II	990 ~ 1010	4	78 ~ 76	18 ~ 20

③ 淬火温度与硬度、残留奥氏体量的关系（表 4-272）。

表 4-272 Cr6WV 钢淬火温度与硬度、残留奥氏体量的关系

淬火温度/℃	850	900	950	1000	1050	1100
硬度 HRC	52.5	58	62	63.5	62	54
残留奥氏体量 (体积分数,%)	35.5	36	39	43	49	60.5

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范 (表 4-273)。

表 4-273 Cr6WV 钢推荐的回火工艺规范

方案	加热介质	加热温度/℃	一次回火加热保温时间/h	回火次数/次	硬度 HRC
I II	油、硝酸盐或碱	150 ~ 170 190 ~ 210	2 ~ 3	1	62 ~ 63 58 ~ 60
III	硝酸盐、碱或空气炉	第一次回火 500℃	2	1	57 ~ 58
		第二次回火 190 ~ 210℃	2		57 ~ 58

② 回火温度与硬度的关系 (表 4-274)。

表 4-274 Cr6WV 钢回火温度与硬度的关系

硬度 回火温度/℃ HRC 淬火条件	100	200	300	400	500	550	600	650
	950℃ 淬火	62	57.5	55	53.5	51	49	48
1010℃ 淬火	63.5	60	57	56	56	56	55.5	53

注: 回火 2h。

(5) 力学性能

Cr6WV 钢为高碳中铬冷作模具钢。钢中的碳化物分布均匀, 淬火变形小, 淬透性良好, 具有较好的耐磨性和一定的冲击韧度。在 960℃ 油淬, 由于碳含量和合金元素含量低, 抗弯强度和冲击韧度较 Cr12、Cr12MoV 钢高, 具有较好的综合力学性能。

(6) 材料应用

Cr6WV 钢具有高的强度和较好的综合力学性能, 用途广泛, 可以制造具有高强度, 要求一定的耐磨性, 且能经受一定冲击载荷的工具、模具, 如量块、量规、钻套、冲模及冲头、冷镦模、圆滚模、切边模、压印模、滚丝模、搓丝板等。

4. 9Cr6W3Mo2V2 (GM) 钢

(1) 化学成分

9Cr6W3Mo2V2 钢的化学成分见表 4-275。

表 4-275 9Cr6W3Mo2V2 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	P	S
0.86 ~ 0.96	≤0.40	≤0.40	5.60 ~ 6.40	2.80 ~ 3.20	2.00 ~ 2.50	1.79 ~ 2.20	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-276。

表 4-276 9Cr6W3Mo2V2 钢临界点

临界点	A_{c1}	$A_{c_{cm}}$	M_s
温度（近似值）/℃	795	820	220

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-277。

表 4-277 9Cr6W3Mo2V2 钢锻造工艺规范

项 目	预热温度/℃	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢 锭	600 ~ 800	1100 ~ 1150	1060 ~ 1100	850 ~ 900	缓冷
钢 坯	600 ~ 800	1060 ~ 1100	1040 ~ 1080	850 ~ 900	缓冷

注：锻造加热一定要缓慢进行以充分热透，锻造时严格按照“轻—重—轻”法操作，严格控制变形，不允许冷锤锻造，否则易出现角裂或劈头等缺陷。锻后需缓冷并及时回火。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 4-278）。

表 4-278 9Cr6W3Mo2V2 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后一般退火	加热温度为 820 ~ 840℃，保温 2h，炉冷至 550℃ 以下空冷，退火后硬度 ≤241HBW
锻后等温球化退火	加热温度为 850 ~ 870℃，保温 3h；炉冷至 730 ~ 750℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火硬度为 205 ~ 228HBW

2) 淬火与回火。

① 淬火与回火工艺规范（表 4-279）。

表 4-279 9Cr6W3Mo2V2 钢淬火与回火工艺规范

预热温度/℃	淬火温度/℃	冷 却	淬火硬度 HRC	回火温度/℃	回火次数/次	回火后硬度 HRC
800 ~ 820	1080 ~ 1120	油冷	64 ~ 66	540 ~ 560	2	≥64

② 淬火温度对硬度、残留奥氏体量、奥氏体晶粒尺寸的影响（表 4-280）。

表 4-280 9Cr6W3Mo2V2 钢淬火温度对硬度、残留奥氏体量和奥氏体晶粒尺寸的影响

淬火温度/℃	1000	1040	1080	1100	1120	1160	1220	1260
硬度 HRC	60.5	62	66	64.5	64	62	56	60
残留奥氏体量 (体积分数, %)	—	20	20.5	21	28	43	57	—
晶粒尺寸 $D/\mu\text{m}$	—	—	—	—	—	1.0	3.0	3.8

③ 回火温度对硬度的影响 (表 4-281)。

表 4-281 9Cr6W3Mo2V2 钢回火温度对硬度的影响

回火温度/℃	未回火	300	400	450	500	550	600
硬度 HRC	64	58	59.5	61	65	63.5	61

注: 1100℃ 淬火。

(5) 力学性能

9Cr6W3Mo2V2 (GM) 钢是一种高硬度冷作模具钢, 属于莱氏体钢。具有高的淬透性、耐回火性和二次硬化效果, 韧性、强度、硬度和耐磨性好, 抗粘着磨损、抗弯强度和压缩屈服强度值高。钢的力学性能见表 4-282。

表 4-282 9Cr6W3Mo2V2 钢的力学性能

热处理工艺	$\sigma_{\text{th}}/\text{MPa}$	α_{K} (J/cm^2)	断裂韧度 $K_{\text{IC}}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	R_{mc}/MPa	硬度 HRC
1080℃ 油淬, 540℃ 回火 2 次, 每次 1h	4308	28.0	20.5	3300	65.5
1120℃ 油淬, 540℃ 回火 2 次, 每次 1h	3396	22.1	15.5	3260	66.0

(6) 材料应用

9Cr6W3Mo2V2 (GM) 钢是一种高硬度冷作模具钢。强度高, 加工工艺性能好, 各项性能指标优良, 是制作精密、耐磨、高寿命冷作模具的主要材料。常用于高速压力机多工位级进模、滚丝模、切边模、拉深模等。

5. 7Cr7Mo2V2Si (LD) 钢

(1) 化学成分

7Cr7Mo2V2Si (LD) 钢的化学成分见表 4-283。

表 4-283 7Cr7Mo2V2Si 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Cr	Mo	V	Si	Mn	P	S
0.70 ~ 0.80	6.70 ~ 7.50	2.00 ~ 2.50	1.70 ~ 2.20	0.70 ~ 1.20	≤0.50	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 4-284)。

表 4-284 7Cr7Mo2V2Si 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}	M_{s}
温度 (近似值) /℃	856	915	720	806	105

2) 线膨胀系数 (表 4-285)。

表 4-285 7Cr7Mo2V2Si 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 500	20 ~ 600	20 ~ 700
线膨胀系数 $\alpha/\times 10^{-6}\text{℃}^{-1}$	8.2	10.2	11.3	11.8	12.4	12.7	12.9

3) 其他物理性能 (表 4-286)。

表 4-286 7Cr7Mo2V2Si 钢其他物理性能

密度/ (g/cm ³)	弹性模量 E (室温) /MPa
7.80	225 400

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-287。

表 4-287 7Cr7Mo2V2Si 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1120 ~ 1130	1080 ~ 1120	≥ 850	缓冷 (坑冷或砂冷)

注: 1. 7Cr7Mo2V2Si (LD) 钢可锻性好, 宜缓慢加热保证热透, 加热温度不宜过高, 应严格控制在 1150℃ 以下, 否则容易锻裂, 锻后宜缓冷。

2. 锻造时应反复锻拔 3 次, 以保证碳化物完全破碎, 并获得均匀分布的碳化物, 为以后的热处理创造条件, 并有利于模具使用寿命的提高。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-288)。

表 4-288 7Cr7Mo2V2Si 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
一般退火	加热温度为 840 ~ 860℃, 保温 2 ~ 3h, 炉冷至 550℃ 以下出炉空冷, 硬度 $\leq 220\text{HBW}$
等温球化退火	加热温度为 840 ~ 860℃, 保温 2 ~ 3h; 炉冷至 700 ~ 720℃, 保温 4 ~ 6h, 炉冷至 550℃ 以下出炉空冷。退火后硬度 $\leq 220\text{HBW}$, 组织为铁素体基体 + 球状碳化物

2) 淬火。

① 淬火工艺规范 (表 4-289)。

表 4-289 7Cr7Mo2V2Si 钢淬火工艺规范

淬火温度/℃	冷却方式	淬火组织状态
1100 ~ 1150	油冷或空冷	淬火后约有体积分数为 34% 的残留奥氏体, 淬火后变形小

② 淬火温度与硬度、晶粒度、残留奥氏体量的关系 (表 4-290)。

表 4-290 7Cr7Mo2V2Si 钢的淬火温度与硬度、晶粒度、残留奥氏体量的关系

淬火温度/℃	1050	1100	1150	1210
硬度 HRC	57	60	61	60
晶粒度/级	11 ~ 12	10 ~ 11	9 ~ 10	7 ~ 8
残留奥氏体量 (体积分数, %)	14	33	35	34

3) 回火。推荐的回火工艺规范见表 4-291。

表 4-291 7Cr7Mo2V2Si 钢推荐的回火工艺规范

回火温度/℃	回火次数/次	每次回火时间/h	回火硬度 HRC
530 ~ 540	2 ~ 3	1 ~ 2	59 ~ 62

4) 推荐的热处理工艺规范 (表 4-292)。

表 4-292 7Cr7Mo2V2Si 钢推荐的热处理工艺

热处理工艺	工 艺 参 数
高淬高回	淬火温度为 1150℃, 550℃ 回火 3 次, 强韧性综合指标最佳
低淬低回	淬火温度为 1050 ~ 1080℃, 回火温度为 180 ~ 220℃, 回火 2 次, 硬度为 58 ~ 60HRC

(5) 力学性能

7Cr7Mo2V2Si (LD) 钢是一种高强韧性、高耐磨性冷作模具钢。其抗压强度、抗弯强度及耐磨性高, 由于多种合金元素的加入, 提高了淬透性, 淬火后获得高硬度马氏体组织和少量的残留奥氏体, 耐回火性好, 并可产生二次硬化效果, 可获得高的硬度和耐磨性。

1) 不同温度淬火、回火后的力学性能 (表 4-293)。

表 4-293 7Cr7Mo2V2Si 钢不同温度淬火、回火后的力学性能

淬火温度/℃	回火温度/℃	抗拉强度 R_m /MPa	压缩屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗弯强度 σ_{bb} /MPa	挠度 f /mm	冲击韧度 a_K /(J/cm ²)
1100	510	2400	2710	4690	6.7	33
	530	2480	2820	5520	8.9	75
	550	2580	2550	5430	16.5	116
	570	2500	2340	4990	16.5	104
	590	—	2080	4380	16.5	48
1150	510	1460	2720	3570	3.7	—
	530	2360	2920	4670	4.7	44
	550	2680	2865	5590	12.7	98
	570	2680	2660	5190	8.3	104
	590	2340	2230	4790	9.8	82

(续)

淬火温度/℃	回火温度/℃	抗拉强度 R_m /MPa	压缩屈服强度 $R_{pe0.2}$ /MPa	抗弯强度 σ_{bb} /MPa	挠度 f /mm	冲击韧度 a_K / (J/cm ²)
1180	510	1260	2600	2880	4.6	—
	530	1520	3230	2910	3.6	29
	550	2770	2810	5080	5.7	73
	570	2610	2700	4730	6.5	48
	590	2470	2490	4880	7.1	47

2) 与其他莱氏体钢的性能对比 (表 4-294)。

表 4-294 几种莱氏体钢的性能对比

钢种	抗弯强度 σ_{bb} /MPa	抗压强度 R_{mc} /MPa	冲击韧度 a_K / (J/cm ²)	挠度 f /mm	硬度 HRC
7Cr7Mo2V2Si (LD)	2550 ~ 3020	5080 ~ 5590	94 ~ 123	12 ~ 16	61
W18Cr4V	3156 ~ 3254	2166 ~ 2969	24	—	> 63
W6Mo5Cr4V2	2740	4500	21	—	61
Cr12	2260	2950	19	3 ~ 4	61

(6) 材料应用

7Cr7Mo2V2Si (LD) 钢具有高强韧性、高耐磨性, 且热处理性能好, 常用于制造既能在较大压力下工作, 又能承受一定冲击载荷的冷镦冲头和形状复杂的冷挤压模、冷镦模、冲模等模具。如螺栓冷镦切边模、冷镦光冲模、汽车弹簧冲孔模、自行车中轴碗冷挤压模、硅钢片冲模等。

7Cr7Mo2V2Si 钢与 Cr12MoV 钢模具使用寿命对比见表 4-295。

表 4-295 7Cr7Mo2V2Si 钢与 Cr12MoV 钢模具使用寿命对比

钢种	热处理工艺	硬度 HRC	金相组织	平均寿命	失效形式
7Cr7Mo2V2Si (LD)	1100℃ 加热油淬, 600℃ 回火 1h + 550℃ 回火 1h	58 ~ 59	回火马氏体 + 体积分数为 3% 未溶碳化物 + 残留奥氏体	30000 件	磨损、疲劳裂纹
Cr12MoV	1040℃ 回热油淬 240℃ 回火 2 次, 每次 4h	57 ~ 60	回火马氏体 + 体积分数为 10% 未溶碳化物 + 残留奥氏体	2000 ~ 2500 件	崩刃、开裂

6. 7Cr7Mo3V2Si (LD2) 钢

(1) 化学成分

7Cr7Mo3V2Si 钢的化学成分见表 4-296。

表 4-296 7Cr7Mo3V2Si 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Cr	Mo	V	Si	Mn	P	S
0.70 ~ 0.80	6.50 ~ 7.50	2.00 ~ 3.00	1.70 ~ 2.20	0.70 ~ 1.20	≤0.50	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 4-297)。

表 4-297 7Cr7Mo3V2Si 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	Ar_1	Ar_3	M_s
温度 (近似值) /℃	856	915	720	806	105

2) 线膨胀系数 (表 4-298)。

表 4-298 7Cr7Mo3V2Si 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 500	20 ~ 600	20 ~ 700
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	8.2	10.2	11.3	11.8	12.4	12.7	12.9

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-299。

表 4-299 7Cr7Mo3V2Si 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1120 ~ 1130	1100	≥ 850	缓冷 (坑冷或砂冷)

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-300)。

表 4-300 7Cr7Mo3V2Si 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
一般退火	加热温度为 840 ~ 860℃, 保温 2 ~ 3h, 炉冷至 550℃ 以下出炉空冷, 硬度 $\leq 220\text{HBW}$
等温球化退火	加热温度为 840 ~ 860℃, 保温 2 ~ 3h; 炉冷至 700 ~ 720℃, 保温 4 ~ 6h, 炉冷至 550℃ 以下出炉空冷。退火后硬度 $\leq 220\text{HBW}$, 组织为铁素体基体 + 球状碳化物

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 4-301。

表 4-301 7Cr7Mo3V2Si 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	冷却方式	淬火组织状态
1100 ~ 1150	油冷或空冷	淬火后约有体积分数为 34% 的残留奥氏体, 淬火变形小

3) 回火。推荐的回火工艺规范见表 4-302。

表 4-302 7Cr7Mo3V2Si 钢推荐的回火工艺规范

回火温度/℃	回火次数/次	每次回火时间/h	回火硬度 HRC
530 ~ 540	2 ~ 3	1 ~ 2	59 ~ 62

4) 推荐的热处理工艺 (表 4-303)。

表 4-303 7Cr7Mo3V2Si 钢推荐的热处理工艺

工艺	淬火温度/℃	回火	回火后组织性能
高淬高回	1150	550℃回火 3 次	强韧性综合指标最佳
低淬低回	1050 ~ 1080	回火温度为 180 ~ 220℃，回火 2 次	硬度为 58 ~ 60HRC

(5) 力学性能

7Cr7Mo3V2Si (LD2) 钢是一种高强韧性、高耐磨冷作模具钢。其抗压强度、抗弯强度及耐磨性高。淬透性高，淬火后获得高硬度马氏体组织和少量的残留奥氏体，耐回火性好，并可产生二次硬化效果，可获得高的硬度和耐磨性。

(6) 材料应用

7Cr7Mo3V2Si (LD2) 钢具有高强韧性、高耐磨性，且热处理性能好，常用于制造既能在较大压力下工作，又能承受一定冲击载荷的冷镦冲头和形状复杂的冷挤压、冷镦、冲压等模具。如螺栓冷镦切边模、冷镦光冲模、汽车弹簧冲孔模、自行车中轴碗挤压模、硅钢片冲模等。

7. Cr8MoWV3Si (ER5) 钢

(1) 化学成分

Cr8MoWV3Si 钢的化学成分见表 4-304。

表 4-304 Cr8MoWV3Si 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	P	S
0.95 ~ 1.10	0.90 ~ 1.20	0.30 ~ 0.60	7.0 ~ 8.0	0.80 ~ 1.20	1.40 ~ 1.80	2.20 ~ 2.70	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-305。

表 4-305 Cr8MoWV3Si 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	M_s
温度 (近似值) /℃	858	907	215

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-306。

表 4-306 Cr8MoWV3Si 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1150 ~ 1200	1100 ~ 1150	≥900	缓冷
钢坯	1100 ~ 1150	1080 ~ 1120	≥900	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-307)。

表 4-307 Cr8MoWV3Si 钢预备热处理工艺规范

预备热处理工艺	工 艺 参 数
等温退火	加热温度为 850 ~ 870℃，保温 2h；炉冷至 750 ~ 770℃，保温 4h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 200 ~ 240HBW

2) 淬火及回火

① 推荐的热处理工艺规范（表 4-308）。

表 4-308 Cr8MoWV3Si 钢推荐的热处理工艺规范

热处理工艺	工 艺 参 数
推荐的热处理工艺	淬火温度为 1150℃，油冷，520 ~ 530℃ 回火 3 次，硬度为 62 ~ 64HRC
重载工作条件下的模具	淬火温度为 1120 ~ 1130℃，油冷，550℃ 回火 3 次，硬度为 62 ~ 64HRC。 热处理后的模具耐磨性高、具有高强韧性

② 不同淬火温度及 3 次回火（每次 1h）后的硬度（表 4-309）。

表 4-309 Cr8MoWV3Si 钢不同淬火温度及 3 次回火（每次 1h）后的硬度

硬度 HRC 淬火温度/℃	回火温度/℃					
	500	530	550	570	600	630
1000	56.5	54.7	53.2	51.2	45.1	37.2
1050	61	60.0	53.0	56.2	51.2	40.2
1100	63.2	62.7	60.8	57.8	51.0	44.7
1120	64.0	65.0	64.0	62.2	57.0	47.7
1150	63.5	64.0	64.0	62.2	57.4	47.3
1180	63.3	65.1	64.7	63.8	59.1	49.3

③ 淬火温度对钢硬度和晶粒度的影响（表 4-310）。

表 4-310 Cr8MoWV3Si 钢不同淬火温度下的硬度、晶粒度

淬火温度/℃	1000	1050	1100	1120	1150	1180
硬度 HRC	56.5	63.0	64.7	63.7	63.6	63.2
晶粒度/级	12	11 ~ 12	11	9 ~ 10	8 ~ 9	8 ~ 9

(5) 力学性能

Cr8MoWV3Si（ER5）钢为高耐磨性、高韧性冷作模具钢。其含碳量、含钒量高，具有高耐磨性和高强韧性。最高抗拉强度可达 2480MPa。其他性能见表 4-311。

表 4-311 ER5 钢压缩屈服强度、抗弯强度和冲击韧度值

性能 \ 回火温度/℃	510	530	550
弯曲屈服强度 R_{eLc}/MPa	3255.6	3296.7	3020.4
抗弯强度 σ_{bb}/MPa	3555.4	3898.4	4503.1
冲击韧度 $a_K/(J/\text{cm}^2)$	45.37	38.42	39.20

注：1120℃油淬。

(6) 材料应用

Cr8MoWV3Si (ER5) 钢为高耐磨性、高韧性冷作模具钢，为模具制造的一种新型重要材料。主要应用于有高耐磨、高韧性要求的模具，如冷锻模、冲模、冷锻模、冷挤压模等。

8. Cr12 钢

(1) 化学成分

Cr12 钢的化学成分见表 4-312。

表 4-312 Cr12 钢及相似国外钢的化学成分 (质量分数) (%)

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	P	S
中国 (GB ^①)	Cr12	2.00 ~ 2.30	≤0.40	≤0.40	11.50 ~ 13.00	—	—	—	≤0.030	≤0.030
美国 (AISI)	D3	2.00 ~ 2.35	0.25 ~ 0.45	0.24 ~ 0.45	11.0 ~ 13.0	(0.80)	(0.80)	(0.75)	—	—
美国 (AISI)	D6	2.00 ~ 2.20	≤0.70	0.20 ~ 0.40	11.50 ~ 12.50	—	—	0.60 ~ 0.90	—	—
日本 (JIS)	SKD1	1.80 ~ 2.40	≤0.40	≤0.60	12.00 ~ 15.00	—	(≤0.30)	—	≤0.030	≤0.030
德国	W – Nr. 1.2080	1.90 ~ 2.20	0.10 ~ 0.40	0.15 ~ 0.45	11.0 ~ 12.0	—	—	—	—	—
法国 (NF)	X200Cr12	1.90 ~ 2.20	0.10 ~ 0.40	0.40 ~ 0.70	11.0 ~ 13.0	0.50 ~ 0.80	—	—	—	—
英国 (BS)	BD3 ^②	1.90 ~ 2.30	≤0.60	≤0.60	12.0 ~ 13.0	—	≤0.50	—	—	—
韩国 (KS)	STD1	1.80 ~ 2.40	≤0.40	≤0.60	12.0 ~ 15.0	—	(≤0.30)	—	≤0.030	≤0.030

① GB/T 1299—2000。

② BD3 钢中 Ni 的质量分数 ≤0.40%。

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-313。

表 4-313 Cr12 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	$A_{c_{em}}$	Ar_1	Ar_3	M_s
温度（近似值）/℃	810	835	755	770	180

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-314。

表 4-314 Cr12 钢锻造工艺规范

项 目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢 锭	1140 ~ 1160	1100 ~ 1120	900 ~ 920	缓冷
钢 坯	1120 ~ 1140	1080 ~ 1100	880 ~ 920	缓冷

注：1. Cr12 钢锻造及改锻目的。锻造成形是模具锻造的目的，但更重要的是打碎钢中的碳化物，使其分布均匀，提高强韧性，而且在模具中形成合理的锻造流线排列，促使各方向淬火变形趋向一致。因此，模具钢钢材，特别是精密模具和重载模具的毛坯，必须进行合理的改锻，从而提高加工效率和保证热处理的质量，显著提高模具使用寿命。

2. Cr12 钢锻造工艺要求。锻造加热时要先预热，再逐渐升温，注意工件放置的位置要适当，且应注意翻料，以使加热均匀。操作时，一定要严格按照锻造工艺规范，其关键在于毛坯加热温度及保温时间。加热时间短，温度低，工件未烧透，变形抗力太大，使锻件产生裂纹；而加热温度过高，会使毛坯过热或过烧，导致锻打碎裂而报废；保温时间长，会造成晶粒长大及表面严重脱碳。锻打时多向锻拔，反复锻粗、拔长，将网状碳化物和共晶碳化物打碎，消除碳化物的不均匀性。锻后应注意缓冷并及时退火，防止变形和开裂。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 4-315）。

表 4-315 Cr12 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后一般退火	加热温度为 850 ~ 870℃，均热后，保温 4 ~ 5h，以冷速 < 30℃/h 炉冷至 500℃ 以下，出炉空冷，退火后硬度 ≤ 229HBW，退火后的显微组织为粒状珠光体 + 碳化物
锻后等温退火	加热温度为 830 ~ 850℃，保温 2 ~ 3h，炉冷至 720 ~ 740℃，保温 3 ~ 4h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，退火后硬度 ≤ 269HBW，组织为粒状珠光体 + 碳化物

2) 淬火。

① 推荐的淬火规范（表 4-316）。

表 4-316 Cr12 钢推荐的淬火规范

工 艺	淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
推荐淬火规范	950 ~ 980	油冷	≥ 60
等温淬火工艺	加热温度为 980℃，保温一定时间后，在 250 ~ 280℃ 温度下的硝盐中等温一段时间，空冷，可以获得下贝氏体 + 马氏体 + 残留奥氏体 + 碳化物的混合组织，然后再经过适当温度回火，即可获得强韧性的组织		

② Cr12 钢采用不同的淬火工艺后的效果（表 4-317）。

表 4-317 Cr12 钢不同热处理工艺的性能对比

热处理工艺	硬度 HRC	冲击韧度 $a_K / (J/cm^2)$	残留奥氏体 (体积分数, %)	搓丝板 寿命/ $\times 10^5$ 件	磨损量 ^① /mg
980℃ 加热, 油淬	66.5	14.1	13.2	4	—
980℃ 加热, 180℃ 分级 50min	65.8	15.8	—	5	—
980℃ 加热, 270℃ 等温 3h	62.5	15.9	—	6	11.9
980℃ 加热, 270℃ 等温 4h	60	17.7	15.02	—	—
980℃ 加热, 270℃ 等温 5h	59	16.8	—	—	—
980℃ 加热, 180℃ 预淬火 35min, 270℃ 等温 1h	64.6	14.6	—	12 ~ 15	8.2
980℃ 加热, 180℃ 预淬火 35min, 270℃ 等温 2h	46.2	14.9	18.31	12 ~ 28	—
980℃ 加热, 180℃ 预淬火 35min, 270℃ 等温 3h	63.8	15.2	—	—	—

注：所有试样均在 180℃ 回火 2 次，每次 1.5h。

① 磨损试验在 P-2 球盘磨损试验机上进行，对磨材料为 YT30 硬质合金，荷重 600g，转速为 400r/min，干磨损，用万分之一感量的天平称量。

③ 淬火温度与硬度的关系（表 4-318）

表 4-318 Cr12 钢淬火温度与硬度的关系

淬火温度/℃	875	900	925	950	975	1000	1050	1100
硬度 HRC	54.5	57	60	62.5	65	66	64	59.5

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 4-319）。

表 4-319 Cr12 钢推荐的回火工艺规范

回火目的	加热温度/℃	回火时间	回火次数	硬度 HRC
消除应力，稳定组织	180 ~ 200	2	1	60 ~ 62
消除应力，降低硬度	320 ~ 350	2	1	57 ~ 58

注：回火温度一般为 180 ~ 200℃，硬度 $\geq 60HRC$ 。为了避免产生电火花线切割裂纹和磨削裂纹，提高模具的韧性，常采取 400℃ 回火。回火后硬度为 54 ~ 58HRC。回火脆性区为 275 ~ 375℃，在回火时应尽量避开回火脆性区。

② 回火温度与硬度的关系（表 4-320）。

表 4-320 Cr12 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	未回火	200	300	400	450	500	550	600	650
硬度 HRC	65	63	62	60	60	60	59.5	57.1	44

注：955℃ 油淬。

4) 固溶双细化工艺。

固溶双细化工艺完全利用热处理方法,使碳化物细化、棱角圆整化,同时使奥氏体晶粒超细化,其主要的工艺措施是高温固溶和循环细化。高温固溶可以改善碳化物的形态和粒度。循环细化的目的在于使奥氏体晶粒超细化。Cr12 钢的固溶双细化工艺见表4-321。

表 4-321 Cr12 钢的固溶双细化工艺

工 艺	工 艺 参 数
固溶处理	将模坯或工、模具粗加工后高温加热固溶,加热温度为 1100 ~ 1150℃ (加热过程中应预热 2 次),并保温一段时间。固溶后可以直接淬入热油。等温处理后转变为下贝氏体 + 马氏体的复合组织。回火温度为 750℃,保温 1h。组织为以细珠光体为基体的复合组织
双细化工艺	在最终热处理前再增加一次低温淬火。加热温度为 960℃,油冷淬火,300℃左右出油空冷。

注:钢经固溶双细化工艺处理后,其冲击韧度可以提高,模具使用寿命可以提高几倍,工序虽然增加,单位成本有所上升,但总的经济效益仍然很高。

(5) 力学性能

Cr12 钢属于高碳高铬类型的莱氏体钢,碳的质量分数高,冲击韧度较低、易脆裂,而且容易形成不均匀的共晶碳化物。钢中存在大量 Cr 元素形成 $(\text{CrFe})_7\text{C}_3$ 化合物,使渗碳体碳化物减少。淬火加热时碳化物大量溶入奥氏体中,淬火后得到高硬度马氏体,回火时马氏体析出大量弥散分布的碳化物,形成良好的耐磨性。该钢经过适当的热处理工艺,可获得强韧性组织。

(6) 材料应用

Cr12 钢具有高硬度和良好的耐磨性,所以在冷作模具中得到广泛应用,多用于制作承受冲击负荷较小的要求高耐磨性的冷剪切刀、钻套、量规、冲头、搓丝板、冲模、拉丝模、冷挤压模、压印模、拉深模和滚丝模等。

9. Cr12MoV 钢

(1) 化学成分

Cr12MoV 钢的化学成分 (GB/T 1299—2000) 见表 4-322。

表 4-322 Cr12MoV 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	V	Mo	S	P
1.45 ~ 1.70	≤0.40	≤0.40	11.00 ~ 12.50	0.15 ~ 0.30	0.40 ~ 0.60	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 4-323)。

表 4-323 Cr12MoV 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	M_s
温度（近似值）/℃	810	1200	760	185

2) 线膨胀系数（表 4-324）。

表 4-324 Cr12MoV 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 400	20 ~ 600
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	10.9	11.4	12.2

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-325。

表 4-325 Cr12MoV 钢锻造工艺规范

项 目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢 锭	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	850 ~ 900	缓冷（坑冷或砂冷）
钢 坯	1050 ~ 1100	1000 ~ 1050	850 ~ 900	缓冷（坑冷或砂冷）

注：Cr12MoV 钢的熔点较低，故加热温度不得太高；导热性差，应注意缓慢加热。锻后必须缓冷，以免产生裂纹。可置于预热过的坑中，冷至 400 ~ 500℃。冷却后可进行退火。

(4) 热处理

1) 预备热处理。

① 预备热处理工艺规范（表 4-326）。

表 4-326 Cr12MoV 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 850 ~ 870℃，保温 1 ~ 2h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 207 ~ 255HBW，组织为细珠光体 + 碳化物
锻后等温退火工艺	加热温度为 850 ~ 870℃，保温 1 ~ 2h，炉冷至 720 ~ 750℃，保温 3 ~ 4h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷。退火后硬度为 207 ~ 255HBW，组织为细珠光体 + 碳化物
高温回火工艺	加热温度为 760 ~ 790℃，保温 2 ~ 3h，炉冷或空冷，硬度为 207 ~ 255HBW

② 退火前后的硬度和组织（表 4-327）。

表 4-327 Cr12MoV 钢退火前后的硬度和组织

硬 度				相成分（质量分数，%）			合金元素含量（质量分数，%）					显微组织	
未退火		退火后		铁素体	碳化物	碳化物类型	碳化物中			铁素体中		未退火	退火后
压痕直径/mm	HBW	压痕直径/mm	HBW				C	Cr	V	Cr	V		
2.4 ~ 3.8	653 ~ 477	3.8 ~ 4.2	255 ~ 207	83.0 ~ 85.0	15 ~ 17	Cr_7C_3	9.2	48	2.5	33	0.1	马氏体 + 碳化物	球化体 + 碳化物

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 4-328）。

表 4-328 Cr12MoV 钢推荐的淬火工艺规范

方案	第 1 次预热温度/℃	第 2 次预热温度/℃	淬火温度/℃	冷 却				硬度 HRC
				淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	在介质中冷却	随后	
I	550 ~ 600	840 ~ 860	950 ~ 1000	油	20 ~ 60	至油温	空冷	58 ~ 62
II			1020 ~ 1040	油	20 ~ 60	至油温	空冷	62 ~ 63
III			1020 ~ 1040	熔融硝酸盐	400 ~ 550	5 ~ 10min	空冷	62 ~ 63
IV			1115 ~ 1130	油	20 ~ 60	至油温	空冷	42 ~ 50
V			1115 ~ 1130	熔融硝酸盐	400 ~ 450	5 ~ 10min	空冷	42 ~ 50

注：方案Ⅳ和Ⅴ用于要求获得热硬性及高耐磨性的模具，例如 450℃ 以下工作的热冲模等，但其力学性能较差，尺寸变形较大；方案Ⅰ、Ⅱ淬火后组织体积分数为碳化物 12%，马氏体 68% ~ 73%，奥氏体 25% ~ 20%。

② 不同加热和冷却条件下硬度与淬火温度的关系（表 4-329）。

表 4-329 Cr12MoV 钢不同加热和冷却条件下硬度与淬火温度的关系

加热条件	冷却方式	淬火温度/℃	硬度 HRC
在增碳剂中加热	油冷	930	64
		980	65
		1010	65
		1030	63.5
在空气炉中加热	油冷	930	60.2
		980	63
		1010	63.9
		1030	63.5
在空气炉中加热	空冷	930	59
		980	62.5
		1010	63.2
		1030	62

3) 回火

① 推荐的回火工艺规范（表 4-330）。

表 4-330 Cr12MoV 钢推荐的回火工艺规范

方案	淬火温度/℃	回火用途	回火温度/℃	介质	硬度 HRC
I	1020 ~ 1040	消除应力	150 ~ 170	油或硝酸盐	61 ~ 63
II		消除应力，降低硬度	200 ~ 275	—	57 ~ 59
III			400 ~ 425		55 ~ 57

(续)

方案	淬火温度/℃	回火用途	回火温度/℃	介质	硬度 HRC
IV	1115 ~ 1130	消除应力及形成二次硬化	510 ~ 520℃ 多次回火	—	60 ~ 61
V			- 78℃ 冷处理 + 510 ~ 520℃ 一次回火		60 ~ 61
VI			- 78℃ 冷处理加一次 510 ~ 520℃ 回火, 再一次 - 78℃ 冷处理		61 ~ 62

注: 1. 用方案 I 回火的工件, 需要保持高硬度及高耐磨性, 而其尺寸变化与淬火状态几乎无关。

2. 方案 II 用于获得具有良好韧性的工件。

② 回火温度与硬度的关系 (表 4-331)。

表 4-331 Cr12MoV 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	未回火	100	200	300	400	500	550	600	650
硬度 HRC	63	62	61	59	57	59	53	47	40

注: 1030℃ 油淬, 回火 2h。

(5) 力学性能

Cr12MoV 钢为高碳高铬高淬透性类型的莱氏体钢。具有高硬度和冲击韧度, 淬透性高, 淬火变形小, 截面尺寸在 400mm 以下时, 可以完全淬透, 在 300 ~ 400℃ 仍可保持良好的硬度和耐磨性。淬火时体积变化量小, 综合力学性能优良, 为高档冷作模具材料的代表性钢号之一。

(6) 材料应用

Cr12MoV 钢可以制造截面大、形状复杂、经受较大冲击的各种工具、模具, 如形状复杂的冲孔凹模、冲模、硅钢片落料模、切边模、滚边模、拉丝模、冷挤压模、钢板拉深模、搓丝板、冷切剪刀、圆锯、标准工具、量具等。

10. Cr12V 钢

(1) 化学成分

Cr12V 钢的化学成分见表 4-332。

表 4-332 Cr12V 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	V	P	S
1.20 ~ 1.40	≤0.40	≤0.35	11.00 ~ 12.50	0.70 ~ 0.90	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-333。

表 4-333 Cr12V 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{r1}	M_s
温度 (近似值) /℃	810	760	180

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-334。

表 4-334 Cr12V 钢锻造工艺规范

项 目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢 锭	≤1150	1100 ~ 1150	850 ~ 900	缓冷（坑冷或砂冷）
钢 坯	≤1100	1050 ~ 1100	800 ~ 850	缓冷（坑冷或砂冷）

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 4-335）。

表 4-335 Cr12V 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后等温退火	加热温度为 850 ~ 870℃，保温 1 ~ 2h；等温温度为 720 ~ 750℃，保温 3 ~ 4h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，硬度为 207 ~ 255HBW
高温回火	加热温度为 760 ~ 790℃，保温 2 ~ 3h；炉冷或空冷。目的为降低硬度，便于机械加工

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 4-336。

表 4-336 Cr12V 钢推荐的淬火工艺规范

方案	加热温度/℃			冷 却				硬度 HRC
	第 1 次预热	第 2 次预热	淬火加热	淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	延续	冷到 20℃	
I	300 ~ 400	800 ~ 850	1060 ~ 1080	油	20 ~ 60	到油温	空冷	62 ~ 64
II				硝盐	400 ~ 550	5 ~ 10min	空冷	62 ~ 64

3) 回火。

推荐的回火工艺规范见表 4-337。

表 4-337 Cr12V 钢推荐的回火工艺规范

方案	回火用途	加热温度/℃	加热介质	硬度 HRC
I	消除应力	150 ~ 170	油	62 ~ 64
II	消除应力，降低硬度	190 ~ 210	硝盐、碱	58 ~ 60
III	消除应力，降低硬度	200 ~ 275	硝盐、碱	57 ~ 59
IV	消除应力，降低硬度	400 ~ 425	硝盐、碱	55 ~ 57
V	模具尺寸较小，减少变形	450 ~ 470	硝盐、碱	53 ~ 55

注：回火时应进行 2 次，并应注意避开 275 ~ 375℃ 回火脆性区。

(5) 力学性能

Cr12V 钢属于高碳高铬类型莱氏体钢，V 元素能进一步提高钢的淬透性，细化晶粒和形成共晶碳化物，改善了韧性。铸态下共晶碳化物呈网状，需经反复锻造加以改善，从而提高了钢的强度和耐磨性。通过淬火温度的调节，控制合金元素的溶解，影响淬火后钢中残留奥氏体量，使模具达到微变形或不变形。随着淬火温度提高，粒状碳化物逐渐溶解，因此淬火后残留奥氏体量也随之增加，同时马氏体也开始粗化。极不均匀分布

的碳化物（网状、堆集状和带状）将增大钢的脆性，使模具在淬火时和使用中开裂。

（6）材料应用

Cr12V 钢主要用于制造必须具有高耐磨、微变形和承受高负荷要求的冲模、切边模、压印模、滚丝模、搓丝板。

11. Cr12Mo 钢

（1）化学成分

Cr12Mo 钢的化学成分见表 4-338。

表 4-338 Cr12Mo 钢的化学成分（质量分数）（%）

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
中国	Cr12Mo	2.05 ~ 2.40	0.10 ~ 0.60	0.10 ~ 0.60	11.00 ~ 13.00	0.70 ~ 1.20	≤0.030	≤0.030
美国（AISI）	D4	2.25	0.20 ~ 0.40	0.20 ~ 0.40	12.00	1.00	≤0.025	≤0.030

（2）物理性能

临界点温度见表 4-339。

表 4-339 Cr12Mo 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{cm}	A_{r1}	M_s
温度（近似值）/℃	810	875	695	230

（3）热加工

锻造工艺规范见表 4-340。

表 4-340 Cr12Mo 钢锻造工艺规范

项 目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢 锭	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	850 ~ 925	缓冷（坑冷或砂冷）
钢 坯	1050 ~ 1100	1010 ~ 1050	850 ~ 900	缓冷（坑冷或砂冷）

注：锻造工艺应按照“轻—重—轻”锻造法，经六面锻造，使钢中碳化物呈无规则均匀分布。

（4）热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 4-341）。

表 4-341 Cr12Mo 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后一般退火	加热温度为 870 ~ 890℃，保温 2 ~ 4h；炉冷到 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 217 ~ 255HBW
锻后等温退火	加热温度为 870 ~ 890℃，保温 2 ~ 4h；炉冷至 720 ~ 740℃，保温 3 ~ 4h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，硬度为 217 ~ 255HBW
高温回火	加热温度为 760 ~ 790℃，保温 2 ~ 3h；炉冷或空冷。目的为降低硬度，便于机械加工

2) 淬火与回火。淬火及回火工艺规范（表 4-342）。

表 4-342 Cr12Mo 钢淬火与回火工艺规范

热处理工艺	工 艺 参 数
常规淬火与回火	加热温度为 980 ~ 1050℃，油冷，硬度为 62 ~ 64HRC。回火温度为 160 ~ 180℃，硬度为 60 ~ 62HRC；400 ~ 450℃，硬度为 50 ~ 60HRC。回火最好进行 2 次，应注意避开 275 ~ 375℃ 回火脆性区
高温淬火与回火	加热温度为 1100 ~ 1120℃，硬度为 40 ~ 50HRC。回火温度为 500 ~ 520℃，回火 3 次，硬度为 60HRC

(5) 力学性能

Cr12Mo 钢为高铬微变形模具钢，属于莱氏体钢，为 Cr12 钢系列之一。钢中 Mo 元素能进一步提高钢的淬透性，细化晶粒和共晶碳化物，改善韧性，提高耐回火性。通过淬火加热温度的调节，可以控制合金元素的溶解，从而影响淬火后钢中残留奥氏体量，使模具达到微变形甚至不变形。钢中含有大量共晶碳化物，碳化物的不均匀性易造成模具淬火后开裂。

(6) 材料应用

Cr12Mo 钢主要用于制造具有高耐磨、微变形和承受高负荷工作要求的冷作模具，如冲孔凹模、冲模、切边模、滚边模、拉丝模、冷挤压模、钢板拉深模、搓丝板、标准工具、量具等。

12. Cr12Mo1V1 (D2) 钢

(1) 化学成分

Cr12Mo1V1 钢的化学成分见表 4-343。

表 4-343 Cr12Mo1V1 钢的化学成分 (质量分数) (%)

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S	其他
中国 (GB ^①)	Cr12Mo1V1	1.40 ~ 1.60	≤0.60	≤0.60	11.0 ~ 13.0	0.70 ~ 1.20	0.50 ~ 1.10	≤0.030	≤0.030	Co ≤ 1.00
美国 (AISI)	D2	1.40 ~ 1.60	0.30 ~ 0.50	0.30 ~ 0.50	11.0 ~ 13.0	0.70 ~ 1.20	(0.80)	≤0.025	≤0.025	(Co: 0.60)
日本 (JIS)	SKD11	1.40 ~ 1.60	≤0.40	≤0.60	11.0 ~ 13.0	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50	—	—	Ni ≤ 0.50
日本 (大同)	DC11	1.40 ~ 1.60	≤0.40	≤0.60	11.0 ~ 13.0	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50	—	—	—
日本 (日立)	SLD	1.50	0.25	0.45	12.0	1.0	0.35	≤0.025	≤0.010	—
韩国 (重工)	STD11	1.40 ~ 1.60	≤0.40	≤0.60	11.0 ~ 13.0	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50	—	—	—

(续)

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S	其他
德国 (DIN)	W - Nr. 1. 2379	1. 50 ~ 1. 60	0. 10 ~ 0. 40	0. 15 ~ 0. 45	11. 50 ~ 12. 50	0. 60 ~ 0. 80	0. 90 ~ 1. 10	≤0. 030	≤0. 030	—
德国 (德威)	GSW - 2379	1. 50 ~ 1. 60	0. 10 ~ 0. 40	0. 15 ~ 0. 45	11. 0 ~ 12. 0	0. 60 ~ 0. 80	0. 90 ~ 1. 10	—	—	
法国 (NF)	X160CrMo V12	1. 45 ~ 1. 70	0. 10 ~ 0. 40	0. 15 ~ 0. 45	11. 0 ~ 1. 30	0. 70 ~ 1. 10	1. 00	—	—	
瑞典 (ASSAB)	XW -42	1. 5	≤0. 60	≤0. 60	12. 0	1. 0	1. 0	—	—	
奥地利 (百禄)	K110	1. 50 ~ 1. 60	0. 10 ~ 0. 40	0. 15 ~ 0. 45	11. 0 ~ 12. 0	0. 60 ~ 0. 80	0. 90 ~ 1. 10	—	—	

① GB/T 1299—2000。

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 4-344)。

表 4-344 Cr12Mo1V1 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_{cm}	Ar_1	Ar_{cm}	M_s
温度 (近似值) /℃	810	875	695	750	190

2) 线膨胀系数 (表 4-345)。

表 4-345 Cr12Mo1V1 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	10. 5	11. 5	11. 9	12. 2

3) 其他物理性能 (表 4-346)。

表 4-346 Cr12Mo1V1 钢其他物理性能

弹性模量 E/MPa	比热容 $c_p / [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
207000	461

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-347。

表 4-347 Cr12Mo1V1 钢锻造工艺规范

项 目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢 锭	1120 ~ 1160	1050 ~ 1090	≥850	高温退火
钢 坯	1120 ~ 1140	1050 ~ 1070	≥850	高温退火, 坑冷或砂冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-348)。

表 4-348 Cr12Mo1V1 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
钢锭、钢坯退火工艺	以 $<100^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 速度加热至 $870 \sim 890^{\circ}\text{C}$, 保温 $2 \sim 4\text{h}$, 以冷速 $<30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 炉冷至 550°C 以下出炉空冷
钢材等温退火工艺	加热温度为 $840 \sim 860^{\circ}\text{C}$, 保温 2h ; 炉冷至 $720 \sim 740^{\circ}\text{C}$, 保温 4h , 炉冷至 550°C 以下出炉空冷, 退火硬度为 $205 \sim 255\text{HBW}$

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范 (表 4-349)。

表 4-349 Cr12Mo1V1 钢推荐的淬火工艺规范

方案	加热温度/ $^{\circ}\text{C}$			冷 却	硬度 HRC
	第 1 次预热	第 2 次预热	淬火加热		
I	$500 \sim 600$	$820 \sim 860$	$980 \sim 1040$	油冷或空冷	$60 \sim 65$
II	$500 \sim 600$	$820 \sim 860$	$1060 \sim 1100$	油冷或空冷	$60 \sim 65$

② 淬火温度与硬度及残留奥氏体量的关系 (表 4-350)。

表 4-350 Cr12Mo1V1 钢淬火温度与硬度及残留奥氏体量的关系

淬火温度/ $^{\circ}\text{C}$	900	950	980	1000	1030	1050	1080	1100	1130
硬度 HRC	52.5	57.5	60	63.5	64	63	62.5	62	60
残留奥氏体量 (体积分数, %)	—	4	4	4.5	6	10	13	24	—

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范 (表 4-351)。

表 4-351 Cr12Mo1V1 钢推荐的回火工艺规范

淬火方案	回火温度/ $^{\circ}\text{C}$	回火次数/次	硬度 HRC
I	$180 \sim 230$	1	$60 \sim 64$
II	$510 \sim 540$	2	$60 \sim 64$

② 回火温度对硬度的影响 (表 4-352)。

表 4-352 Cr12Mo1V1 钢回火温度对硬度的影响

硬度 HRC 回火温度/ $^{\circ}\text{C}$		未回火	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
淬火条件													
1010 $^{\circ}\text{C}$	空冷	62	60.5	59.5	58.5	58	58	58	58	56	48	42	36.5
	油淬	62.5	61.5	60	58.5	58.5	58.5	58.5	59.5	56	48	42	36.5

(续)

硬度 HRC 淬火条件		回火温度/℃	未回火	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
1066℃	空冷		63	61.5	60.5	60	59.5	59.5	59.5	60.5	61.5	51	43	40.5
	油淬		63	61.5	60	59.5	59.5	59.5	60.0	61	62.5	51	44	38
1121℃	空冷		60.5	59.5	58	57.5	57	57	57.0	59.5	62	51.5	44	40.5
	油淬		60.0	58.0	58.5	56	54	54.5	56.5	58	61	57	44	38

(5) 力学性能

Cr12Mo1V1 (D2) 钢属于高碳高铬钢, 具有高淬透性、淬硬性、耐磨性。由于钢中的 Mo、V 元素比 Cr12MoV 钢多, 改善了钢中的铸造组织, 细化了晶粒, 改善了碳化物形貌, 所以钢的抗弯强度、挠度、冲击韧度等强韧性指标高, 耐磨性好, 而且具有更高的耐回火性。Cr12Mo1V1 钢与 Cr12MoV 钢力学性能对比见表 4-353。

表 4-353 Cr12Mo1V1 钢与 Cr12MoV 钢力学性能对比

淬火温度/℃	钢号	σ_b /MPa	a_k (J/cm ²)	硬度 HRC
1020	Cr12Mo1V1 (D2)	3262	40	59.3
	Cr12MoV	2888	40	61.0
1060	Cr12Mo1V1 (D2)	1550	35.5	61.0
	Cr12MoV	796	10	61.5

(6) 材料应用

Cr12Mo1V1 (D2) 钢属于高碳高铬型冷作模具钢。制造截面大、形状复杂、经受较大冲击的要求高精度、长寿命的冷作模具、刀具和量具, 如形状复杂的冲孔凹模、冲模、硅钢片落料模、切边模、滚边模、拉丝模、冷挤压模、钢板拉深模、搓丝板和冷切剪刀、圆锯、标准工具及精密量具等。

4.2.4 冷作模具用高速工具钢

高速工具钢属于莱氏体钢, 通过正常的热处理方法不能消除鱼骨状莱氏体共晶碳化物, 因而出现各向异性, 强度、韧性降低, 需要通过改锻、反复墩粗和拔长, 来改善碳化物分布。锻后需要进行退火, 以利于切削并消除应力, 获得索氏体和粒状碳化物组织, 为淬火做好组织准备。淬火温度很高, 以保证碳化物溶解, 使碳和合金元素充分地溶于奥氏体, 在淬火后形成合金程度较高的马氏体。由于钢淬火后残留奥氏体过多, 需经 500~600℃ 的 3 次回火后才能使残留奥氏体转变消除, 产生最佳的二次硬化效应, 其硬度、抗压强度和耐磨性高, 获得较好的综合力学性能。采用低温淬火、快速加热淬火等工艺措施可以有效地改善其韧性, 因此越来越多地用于制造要求承受重载荷、高寿命的冷作模具。常用的钢号有 W18Cr4V (W18)、W6Mo5Cr4V2 (M2)、W12Mo3Cr4V3N

(V3N)、W9Mo3Cr4V (W9), 以及为提高韧性而研制的降碳降钒 6W6Mo5Cr4V (6W6) 高速工具钢等。这些钢在制造重载荷冷作模具方面获得了良好的使用效果。

1. W18Cr4V (W18) 钢

(1) 化学成分

W18Cr4V 钢的化学成分 (GB/T 9943—2008) 见表 4-354。

表 4-354 W18Cr4V 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	P	S
0.73 ~ 0.83	0.20 ~ 0.40	0.10 ~ 0.40	3.80 ~ 4.50	17.20 ~ 18.70	≤0.30	1.00 ~ 1.20	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度见表 4-355。

表 4-355 W18Cr4V 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	$A_{c_{cm}}$	A_{r1}	M_s
温度 (近似值) /℃	820	1330	760	210

2) 线膨胀系数 (表 4-356)。

表 4-356 W18Cr4V 钢线膨胀系数

温度/℃	100	200	300	400	500	600	700	800
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	11.1	11.9	12.6	13.4	14.1	15.3	13.4	10.8

3) 热导率 (表 4-357)。

表 4-357 W18Cr4V 钢热导率

温度/℃	20	200	500	700	900
热导率 $\lambda / [\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})]$	27.2	25.9	25.9	25.1	25.1

4) 比热容 (表 4-358)。

表 4-358 W18Cr4V 钢比热容

温度/℃	50	200	600	800	900
比热容 $c_p / [\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})]$	472.3	493.2	756.5	923.7	785.8

5) 电阻率 (表 4-359)。

表 4-359 W18Cr4V 钢电阻率

温度/℃	20	200	500	700	900
电阻率 $\rho / \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$	0.42	0.53	0.77	1.02	1.17

6) 其他物理性能 (表 4-360)。

表 4-360 W18Cr4V 钢其他物理性能

密度/ (g/cm ³)	矫顽力/ (A/m)	饱和磁感/T
8.70	636 ~ 795	1.55 ~ 1.57

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-361。

表 4-361 W18Cr4V 钢锻造工艺规范

项 目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢 锭	1220 ~ 1240	1120 ~ 1140	≥950	砂冷或堆冷
钢 坯	1180 ~ 1220	1120 ~ 1140	≥950	砂冷或堆冷

注：1. 由于高速工具钢导热性差，因此钢锭或钢坯装炉温度不得高于 400℃，低温阶段需要缓慢加热（≤300℃/h），到 850℃保温 1h，然后升温至锻造加热温度。锻造钢锭时，必须轻锤开坯，随着铸态组织的改变，方可逐步加重锤力。

2. 降低停锻温度，会使碳化物粉碎程度增加，但过低的停锻温度，会使塑性降低，导致裂纹。

(4) 热处理

1) 预备热处理。

① 预备热处理工艺规范（表 4-362）。

表 4-362 W18Cr4V 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
常规球化退火	加热温度为 860 ~ 880℃，保温 2h，缓慢冷却到 500 ~ 550℃出炉，退火后硬度 ≤277HBW
等温球化退火	加热温度为 860 ~ 880℃，保温 2 ~ 4h；炉冷至 740 ~ 760℃，保温 4 ~ 6h，炉冷到 500 ~ 550℃出炉空冷，退火硬度 ≤255HBW

注：高速工具钢锻后要立即进行球化退火，以降低硬度，便于切削加工，同时使共晶物球状化，为下一步热处理打下组织基础。

② 退火前后的硬度和组织（表 4-363）。

表 4-363 W18Cr4V 钢退火前后的硬度和组织

硬度 HBW		相成分（质量分数，%）			合金元素含量（质量分数，%）							显微组织	
锻造用钢	切削用钢	铁素体	碳化物	碳化物形式	碳化物中				铁素体中			未退火	退火后
					C	Cr	W	V	Cr	W	V		
207 ~ 285	207 ~ 255	75 ~ 80	20 ~ 25	Fe ₃ W ₃ C	2.5	6	6.3	4.5	3	1	0.3	S + 碳化物	P + 碳化物

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 4-364）。

表 4-364 W18Cr4V 钢推荐的淬火工艺规范

类型	1 次预热温度/℃	2 次预热温度/℃	淬火温度/℃	冷却	硬度 HRC
工具	500 ~ 600	840 ~ 860	1260 ~ 1290	油冷或分级淬火	62 ~ 64
冷作模具	—	840 ~ 860	1200 ~ 1240	油冷或分级淬火	62 ~ 64

② 马氏体转变区（表 4-365）。

表 4-365 W18Cr4V 钢马氏体转变区

淬火温度/℃	1000	1100	1200	1250	1300
$M_s/^\circ\text{C}$	300	205	145	145	125
$M_f/^\circ\text{C}$	220	-10	-80	-95	-100

③ 淬火温度与硬度及残留奥氏体量的关系（表 4-366）。

表 4-366 W18Cr4V 钢淬火温度与硬度及残留奥氏体量的关系

淬火温度/℃	1050	1100	1150	1200	1250	1270	1290
硬度 HRC	58	62.5	65	65	65	64	63
残留奥氏体量（体积分数，%）	—	45.5	47	48	50	52	—

3) 冷处理

冷处理工艺规范见表 4-367。

表 4-367 W18Cr4V 钢冷处理工艺规范

项 目	冷却温度/℃	冷处理延续时间	硬度 HRC
工具及模具	-70 ~ -80	到整个零件截面冷却为止	63 ~ 65

注：淬火后 2h 内进行冷处理，复杂的薄刃成形工具不进行冷处理。

4) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 4-368）。

表 4-368 W18Cr4V 钢推荐的回火工艺规范

方案	加热介质	冷却温度/℃	回火 延续时间	回火次数	硬度 HRC	残留奥氏 体量（体积 分数，%）
I	空气炉或煤气炉：熔融硝酸钾、熔碱	560	1h	2 ~ 3	≥62	≤5
II	熔融硝酸钾、熔碱	580	30min	2	≥62	≤5
III	熔融硝酸钾、熔碱	600	15min	2	≥62	≤5

注：高速工具钢在 560 ~ 580℃ 回火，回火后硬度 ≥62HRC，硬度显著提高并达到最高值，即发生二次硬化现象。

② 回火温度与硬度的关系（表 4-369）。

表 4-369 W18Cr4V 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	100	200	300	400	500	550	580	600	650	690
硬度 HRC	65	63	60.5	61	64	65	65.5	65	59	49

注：1260℃油淬，回火 2.5h。

(5) 力学性能

W18Cr4V 钢为钨系高速工具钢，具有高硬度、高强度、高抗压性、高耐磨性和高热稳定性等特点。其热处理范围较宽，淬火不易过热，热处理过程中不易氧化脱碳，磨削加工性能好。该钢在 500℃ 及 600℃ 时，硬度分别保持在 57 ~ 58HRC 及 52 ~ 53HRC，对大多数被加工材料具有良好的切削性能。钢中有较多的共晶碳化物，虽经轧制，但仍呈不均匀分布，大截面钢材的碳化物偏析尤为严重，高温塑性较差。

(6) 材料应用

W18Cr4V 钢具有优良的综合力学性能，常用于制造有高硬度、高耐磨性、高抗压强度和高温强性要求的工具、刀具和模具，如制造高耐磨性、高温强性的车刀、铣刀、滚刀等切削工具和具有高硬度、高抗压强度、高耐磨性、能承受高负荷的重载冲头、冷挤压模、落料模、切边模等模具。

2. W12Mo3Cr4V3N (V3N) 钢

(1) 化学成分

W12Mo3Cr4V3N 钢的化学成分见表 4-370。

表 4-370 W12Mo3Cr4V3N 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	W	Mo	Cr	V	N	S	P
1.15 ~ 1.25	≤0.40	≤0.40	11.0 ~ 12.5	2.70 ~ 3.70	3.50 ~ 4.10	2.50 ~ 3.10	0.04 ~ 0.10	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点 $Ac_1 \approx 876 \sim 915^\circ\text{C}$ 。

(3) 热加工

W12Mo3Cr4V3N 钢锻造工艺规范见表 4-371。

表 4-371 W12Mo3Cr4V3N 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	停锻温度/℃	冷却
钢锭	1180 ~ 1200	≥950	缓冷 (坑冷或堆冷)
钢坯	1160 ~ 1180	≥950	缓冷 (坑冷或堆冷)

- 注：1. 由于钢的导热性差，因此钢锭或钢坯入炉温度不得高于 400℃，低温阶段需缓慢加热 (≤300℃/h)，到 850℃保温 1h，然后便可随炉升温至锻造加热温度。
2. 锻造钢锭时，必须轻锤开坯，随着铸态组织的逐渐破坏方可逐步加重锤力。增大锻造比是使碳化物呈现均匀化分布的重要措施。
3. 停锻温度对碳化物分布有很大影响，降低停锻温度，能使碳化物粉碎程度增加，但停锻温度过低，会使塑性明显变坏，导致产生裂纹。
4. 锻造时易产生角裂，应该及时用工具去掉已产生的角裂，避免角裂继续扩大。
5. 因该钢空冷时就可以淬火，因此锻造后应及时放入灰中或堆冷，进行缓慢冷却。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 4-372）。

表 4-372 W12Mo3Cr4V3N 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火	加热温度为 840 ~ 860℃，保温 3 ~ 4h，缓慢冷却到 550℃ 以下炉冷或空冷，退火后硬度 ≤ 295HBW
等温退火	加热温度为 840 ~ 860℃，保温 3 ~ 4h；等温温度为 740 ~ 750℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度 ≤ 285HBW

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 4-373）。

表 4-373 W12Mo3Cr4V3N 钢推荐的淬火工艺规范

预热温度/℃	淬火温度/℃	冷却	硬度 HRC
850	1220 ~ 1280	油冷	66 ~ 68

② 淬火温度对硬度、奥氏体晶粒度、抗弯强度、冲击韧度的影响（表 4-374）。

表 4-374 W12Mo3Cr4V3N 钢淬火温度对硬度、奥氏体晶粒度、抗弯强度、冲击韧度的影响

淬火温度/℃	1200	1230	1250	1270
硬度 HRC	67.2	68.5	69	68.7
奥氏体晶粒度/级	11	10.5	10	9
抗弯强度 σ_{bh} /MPa	2800	2700	2100	1500
冲击韧度 a_k / (J/cm ²)	43	32	20.1	10

3) 回火

① 推荐的回火工艺规范（表 4-375）。

表 4-375 W12Mo3Cr4V3N 钢推荐的回火工艺规范

回火温度/℃	回火次数	冷却方式	硬度 HRC
550 ~ 570	4 次，每次 1h	空冷至室温	≥ 65

② 硬度与回火温度的关系（表 4-376）。

表 4-376 W12Mo3Cr4V3N 钢硬度与回火温度的关系

回火温度/℃	淬火后	300	400	500	520	540	560	600
硬度 HRC	66.5	64.6	64	65	68.2	69	69.1	68.3

注：1240℃ 淬火，回火 4 次，每次 1h。

(5) 力学性能

W12Mo3Cr4V3N（V3N）钢是钨钼系含氮超硬型高速工具钢，具有硬度高、热硬性好、耐磨性好、热强性好等特点，但由于钢中钒含量较高，磨削加工性能较差。

(6) 材料应用

W12Mo3Cr4V3N (V3N) 钢可制造钻头、车刀、铣刀、滚刀、刨刀等切削工具和制造多种冷作模具, 如冷挤压模、拉深模等。该钢制成的切削工具在加工高强度材料时, 表现出了良好的切削性能, 制作的冷作模具在工作时有很好的耐磨性和热硬性。

3. W9Mo3Cr4V (W9) 钢

(1) 化学成分

W9Mo3Cr4V 钢的化学成分 (GB/T 9943 - 2008) 见表 4-377。

表 4-377 W9Mo3Cr4V 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	W	Mo	Cr	V	S	P
0.77 ~ 0.87	0.20 ~ 0.40	0.20 ~ 0.40	8.50 ~ 9.50	2.70 ~ 3.30	3.80 ~ 4.40	1.30 ~ 1.70	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 4-378)。

表 4-378 W9Mo3Cr4V 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}
温度 (近似值) /℃	835	875

2) 线膨胀系数 (表 4-379)。

表 4-379 W9Mo3Cr4V 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 300	20 ~ 500	20 ~ 700
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	12.0	12.6	13.2

3) 热导率 (表 4-380)。

表 4-380 W9Mo3Cr4V 钢热导率

温度/℃	600	750	1100
热导率 $\lambda / [\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})]$	30.9	32.6	31.4

4) 弹性模量 (表 4-381)。

表 4-381 W9Mo3Cr4V 钢弹性模量

温度/℃	室温	300	500	550	600
弹性模量 E / MPa	221 900	209 000	191 600	185 000	178 600

5) 密度为 8.25 g/cm^3 。

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-382。

表 4-382 W9Mo3Cr4V 钢锻造工艺规范

装炉温度/℃	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
≤700	1160 ~ 1190	1080 ~ 1120	≥950	及时退火或砂冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 4-383）。

表 4-383 W9Mo3Cr4V 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火	加热温度为 830 ~ 850℃，保温 3 ~ 4h，炉冷至 600℃ 以下出炉空冷，硬度 ≤285HBW
等温退火	加热温度为 830 ~ 850℃，保温 3 ~ 4h；等温温度为 740 ~ 760℃，保温 4 ~ 6h，炉至 600℃ 出炉空冷，硬度 ≤285HBW

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 4-384）。

表 4-384 W9Mo3Cr4V 钢推荐的淬火工艺规范

类型	预热温度/℃	淬火温度/℃	冷却	硬度 HRC
工具	850	1220 ~ 1250	油冷	64 ~ 66
冷作模具	850	1160 ~ 1200	油冷	58 ~ 64

② 淬火温度的影响（表 4-385）。

表 4-385 W9Mo3Cr4V 钢硬度、晶粒度、残留奥氏体量与淬火温度的关系

淬火温度/℃	1220	1230	1240	1250
硬度 HRC	66.1	66	65.6	65.3
ASTM 标准 晶粒度/级	10.3	10.1	9.85	9.2
残留奥氏体量 (体积分数, %)	19 (淬火温度 1180℃)	20 (淬火温度 1200℃)	24 (淬火温度 1230℃)	26 (淬火温度 1240℃)

3) 回火。

① 回火工艺规范（表 4-386）。

表 4-386 W9Mo3Cr4V 钢回火工艺规范

回火工艺	回火后硬度 HRC	
	工具	模具
回火温度为 560℃，回火 3 次，每次 1 ~ 1.5h	65 ~ 66.5	58 ~ 64

② 不同温度回火后的硬度（表 4-387）。

表 4-387 W9Mo3Cr4V 钢不同温度回火后的硬度

回火温度/℃	淬火后	200	300	450	540	560	600
硬度 HRC	66	64	62	62.5	66	66	64.2

注：1240℃淬火，回火 3 次，每次 1h。

(5) 力学性能

W9Mo3Cr4V (W9) 钢为通用型钨钼系高速工具钢，是具有良好综合性能的通用型高速工具钢新品种。该钢易冶炼，有良好的冷、热塑性，强度、韧性较好，中硬度，热硬性高。其硬度、热硬性略高于 W18 和 M2，强度、韧性较 W18 高，与 M2 相当。

(6) 材料应用

W9Mo3Cr4V (W9) 钢具有良好的综合性能，能满足机械制造中采用多次锻造改锻、高频加热塑性成形工艺和冲压变形工艺要求，切削性能好，磨削性能和焊接性较优，热处理过热敏感性低。常用于制造锯条、钻套、拉刀、滚刀、铣刀、丝锥和滚丝轮等刀具、工具。在适当改变淬火、回火工艺后，宜制造高载荷模具，如制造冷挤压模，其使用寿命比 W18、M2 高，在模具生产中得到广泛应用。

4. W6Mo5Cr4V2 (M2) 钢

(1) 化学成分

W6Mo5Cr4V2 钢的化学成分 (GB/T 9943 - 2008) 见表 4-388。

表 4-388 W6Mo5Cr4V2 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	W	Mo	Cr	V	P	S
0.80 ~ 0.90	0.20 ~ 0.45	0.15 ~ 0.40	5.50 ~ 6.75	4.50 ~ 5.50	3.80 ~ 4.40	1.75 ~ 2.20	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 4-389)。

表 4-389 W6Mo5Cr4V2 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	M_s
温度 (近似值) /℃	780 ~ 840	840 ~ 890	131

2) 线膨胀系数 (表 4-390)。

表 4-390 W6Mo5Cr4V2 钢线膨胀系数

温度/℃		20 ~ 200	20 ~ 400	20 ~ 500	20 ~ 600	20 ~ 700	20 ~ 750
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	退火状态	9.44	10.76	10.98	11.49	11.95	12.13
	1220℃油淬 560℃ × (1 + 1) 回火	9.52	10.50	10.83	11.26	—	—

3) 热导率 (表 4-391)。

表 4-391 W6Mo5Cr4V2 钢热导率

温度/℃	20	118	198	310	400	513
热导率 λ / [W/(m·K)]	19.3	22.1	23.6	26.7	26.2	27.6

注：钢中各元素的质量分数为 C0.85%、Cr4.05%、W6.34%、Mo5.01%、V1.91%，1200℃油淬，500℃回火 2 次，每次 1h。

4) 电阻率（表 4-392）。

表 4-392 W6Mo5Cr4V2 钢电阻率

温度/℃	20	118	198	310	400	513
电阻率 ρ / $\times 10^{-6} \Omega \cdot m$	0.46	0.52	0.58	0.66	0.73	0.81

5) 其他物理性能（表 4-393）。

表 4-393 W6Mo5Cr4V2 钢其他物理性能

密度/ (g/cm ³)	弹性模量 E /MPa
8.16	218000

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-394。

表 4-394 W6Mo5Cr4V2 钢锻造工艺规范

项 目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢 锭	1180 ~ 1190	1080 ~ 1100	≥950	砂冷或堆冷
钢 坯	1140 ~ 1150	1040 ~ 1080	≥900	砂冷或堆冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 4-395）。

表 4-395 W6Mo5Cr4V2 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火	加热温度为 840 ~ 860℃，保温 2 ~ 4h，缓慢冷却到 500℃出炉空冷或炉冷到室温，硬度 ≤285HBW
锻后等温退火	加热温度为 840 ~ 860℃，保温 2 ~ 4h；炉冷至 740 ~ 760℃，保温 4 ~ 6h，炉到 500℃以下出炉空冷，硬度 ≤255HBW

注：W6Mo5Cr4V2 钢易氧化、脱碳，必须装箱或在保护气氛下退火。

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 4-396。

表 4-396 W6Mo5Cr4V2 钢推荐的淬火工艺规范

类型	预热温度/℃	淬火温度/℃	冷却	硬度 HRC
简单工具	800 ~ 850	1200 ~ 1240	油冷	62 ~ 64
复杂刀具	800 ~ 850	1230	油冷	62 ~ 64

(续)

类型	预热温度/℃	淬火温度/℃	冷却	硬度 HRC
高强度薄刃刀具	800 ~ 850	1240	油冷	62 ~ 64
冷作模具 ^①	800 ~ 850	1150 ~ 1200	油冷	62 ~ 64

① 模具零件淬火温度不要高于 1200℃，否则冲击韧度下降。

3) 冷处理 冷处理工艺规范见表 4-397。

表 4-397 W6Mo5Cr4V2 钢冷处理工艺规范

淬火工艺	冷处理温度/℃	硬度增量 HRC
1250℃ 加热，预冷到 1100 ~ 1050℃（真空炉内加热）油冷	- 196	0 ~ 1

4) 回火。

① 推荐的回火工艺规范见表 4-398。

表 4-398 W6Mo5Cr4V2 钢推荐的回火工艺规范

回火温度/℃	回火次数/次	冷却方式	硬度 HRC
560	3	空冷至室温	62 ~ 66

注：回火时，会出现回火二次硬化现象，回火硬化峰值在 560℃ 左右。

② 回火温度与硬度的关系（表 4-399）。

表 4-399 W6Mo5Cr4V2 钢回火温度和硬度的关系

硬度 HRC 淬火条件	回火温度/℃	淬火后	200	300	400	500	525	550	575	600	700
1180℃ 油淬		66	63	62.7	63	63.5	64.5	64.5	64	62	52.5
1200℃ 油淬		64	61.5	61.5	62	64	65	65.5	63.5	62.5	53.5
1220℃ 油淬		65	62.5	62.5	62.5	64.5	65.5	66	64.5	62.5	53.5
1240℃ 油淬		64	61.5	61.5	62	64.5	66	66.5	66	63	53.5

(5) 力学性能

W6Mo5Cr4V2（M2）钢为钨钼系通用高速工具钢，该钢碳化物细小均匀，韧性、强度、热塑性高，硬度、耐磨性、热硬性好，具有优良的室温和高温力学性能。但钢易于氧化脱碳，在热加工及热处理时应加以注意。

1) W6Mo5Cr4V2 钢等温处理后的力学性能（表 4-400）。

表 4-400 高速工具钢等温处理后的力学性能

钢号	热处理工艺	硬度 HRC	σ_{bb} /MPa	a_K (J/cm ²)	下贝氏体量 (体积分数, %)
W6Mo5Cr4V2	1230℃ 加热，230℃ 等温 4h， 560℃ 回火 3 次，每次 1h	63 ~ 67	3500 ~ 4500	20 ~ 50	60
W18Cr4V	1280℃ 加热，260℃ 等温 4h， 560℃ 回火 3 次，每次 1h	63 ~ 67	2000 ~ 2500	20 ~ 35	60

2) 高速工具钢性能对比 (表 4-401)。

表 4-401 高速工具钢性能对比

钢号	热处理工艺	硬度 HRC	$a_K/$ (J/cm ²)	σ_{bb} /MPa	热硬性 HRC			高温硬度 HV		
					580℃	600℃	620℃	400℃	500℃	600℃
W6Mo5Cr4V2	1220℃ 加热, 油冷, 580℃ 回火 2 次, 每次 1h	66. 6	24. 5	4027	64. 8	61. 5	61. 5	766	691	574
W18Cr4V	1260℃ 加热, 油冷, 600℃ 回火 2 次, 每次 1h	66. 3	16. 7	2969	65. 2	62. 2	62. 2	730	680	560

(6) 材料应用

W6Mo5Cr4V2 (M2) 钢具有较好的综合力学性能和工艺性能, 主要用于制造各种类型的工具、成形刀具和制造大型、高负荷下耐磨损的冷挤压模等冷作模具及热塑性成形模具。如制造高耐磨性、高热强性的车刀、铣刀、滚刀等切削工具和具有高硬度、高抗压强度、高耐磨性、能承受高负荷的重载冲头, 精冲模的凸模、凹模, 下料冲孔模, 冷挤压模和温挤压模的凸模、凹模, 热压模 (Al、Mg、Cu 合金) 的芯棒头、镶块等。

5. 6W6Mo5Cr4V (6W6) 钢

(1) 化学成分

6W6Mo5Cr4V 钢的化学成分 (GB/T 1299—2000) 见表 4-402。

表 4-402 6W6Mo5Cr4V 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	P	S
0. 55 ~ 0. 65	≤0. 40	≤0. 60	3. 70 ~ 4. 30	6. 00 ~ 7. 00	4. 50 ~ 5. 50	0. 70 ~ 1. 10	≤0. 030	≤0. 030

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-403。

表 4-403 6W6Mo5Cr4V 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ar_1	M_s
温度 (近似值) /℃	820	730	240

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-404。

表 4-404 6W6Mo5Cr4V 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1180 ~ 1480	1100 ~ 1150	≥900	坑冷、热砂缓冷
钢坯	1100 ~ 1140	1050 ~ 1100	≥850	坑冷、热砂缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-405)。

表 4-405 6W6Mo5Cr4V 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
普通退火工艺	加热温度为 850 ~ 860℃，保温 2 ~ 4h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 197 ~ 229HBW
等温退火工艺	加热温度为 850 ~ 860℃，保温 2 ~ 4h；等温温度为 740 ~ 750℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，硬度为 197 ~ 229HBW

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 4-406）。

表 4-406 6W6Mo5Cr4V 钢推荐的淬火工艺规范

预热温度/℃	淬火温度/℃	加热介质	淬火冷却介质	硬度 HRC
830 ~ 850	1180 ~ 1200	熔融盐	油、空气或熔融盐	58 左右

② 淬火温度与硬度的关系（表 4-407）。

表 4-407 6W6Mo5Cr4V 钢淬火温度与硬度的关系

淬火温度/℃	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300
硬度 HRC	30	51	54	55	59.5	61	61.5	63.5	64	65

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 4-408）。

表 4-408 6W6Mo5Cr4V 钢推荐的回火工艺规范

回火温度/℃	回火次数	硬度 HRC
560 ~ 580	3 次，每次 1h	58 ~ 63

② 回火温度与硬度的关系（表 4-409）

表 4-409 6W6Mo5Cr4V 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	200	300	400	450	500	550	575	600	650	700
硬度 HRC	59	58	58	58	59.5	63	60.5	55	50	40

注：1200℃ 油淬，回火 3 次，每次 1h。

(5) 力学性能

6W6Mo5Cr4V（6W6）钢为高韧性高速工具钢。该钢淬透性好，具有高硬度、高耐磨性、高强度和良好的热硬性，韧性比高碳高速工具钢高，具有优良的综合力学性能。

(6) 材料应用

6W6Mo5Cr4V（6W6）钢具有优良的综合力学性能。通常用于制造剪刀片、拉深模、冷挤压模、冷镦模的凸模等，具有较高的使用寿命。

4.2.5 基体钢

基体钢是指成分与高速工具钢淬火后的基体组织成分大致相同，而性能有所改善的

一类钢。这类钢减少了共晶碳化物，并使其均匀分布，工艺性能好，强韧性明显提高。一般在高速工具钢的基体成分上添加少量其他元素，适当改变含碳量，以改善性能，适应某些不同需求的使用要求。钢中允许含有体积分数 5% 左右的剩余碳化物，这样一方面可以提高耐磨性，另一方面有助于防止高温加热时晶粒长大。为了提高基体钢的强度，在高速工具钢基体中适当增加了含碳量并增添了少量合金元素，调整了钢的性能。既具有高速工具钢的强度、热硬性、耐磨性，又具有低合金模具钢的韧性和塑性。可以广泛应用于制造要求高负荷、高速、耐冲击的冷、热变形模具。

1. 5Cr4Mo3SiMnVAI (012Al) 钢

(1) 化学成分

5Cr4Mo3SiMnVAI 钢的化学成分 (GB/T 1299 - 2000) 见表 4-410。

表 4-410 5Cr4Mo3SiMnVAI 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Al	P	S
0.47 ~ 0.57	0.80 ~ 1.10	0.80 ~ 1.10	3.80 ~ 4.30	2.80 ~ 3.40	0.80 ~ 1.20	0.30 ~ 0.70	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-411。

表 4-411 5Cr4Mo3SiMnVAI 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{r1}	M_s
温度 (近似值) /℃	837	902	277

(3) 热加工

锻压工艺规范见表 4-412。

表 4-412 5Cr4Mo3SiMnVAI 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1100 ~ 1140	1050 ~ 1080	≥850	缓冷 (砂冷或坑冷)

注：合金元素含量较高，导热性差，变形抗力大，热加工较困难，钢锭开坯应该实行小变形多次锻造。开始要轻锤快锻，待铸造组织改善后再重锤锻打，但不可连续重锤快打，以免钢锭心部温度上升过高出现内裂。钢在 900 ~ 1150℃ 范围内有较好的塑性。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-413)。

表 4-413 5Cr4Mo3SiMnVAI 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
等温退火工艺	加热温度为 850 ~ 870℃，保温 4h，炉冷至 710 ~ 720℃，保温 6h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度 ≤229HBW

2) 淬火及回火

① 推荐的淬火、回火工艺规范 (表 4-414)。

表 4-414 5Cr4Mo3SiMnVAI 钢推荐的淬火、回火工艺规范

模具种类	冷作模具	热作模具	压铸模具
淬火条件	1090 ~ 1120℃ 油冷	1090 ~ 1120℃ 油冷	1120 ~ 1140℃ 油冷
回火条件	510℃ ×1 次 ×2h	580 ~ 600℃ ×2 次 ×2h	620 ~ 630℃ ×2 次 ×2h
回火后硬度 HRC	60 ~ 62	52 ~ 54	42 ~ 44

② 淬火温度的影响（表 4-415）。

表 4-415 5Cr4Mo3SiMnVAI 钢淬火温度的影响

力学性能及组织 \ 淬火温度/℃	1060	1090	1120	1150	1290
硬度 HRC	60	61	62	62.5	62.5
晶粒度/级	11	10 ~ 11	9.5 ~ 10	8 ~ 8.5	7.5
碳化物量（体积分数,%）	5.6	5.3	2.3	1.8	0.8
残留奥氏体量（体积分数,%）	—	20.8	28	29	30

③ 回火后的硬度（表 4-416）。

表 4-416 5Cr4Mo3SiMnVAI 钢回火后的硬度

硬度 \ 回火温度/℃	20	200	350	450	510	540	580	620	650
1090	61	57.5	58	60	61	58.5	54	49.5	41
1120	62	58	58	60	61.5	61	57	53	44.5

注：1. 回火时有二次硬化现象。在 500 ~ 520℃ 回火时出现峰值，显微组织为回火马氏体 + 弥散分布的点状碳化物。

2. 在 580 ~ 620℃ 回火慢冷时，会出现第二类回火脆性，因此在该温度范围内回火时必须快速冷却。

(5) 力学性能

5Cr4Mo3SiMnVAI (012Al) 钢综合性能好，具有较高的韧性、较高的高温强度和较优良的热疲劳性能。钢的耐磨性不如莱氏体钢，经表面化学热处理，特别是渗氮或氮碳共渗处理后，可以有效地提高模具的耐磨性。

(6) 材料应用

5Cr4Mo3SiMnVAI (012Al) 钢为冷热兼用的基体钢，强韧性高，具有较高的疲劳强度和高温强度，综合性能好，通用性强，适用于制造受强烈冲击的冷作模具和有高温强度、热疲劳性能要求的热作模具，如轴承热挤压冲头、传动杆热墩模、冲模等。

2. 5Cr4W5Mo2V (RM2) 钢

(1) 化学成分

5Cr4W5Mo2V 钢的化学成分（GB/T 1299—2000）见表 4-417。

表 4-417 5Cr4W5Mo2V 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	P	S
0.40 ~ 0.50	≤0.40	≤0.40	3.40 ~ 4.40	4.50 ~ 5.30	1.50 ~ 2.10	0.70 ~ 1.10	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度 (表 4-418)。

表 4-418 5Cr4W5Mo2V 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}	M_s
温度 (近似值) /℃	836	893	744	816	250

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-419。

表 4-419 5Cr4W5Mo2V 钢锻造工艺规范

项 目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢 锭	1150 ~ 1200	1100 ~ 1150	≥850	缓冷 (坑冷或砂冷)
钢 坯	1120 ~ 1170	1080 ~ 1130	≥850	缓冷 (坑冷或砂冷)

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-420)。

表 4-420 5Cr4W5Mo2V 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后等温退火	加热温度为 850 ~ 870℃, 保温 2 ~ 3h, 炉冷至 720 ~ 740℃, 保温 3 ~ 4h, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷, 退火后硬度 ≤255HBW

2) 淬火及回火

① 淬火、回火工艺规范 (表 4-421)。

表 4-421 5Cr4W5Mo2V 钢推荐的淬火、回火工艺规范

淬火温度/℃	淬火冷却介质	淬火硬度 HRC	回火温度/℃	回火时间 × 回火次数	回火硬度 HRC
1130 ~ 1140	油	58 ~ 60	600 ~ 630	2h × 2 次	50 ~ 56

② 淬火温度与硬度、晶粒度的关系 (表 4-422)。

表 4-422 5Cr4W5Mo2V 钢淬火温度与硬度、晶粒度的关系

淬火温度/℃	1000	1050	1100	1120	1140	1160	1180
硬度 HRC	57.5	58.5	59.5	60	59	58	55.5
晶粒度/级	10	7	6	5 ~ 6	5	4 ~ 5	4

③ 回火温度与硬度的关系 (表 4-423)。

表 4-423 5Cr4W5Mo2V 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬火态	400	450	500	550	600	625	650
硬度 HRC	59	56.5	57.5	58	58.5	57	55	52

注：1130℃油淬。

(5) 力学性能

5Cr4W5Mo2V (RM2) 钢具有较高的热强性、耐磨性、热硬性及热稳定性，进行一般的热处理及化学热处理，可使工件进一步提高综合力学性能。

(6) 材料应用

5Cr4W5Mo2V (RM2) 钢是一种冷热兼用型模具钢。其综合性能好，适用于制造某些热挤压模，在 700℃工作时仍可保持 54HRC 的硬度；也可用于制造精锻模、辊锻模、冲头等。但不适于制造水冷及较大尺寸的模具。

3. 6Cr4W3Mo2VNb (65Nb) 钢

(1) 化学成分 6Cr4W3Mo2VNb 钢的化学成分 (GB/T 1299—2000) 见表 4-424。

表 4-424 6Cr4W3Mo2VNb 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Nb	P	S
0.60 ~ 0.70	≤0.40	≤0.40	3.80 ~ 4.40	1.80 ~ 2.50	2.50 ~ 3.50	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.35	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-425。

表 4-425 6Cr4W3Mo2VNb 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{r1}	M_s
温度 (近似值) /℃	810	740 ~ 760	220

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-426。

表 4-426 6Cr4W3Mo2VNb 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1140 ~ 1180	1100 ~ 1150	≥900	缓冷 (砂冷或坑冷)
钢坯	1120 ~ 1150	1080 ~ 1120	900 ~ 850	缓冷 (砂冷或坑冷)

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-427)。

表 4-427 6Cr4W3Mo2VNb 钢预备热处理工艺规范

预备热处理工艺	工 艺 参 数
等温退火	加热温度为 850 ~ 870℃，保温 3 ~ 4h，炉冷到 730 ~ 750℃，保温 5 ~ 6h，炉冷至 500℃以下出炉空冷，退火后硬度 ≤241HBW，组织为球状珠光体

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 4-428）。

表 4-428 6Cr4W3Mo2VNb 钢推荐的淬火工艺规范

方案	预热温度/℃	淬火温度/℃	冷却			硬度 HRC
			淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	冷却到	
I	840	1080 ~ 1120	油	20 ~ 60	油温或冷却到 150 ~ 200℃ 后空冷	≥61
II	840	1180 ~ 1190	油	20 ~ 60		≥61
III	840	1120 ~ 1160	油	20 ~ 60		≥61

注：要求耐磨性高的模具可采用方案Ⅱ，受挤压力大而要求韧性的模具选用方案Ⅰ，一般情况用方案Ⅲ。

② 淬火温度的影响（表 4-429）。

表 4-429 6Cr4W3Mo2VNb 钢不同温度淬火后的硬度、晶粒度和残留奥氏体量

淬火温度/℃	1060	1080	1100	1120	1140	1160	1180	1200
硬度 HRC	65.1	65.7	65.6	65.5	65.6	66.3	65.7	65
晶粒度/级	—	—	11 ~ 12	10 ~ 11	9 ~ 10	9 ~ 10	9	8
残留奥氏体量 (体积分数,%)	—	11	11.3	11.5	12	14	15	27

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 4-430）。

表 4-430 6Cr4W3Mo2VNb 钢推荐的回火工艺规范

回火目的	加热温度/℃	加热设备	冷却介质	回火次数	回火硬度 HRC
消除应力，稳定组织	540 ~ 580	空气炉	空气	2	≤56

注：每次回火 1 ~ 2h

② 回火温度对硬度的影响（表 4-431）。

表 4-431 6Cr4W3Mo2VNb 钢回火温度对硬度的影响

硬度 HRC 回火温度/℃	淬火温度/℃	1080	1120	1160
200		61.3	61.4	61.5
300		58.0	58.5	59.0
400		58.0	59.0	59.5
450		59.4	59.9	60.3
500		60.1	61.4	61.8
520		60.1	62.3	62.6
540		60.2	62.2	62.5
560		58.5	60.4	61.5
580		58.3	60.3	60.5
600		55.5	57.0	58.5

4) 表面处理。表面处理工艺规范见表 4-432。

表 4-432 6Cr4W3Mo2VNb 钢表面处理工艺规范

渗氮	渗氮介质	渗氮层	
		层深/mm	硬度 HV
520℃ 渗氮 1h	NH ₃ 流量为 0.1L/min	0.07 ~ 0.08	945 ~ 1070

(5) 力学性能

6Cr4W3Mo2VNb (65Nb) 钢为高韧性、高耐磨性的冷作模具钢, 该钢具有优良的室温和高温综合力学性能, 其强度高, 硬度和耐磨性好。因碳含量低而无过量的剩余碳化物, 所以具有高的韧性和抗疲劳性能。钢中含有适量 Nb 元素, 能起到细化晶粒的作用, 并能提高韧性和改善工艺性能。

(6) 材料应用

6Cr4W3Mo2VNb (65Nb) 钢具有高硬度、高强度、高的韧性和疲劳强度等优良的室温和高温综合力学性能。常用来制作锯片、冲头和制造各类形状复杂、大型或加工困难的冷挤压模具以及受冲击负荷较大的冷锻模、冲模、温锻模的凸模、热挤压模等, 应用范围不断扩大。

4. 6Cr4Mo3Ni2WV (CG2) 钢

(1) 化学成分

6Cr4Mo3Ni2WV 钢的化学成分见表 4-433。

表 4-433 6Cr4Mo3Ni2WV 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Mn	Si	Cr	Mo	W	Ni	P	S
0.55 ~ 0.64	≤0.40	≤0.40	3.80 ~ 4.30	2.80 ~ 3.30	0.90 ~ 1.30	0.90 ~ 1.30	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 4-434。

表 4-434 6Cr4Mo3Ni2WV 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	M_s
温度 (近似值) /℃	737	822	650	180

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-435。

表 4-435 6Cr4Mo3Ni2WV 钢锻造工艺规范

项 目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢 锭	1120 ~ 1160	1080 ~ 1120	≥900	缓冷 (坑冷或砂冷)
钢 坯	1100 ~ 1140	1050 ~ 1080	≥900	缓冷 (坑冷或砂冷)

注: CG2 钢中含有一定量的共晶碳化物, 需要进行锻造来改善其分布, 锻造前要仔细预热, 锻造时要反复锻拔 3 次以上, 以保证碳化物均匀分布, 锻后应缓冷并及时进行球化退火。热加工工艺较难掌握, 锻造开裂倾向较为严重, 在热加工时应予以注意。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 4-436）。

表 4-436 6Cr4Mo3Ni2WV 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
等温退火	加热温度为 800 ~ 820℃，保温 2 ~ 3h，炉冷至 650 ~ 670℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度 ≤ 255HBW
反复等温退火	加热温度为 820 ~ 830℃，保温 1 ~ 2h，炉冷至 680℃，保温 2 ~ 3h，加热至 830℃，保温 1 ~ 2h，炉冷至 680℃，保温 4 ~ 6h，550℃ 以下出炉空冷，硬度 ≤ 255HBW

2) 淬火及回火

① 推荐的淬火、回火工艺规范（表 4-437）。

表 4-437 6Cr4Mo3Ni2WV 钢推荐的淬火、回火工艺规范

类型	淬火温度/℃	淬火冷却介质	回火温度/℃	回火次数/次	回火后硬度 HRC
冷作模具	1100 ~ 1140	油	560℃	2	60 ~ 61
热作模具	1120 ~ 1180	油	630℃	2	51 ~ 53

② 淬火、回火后硬度、残留奥氏体量的变化（表 4-438）。

表 4-438 6Cr4Mo3Ni2WV 钢淬火、回火后硬度、残留奥氏体量的变化

回火温度/℃ 淬火温度/℃		500	520	540	560	600	630	650
1120	硬度 HRC	60.5	61.0	61.0	62.0	59.5	53	48
	残留奥氏体量 (体积分数,%)	6.5	4.4	3.5	3.3	1.6	1.5	0.3
1140	硬度 HRC	60.5	61.0	61.0	62.0	59.5	56	51
1160	硬度 HRC	61.0	61.5	61.0	60.5	58	56	51

③ 淬火温度与各参数之间的关系（表 4-439）。

表 4-439 6Cr4Mo3Ni2WV 钢淬火温度与各参数之间的关系

淬火温度/℃	1020	1050	1080	1100	1120	1140	1160	1180	1200
硬度 HRC	59.5	60	62.5	62.5	63	62.5	62	61.5	61.5
晶粒度/级	—	12	11 ~ 12	11 ~ 12	10 ~ 11	8 ~ 9	7 ~ 8	6 ~ 7	5 ~ 6
残留奥氏体量 (体积分数,%)	14.8	17.4	15.3	21.3	22.8	22.8	26.0	26.3	26.3

(5) 力学性能

6Cr4Mo3Ni2WV（CG2）钢具有强度高、热硬性和韧性较好的综合力学性能。而且有较宽的热处理温度范围，灵活性大，可根据模具的使用条件，适当调整热处理工艺。

但该钢热加工工艺较难掌握，锻造开裂倾向较为严重。

(6) 材料应用

6Cr4Mo3Ni2WV (CG2) 钢为一种冷热兼用的模具钢。常用于制造热挤压轴承圈冲头、热挤压凹模、热冲模、精锻模，或制作冷挤压模、冲模及冷锻模等。

5. 6W8Cr4VTi (LM1) 钢

(1) 化学成分

6W8Cr4VTi 钢的化学成分见表 4-440。

表 4-440 6W8Cr4VTi 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	W	V	Ti	P	S
0.60 ~ 0.70	≤0.40	≤0.40	4.20 ~ 4.80	7.50 ~ 8.50	0.80 ~ 1.20	0.10 ~ 0.30	≤0.030	≤0.030

(2) 热加工

锻造工艺规范见表 4-441。

表 4-441 6W8Cr4VTi 钢锻造工艺规范

项 目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢 锭	1150 ~ 1180	1100 ~ 1150	≥900	缓冷
钢 坯	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	≥900	缓冷

(3) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-442)。

表 4-442 6W8Cr4VTi 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数	备 注
一般退火	加热温度为 840 ~ 860℃，保温 2 ~ 4h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，硬度 ≤285HBW	该钢易氧化脱碳，应采用装箱退火或在保护气氛条件下退火
等温退火	加热温度为 840 ~ 860℃，保温 2 ~ 4h，等温温度为 740 ~ 750℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度 ≤255HBW	

2) 淬火及回火。推荐的淬火及回火工艺规范 (表 4-443)。

表 4-443 6W8Cr4VTi 钢推荐的淬火及回火工艺规范

淬 火 规 范			回 火 规 范
淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度为 560 ~ 580℃，回火 3 次，每次 1.5h，回火后硬度为 58 ~ 64HRC
1190 ~ 1210	油冷	62 ~ 64	

(4) 力学性能

6W8Cr4VTi (LM1) 基体钢，热胀系数小，导热性、热锻性、耐回火性好，耐磨

性、热硬性、抗压性能、抗拉强度、断裂韧度、抗弯强度、冲击韧度等综合力学性能优良。

(5) 材料应用

6W8Cr4VTi (LM1) 钢是冷热兼用的模具钢, 其综合力学性能好, 主要用来制作大型复杂模具, 如冷挤压模和厚板冲压、冷镦等模具, 还可以用于制造加工钢铁材料的温热挤压模等。

6. 6Cr5Mo3W2VSiTi (LM2) 钢

(1) 化学成分

6Cr5Mo3W2VSiTi 钢的化学成分见表 4-444。

表 4-444 6Cr5Mo3W2VSiTi 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Cr	W	Mo	Si	Mn	V	Ti	P	S
0.60 ~ 0.70	4.50 ~ 5.20	1.60 ~ 2.30	2.80 ~ 3.40	≤0.40	≤0.40	1.00 ~ 1.40	0.10 ~ 0.30	≤0.030	≤0.030

(2) 热加工

锻造工艺规范见表 4-445。

表 4-445 6Cr5Mo3W2VSiTi 钢锻造工艺规范

项 目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢 锭	1150 ~ 1180	1100 ~ 1150	≥900	缓冷 (坑冷或砂冷)
钢 坯	1120 ~ 1150	1080 ~ 1120	850 ~ 900	缓冷 (坑冷或砂冷)

(3) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-446)。

表 4-446 6Cr5Mo3W2VSiTi 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
一般退火	加热温度为 840 ~ 860℃, 保温 2 ~ 4h, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷, 硬度 ≤241HBW
等温退火	加热温度为 850 ~ 870℃, 保温 2 ~ 3h, 等温温度为 730 ~ 750℃, 保温 4 ~ 6h, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷, 退火后硬度 ≤241HBW

注: 该钢易氧化、脱碳, 应采用装箱退火或在保护气氛条件下退火。

2) 淬火及回火. 推荐的淬火及回火工艺规范见表 4-447。

表 4-447 6Cr5Mo3W2VSiTi 钢推荐的淬火及回火工艺规范

热处理方案	工 艺 参 数
方案 I	淬火温度为 1100 ~ 1150℃, 油冷, 硬度 ≥61HRC。回火温度为 520 ~ 540℃, 回火 2 次, 每次 1 ~ 2h, 硬度为 60 ~ 62HRC
方案 II	淬火温度为 1170 ~ 1190℃, 油冷, 硬度 ≥61HRC。回火温度为 530 ~ 560℃, 回火 3 次, 每次 1.5h, 硬度为 60 ~ 62HRC

(4) 力学性能

6Cr5Mo3W2VSiTi (LM2) 钢属于基体钢, 其热膨胀系数小, 导热性好, 热锻性好, 耐磨性高, 抗压强度、抗弯强度、冲击韧度等综合力学性能优良 (表 4-448)。

表 4-448 LM1、LM2 钢的力学性能比较

钢号	LM1	LM2
热处理工艺	1190 ~ 1210℃ 淬火, 550 ~ 580℃ 回火	1170 ~ 1190℃ 淬火, 530 ~ 560℃ 回火
硬度 HRC	61 ~ 63	61 ~ 63
抗压强度/MPa	3380 ~ 3700	3300 ~ 3780
冲击韧度 a_K (J/cm ²)	100 ~ 130	120 ~ 160
断裂韧度 K_{IC} /MPa · m ^{1/2}	425 ~ 633	811 ~ 852
抗弯强度 σ_{bb} /MPa	5000 ~ 5450	5180 ~ 5600

(5) 材料应用

6Cr5Mo3W2VSiTi (LM2) 钢属于冷热兼用模具钢。主要用于制造冷挤压模, 厚板冷冲、冷锻等模具, 还可以用于制造热挤压模等热作模具。

4.2.6 无磁模具钢

无磁模具钢包括奥氏体不锈钢和高锰系奥氏体钢, 代表钢号有奥氏体不锈钢: 1Cr18Ni9Ti; 高锰系奥氏体钢: 5Mn15Cr8Ni5Mo3V2、7Mn10Cr8Ni10Mo3V2、7Mn15Cr2Al3V2WMo 等。其中, 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢具有较高的抗晶间腐蚀性能。经固溶后呈单相奥氏体组织, 因此在强磁场中不产生磁感应, 适宜制造无磁模具和要求耐蚀性的塑料模具。高锰系奥氏体钢在加热和冷却过程中无相变, 始终保持奥氏体组织。由于高锰钢的冷作硬化现象, 切削加工较困难, 经过适当的固溶和时效处理后有较好的综合性能。这类钢适于制造无磁模具、无磁轴承及其他要求在强磁场中不产生磁感应的结构零件, 主要用来制造工作应力较高、使用温度超过 700℃ 的热作模具。

1. 7Mn15Cr2Al3V2WMo (7Mn15) 钢

(1) 化学成分

7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢的化学成分 (GB/T 1299—2000) 见表 4-449。

表 4-449 7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Al	P	S
0.65 ~ 0.75	≤0.80	14.50 ~ 16.50	2.00 ~ 2.50	0.50 ~ 0.80	0.50 ~ 0.80	1.50 ~ 2.00	2.30 ~ 3.30	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 线膨胀系数 (表 4-450)

表 4-450 7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢线膨胀系数

温度/℃	25 ~ 100	25 ~ 200	25 ~ 300	25 ~ 400	25 ~ 500	25 ~ 600	25 ~ 700	25 ~ 800
线膨胀系数 $\alpha' \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	16.5	17.8	18.9	19.7	20.3	20.8	21.2	21.6

2) 热导率 (表 4-451)。

表 4-451 7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢热导率

温度/℃	150	300	400	500	600	700	800	900
热导率 λ / [W/ (m · K)]	14. 4	15. 7	19. 5	20. 0	20. 3	22. 2	24. 9	24. 8

3) 电阻率 (表 4-452)。

表 4-452 7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢电阻率

温度/℃	150	300	400	500	600	700	800	900
电阻率 ρ / $\times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$	1. 05	1. 15	1. 17	1. 23	1. 25	1. 31	1. 33	1. 35

4) 磁导率 (表 4-453)。

表 4-453 7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢磁导率

状 态	磁导率 μ / ($\times 10^{-3} \text{mH/m}$)
1150℃ 固溶	1. 2602
1180℃ 固溶	1. 2603
1150℃ 固溶, 700℃ 时效	1. 2639
1180℃ 固溶, 650℃ 2h 时效	1. 2609
1180℃ 固溶, 700℃ 2h 时效	1. 2602
1180℃ 固溶, 650℃ 20h 时效. 变形 8. 5%	1. 2608
1180℃ 固溶, 650℃ 20h 时效. 变形 14. 5%	1. 2608
1180℃ 固溶, 650℃ 20h 时效. 变形 24. 5%	1. 2617
1180℃ 固溶, 650℃ 20h 时效. 变形 42. 5%	1. 2704

5) 密度为, 7. 81g/cm³。

(3) 加工性能

1) 锻造工艺规范 (表 4-454)。

表 4-454 7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢锻造工艺规范

项 目	加热温度/℃	加温时间/h	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢 锭	1150 ~ 1170	≥8	1100 ~ 1120	≥950	空冷
钢 坯	1140 ~ 1160	≥8	1080 ~ 1100	≥950	空冷

注: 7Mn15 钢导热性较差, 锻造时装炉温度不宜过高, 需缓慢升温, 保温时间要求足够长, 以保证钢中碳化物充分固溶, 锻后硬度为 33 ~ 35HRC。

2) 拉伸性能。高温拉伸性能见表 4-455。

表 4-455 7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢高温拉伸性能

热处理工艺	强度性能	试验温度/℃				
		600	650	700	750	800
1180℃ × 30min 固溶, 700℃ × 4h 时效	R_m /MPa	900 ~ 800	800 ~ 780	730 ~ 780	610 ~ 600	500
	A (%)	2. 0	2. 0	1. 7	1. 7	2. 4
	Z (%)	5. 5	5. 0	9. 0	1. 0	3. 0

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-456)。

表 4-456 7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
高温退火工艺①	加热温度为 870 ~ 890℃, 保温 3 ~ 6h, 炉冷至 500℃ 以下出冷空冷, 退火后硬度为 28 ~ 30HRC, 组织为细晶粒奥氏体 + 均匀分布的颗粒状碳化物

① 采用高温退火工艺, 能改善 7Mn15 钢的切削加工性能。

2) 固溶处理。推荐的固溶处理工艺规范 (表 4-457)。

表 4-457 7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢推荐的固溶处理工艺规范

固溶温度/℃	保温时间	冷却介质	固溶硬度 HRC
1150 ~ 1180	盐浴炉 15 ~ 20min, 空气炉 30min	水	20 ~ 22

注: 金相组织为奥氏体 + 未溶一次碳化物。

3) 时效处理。

① 时效处理工艺规范 (表 4-458)。

表 4-458 7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢时效处理工艺规范

时效温度/℃	保温时间/h	冷却介质	时效后硬度 HRC
650	20	空气	48.0
700	2	空气	48.5

② 不同时效时间后的硬度 (表 4-459)。

表 4-459 7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢不同时效时间后的硬度

时效时间/h	固溶后	2	4	10	14	18	20
650℃ 时效, 硬度 HRC	20	32	44	46	47	46	48.5
700℃ 时效, 硬度 HRC	20	48.5	48	46	45.5	—	45.5

注: 固溶温度为 1180℃, 水淬。

③ 不同状态时钢的硬度 (表 4-460)。

表 4-460 7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢不同状态时的硬度

状态	锻造	退火	固溶	时效
硬度 HRC	33 ~ 35	28 ~ 30	20 ~ 22	47 ~ 48

④ 不同温度固溶和时效处理后的力学性能 (表 4-461)。

表 4-461 7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢在不同温度固溶和时效处理后的力学性能

热处理工艺	R_m /MPa	A (%)	Z (%)	a_K (J/cm ²)
1180℃ 固溶处理	820	61.0	61.5	230
	720	60.0	62.5	240

(续)

热处理工艺	R_m /MPa	A (%)	Z (%)	a_K (J/cm ²)
1150℃固溶处理, 700℃、2h时效处理	1370	16.5	34.0	48
	1370	15.5	35.5	45
	1380	18.0	35.5	45
1180℃固溶处理, 650℃、20h时效处理	1510	4.5	8.5	15
	1490	4.5	9.5	13

4) 表面处理 (表 4-462)。

表 4-462 7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢气体氮碳共渗

温度/℃	时间/h	渗层深度/mm	渗层硬度 HV
560 ~ 570	4 ~ 6	0.03 ~ 0.04	950 ~ 1100

(5) 力学性能

7Mn15Cr2Al3V2WMo (7Mn15) 无磁冷作模具钢在各种状态下都保持稳定的奥氏体组织, 具有非常低的磁导率, 高的硬度、强度, 较好的耐磨性。由于高锰钢的冷作硬化现象, 切削加工比较困难。采用高温退火工艺, 可以改变碳化物的颗粒与分布状态, 从而改善钢的切削加工性能。采用气体氮碳共渗工艺, 可以进一步提高钢的表面硬度, 提高耐磨性, 显著地提高零件的使用寿命。

(6) 材料应用

7Mn15Cr2Al3V2WMo (7Mn15) 钢适于制造无磁模具、无磁轴承及其他要求在强磁场中不产生磁感应的结构零件, 如无磁性的粉末压铸模等。由于该钢具有高的的高温强度和硬度, 也可以用于制造在 700 ~ 800℃ 温度下使用的热作模具、无磁性的塑料模具。

2. 1Cr18Ni9Ti 钢

(1) 化学成分

1Cr18Ni9Ti 钢的化学成分见表 4-463。

表 4-463 1Cr18Ni9Ti 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	P	S
≤0.12	≤1.00	≤2.00	17.00 ~ 19.00	8.00 ~ 11.0	5 ($w_C - 0.02$) ~ 0.80	≤0.035	≤0.030

(2) 物理性能

1) 线膨胀系数 (表 4-464)。

表 4-464 1Cr18Ni9Ti 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 500	20 ~ 600	20 ~ 700
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	16.6	17.2	17.5	17.9	18.2	18.6

2) 热导率 (表 4-465)。

表 4-465 1Cr18Ni9Ti 钢热导率

温度/℃	100	200	300	400	500	600	700
热导率 λ / [W/(m·K)]	16.3	17.5	18.8	21.3	23.0	24.7	26.8

3) 弹性模量 (表 4-466)。

表 4-466 1Cr18Ni9Ti 钢弹性模量

温度/℃	20	100	200	300	400	500	600	700
弹性模量 E /MPa	202 000	198 000	193 000	185 000	177 000	169 000	160 000	150 000

4) 其他物理性能 (表 4-467)。

表 4-467 1Cr18Ni9Ti 钢其他物理性能

密度/(g/cm ³)	比热容 c_p (20℃) / [J/(kg·K)]	电阻率 ρ / $\times 10^{-6} \Omega \cdot m$
7.9	501.6	0.73

(3) 加工性能

1) 热加工。锻造工艺规范见表 4-468。

表 4-468 1Cr18Ni9Ti 钢锻造工艺规范

装炉炉温/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
冷装炉温度 $\leq 800^{\circ}\text{C}$ ，热装炉不限	1130 ~ 1180	> 850	空冷

注：由于钢的导热性差，故应均匀加热，锻压时宜选用较大的压下量和高的终锻温度，以获得较好的力学性能，减小形成裂纹的可能性。

2) 冷加工性能。1Cr18Ni9Ti 钢冷变形性能良好，可以进行各种加工，如弯曲、卷边、折叠等，并有良好的深冲性能。

3) 切削加工性能。切削加工性能较好，应选用优质刀具加工。

4) 焊接性。焊接性很好，可用各种方法进行焊接，焊后不需进行热处理。

(4) 热处理

1) 淬火及淬火时效 (表 4-469)。

表 4-469 1Cr18Ni9Ti 钢淬火及淬火时效

项目	加热温度	冷却	组织
淬火	1100 ~ 1150℃	水淬	奥氏体
淬火时效	淬火 1130 ~ 1160℃，时效 800℃ $\times 10\text{h}$ 或 700℃ $\times 20\text{h}$	水淬或空冷	奥氏体 + 碳化物

2) 硬度变化与时效时间的关系 (表 4-470)。

表 4-470 1Cr18Ni9Ti 钢硬度变化与时效时间的关系

硬度 HRC 时效温度/℃	时效时间/h	淬火后	5	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	1 × 10 ⁴
800℃ 时效		130	151	171	175	174	171	166	160	155	—	—
700℃ 时效		130	142	155	162	169	174	177	177	175	170	162
650℃ 时效		130	137	142	148	153	160	168	175	181	186	183
600℃ 时效		130	134	136	137	138	140	143	148	154	170	183
550℃ 时效		130	133	134	135	136	138	140	143	149	155	170

注：1150℃ 水淬。

3) 时效的稳定性（表 4-471）。

表 4-471 1Cr18Ni9Ti 钢时效的稳定性

热处理制度	时效温度/℃	时效时间/h	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A (%)	Z (%)	a_K (J/cm ²)
1150℃，水冷， 800℃ 时效 10h	时效前		655	310	55.0	75.5	250
	500	10 000	695	300	56.5	70.0	190
		10 000	635	315	54.0	68.0	245
		20 000	635	300	54.0	71.0	295
	600	5000	610	335	50.0	73.0	240
		10 000	640	310	59.6	67.5	295
	650	10 000	620	270	46.0	72.0	170
	时效前		675	245	69.5	79.5	285
	550	3000	601	275	60.5	71.5	175
		5000					200
1050℃，空冷	600	3000	620	295	61.5	70.5	190
		5000					205
	650	3000	615	275	57.5	70.0	185
		5000					200

(5) 力学性能

1Cr18Ni9Ti 钢属于奥氏体不锈钢耐酸钢。经过热处理（1050 ~ 1100℃，在水中或在空气中淬火）后，呈单相奥氏体组织，因此在强磁场中不产生磁感应，且具有较好的综合力学性能。

1) 钢的室温力学性能（表 4-472）。

表 4-472 1Cr18Ni9Ti 钢室温力学性能

热处理	R_m /MPa	R_{el} /MPa	A (%)	Z (%)	a_K (J/cm ²)
1100 ~ 1150℃ 水淬	550 ~ 650	200 ~ 350	50 ~ 60	60 ~ 70	> 200
1130 ~ 1160℃ 水淬, 800℃ 时效 10h	655	310	55.0	75.5	250

2) 钢的高温力学性能 (表 4-473)。

表 4-473 1Cr18Ni9Ti 钢高温力学性能

热处理制度	时效温度/℃	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A (%)	Z (%)	a_K (J/cm ²)
棒 材 1130 ~ 1160℃, 水 冷, 再 经 800℃ 10h 或 700℃ 20h 时效	20	655	310	55.0	75.5	250
	100	510	245	44.0	76.5	
	200	465	205	38.0	70.0	370
	300	450	220	29.0	66.0	
	400	455	220	26.5	64.0	317
	500	430	210	30.0	64.5	365
	550	455	180	40.5	61.0	365
	600	360	210	28.5	64.5	360
	650	355	195	30.0	68.3	
	700	275	210	29.5	57.5	340
219mm × 12mm 管 坯 料, 1050 ~ 1100℃ 固溶处理	20	577	244	69.7	70.6	280
	550	436	144	37.3	66.2	288
	600	378	183	31.0	62.5	303
	650	408	132	34.6	65.5	292
	700	386	133	24.0	58.5	320

3) 钢的持久性能 (表 4-474)。

表 4-474 1Cr18Ni9Ti 钢持久性能

温度/℃		550	600	650	700
R_m (1000h)	/MPa	240 ~ 290	180 ~ 220	110 ~ 140	70 ~ 120
R_m (10000h)		190 ~ 240	130 ~ 170	60 ~ 100	50 ~ 70
R_m (100000h)		140 ~ 200	90 ~ 130	40 ~ 70	30 ~ 50

4) 钢的耐蚀性 (表 4-475)。

表 4-475 1Cr18Ni9Ti 钢耐蚀性

介 质 条 件			试验时间 /h	腐蚀速度/ (mm/y)
介 质	浓 度 (%)	温 度 /℃		
硝酸	30	20	720	0.007
	50 ~ 66	20	720	0.00
	99	55	720	1.25

(续)

介 质 条 件			试验时间 /h	腐蚀速度/ (mm/y)
介 质	浓 度 (%)	温 度/℃		
磷酸	28	80	20	0.67
	60	60	72	1.7
	80	110	72	腐蚀深度过大
硫酸钠	5 ~ 饱和 熔化的	100 900		<0.1 >10
漂白粉	潮湿的	40		0.48
混合酸	H ₂ SO ₄ 78 + HNO ₃ 0.5	90	360	0.05
	H ₂ SO ₄ 78 + HNO ₃ 1.0	90	360	0.0251
硫酸	2	50	68	0.016
	2	100	42	30 ~ 65
	80	20	120	0.46
氢氧化钾	50	20 ~ 沸腾		<0.1
	50	50 ~ 沸腾		<0.1
	熔化的			>10.0

5) 钢的抗氧化性能 (表 4-476)。

表 4-476 1Cr18Ni9Ti 钢抗氧化性能

介 质	温 度 /℃	时 间 /h	质量增加/ [g/ (m ² · 24h)]
湿空气	870	100	5.40
	980	100	>35
	1100	100	>200
空气	870	100	1.6
	980	100	6.9
	1100	100	9.4

(6) 材料应用

1Cr18Ni9Ti 钢经过热处理后, 呈单相奥氏体组织, 因此在强磁场中不产生磁感应, 且具有如弯曲、卷边、折叠等各种加工性能和良好的深冲性能。适宜制造无磁模具和要求高耐蚀性的塑料模具。

3. 5Mn15Cr8Ni5Mo3V2 (5Mn15) 钢

(1) 化学成分

5Mn15Cr8Ni5Mo3V2 钢的化学成分见表 4-477。

表 4-477 5Mn15Cr8Ni5Mo3V2 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	P	S
0.45 ~ 0.55	≤1.00	14.50 ~ 16.00	7.50 ~ 8.50	2.50 ~ 3.00	1.50 ~ 2.00	4.50 ~ 5.50	≤0.040	≤0.030

(2) 物理性能

1) 线膨胀系数 (表 4-478)。

表 4-478 5Mn15Cr8Ni5Mo3V2 钢线膨胀系数

温度/℃	25 ~ 100	25 ~ 300	25 ~ 500	25 ~ 700	25 ~ 900
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	16.3	18.5	20.3	21.2	21.6

2) 热导率 (表 4-479)。

表 4-479 5Mn15Cr8Ni5Mo3V2 钢热导率

温度/℃	100	300	400	500	600	700	800	900
热导率 $\lambda / [\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})]$	13.4	15.5	18.9	19.8	20.3	21.8	23.9	24.7

3) 电阻率 (表 4-480)。

表 4-480 5Mn15Cr8Ni5Mo3V2 钢电阻率

温度/℃	100	300	400	500	600	700	800	900
电阻率 $\rho / \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$	1.07	1.16	1.19	1.23	1.25	1.32	1.33	1.35

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 4-481。

表 4-481 5Mn15Cr8Ni5Mo3V2 钢锻造工艺规范

项 目	加热温度/℃	加温时间/h	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢 锭	1150 ~ 1170	≥8	1100 ~ 1120	≥950	空冷
钢 坯	1140 ~ 1160	≥8	1080 ~ 1100	≥950	空冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 4-482)。

表 4-482 5Mn15Cr8Ni5Mo3V2 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
高温退火工艺	加热温度为 870 ~ 890℃, 保温 3 ~ 6h, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷, 退火后硬度 ≤30HRC, 退火后组织为细晶粒奥氏体 + 均匀分布的颗粒状碳化物

2) 固溶时效处理 (表 4-483)。

表 4-483 5Mn15Cr8Ni5Mo3V2 钢固溶时效处理

固溶处理			时效处理		
固溶温度/℃	冷却介质	硬度 HRC	时效温度/℃	延续时间/h	硬度 HRC
1150 ~ 1180	水	18 ~ 25	700	4	46 ~ 47

(5) 力学性能

5Mn15Cr8Ni5Mo3V2 (5Mn15) 钢是高锰系奥氏体钢, 在加热和冷却过程中无相变, 始终保持奥氏体组织, 经适当温度固溶和时效处理后, 具有良好的综合性能。这类钢室温强度、硬度并不高, 韧性、塑性较低, 脆性也较大, 实际应用受到限制。5Mn15Cr8Ni5Mo3V2 钢与其他钢种的室温力学性能比较见表 4-484。

表 4-484 5Mn15Cr8Ni5Mo3V2 钢与其他钢种的室温力学性能比较

钢种	热处理工艺	HRC	R_{eL}/MPa	$A(\%)$	$Z(\%)$	$a_K(\text{J}/\text{cm}^2)$
5Mn15	1180℃ 固溶 + 700℃ ×4h 时效	45.6	1384	15.3	32.8	35
7Mn10	1150℃ 固溶 + 700℃ ×6h 时效	44.5	1310	8.8	27.1	20
7Mn15	1150℃ 固溶 + 700℃ ×2h 时效	48.5	1380	16.5	35.5	45
3Cr2W8V	1100℃ 油淬 + 580℃ 回火	49.0	1650	9.0	37.0	28

(6) 材料应用

5Mn15Cr8Ni5Mo3V2 (5Mn15) 钢是高锰系奥氏体钢, 在实际应用中, 应将模具预热到 400 ~ 450℃。主要用来制造工作应力较高, 使用温度超过 700℃, 且形状简单的模具, 例如铜合金挤压模、粉末烧结用模具等。

4. 7Mn10Cr8Ni10Mo3V2 (7Mn10) 钢

(1) 化学成分

7Mn10Cr8Ni10Mo3V2 钢的化学成分见表 4-485。

表 4-485 7Mn10Cr8Ni10Mo3V2 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S
0.65 ~ 0.75	≤1.00	9.00 ~ 11.00	7.50 ~ 8.50	9.00 ~ 11.00	2.50 ~ 3.00	1.50 ~ 2.00	≤0.030	≤0.030

(2) 热加工

锻造工艺规范见表 4-486。

表 4-486 7Mn10Cr8Ni10Mo3V2 钢锻造工艺规范

项 目	加热温度/℃	加温时间/h	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢 锭	1150 ~ 1170	≥8	1100 ~ 1120	≥950	空冷
钢 坯	1140 ~ 1160	≥8	1090 ~ 1110	≥950	空冷

(3) 热处理

1) 热处理工艺规范 (表 4-487)。

表 4-487 7Mn10Cr8Ni10Mo3V2 钢热处理工艺规范

热处理方案	工 艺	工 艺 参 数
预备热处理	高温退火工艺	加热温度为 870 ~ 890℃，保温 3 ~ 6h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，硬度为 28 ~ 30HRC。退火后组织为细晶粒状奥氏体 + 均匀分布的颗粒状碳化物。采用高温退火工艺的目的在于改善 7Mn10 钢的切削加工性能
固溶处理	固溶处理	固溶温度为 1150 ~ 1180℃，水淬，硬度为 18 ~ 25HRC。时效温度为 700℃，时间为 2h，硬度为 46 ~ 47HRC
表面处理	气体氮碳共渗处理	为提高模具硬度和耐磨性，可以采用气体氮碳共渗处理，见表 4-488

2) 表面处理（表 4-488）。

表 4-488 7Mn10Cr8Ni10Mo3V2 钢气体氮碳共渗工艺规范

温度/℃	时间/h	渗层深度/mm	渗层硬度 HV
560 ~ 570	4 ~ 6	0.03 ~ 0.04	950 ~ 1100

(4) 力学性能

7Mn10Cr8Ni10Mo3V2 (7Mn10) 钢属于高锰钒系无磁钢，在各种状态下都能保持稳定的奥氏体，具有非常低的磁导率，高的硬度和高温强度，较好的耐磨性，经过适当的热处理（固溶 + 时效）后，具有较好的综合性能。

(5) 材料应用

7Mn10Cr8Ni10Mo3V2 (7Mn10) 钢由于具有高的的高温强度和硬度，可用来制造在 700 ~ 800℃ 以下使用的无磁冷作模具和热作模具。

第 5 章 热作模具钢

热作模具钢主要用于制造高温状态下进行压力加工的模具，如热锻模、热挤压模、压铸模、热镦模等。由于热作模具长时间处于高温高压条件下工作，因此，要求模具材料具有高的强度、硬度及热稳定性，特别是应有高热强性、热疲劳性、韧性和耐磨性。

5.1 热作模具钢的分类

5.1.1 热作模具钢标准钢号

国家标准 GB/T 1299—2000《合金工具钢》列入了 12 个热作模具钢钢号。钢号分三类：第一类是原有老钢种，如 5CrMnMo、5CrNiMo、3Cr2W8V、8Cr3 等；第二类是国内研制的新钢种，如 5Cr4Mo3SiMnVAI、3Cr3Mo3W2V、5Cr4W5Mo2V、4CrMnSiMoV 等；第三类是从国外引进的通用钢种，如 4Cr3Mo3SiV（H10）、4Cr5MoSiV（H11）、4Cr5MoSiV1（H13）、4Cr5W2VSi（W2）等。另外冷作模具用无磁模具钢 7Mn15Cr2Al3V2WMo（7Mn15），也常用于制造在 700~800℃ 下使用的热作模具。

5.1.2 热作模具钢的分类方法

热作模具钢的分类方法很多，可以按用途分类，按工作温度分类，也可以根据合金元素含量及热处理后的性能分类。但每一种钢号有不同的合金元素含量，采用不同的热处理工艺，从而具有不同的性能，可以制造多种不同用途的模具，因此，对热作模具钢作出统一的分类相当困难。常用分类方法见表 5-1。

表 5-1 热作模具钢常用分类

按用途分	按性能分	按工作温度分	主要钢号
锤锻模和大型机锻模用钢	高韧性热作模具钢	低耐热模具钢 (350~500℃)	5CrMnMo、5CrNiMo、4CrMnSiMoV、 5Cr2NiMoVSi、5SiMnMoV
中、小机锻模和热挤压模用钢	高热强热作模具钢	中耐热模具钢 (550~600℃)	4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi
		高耐热模具钢 (580~650℃)	3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V、4Cr3Mo3SiV、 5Cr4W5Mo2V、5Cr4Mo3SiMnVAI
	特高热强热作模具钢	高合金热作模具钢	7Mn15Cr2Al3V2WMo
压铸模用钢	高热强热作模具钢	中耐热模具钢	4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi
		低耐热模具钢	3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V
热冲裁模用钢	高耐磨热作模具钢	中耐热模具钢	4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2Si
		低耐热模具钢	8Cr3、7Cr3

5.1.3 常用热作模具钢

常用热作模具钢的分类及化学成分见表 5-2。

表 5-2 常用热作模具钢的分类及化学成分 (质量分数) (%)

钢号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	W	P	S	其他
低耐热高韧性热作模具钢											
5CrMnMo	0.50 ~ 0.60	0.25 ~ 0.60	1.20 ~ 1.60	0.60 ~ 0.90	1.40 ~ 1.80	0.15 ~ 0.30	—	—	≤0.030	≤0.030	—
5CrNiMo	0.50 ~ 0.60	≤0.40	0.50 ~ 0.80	0.50 ~ 0.80	1.40 ~ 1.80	0.15 ~ 0.30	—	—	≤0.030	≤0.030	—
4CrMnSiMoV	0.35 ~ 0.45	0.80 ~ 1.10	0.80 ~ 1.10	1.30 ~ 1.50	1.40 ~ 1.80	0.40 ~ 0.60	0.20 ~ 0.40	—	≤0.030	≤0.030	—
5SiMnMoV	0.52 ~ 0.60	0.90 ~ 1.20	1.00 ~ 1.30	≤0.35	—	0.20 ~ 0.30	0.08 ~ 0.15	—	≤0.030	≤0.030	—
45Cr2NiMoVSi	0.40 ~ 0.47	0.50 ~ 0.80	0.40 ~ 0.60	1.54 ~ 2.00	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	0.30 ~ 0.50	—	≤0.030	≤0.030	—
5Cr2NiMoVSi	0.46 ~ 0.53	0.60 ~ 0.90	0.40 ~ 0.60	1.54 ~ 2.00	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	0.30 ~ 0.50	—	≤0.030	≤0.030	—
3Cr2MoWVNi	0.26 ~ 0.35	≤0.40	≤0.40	2.20 ~ 2.60	1.00 ~ 1.40	1.20 ~ 1.60	0.40 ~ 0.65	0.50 ~ 0.80	≤0.030	≤0.030	—
中耐热性热作模具钢											
4Cr5MoSiV (H11)	0.33 ~ 0.43	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50	4.75 ~ 5.50	1.40 ~ 1.80	1.10 ~ 1.60	0.30 ~ 0.60	—	≤0.030	≤0.030	—
4Cr5MoSiV1 (H13)	0.32 ~ 0.45	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50	4.75 ~ 5.50	1.40 ~ 1.80	1.10 ~ 1.75	0.80 ~ 1.20	—	≤0.030	≤0.030	—
3Cr3Mo2WVSi (ZDM2)	0.32 ~ 0.40	0.60 ~ 1.00	0.40 ~ 0.60	2.80 ~ 3.20	1.40 ~ 1.80	1.00 ~ 2.00	0.50 ~ 1.20	0.50 ~ 1.20	≤0.030	≤0.030	—
8Cr3	0.75 ~ 0.85	≤0.40	≤0.40	3.20 ~ 3.80	1.40 ~ 1.80	—	—	—	≤0.030	≤0.030	—
4Cr5W2VSi	0.32 ~ 0.42	0.80 ~ 1.20	≤0.40	4.50 ~ 5.50	1.40 ~ 1.80	—	0.60 ~ 1.00	1.60 ~ 2.40	≤0.030	≤0.030	B: 0.002 ~ 0.005
4Cr3Mo2MnVB (ER8)	0.34 ~ 0.39	0.25 ~ 0.60	1.20 ~ 1.70	2.20 ~ 2.80	—	1.80 ~ 2.30	0.90 ~ 1.40	—	≤0.030	≤0.030	B: 0.002 ~0.005
3Cr3Mo3W2V (HM1)	0.32 ~ 0.42	0.60 ~ 0.90	≤0.65	2.80 ~ 3.30	—	2.50 ~ 3.00	0.80 ~ 1.20	1.20 ~ 1.80	≤0.030	≤0.030	—
3Cr3Mo3V Nb (HM3)	0.24 ~ 0.33	≤0.60	≤0.35	2.60 ~ 3.20	—	2.70 ~ 3.20	0.60 ~ 0.80	—	≤0.030	≤0.030	Nb: 0.08 ~0.15

(续)

钢号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	W	P	S	其他
中耐热性热作模具钢											
4Cr3Mo3SiV (H10)	0.35 ~ 0.45	0.80 ~ 1.20	0.25 ~ 0.70	3.00 ~ 3.75	1.40 ~ 1.70	2.00 ~ 3.00	0.25 ~ 0.75	—	≤0.030	≤0.030	—
4Cr4WMoSiV	0.35 ~ 0.45	0.80 ~ 1.20	≤0.40	3.60 ~ 4.40	—	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	≤0.030	≤0.030	—
高耐热性热作模具钢											
3Cr2W8V (H21)	0.30 ~ 0.40	≤0.40	≤0.40	2.20 ~ 2.70	1.40 ~ 1.80	—	0.20 ~ 0.50	7.50 ~ 9.00	≤0.030	≤0.030	—
4Cr3Mo3W4VNb (GR)	0.37 ~ 0.47	≤0.50	≤0.50	2.50 ~ 3.50	—	2.00 ~ 3.00	1.00 ~ 1.40	3.50 ~ 4.50	≤0.030	≤0.030	Nb: 0.10 ~0.20 Ti: 0.10 ~0.20
4Cr3Mo2MnVNB (Y4)	0.36 ~ 0.42	0.25 ~ 0.50	0.90 ~ 1.30	2.20 ~ 2.80	—	2.00 ~ 2.50	0.90 ~ 1.30	—	≤0.030	≤0.030	B: 0.002 ~0.006 Nb: 0.04 ~0.10
4Cr5Mo2MnVSi (Y10)	0.36 ~ 0.42	1.00 ~ 1.50	0.70 ~ 1.50	4.50 ~ 5.50	—	1.80 ~ 2.20	0.80 1.20	—	≤0.030	≤0.030	Al: ≤0.05
4Cr3Mo2VNiNb (HD)	0.35 ~ 0.45	≤0.40	≤0.40	2.50 ~ 3.00	0.80 ~ 1.20	1.80 ~ 2.20	1.00 ~ 1.40	—	≤0.030	≤0.030	Nb: 0.10 ~0.25
4Cr3Mo2WVMn (TM)	0.35 ~ 0.45	0.20 ~ 0.40	0.90 ~ 1.20	2.40 ~ 2.80	—	1.80 ~ 2.20	1.00 ~ 1.30	1.10 ~ 1.30	≤0.030	≤0.030	—
5Cr4Mo3SiMnVAl (012Al)	0.47 ~ 0.57	0.80 ~ 1.10	0.80 ~ 1.10	3.80 ~ 4.30	—	2.80 ~ 3.40	0.80 ~ 1.20	—	≤0.030	≤0.030	Al: 0.30 ~0.70
5Cr4W5Mo2V (RM2)	0.40 ~ 0.50	≤0.40	≤0.40	3.40 ~ 4.40	—	1.50 ~ 2.10	0.70 ~ 1.10	4.50 ~ 5.30	≤0.030	≤0.030	—
6Cr4Mo3Ni2WV	0.55 ~ 0.64	≤0.40	≤0.40	3.80 ~ 4.30	1.80 ~ 2.20	2.80 ~ 3.30	0.90 ~ 1.30	0.90 ~ 1.30	≤0.030	≤0.030	—
奥氏体型热作模具钢											
4Cr4Mo3Ni2WV	0.40 ~ 0.50	≤0.80	≤0.70	13.00 ~ 15.00	13.00 ~ 15.00	0.25 ~ 0.40	—	2.00 ~ 2.75	≤0.030	≤0.030	—
7Mn15Cr2Al3V2 WMo (7Mn15)	0.65 ~ 0.75	≤0.80	14.50 ~ 16.50	2.00 ~ 2.50	—	0.50 ~ 0.80	1.50 ~ 2.00	0.50 ~ 0.80	≤0.030	≤0.030	Al: 2.30 ~3.30

(续)

钢号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	W	P	S	其他
奥氏体型热作模具钢											
5Mn15Cr8Ni5Mo -3V2 (5Mn15)	0.45 ~ 0.55	≤1.00	14.50 ~ 16.00	7.50 ~ 8.50	4.50 ~ 5.50	2.50 ~ 3.00	1.50 ~ 2.00	—	≤0.040	≤0.030	—
7Mn10Cr8Ni10Mo -3V2 (7Mn10)	0.65 ~ 0.75	—	9.00 ~ 11.00	7.50 ~ 8.50	9.00 ~ 11.00	2.50 ~ 3.50	1.50 ~ 2.00	—	≤0.040	≤0.030	—
高速工具钢型耐热钢											
W18Cr4V	0.73 ~ 0.83	0.20 ~ 0.40	0.10 ~ 0.40	3.80 ~ 4.50	—	—	1.00 ~ 1.20	17.20 ~ 18.70	≤0.030	≤0.030	—
W6Mo5Cr4V2	0.80 ~ 0.90	0.20 ~ 0.45	0.15 ~ 0.40	3.80 ~ 4.40	—	4.50 ~ 5.50	1.75 ~ 2.20	5.50 ~ 6.75	≤0.030	≤0.030	—
马氏体时效型耐热钢											
18Ni (250)	≤0.03	≤0.10	≤0.10	—	17.50 ~ 18.50	4.25 ~ 5.25	—	—	≤0.010	≤0.010	Co: 7.00 ~8.00 Ti: 0.30 ~0.50 Al: 0.05 ~0.15
18Ni (300)	≤0.03	≤0.10	≤0.10	—	18.00 ~ 19.00	4.60 ~ 5.20	—	—	≤0.010	≤0.010	Co: 8.50 ~9.50 Ti: 0.50 ~0.80 Al: 0.05 ~0.15
18Ni (350)	≤0.03	≤0.10	≤0.10	—	17.00 ~ 19.00	4.00 ~ 5.00	—	—	≤0.010	≤0.010	Co: 11.00 ~12.75 Ti: 1.20 ~1.45 Al: 0.050 ~0.15
析出硬化型热作模具钢											
2Cr3Mo2NiVSi (PH)	0.16 ~ 0.22	0.60 ~ 0.90	0.40 ~ 0.70	2.54 ~ 3.00	0.80 ~ 1.20	1.80 ~ 2.20	0.30 ~ 0.50	—	≤0.030	≤0.030	Zr: 0.05 ~0.12
冷热兼用基体钢											
6Cr4Mo3Ni2WV (CG2)	0.55 ~ 0.64	≤0.40	≤0.40	3.80 ~ 4.30	1.80 ~ 2.20	2.80 ~ 3.30	0.90 ~ 1.30	0.90 ~ 1.30	≤0.030	≤0.030	—

(续)

钢号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	W	P	S	其他
冷 热 兼 用 基 体 钢											
6W8Cr4VTi (LM1)	0.60 ~ 0.70	≤0.60	≤0.40	4.20 ~ 4.80	—	—	0.80 ~ 1.20	7.50 ~ 8.50	≤0.030	≤0.030	—
6Cr5Mo3W2VSiTi (LM2)	0.60 ~ 0.70	0.90 ~ 1.40	≤0.40	4.50 ~ 5.20	—	2.80 ~ 3.40	1.00 ~ 1.40	1.60 ~ 2.30	≤0.030	≤0.030	—
5Cr4W2Mo 2SiV	0.45 ~ 0.54	0.80 ~ 1.10	≤0.50	3.70 ~ 4.30	—	1.80 ~ 2.20	1.00 ~ 1.30	1.80 ~ 2.20	≤0.030	≤0.030	—

5.2 热作模具钢的性能与应用

5.2.1 低耐热高韧性热作模具钢

低耐热高韧性热作模具钢碳质量分数为 0.30% ~ 0.50%，属于亚共析钢；合金元素总量（质量分数）在 5% 以下，主要含有 Cr、Ni、Mn、Mo、Si、V 等元素。其中 Cr - Mn、Cr - Ni 配合加入可以提高淬透性，并有强化作用。Mo 可以提高耐回火性，防止回火脆性；V 可以细化晶粒，Mo、V 可以形成碳化物，提高耐磨性。钢的淬透性较高，有一定的耐回火性和高温强度，能在 400 ~ 500℃ 的温度下工作，有高的冲击韧度和疲劳强度，同时还具有好的耐热性、抗氧化性和加工工艺性。主要用于承受较大冲击载荷的锤锻模、平锻机锻模和大型压力机锻模等。

1. 5CrNiMo 钢

(1) 化学成分

5CrNiMo 钢的化学成分见表 5-3。

表 5-3 5CrNiMo 钢的化学成分（质量分数） (%)

国家	钢号	C	Si	Mo	Cr	Ni	Mo	P	S	其他
中国 (GB ^①)	5CrNiMo	0.50 ~ 0.60	≤0.40	0.50 ~ 0.80	0.50 ~ 0.80	1.40 ~ 1.80	0.15 ~ 0.30	≤0.030	≤0.030	—
美国 (AISI)	L6	0.65 ~ 0.75	0.20 ~ 0.40	0.55 ~ 0.65	0.65 ~ 0.85	1.25 ~ 1.75	(0.25)	—	—	V: (0.25)
日本 (JIS)	SKT4	0.50 ~ 0.60	≤0.35	0.60 ~ 1.00	0.70 ~ 1.00	1.30 ~ 2.00	0.20 ~ 0.50	≤0.030	≤0.030	—
日本 (大同)	GFA	0.55	0.20	1.00	1.10	1.65	0.50	—	—	V: 0.13
日本 (日立)	DM	0.55	0.25	0.85	1.20	1.65	0.35	—	—	V: 0.15
德国 (DIN)	W - Nr. 1.2713	0.50 ~ 0.60	0.10 ~ 0.40	— 0.95	0.60 ~ 0.80	1.50 ~ 1.80	0.25 ~ 0.35	—	—	V: 0.07 ~ 0.12
法国 (NF)	55 Ni Cr Mo V7	0.50 ~ 0.60	0.10 ~ 0.40	0.50 ~ 0.80	0.70 ~ 1.00	1.50 ~ 2.00	0.30 ~ 0.50	—	—	V: 0.05 ~ 0.15

① GB/T 1299—2000。

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 5-4)。

表 5-4 5CrNiMo 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}	M_s
温度 (近似值)/℃	730	780	610	640	230

2) 线膨胀系数 (表 5-5)。

表 5-5 5CrNiMo 钢线膨胀系数

温度/℃	100 ~ 250	250 ~ 300	350 ~ 600	600 ~ 700
线膨胀系数 $\alpha/\times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	12.55	14.1	14.2	15.0

3) 弹性模量 (表 5-6)。

表 5-6 5CrNiMo 钢弹性模量

温度/℃	室温	100	200	300	400	500
E/MPa	209 720	206 780	203 840	198 940	193 060	186 200

4) 切变模量 (表 5-7)

表 5-7 5CrNiMo 钢切变模量

温度/℃	室温	100	200	300	400	500
G/MPa	83 300	82 320	80 360	78 400	75 460	73 500

5) 热导率 (表 5-8)。

表 5-8 5CrNiMo 钢热导率

温度/℃	室温	100	200	300	400	500
$\lambda/[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	0.44	0.44	0.43	0.43	0.39	0.35

6) 比热容 (表 5-9)。

表 5-9 5CrNiMo 钢比热容

温度/℃	室温 ~ 100	室温 ~ 200	室温 ~ 300	室温 ~ 400	室温 ~ 500
$c_p(20\text{℃})/[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	0.484	0.497	0.509	0.531	0.552

7) 密度为 $7.804\text{g}/\text{cm}^3$ 。

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-10。

表 5-10 5CrNiMo 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1140 ~ 1180	1100 ~ 1150	800 ~ 880	缓冷 (坑冷或砂冷)
钢坯	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	800 ~ 850	缓冷 (坑冷或砂冷)

注：5CrNiMo 钢在空气中冷却即能淬硬，但易形成白点，因此锻造后应缓慢冷却。对于大型锻件，必须于 600℃ 的炉中，待温度一致以后，再缓慢冷却到 150 ~ 200℃，然后再在空气中冷却。对于较大的锻件，应在冷却到 150 ~ 200℃ 后，立即进行回火。

(4) 热处理

1) 预备热处理。

① 锻后退火方案（表 5-11）。

表 5-11 5CrNiMo 钢锻后退火方案

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火	加热温度为 760 ~ 780℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 197 ~ 241HBW，组织为珠光体 + 铁素体
锻后等温退火	加热温度为 850 ~ 870℃，保温 4 ~ 6h；等温温度为 680℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 197 ~ 241HBW，组织为珠光体 + 铁素体
锻模翻新退火	加热温度为 710 ~ 730℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷。退火后硬度为 197 ~ 241HBW

② 退火前后的组织和硬度（表 5-12）。

表 5-12 5CrNiMo 钢退火前后的组织和硬度

硬 度		显 微 组 织	
压痕直径/mm	HBW	未退火	退火后
3.9 ~ 4.3	241 ~ 197	托氏体 + 马氏体	珠光体 + 铁素体

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 5-13）。

表 5-13 5CrNiMo 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	冷 却			硬度 HRC
	淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	延 续	
830 ~ 860	油	20 ~ 60	至 150 ~ 180℃ 后立即回火	53 ~ 58

注：1. 大型模具淬火加热温度采用上限值，小型模具（边长在 200 ~ 300mm 以下）采用下限值。

2. 为了避免工件在淬火过程中产生大的应力和变形，加热至 830 ~ 860℃ 后，先在空气中预冷至 750 ~ 780℃，然后再油冷到 150 ~ 180℃，取出并立即回火。
3. 大型模具应先缓慢加热至 600 ~ 650℃，并保温 1 ~ 1.5h，热透后再使炉温升高。在加热过程中，为了使工件加热得更好，将工件置于 60 ~ 100mm 厚的垫板上加热，可提升加热质量。
4. 模块淬火出油温度低，容易开裂，实际操作时，为避免开裂，常于 200℃ 左右出油，这样，模具表面虽然获得了一层马氏体组织，但心部却仍处于奥氏体状态。为了提高使用寿命，可采用等温淬火。

② 等温淬火工艺（表 5-14）。

表 5-14 5CrNiMo 钢等温淬火工艺

淬火温度 /℃	冷 却		等温温度与时间	淬火后组织
	淬火冷却 介质	淬火冷却介 质温度/℃		
830 ~ 860	油	20 ~ 60	模具表面温度冷到 150 ~ 200℃ 时, 即带温转入 280 ~ 300℃ 等温槽, 保温 2 ~ 3h	少量马氏体 + 下贝氏体 + 残留奥氏体组织, 回火后马氏体转变为下贝氏体组织

注: 该工艺降低了模具的开裂倾向, 提高了模具的使用寿命。

③ 高温淬火工艺 (表 5-15)。

表 5-15 5CrNiMo 钢高温淬火工艺

淬火温度/℃	淬火冷却介质	淬火硬度 HRC	淬火后组织
890 ~ 910	油	61.5	淬火后组织为板条马氏体 + 体积分数约为 9.2% 的残留奥氏体, 晶粒度为 7 ~ 8 级

注: 回火温度为 420 ~ 550℃, 回火 2 次, 硬度为 38 ~ 47HRC。

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范 (表 5-16)。

表 5-16 5CrNiMo 钢推荐的回火工艺规范

方案	回火用途	锻模规格		回火温度/℃	加热设备	硬度 HRC
I	消除应力, 稳定组织和尺寸	小型		490 ~ 510	煤气炉或电炉	44 ~ 47
		中型		520 ~ 540		38 ~ 42
		大型		560 ~ 580		34 ~ 37
II		燕尾	中型	620 ~ 640		34 ~ 37
			小型	640 ~ 660		30 ~ 35

注: 回火后应油冷, 以防止回火脆性的产生, 为了消除油冷时产生的应力, 可在 160 ~ 180℃ 再回火一次。

大型锻模无论淬火还是回火都不能在油中冷到室温, 否则容易开裂。

② 淬火、回火温度对冲击韧度的影响 (表 5-17)。

表 5-17 5CrNiMo 钢淬火、回火温度对冲击韧度的影响

$a_K/(J/cm^2)$ 回火温度 /℃	300	350	400	450	500	550	600
淬火温度/℃							
840	21	25	29	35	45	56	71
950	19	20	23	25	35	49	62
1000	13	16	20	23	30	40	54

注: 5CrNiMo 钢模块在 380 ~ 450℃ 回火时, 心部的过冷奥氏体即转变为上贝氏体组织, 冲击韧度极差。

③ 淬火、回火温度对硬度的影响 (表 5-18)

表 5-18 5CrNiMo 钢淬火、回火温度对硬度的影响

硬度 HRC 淬火温度/℃	回火温度 /℃	300	350	400	450	500	550	600
850		52	50	48	45	41	38	32
900		52	50	48	45	41	38	32
950		53	51	49	46	42	39	33
1000		54	52	50	47	43	40	34

(5) 力学性能

5CrNiMo 钢是传统的热锻模具钢，具有良好的塑性、韧性，同时具有一定的强度和耐磨性，对尺寸效应不敏感，其室温力学性能与 500 ~ 600℃ 时几乎相同，在加热到 500℃ 时，仍然保持 300HBW 左右的硬度。由于碳化物形成元素含量低，二次硬化效应微弱，热稳定性较差，高温强度低。

1) 高温硬度（表 5-19）。

表 5-19 5CrNiMo 钢高温硬度

温度/℃	300	450	600	650	710	750
硬度 HV	383	351 ~ 354	254 ~ 274	201 ~ 203	147 ~ 154	71.3 ~ 72.7

2) 高温冲击韧性（表 5-20）。

表 5-20 5CrNiMo 钢高温冲击韧性

温度/℃	300	600	650	700
冲击吸收能量 KU/J	48.4	36.4	36.3	70.3

3) 热疲劳性能（表 5-21）。

表 5-21 5CrNiMo 钢热疲劳性能

试验方法及状态	20℃ ← → 650℃（1000 次）	20℃ ← → 750℃（1000 次）
级别 ^①	13.4	20.0

① 级别越高热疲劳性能越差。

4) 热磨损性能（表 5-22）

表 5-22 5CrNiMo 钢热磨损性能

旋转次数/次	300	600	900	1200	1500	2500
失重量/mg	1.00	2.43	3.27	4.2	4.97	5.97

注：采用 S. R. Tittagala 法，800 ~ 850℃，压力为 784 ~ 850N。

5) 表层力学性能与心部力学性能（表 5-23）。

表 5-23 5CrNiMo 钢制造的大截面工件淬火后的力学性能

部 位	表 层			心 部				
力学性能	R_m /MPa	Z (%)	KU /J	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	KU /J
室温	1310	41	31.3	1020	761	16	42	14.1
300℃	1214	58	48.4	1011	833	26	62	59.2

注：大截面工件淬火时由于表层和心部的冷却速度不同，因而得到的力学性能不同，钢的这种效应称为质量效应（mass effect），也称为尺寸效应（size effect）。

(6) 材料应用

5CrNiMo 钢由于淬透性好，300mm × 400mm × 300mm 的大块钢料经 820℃ 油淬 + 560℃ 回火，断面硬度几乎一致。主要用于制造边长不大于 300mm，工作温度低于 500℃ 的各种中、小型锻模，更适合制造大批量生产的大、中型模块，也可以制作形状复杂的铸造模具零件。

2. 5CrMnMo 钢

(1) 化学成分

5CrMnMo 钢的化学成分（GB/T 1299—2000）见表 5-24。

表 5-24 5CrMnMo 钢的化学成分（质量分数） (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
0.50 ~ 0.60	0.25 ~ 0.60	1.20 ~ 1.60	0.60 ~ 0.90	0.15 ~ 0.30	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 5-25。

表 5-25 5CrMnMo 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	M_s
温度（近似值）/℃	710	760	650	220

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-26。

表 5-26 5CrMnMo 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1140 ~ 1180	1100 ~ 1150	800 ~ 880	缓冷（坑冷或砂冷）
钢坯	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	800 ~ 850	缓冷（坑冷或砂冷）

注：锻后应进行缓冷。大型模具锻造后需放在 600℃ 左右的炉中保温后，再冷至 150 ~ 200℃ 后出炉空冷。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 5-27）。

表 5-27 5CrMnMo 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
一般退火	加热温度为 760 ~ 780℃，保温 2 ~ 4h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 197 ~ 241HBW
锻后等温退火	加热温度为 850 ~ 870℃，保温 2 ~ 4h；炉冷至 680℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 197 ~ 241HBW

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 5-28）。

表 5-28 5CrMnMo 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	操作	硬度 HRC
820 ~ 850	油	150 ~ 180	至 150 ~ 180℃，小型模具空冷，大、中型模具立即回火	52 ~ 58

注：1. 大、中型模具淬火加热温度采用上限值，小型模具采用加热温度下限值。

2. 为了避免工件在淬火过程中和淬火后产生大的应力和变形，淬火时最好先在空气中预冷至 740 ~ 760℃，然后再油冷到 150 ~ 180℃，取出并立即回火。

② 等温淬火工艺规范（表 5-29）。

表 5-29 5CrMnMo 钢等温淬火工艺规范

等温淬火方案	工 艺 参 数
方案 I	加热温度为 840 ~ 860℃，加热后将模具放于 160 ~ 180℃ 硝盐中分级停留，使之发生部分马氏体转变，然后再转入 280 ~ 300℃ 硝盐中保温 2 ~ 3h
方案 II	加热温度为 840 ~ 860℃，淬入油中，待模具表面冷到 150 ~ 200℃ 时，带温转入等温槽，在 280 ~ 300℃ 保温 2 ~ 3h

注：采取以上两种淬火方法后，模具钢的组织为马氏体 + 下贝氏体 + 残留奥氏体，回火后获得回火下贝氏体组织。这种工艺减少了模具使用过程中的开裂，提高了模具的使用寿命。

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 5-30）。

表 5-30 5CrMnMo 钢推荐的回火工艺规范

回火部位		加热温度/℃	加热介质	硬度 HRC
模具工作部分	小型锻模	490 ~ 510	煤气炉或电炉	41 ~ 47
	中型锻模	520 ~ 540		38 ~ 41
锻模燕尾部分	小型锻模	600 ~ 620	煤气炉或电炉	35 ~ 39
	中型锻模	620 ~ 640		34 ~ 37

注：一般回火 2 次，每次回火后均需油冷，以防回火脆性的产生。

② 回火温度与常温力学性能的关系（表 5-31）。

表 5-31 5CrMnMo 钢回火温度与常温力学性能的关系

回火温度/℃	200	300	400	450	500	550	600	650
硬度 HRC	57	52	47	44	41	37	34	30
R_m /MPa	—	—	—	1630	1600	1430	1260	1120
a_K /(J/cm ²)	—	—	—	19	20	27	42	30
A (%)	—	—	—	5.5	7.5	9.5	10	11.5

注：840℃油淬。

③ 高温淬火与回火工艺规范（表 5-32）。

表 5-32 5CrMnMo 钢高温淬火与回火工艺规范

工 艺	工 艺 参 数
高 温 淬 火 与 回 火 工艺 ^①	高温淬火温度为 890 ~ 900℃，油冷，硬度为 61.5HRC。回火温度为 420 ~ 550℃，回火 2 次

① 高温淬火可以获得细致的板条状马氏体，强韧性较好，但超过 900℃加热淬火，冲击韧度等性能开始下降。

(5) 力学性能

5CrMnMo 钢是传统的热锻模具钢，与 5CrNiMo 钢性能相似，是在考虑我国资源优势的基础上，以锰代镍的经济型钢种。该钢具有较高的强度、高耐磨性和抗氧化性，但淬透性差，疲劳强度稍差。要求韧性较高时，可采用电渣重熔钢。

(6) 材料应用

5CrMnMo 钢淬透性及韧性均低，适于制造要求有较高强度和高耐磨性的各种中、小型（边长≤400mm）锤锻模和压力机锻模块。制造 3t 锤以下的浅型槽中小型锻模，使用寿命较长，也可以制造工作温度低于 500℃的其他小型热作模具。

3. 4CrMnSiMoV 钢

(1) 化学成分

4CrMnSiMoV 钢的化学成分（GB/T 1299—2000）见表 5-33。

表 5-33 4CrMnSiMoV 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
0.35 ~ 0.45	0.80 ~ 1.10	0.80 ~ 1.10	1.30 ~ 1.50	0.40 ~ 0.60	0.20 ~ 0.40	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 5-34。

表 5-34 4CrMnSiMoV 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	Ar_3	Ar_1	M_s	M_f	B_s	B_f
温度（近似值）/℃	792	855	770	660	330	165	420	350

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-35。

表 5-35 4CrMnSiMoV 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1160 ~ 1180	1100 ~ 1150	≥850	缓冷（砂冷或坑冷）
钢坯	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	≥850	缓冷（砂冷或坑冷）

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 5-36）。

表 5-36 4CrMnSiMoV 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
等温退火	加热温度为 840 ~ 860℃，保温 2 ~ 4h；等温温度为 700 ~ 720℃，保温 4 ~ 8h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 5-37）。

表 5-37 4CrMnSiMoV 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	冷却	淬火硬度 HRC
870 ± 10	油	20 ~ 60	至油温	56 ~ 68

② 不同温度淬火后的硬度（表 5-38）。

表 5-38 4CrMnSiMoV 钢不同温度淬火后的硬度

淬火温度/℃	800	850	860	870	875	885	900
硬度 HRC	46	56	57	58	58	58	57

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 5-39）。

表 5-39 4CrMnSiMoV 推荐的回火规范

模具类型	回火温度/℃	回火设备	回火硬度 HRC
小型	520 ~ 580	空气炉	43.7 ~ 48.7
中型	580 ~ 630	空气炉	40.7 ~ 43.7
大型	610 ~ 650	空气炉	37.8 ~ 41.7
特大型	620 ~ 660	空气炉	36.9 ~ 39.7

② 回火温度与硬度的关系（表 5-40）。

表 5-40 4CrMnSiMoV 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬火后	300	400	450	500	550	600	650	700
硬度 HRC	56	52	49	48	47	46	42	38	30

注：870℃ 油淬。

(5) 力学性能

4CrMnSiMoV 钢是 5CrMnSiMoV 钢的改进型钢，具有较高的强度、耐磨性和冲击韧度，淬透性好，并有较高的耐回火性和高温强度，热疲劳性能好，具有良好的综合力学性能，且冷热加工性能优良。

(6) 材料应用

4CrMnSiMoV 钢具有高的 高温强度和好的耐热疲劳性能，冷、热加工性能好。适用于制造大、中型锤锻模和压力机锻模，如连杆模、前梁模、齿轮模、突缘节模（深型模）、校平模、弯曲模和平锻机锻模等。

4. 5SiMnMoV 钢

(1) 化学成分

5SiMnMoV 钢的化学成分见表 5-41。

表 5-41 5SiMnMoV 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Mo	V	Cr	P	S
0.52 ~ 0.60	0.90 ~ 1.20	1.00 ~ 1.30	0.20 ~ 0.30	0.08 ~ 0.15	≤0.35	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 5-42。

表 5-42 5SiMnMoV 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r3}	A_{r1}	M_s
温度（近似值）/℃	764	788	751	623	243

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-43。

表 5-43 5SiMnMoV 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	≥850	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 5-44）。

表 5-44 5SiMnMoV 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 760 ~ 780℃，保温 2 ~ 4h；炉冷至 500℃ 以下出炉空冷
等温退火工艺	加热温度为 860 ~ 880℃，保温 2 ~ 4h；炉冷至 700 ~ 720℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 5-45。

表 5-45 5SiMnMoV 钢推荐的淬火规范

淬火温度/℃	淬火冷却介质	淬火冷却介质温度	操作	硬度 HRC
840 ~ 860	油或水	20 ~ 60℃ (油)	至 150 ~ 180℃ 后小型模具空冷, 中型模具立即回火	≥56 (油冷) ≥60 (水冷)

注: 1. 中型锻模采用加热温度上限, 小型模具采用加热温度下限。
2. 为减少模具淬火后的应力和变形, 淬火时最好先空冷至 750 ~ 780℃, 然后油冷至 150 ~ 180℃, 取出后立即回火。

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范 (表 5-46)。

表 5-46 5SiMnMoV 钢推荐的回火工艺规范

回火部位	加热温度/℃	加热设备	硬度 HRC
锻模工作部分	490 ~ 510 (油冷)	空气炉	40 ~ 46
锻模燕尾部分	600 ~ 620 (油冷)	空气炉	35 ~ 39

② 回火温度和力学性能的关系 (表 5-47)。

表 5-47 5SiMnMoV 钢回火温度和力学性能的关系

回火温度/℃	400	450	500	550	600
硬度 HRC	46	45	44	39.5	38
$a_K/(J/cm^2)$	10	20	21	24	28
R_m/MPa	1740	1600	1450	1350	—

注: 860℃ 淬火。

(5) 力学性能

5SiMnMoV 钢中含质量分数为 1% 左右的 Si 元素和 Mn 元素。Si 元素使钢的强度和抗疲劳性能较高, 耐回火性好; Mn 元素能提高钢的淬透性; 少量 V 可以改善钢的韧性和塑性。该钢具有一定的强度和疲劳强度, 一般的韧性和塑性, 其综合力学性能优良。

(6) 材料应用

5SiMnMoV 钢是一种传统的锤锻模具用钢。适合制造各类锤锻模和制造负荷不大的中、小型 (边长 300 ~ 400mm) 热锻模具。

5. 45Cr2NiMoVSi 钢

(1) 化学成分

45Cr2NiMoVSi 钢的化学成分见表 5-48。

表 5-48 45Cr2NiMoVSi 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Cr	Ni	Mo	V	Si	Mn	P	S
0.40 ~ 0.47	1.54 ~ 2.00	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	0.30 ~ 0.50	0.50 ~ 0.80	0.40 ~ 0.60	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 5-49。

表 5-49 45Cr2NiMoVSi 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r3}	A_{r1}	M_s
温度 (近似值)/℃	750	874	625	751	243

(3) 热加工

钢的加热温度范围较宽，锻造合格率较高，锻造工艺规范见表 5-50。

表 5-50 45Cr2NiMoVSi 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1180 ~ 1200	1160 ~ 1180	900 ~ 920	缓冷 (砂冷或坑冷)

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 5-51)。

表 5-51 45Cr2NiMoVSi 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后等温退火	加热温度为 790 ~ 810℃，保温 1 ~ 2h；等温温度为 710 ~ 730℃，保温 2 ~ 4h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷

2) 淬火及回火工艺规范 (表 5-52)。

表 5-52 45Cr2NiMoVSi 钢淬火及回火工艺规范

工 艺	工 艺 参 数
淬火及回火	淬火温度为 900 ~ 1100℃，油冷，硬度为 54 ~ 61HRC。回火温度为：型腔 630 ~ 670℃，硬度 40 ~ 44HRC；燕尾 680 ~ 700℃，硬度 34 ~ 39HRC

(5) 力学性能

45Cr2NiMoVSi 钢淬透性较高，热稳定性好，有较高的强韧性，有较强的抗热疲劳性和耐热磨损性。由于钢中含有质量分数为 1% 的 Ni，过热敏感性小，热处理加热温度范围宽，工艺性能好，具有优良的使用性能。钢的强度和冲击韧度见表 5-53。

表 5-53 45Cr2NiMoVSi 钢的强度和冲击韧度

回火温度/℃ 淬火温度/℃		500		550		600		650		700	
		R_m /MPa	a_K /(J/ cm ²)	R_m /MPa	a_K /(J/ cm ²)	R_m /MPa	a_K /(J/ cm ²)	R_m /MPa	a_K /(J/ cm ²)	R_m /MPa	a_K /(J/ cm ²)
950		1530	23	1560	20	1480	20	1220	34	920	116
1000		1810	19	1780	19	1700	18	1380	26	1050	114

(6) 材料应用

45Cr2NiMoVSi 钢适合制造 10t 以下的各类锤锻模。例如 75 拖大齿轮锻模，使用设

备为 10t 锤，使用寿命比由德国进口的 55CrNiMoV6 钢（相当于 5CrNiMo 钢）模具提高 0.5 倍以上。

6. 5Cr2NiMoVSi 钢

(1) 化学成分

5Cr2NiMoVSi 钢的化学成分见表 5-54。

表 5-54 5Cr2NiMoVSi 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S
0.46 ~ 0.53	0.60 ~ 0.90	0.40 ~ 0.60	1.54 ~ 2.00	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	0.30 ~ 0.50	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度（表 5-55）。

表 5-55 5Cr2NiMoVSi 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	Ar_3	Ar_1	M_s
温度（近似值）/℃	750	874	751	623	243

2) 热导率与比热容（表 5-56）。

表 5-56 5Cr2NiMoVSi 钢热导率与比热容

热导率 λ / [W/(m · K)]	比热容（室温）/[J/(kg · K)]
33.5	501.6

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-57。

表 5-57 5Cr2NiMoVSi 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1180 ~ 1200	1140 ~ 1160	850 ~ 900	缓冷（坑冷或砂冷）

注：锻块锻后必须及时回火，以防止产生白点。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 5-58）。

表 5-58 5Cr2NiMoVSi 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
等温退火工艺	450℃ 以下入炉，加热温度为 (800 ± 10)℃，保温 0.8 ~ 1h；炉冷至 (720 ± 10)℃，保温 4 ~ 6h，或者按有效厚度 2 ~ 3h/100mm 计，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 5-59。

表 5-59 5Cr2NiMoVSi 钢推荐的淬火规范

淬火温度/℃	淬火冷却介质	硬度 HRC
960 ~ 1010	油	54 ~ 61

3) 回火。推荐的回火工艺规范见表 5-60。

表 5-60 5Cr2NiMoVSi 钢推荐的回火工艺规范

回火温度/℃	冷却方法	硬度 HRC
600 ~ 680	空冷	35 ~ 48

4) 5Cr2NiMoVSi 钢与 5CrNiMo 钢模块的热处理规范比较 (表 5-61)。

表 5-61 5Cr2NiMoVSi 钢与 5CrNiMo 钢模块的热处理规范比较

类别	模块截面尺寸 (长 × 宽)/(mm × mm)	5CrNiMo		5Cr2NiMoVSi		回火后硬度 HRC
		淬火温度/℃	回火温度/℃	淬火温度/℃	回火温度/℃	
锤锻模	≤300 × 300	820 ~ 850	480 ~ 520	960 ~ 980	620 ~ 640	40 ~ 45
	> 300 × 300	820 ~ 850	520 ~ 560	960 ~ 980	630 ~ 660	38 ~ 41
机锻模	≤300 × 300	840 ~ 870	420 ~ 450	970 ~ 1000	610 ~ 630	45 ~ 47
	> 300 × 300	840 ~ 870	450 ~ 480	970 ~ 1000	630 ~ 650	42 ~ 44

5) 不同截面尺寸工件淬火后组织状态比较 (表 5-62)。

表 5-62 5Cr2NiMoVSi 钢不同截面尺寸工件淬火后组织状态比较

淬火温度/℃	碳状态		退火态	淬火态		
				10mm × 10mm	300mm × 300mm	500mm × 500mm
985 (油冷)	碳化物	体积分数 (%)	6.70	1.80	2.42	2.56
		类型	M ₃ C、M ₂₃ C ₆ 、 M ₆ C、MC	M ₃ C、MC	M ₃ C、M ₂₃ C ₆ 、 M ₆ C、MC	M ₃ C、M ₂₃ C ₆ 、 M ₆ C、MC
	残留奥氏体体积分数 (%)		—	9.3	23.1	29.6

(5) 力学性能

5Cr2NiMoVSi 钢淬透性高，高温性能好，强度、硬度高，冲击韧度、抗氧化性、抗热疲劳性能、抗磨损性能等良好。热处理加热温度范围宽，过热敏感性小，综合力学性能好。

1) 回火温度与力学性能的关系 (表 5-63)。

表 5-63 5Cr2NiMoVSi 钢回火温度与力学性能的关系

回火温度/℃ 力学性能	300	350	400	450	500	550	600	650
硬度 HRC	55	54	53	53	53.5	52	49	42
R_m /MPa	2040	1960	1900	1880	1900	1800	1640	1300
a_K /(J/cm ²) ^①	35	32	30	30	33	40	38	56

注：980℃淬火。

① 夏比 V 型缺口试样。

2) 5Cr2NiMoVSi 钢与 5CrNiMo 钢的高温性能比较（表 5-64）。

表 5-64 5Cr2NiMoVSi 钢和 5CrNiMo 钢的高温性能比较

回火温度/℃		200	300	400	450	500	550	600
5Cr2NiMoVSi	R_m /MPa	1280	1200	1100	1030	960	760	580
	a_K /(J/cm ²)	55	66	74	74	74	63	86
5CrNiMo	R_m /MPa	1270	1200	1160	1030	900	650	290
	a_K /(J/cm ²)	55	50	45	42	40	32	80

注：5Cr2NiMoVSi 钢经 985℃淬火 630℃回火；5CrNiMo 钢经 850℃淬火 550℃回火。

(6) 材料应用

5Cr2NiMoVSi 钢综合力学性能好，热处理加热温度范围宽，过热敏感性小，工艺性好，常用于制造大截面的压力机模具和大型锤锻模等热作模具，例如，制造 3t 锻模、汽车前梁模和各类压力机模具。

7. 3Cr2MoWVNi 钢

(1) 化学成分

3Cr2MoWVNi 钢的化学成分见表 5-65。

表 5-65 3Cr2MoWVNi 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Cr	W	Mo	V	Ni	P	S
0.26 ~ 0.35	2.20 ~ 2.60	0.50 ~ 0.80	1.20 ~ 1.60	0.40 ~ 0.65	1.00 ~ 1.40	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 5-66。

表 5-66 3Cr2MoWVNi 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	M_s
温度（近似值）/℃	816	833	268

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-67。

表 5-67 3Cr2MoWVNi 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	≥850	锻后缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 5-68）。

表 5-68 3Cr2MoWVNi 钢预备热处理

预备热处理方案	工 艺 参 数
等温退火工艺	加热温度为 810 ~ 830℃，保温 2 ~ 4h；等温温度为 700 ~ 720℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷

2) 淬火及回火工艺规范（表 5-69）。

表 5-69 3Cr2MoWVNi 钢淬火及回火工艺规范

工 艺	工 艺 参 数
淬火及回火	淬火温度为 980 ~ 1020℃，油冷，硬度为 50 ~ 52HRC，回火温度为 610 ~ 660℃，硬度为 41 ~ 43HRC

(5) 力学性能

3Cr2MoWVNi 钢可产生二次硬化效应，强度、硬度和热硬性较高，韧性、塑性好，具有一定的高温综合力学性能，且钢的热处理加热温度较宽，热稳定性较好。室温及高温力学性能见表 5-70。

表 5-70 3Cr2MoWVNi 钢室温及高温力学性能

热处理工艺	测试温度/℃	硬度 HRC	$a_K / (J/cm^2)$	R_m / MPa	R_{eL} / MPa	$A (%)$
1000℃ 淬火，600℃ 回火 2h	室温	46	80	1560	1450	65
1000℃ 淬火，650℃ 回火 2h	室温	40 ~ 42	105	1390	1290	65
1000℃ 淬火，回火到 41 ~ 43HRC	650	—	250	700	610	81

(6) 材料应用

3Cr2MoWVNi 钢具有一定的综合力学性能，且工艺性能优良，是制造机锻模比较理想的材料。常用来制作突缘、滑动叉、万向节叉和羊角机锻模等热作模具。

5.2.2 中耐热性热作模具钢

中耐热韧性钢的特点是碳质量分数较低，一般为 0.3% ~ 0.5%，合金元素含量中等，含有较多的 Cr、W、Mo、V 等碳化物形成元素。Cr 含量较高，一般质量分数为 3% ~ 5%，Mo 的质量分数为 1% ~ 3%，Cr 和 Mo 使钢的淬透性大大提高。V 元素使钢

具有较好的抗过热敏感性,从而可提高热硬性和热强性,在工作温度达 500 ~ 600℃ 时仍具有较高的硬度、热强度和耐磨性,最高可达 650℃。这类钢淬透性好,一般 $\phi 100\text{mm}$ 工件空冷即能淬透,被称为空冷硬化热作模具钢。综合性能好,在最佳淬火、回火热处理工艺条件下,具有高强度、高硬度以及良好的韧性、塑性配合。由于含 Cr 量较高,具有高的疲劳强度。广泛用于制造热变形用模具,如机锻模、高速锤锻模和压铸模等。

1. 4Cr5MoSiV (H11) 钢

(1) 化学成分

4Cr5MoSiV 钢的化学成分见表 5-71。

表 5-71 4Cr5MoSiV 钢的化学成分 (质量分数) (%)

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
中国 (GB ①)	4Cr5MoSiV	0.33 ~ 0.43	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50	4.75 ~ 5.50	1.10 ~ 1.60	0.30 ~ 0.60	≤0.030	≤0.030
美国 (AISI)	H11	0.33 ~ 0.43	0.80 ~ 1.25	0.20 ~ 0.60	4.75 ~ 5.50	1.10 ~ 1.60	0.30 ~ 0.60	≤0.030	≤0.030

① GB/T 1299—2000。

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 5-72)。

表 5-72 4Cr5MoSiV 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}	M_s	M_f
温度 (近似值)/℃	853	912	720	773	310	103

2) 线膨胀系数 (表 5-73)。

表 5-73 4Cr5MoSiV 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 500	20 ~ 600	20 ~ 700
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	10.0	10.9	11.4	12.2	12.8	13.3	13.6

3) 热导率 (表 5-74)。

表 5-74 4Cr5MoSiV 钢热导率

温度/℃	100	200	300	400	500	600	700
热导率 $\lambda / [\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})]$	25.9	27.6	28.4	28.0	27.6	26.7	25.9

4) 弹性模量 (表 5-75)。

表 5-75 4Cr5MoSiV 钢弹性模量

温度/℃	20	100	200	300	400	500
弹性模量 E / MPa	227 000	221 000	216 000	208 000	200 000	192 000

5) 密度与比热容 (表 5-76)。

表 5-76 4Cr5MoSiV 钢密度与比热容

密度/(g/cm ³)	比热容 c_p (20℃)/[J/(kg·K)]
7.69	459.8

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-77。

表 5-77 4Cr5MoSiV 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1140 ~ 1180	1100 ~ 1150	≥900	砂冷或坑冷
钢坯	1120 ~ 1150	1070 ~ 1100	850 ~ 900	砂冷或坑冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 5-78)。

表 5-78 4Cr5MoSiV 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 860 ~ 890℃, 保温 2 ~ 4h; 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷, 退火后硬度 ≤229HBW
消除应力退火	加热温度为 730 ~ 760℃, 保温 3 ~ 4h, 炉冷或空冷

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范 (表 5-79)。

表 5-79 4Cr5MoSiV 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	延续	硬度 HRC
1000 ~ 1030	油或空气	20 ~ 60	冷至油温	53 ~ 55

② 淬火温度与硬度的关系 (表 5-80)。

表 5-80 4Cr5MoSiV 钢淬火温度与硬度的关系

淬火温度/℃	950	975	1000	1025	1050	1075	1100
硬度 HRC	51	53	54.5	56	58	58.5	57.5

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范 (表 5-81)。

表 5-81 4Cr5MoSiV 钢推荐的回火工艺规范

回火目的	温度/℃	设备	冷却	回火次数	硬度 HRC
消除应力和降低硬度	530 ~ 580	熔融盐浴炉或空气炉	空冷	2	47 ~ 49

注: 第二次回火温度通常比第一次低 20 ~ 30℃。

② 不同温度回火后的力学性能 (表 5-82)。

表 5-82 4Cr5MoSiV 钢不同温度回火后的力学性能

回火温度/℃	500	550	600	650
硬度 HRC	57	54. 5	46. 5	37
$a_K/(J/cm^2)$	20	45	60	66

注：1000℃空淬，580℃回火。

4) 表面强化处理工艺规范（表 5-83）。

表 5-83 4Cr5MoSiV 钢推荐的表面强化处理工艺规范

工艺	温度/℃	时间/h	介质	渗层厚度/mm	表面硬度 HV
渗氮	560	2	KNO ₃ 50% + NaNO ₃ 50% (质量分数)	0. 04	640 ~ 690
渗氮	580	8	天然气 + 氨	0. 25 ~ 0. 30	830 ~ 860
渗氮	540	12 ~ 20	氨的分解率 30% ~ 60%	0. 15 ~ 0. 20	550 ~ 760

(5) 力学性能

4Cr5MoSiV（H11）钢是一种空冷硬化型热作模具钢。韧性较好，经热处理强韧化后，强度可达 2070MPa 以上；由于在空气中可淬硬，淬火变形和残余应力小，表面氧化倾向也小；可产生二次硬化现象，在 510℃ 以上回火时能达到最佳性能；高温回火后内应力大部分可以消除，有良好的热稳定性，可抵抗铝合金熔液的冲蚀作用。在 650℃ 以下，具有高的延展性、冲击韧度、抗氧化性、抗热疲劳性能以及高的蠕变强度和抗拉强度。

1) 高温力学性能（表 5-84）。

表 5-84 4Cr5MoSiV 钢高温力学性能

试验温度/℃	R_m/MPa	R_{eL}/MPa	$A (%)$	$Z (%)$
300	1504	1311	12. 0	39. 1
600	895	794	21. 9	72. 9
650	471	402	33. 1	85. 5
700	226	179	55. 0	94. 5

2) 高温硬度（表 5-85）。

表 5-85 4Cr5MoSiV 钢高温硬度

试验温度/℃	300	450	600	650	700	750
硬度 HV	491. 5	448. 5	384. 0	302. 5	227. 5	178. 5

注：试样原始硬度 49 ~ 50HRC。

3) 高温冲击韧性（表 5-86）。

表 5-86 4Cr5MoSiV 钢高温冲击韧性

试验温度/℃	300	600	650	700
冲击吸收能量 K/J	28. 8	31. 0	36. 5	70. 0

4) 热疲劳性能 (表 5-87)。

表 5-87 4Cr5MoSiV 钢热疲劳性能

20 ~ 650℃ 反复 1000 次	8.2 级
20 ~ 750℃ 反复 1000 次	14.6 级

5) 热磨损性能 (表 5-88、表 5-89)。

表 5-88 4Cr5MoSiV 钢热磨损性能 (一)

旋转次数/次	300	600	900	1200	1500	2500
失重/mg	0.67	0.80	1.4	1.63	1.97	2.62

注: 试验温度为 800 ~ 850℃, 压力为 784 ~ 882N, 试样硬度为 49 ~ 50HRC。

表 5-89 4Cr5MoSiV 钢热磨损性能 (二)

旋转次数/次	100	200	300	400	500	600	700	1000
失重/mg	0.77	1.67	2.50	3.47	4.33	4.90	5.60	7.40

注: 试验温度为 910 ~ 950℃, 压力为 1784 ~ 1813N, 试样硬度为 49 ~ 50HRC。

6) 耐回火性 (表 5-90)。

表 5-90 4Cr5MoSiV 钢耐回火性

温度/℃	500 (二次硬化峰温度)	560	615	600	653
硬度 HRC	55.0 (二次硬化最高硬度)	49.0	42.0	36.0	35.0

注: 试样 1020℃ 油淬, 硬度为 59 ~ 60HRC。

7) 热熔损性 (表 5-91)。

表 5-91 4Cr5MoSiV 钢热熔损性

试验温度和时间	620℃ × 4h	680℃ × 4h
失重/(g/dm ²)	4.4188	16.4

8) 疲劳极限 (表 5-92)。

表 5-92 4Cr5MoSiV 钢疲劳极限

试验温度/℃	室温	300	400	450	500
σ_{-1} /MPa	880	680	640	630	610
σ_{-1k} /MPa	570	440	430	—	420

9) 热稳定性 (表 5-93)。

表 5-93 4Cr5MoSiV 钢 620℃ 的热稳定性

保温时间/h	2	4	6	8	11.5	14.5	17.5	21
硬度 HRC	39.4	38.4	36.9	35.1	34.4	33.2	32.6	32.3

注: 试样原始硬度为 49.9HRC。

(6) 材料应用

4Cr5MoSiV (H11) 钢常用于制造铝铸件用的压铸模、热挤压模和穿孔用的工具和芯棒、压力机锻模、塑料模等。此外, 由于该钢具有好的中温强度, 也用于制造飞机、火箭等的结构件和汽轮机、燃气轮机零件。

2. 4Cr5MoSiV1 (H13) 钢

(1) 化学成分

4Cr5MoSiV1 钢的化学成分 (GB/T 1299—2000) 见表 5-94。

表 5-94 4Cr5MoSiV1 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
0.32 ~ 0.45	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50	4.75 ~ 5.50	1.10 ~ 1.75	0.80 ~ 1.20	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 5-95)。

表 5-95 4Cr5MoSiV1 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}	M_s	M_f
温度 (近似值)/℃	860	915	775	875	340	215

2) 线膨胀系数 (表 5-96)。

表 5-96 4Cr5MoSiV1 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 500	20 ~ 600	20 ~ 700
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	9.1	10.3	11.5	12.2	12.8	13.2	13.5

3) 热导率 (表 5-97)。

表 5-97 4Cr5MoSiV1 钢热导率

温度/℃	250	650
热导率 $\lambda / [\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})]$	32.2	28.8

4) 密度与弹性模量 (表 5-98)。

表 5-98 4Cr5MoSiV1 钢密度与弹性模量

密度/(g/cm ³)	弹性模量 E/MPa
7.8	210 000

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-99。

表 5-99 4Cr5MoSiV1 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1140 ~ 1180	1100 ~ 1150	850 ~ 900	缓冷 (砂冷或坑冷)
钢坯	1120 ~ 1150	1050 ~ 1100	850 ~ 900	缓冷 (砂冷或坑冷)

(4) 热处理

1) 预备热处理。

① 预备热处理工艺规范（表 5-100）。

表 5-100 4Cr5MoSiV1 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 860 ~ 890℃，保温 3 ~ 4h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度 ≤229HBW，组织为球化珠光体 + 少量碳化物
去应力退火	加热温度为 730 ~ 760℃，保温 3 ~ 4h，炉冷

② 退火前后的硬度和组织（表 5-101）。

表 5-101 4Cr5MoSiV1 钢退火前后的硬度和组织

未退火		退火后		未退火	退火后
压痕直径/mm	HBW	压痕直径/mm	HBW		
≈2.75	≈500	≥3.9	≤241	索氏体或马氏体	球状珠光体 + 少量碳化物

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 5-102）。

表 5-102 4Cr5MoSiV1 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	冷 却			硬度 HRC
	淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	冷却至	
1020 ~ 1080	油或空气	20 ~ 60	室温	56 ~ 58

② 淬火温度与硬度、晶粒度的关系（表 5-103）

表 5-103 4Cr5MoSiV1 钢淬火温度与硬度、晶粒度的关系

淬火温度/℃	930	950	980	1000	1020	1040	1060	1080	1100
硬度 HRC	50.3	52	53.5	54.8	56.3	57.8	58.2	59.1	59.1
晶粒度/级	—	11.2	11.1	11.1	11.1	11	10	8	7

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 5-104）。

表 5-104 4Cr5MoSiV1 钢推荐的回火工艺规范

目的	回火温度/℃	设备	冷却	回火硬度 HRC
消除应力，降低硬度	560 ~ 580 ^①	熔融盐浴炉或空气炉	空冷	47 ~ 49

① 通常采用两次回火，第二次回火温度比第一次回火温度低 20℃。

② 回火温度与硬度的关系（表 5-105）。

表 5-105 4Cr5MoSiV1 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	硬度 HRC	回火温度/℃	硬度 HRC
100	59.0	500	57.5
200	57.0	550	53.5
300	54.5	600	49.5
400	54.5	650	40.0
450	57.5	700	30.0

4) 表面强化处理。推荐的表面强化处理工艺规范见表 5-106。

表 5-106 4Cr5MoSiV1 钢推荐的表面强化处理工艺规范

工 艺	温度/℃	时间/h	介质	扩散层	
				深度/mm	显微硬度 HV
渗氮	560	2	KNO ₃ 50% + NaNO ₃ 50%（质量分数）	0.04 ~ 0.07	640 ~ 690
渗氮	580	8	天然气 + 氨	0.25	835 ~ 860
渗氮	530 ~ 550	12 ~ 20	氨的分解率 α 为 30% ~ 60%	0.12 ~ 0.20	550 ~ 760

(5) 力学性能

4Cr5MoSiV1（H13）钢是一种空冷硬化型热作模具钢。韧性较好，强度高；由于在空气中可淬硬，淬火变形和残余应力小，表面氧化倾向也小，可产生二次硬化现象，有良好的热稳定性，可抵抗铝合金熔液的冲蚀作用。在工作温度 650℃ 以下，具有高的延展性、冲击韧度、抗氧化性、抗热疲劳性能以及高的蠕变强度和抗拉强度。

1) 室温纵向力学性能（表 5-107）。

表 5-107 4Cr5MoSiV1 钢室温纵向力学性能

回火温度/℃	淬火后	200	400	500	520	550	580	600	650	700
硬度 HRC	56	54	54	55.5	54	52.5	49	45.5	33	28
R_m /MP _a	—	—	2040	2100	2080	1980	1780	1650	1180	—
Z （%）	—	—	40	34	40	48	53	54	55	—
A （%）	—	—	11	11	11.5	12	12.5	14	18	—
a_K /(J/cm ²)	—	—	40	32	35	50	60	70	100	—

注：1020℃ 油淬，2 次回火。

2) 疲劳性能（表 5-108）。

表 5-108 4Cr5MoSiV1 钢疲劳性能

试验温度/℃	室温	540
σ_{-1} /MPa	730	510
σ_{-1k} /MPa	670	370

3) 纵向冲击韧性 (表 5-109)。

表 5-109 4Cr5MoSiV1 钢棒料的纵向冲击韧性^①

回火温度/℃	硬度 ^② HRC	下列试验温度下的夏比 V 型缺口冲击吸收能量/J				
		- 73℃	21℃	260℃	540℃	595℃
524	54	7	14	27	31	—
565	52	7	14	30	34	34 ^③
607	47	8	24	41	45	43
615	43	9.5	24	52	60	57

① 从 1010℃ 空冷, 并二次回火, 在指定温度下各回火两次。

② 室温。

③ 565℃。

4) 纵向拉伸性能 (表 5-110)。

表 5-110 4Cr5MoSiV1 钢棒料的纵向拉伸性能^①

室温硬度 HRC	试验温度/℃	抗拉强度 R_m /MPa	下屈服强度 R_{eL} /MPa	断后伸长率 A (%)	断面收缩率 Z (%)
52 ^②	425	1620	1240	13.7	50.6
	540	1305	1000	13.9	54.0
	595	1020	825	17.5	65.4
	650	450	340	28.9	88.9
48 ^③	425	1400	1150	15.0	59.9
	540	1160	960	17.1	62.4
	595	940	750	18.0	68.5
	650	455	350	33.6	89.0
44 ^④	425	1200	1005	17.0	64.1
	540	995	820	20.6	70.0
	595	827	690	22.6	74.0
	650	450	350	28.4	87.0

① 从 1010℃ (1850°F) 油淬, 并二次回火到指定硬度。

② 在 527℃ 回火 2 × 2h。

③ 在 575℃ 回火 2 × 2h。

④ 在 605℃ 回火 2 × 2h。

(6) 材料应用

4Cr5MoSiV1 (H13) 钢广泛用于制造热挤压模具与芯棒、锤锻模、锻造压力机的模具、精锻机用模具和铝、铜、镁及其合金的压铸模。

3. 4Cr5W2VSi 钢

(1) 化学成分

4Cr5W2VSi 钢的化学成分 (GB/T 1299—2000) 见表 5-111。

表 5-111 4Cr5W2VSi 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	S	Mn	Cr	W	V	P	S
0.32 ~ 0.42	0.80 ~ 1.20	≤0.40	4.50 ~ 5.50	1.60 ~ 2.40	0.60 ~ 1.00	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 5-112)。

表 5-112 4Cr5W2VSi 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}	M_s	M_f
温度 (近似值)/℃	800	875	730	840	275	90

2) 线膨胀系数 (表 5-113)。

表 5-113 4Cr5W2VSi 钢线膨胀系数

温度/℃	22 ~ 100	22 ~ 200	22 ~ 500	22 ~ 600
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	7.6	8.7	11.6	12

3) 弹性模量 (表 5-114)。

表 5-114 4Cr5W2VSi 钢弹性模量

温度/℃	20	100	200	300	400	500	600
弹性模量 E/MPa	230 000	226 000	210 000	210 000	203 000	192 000	178 000

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-115。

表 5-115 4Cr5W2VSi 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1140 ~ 1180	1100 ~ 1150	850 ~ 900	缓冷 (砂冷或坑冷)
钢坯	1120 ~ 1150	1050 ~ 1100	850 ~ 900	缓冷 (砂冷或坑冷)

(4) 热处理

1) 预备热处理。

① 预备热处理工艺规范 (表 5-116)。

表 5-116 4Cr5W2VSi 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火	加热温度为 860 ~ 880℃, 保温 3 ~ 4h, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷, 退火后硬度 ≤229HBW, 组织为珠光体 + 碳化物
等温球化退火	加热温度为 860℃, 保温 2 ~ 4h, 等温温度为 750℃, 保温 4 ~ 6h, 炉冷至 550℃ 以下出炉空冷, 硬度 ≤229HBW, 组织为球状珠光体 + 碳化物
去应力退火	加热温度为 750 ~ 780℃, 保温 2 ~ 4h, 炉冷或空冷

② 退火后的硬度和组织（表 5-117）。

表 5-117 4Cr5W2VSi 钢退火前后的硬度和组织

硬 度		组 织	
压痕直径/mm	HBW	未退火	退火后
≥3.9	≤241	托氏体	球状珠光体 + 碳化物

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 5-118）。

表 5-118 4Cr5W2VSi 钢推荐的淬火工艺规范

方案	淬火温度/℃	淬火冷却介质	淬火冷却介质 温度/℃	冷却到	硬度 HRC
I	1060 ~ 1080	油或空气	20 ~ 40	油温	56 ~ 58
II	1030 ~ 1050	油	20 ~ 40	油温	53 ~ 56

② 淬火温度与硬度及晶粒度的关系（表 5-119）。

表 5-119 4Cr5W2VSi 钢淬火温度与硬度及晶粒度的关系

淬火温度/℃	1000	1050	1100	1150	1200	1250
淬火后硬度 HRC	51	55.5	58	59	59	57.5
晶粒度/级	—	11	8 ~ 9	6 ~ 7	4	2

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 5-120）。

表 5-120 4Cr5W2VSi 钢推荐的回火工艺规范

淬火方案	用途	回火温度/℃	设备	冷却	保温时间/h	硬度 HRC
I	降低硬度， 稳定组织	第 1 次 590 ~ 610 第 2 次 570 ~ 590	熔融盐浴炉 或空气炉	空气	2 2	48 ~ 52
II		第 1 次 560 ~ 580 第 2 次 530 ~ 540	熔融盐浴炉 或空气炉	空气	2 2	47 ~ 49

② 回火温度与硬度的关系（表 5-121）。

表 5-121 4Cr5W2VSi 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬火后	450	500	530	580	620	660
硬度 HRC	57.5	56.5	57.5	56.5	54	48	43

注：1080℃空气淬火。

4) 表面处理。推荐的表面强化处理工艺规范见表 5-122。

表 5-122 4Cr5W2VSi 钢推荐的表面强化处理工艺规范

工艺	温度/℃	时间/h	介质	渗层深度/mm	表面硬度 HV
渗氮	560	2	KNO ₃ 50% + NaNO ₃ 50% (质量分数)	0.04 ~ 0.07	580 ~ 710
渗氮	580	8	天然气 + 氨	0.25	660 ~ 765
渗氮	530 ~ 550	12 ~ 20	氨的分解率 30% ~ 60%	0.12 ~ 0.20	650 ~ 1115

(5) 力学性能

4Cr5W2VSi 钢在中温下具有较高的强度、硬度，有较高的耐磨性、韧性和较好的热疲劳性能，采用电渣重熔可以较有效地提高钢的横向力学性能。钢在不同温度回火后的室温力学性能见表 5-123。

表 5-123 4Cr5W2VSi 钢不同温度回火后的室温力学性能

回火温度/℃	500	550	600	650
R_m /MPa	2300	1880	1690	1280
$R_{p0.2}$ /MPa	1700	1690	1640	1100
Z (%)	12	40	44	52
A (%)	9	11	13	15
α_K /(J/cm ²)	5	12	47	70

注：1040℃油淬，580℃回火 2h。

(6) 材料应用

4Cr5W2VSi 钢是一种空冷硬化型热作模具钢，主要用于制造热挤压用的模具和芯棒，铝、锌等轻金属的压铸模，以及某些成形零件用的高速锤锻模具与形状简单的模具零件，如镦头模、成形针、穿孔模、管体挤压用型胎等。

4. 4Cr4WMoSiV 钢

(1) 化学成分

4Cr4WMoSiV 钢的化学成分见表 5-124。

表 5-124 4Cr4WMoSiV 钢的化学成分（质量分数） (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	P	S
0.35 ~ 0.45	0.80 ~ 1.20	≤0.40	3.60 ~ 4.40	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	≤0.030	≤0.030

(2) 热加工

锻造工艺规范见表 5-125。

表 5-125 4Cr4WMoSiV 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1140 ~ 1180	1100 ~ 1150	850 ~ 900	缓冷（坑冷或砂冷）
钢坯	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	≥850	缓冷（坑冷或砂冷）

(3) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 5-126)。

表 5-126 4Cr4 WMoSiV 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 860 ~ 890℃, 保温 3 ~ 4h; 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷, 退火后硬度 $\leq 229\text{HBW}$

2) 淬火及回火 推荐的淬火及回火工艺规范见表 5-127。

表 5-127 4Cr4WMoSiV 钢推荐的淬火及回火工艺规范

淬 火 规 范			回 火 规 范	
淬火温度/℃	淬火冷却介质	硬度 HRC	回火温度/℃	硬度 HRC
1060 ~ 1080	油	≥ 50	600 ~ 640	48 ~ 52

(4) 力学性能

4Cr4WMoSiV 钢为中耐热韧性热作模具钢。具有高的耐热性和抗过热敏感性, 一定的高温强度, 较高的冲击韧度、热韧性和一定的热硬性, 具有一般的综合力学性能。

(5) 材料应用

4Cr4WMoSiV 钢综合力学性能较好, 适用于制造加工塑性变形抗力大的材料的热变形模、高速锤锻模和铜合金压铸模等。常用于不锈钢和耐热钢的成形加工模具。

5. 8Cr3 钢

(1) 化学成分

8Cr3 钢的化学成分 (GB/T 1299—2000) 见表 5-128。

表 5-128 8Cr3 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	P	S
0.75 ~ 0.85	≤ 0.40	≤ 0.40	3.20 ~ 3.80	≤ 0.030	≤ 0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 5-129。

表 5-129 8Cr3 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}	M_s	M_f
温度 (近似值)/℃	785	830	750	770	370	110

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-130。

表 5-130 8Cr3 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1180 ~ 1200	1100 ~ 1150	870 ~ 900	缓冷
钢坯	1160 ~ 1180	1050 ~ 1100	≥ 800	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理。

① 预备热处理工艺规范（表 5-131）。

表 5-131 8Cr3 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 790 ~ 810℃，保温 2 ~ 6h，炉冷至 600℃ 以下出炉空冷，硬度为 207 ~ 255HBW
奥氏体等温退火工艺	加热温度为 870℃，保温 2 ~ 4h，等温温度为 750℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度为 207 ~ 255HBW，组织为球状珠光体 + 碳化物

② 锻后退火硬度和组织（表 5-132）。

表 5-132 8Cr3 钢锻后退火硬度和组织

硬 度				组 织	
未退火		退火后		未退火	退火后
d_{HBW}/mm	HBW	d_{HBW}/mm	HBW		
2.8 ~ 3.2	477 ~ 363	3.8 ~ 4.2	255 ~ 207	托氏体 + 马氏体	珠光体 + 碳化物

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 5-133。

表 5-133 8Cr3 钢推荐淬火工艺规范

淬火温度/℃	冷 却			硬度 HRC
	介质	介质温度/℃	冷却到	
850 ~ 880	油	20 ~ 40	油温	≥55

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范见表 5-134。

表 5-134 8Cr3 钢推荐的回火工艺规范

回火目的	回火温度/℃	加热设备	冷却介质	硬度 HRC
降低硬度，消除应力	480 ~ 520	熔融盐浴炉或空气炉	空气	41 ~ 46

② 回火温度与硬度的关系（表 5-135）。

表 5-135 8Cr3 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	未回火	100	200	300	450	500	540
硬度 HRC	57.0	56.0	56.0	54.0	46.0	40.5	37.0

注：1. 试验用钢成分（质量分数）为 C 0.76%，Si 0.18%，Mn 0.23%，P 0.08%，S 0.014%，Cr 3.61%。

2. 试样（850 ± 10）℃ 淬火油冷，硬度为 57HRC，回火保温 2h。

4) 表面处理。推荐的表面处理工艺规范见表 5-136。

表 5-136 8Cr3 钢推荐的表面处理工艺规范

渗氮温度/℃	渗氮时间/h	介质	扩散层	
			渗层深/mm	显微硬度 HV
480	50	氨的分解率 25% ~ 35%	0.35 ~ 0.40	600 ~ 750

(5) 力学性能

8Cr3 钢是一种含碳量高的热作模具钢。该钢在 T8 钢的基础上添加一定量的 Cr (质量分数为 3.20% ~ 3.80%), 从而具有一定的淬透性, 且组织中形成细小、均匀分布的碳化物, 耐磨性高, 具有一定的室温、高温力学性能。

1) 钢的热稳定性 (表 5-137)。

表 5-137 8Cr3 钢的热稳定性

温度/℃	620					660				
保温时间/h	0	2	4	6	11.5	0	1	2	3	5
硬度 HRC	49.6	29.9	29.6	27.4	27.9	50.1	27.4	25.2	25.3	25.2

2) 室温力学性能 (表 5-138)。

表 5-138 8Cr3 钢室温力学性能

回火温度/℃	300	400	500	520	550	600
硬度 HRC	53	48.5	44.5	43.5	38	29
R_m /MPa	2020	1750	1360	—	1200	—
$R_{p0.2}$ /MPa	1830	1650	1280	1200	—	—
a_K /(J/cm ²)	16	23	33	—	47	—
Z (%)	—	10.5	26	30	37	—
A (%)	4	7	9	—	10	—

注: 870℃油淬。

3) 高温力学性能 (表 5-139)。

表 5-139 8Cr3 钢高温力学性能

回火温度℃	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	a_K /(J/cm ²)	A (%)	Z (%)
200	1290	1100	43	8	29
300	1230	1070	52	9	29.5
400	1170	950	43.5	16	46
500	850	650	43	20.5	52

注: 870℃油淬, 570℃回火。

4) 热疲劳性能 (表 5-140)。

表 5-140 8Cr3 钢热疲劳性能

试验方法及状态	20 ~ 650℃ (1500 次)	20 ~ 700℃ (1500 次)
级别	9. 8	20. 0

(6) 材料应用

8Cr3 钢为冷、热兼用的低合金模具钢。但由于性能有限，应用并不普遍。适于制造热冲孔模的冲头、热切边模的凹模镶块、热顶锻模、热弯曲模、热冲裁模和工作温度低于 500℃、受冲击较小、要求耐磨性高的工作零件及热剪刀片等。

6. 4Cr3Mo2MnVB (ER8) 钢

(1) 化学成分

4Cr3Mo2MnVB 钢的化学成分见表 5-141。

表 5-141 4Cr3Mo2MnVB 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Cr	Mn	Mo	V	B	Si	P	S
0. 34 ~ 0. 39	2. 20 ~ 2. 80	1. 20 ~ 1. 70	1. 80 ~ 2. 30	0. 90 ~ 1. 40	0. 002 ~ 0. 005	0. 25 ~ 0. 60	≤0. 030	≤0. 030

(2) 物理性能

临界点温度见表 5-142。

表 5-142 4Cr3Mo2MnVB 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}	M_s
温度 (近似值)/℃	801	874	680	759	342

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-143。

表 5-143 4Cr3Mo2MnVB 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1120 ~ 1150	1080 ~ 1120	≥850	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 5-144)。

表 5-144 4Cr3Mo2MnVB 钢预备热处理

预备热处理方案	工 艺 参 数
球化等温退火	加热温度为 840℃, 保温 3 ~ 4h, 等温温度为 730℃, 保温 2 ~ 3h, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 5-145。

表 5-145 4Cr3Mo2MnVB 钢推荐的淬火工艺规范

加热温度/℃	冷却方法	硬度 HRC
1000 ~ 1070	油冷或空冷	52 ~ 57

注：加热温度过高，组织很容易粗化，淬火冷却时也极可能有碳化物沿晶界析出，一般淬火温度以 1030℃ 为宜。

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 5-146）。

表 5-146 4Cr3Mo2MnVB 钢推荐的回火工艺规范

回火温度/℃	硬度 HRC	回火后组织
600 ~ 650	41 ~ 49	回火索氏体 + 回火托氏体 + 未溶碳化物

② 回火温度与硬度的关系（表 5-147）

表 5-147 4Cr3Mo2MnVB 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	450	500	580	620	660	700
硬度 HRC	50.6 ~ 51	50 ~ 51	50.2 ~ 50.5	46 ~ 47.8	41.3 ~ 43	35.3 ~ 36.3

注：1030℃ 油冷。

(5) 力学性能

4Cr3Mo2MnVB（ER8）钢为空冷硬化型热作模具钢。钢中微量 B 元素使该钢抗热疲劳性能和抗氧化性能都较好，并可提高热稳定性和淬透性，使钢具有一定的热强性和高温硬度，其主要力学性能见表 5-148。

表 5-148 4Cr3Mo2MnVB 钢主要力学性能

力学性能 试验温度/℃	硬度	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	$a_K/(J/cm^2)$
室温	48HRC	1534	1375	11.6	40.8	13.6
300	445HV	1396	1250	12.2	50.3	29.5
600	392HV	906	820	19.3	64.6	36.8
650	364HV	721	648	21.4	71.3	35.6
700	296HV	500	437	24.7	83.2	40.1

注：试样经 1030℃ 加热油冷淬火，600℃ 和 610℃ 两次回火。

(6) 材料应用

4Cr3Mo2MnVB（ER8）钢抗疲劳性能和抗氧化性能好，目前广泛用于铜铝合金的压铸模和各类锻模。

7. 4Cr3Mo3SiV（H10）钢

(1) 化学成分

4Cr3Mo3SiV 钢的化学成分见表 5-149。

表 5-149 4Cr3Mo3SiV 钢的化学成分（质量分数）（%）

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
中国 (GB ^①)	4Cr3Mo3SiV	0.35 ~ 0.45	0.80 ~ 1.20	0.25 ~ 0.70	3.00 ~ 3.75	2.00 ~ 3.00	0.25 ~ 0.75	≤0.030	≤0.030
美国 (ASTM)	H10	0.35 ~ 0.45	0.80 ~ 1.25	0.20 ~ 0.70	3.00 ~ 3.75	2.00 ~ 3.00	0.25 ~ 0.75	≤0.030	≤0.030

① GB/T 1299—2000。

(2) 物理性能

1) 临界点温度（表 5-150）。

表 5-150 4Cr3Mo3SiV 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	M_s
温度（近似值）/℃	820	900	310

2) 密度为 7.8g/cm³。

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-151。

表 5-151 4Cr3Mo3SiV 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1160 ~ 1180	1040 ~ 1170	≥900	缓冷
钢坯	1150 ~ 1170	1120 ~ 1140	≥850	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 5-152）。

表 5-152 4Cr3Mo3SiV 钢预备热处理工艺规范

材料	加热温度/℃	保温时间	等温时间	冷却方式
棒材	860 ~ 880	2h + 1min/mm	—	炉冷至 500℃ 以下 出炉冷却
锻材	860 ~ 880	1h + 1min/mm	730℃ × 2h + 1min/mm	

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 5-153。

表 5-153 4Cr3Mo3SiV 钢推荐的淬火工艺规范

第一次预热	第二次预热	奥氏体化温度/℃	冷却介质	硬度 HRC
550℃ 均热	880℃ 均热	1030 ± 10	油	55 ~ 56

3) 回火。推荐的回火工艺规范见表 5-154。

表 5-154 4Cr3Mo3SiV 钢推荐的回火工艺规范

第一次回火	第二次回火	硬度 HRC
610℃ × 2h	615℃ × 2h	47.0 ~ 49.0

(5) 力学性能

4Cr3Mo3SiV (H10) 钢为引进美国的热作模具钢。该钢含 Cr、Mo、V 等碳化物形成元素较多, 韧度较好, 且在工作温度 500 ~ 600℃ 时, 具有高的硬度、热强性和耐磨性。该钢淬透性好, 耐回火性及热稳定性高, 具有很高的韧性, 冲击韧度及断裂韧度高, 抗氧化性能较好。

1) 室温力学性能 (表 5-155)。

表 5-155 4Cr3Mo3SiV 钢室温力学性能

试样硬度 HRC	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	KU /J	K_{Ic} /MPa · m ^{1/2}
47 ~ 49	1559	1356	10.1	34.1	16.9	41.2

2) 高温力学性能 (表 5-156)。

表 5-156 4Cr3Mo3SiV 钢高温力学性能

温度/℃	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	KU /J	维氏硬度 HV
300	1349	1218	10.4	29.3	20.5	471.5
600	888	779	20.3	69.8	25.2	409.0
650	651	596	19.5	60.7	20.9	360.5
700	298	261	31.2	81.6	23.2	278.5

3) 热稳定性 (表 5-157)。

表 5-157 4Cr3Mo3SiV 钢热稳定性

620℃ 时热稳定性			
保温时间/h	硬度 HRC	保温时间/h	硬度 HRC
0	47.5	11.5	38.6
2	44.1	14.5	37.6
4	43.8	17.5	35.4
6	42.2	21.0	33.8
8	41.3		
660℃ 时热稳定性			
0	46.9	5	31.5
1	40.3	7	29.8
2	34.9	9	29.5
3	33.8	12	26.8
700℃ 时热稳定性			
0	46.6	1.5	28.3
0.5	33.5	2	25.8
1	29.0	3	—

4) 疲劳性能 (表 5-158)。

表 5-158 4Cr3Mo3SiV 钢疲劳性能

试验状态	20℃←→650℃ (1000 次)	20℃←→700℃ (1000 次)
47~49HRC	7.6 级	15.6 级

(6) 材料应用

4Cr3Mo3SiV (H10) 钢为韧性较好的耐冲击热作模具钢, 由于该钢具有高冲击韧度及断裂韧度, 具有一定的硬度和耐磨性, 因此常用于制造承受冲击负荷较大的中、小型机锻模、热挤压模、热冲孔模及塑料模等, 主要用于铝合金压铸模。

8. 3Cr3Mo3W2V (HM1) 钢

(1) 化学成分

3Cr3Mo3W2V 钢的化学成分 (GB/T 1299—2000) 见表 5-159。

表 5-159 3Cr3Mo3W2V 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	P	S
0.32~0.42	0.60~0.90	≤0.65	2.80~3.30	2.50~3.00	1.20~1.80	0.80~1.20	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 5-160)。

表 5-160 3Cr3Mo3W2V 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	Ar_1	Ar_3	M_s
温度 (近似值)/℃	850	930	735	825	400

2) 线膨胀系数 (表 5-161)。

表 5-161 3Cr3Mo3W2V 钢线膨胀系数

温度/℃	25~100	25~200	25~300	25~400	25~500	25~600	25~700
线膨胀系数 $\alpha/\times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	10.4	12	11.06	12.27	12.53	13.35	13.58

3) 热导率 (表 5-162)。

表 5-162 3Cr3Mo3W2V 钢热导率

温度/℃	99.4	398.2	479.4	568	673.4
热导率 $\lambda/[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	31.8	30.9	31.8	31.8	31.8

4) 电导率 (表 5-163)。

表 5-163 3Cr3Mo3W2V 钢电导率

温度/℃	100	400	500	600	700
电导率 $\rho/\times 10\Omega \cdot \text{cm}$	46	70	79	88	101

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-164。

表 5-164 3Cr3Mo3W2V 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1170 ~ 1200	1100 ~ 1150	≥900	缓冷（砂冷或坑冷）
钢坯	1150 ~ 1180	1050 ~ 1100	≥850	缓冷（砂冷或坑冷）

注：3Cr3Mo3W2V 钢具有良好的热塑性，易锻造成形，开裂倾向低，但因含钼要注意加热和保温时避免严重脱碳。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 5-165）。

表 5-165 3Cr3Mo3W2V 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
球化退火工艺	加热温度为 870℃，保温 2 ~ 4h，炉冷至 730℃ 保温 4 ~ 6 h，炉冷至 500℃ 以下空冷，硬度 ≤255HBW。大截面工件在球化退火时易在晶界形成链状碳化物，降低钢的强韧性和疲劳强度，增大热裂倾向。在球化退火前先进行正火处理
正火处理 + 球化退火工艺	截面大的工件，在球化退火时，易在晶界形成链状碳化物，可进行正火 + 球化退火工艺，以改善或消除链状碳化物的出现。加热温度为 1060℃，空冷，正火后进行球化退火，可获得高强韧性组织
快速球化退火工艺	将工件加热至 850℃，以 40s/mm 保温，继续升温至 1050 ~ 1080℃，以 20s/mm 保温，油冷；再次升温至 860 ~ 920℃，以 1min/mm 保温，炉冷至低于 500℃ 出炉空冷。可获得非常均匀细小的球化组织，退火硬度 ≥229HBW，经最终热处理后，可获得高的强韧性

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 5-166）。

表 5-166 3Cr3Mo3W2V 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	淬火硬度 HRC
1060 ~ 1130	油	20 ~ 60	52 ~ 58

② 不同温度淬火后的硬度、晶粒度和残留奥氏体量（表 5-167）。

表 5-167 3Cr3Mo3W2V 钢不同温度淬火后的硬度、晶粒度和残留奥氏体量

淬火温度/℃	950	1050	1100	1130	1160	1200
淬火硬度 HRC	48	51.5	53	56	57.5	58
晶粒度级别	>10	>10	>10	10 ~ 9	9 ~ 8	8 ~ 7
残留奥氏体量（体积分数，%）	2.5	2.7	2.8	3.0	3.5	4.0

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 5-168）。

表 5-168 3Cr3Mo3W2V 钢推荐的回火工艺规范

回火目的	回火温度/℃	回火介质	回火硬度 HRC
提高耐磨性	640	空气	52 ~ 54
提高韧性	680	空气	39 ~ 41

② 回火温度与硬度的关系（表 5-169）。

表 5-169 3Cr3Mo3W2V 钢回火温度与硬度的关系

硬度 HRC 淬火条件	回火温度/℃					
		600	620	640	660	680
1060℃ 油淬		53	53.5	53.5	45	34
1130℃ 油淬		54	55	56	47.5	38.5

注：保温 1h。

(5) 力学性能

3Cr3Mo3W2V（HM1）钢是综合性能优异的高强韧性热作模具钢。其淬火温度范围较宽；具有高的热强性、热疲劳性能，又有良好的耐磨性和耐回火性等特点，且冷、热加工性能良好。

1) 耐回火性（表 5-170）。

表 5-170 3Cr3Mo3W2V 钢耐回火性

回火温度/℃	下列保温时间后的硬度 HRC			
	4h	6h	8h	12h
600	50	49.5	50.5	46.5
640	48	46.5	43.5	—
680	39.5	37.5	—	—

注：1. 1060℃ 淬火。

2. 在 1130℃ 淬火后，640℃ 回火时硬度下降到≤40HRC 所需时间为 8h。

2) 高温硬度（表 5-171）。

表 5-171 3Cr3Mo3W2V 钢高温硬度

温度/℃	400	500	600	700	750
高温硬度 HV	460	410	340	210	90

注：1050℃ 淬火，600℃ 回火。

3) 不同状态的抗弯强度和抗压强度（表 5-172）。

表 5-172 3Cr3Mo3W2V 钢不同状态的抗弯强度和抗压强度

热处理制度	抗弯强度/MPa	抗压强度/MPa
退火	6600	2600
1040℃ 油淬，620℃ 回火	3000	

4) 疲劳性能 (表 5-173)。

表 5-173 3Cr3Mo3W2V 钢与 3Cr2W8V 钢冷热疲劳性能比较

钢种	3Cr3Mo3W2V				3Cr2W8V			
循环温度/℃	20← →600							
循环次数	600	540	300	270	600	540	300	270
裂纹长度/mm	0.45	0.42	0.35	0.25	0.50	0.45	0.35	0.25

注：试样为 20mm×185mm×3mm，预制 V 型缺口，高频加热，循环水冷却，50s 循环一次。

(6) 材料应用

3Cr3Mo3W2V (HM1) 钢为综合性能优良的高强热作锻模钢。适合制造锻造、压力机锻造、挤压等热作模具，如制造高温、高负荷、急热急冷水冷条件下工作的压力机和轴承环热锻凹模、成形辊锻模，高强度和高热强钢零件的精锻模，铝和铜合金压铸模，热挤压模具零件，模具使用寿命较高。

9. 3Cr3Mo3VNb (HM3) 钢

(1) 化学成分

3Cr3Mo3VNb 钢的化学成分见表 5-174。

表 5-174 3Cr3Mo3VNb 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Nb	P	S
0.24 ~ 0.30	≤0.60	≤0.35	2.60 ~ 3.20	2.70 ~ 3.20	0.60 ~ 0.80	0.08 ~ 0.15	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 5-175)。

表 5-175 3Cr3Mo3VNb 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}	M_s
温度 (近似值)/℃	825	920	734	810	355

2) 线膨胀系数 (表 5-176)。

表 5-176 3Cr3Mo3VNb 钢线膨胀系数

温度/℃	28 ~ 100	28 ~ 200	28 ~ 310	28 ~ 400	28 ~ 500	28 ~ 600	28 ~ 700
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	10.07	10.81	11.58	11.94	12.28	12.64	12.91

3) 热导率 (表 5-177)。

表 5-177 3Cr3Mo3VNb 钢热导率

温度/℃	状态	100	200	300	400	500	600	700	850
热导率 $\lambda / [\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})]$	退火	0.084	0.085	0.086	0.086	0.086	0.086	0.084	0.075
	回火	0.072	0.074	0.076	0.077	0.078	0.078	0.078	0.075

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-178。

表 5-178 3Cr3Mo3VNb 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1170 ~ 1200	1120 ~ 1150	≥900	缓冷（坑冷或砂冷）
钢坯	1150 ~ 1180	1050 ~ 1100	≥850	缓冷（坑冷或砂冷）

注：1. 3Cr3Mo3VNb（HM3）钢在锻造状态和正火状态时易形成贝氏体组织。在淬火状态可得到板条状马氏体组织，并随淬火加热温度和冷却条件的不同含有体积分数分别为 5% ~ 18% 的残留奥氏体和 1% ~ 3% 的碳化物。

2. 3Cr3Mo3VNb（HM3）钢的碳化物在退火状态为 M_6C ， M_4C_3 和 NbC；在淬火状态为 M_2C ， V_4C_3 。大截面含 Nb 钢模具零件在缓慢冷却下，有形成晶界链状碳化物的倾向。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 5-179）。

表 5-179 3Cr3Mo3VNb 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
常规退火工艺	加热温度为 860 ~ 900℃，保温 2 ~ 3h；在 700 ~ 730℃，保温 3 ~ 5h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 180 ~ 200HBW
等温退火工艺	加热温度为 850 ~ 870℃，保温 2 ~ 4h；等温温度为 700 ~ 720℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，退火后硬度 ≤ 229HBW，组织为均匀细小的点状和粒状珠光体
快速球化退火工艺	将工件加热至 1030℃，按每 20s/mm 进行等温，油冷，升温至 800 ~ 850℃，以 2min/mm 进行等温，炉冷至 550℃ 出炉。退火后硬度 ≤ 200HBW，组织为均匀细小的点状和粒状珠光体。退火周期可缩短 1/3 以上，节约电能 20% 左右

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 5-180）。

表 5-180 3Cr3Mo3VNb 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	淬火冷却介质	硬度 HRC
1060 ~ 1090	油	47 ~ 49

② 淬火温度与硬度及晶粒度的关系（表 5-181）。

表 5-181 3Cr3Mo3VNb 钢淬火温度与硬度及晶粒度的关系

淬火温度/℃	1020	1060	1080	1090	1120
硬度 HRC	47	47.1	48.5	47.9	47.8
晶粒度/级	10	9 ~ 10	9	8 ~ 9	8 ~ 9

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 5-182）。

表 5-182 3Cr3Mo3VNb 钢推荐的回火工艺规范

回火工件	回火温度/℃	回火设备	回火硬度 HBC
锻造变形抗力小的工件	570 ~ 600	空气炉	47 ~ 49
锻造变形抗力大的工件	600 ~ 630	空气炉	42 ~ 47

② 不同温度回火后的硬度值和残留奥氏体量（表 5-183）。

表 5-183 3Cr3Mo3VNb 钢不同温度回火后的硬度值和残留奥氏体量

回火温度/℃ 回火次数		450	500	550	580	600	620	650
一次回火	硬度 HRC	48.5	48.5	49	49	48	45.5	39
	φ_{A_r} (%)	6.4	6.17	1.58	0.77	0	0	0
二次回火	硬度 HRC	48.5	49.5	49.5	49.5	48	45.5	41.0
	φ_{A_r} (%)	6.64	3.30	0.69	0.40	0	0	0

注：1080℃ 淬火。 φ_{A_r} 表示残留奥氏体的体积分数。

4) 表面强化处理。离子渗氮工艺规范见表 5-184。

表 5-184 3Cr3Mo3VNb 钢离子渗氮工艺

渗氮温度/℃	保持时间/h	层深/mm	表面硬度 HV0.5
460	10	0.12 ~ 0.16	1145 ~ 1320
530	10	0.28	1120
580	10	0.35	1095
640	10	0.35	810 ~ 824

(5) 力学性能

3Cr3Mo3VNb（HM3）钢为高强韧性热作模具钢，该钢热稳定性好，具有高的高温强度、高的断裂韧度与高温冲击韧度和高的疲劳强度，钢中的微量 Nb 元素提高了钢的耐回火性、热强性，有明显的回火硬化效果，具有优良的综合力学性能。但该钢有脱碳倾向。

1) 室温力学性能（表 5-185）。

表 5-185 3Cr3Mo3VNb 钢的室温力学性能

淬火温度 /℃	硬度 HRC	回火后 硬度 HRC	晶粒度 /级	R_m /MPa	R_{el} /MPa	A (%)	Z (%)	a_K / (J/cm ²)	K_{Ic} / MPa · m ^{1/2}
1060	47.1	48.1	9 ~ 10	1535	1352	11	59.8	26.3	36
1120	47.8	49.7	8 ~ 9	1646	1433	13	60.7	19	32

注：油淬，600℃ 回火。

2) 高温力学性能（表 5-186）。

表 5-186 3Cr3Mo3VNb 钢高温力学性能

试验温度/℃	室温	450	500	550	600	650
R_m /MPa	1600	1380	1200	1100	1000	750
$R_{p0.2}$ /MPa	—	—	—	800	650	550
Z (%)	59	64	63	62	61	69
A (%)	12	15	11	10	11.5	15

注：1080℃油淬，600℃回火。

3) 抗疲劳性能（表 5-187）。

表 5-187 3Cr3Mo3VNb 钢抗疲劳性能

循环周次/次	热疲劳裂纹长度/mm				
	距表面距离/mm				
	0.45	0.90	1.35	1.70	2.35
500	0.855	0.762	0.427	0.421	—
1000	1.857	1.901	1.292	1.170	0.605
1500	—	2.870	1.775	1.170	1.122
2000	—	—	2.156	1.120	1.340

注：热疲劳试验条件为 650℃←→259℃循环水冷。

4) 热疲劳性能对比（表 5-188）。

表 5-188 3Cr3Mo3VNb、4Cr5W2VSi、5CrNiMo 钢热疲劳性能对比

钢号	裂纹长度/mm	
	纵向	横向
3Cr3Mo3VNb	0.31	0.26
4Cr5W2VSi	0.45	0.42
5CrNiMo	3.39	1.20

(6) 材料应用

3Cr3Mo3VNb（HM3）钢为高强韧性热作模具钢，具有较好的综合力学性能，主要用于热锻成形凹模、连杆辊锻模、轴承套圈毛坯热挤压凹模、高强钢精锻模、小型机锻模、非铁金属合金如铝合金压铸模等。

10. 3Cr3Mo2WVSi（ZDM2）钢

(1) 化学成分

3Cr3Mo2WVSi 钢的化学成分见表 5-189。

表 5-189 3Cr3Mo2WVSi 钢的化学成分（质量分数） (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	P	S
0.32~0.40	0.60~1.00	0.40~0.60	2.80~3.20	1.00~2.00	0.50~1.20	0.50~1.20	≤0.030	≤0.030

(2) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 5-190)。

表 5-190 3Cr3Mo2WVSi 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
等温退火工艺	加热温度为 840 ~ 860℃, 保温 6 ~ 10h; 炉冷至 720℃, 保温 6 ~ 10h, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷
不完全等温退火工艺	加热至 840 ~ 860℃, 保温 6h, 710 ~ 730℃ 等温 6h, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷, 硬度为 197 ~ 229HBW, 加热温度在 A_{c1} ~ A_{c3} 线之间, 以获得粒状珠光体组织

注: 铸造模具预备热处理的目的是消除由于铸造、清理及切割冒口时产生的组织应力和热应力, 使模具的组织及性能均匀, 以减少最终热处理时的变形及开裂, 同时也为了降低硬度, 便于机械加工。

2) 淬火及回火工艺规范 (表 5-191)。

表 5-191 3Cr3Mo2WVSi 钢淬火及回火工艺规范

热处理工艺	工艺参数	硬度要求	工 艺 特 点
淬火	加热至 980 ~ 1030℃, 保温, 油冷	50 ~ 55HRC	加热时 Cr、Si、Mn、Mo、W 元素及少量的 V 元素溶入奥氏体中, 提高淬透性, 改善耐回火性。未溶 V 元素的碳化物细化晶粒, 改善强韧性及耐磨性
回火	加热至 600 ~ 650℃, 保温 2h, 空冷	41 ~ 44HRC	较高温度回火, 合金渗碳体及 V、Mo、W 元素的碳化物析出并聚集, 出现二次硬化效应

(3) 力学性能

3Cr3Mo2WVSi (ZDM2) 钢具有良好的淬透性, 较高的耐回火性和耐磨性, 抗冷热疲劳性好, 抗拉强度和断裂韧度较高, 但常温冲击韧度较差, 当加热至 200℃ 时, a_k 值明显增大。

(4) 材料应用

3Cr3Mo2WVSi (ZDM2) 钢为铸造模具钢, 主要用于制造陶瓷精铸模。适用于制作高速锤锻模、热冲模、热锻模、热滚压模和压塑模以及铜合金压铸模、精锻模、铝合金压铸模等。其高速锤锻模工作时自身温度不宜超过 600℃。

11. 42Cr9Si2 钢

(1) 化学成分

42Cr9Si2 钢的化学成分 (GB/T 1221—2007) 见表 5-192。

表 5-192 42Cr9Si2 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
0.35 ~ 0.50	2.00 ~ 3.00	≤0.70	8.00 ~ 10.00	≤0.60	≤0.035	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 5-193。

表 5-193 42Cr9Si2 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}
温度（近似值）/℃	900	970	810	870

（3）热加工

锻造工艺规范见表 5-194。

表 5-194 42Cr9Si2 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1100 ~ 1150	1080 ~ 1120	≥900	缓冷
钢坯	1050 ~ 1100	1030 ~ 1080	≥850	缓冷

（4）热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 5-195）。

表 5-195 42Cr9Si2 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	退火温度为 850 ~ 900℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 193 ~ 230HBW

2) 淬火及回火工艺规范（表 5-196）。

表 5-196 42Cr9Si2 钢淬火及回火工艺规范

淬火规范			回火规范 ^①		
淬火温度/℃	淬火冷却介质	硬度 HRC	回火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
1000 ~ 1050	油	58 ~ 63	700 ~ 750	快冷	28 ~ 32

① 42Cr9Si2 钢在 450 ~ 600℃ 范围内回火有回火脆性，因此在此回火温度范围内回火时，需快速冷却。

（5）力学性能

42Cr9Si2 钢为马氏体型耐热钢。具有较高的高温强度和耐热性，在 700℃ 高温下仍保持 30HRC 硬度，耐热磨损性能好。

（6）材料应用

42Cr9Si2 马氏体型耐热钢具有较高的高温强度和热硬性，但冷变形性能较差，变形时宜加热至 600℃ 以上。可作为热作模具钢、塑料模具钢使用。常用于制作耐热模具配件。

12. 40Cr10Si2Mo 钢

（1）化学成分

40Cr10Si2Mo 钢的化学成分（GB/T 1221—2007）见表 5-197。

表 5-197 40Cr10Si2Mo 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S
0.35 ~ 0.45	1.90 ~ 2.60	≤0.70	9.00 ~ 10.50	≤0.60	≤0.70 ~ 0.90	≤0.035	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 5-198。

表 5-198 40Cr10Si2Mo 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}
温度（近似值）/℃	910	925	840	860

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-199。

表 5-199 40Cr10Si2Mo 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
1180 ~ 1200	1100 ~ 1150	850 ~ 900	锻后缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 5-200）。

表 5-200 40Cr10Si2Mo 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 850 ~ 900℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火硬度为 217 ~ 248HBW

2) 淬火及回火工艺规范（表 5-201）。

表 5-201 4Cr10Si2Mo 钢淬火及回火工艺规范^①

淬火规范			回火规范	
淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度/℃	硬度 HRC
1020 ~ 1050	油冷或空冷	58 ~ 63	720 ~ 780	36 ~ 40

① 高温加热时间不宜过长，以避免表面脱碳使表面硬度降低、耐磨性变坏，同时可以避免含硅钢易产生的晶粒长大倾向。

(5) 力学性能

40Cr10Si2Mo 马氏体型耐热钢淬透性和耐热性能好，具有较高的高温强度和热硬性，在高温下仍保持足够的硬度，耐热磨损性能好。

(6) 材料应用

40Cr10Si2Mo 马氏体型耐热钢常作为耐热模具钢、塑料模具钢使用，一般用于制作耐热钢配件。冷加工性能差，冷变形时必须预热至 600 ~ 800℃。

5.2.3 高耐热性热作模具钢

高耐热性热作模具钢含碳量不高，但合金元素含量高，多数合金元素的质量分数为 8% ~ 10%。这类钢有高的耐热性，即高的高温强度和高温硬度，可以在 600 ~ 700℃ 高温下工作，同时具有高的耐磨性，淬透性好，有显著的二次硬化效果，好的耐回火性，较高的抗疲劳性和断裂韧度。塑性、韧性和抗疲劳性低于中耐热韧性钢。适用于制造要求高耐热性、耐磨性，韧性要求较低，形状不太复杂的模具。主要用于制造压力机镦锻模和挤压机上加工高强钢、不锈钢、钛合金、耐热合金等尺寸小于 150mm 的模具，以及在工作温度较高（680 ~ 690℃）、高磨损条件下工作的压铸模。

1. 3Cr2W8V（H21）钢

（1）化学成分

3Cr2W8V 钢的化学成分（GB/T 1299—2000）见表 5-202。

表 5-202 3Cr2W8V 钢化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	W	V	P	S
0.30 ~ 0.40 ^①	≤0.40	≤0.40	2.20 ~ 2.70	7.50 ~ 9.00	0.20 ~ 0.50	≤0.030	≤0.030

① 根据用户要求，碳质量分数可提高至 0.4% ~ 0.5%。

（2）物理性能

1) 临界点温度（表 5-203）。

表 5-203 3Cr2W8V 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}	M_s	M_f
温度（近似值）/℃	850	930	773	835	350	160

2) 线膨胀系数（表 5-204）。

表 5-204 3Cr2W8V（H21）钢线膨胀系数

温度/℃	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	12.0	12.3	12.7	13.1	13.5	13.9	14.5	14.5	12.8	13.3

3) 比热容（表 5-205）。

表 5-205 3Cr2W8V 钢比热容

温度/℃	100	200	300	500	800	900
比热容 $c_p / [\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})]$	468.2	473	478	685.5	1262.4	660.4

4) 热导率（表 5-206）。

表 5-206 3Cr2W8V 钢热导率

温度/℃	100	200	700	900
热导率 $\lambda / [\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})]$	20.1	22.2	24.3	23.0

5) 电阻率 (表 5-207)。

表 5-207 3Cr2W8V (H21) 钢电阻率

温度/℃	20	200	500	700	900
电阻率 $\rho/\times 10^{-6}\Omega\cdot\text{m}$	0.50	0.60	0.80	1.0	1.19

6) 其他物理性能 (表 5-208)。

表 5-208 3Cr2W8V 钢其他物理性能

密度/(g/cm ³)	弹性模量 E/MPa	剪切模量 G/MPa
7.74	214 000	73 000

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-209。

表 5-209 3Cr2W8V 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式 ^①
钢锭	1150 ~ 1200	1100 ~ 1150	850 ~ 900	先空冷, 后坑冷或砂冷
钢坯	1130 ~ 1160	1080 ~ 1120	850 ~ 900	先空冷, 后坑冷或砂冷

① 锻后要在空气中较快地冷却到 A_{c1} 以下 (约 700℃), 随后缓冷 (砂冷或炉冷), 也可以进行高温退火。如条件许可, 直接进行红装退火。

(4) 热处理

1) 预备热处理。

① 预备热处理工艺规范 (表 5-210)。

表 5-210 3Cr2W8V 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 800 ~ 820℃, 保温 2 ~ 4h, 以 < 30 ~ 40℃/h 炉冷至 600℃ 以下出炉空冷, 退火硬度为 207 ~ 255HBW, 组织为珠光体 + 碳化物
等温退火工艺	加热温度为 840 ~ 880℃, 保温 2 ~ 4h; 等温温度 720 ~ 740℃, 保温 2 ~ 4h (或 2h + 1min/mm), 炉冷至 550℃ 以下出炉空冷, 退火后硬度为 207 ~ 255HBW

② 退火后的硬度和组织 (表 5-211)。

表 5-211 3Cr2W8V 钢退火后的硬度和组织

硬度 HBW	金相组织	
	未退火	退火后
207 ~ 255	托氏体 + 马氏体	珠光体 + 碳化物

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范 (表 5-212)。

表 5-212 3Cr2W8V 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	淬火冷却介质	淬火冷却介质温度/℃	延续	冷却到 20℃	硬度 HRC
1050 ~ 1100	油	20 ~ 40	至 150 ~ 180℃	空气冷却	49 ~ 52

注：1. 大型模具采用加热温度的上限值，小型模具采用加热温度的下限值。

2. 大型模具应先在 600 ~ 650℃ 进行 1 ~ 2h 的预热，然后再继续升温。

3. 对于火焰炉，根据模具厚度，每 25mm 保温 40 ~ 50min。对于电炉加热，在火焰炉加热的基础上再增加加热时间 40%。

② 常用淬火工艺（表 5-213）。

表 5-213 3Cr2W8V 钢常用淬火工艺

淬 火 方 案	工 艺 参 数
等温淬火①	加热温度为 1150℃，在 350 ~ 450℃ 等温后油冷。组织为下贝氏体 + 马氏体，硬度可达 47HRC 以上。等温淬火后以低温回火为宜，温度 340 ~ 380℃
高温淬火②	加热至 1140 ~ 1150℃ 奥氏体化，油冷淬火后硬度可高达 55HRC，分级淬火硬度为 47HRC

① 等温淬火后获得的贝氏体组织有较高的强韧性，耐回火性也比常规热处理好得多，抗热冲性能比较高，模具变形小。可提高模具的使用寿命。

② 3Cr2W8V 钢的淬火加热温度提高，马氏体合金化程度也提高，模具热强性特别好，但韧性稍差，一般用于制造铜合金和铝合金挤压模、压铸模、压型模等受冲击力不太大、而要求有高热强性的模具。

③ 淬火温度与硬度的关系（表 5-214）。

表 5-214 3Cr2W8V 钢淬火温度与硬度的关系

淬火温度/℃	950	1050	1100	1150	1200	1250
硬度 HRC	44	49	52	55	56	57

3) 固溶超细化处理（表 5-215）。

表 5-215 3Cr2W8V 钢固溶超细化处理

工 艺	工 艺 参 数
固溶超细化处理	锻造毛坯在 1200 ~ 1250℃ 加热固溶，使碳化物基本溶入奥氏体中，然后淬入热油或沸水中，并立即进行高温回火或短时间等温球化处理。高温回火温度为 720 ~ 850℃（毛坯加工选上限，模具成品选下限）。最终热处理可以选用常规热处理工艺，1100℃ 油冷淬火

4) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 5-216）。

表 5-216 3Cr2W8V 钢推荐的回火工艺规范

回火目的	加热温度/℃	加热设备	冷却	硬度 HRC
消除应力，稳定组织和尺寸	600 ~ 620	电炉	空冷	40.2 ~ 47.4

- 注：1. 大型模具在淬火后应立即回火。一般需回火 2 次（620℃、600℃，每次 2 ~ 3h），形状复杂的大型模具，可采用 3 次回火。
2. 模具回火时，先装入 350 ~ 400℃ 的炉内停留 1 ~ 3h，然后将温度升至回火温度。
3. 回火保温时间按每 25mm 厚度为 40 ~ 45min 进行计算。

② 回火温度与硬度的关系（表 5-217）。

表 5-217 3Cr2W8V 钢回火温度与硬度的关系

硬度 HRC 回火温度/℃ 淬火条件	未回火	500	550	600	650	670	700
1050℃ 油淬	49	46	47	43	35	32	27
1075℃ 油淬	50	47	48	44	36	33	30
1100℃ 油淬	52	48	49	45	40	36	32
1150℃ 油淬	55	49	53	50	45	40	34

5) 表面处理。气体渗氮工艺规范见表 5-218。

表 5-218 3Cr2W8V 钢气体渗氮工艺规范

工艺	温度/℃	时间/h	介质	渗氮层	
				深度/mm	硬度 HV
气体渗氮	530	3 ~ 6	NH ₃ 分解率 30% ~ 60%	0.07 ~ 0.12	1000 ~ 1160

(5) 力学性能

3Cr2W8V 钢属于典型的高热强性热作模具钢。易形成碳化物的 W、Cr 元素含量高，因此，高温强度和热硬性高，具有较高的高温力学性能，但其韧性和塑性较差。该钢相变温度较高，抵抗冷热交替的耐热疲劳性能良好。淬透性好，钢材截面尺寸在 80mm 以下时可以淬透，耐回火性较高。

1) 不同回火温度的力学性能（表 5-219）。

表 5-219 3Cr2W8V 钢不同回火温度的力学性能

回火温度/℃	400	450	500	550	600	650
R_m /MPa	1800	4800	1800	1760	1620	1270
$R_{p0.2}$ /MPa	1400	1420	1450	1500	1410	
Z (%)	36	35.5	35	35.5	38	36
A (%)	18	14	13	12	8	12

注：1100℃ 油淬。

2) 高温硬度 (表 5-220)。

表 5-220 3Cr2W8V 钢高温硬度

温度/℃	300	450	600	650	700	750
试样原始硬度 HRC	高温硬度 HV					
48.8 ~ 49.1	479.5	448.5	414.5	398.5	354.5	208.5
42.0 ~ 43.0	390.0	386.5	332.0	304.0	268.0	203.5

3) 3Cr2W8V 钢与 4Cr5MoSiV1 (H13) 钢疲劳性能对比 (表 5-221)。

表 5-221 3Cr2W8V 钢与 4Cr5MoSiV1 钢疲劳性能对比

钢号	疲劳裂纹条数/条	裂纹长度/mm	
		总长度	平均长度
3Cr2W8V (H21)	125	2.81	0.023
4Cr5MoSiV1 (H13)	11	0.46	0.041

注: 试验条件为试样在铅浴中加热到 700℃, 然后在 20℃ 的水中急冷, 循环 1500 次。

(6) 材料应用

3Cr2W8V 钢为高热强性热作模具钢, 可以制造高温下承受高应力但冲击负荷不大的热作模具凸模、凹模, 如热挤压模的凹模、芯棒、顶杆, 平锻机的凸模、凹模、镶块, 铜合金挤压模、压铸用模具, 或用于制作同时承受较大压缩应力、弯曲应力和拉伸应力的反挤压模, 也用于制作高温下受力的热金属切削刀具。

2. 4Cr3Mo3W4VNb (GR) 钢

(1) 化学成分

4Cr3Mo3W4VNb 钢的化学成分见表 5-222。

表 5-222 4Cr3Mo3W4VNb 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Mo	Cr	W	V	Nb	Ti	P	S
0.37 ~ 0.47	≤0.50	≤0.50	2.00 ~ 3.00	2.50 ~ 3.50	3.50 ~ 4.50	1.00 ~ 1.40	0.10 ~ 0.20	0.10 ~ 0.20	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 5-223。

表 5-223 4Cr3Mo3W4VNb 钢临界点温度

临界点	Ac ₁	Ac ₃	Ar ₁	Ar ₃
温度 (近似值)/℃	821	880	752	850

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-224。

表 5-224 4Cr3Mo3W4VNb 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1150 ~ 1200	1100 ~ 1150	≥900	缓冷并及时退火
钢坯	1120 ~ 1180	1080 ~ 1130	≥900	缓冷并及时退火

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 5-225)。

表 5-225 4Cr3Mo3W4VNb 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
等温退火工艺	加热温度为 850℃, 保温 2 ~ 4h; 等温温度为 720℃, 保温 2 ~ 4h, 炉冷到 550℃ 以下出炉空冷

2) 淬火及回火工艺规范 (表 5-226)。

表 5-226 4Cr3Mo3W4VNb 钢淬火及回火工艺规范

淬 火 ^①			回 火
淬火温度/℃	淬火冷却介质	硬度 HRC	
1160 ~ 1200	油	≥55	回火温度为 630℃、600℃, 2 次回火, 每次 2 ~ 3h。形状复杂的大型模具可以采用 3 次回火, 回火后硬度为 50 ~ 54HRC

① 若要求高韧性及塑性, 则选用较低的淬火温度; 如要求高的 高温强度及耐回火性, 则选用较高的 淬火温度。

(5) 力学性能

4Cr3Mo3W4VNb (GR) 钢为钨钼系热作模具钢。有良好的热强性和热稳定性, 抗冷热疲劳性能较好, 具有较高的室温及高温力学性能。

1) 抗冷热疲劳性能比较 (表 5-227)。

表 5-227 4Cr3Mo3W4VNb 钢与 3Cr2W8V 钢抗冷热疲劳性能比较

钢号	硬度 HRC	裂纹条数/条	裂纹深度总和/mm	最大裂纹深度/mm
4Cr3Mo3W4VNb (GR)	50	8	0.68	0.119
3Cr2W8V	48	14	4.53	1.34

2) 热稳定性比较 (表 5-228)。

表 5-228 4Cr3Mo3W4VNb 钢与 3Cr2W8V 钢热稳定性比较

钢号	4Cr3Mo3W4VNb (GR)						3Cr2W8V					
保温时间/h	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5
硬度 HRC	50	47.5	45	42.5	41	39.5	48	44	41	37.5	34.5	32.5

注: 保温温度为 680℃。

3) 室温及高温力学性能 (表 5-229)。

表 5-229 4Cr3Mo3W4VNb 钢室温及高温力学性能

试验温度/℃	R_m /MPa	R_{cl} /MPa	A (%)	Z (%)	$a_K/(J/cm^2)$	硬度 HRC
室温	1880	1500	6.7	20.0	16	52
600	1440	1160	1.25	3.0	23	—
650	1220	1030	2.0	3.0	26	—
750	675	580	3.75	18.0	110	—

(6) 材料应用

4Cr3Mo3W4VNb (GR) 钢具有较高的室温及高温力学性能。主要用于制造加工高温金属的热锻压模具,如热锻锻模、热冲模、热挤压模等。

3. 4Cr3Mo2MnVNbB (Y4) 钢

(1) 化学成分

4Cr3Mo2MnVNbB 钢的化学成分见表 5-230。

表 5-230 4Cr3Mo2MnVNbB 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	B	Nb	P	S
0.36 ~ 0.42	0.25 ~ 0.50	0.90 ~ 1.30	2.20 ~ 2.70	2.00 ~ 2.50	0.90 ~ 1.30	0.002 ~ 0.006	0.04 ~ 0.10	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 5-231。

表 5-231 4Cr3Mo2MnVNbB 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	M_s
温度 (近似值)/℃	789	910	263

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-232。

表 5-232 4Cr3Mo2MnVNbB 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1150 ~ 1200	1100 ~ 1150	850 ~ 900	缓冷
钢坯	1130 ~ 1160	1080 ~ 1120	850 ~ 900	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 5-233)。

表 5-233 4Cr3Mo2MnVNbB 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
等温退火工艺	加热温度为 840 ~ 860℃, 保温 2 ~ 4h, 等温温度为 680℃, 保温 4 ~ 6h, 炉冷 550℃ 出炉空冷

2) 淬火与回火工艺规范 (表 5-234)。

表 5-234 4Cr3Mo2MnVNbB 钢淬火与回火工艺规范

淬 火 规 范			回 火 规 范
淬火温度/℃	淬火冷却介质	硬度 HRC	回火温度为 600 ~ 630℃, 回火时间为 2h, 回火 2 次, 硬度为 44 ~ 52HRC
1050 ~ 1100	油	58 ~ 59	

(5) 力学性能

4Cr3Mo2MnVNbB (Y4) 钢高温强度高, 热稳定性较好, 具有高的热强性和抗冷热疲劳性能, 具有较好的综合力学性能 (表 5-235), 是比较理想的制作铜合金压铸模材料。

表 5-235 4Cr3Mo2MnVNbB 钢室温及高温力学性能

力学性能 试验温度/℃	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	$a_K/(J \cdot cm^2)$
室温	1455	1292	12.5	42.2	5.9
300	1494	1328	7.8	19.0	12.2
600	978	861	10	15.4	27.3
650	815	719	5.6	7.8	17.5
700	605	534	4.3	11.6	27.5

注: 1100℃油淬, 640℃回火 2 次。

(6) 材料应用

4Cr3Mo2MnVNbB (Y4) 钢是针对铜合金压铸模而设计出来的新型热压铸模具钢, 是比较理想的铜合金压铸模材料, 也常用于制造热挤压模、热锻模等。

4. 4Cr5Mo2MnVSi (Y10) 钢

(1) 化学成分

4Cr5Mo2MnVSi 钢的化学成分见表 5-236。

表 5-236 4Cr5Mo2MnVSi 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Al	P	S
0.36 ~ 0.42	1.00 ~ 1.50	0.70 ~ 1.50	4.50 ~ 5.50	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	≤0.05	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 5-237。

表 5-237 4Cr5Mo2MnVSi 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	Ar_1	M_s
温度 (近似值)/℃	815	893	710	271

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-238。

表 5-238 4Cr5Mo2MnVSi 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1120 ~ 1150	1070 ~ 1140	850 ~ 900	缓冷，立即回火

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 5-239）。

表 5-239 4Cr5Mo2MnVSi 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
等温退火工艺	加热温度为 840 ~ 860℃，保温 2 ~ 4h；等温温度为 680℃，保温 4 ~ 6h，炉冷到 550℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 170 ~ 187HBW，退火组织为点状珠光体 + 少量分散分布的亚稳定共晶碳化物

2) 淬火及回火工艺规范（表 5-240）。

表 5-240 4Cr5Mo2MnVSi 钢淬火及回火工艺规范^①

淬火规范			回火规范 ^②	
淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度/℃	硬度 HRC
950 ~ 1050	油冷	50 ~ 56	550 ~ 620	42 ~ 51

① 采取 1050℃ 油淬，650℃ 回火 2 次，硬度为 39HRC。

② 采取下限温度（550℃）回火，硬度为 50 ~ 51HRC。

(5) 力学性能

4Cr5Mo2MnVSi（Y10）钢淬透性较高，耐回火性好，具有高的高温强度、热硬性和抗冷热疲劳性能及良好的韧性，且冲击韧度和断裂韧度较高，抗熔蚀性能好。

1) 力学性能（表 5-241）。

表 5-241 4Cr5Mo2MnVSi 钢的力学性能

力学性能 试验温度/℃	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	a_K (J/cm ²)
室温	1724	1563	5.4	20.9	15.6
300	1319	1122	10.8	48.2	31.3
600	803	716	25.7	78.3	48.7
650	527	470	26.8	87.3	52.1
700	274	224	41	95	60.5

注：1020℃ 油淬，595℃ 回火 2h。

2) 热稳定性比较（表 5-242）。

表 5-242 4Cr5Mo2MnVSi 钢与 3Cr2W8V 钢热稳定性比较

试验温度/℃		660					700				
保温时间/h		0	0.5	1	2	3	0	0.5	1	2	3
硬度 HRC	4Cr5Mo2MnVSi	50	43.2	39.2	34.6	33.1	47.6	32.5	30	29.2	29
	3Cr2W8V	49	—	—	45.8	43.5	50	44	40	37.2	34.5

注：保温温度为 680℃。

3) 热疲劳性能比较（表 5-243）

表 5-243 4Cr5Mo2MnVSi 钢与 3Cr2W8V 钢热疲劳性能比较

钢种	裂纹	裂纹条数/条				最大裂纹长度
		≤0.05mm	>0.05 ~ 0.10mm	>0.10 ~ 0.15mm	>0.15mm	/mm
4Cr5Mo2MnVSi		5	1	2	2	0.33
3Cr2W8V		16			127	0.55

4) 抗熔蚀性比较（表 5-244）。

表 5-244 4Cr5Mo2MnVSi 钢与 3Cr2W8V 钢抗熔蚀性比较

钢号	失重/g	失重/(g/dm ³)
4Cr5Mo2MnVSi	4.153	16.57
3Cr2W8V	5.056	20.18

(6) 材料应用

4Cr5Mo2MnVSi（Y10）钢是针对铝合金压铸特点而研制的新型热作模具钢，主要用于制造铝合金压铸模，也用于制造热挤压模、热冲模、热锻模及塑料模具等。

5. 4Cr3Mo2VNb（HD）钢

(1) 化学成分

4Cr3Mo2VNb 钢的化学成分见表 5-245。

表 5-245 4Cr3Mo2VNb 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Nb	P	S
0.35 ~ 0.45	≤0.35	≤0.40	2.50 ~ 3.00	1.80 ~ 2.20	0.80 ~ 1.20	1.00 ~ 1.40	0.10 ~ 0.25	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 5-246。

表 5-246 4Cr3Mo2VNb 临界点温度

临界点	A_{c1}	M_s
温度（近似值）/℃	770	320

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-247。

表 5-247 4Cr3Mo2VNb 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1100 ~ 1150	1000 ~ 1050	≥850	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 5-248）。

表 5-248 4Cr3Mo2VNb 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	加热温度为 840 ~ 860℃，保温 4h，炉冷到 550℃ 以下出炉空冷

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 5-249）。

表 5-249 4Cr3Mo2VNb 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度	冷却方式	淬火后硬度 HRC
1130	油冷	53.5

② 淬火温度与硬度、晶粒度的关系（表 5-250）

表 5-250 4Cr3Mo2VNb 钢淬火温度与硬度、晶粒度的关系

淬火温度/℃	1050	1100	1130	1160	1180	1200
硬度 HRC	50.5	53.5	53.5	56.0	56.0	56.5
晶粒度/级	—	11	10	8 ~ 9	7 ~ 8	7 ~ 8

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 5-251）。

表 5-251 4Cr3Mo2VNb 钢推荐的回火工艺规范

回火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
650 ~ 700	油冷或空冷	40 ~ 47

② 不同温度回火后的硬度值（表 5-252）。

表 5-252 4Cr3Mo2VNb 钢与 3Cr2W8V 钢不同温度回火后的硬度值

回火温度/℃		300	400	500	530	560	590	620	650	700
硬度 HRC	4Cr3Mo2VNb	52.5	52.0	52.5	53.5	54.0	53.8	51.2	47.0	41.0
	3Cr2W8V	51.0	51.0	51.4	52.3	51.5	51.8	51.0	46.0	34.0

注：淬火温度为 1130℃

(5) 力学性能

4Cr3Mo2VNb（HD）钢具有较高的热稳定性，高温韧性、抗冷热疲劳性能和热磨损性能好，具有良好的室温与高温力学性能。

1) 室温力学性能比较 (表 5-253)。

表 5-253 4Cr3Mo2VNb (HD) 钢与 3Cr2W8V 钢的室温力学性能比较

热处理工艺	$R_{p0.2}/\text{MPa}$		$Z (\%)$		$a_K/(J/\text{cm}^2)$	
	HD	3Cr2W8V	HD	3Cr2W8V	HD	3Cr2W8V
1130℃ 淬火 650℃ 回火	1633	1463	32.4	41.8	38.8	—
1130℃ 淬火 700℃ 回火	1165	952	45.7	41.9	48.8	—

2) 高温力学性能比较 (表 5-254)。

表 5-254 4Cr3Mo2VNb (HD) 钢与 3Cr2W8V 钢的高温力学性能比较

试验温度/℃	$R_{p0.2}/\text{MPa}$		$Z (\%)$		$a_K/(J/\text{cm}^2)$	
	HD	3Cr2W8V	HD	3Cr2W8V	HD	3Cr2W8V
650	536.9	414	66.1	49.1	56/54	—
700	405.3	235	69.3	85.4	75/40	62/38

注： a_K 值中分母为硬度值 (HRC)。

(6) 材料应用

4Cr3Mo2VNb (HD) 钢主要用于钢铁及非铁金属及其合金热挤压模。常用于制造钢质药管热挤压凸模、铜合金管材挤压底模和穿孔针、热挤压轴承环凸模与凹模、气门挤压底模等模具。4Cr3Mo2VNb 钢应用效果见表 5-255。

表 5-255 4Cr3Mo2VNb 钢应用效果

模具名称	产品材料	HD 钢寿命/支	3Cr2W8V 钢寿命/支
铜管挤压底模	70 - 1 锡黄铜	420	150 左右
铜管挤压底模	10 - 1 - 1 铁白铜	59	25 左右
热挤压凸模	低碳钢	420	150 左右
穿孔针	70 - 1 锡黄铜	240	120
挤压底模	42Cr9Si2	2500	1500 左右
218 轴承凸模	GCr15	10000	—
218 轴承凹模	GCr15	11 000 还可用	—

6. 4Cr3Mo2WVMn (TM) 钢

(1) 化学成分

4Cr3Mo2WVMn 钢的化学成分见表 5-256。

表 5-256 4Cr3Mo2WVMn 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	P	S
0.35 ~ 0.45	0.20 ~ 0.40	0.90 ~ 1.20	2.40 ~ 2.80	1.80 ~ 2.20	1.10 ~ 1.30	1.00 ~ 1.30	≤0.030	≤0.030

(2) 热加工

锻造工艺规范见表 5-257。

表 5-257 4Cr3Mo2WVMn 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1150 ~ 1200	1100 ~ 1150	850 ~ 900	缓冷（砂冷或坑冷）

(3) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 5-258）。

表 5-258 4Cr3Mo2WVMn 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
等温退火工艺	加热温度为 840 ~ 860℃，保温 4h；炉冷至 720℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷

2) 淬火及回火工艺规范（表 5-259）。

表 5-259 4Cr3Mo2WVMn 钢淬火及回火工艺规范

淬火规范			回火规范	
淬火温度/℃	淬火冷却介质	硬度 HRC	回火温度/℃	硬度 HRC
1050 ~ 1100	油	≥50	570 ~ 650	45 ~ 50

(4) 力学性能

4Cr3Mo2WVMn（TM）钢具有高的的高温强度及缺口冲击韧度，高的热强性、热疲劳性，良好的耐磨性和耐回火性等，具有良好的综合力学性能。

(5) 材料应用

4Cr3Mo2WVMn（TM）钢具有良好的综合力学性能，常用于制造各种热挤压模具零件，如热挤压模冲头等。

7. 5Cr4Mo2W2VSi 钢

(1) 化学成分

5Cr4Mo2W2VSi 钢的化学成分见表 5-260。

表 5-260 5Cr4Mo2W2VSi 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	P	S
0.45 ~ 0.55	0.80 ~ 1.10	≤0.50	3.70 ~ 4.30	1.80 ~ 2.20	1.80 ~ 2.20	1.00 ~ 1.30	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度（表 5-261）。

表 5-261 5Cr4Mo2W2VSi 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	Ar_1	Ar_3	M_s	M_f
温度（近似值）/℃	810	885	700	785	290	175

2) 线膨胀系数（表 5-262）。

表 5-262 5Cr4Mo2W2VSi 钢线膨胀系数

温度范围/℃	22 ~ 100	22 ~ 200	22 ~ 300	22 ~ 400	22 ~ 500	22 ~ 600	22 ~ 700
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	11.5	12.1	12.5	13.0	13.3	13.5	13.6

3) 弹性模量 (表 5-263)。

表 5-263 5Cr4Mo2W2VSi 钢弹性模量

温度/℃	室温	100	200	300	400	500	600	700
弹性模量 E/MPa	223 000	219 000	212 000	206 000	198 000	188 000	177 000	170 000

4) 密度为 $7.84\text{g}/\text{cm}^3$ 。

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-264。

表 5-264 5Cr4Mo2W2VSi 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1150 ~ 1180	1100 ~ 1140	≥ 900	坑冷或砂冷
钢坯	1130 ~ 1160	1080 ~ 1100	≥ 850	坑冷或砂冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 5-265)。

表 5-265 5Cr4Mo2W2VSi 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
一般退火工艺	加热温度为 $880 \sim 900^{\circ}\text{C}$, 保温 $2 \sim 4\text{h}$, 炉冷至 500°C 以下出炉空冷, 退火后硬度 $\leq 207\text{HBW}$
等温退火工艺	加热温度为 $880 \sim 900^{\circ}\text{C}$, 保温 $2 \sim 4\text{h}$, 炉冷至 $750 \sim 780^{\circ}\text{C}$, 保温 $8 \sim 12\text{h}$, 炉冷至 500°C 以下出炉空冷, 硬度 $\leq 207\text{HBW}$
消除应力退火工艺	加热温度为 $710 \sim 730^{\circ}\text{C}$, 保温 $3 \sim 4\text{h}$, 以 $< 30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 随炉冷却到 500°C 以下出炉空冷

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范 (表 5-266)。

表 5-266 5Cr4Mo2W2VSi 钢推荐的淬火工艺规范

预热温度/℃	淬火温度/℃	淬火冷却介质	出油温度/℃	硬度 HRC
500 ~ 580	1080 ~ 1120	油	150 ~ 200	61 ~ 63

② 淬火温度与硬度、晶粒度及残留奥氏体量的关系 (表 5-267)。

表 5-267 5Cr4Mo2W2VSi 钢淬火温度与硬度、晶粒度及残留奥氏体量的关系

淬火温度/℃	950	1000	1040	1080	1100	1120	1140	1160	1180	1200
硬度 HRC	54.7	57.0	58.2	61.8	62.3	63.4	63.1	62.0	61.9	61.6
晶粒度/级	—	—	—	>8	>8	8	7~8	6~7	5~6	4
残留奥氏体量 (体积分数, %)	—	2	3	4	4	6	6	7	—	7

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范 (表 5-268)。

表 5-268 5Cr4Mo2W2VSi 钢推荐的回火工艺规范

回火温度/℃	加热设备	保温时间	冷却方式	硬度 HRC
600~620	熔融盐浴炉或电炉	2h	空气	52~54

② 回火温度与硬度的关系 (表 5-269)。

表 5-269 5Cr4Mo2W2VSi 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬火后	300	400	450	500	540	570	600	650	700
硬度 HRC	61	57	57.5	58.5	61.5	60	58	56.5	48	35.5

注: 1100℃油淬, 回火 2h。

(5) 力学性能

5Cr4Mo2W2VSi 钢是一种新型冷热兼用基体钢。具有高的硬度、强度, 高的耐磨性、高温强度以及良好的耐回火性, 还具有一定的韧性和抗冷热疲劳性能, 综合力学性能优良。5Cr4Mo2W2VSi 钢的抗拉强度见表 5-270。

表 5-270 5Cr4Mo2W2VSi 钢的抗拉强度

淬火条件	下列温度回火后的 R_m /MPa				
	300℃	400℃	500℃	600℃	650℃
1080℃油淬	2070	2210	2182	2055	1870
1120℃油淬	2075		2070	2215	2055

(6) 材料应用

5Cr4Mo2W2VSi 钢是一种冷热兼用型模具钢。热加工性能较好, 加工温度范围较宽。适于制造热挤压模、热锻模、温锻模以及要求韧性较好的冷锻用模具。

8. 4SiMnW3Mo2VN 钢

(1) 化学成分

4SiMnW3Mo2VN 钢的化学成分见表 5-271。

表 5-271 4SiMnW3Mo2VN 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Mo	W	V	N
0.35 ~ 0.45	0.90 ~ 1.20	1.20 ~ 1.70	1.70 ~ 2.30	3.00 ~ 4.00	0.80 ~ 1.20	0.02 ~ 0.06

(2) 热加工

锻造工艺规范见表 5-272。

表 5-272 4SiMnW3Mo2VN 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1180 ~ 1220	1100 ~ 1180	≥950	锻后砂冷

(3) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 5-273）。

表 5-273 4SiMnW3Mo2VN 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
锻后退火工艺	(860 ± 10)℃ × 2h，随炉降温，(680 ± 10)℃ × 5h，炉冷到温度 ≤ 500℃，出炉空冷，硬度为 229HBW
球化退火工艺	(860 ~ 900)℃ × (2 ~ 4) h，随炉降温，(700 ~ 730)℃ × (3 ~ 4) h，炉冷至 ≤ 550℃，出炉空冷，退火硬度为 180 ~ 190HBW

2) 淬火及回火工艺工艺规范（表 5-274）。

表 5-274 4SiMnW3Mo2VN 钢淬火及回火工艺规范

淬火规范			回火规范	
淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度	硬度 HRC
1140	油冷	>50	660	50

(4) 力学性能

4SiMnW3Mo2VN 钢具有较高的硬度、耐磨性、热硬性，足够的强度及高的淬透性，淬火后硬度梯度平缓，有优良的耐回火性，但碳化物分布不均匀，韧性较差。

(5) 材料应用

4SiMnW3Mo2VN 钢退火态供货，主要用于制造精锻模、高速锤锻模和热挤压模等，例如，制造汽车行星齿轮的高速锤锻凹模，使用寿命可达 2500 件以上。

5.2.4 奥氏体型热作模具钢

1. 奥氏体型热作模具钢的类型（表 5-275）

表 5-275 奥氏体型热作模具钢的类型

类 型	特 点
高锰系奥氏体钢	包括 5Mn15Cr8Ni5Mo3V2、7Mn10Cr8Ni10Mo3V2 和 7Mn15Cr2Al3V2WMo 钢。这类钢易产生加工硬化，在 880℃退火后，可提高其加工性能。固溶处理的加热温度为 1150 ~ 1200℃，然后水淬，热处理后的组织为奥氏体 + 少量未溶碳化物，硬度为 20HRC，固溶后在 700℃长时间高温时效，弥散析出细小 MC、M ₂₃ C ₆ 、M ₇ C 型等碳化物，在 800℃时硬度为 42HRC，900℃时产生过时效。适于制造使用温度高于 700℃但低于 900℃、工作应力较高、形状简单的模具，例如铜合金挤压模、钢或高温合金挤压模、用于粉末烧结的模具等
铬镍系奥氏体钢	铬镍系奥氏体钢包括 45Cr14Ni14W2Mo、Cr14Ni25Co2V。这类钢在 650℃以下有良好的力学性能，在 600 ~ 800℃时易因强烈的时效而强化，在 800℃以下耐热不起皮，在 900℃以下耐蚀性高。适宜于制造发动机进、排气门及蒸汽或气体管道。由于抗氧化性好，可用于制造钛合金蠕变成型模、强腐蚀性玻璃成型模及压铸用型芯等热作模具

注：高锰系奥氏体钢 5Mn15Cr8Ni5Mo3V2、7Mn10Cr8Ni10Mo3V2、7Mn15Cr2Al3V2WMo 在第 4 章冷作模具钢无磁模具钢部分已介绍。

2. 典型铬镍系奥氏体型热作模具钢

(1) 45Cr14Ni14W2Mo 钢

1) 化学成分。45Cr14Ni14W2Mo 钢的化学成分（GB 1221—2007）见表 5-276。

表 5-276 45Cr14Ni14W2Mo 钢化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	P	S
0.40 ~ 0.50	≤0.80	≤0.70	13.00 ~ 15.00	13.00 ~ 15.00	2.00 ~ 2.75	0.25 ~ 0.40	≤0.040	≤0.030

注：45Cr14Ni14W2Mo 钢能耐高温、耐蚀、抗氧化，组织比较稳定，在加热和冷却过程中不发生相变，具有很高的高温强度和耐热性，但线膨胀系数大、导热性差，降低了钢的热疲劳性能，不适宜作为强烈水冷的模具材料。

2) 热加工。45Cr14Ni14W2Mo 钢锻造工艺规范见表 5-277。

表 5-277 45Cr14Ni14W2Mo 钢锻造工艺规范

装炉方法	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
冷装炉不高于 800℃， 热装炉不限	1160 ~ 1180	1110 ~ 1130	≥850	成堆空冷

注：45Cr14Ni14W2Mo 钢导热性差（锻压前应均匀加热），变形阻力大、加工困难，钢锭表面及内部易产生裂纹，锻造时变形必须缓慢，以减少裂纹形成，停锻温度应较高。

3) 热处理。

① 预备热处理工艺规范（表 5-278）。

表 5-278 45Cr14Ni14W2Mo 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
正火	加热温度为 860 ~ 880℃，空冷，硬度为 217 ~ 248HBW，正火后可获得细晶奥氏体组织

② 固溶处理工艺规范（表 5-279）。

表 5-279 45Cr14Ni14W2Mo 钢固溶处理工艺规范

工 艺	工 艺 参 数
固溶处理	温度为 1000 ~ 1100℃，水冷，组织为奥氏体，硬度为 217 ~ 248HBW

③ 推荐的淬火工艺规范（表 5-280）。

表 5-280 45Cr14Ni14W2Mo 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	淬火冷却介质	淬火后硬度 HBW	淬火后组织
1170 ~ 1200	水	217 ~ 248	加热时 Cr、Mo、Ni、W 元素溶入奥氏体中，获得单相过饱和的奥氏体组织

④ 时效处理工艺规范（表 5-281）。

表 5-281 45Cr14Ni14W2Mo 钢时效处理工艺规范

时效温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	时效后组织
750	空冷	32 ~ 38（组织为奥氏体）	合金渗碳体及 Cr、Mo、W 元素的碳化物析出并聚集，形成时效硬化

4) 加工性能（表 5-282）。

表 5-282 45Cr14Ni14W2Mo 钢加工性能

性能	特 点
切削加工性能	切削加工性能较差，需要使用优质刀具，切削速度要低，进给量要小
焊接性	焊接性较差，由于有产生硬化和应力裂纹的危险，所以通常不用 45Cr14Ni14W2Mo 钢制作焊接件，不能避免焊接时，必须经较高温度预热，焊后必须进行热处理（退火或调质）

5) 力学性能

45Cr14Ni14W2Mo 钢属于奥氏体型钢，在 650℃ 以下有良好的力学性能；在 600 ~ 800℃ 时，易因强烈的时效而强化；在 800℃ 以下耐热不起皮；在 900℃ 以下耐气体腐蚀能力高。该钢组织比较稳定，在加热和冷却过程中均不发生相变，具有很高的的高温强度和耐热性，但线膨胀系数大，导热性差，降低了钢的热疲劳性能，不适宜制造强烈水冷的模具。

6) 材料应用

45Cr14Ni14W2Mo 钢适宜于制造发动机进、排气门及蒸汽或气体管道。由于抗氧化性好,可用于制造钛合金蠕变成型模、强腐蚀性玻璃成形模及压铸用型芯等热作模具。

(2) Cr14Ni25Co2V 钢

Cr14Ni25Co2V 钢属于铬镍系奥氏体钢。在 700℃ 以下有良好的热强性,在 800℃ 以下有良好的抗氧化性,在 900℃ 以下耐蚀性高。适宜于制造发动机进、排气门和制造钛合金蠕变成形模等热作模具。其加工工艺、热处理规范及应用范围与 45Cr14Ni14W2Mo 钢类似。

5.2.5 析出硬化型热作模具钢

1. 析出硬化型热作模具钢的特点 (表 5-283)

表 5-283 析出硬化型热作模具钢的特点

性 能	材 料 特 点
含碳量较低,韧性好	一般含碳量(质量分数)为 0.2% 左右,并且含有一些沉淀硬化的合金元素,如 V、Ni、Mo 等,淬火后宜采用较低温度回火(≈400℃),硬度为 40HRC 左右。由于碳含量低,中温回火后钢的组织为板条状低碳马氏体,具有良好的韧性
使用温度下产生沉淀硬化可提高模具使用寿命	模具在使用过程中,与高温工件接触的型腔表面被工件加热到钢的沉淀硬化温度(500~600℃),型腔表面由于合金碳化物和金属间化合物的析出,硬度可以上升到 45~48HRC,提高了型腔表面的耐磨性,模具心部仍保持原有的组织和高韧性,从而提高了模具的使用寿命
加工性能好	制作模具在淬火和低温回火后进行机械加工,此时模具的硬度约为 40HRC,加工后直接使用。钢中加入一定量的微合金元素,是为改善钢的冲击韧度及切削加工性能,具有很好的切削加工性能,可以进行型腔加工
不存在热处理畸变和表面氧化脱碳	由于模具是在机械加工前进行热处理,不存在热处理畸变和表面氧化脱碳问题,且切削加工性能好,因此,适宜制造高精度、高密封、镜面、复杂的模具,如锌合金压铸模、精密冷作模具和大中型精密注射模等

2. 典型析出硬化型热作模具钢

2Cr3Mo2NiVSi (PH) 钢的性能与应用。

(1) 化学成分

2Cr3Mo2NiVSi 钢的化学成分见表 5-284。

表 5-284 2Cr3Mo2NiVSi 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Zr
0.16 ~ 0.22	0.40 ~ 0.70	0.60 ~ 0.90	2.54 ~ 3.00	0.80 ~ 1.20	1.80 ~ 2.20	0.30 ~ 0.50	0.05 ~0.12

(2) 物理性能

临界点温度见表 5-285。

表 5-285 2Cr3Mo2NiVSi 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	Ar_1
温度 (近似值)/℃	776	851	672

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 5-286。

表 5-286 2Cr3Mo2NiVSi 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
1100 ~ 1150	1000 ~ 1100	≥850	炉冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 5-287)。

表 5-287 2Cr3Mo2NiVSi 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
常规退火工艺	加热温度为 780℃, 保温 2 ~ 3h, 冷却速度 ≤40℃/h, 冷到 680℃ 后随炉冷却, 退火硬度为 217 ~ 229HBW

2) 淬火与回火工艺规范 (表 5-288)。

表 5-288 2Cr3Mo2NiVSi 钢淬火与回火工艺规范

淬 火 规 范	回 火 规 范
淬火温度为 900 ~ 1020℃, 油冷 (截面尺寸 >100mm) 或者空冷 (截面尺寸 ≤100mm)	回火温度为 370 ~ 400℃, 硬度为 40 ~ 45HRC; 回火温度为 525 ~ 550℃, 硬度为 47 ~ 49HRC

(5) 力学性能

2Cr3Mo2NiVSi (PH) 钢为析出硬化型热作模具钢。在淬火和低温回火后进行机械加工, 此时的模具硬度为 40HRC, 加工后可直接使用。在模具使用过程中, 模具表层受热析出碳化物, 导致二次硬化, 硬度可达 48HRC, 而心部组织未发生转变, 这种热作模具同时具有表层所需的高温强度和心部韧性, 体现了优良的综合力学性能。2Cr3Mo2NiVSi 钢不同温度的力学性能见表 5-289。

表 5-289 2Cr3Mo2NiVSi 钢不同温度的力学性能

性能 温度/℃	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A (%)	Z (%)
300	1523	1203	11.5	48.8
400	1387	1127	11.0	41.0
500	1280	1102	9.8	44.2
550	1138	993	7.7	46.7
600	965	859	7.6	44.7
650	62.6	58.9	8.2	45.9

注: 热处理工艺为 1010℃ 油淬, 400℃ 回火 2h, 硬度为 45.2HRC。

(6) 材料应用

2Cr3Mo2NiVSi (PH) 析出硬化型热作模具钢主要用于制造 500 ~ 600℃ 范围内使用的热锻模具, 如啮合齿轮模、连杆模等。

5.2.6 高速工具钢型耐热钢

1) 高速工具钢主要用于制造切削刀具, 也常用来制造受强烈冲击的冷作模具和有高温强度、热疲劳性能要求的热作模具, 如热冲压冲头、挤压模、热锻模、热成形用轧辊等。

2) 要求高热强性的工具、模具可选用 W18Cr4V 类高速工具钢; 要求承受一定冲击载荷的工具模具可选用 W6Mo5Cr4V2 类钢。

3) 高速工具钢作为热作模具使用时, 工作温度可高达 600 ~ 700℃, 此时, 具有高的强度、好的热硬性, 但韧性较差。高速工具钢与 3Cr2W8V 钢性能对比见表 5-290。

表 5-290 高速工具钢与 3Cr2W8V 钢性能对比

钢号	热处理工艺	热硬度 HRC	$a_K/(J/cm^2)$	σ_{bb}/MPa	热硬性 HRC			高温硬度 HV		
					580℃ 4 次	600℃ 4 次	620℃ 4 次	400℃	500℃	600℃
W18Cr4V	1260℃ 加热, 油淬, 600℃ 回火 2 次, 每次 1h	66.3	16.7	2969	65.2	63.2	62.2	730	680	560
W6Mo5Cr4V2	1220℃ 加热, 油冷, 580℃ 回火 2 次, 每次 1h	66.6	24.5	4027	64.8	63.2	61.5	766	691	574
3Cr2W8V	1100℃ 加热, 油淬, 580℃ 回火 2 次, 每次 1h	50	29.4	3989	50.2	47.0	45.0	483	420	286

注: W18Cr4V 钢、W6Mo5Cr4V2 钢的技术参数、性能和热处理工艺参见第 4 章冷作模具钢中冷作模具用高速工具钢部分。

5.2.7 冷热兼用基体钢

1) 基体钢中有较多钢种可以兼冷作模具用钢和热作模具用钢, 采用基体钢制造热作模具, 如热挤压模、精锻模等, 其使用寿命一般高于 3Cr2W8V 钢。

2) 主要的基体钢有 6W8Cr4VTi (LM1) 钢、6Cr5Mo3W2VSiTi (LM2) 钢、6Cr4Mo3Ni2WV (CG2) 钢、5Cr4W5Mo2V (RM2) 钢、5Cr4Mo3SiMnVAl (012Al) 钢和 5Cr4W2Mo2SiV 钢等, 其中 5Cr4Mo3SiMnVAl (012Al) 钢和 5Cr4W2Mo2SiV 钢较多地应用于热挤压模具。具体钢种的技术参数见第 4 章冷作模具钢基体钢部分。部分基体钢和热作模具钢性能比较见表 5-291。

表 5-291 部分基体钢和热作模具钢性能比较

钢号	抗拉强度/MPa			断后伸长率 (%)		断面收缩率 (%)		$a_K/(J/cm^2)$		硬度 HV			
	20℃	600℃	700℃	600℃	700℃	600℃	700℃	20℃	600℃	300℃	600℃	700℃	750℃
6W8Cr4VTi (LM1)	2430	1530	794	7.3	11.3	15.0	30.6	20	20	586	440	154	96
6Cr5Mo3W2VSrTi (LM2)	2300	1480	698	6.7	10.4	17.8	38.3	30.8	20	643	439	124	78
3Cr2W8V (H21)	1620	1050	450	10.8	17.0	53.3	80.7	28.7	36.0	396	313	155	97.8
5Cr4Mo3SiMnVAi (O12Al)	1920	1370	696	7.6	9.5	44.8	55.0	24.7	32.6	376	296	146	115
6Cr4Mo3Ni2WV (CG2)	1530	820	467	12.5	18.0	56.8	82.0	25.0	39.0	391	268	143	119
4Cr3Mo3W4VNb (GR)	1850	1180	743	6.6	7.6	36.5	53.8	23.0	36.0	336	293	151	109
3Cr3Mo3W2V (HM1)	1720	910	575	10.9	20.9	65.8	82.3	28.5	53.4	386	293	144	109

5.2.8 马氏体时效型耐热钢

马氏体时效钢为超低碳（C 的质量分数 $\leq 0.03\%$ ）高含镍量（Ni 的质量分数 $> 10\%$ ）钢。钢中含有一定的 Co、Mo、Ti、Al 等元素。因为含镍量高， M_s 线、 M_f 线均高于室温。它不同于 Fe-C 马氏体，为 Ni 置换型固溶体，呈体心立方晶格、板条状形态，具有小孪晶（亚结构）和相当高的位错密度。

1. 马氏体时效型耐热钢的性质（表 5-292）

表 5-292 马氏体时效型耐热钢的性质

性 质	特 点
强度高，塑性、韧性好	马氏体时效钢经时效处理后，具有超高强度和良好的塑性、韧性配合，屈服比高（0.95~0.99），并有高的断裂韧度
硬度高、耐磨性好	马氏体时效钢的热处理工艺通常为在 800~900℃ 加热进行固溶处理，硬度达 30HRC，适合切削或其他加工，然后在 480~500℃ 时效处理 3h，析出沉淀相，硬度可达 57~60HRC
高的耐热性能	该类钢有高的耐热性能，在 500℃ 以下工作强度不会降低，高温疲劳强度高，抗氧化性能高，并且具有良好的低温性能和耐蚀性。淬火工艺性能好，淬透性高，一般空冷可全部淬成马氏体组织
热处理变形小，化学稳定性好	热处理工艺简单、变形小，加热不脱碳，尺寸稳定好。固溶处理后的切削加工性能及焊接性等冷热加工性能好
价格昂贵	钢的冶炼成本高，价格昂贵，应用受到一定的限制

2. 马氏体时效型耐热钢的应用

马氏体时效钢常用的钢号有 18Ni (200)、18Ni (250)、18Ni (300)、18Ni (350) 钢。我国研制了 00Cr5Ni12Mo5TiAl (12Ni - 5Cr - 5Mo) 钢和 00Ni18Co8Mo5TiAl 钢 [相当于 18Ni (250)] 两种钢号, 常用于冷挤压模具、精密塑料模、铝合金压铸模以及精锻模等。如 18Ni (250) 钢 (00Ni18Co8Mo5TiAl) 用于制造铝合金压铸模, 使用寿命比 4Cr5MoSiV1 (H13) 钢制造的铝合金压铸模提高几倍。但是由于钢中贵重金属元素含量高, 价格昂贵, 因此只用于制造小型精密复杂的长寿命压铸模具和压铸模具的芯棒等工件。

18Ni 钢等马氏体时效钢的具体钢种介绍, 参见第 6 章塑料模具钢中时效硬化型模具钢部分。

第 6 章 塑料模具钢

随着塑料工业的发展，塑料制品的种类日益增多，应用领域不断扩大，制品趋向精密化、大型化、复杂化，成型生产向高速化发展。因此，塑料模具形状结构日趋复杂，表面粗糙度值低，制造难度大，对塑料模具材料的要求越来越高。我国已有了自己的专用塑料模具钢系列，目前已纳入国家标准的有两种，即 3Cr2Mo 和 3Cr2MnNiMo 钢，纳入行业标准的已有 20 多种，已在生产中推广应用的新型塑料模具钢数十种，已形成了我国塑料模具用钢的材料体系。

6.1 塑料模具钢的分类

6.1.1 现行塑料模具用钢牌号（表 6-1）

表 6-1 现行塑料模具用钢牌号

类别	钢 号	标 准
渗碳型	20、20Cr	JB/T 6057—1992 《塑料模具成型部分用钢及其热处理 技术条件》
淬硬型	45、40Cr、Ti0A、CrWMn、9SiCr、9Mn2V	
预硬型	5CrNiMnMoVSCa、3Cr2Mo、3Cr2NiMnMo、8Cr2MnWMoVS	
耐蚀性	2Cr13、4Cr13、1Cr18Ni9、3Cr17Mo	YB/T 094—1997 《塑料模具用扁钢》
碳素钢	SM45、SM50、SM55	
合金钢	SM1CrNi3、SM3Cr2Mo、SM3Cr2NiMo、SM4Cr5MoSiV、SM2CrNi3MoAl1S、SM4Cr5MoSiV1、SM2Cr13、SM3Cr17Mo、SM4Cr13	YB/T 107—1997 《塑料模具用热轧厚钢板》
—	SM45、SM48、SM50、SM53、SM55、SM3Cr2Mo、SM3Cr2Ni1Mo	
—	SM45、SM50、SM55、SM3Cr2Mo、SM3Cr2Ni1Mo	YB/T 129—1997 《塑料模具钢模块技术条件》
常用钢	12CrNi3A、T8A、5CrW2Si、Cr12MoV、5CrNiMo、5CrMnMo	—
新型用钢	3Cr3Mo3VNb、3Cr2MnNiMo、Y55CrNiMnMoVS、20CrNi3AlMnMo、25CrNi3MoAl、10Ni3MnCuAl、06Ni6CrMoVTiAl、05Cr17Ni4Cu4Nb、18Ni（250）、18Ni（300）等	—
国家标准	3Cr2Mo、3Cr2MnNiMo	GB/T 1299—2000 《合金工具钢》

6.1.2 塑料模具的工作条件及其用钢的分类方法应用特点

1. 塑料模具的工作条件（表 6-2）

表 6-2 塑料模具的工作条件

分类 \ 工作条件	工作压力 /MPa	工作温度 /℃	摩擦状况	进入型腔时物料状态	腐蚀状况	特 点
热固性塑料模具	2000 ~ 8000	150 ~ 250	摩擦磨损较大	固体粉末状态，预制坯料	有时有腐蚀	受热、受力大，磨损较大
热塑性塑料模具	2000 ~ 6000	150 ~ 250	摩擦磨损较小，当加入某些固态填料时磨损增大	黏流状态 ^①	有时有腐蚀	受热、受压，磨损较小

① 当加入固体粉末状态的填料时，磨损会大大增加。

2. 塑料模具钢的分类方法（图 6-1）

(1) 按热处理特征分类

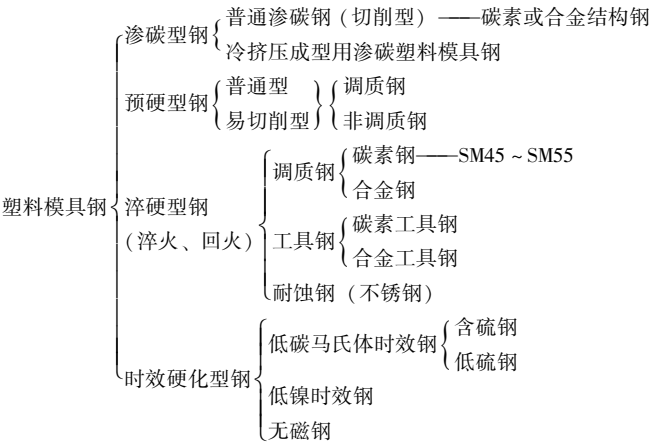


图 6-1 塑料模具钢分类

(2) 按化学成分及性能分类（表 6-3）

表 6-3 常用塑料模具钢的分类及化学成分（质量分数）（%）

钢号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S	其他
碳素塑料模具钢										
SM45	0.42 ~ 0.48	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	—	—	—	—	≤0.030	≤0.035	—
SM48	0.45 ~ 0.51	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	—	—	—	—	≤0.030	≤0.035	—

(续)

钢号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S	其他
碳素塑料模具钢										
SM50	0.47 ~ 0.53	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	—	—	—	—	≤0.030	≤0.035	—
SM53	0.50 ~ 0.56	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	—	—	—	—	≤0.030	≤0.035	—
SM55	0.52 ~ 0.58	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	—	—	—	—	≤0.030	≤0.035	—
渗碳型塑料模具钢										
SM1CrNi3	0.05 ~ 0.15	0.10 ~ 0.40	0.35 ~ 0.75	1.25 ~ 1.75	3.25 ~ 3.75	—	—	≤0.030	≤0.030	—
20	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.35 ~ 0.65	≤0.25	≤0.30	—	—	≤0.035	≤0.035	Cu ≤ 0.25
20Cr	0.18 ~ 0.24	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.70 ~ 1.00	—	—	—	≤0.035	≤0.035	—
20CrMnTi	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.80 ~ 1.10	1.00 ~ 1.30	—	—	—	≤0.035	≤0.035	Ti: 0.04 ~ 0.10
12CrNi3A	0.10 ~ 0.17	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	0.60 ~ 0.90	2.75 ~ 3.15	—	—	≤0.025	≤0.025	—
12CrNi2A	0.10 ~ 0.17	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	0.60 ~ 0.90	1.50 ~ 2.20	—	—	≤0.025	≤0.025	—
12Cr2Ni4	0.10 ~ 0.16	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	1.25 ~ 1.65	3.25 ~ 3.65	—	—	≤0.035	≤0.035	—
20Cr2Ni4	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	1.25 ~ 1.65	3.25 ~ 3.65	—	—	≤0.035	≤0.035	—
2CrNi3MoAlS	0.17 ~ 0.23	0.20 ~ 0.50	0.50 ~ 0.80	1.20 ~ 1.80	3.00 ~ 4.00	0.20 ~ 0.40	—	≤0.030	≤0.030	—
0Cr4NiMoV (LJ)	≤0.08	≤0.20	≤0.30	3.60 ~ 4.20	0.30 ~ 0.70	0.20 ~ 0.60	0.08 ~ 0.15	≤0.030	≤0.030	—

(续)

钢号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S	其他
预硬型塑料模具钢										
SM3Cr2Mo (P20)	0.28 ~ 0.40	0.20 ~ 0.80	0.60 ~ 1.00	1.40 ~ 2.00	1.40 ~ 2.00	0.30 ~ 0.55	—	≤0.030	≤0.030	
SM3Cr2MnNiMo (718)	0.32 ~ 0.40	0.20 ~ 0.40	1.10 ~ 1.50	1.70 ~ 2.00	0.85 ~ 1.15	0.25 ~ 0.40	—	≤0.030	≤0.030	
SM3Cr2Ni1Mo	0.32 ~ 0.40	0.20 ~ 0.40	1.00 ~ 1.50	1.40 ~ 2.00	0.80 ~ 1.20	0.30 ~ 0.55	—	≤0.030	≤0.030	
40Cr	0.37 ~ 0.44	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.80 ~ 1.10		—	—	≤0.035	≤0.035	—
42CrMo	0.38 ~ 0.45	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.90 ~ 1.20		0.15 ~ 0.25	—	≤0.035	≤0.035	—
5CrNiMnMoVSCa (5NiSCa)	0.50 ~ 0.60	≤0.40	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	0.30 ~ 0.60	0.15 ~ 0.30	≤0.030	0.06 ~ 0.15	—
30CrMnSiNi2A	0.26 ~ 0.33	0.90 ~ 1.20	1.00 ~ 1.30	0.90 ~ 1.20	1.40 ~ 1.80	—	—	≤0.030	≤0.030	Cu ≤ 0.20
8Cr2MnWMoVS (8Cr2S)	0.75 ~ 0.85	≤0.40	1.30 ~ 1.70	2.30 ~ 2.60	—	0.50 ~ 0.80	0.10 ~ 0.15	≤ 0.030	0.08 ~ 0.15	W: 0.70 ~ 1.00
5CrMnMo	0.50 ~ 0.60	0.25 ~ 0.60	1.20 ~ 1.60	0.60 ~ 0.90	1.40 ~ 1.80	0.15 ~ 0.30	—	≤0.030	≤0.030	—
5CrNiMo	0.50 ~ 0.60	≤0.40	0.50 ~ 0.80	0.50 ~ 0.80	1.40 ~ 1.80	0.15 ~ 0.30	—	≤0.030	≤0.030	—
Y55CrNiMnMoVS (SM1)	0.50 ~ 0.60	≤0.40	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	1.00 ~ 1.50	0.20 ~ 0.50	0.10 ~ 0.30	≤0.030	0.08 ~ 0.15	—
20CrNi3AlMnMo (SM2)	0.17 ~ 0.23	≤0.40	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	3.00 ~ 3.50	0.20 ~ 0.50	—	≤0.030	0.08 ~ 0.15	Al: 1.00 ~ 1.50
4Cr3Mo3SiV	0.35 ~ 0.45	0.80 ~ 1.20	0.25 ~ 0.70	3.00 ~ 3.75	1.40 ~ 1.80	2.00 ~ 3.00	0.25 ~ 0.75	≤0.030	≤0.030	—
4Cr5MoSiV	0.33 ~ 0.43	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50	4.75 ~ 5.50	1.40 ~ 1.80	1.10 ~ 1.60	0.30 ~ 0.60	≤0.030	≤0.030	—
4Cr5MoSiV1	0.32 ~ 0.45	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50	4.75 ~ 5.50	1.40 ~ 1.80	1.10 ~ 1.75	0.80 ~ 1.20	≤0.030	≤0.030	—

(续)

钢号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S	其他
时效硬化型塑料模具钢										
06Ni6CrMoVTiAl (06Ni)	≤0.06	≤0.50	≤0.50	1.30 ~ 1.60	5.50 ~ 6.50	0.90 ~ 1.70	0.08 ~ 0.16	≤0.030	≤0.030	Ti: 0.90 ~ 1.30 Al: 0.50 ~ 0.90
SM2CrNi3MoAl1S	0.20 ~ 0.30	0.20 ~ 0.50	0.50 ~ 0.80	1.20 ~ 1.80	3.00 ~ 4.00	0.20 ~ 0.40	0.20 ~ 0.40	≤0.030	≤0.030	Al: 1.00 ~ 1.60
SM1Ni3Mn2CuAlMo (PMS)	0.06 ~ 0.20	≤0.35	1.40 ~ 1.70	—	2.80 ~ 3.40	0.20 ~ 0.50	—	≤0.030	≤0.030	Al: 0.70 ~ 1.20 Cu: 0.80 ~ 1.20
25CrNi3MoAl	0.20 ~ 0.30	0.20 ~ 0.50	0.50 ~ 0.80	1.20 ~ 1.80	3.00 ~ 4.00	0.20 ~ 0.40	—	≤0.030	≤0.030	Al: 1.00 ~ 1.60
18Ni (200)	≤0.03	≤0.12	≤0.12	—	18	3.30	—	≤0.010	≤0.010	Co: 8.50 Ti: 0.20 Al: 0.10
18Ni (250)	≤0.03	≤0.12	≤0.10	—	17.50 ~ 18.50	4.25 ~ 5.25	—	≤0.010	≤0.010	Co: 7.00 ~ 8.00 Ti: 0.30 ~ 0.50 Al: 0.05 ~ 0.15
18Ni (300)	≤0.03	≤0.12	≤0.10	—	18.00 ~ 19.00	4.60 ~ 5.20	—	≤0.010	≤0.010	Co: 8.50 ~ 9.50 Ti: 0.50 ~ 0.80 Al: 0.05 ~ 0.15
18Ni (350)	≤0.03	≤0.10	≤0.10	—	17.00 ~ 19.00	4.00 ~ 5.00	—	≤0.010	≤0.010	Co: 11.00 ~ 12.75 Ti: 1.20 ~ 1.45 Al: 0.05 ~ 0.15

(续)

钢号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S	其他
时效硬化型塑料模具钢										
0Cr16Ni4Cu3Nb (PCR)	≤0.07	≤1.00	≤1.00	15.00 ~ 17.00	3.00 ~ 5.00	—	—	≤0.030	≤0.030	Cu: 2.50 ~ 3.50 Nb: 0.25 ~ 0.40
05Cr17Ni4Cu4Nb	≤0.07	≤1.00	≤1.00	15.00 ~ 17.50	3.00 ~ 5.00	—	—	≤0.040	≤0.030	Cu: 3.00 ~ 5.00 Nb: 0.15 ~ 0.45
07Cr17Ni7Al	≤0.09	≤1.0	≤1.0	16.00 ~ 18.00	6.50 ~ 7.50	—	—	≤0.035	≤0.030	Al: 0.75 ~ 1.50
07Cr15Ni7Mo2Al	≤0.09	≤1.00	≤1.00	14.00 ~ 16.00	6.50 ~ 7.75	2.00 ~ 3.00	—	≤0.040	≤0.030	Al: 0.75 ~ 1.50
1Cr14Co13Mo5V AFC-77	0.15	0.15	0.20	14.50	0.20	5.00	0.50	≤0.030	≤0.030	Co: 13.50
耐蚀性塑料模具钢										
SM2Cr13	0.16 ~ 0.25	≤1.00	≤1.00	12.00 ~ 14.00	—	—	—	≤0.030	≤0.030	—
30Cr13	0.26 ~ 0.35	≤0.60	≤0.80	12.00 ~ 14.00	—	—	—	≤0.030	≤0.030	—
SM4Cr13	0.36 ~ 0.45	≤0.60	≤0.80	12.00 ~ 14.00	—	—	—	≤0.030	≤0.030	—
95Cr18	0.90 ~ 1.00	≤0.80	≤0.80	17.00 ~ 19.00	—	—	—	≤0.040	≤0.030	—
102Cr17Mo	0.95 ~ 1.10	≤0.80	≤0.80	16.00 ~ 18.00	—	0.40 ~ 0.70	—	≤0.040	≤0.030	—
14Cr17Ni2	0.11 ~ 0.17	≤0.80	≤0.80	16.00 ~ 18.00	1.50 ~ 2.50	—	—	≤0.040	≤0.030	—
SM3Cr17Mo	0.28 ~ 0.35	≤0.80	≤1.00	16.00 ~ 18.00	—	0.75 ~ 1.25	—	≤0.030	≤0.030	—
0Cr16Ni4Cu3Nb (PCR)	≤0.07	≤1.00	≤1.00	15.00 ~ 17.00	3.00 ~ 5.00	—	—	≤0.030	≤0.030	Cu: 2.50 ~ 3.50 Nb: 0.25 ~ 0.40
GS-316ESR	0.36	—	—	16.00	—	1.20	—	≤0.030	≤0.030	—

(续)

钢号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S	其他
淬硬型塑料模具钢										
SM4Cr5MoSiV	0.33 ~ 0.43	0.80 ~ 1.25	0.20 ~ 0.60	4.75 ~ 5.50	—	1.10 ~ 1.60	0.30 ~ 0.60	≤0.030	≤0.030	—
SM4Cr5MoSiV1	0.32 ~ 0.45	0.80 ~ 1.25	0.20 ~ 0.60	4.75 ~ 5.50	—	1.10 ~ 1.75	0.80 ~ 1.20	≤0.030	≤0.030	—
SMCr12Mo1V1	1.40 ~ 1.60	0.10 ~ 0.60	0.10 ~ 0.60	11.00 ~ 13.00	—	0.70 ~ 1.20	0.50 ~ 1.10	≤0.030	≤0.030	—
非调质塑料模具钢										
B20	0.30 ~ 0.40	0.20 ~ 0.60	≥1.20	≥0.30	—	—	≥0.05	—	—	—
B20H	0.30 ~ 0.40	0.20 ~ 0.60	≥1.20	≥1.00	—	—	≥0.05	—	—	—
B25	≤0.40	≤0.50	≤2.00	—	—	—	≤0.20	—	—	—
B30	0.20 ~ 0.30	0.20	≥1.50	≥0.50	≥0.05	≥0.20	≥0.05	—	—	Cu ≥0.10
B30H	0.10 ~ 0.20	0.60	—	—	≥0.10	—	—	—	—	Cu ≥0.50

注：淬硬型冷作模具钢 T8A、T10A、9CrWMn、9Mn2V、7CrMn2WMo、Cr12、Cr12MoV、Cr12Mo1V1、GCr15、Cr6WV、7CrMnNiMo、Cr2Mn2SiWMoV 都可以作为硬度要求高的塑料模具钢。

3. 塑料模具钢的应用特点（表 6-4）

表 6-4 塑料模具钢的应用特点

特 点	材 料 应 用
塑料模具钢涵盖广泛	从普通钢材到专用材料都有使用，专用用钢已自成体系，高级塑料模具钢货源充足，特殊性能用钢可根据用户要求进行专门设计，随着国外高性能模具钢进入我国市场，塑料模具的制造获得更大的选材空间，对降低消耗、提高产品质量有利
塑料模具钢具有良好的蚀刻性和抛光性能与镜面质量	塑料模具成型零件对表面质量要求很高，要求塑料模具钢具有良好的蚀刻性和抛光性能与镜面质量。所以对钢的纯净度和碳化物的数量、形态、大小要求严格。尽管模具用钢的化学成分与合金工具钢基本相同，但其冶金质量更高，非金属夹杂物少，钢材低倍组织致密，中心疏松及锭型偏析≤1~3 级。可实现精良加工并且对热处理有利

(续)

特 点	材 料 应 用
以预硬化钢、非调质钢、易切削钢供货	预硬化钢、非调质钢的应用，以及易切削塑料模具钢切削加工的进步，避免了模具零件在强韧化过程中的变形或其他热处理问题。模具钢以预硬化、易切削形式供应市场已较普遍，从而节约了资源，减少了环境污染，缩短了生产周期，提高了产品质量，降低了综合成本
使用“近终形”型材	原材料形状、性能最接近模具零件毛坯或零件尺寸和热处理状态。如《塑料模具用热轧厚钢板》（YB/T 107—1997）、《塑料模具用扁钢》（YB/T 094—1997）和《塑料模具钢模块技术条件》（YB/T 129—1997）等标准，是塑料模具制造中实现“材料最大利用率”的技术措施
耐蚀钢应用取代传统的电镀工艺	以石化产品为原料的塑料制品，都有不同程度的腐蚀性，所以耐蚀钢应用也较多。过去采用的电镀 Cr、Ni 镀层的方法，因成本高、质量差、有污染而逐渐被淘汰

6.2 塑料模具钢的性能与应用

6.2.1 碳素塑料模具钢

碳素塑料模具钢价格便宜、来源方便、加工性能好，一般结构零件或次要工作（成型）零件，以及生产批量不大、没有特殊要求的小型塑料模具，常采用碳素结构钢制造。如 45 钢、50 钢、55 钢、T8 钢、T10 钢及弹簧钢等。为了保证塑料模具具有较低的表面粗糙度值，对钢材的有害杂质含量、纯净度、低倍组织等冶金质量进行特殊要求，成为塑料模具的专门用钢。目前纳入行业标准的碳素塑料模具钢有 SM45、SM48、SM50、SM53、SM55 五个钢号。为了区别于结构钢，在钢号前冠以“SM”符号，并另列标准。但其碳含量仍沿用结构钢。国外的碳素塑料模具钢通常降低碳质量分数和提高冶金质量。一般 $w_c = 0.5\% \sim 0.6\%$ 。例如，日本的 S55C 碳素塑料模具钢，常采用真空脱气、特殊加工、降低 P、S 含量及残余合金元素含量等提高碳素钢的冶金质量。常用国产碳素塑料模具钢见表 6-5。

表 6-5 常用国产碳素塑料模具钢

常用材料	材料特点
45 钢、50 钢、55 钢、T8 钢、T10 钢及弹簧钢	塑料模具的一般结构零件或次要工作（成型）零件，以及生产批量不大、没有特殊要求的小型塑料模具，采用价格便宜、来源方便、加工性能好的碳素结构钢制造，如 45 钢、50 钢、55 钢、T8 钢、T10 钢及弹簧钢等。这些钢种既是冷作模具制造材料，也是塑料模具制造的常用材料

(续)

常用材料	材料特点
SM45、SM48、SM50、SM53、SM55	为了保证塑料模具具有较低的表面粗糙度值,对碳素钢的冶金质量提出了一些特殊要求,如钢材的有害杂质含量、低倍组织等。碳素塑料模具钢已提高碳素结构钢的冶金质量,提高钢的纯净度等,成为塑料模具的专用钢。目前纳入行业标准的碳素塑料模具钢有 SM45、SM48、SM50、SM53、SM55 五个钢号
B610SM1、B20、B25	我国宝钢生产的 B610SM1 钢的性能与 SM45 相当,但含碳量调整为 $w_c = 0.41\% \sim 0.50\%$ 。目前,非标准微合金非调质塑料模具钢,除 B610SM1 外,还有 B20、B25 等,这类钢材的有害杂质含量低,工艺性能好,适用于普通热塑性塑料成型模具

1. SM45 钢

(1) 化学成分

SM45 钢的化学成分 (YB/T 107—1997) 见表 6-6。

表 6-6 SM45 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	P	S
0.42 ~ 0.48	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤0.030	≤0.035

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 6-7)。

表 6-7 SM45 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	Ar_1	Ar_3
温度 (近似值)/℃	724	780	682	751

2) 线膨胀系数 (表 6-8)。

表 6-8 SM45 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	200	300	400	500	600	700	800
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	11.59	12.32	13.09	13.71	14.18	14.67	15.08	12.50

3) 比热容 (表 6-9)。

表 6-9 SM45 钢比热容

温度/℃	100	200	400	600
比热容 $c_p / [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	468.2	480.7	522.5	572.7

4) 热导率 (表 6-10)。

表 6-10 SM45 钢热导率

温度/℃	200	300	500	600	200	800	900	1000	1100	1200
热导率 $\lambda / [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	46.4	43.8	38.1	35.1	31.8	25.9	25.9	26.7	28.0	29.7

5) 弹性模量 (表 6-11)。

表 6-11 SM45 钢弹性模量

温度/℃	20	100	200	300	400	450
弹性模量 E/MPa	204 000	205 000	197 000	194 000	175 000	161 000

6) 密度为 $7.81\text{g}/\text{cm}^3$ 。

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-12。

表 6-12 SM45 钢锻造工艺规范

项目	入炉温度/℃	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	≤ 850	1150 ~ 1220	1100 ~ 1160	≥ 850	坑冷或堆冷
钢坯	≤ 850	1130 ~ 1200	1070 ~ 1150	≥ 850	坑冷或堆冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-13)。

表 6-13 SM45 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	保温时间	冷却方式	硬度 HBW
锻后退火	820 ~ 840	一定时间	炉冷	197 ~ 207
高温回火	680 ~ 720	一定时间	空冷	< 199
正火	830 ~ 880	一定时间	空冷	197 ~ 207

2) 淬火。推荐的淬火工艺规范见表 6-14。

表 6-14 S4M5 钢推荐的淬火工艺规范

加热温度/℃	淬火冷却介质	硬度 HRC
820 ~ 860	油或水	≥ 50

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范 (表 6-15)。

表 6-15 SM45 钢推荐的回火工艺规范

加热温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
500 ~ 560	空冷	25 ~ 33

② 回火温度与硬度的关系 (表 6-16)。

表 6-16 SM45 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬火后	200	300	400	500	550	600
硬度 HRC	57	55	50	41	33	26	22

注：840℃水淬。

(5) 力学性能

SM45 钢纯净度高, 缩小了碳含量的范围, 降低了 S、P 含量, 稳定了钢的性能, 经调质处理可获得较高的硬度和较好的强韧性。但钢的淬透性差, 水淬容易出现裂纹, 宜采用水淬油冷双介质淬火工艺。

1) SM45 钢不同回火温度的力学性能 (表 6-17)。

表 6-17 SM45 钢不同回火温度的力学性能

回火温度/℃	硬度 HBW	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	Z (%)	A (%)	$a_K/(J/cm^2)$
200	500	1520	1450	19	5	30
250	480	1600	1480	33	7	35
300	420	1405	1305	38	9	45
400	340	1105	1010	62	15	126
500	262	870	780	64	21	150
600	205	720	620	68	27	185
650	199	680	580	70	30	200

注: 840℃ 水淬, 试样直径为 10mm。

2) SM45 钢不同截面调质后的力学性能 (表 6-18)。

表 6-18 SM45 钢不同截面调质后力学性能

热处理工艺	直径/mm	取样部位	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	$a_K/(J/cm^2)$	HBW
800℃ 加热淬盐水, 500℃ 回火	12.5	中心	1080	1010	14.5	59.0	—	308
	25	中心	960	745	18.5	61.0	150	274
	50	中心	920	615	21.5	57.0	110	255
	100	中心	820	505	20.0	57.0	102	230
	100	1/2 半径	845	525	23.5	57.0	105	241
800℃ 加热淬盐水, 575℃ 回火	12.5	中心	880	790	21.0	63.0	—	259
	25	中心	840	620	23.5	65.0	174	241
	50	中心	835	525	23.5	61.0	167	229
	100	中心	745	425	25.0	62.5	122	218
	100	1/2 半径	815	485	26.0	63.5	155	229
800℃ 加热淬盐水, 650℃ 回火	12.5	中心	760	670	25.5	67.0	—	227
	25	中心	755	555	26.5	68.0	162	220
	50	中心	645	470	27.0	63.5	178	208
	100	中心	670	375	31.0	65.5	123	188
	100	1/2 半径		420	30.0	66.0	102	191

(6) 材料应用

SM45 钢价格便宜, 切削加工性能好, 碳含量中等, 淬火后具有较高的硬度, 经调

质处理可获得较好的强韧性，一般用热轧、热锻或正火状态的扁钢、厚钢板供货。广泛应用于中、小型的中低档次的塑料模具和形状简单的小型模具和模架；常用热轧、热锻或正火状态，制造较大尺寸的塑料模具。

2. SM50 钢

(1) 化学成分

SM50 钢的化学成分（YB/T 107—1997）见表 6-19。

表 6-19 SM50 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	S	P
0.47 ~ 0.53	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤0.035	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度（表 6-20）。

表 6-20 SM50 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	Ar_1	Ar_3
温度（近似值）/℃	725	760	720	690

2) 线膨胀系数（表 6-21）。

表 6-21 SM50 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 500
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	10.98	11.85	12.65	14.02

3) 比热容（表 6-22）。

表 6-22 SM50 钢比热容

温度/℃	100	400	500	600	625	640	650	700	820	900
比热容 $c_p / [J / (kg \cdot K)]$	560.1	639.5	785.8	1120	1692	3435	7942	668.8	639.5	627

4) 热导率（表 6-23）。

表 6-23 SM50 钢热导率

温度/℃	100	200	300	500
热导率 $\lambda / [W / (m \cdot K)]$	67.8	55.2	45.6	31.4

5) 弹性模量（表 6-24）。

表 6-24 SM50 钢弹性模量

温度/℃	20	100	300	500
弹性模量 E / MPa	220000	215000	200000	180000

6) 密度为 7.81g/cm^3 。

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-25。

表 6-25 SM50 钢锻造工艺规范

始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷 却
1180 ~ 1209	> 800	空冷, $\phi 300\text{mm}$ 以上应缓冷

(4) 热处理

1) 推荐的预备热处理工艺规范 (表 6-26)。

表 6-26 SM50 钢推荐的预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度 / ℃	冷却方式	硬度 HBW
锻后退火	810 ~ 830	炉冷	207
正火	820 ~ 870	空冷	—

2) 淬火及回火。

① 推荐的淬火及回火工艺规范 (表 6-27)。

表 6-27 SM50 钢推荐的淬火及回火工艺规范

淬火规范			回火规范		
淬火温度 / ℃	淬火冷却介质	硬度 HRC	回火温度 / ℃	冷却方式	硬度 HRC
820 ~ 860	水或油	≥ 50	200 ~ 650	水冷或油冷	(按需要)

② 回火温度与硬度的关系 (表 6-28)

表 6-28 SM50 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬火后	200	300	400	500	550	600
硬度 HRC	58	56	51	42	33	27	23

注: 830℃ 水淬。

(5) 力学性能

SM50 钢的纯净度高, 碳含量的波动范围较窄, 力学性能稳定, 经正火或调质后, 具有一定的硬度、强度和耐磨性。

1) SM50 钢不同回火温度的力学性能 (表 6-29)。

表 6-29 SM50 钢不同回火温度的力学性能

回火温度/℃	硬度 HBW	R_m/MPa	R_{eL}/MPa	$A (\%)$	$Z (\%)$	$a_K/(\text{J}/\text{cm}^2)$
250	505	1650	1390	22	6	30
300	495	1400	1300	30	7	48
400	390	1110	1050	33.5	6.5	105
500	340	780	690	48	7.5	130
550	270	700	590	51	9	150
600	240	590	500	56	11	170
650	—	—	—	60	18	190

注: 840℃ 水淬, 试样直径 10mm。

2) 疲劳强度 (表 6-30)。

表 6-30 SM50 钢疲劳强度

试 验 状 态	力学性能					疲劳强度		
	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	HBW	循环次数	σ_{-1}	σ_{-1k}
850℃ 水淬, 550℃ 回火, 水冷	900	704	13.6	—	—	1×10^7	430	24
850℃ 正火	692	400	20.0	—	—	—	300	18
925℃ 正火	634	331	26.5	39.5	164	—	232	—
785℃ 油淬, 315℃ 回火,	891	568	11.5	52.0	—	—	478	—
785℃ 油淬, 425℃ 回火	856	554	11.5	51.0	—	—	450	—
870℃ 油淬, 760℃ 回火	602	366	23.5	55.3	125	—	260	—

3) 室温力学性能 (表 6-31)。

表 6-31 SM50 钢室温力学性能

毛坯尺寸/mm	试样状态	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	$a_K/(J/cm^2)$	HBW
φ25	正火	≥660	≥370	≥15	≥40	≥70	—
	热轧	—	—	—	—	—	≤241
	退火	—	—	—	—	—	≤207
	810 ~ 860℃ 水淬, 550 ~ 650℃ 回火, 水冷	≥750	≥550	≥15	≥40	≥70	212 ~ 277

4) 高温力学性能 (表 6-32)。

表 6-32 SM50 钢高温力学性能

试验温度/℃	400	450	500	550
σ_{-1} (10000)/MPa	150	85	44	23
σ_{-1} (100000)/MPa	105	57	28	13

注: 试验用钢为退火状态, 硬度为 170HBW。

5) 低温力学性能 (表 6-33)。

表 6-33 SM50 钢低温力学性能

化学成分 (质量分数, %)					力学性能						
C	Si	Mn	S	P	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	Z (%)	$a_K/(J/cm^2)$			
								−80℃	−20℃	50℃	100℃
0.48	0.08	0.97	0.047	0.030	690	351	42.3	10.4	27.8	64.4	80.2
0.46	0.13	0.78	0.048	0.029	658	324	40.7	9.1	23.0	51.2	70.9
0.47	0.23	0.98	0.039	0.030	695	371	43.7	7.6	13.4	57.0	74.4

(6) 材料应用

SM50 钢具有一定的硬度、强度和耐磨性, 且价格便宜, 切削加工性能好, 适宜制

造形状简单的小型塑料模具，或者精度要求不高、使用寿命不需要很长的塑料模具。但该钢焊接性不好，冷变形性能较差，使用时应采用预温焊接，宜采用热加工成形。

3. SM55 钢

(1) 化学成分

SM55 钢的化学成分 (YB/T 107—1997) 见表 6-34。

表 6-34 SM55 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	P	S
0.52 ~ 0.58	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤0.030	≤0.035

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 6-35)。

表 6-35 SM55 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}
温度 (近似值)/℃	727	774	690	755

2) 线膨胀系数 (表 6-36)。

表 6-36 SM55 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 500	20 ~ 600	20 ~ 700	20 ~ 900	20 ~ 1000
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	10.98	11.85	12.65	13.40	14.02	14.50	14.81	13.54	14.38

3) 比热容 (表 6-37)。

表 6-37 SM55 钢比热容

温度/℃	100	200	300	400	625	650	700	750	800	900
比热容 $c_p / [J / (kg \cdot K)]$	518.3	547.5	618.6	798.3	836.0	1045	1492	1254	760.7	752.4

4) 热导率 (表 6-38)。

表 6-38 SM55 钢热导率

温度/℃	100	200	400	500
热导率 $\lambda / [W / (m \cdot K)]$	67.8	55.2	35.5	31.4

5) 弹性模量 (表 6-39)。

表 6-39 SM55 钢弹性模量

温度/℃	20	100	200	300	400	500
弹性模量 E / MPa	224000	215000	197000	200000	194000	180000

6) 密度为 7.82g/cm^3 。

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-40。

表 6-40 SM55 钢锻造工艺规范

始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
1180 ~ 1200	> 850	空冷, 尺寸 > 200mm 缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-41)。

表 6-41 SM55 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	冷却方式
锻后退火	770 ~ 810	炉冷
高温回火	680 ~ 720	空冷
正火	810 ~ 860	空冷

2) 淬火与回火。

① 常规热处理工艺规范 (表 6-42)。

表 6-42 SM55 钢常规热处理工艺规范

项目	退火	高温回火	正火	淬火		回火
加热温度/℃	770 ~ 810	680 ~ 720	810 ~ 860	790 ~ 830	820 ~ 850	400 ~ 650
冷却方式	炉冷	空冷	空冷	水冷	油冷	空冷

② 推荐的淬火与回火工艺规范 (表 6-43)。

表 6-43 SM55 钢推荐的淬火与回火工艺规范

方案	加热温度/℃	冷却方式	回火温度/℃	硬度 HRC
方案 I	790 ~ 830	水冷	—	≥55
方案 II	820 ~ 850	油冷	400 ~ 650	24 ~ 45

③ 回火温度与硬度的关系 (表 6-44)。

表 6-44 SM55 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬火后	200	300	400	500	550	600	650
硬度 HRC	58	57	50	45	35	30	24	23

注: 820℃ 水淬。

(5) 力学性能

SM55 碳素塑料模具钢由于采用特殊的冶炼技术, 提高了钢的冶金质量, 降低了 S、P 及残余合金元素含量, 力学性能稳定。经热处理后具有高的表面硬度、耐磨性, 一定的强度、韧性, 切削加工性能中等, 但焊接性和冷变形性均低。

1) 回火温度与力学性能的关系 (表 6-45)。

表 6-45 SM55 钢回火温度与力学性能的关系

回火温度/℃	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	Z (%)	硬度 HRC
200	1805	—	—	55
300	1528	—	—	47 ~ 48
350	1564	1435	41.6	44
400	1373	1300	51.2	39 ~ 40
500	997	966	—	30 ~ 31

注：试样尺寸为 5mm，850℃ 加热，在质量分数为 10% 的 NaCl 水溶液中淬火。

2) SM55 钢不同热处理过程后的性能（表 6-46）。

表 6-46 SM55 钢不同热处理过程后的性能

试验状态	性 能								
	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	硬度 HBW	τ_b /MPa	τ_s /MPa	σ_{-1} /MPa	τ_{-1} /MPa
840℃ 退火	690	336	24.0	42	193	243	211	294	154
790℃ 水淬， 650℃ 回火	782	590	22.0	57	227	—	368	386	223

3) 钢坯尺寸对力学性能的影响（表 6-47）。

表 6-47 SM55 钢钢坯尺寸对力学性能的影响

毛坯尺寸/mm	试样状态	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	a_K /(J/cm ²)	硬度 HBW
20	800℃ 水淬， 400℃ 回火	1085 ~ 1240	890 ~ 1015	7.50 ~ 8.00	43.5 ~ 52.3	55 ~ 70	302 ~ 341
40		925 ~ 1023	647 ~ 755	10.0 ~ 11.5	43.5 ~ 47.6	40 ~ 54	260 ~ 290
60		845 ~ 950	595 ~ 660	10.5 ~ 12.5	42.7 ~ 46.5	33 ~ 50	234 ~ 266
20	840℃ 水淬， 500℃ 回火	920 ~ 1030	735 ~ 827	10.2 ~ 12.0	53.0 ~ 59.0	65 ~ 105	255 ~ 285
40		840 ~ 920	567 ~ 620	12.5 ~ 14.0	45.0 ~ 52.8	55 ~ 72	228 ~ 264
60		770 ~ 870	524 ~ 580	13.5 ~ 14.1	43.0 ~ 52.0	40 ~ 60	210 ~ 239
20	840℃ 水淬， 600℃ 回火	750 ~ 810	522 ~ 570	13.5 ~ 15.0	58.5 ~ 65.3	110 ~ 145	209 ~ 225
40		730 ~ 805	470 ~ 510	15.5 ~ 16.5	56.0 ~ 62.0	80 ~ 128	203 ~ 225
60		681 ~ 760	445 ~ 490	16.0 ~ 18.0	56.0 ~ 61.0	62 ~ 94	190 ~ 210

4) 室温力学性能与回火温度的关系（表 6-48）。

表 6-48 SM55 钢室温力学性能与回火温度的关系

毛坯尺寸 /mm	取样 部位	试样状态	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	a_K /(J/cm ²)	硬度 HBW
25	中心	正火	≥700	≥390	≥13	≥35	—	—
		退火	—	360 ~ 475	—	—	—	≤229
		热轧	—	360 ~ 475	—	—	—	≤255
25	中心	(820 ± 20)℃ 正火	640 ~ 815	360 ~ 475	15 ~ 24	35 ~ 46	—	—

(续)

毛坯尺寸 /mm	取样 部位	试样状态	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	a_K /(J/cm ²)	硬度 HBW
25	1/2R	(820 ± 20)℃正火	700 ~ 815	360 ~ 475	15 ~ 24	33 ~ 44	—	—
335	纵 1/3R	830 ~ 840℃正火, 540 ~ 560℃回火	740	350	20	35	—	—
520	纵 1/3R	(820 ± 5)℃正火, (610 ± 5)℃回火	660	370	—	53	37	—
25	—	800℃ ~ 850℃水淬, 550 ~ 650℃回火, 水冷	≥800	≥600	≥14	≥35	≥60	—

5) 高温力学性能 (表 6-49)。

表 6-49 SM55 钢高温力学性能

试验温度/℃	400	450	500	550
σ_{-1} (10000)/MPa	150	85	44	(23)
σ_{-1} (100000)/MPa	105	57	28	(13)

注: 试验用钢 $w_c \approx 0.5\%$, 退火状态硬度为 170HBW。

6) 低温力学性能 (表 6-50)。

表 6-50 SM55 钢低温力学性能

化学成分 (质量分数, %)					试样 状态	a_K /(J/cm ²)					
C	Si	Mn	S	P		-50℃	-20℃	0℃	20℃	50℃	100℃
0.52	0.15	0.90	0.029	0.046	热轧	94	111	147	207	316	445
0.56	0.05	0.77	0.035	0.029	热轧	105	146	197	247	322	469
0.59	0.21	0.94	0.042	0.031	热轧	129	182	212	270	315	425

(6) 材料应用

SM55 钢价格便宜, 切削加工性能中等, 经热处理后具有高的表面硬度、耐磨性, 一定的强度、韧性, 适宜制造形状简单的小型塑料模具或精度要求不高、使用寿命不需要很长的塑料模具。一般在正火或调质状态下使用。

6.2.2 渗碳型塑料模具钢

渗碳型塑料模具钢主要用于冷挤压成型塑料模具, 一般要求较低的含碳量, 且 Si 的含量应尽量低, 同时钢中加入能提高淬透性而固溶强化铁素体效果较小的合金元素。Cr、Ni 是比较理想的元素。这类钢用冷挤压成形, 因此在退火态必须有低的硬度、高的塑性和低的变形抗力。成形复杂型腔时, 其退火硬度 ≤ 100HBW; 成形浅型腔时, 其退火硬度 ≤ 160HBW。为了提高模具的耐磨性, 在冷挤压成形后需要进行渗碳和淬火、

回火处理，以提高模具的硬度、强度和耐磨性，表面硬度可以达到 58 ~ 62HRC，而心部仍有较好的韧性。由于模具为冷挤压成形，无需再进行切削加工，故模具制造周期短，便于批量加工，而且精度高。在国外有专用钢种，如美国的 P1、P2，日本的 CH1，瑞典的 8416 等。国内常用的钢种有 20、20Cr、20CrMnTi、SM1CrNi3（已纳标）、2CrNi3MoAlS、0Cr4NiMoV（LJ）等，见表 6-51。

表 6-51 常用渗碳型塑料模具钢

模具材料市场	钢 号
国产模具钢	20、20Cr、20CrMnTi、SM1CrNi3、12CrNi3A、20Cr2Ni4A、2CrNi3MoAlS、0Cr4NiMoV（LJ）
国外模具钢	美国的 P1、P2、P4、P6，日本的 CH1、CH2、CH41，瑞典的 8416 等

1. SM1CrNi3 钢

(1) 化学成分

SM1CrNi3 钢的化学成分见表 6-52。

表 6-52 SM1CrNi3 钢的化学成分（质量分数）（%）

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
中国（YB ^① ）	SM1CrNi3	0.05 ~ 0.15	0.10 ~ 0.37	0.35 ~ 0.75	1.25 ~ 1.75	3.25 ~ 3.75	≤0.030	≤0.030
美国（ASTM）	P6	0.05 ~ 0.10	0.10 ~ 0.40	0.35 ~ 0.70	1.25 ~ 1.75	3.25 ~ 3.75	≤0.030	≤0.030
德国（DIN ^② ）	X19NiCrMo4	0.16 ~ 0.22	0.10 ~ 0.40	0.15 ~ 0.45	1.10 ~ 1.40	3.80 ~ 4.30	≤0.030	≤0.030

① YB/T 094—1997。

② 成分中 Mo 的质量分数为 0.15% ~ 0.25%。

(2) 物理性能

1) 临界点温度（表 6-53）。

表 6-53 SM1CrNi3 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}	M_s
温度（近似值）/℃	720	810	715	600	409

注：试验用钢成分（质量分数）为 C0.13%、Si0.34%、Mn0.50%、Cr0.76%、Ni2.92%、P0.013%、S0.004%。

2) 比热容（表 6-54）。

表 6-54 SM1CrNi3 钢比热容

温度/℃	380	425
比热容 $c_p/[J/(kg \cdot K)]$	656.2	643.7

3) 线膨胀系数（表 6-55）。

表 6-55 SM1CrNi3 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 500
线膨胀系数 $\alpha/\times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	11.8	13.0	14.0	15.3

4) 热导率 (表 6-56)。

表 6-56 SM1CrNi3 钢热导率

温度/℃	60	500	750	910
热导率 λ /[W/(m·K)]	30.9	25.5	21.3	18.8

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-57。

表 6-57 SM1CrNi3 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1200	1180	≥850	缓冷

(4) 热处理工艺

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-58)。

表 6-58 SM1CrNi3 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	冷却方式	硬度 HBW
锻后退火	670 ~ 680	炉冷	≤229
正火	880 ~ 940	空冷	—
高温回火	670 ~ 680	空冷	≤229

2) 淬火及回火。推荐的淬火及回火工艺规范见表 6-59。

表 6-59 SM1CrNi3 钢推荐的淬火及回火工艺规范

淬火规范		回火规范		
淬火温度/℃	淬火冷却介质	回火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
860	油	200 ~ 600 (按需要)	油冷	58 ~ 42

3) 表面处理。

① 渗碳及淬火与回火工艺规范 (表 6-60)。

表 6-60 SM1CrNi3 钢渗碳及淬火与回火工艺规范

工 艺	渗碳		淬火			回火		
	渗碳温度 /℃	冷却 方式	淬火温度 /℃	淬火冷却 介质	硬度 HRC	回火温度 /℃	硬度 HRC	
							表面	心部
I	900 ~ 920	罐冷	860	油	—	160 ~ 180	58 ~ 62	26 ~ 40
II			760 ~ 810	油	60	160 ~ 180	58 ~ 62	26 ~ 40

② 碳氮共渗及淬火与回火工艺规范 (表 6-61)

表 6-61 SM1CrNi3 钢碳氮共渗及淬火与回火工艺规范

气体碳氮共渗温度 /℃	淬火		回火	
	淬火温度/℃	硬度 HRC	回火温度/℃	硬度 HRC
840 ~ 860	出炉后直接淬油	≥60	150 ~ 180	≥58

(5) 力学性能

SM1CrNi3 钢低温韧性好，缺口敏感性小，切削加工性能良好，在硬度为 260 ~ 320HBW 时，相对切削加工性为 60% ~ 70%。由于钢的含碳量低，退火后硬度低，抗冷塑性变形能力低，利于采用冷挤压成形方法制造模具零件。零件成形后经渗碳、淬火、回火，模具零件表面具有较高硬度、耐磨性，而心部具有很好的韧性。

1) 疲劳极限（表 6-62）。

表 6-62 SM1CrNi3 钢疲劳极限

毛坯直径 /mm	热处理制度	R_m	R_{eL}	σ_{-1}	σ_{-1k}	τ_{-1}
		/MPa				
16	900℃正火，660℃回火空冷；860℃、780℃两次油淬，180℃回火空冷 ^①	1215	840	810	260	—
15	940℃伪渗碳 7h 缓冷，870℃油淬，200℃回火，820℃ ^② 油淬，500℃回火 ^③	1130 745	910 622	460 345		235

① 试验用钢成分（质量分数）：C0.14%，Si0.22%，Mn0.44%，Cr0.69%，Ni3.036%，P0.025%，S0.016%。

② 试验用钢成分（质量分数）：C0.13%，Si0.35%，Mn0.46%，Cr0.71%，Ni2.88%，P0.012%，S0.011%。

③ 试验用钢成分（质量分数）：C0.19%，Si0.27%，Mn0.40%，Cr0.70%，Ni3.02%。

2) 不同温度回火后的力学性能（表 6-63）。

表 6-63 SM1CrNi3 钢不同温度回火后的力学性能

毛坯直径 /mm	热处理制度		R_m	R_{eL}	A	Z	a_K	备注
			/MPa		(%)		/(J/cm ²)	
15	900℃正火， 660℃回火空冷	800℃油淬，200℃回火空冷	1400	1290	12.0	60.0	105	①
		800℃油淬，300℃回火空冷	1290	1150	12.5	67.0	80	
		800℃油淬，400℃回火空冷	1220	1090	13.5	68.0	90	
		800℃油淬，500℃回火空冷	1030	940	18.0	70.0	120	
		800℃油淬，600℃回火空冷	750	660	23.5	74.0	170	
16	900℃正火， 660℃回火空冷	860℃、780℃油淬	1150	785	15.0	64.0	159	②
		180℃回火空冷	1215	840	15.0	63.0	178	

① 试验用钢成分（质量分数）：C0.17%，Si0.19%，Mn0.35%，Cr1.26%，Ni3.25%，P0.016%，S0.016%。

② 试验用钢成分（质量分数）：C0.14%，Si0.22%，Mn0.40%，Cr0.69%，Ni3.06%，P0.025%，S0.006%。

3) 伪渗碳后再经淬火、回火的力学性能 (表 6-64)。

表 6-64 SM1CrNi3 钢伪渗碳后再经淬火、回火的力学性能

碳质量分数 (%)	热处理制度		R_m	R_{eL}	A	Z	$a_K/$	硬度 HRC
			/MPa		(%)		(J/cm ²)	
0.10 ^①	900℃ 伪渗碳 6h, 缓冷	850℃ 加热, 于 180℃ 等温淬火, 830 ~ 850℃ 重加热油淬, 160℃ 回火	1193	1092	15.21	61.0	147	33 ~ 34
			1173	1100	4.4	64.0	150	33
			1155	1062	14.0	64.0	155	34.5
			902	812	16.8	68.9	168	28.5
			1062	960	14.4	64.0	151	29.2
			1054	940	14.0	61.0	154	29.5
0.16 ^②	900℃ 伪渗碳 6h, 缓冷	850℃ 加热, 于 180℃ 等温淬火, 760℃ 重加热油淬, 160℃ 回火	1360	1248	12.8	59.0	124	38.8
			1338	1220	12.8	59.0	125	37.0
			1390	1265	13.2	59.0	98	38.0
			1202	1082	14.0	64.0	>180	34
			1155	1033	13.6	68.9	>180	33
			1140	1018	14.0	70.8	>180	33
0.13 ^③	940℃ 伪渗碳 7h, 缓冷	870℃ 重加热油淬, 200℃ 回火, 890℃、780℃ 两次油淬, 200℃ 回火	1130	910	15	59	150	35
			1000	700	18	60	180	31

- ① 试验用钢成分 (质量分数): C0.10%, Mn0.35%, Cr0.71%, Ni2.81%, P、S 合格。
- ② 试验用钢成分 (质量分数): C0.16%, Mn0.43%, Cr0.83%, Ni2.87%, P、S 合格。
- ③ 试验用钢成分 (质量分数): C0.13%, Si0.35%, Mn0.46%, Cr0.71%, Ni2.88%, P0.012%, S0.011%。

4) 室温力学性能 (表 6-65)。

表 6-65 SM1CrNi3 钢室温力学性能

热处理毛坯 直径/mm	热处理制度	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	$a_K/$ (J/cm ²)	备注
15	860℃, 780℃ 两次油淬, 200℃ 回火, 水冷或空冷	≥950	≥700	≥11	≥50	≥90	
	860℃、780℃ 30min 油淬, 200℃ 180min 回火, 水冷	<u>1010 ~ 1510</u> 1270	<u>860 ~ 1380</u> 1150	<u>11 ~ 20</u> 14	<u>52 ~ 68</u> 61	92 - 197 158	50 炉钢
	860℃、780℃ 10min (盐浴炉) 油淬, 200℃ 回火 180min 水冷	<u>1080 ~ 1450</u> 1245	<u>820 ~ 1210</u> 985	<u>11 ~ 16</u> 14.1	<u>54 ~ 68</u> 61.9	<u>147 ~ 197</u> 168	16 炉电渣 重熔钢

(续)

热处理毛坯 直径/mm	热处理制度	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	a_K / (J/cm ²)	备注
16	830℃、800℃ 两次油 淬, 180℃ 回火空冷	1205	805	13.0	63.0	168	①
		1225	850	15.5	61.5	190	
	860℃、800℃ 两次油 淬, 180℃ 回火空冷	1235	890	14.5	61.5	188	①
		1210	875	14.0	63.5	169	
	890℃、800℃ 两次油 淬, 180℃ 回火空冷	1190	820	17.0	65.5	185	①
		1220	895	16.0	62.0	183	

注: 分子为数据范围, 分母为平均值。

① 试验用钢成分 (质量分数) 为 C0.4%、Si0.22%、Mn0.40%、Cr0.69%、Ni3.06%、P0.025%、S0.006%, 淬火前经 900℃ 正火、660℃ 回火、空冷预处理。

5) 高温力学性能 (表 6-66)。

表 6-66 SM1CrNi3 钢高温力学性能

预 处 理	温度/℃	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z /%	a_K /(J/cm ²)
880 ~ 900℃ 正火, 650℃ 3h 回火	20	560 ~ 590	400 ~ 450	26	73	240
	100	530	390	25.5	74.5	150 ~ 240
	200	525	380	22	72	230
	300	550	380	20	68	250
	400	475	345	20.5	75.5	210
	450	450	350	21	78.5	—
	500	355	310	20.5	83.5	150
	600	205	180	26	86	265
890 ~ 900℃ 油淬, 500℃ 3h 回火	20	815	755	17	68.5	160
	200	810	740	14	61	200
	300	820	740	16	65	150
	400	640	600	17	75	120
	500	500	460	18	75	120

(6) 材料应用

SM1CrNi3 钢具有良好的综合力学性能。在退火后硬度低、塑性好, 可以采用切削加工的方法或冷挤压成型的方法制造模具, 进行渗碳热处理后, 可保证型腔表面具有高硬度、高耐磨性, 而心部仍有很好的韧性, 利于采用冷挤压成型方法制造模具零件, 适于制造要求耐磨性高、尺寸较大的塑料模具。

2. 20 钢

(1) 化学成分

20 钢的化学成分 (GB/T 699—1999) 见表 6-67。

表 6-67 20 钢的化学成分（质量分数/%）

C	Si	Cr	Mn	Ni	P	S	Cu
0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	≤0.25	0.35 ~ 0.65	≤0.30	≤0.035	≤0.035	≤0.25

(2) 物理性能
临界点温度见表 6-68。

表 6-68 20 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}
温度（近似值）/℃	735	855	680	835

(3) 热加工
锻造工艺规范见表 6-69。

表 6-69 20 钢锻造工艺规范

始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
1200 ~ 1250	> 800	空气中冷却

(4) 热处理
1) 预备热处理工艺规范（表 6-70）。

表 6-70 20 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	保温时间	冷却方式	硬度 HBW
锻后退火	880 ~ 900	一定时间	炉冷	≤156
正火	890 ~ 920	一定时间	空冷	—
高温回火	680 ~ 720	一定时间	空冷	≤156

2) 淬火及回火。淬火及回火工艺规范见表 6-71。

表 6-71 20 钢淬火及回火工艺规范

淬火规范			回火规范		
淬火温度/℃	淬火冷却介质	硬度 HRC	回火温度/℃	冷却方法	硬度 HRC
860 ~ 900	油或水	30 ~ 35	160 ~ 180	空冷	43 ~ 48

3) 渗碳。
① 渗碳及淬火工艺规范（表 6-72）。

表 6-72 20 钢渗碳及淬火工艺规范

渗碳温度 /℃	冷却 方式	热处理规范				
		淬 火		回 火		
		淬火温度/℃	冷却方式	回火温度/℃	硬度	
					表面硬度 HRC	心部硬度 HBW
900 ~ 920	罐冷	780 ~ 800	水冷	160 ~ 190	58 ~ 62	170 ~ 190

② 碳氮共渗及淬火工艺规范（表 6-73）。

表 6-73 20 钢碳氮共渗及淬火工艺规范

共渗温度 /℃	冷却 方式	渗后热处理规范					
		淬火 ^①			回火		
		淬火温度 /℃	冷却方式	HRC	回火温度/℃	硬度	
						表面硬度 HRC	心部硬度 HBW
840 ~ 860	罐冷	840 ~ 860	水冷或油冷	≥60	160 ~ 180	58 ~ 62	160 ~ 190

① 碳氮共渗后直接淬火

(5) 力学性能

20 钢属于低碳钢，强度、硬度低，塑性、韧性好，常用正火或冷变形来提高强度、硬度，通常模具制造成形后，进行渗碳或碳氮共渗，再进行淬火 + 低温回火，可保证模具表面具有高硬度、高耐磨性，而心部具有很好的韧性。

(6) 材料应用

20 钢强度低，塑性好，适宜冷挤压成形普通的中小型塑料模具和小批量生产的塑料模具的型腔等。由于冷变形可以提高钢的强度，所以常在冷挤压成形前先进行正火处理，以提高钢的韧性。该钢缓慢冷却可能会使游离态铁素体在晶粒边界上析出，因此不宜在退火状态下制造各类零件。

3. 20Cr 钢

(1) 化学成分

20Cr 钢的化学成分（GB/T 3077—1999）见表 6-74。

表 6-74 20Cr 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	P	S
0.18 ~ 0.24	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.70 ~ 1.00	≤0.035	≤0.035

(2) 物理性能

1) 临界点温度（表 6-75）。

表 6-75 20Cr 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	Ar_1	Ar_3
温度（近似值）/℃	765	836	702	799

2) 线膨胀系数（表 6-76）。

表 6-76 20Cr 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 500	20 ~ 600
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	11.3	11.6	12.5	13.2	13.7	14.2

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-77。

表 6-77 20Cr 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1120	1200	≥800	堆冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-78)。

表 6-78 20Cr 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	冷却方式	硬度 HBW
锻后退火	860 ~ 890	炉冷	≤179
正火	870 ~ 900	空冷	≤217
高温回火	700 ~ 720	空冷	≤179

2) 淬火及回火。淬火及回火工艺规范见表 6-79。

表 6-79 20Cr 钢淬火及回火工艺规范

淬火规范		回火规范		
淬火温度/℃	冷却方式	回火温度/℃	冷却方式	硬度 HBW
860 ~ 880	油冷或水冷	450 ~ 480	油冷或空冷	≤250

3) 渗碳。

① 渗碳及淬火工艺规范 (表 6-80)。

表 6-80 20Cr 钢渗碳及淬火工艺规范 (工艺 I)

渗碳		淬火				回火	
渗碳温度 /℃	冷却方式	一次淬火		二次淬火		回火温度 /℃	表面硬度 HRC
		淬火温度/℃	冷却方式	淬火温度/℃	冷却方式		
900 ~ 920	罐冷	860 ~ 890	油冷或水冷	780 ~ 820	油冷或水冷	170 ~ 190	58 ~ 62

② 渗碳及感应淬火工艺规范 (表 6-81)。

表 6-81 20Cr 钢渗碳及感应淬火工艺规范 (工艺 II)

渗碳		感应淬火			回火	
渗碳温度/℃	冷却方式	加热温度/℃	冷却方式		回火温度/℃	表面硬度 HRC
900 ~ 920	罐冷	(根据需要)	感应加热的同时喷水或乳化液快速冷却		150 ~ 170	58 ~ 65

③ 碳氮共渗及淬火工艺规范 (表 6-82)。

表 6-82 20Cr 钢碳氮共渗及淬火工艺规范 (工艺 III)

碳氮共渗温度 /℃	淬火			回火	
	加热温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度/℃	硬度 HRC
840 ~ 860	840 ~ 860	油冷或水冷	≥60	160 ~ 180	58 ~ 62

注：碳氮共渗后直接淬火。

(5) 力学性能

20Cr 钢淬火并低温回火后具有良好的综合力学性能, 低温冲击韧度优良, 回火脆性不明显, 缺口敏感性小, 切削加工性能良好, 退火硬度低, 抗冷塑性变形能力低, 经渗碳处理并淬火和低温回火后, 可保证模具零件表面具有高硬度、高耐磨性, 而心部具有很好的韧性。

1) 20Cr 钢不同温度回火后的力学性能 (表 6-83)。

表 6-83 20Cr 钢不同温度回火后的力学性能

回火温度/℃	硬度 HRC	R_m /MPa	R_{el} /MPa	Z (%)	A (%)	a_K /(J/cm ²)
未回火	46.5	1605	1150	28	9	13
100	46	1600	1200	31	9	13
200	45.5	1530	1270	37	9	13
300	44	1405	1275	44	9	13.5
400	39	1250	1140	54	10.5	20
500	33	1030	990	64	15	38
600	25	820	795	72	20	50

注: 880℃ 水淬, 试样直径为 10mm。

2) 高温拉伸性能 (表 6-84)。

表 6-84 20Cr 钢高温拉伸性能

温度/℃	R_m /MPa	A (%)	Z (%)
20	523	29.3	69.9
800	488	36.4	56.7
900	475	19.1	25.2
1000	325	29.5	52.3
1100	329	42.5	96.7

注: 1. 试验用钢成分 (质量分数) 为 C0.023%, Si0.39%, Mn0.56%, Cr0.91%。

2. 试样预先经过 830℃ 退火。

3) 室温力学性能 (表 6-85)。

表 6-85 20Cr 钢室温力学性能

热处理毛坯 直径/mm	热处理制度	R_m	R_{eL}	A	Z	$a_K/$	备注
		/MPa		(%)		(J/cm ²)	
15	880℃ 水 或 油 淬, 800℃ 水 或 油 淬, 200℃ 回火	≥850	≥550	≥10	≥40	≥60	
	880℃ 40min 水 淬, 800℃ 30min 水 淬, 200℃ 180min 回火空冷	$\frac{890 \sim 1310}{1055}$	$\frac{550 \sim 810}{670}$	$\frac{10 \sim 20}{15.8}$	$\frac{36 \sim 58}{47.6}$	$\frac{60 \sim 120}{96}$	115 炉钢
	890℃ 40min 水 淬, 800℃ 20min 水 淬, 200℃ 180min 回火空冷	$\frac{1160 \sim 1480}{1240}$	$\frac{830 \sim 1200}{1000}$	$\frac{10 \sim 13}{12.5}$	$\frac{39 \sim 49}{40}$	$\frac{65 \sim 99}{84}$	14 炉 电渣重 熔钢

(续)

热处理毛坯 直径/mm	热处理制度	R_m	R_{eL}	A	Z	$a_K /$ (J/cm ²)	备注
		/MPa		(%)			
25	950℃ 空 冷, 860℃ 40min 油淬, 200℃90min 回火空冷	1009	629	17	58.0	92	①
	925℃ 伪渗碳 6h, 降温 至 875℃ 淬 火, 200℃ 回火	1240	1060	9.5	32	55	②

注：分子为数据范围，分母为平均值。

- ① 试验用钢成分（质量分数）：C0.24%，Si0.29%，Mn0.57%，Cr0.90%，P0.018%，S0.006%，Ni0.1%。
- ② 试验用钢成分（质量分数）：C0.21%，Si0.29%，Mn0.60%，Cr0.87%，P0.020%，S0.012%，Ni0.07%。

4）渗碳和伪渗碳后的力学性能（表 6-86）。

表 6-86 20Cr 钢渗碳和伪渗碳后的力学性能

热处理制度	静弯曲负荷/N				薄片试样			冲击吸收能量 A_K / J
	P_{max}	$P_{0.03}$	P_n	P_k	表面硬 度 HRC	心部硬 度 HRC	σ_{bb} /MPa	
930℃ 10h 渗 碳, 降温 到 830℃保温 10min, 油淬, 190℃ 90min 回火	58000	45300	35500	34500	59	53.5	1890	52
930℃ 8h 伪 渗 碳, 降温 到 850℃保温 10min, 油淬, 200℃ 60min 回火		31500	25000					

注：1. P_{max} 为断裂负荷， $P_{0.03}$ 为挠度为 0.003mm 时的负荷， P_n 为屈服负荷， P_k 为缺口试样的断裂负荷（缺口深 0.3mm， $r=0.2mm$ ， $\alpha=60^\circ$ ）。

2. 弯曲试样尺寸为 15mm×15mm×100mm，薄片试样尺寸为 2mm×11.5mm×80mm。

(6) 材料应用

20Cr 钢的强度较高，淬透性好，钢经淬火、低温回火后具有良好的综合力学性能，且冷变形性能较好。适宜于制造中小型塑料模具及模具型腔等。成形后进行渗碳或碳氮共渗处理，常用于制造表面具有高硬度和高耐磨性，而心部具有强韧性的模具。对于使用寿命要求不高的模具，也可以进行调质处理。

4. 20CrMnTi 钢

(1) 化学成分

20CrMnTi 钢的化学成分（GB/T 3077—1999）见表 6-87。

表 6-87 20CrMnTi 钢化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Ti	P	S
0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.80 ~ 1.10	1.00 ~ 1.30	0.04 ~ 0.10	≤0.035	≤0.035

(2) 物理性能

临界点温度见表 6-88。

表 6-88 20CrMnTi 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	Ar_1	Ar_3
温度 (近似值)/℃	740	825	650	730

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-89。

表 6-89 20CrMnTi 钢锻造工艺规范

始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方法
1200	900	堆冷, ≥φ100mm 锻件缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范见表 6-90。

表 6-90 20CrMnTi 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	冷却方式	硬度 HBW
锻后退火	860 ~ 880	炉冷	≤217
正火	920 ~ 950	风冷	156 ~ 207

2) 淬火及回火。推荐的淬火及回火工艺规范见表 6-91。

表 6-91 20CrMnTi 钢推荐的淬火及回火工艺规范

淬火规范				回火规范 ^①	
加热温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度/℃	冷却介质	回火硬度 HRC
860 ~ 890	油冷	≤60	500 ~ 650	油冷	35 ~ 40

① 在高温回火时有回火脆性, 宜快冷。

3) 渗碳及淬火

①工艺 I: 渗碳及淬火工艺规范见表 6-92。

表 6-92 20CrMnTi 钢渗碳及淬火工艺规范

渗碳		淬火			回火			
渗碳温度 /℃	冷却方式	淬火温度 /℃	淬火冷却 介质	硬度 HRC	回火温度 /℃	冷却 方式	硬度 HRC	
							表面	心部
900 ~ 920	罐冷	820 ~ 850	油	≥60	180 ~ 200	空冷	56 ~ 62	35 ~ 40

② 工艺 II: 碳氮共渗工艺规范见表 6-93。

表 6-93 20CrMnTi 钢碳氮共渗工艺规范

共渗温度 /℃	淬火			回火		
	淬火温度/℃	淬火冷却介质	硬度 HRC	回火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
840 ~ 860	830 ~ 850	油冷	≥60	160 ~ 180	空冷	58 ~ 62

(5) 力学性能

20CrMnTi 钢中的 Cr 和 Mn 元素有效地提高了钢的淬透性，使其具有一定的硬度和耐磨性，而且强度和韧性较好。该钢通过表面渗碳及渗后热处理，具有硬而耐磨的表面及韧性较好的心部，零件的变形较小，低温冲击韧度较高。钢正火后有良好的切削加工性能，可获得光洁的加工表面。但正火时必须采用风冷，避免出现带状组织，影响切削加工性能。在回火时有回火脆性，在高温回火后应快速冷却。

(6) 材料应用

20CrMnTi 钢作为一般渗碳钢使用，也可以作为调质钢使用。该钢热处理性能优良，热处理后硬度、耐磨性高，强度、韧性好，零件的变形小，适于制造几何形状复杂的塑料成型模具。特别是模具零件经表面渗碳及热处理后，可形成内韧外刚的综合性能，提高了模具零件的使用性能。

5. 12CrNi3 钢

(1) 化学成分

12CrNi3 钢的化学成分（GB/T 3077—1999）见表 6-94。

表 6-94 12CrNi3 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
0.10 ~ 0.17	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	0.60 ~ 0.90	2.75 ~ 3.15	≤0.035	≤0.035

(2) 物理性能

1) 临界点温度（表 6-95）。

表 6-95 12CrNi3 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	Ar_1	Ar_3	M_s
温度（近似值）/℃	720	810	600	715	409

注：试验用钢成分（质量分数）为 C0.13%，Mn0.50%，Cr0.76%，Ni2.92%，P0.013%，S0.04%。

2) 比热容（表 6-96）。

表 6-96 12CrNi3 钢比热容

温度/℃	380	425
比热容 c_p / [J/(kg·K)]	656.2	643.7

3) 线膨胀系数（表 6-97）。

表 6-97 12CrNi3 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 500
线膨胀系数 α / $\times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	11.8	13.0	14.0	15.3

4) 热导率 (表 6-98)。

表 6-98 12CrNi3 钢热导率

温度/℃	60	500	750	910
热导率 λ /[W/(m·K)]	30.9	25.5	21.3	18.8

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-99。

表 6-99 12CrNi3 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1200	1180	≥850	缓冷

(4) 热处理工艺

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-100)。

表 6-100 12CrNi3 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	冷却方式	硬度 HBW
锻后退火	670 ~ 680	炉冷	≤229
正火	880 ~ 940	空冷	—
高温回火	670 ~ 680	空冷	≤229

2) 淬火及回火。推荐的淬火及回火工艺规范见表 6-101。

表 6-101 12CrNi3 钢推荐的淬火及回火工艺规范

淬火规范		回火规范		
淬火温度/℃	淬火冷却介质	回火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
860	油	200 ~ 600 (按需要)	油冷	58 ~ 42

3) 渗碳及淬火与回火。

① 渗碳及淬火与回火工艺规范见表 6-102。

表 6-102 12CrNi3 钢渗碳及淬火与回火工艺规范

工艺	渗碳		淬火			回火		
	渗碳温度 /℃	冷却 方式	淬火温度 /℃	淬火冷却 介质	硬度 HRC	回火温度 /℃	硬度 HRC	
							表面	心部
I	900 ~ 920	罐冷	860	油	—	160 ~ 180	58 ~ 62	26 ~ 40
II			760 ~ 810	油	60	160 ~ 180	58 ~ 62	26 ~ 40

② 碳氮共渗及淬火与回火工艺规范 (表 6-103)。

表 6-103 12CrNi3 钢碳氮共渗及淬火与回火工艺规范

共渗温度/℃	淬火		回火	
	淬火方式	硬度 HRC	回火温度/℃	表面硬度 HRC
840 ~ 860	出炉后直接油淬	≥60	160 ~ 180	≥58

(5) 力学性能

12CrNi3 合金渗碳钢淬透性好，在淬火、低温或高温回火后，具有良好的综合力学性能；在退火后硬度低、塑性好，可以采用切削加工的方法或冷挤压成型的方法制造模具。模具型腔制造成形后，进行渗碳热处理从而保证型腔表面具有高硬度、高耐磨性，而心部仍有很好的韧性，但该钢有回火脆性和形成白点的倾向。

1) 拉伸性能与疲劳性能（表 6-104）。

表 6-104 12CrNi3 钢拉伸性能与疲劳性能

毛坯直径 /mm	热处理制度	R_m	R_{eL}	σ_{-1}	σ_{-1k}	τ_{-1}
		/MPa				
16	900℃正火，660℃回火空冷；860℃、780℃两次油淬，180℃回火空冷	1215	840	510	260	①
15	940℃伪渗碳 7h 缓冷，870℃油淬，200℃回火 940℃伪渗碳 7h 缓冷，820℃油淬，500℃回火	1130	910	460	—	②
		745	622	345	—	235 ^③

① 试验用钢成分（质量分数）：C0.14%，Si0.22%，Mn0.44%，Cr0.69%，Ni3.036%，P0.025%，S0.016%。

② 试验用钢成分（质量分数）：C0.13%，Si0.35%，Mn0.46%，Cr0.71%，Ni2.88%，P0.012%，S0.011%。

③ 试验用钢成分（质量分数）：C0.19%，Si0.27%，Mn0.40%，Cr0.70%，Ni3.02%。

2) 不同温度回火后的力学性能（表 6-105）。

表 6-105 12CrNi3 钢不同温度回火后的力学性能

毛坯直径 /mm	热处理制度		R_m	R_{eL}	A	Z	a_K	备注
			/MPa		(%)		(J/cm ²)	
15	900℃正火，660℃回火空冷	800℃油淬，200℃回火空冷	1400	1290	12.0	60.0	105	①
		800℃油淬，300℃回火空冷	1290	1150	12.5	67.0	80	
		800℃油淬，400℃回火空冷	1220	1090	13.5	68.0	90	
		800℃油淬，500℃回火空冷	1030	940	18.0	70.0	120	
		800℃油淬，600℃回火空冷	750	660	23.5	74.0	170	
16	900℃正火，660℃回火空冷	860℃、780℃油淬，180℃回火空冷	1150	785	15.0	64.0	159	②
		860℃、780℃油淬，200℃回火空冷	1215	840	15.0	63.0	178	
		860℃、780℃油淬，200℃回火空冷	1195	835	15.0	65.5	197	
		860℃、780℃油淬，200℃回火空冷	1220	885	15.0	65.5	177	
		860℃、780℃油淬，230℃回火空冷	1195	830	14.0	61.5	185	
		860℃、780℃油淬，230℃回火空冷	1225	890	15.0	66.0	195	
		860℃、780℃油淬，260℃回火空冷	1210	875	16.0	66.0	175	
		860℃、780℃油淬，260℃回火空冷	1235	905	14.0	65.5	178	

① 试验用钢成分（质量分数）：C0.17%，Si0.19%，Mn0.35%，Cr1.26%，Ni3.25%，P0.016%，S0.016%。

② 试验用钢成分（质量分数）：C0.14%，Si0.22%，Mn0.40%，Cr0.69%，Ni3.06%，P0.025%，S0.006%。

3) 低温冲击韧度 (表 6-106)。

表 6-106 12CrNi3 钢低温冲击韧度

毛坯直径 /mm	热处理制度	$a_K/(J/cm^2)$			
		0℃	-20℃	-40℃	-60℃
17 (方)	940℃ 伪渗碳 7h, 870℃ 油淬, 200℃ 回火空冷 900℃ 正火, 660℃ 回火空冷; 860℃ 油淬, 180℃ 回火空冷	150	140	124	110 ^①
		187	167	140	120 ^②
15	900℃ 正火, 600℃ 回火空冷; 860℃、 780℃ 两次油淬, 180℃ 回火空冷	171	153	142	126 ^②

① 试验用钢成分 (质量分数): C0.13%, Si0.325%, Mn0.46%, Cr0.71%, Ni2.88%, P0.012%, S0.011%。

② 试验用钢成分 (质量分数): C0.14%, Si0.22%, Mn0.44%, Cr0.69%, Ni3.06%, P0.025%, S0.006%。

4) 伪渗碳后再经淬火、回火的力学性能 (表 6-107)。

表 6-107 12CrNi3 钢伪渗碳后再经淬火、回火的力学性能

碳质量分数 (%)	热处理制度		R_m	R_{eL}	A	Z	a_K	硬度
			/MPa		(%)		$/(J/cm^2)$	HRC
0. 10 ^①	900℃ 伪 渗 碳 6h, 缓冷	850℃ 加 热, 于 180℃ 等温淬火, 830℃ ~850℃ 重加热油淬, 160℃ 回火	1193	1092	15. 21	61. 0	147	33 ~ 34
			1173	1100	14. 4	64. 0	150	33
			1155	1062	14. 0	64. 0	155	34. 5
			902	812	16. 8	68. 9	168	28. 5
			1062	960	14. 4	64. 0	151	29. 2
			1054	940	14. 0	61. 0	154	29. 5
0. 16 ^②	900℃ 伪 渗 碳 6h, 缓冷	850℃ 加 热, 于 180℃ 等温淬火, 760℃ 重加热 油淬, 160℃ 回火	1360	1248	12. 8	59. 0	124	38. 8
			1338	1220	12. 8	59. 0	125	37. 0
			1390	1265	13. 2	59. 0	98	38. 0
			1202	1082	14. 0	64. 0	> 180	34
			1155	1033	13. 6	68. 9	> 180	33
			1140	1018	14. 0	70. 8	> 180	33
0. 13 ^③	940℃ 伪 渗 碳 7h, 缓冷	870℃ 重 加 热 油 淬, 200℃ 回火, 890℃、780℃ 两次油淬, 200℃ 回火	1130	910	15	59	150	35
			1000	700	18	60	180	31

① 试验用钢成分 (质量分数): C0.10%, Mn0.35%, Cr0.71%, Ni2.81%, P、S 合格。

② 试验用钢成分 (质量分数): C0.16%, Mn0.43%, Cr0.83%, Ni2.87%, P、S 合格。

③ 试验用钢成分 (质量分数): C0.13%, Si0.35%, Mn0.46%, Cr0.71%, Ni2.88%, P0.012%, S0.011%。

5) 室温力学性能 (表 6-108)。

表 6-108 12CrNi3 钢室温力学性能

热处理毛坯 直径/mm	热处理制度	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	$a_K/(J/cm^2)$	备注
15	860℃、780℃ 两次油淬， 200℃ 回火，水冷或空冷	≥950	≥700	≥11	≥50	≥90	
	860℃、780℃ 30min 油淬， 200℃ 180min 回火，水冷	1010 ~ 1510 1270	860 ~ 1380 1150	$\frac{11 \sim 20}{14}$	$\frac{52 \sim 68}{61}$	$\frac{92 \sim 197}{158}$	50 炉钢
	860℃、780℃ 10min (盐 浴炉) 油淬，200℃ 回火 180min，水冷	1080 ~ 1450 1245	820 ~ 1210 985	$\frac{11 \sim 16}{14.1}$	$\frac{54 \sim 68}{61.9}$	$\frac{147 \sim 187}{168}$	16 炉电渣 重熔钢
25	830℃、800℃ 两次油淬， 180℃ 回火，空冷	1205 1225	805 850	13.0 15.5	63.0 61.5	168 190	①
	860℃、800℃ 两次油淬， 180℃ 回火空冷	1235 1210	890 875	14.5 14.0	61.5 63.5	188 169	①
	890℃、800℃ 两次油淬， 180℃ 回火空冷	1190 1220	820 895	17.0 16.0	65.5 62.0	185 183	①

注：分子为数据范围，分母为平均值。

① 试验用钢成分（质量分数）为 C0.4%、Si0.22%、Mn0.40%、Cr0.69%、Ni3.06%、P0.025%、S0.006%，淬火前经 900℃ 正火、660℃ 回火、空冷预处理。

6) 高温力学性能（表 6-109）。

表 6-109 12CrNi3 钢高温力学性能

预 处 理	温度/℃	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z /%	$a_K/(J/cm^2)$
880 ~ 900℃ 正火， 650℃ 3h 回火	20	560 ~ 590	400 ~ 450	26	73	240
	100	530	390	25.5	74.5	150 ~ 240
	200	525	380	22	72	230
	300	550	380	20	68	250
	400	475	345	20.5	75.5	210
	450	450	350	21	78.5	—
	500	355	310	20.5	83.5	150
	600	205	180	26	86	265
890 ~ 900℃ 油淬， 500℃ 3h 回火	20	815	755	17	68.5	160
	200	810	740	14	61	200
	300	820	740	16	65	150
	400	640	600	17	75	120
	500	500	460	18	75	120

(6) 材料应用

12CrNi3 合金渗碳钢在淬火、低温或高温回火后，具有良好的综合力学性能，退火后硬度低、塑性好。常采用切削方法成形或挤压成形方法制造塑料模具。模具成形后，进行渗碳处理再淬火、低温回火。适合制造大、中型塑料模具和截面尺寸稍大的模具零件。

6. 12CrNi2 钢

(1) 化学成分

12CrNi2 钢的化学成分（GB/T 3077—1999）见表 6-110。

表 6-110 12CrNi2 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
0.10 ~ 0.17	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	0.60 ~ 0.90	1.50 ~ 1.90	≤0.035	≤0.035

(2) 物理性能

临界点温度见表 6-111。

表 6-111 12CrNi2 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}
温度 (近似值)/℃	732	794	671	763

(3) 热加工

12CrNi2 钢锻造工艺规范见表 6-112。

表 6-112 12CrNi2 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1200	1180	≥850	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-113)。

表 6-113 12CrNi2 钢预备热处理方案

预备热处理方案	加热温度/℃	冷却方式	硬度 HBW
锻后退火	670 ~ 680	炉冷	≤207
正火	880 ~ 920	空冷	—
高温回火	670 ~ 680	空冷	≤229

2) 淬火及回火。推荐的淬火及回火工艺规范见表 6-114。

表 6-114 12CrNi2 钢推荐的淬火及回火工艺规范

淬火规范		回火规范	
淬火温度/℃	冷却方法	回火温度/℃	硬度 HRC
840 ~ 880	油冷	200 ~ 600 (按需要)	—

3) 渗碳及淬火与回火。

① 渗碳及淬火与回火工艺规范 (表 6-115)。

表 6-115 12CrNi2 钢渗碳及淬火与回火工艺规范

工艺	渗碳温度/℃	淬火			回火	
		淬火温度/℃	淬火冷却介质	硬度 HRC	回火温度/℃	硬度 HRC
						表面 心部
I	900 ~ 920℃	860	油	≥60	160 ~ 180	58 ~ 62 26 ~ 40
II	(罐冷)	760 ~ 810	油	≥60		

② 碳氮共渗工艺规范（表 6-116）。

表 6-116 12CrNi2 钢碳氮共渗工艺规范

碳氮共渗温度/℃	淬火	回火		
		回火温度/℃	冷却方式	表面硬度 HRC
840 ~ 860	出炉后直接油冷淬火硬度 60HRC	160 ~ 180	空冷	≥58

(5) 力学性能

12CrNi2 合金渗碳钢具有高强度、高韧性及良好的淬透性。在淬火、低温或高温回火后都有良好的综合力学性能，钢的低温韧性好，缺口敏感性小，回火脆性倾向小。钢在退火后硬度低、塑性好，可采取切削或挤压成形。渗碳 + 淬火 + 低温回火后，模具表面硬度高、耐磨性高，而心部韧性好。

(6) 材料应用

12CrNi2 钢属于合金渗碳钢，具有高强度、高韧性及良好的淬透性，在淬火、低温回火或高温回火后都具有良好的综合力学性能，钢退火后硬度低、塑性较好，可以采用切削加工的方法制造模具，或采用冷挤压的方法制造模具，适宜制造大、中型塑料模具及模具型腔等零件。

7. 12Cr2Ni4 钢

(1) 化学成分

12Cr2Ni4 钢的化学成分（GB/T 3077—1999）见表 6-117。

表 6-117 12Cr2Ni4 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
0.10 ~ 0.16	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	1.25 ~ 1.65	3.25 ~ 3.65	≤0.035	≤0.035

(2) 物理性能

临界点温度见表 6-118。

表 6-118 12Cr2Ni4 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}
温度（近似值）/℃	720	780	575	660

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-119。

表 6-119 12Cr2Ni4 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷 却
1200	1150 ~ 1200	800 ~ 850	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 6-120）。

表 6-120 12Cr2Ni4 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	冷却方式	硬度 HBW
锻后退火	670 ~ 680	炉冷	≤269
正火	880 ~ 920	空冷	—
高温回火	670 ~ 680	空冷	≤269

2) 淬火及回火。淬火及回火工艺规范见表 6-121。

表 6-121 12Cr2Ni4 钢淬火及回火工艺规范

淬火规范		回火规范	
淬火温度/℃	冷却方式	回火温度/℃	硬度 HRC
840 ~ 880	油冷	200 ~ 600	(按需要进行回火)

3) 渗碳及淬火与回火。

①工艺 I：渗碳工艺规范见表 6-122。

表 6-122 12Cr2Ni4 钢渗碳工艺规范

渗碳温度/℃	淬 火			回 火		
	淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
910 ~ 930℃ (罐冷)	820 ~ 840	油冷	≥60	160 ~ 200	空冷	≥58

②工艺 II：碳氮共渗工艺规范见表 6-123。

表 6-123 12Cr2Ni4 钢碳氮共渗工艺规范

碳氮共渗温度/℃	淬 火	回 火		
840 ~ 860	碳氮共渗后出炉直接油冷， 硬度≥60HRC	回火温度/℃	冷却方式	表面硬度 HRC
		160 ~ 180	空冷	≥58

(5) 力学性能

12Cr2Ni4 钢是优质渗碳钢，具有高的强度、韧性和良好的淬透性。渗碳及淬火后表面硬度和耐磨性高，同时心部有很高的强度及良好的韧性。但钢的切削加工性能一般，冷变形塑性中等，有白点敏感性及回火脆性，焊接性差，焊前需要预热。

(6) 材料应用

12Cr2Ni4 钢是优质渗碳钢，具有高的强度和韧性，渗碳及淬火后具有高的表面硬度和耐磨性，同时心部有很高的强度及良好的韧性。可使用冷挤压成形方法制造模具，也可以用切削加工的方法制造模具，也适合调质状态下使用，适宜制造大、中型塑料模具及其零件。

8. 20Cr2Ni4 钢

(1) 化学成分

20Cr2Ni4 钢的化学成分 (GB/T 3077—1999) 见表 6-124。

表 6-124 20Cr2Ni4 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	1.25 ~ 1.65	3.25 ~ 3.65	≤0.035	≤0.035

(2) 物理性能

临界点温度见表 6-125。

表 6-125 20Cr2Ni4 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}	M_s
温度（近似值）/℃	720	780	575	660	305

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-126。

表 6-126 20Cr2Ni4 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
1200	1150 ~ 1200	≥850	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 6-127）。

表 6-127 20Cr2Ni4 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	冷却方式	硬度 HBW
锻后退火	670 ~ 680	炉冷	≤229
正火	880 ~ 940	空冷	—
高温回火	670 ~ 680	空冷	≤229

2) 推荐的淬火及回火工艺规范（表 6-128）

表 6-128 20Cr2Ni4 钢推荐的淬火及回火工艺规范

淬火规范		回火规范	
淬火温度/℃	冷却方式	回火温度/℃	硬度 HRC
860	油冷	200 ~ 600	（按需要进行回火）

3) 渗碳及淬火与回火。

① 工艺 I：渗碳工艺规范见表 6-129。

表 6-129 20Cr2Ni4 钢渗碳工艺规范

渗碳温度/℃	淬火			回 火					
	淬火温度/℃	冷却介质	硬度 HRC	常规回火			高温回火		
				回火温度 /℃	冷却介质	表面硬度 HRC	回火温度 /℃	硬度 HRC	
								表面	心部
900 ~ 920 （罐冷）	820 ~ 840	油	60	160 ~ 200	空气	≥58	640 ~ 680	58	26 ~ 40

② 工艺 II：碳氮共渗工艺规范见表 6-130。

表 6-130 20Cr2Ni4 钢碳氮共渗工艺规范

共渗温度/℃	回 火		
	回火温度/℃	冷却方式	表面硬度 HRC
840 ~ 860 出炉后直接油冷，硬度≥60HRC	160 ~ 180	空冷	≥58

(5) 力学性能

20Cr2Ni4 钢为优质渗碳钢，强度、韧性好，经淬火、回火后综合力学性能好，经渗碳、淬火、回火后，模具表面硬度高、耐磨性好，心部保持强韧性。

(6) 材料应用

20Cr2Ni4 钢是优质渗碳钢, 经热处理后具有良好的综合力学性能, 适宜制造大、中型塑料模具及零件。该钢在渗碳后, 不能直接回火, 同时, 在淬火前应进行一次高温回火。切削加工性能一般, 焊接性较差, 焊前应预热, 白点敏感性大, 有回火脆性倾向, 适合调质状态下使用。

9. 0Cr4NiMoV (LJ) 钢

(1) 化学成分

0Cr4NiMoV 钢的化学成分见表 6-131。

表 6-131 0Cr4NiMoV 钢的化学成分 (质量分数) (%)

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S
中国 ^①	LJ	≤0.08	≤0.20	≤0.30	3.60~4.20	0.30~0.70	0.20~0.60	0.08~0.15	≤0.030	≤0.030
美国 (AISI)	P2	0.07	0.20~0.40	0.20~0.40	2.00	0.50	0.20	—	—	—
美国 (AISI)	P4	0.07	0.20~0.40	0.20~0.40	5.00	—	0.75	—	—	—
德国	WE5	0.06	0.20	0.30	5.00	—	—	—	—	—
德国	CNS2H	0.20	0.20	0.50	1.20	3.80	0.20	—	—	—
日本	CH2	0.07	0.20	0.30	2.00	0.50	0.20	—	—	—
日本	CH41	<0.06	<0.20	<0.30	5.00		0.90	0.30	—	—

① 瑞典的 8416 钢与我国的 LJ 钢化学成分相近。

(2) 物理性能

临界点温度见表 6-132。

表 6-132 0Cr4NiMoV 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	Ar_1	Ar_3	M_s
温度 (近似值) /℃	725	847	682	780	450

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-133。

表 6-133 0Cr4NiMoV 钢锻造工艺规范

装炉温度/℃	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
≤800	1200~1230	1200	≥900	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理。锻后退火工艺见表 6-134。

表 6-134 0Cr4NiMoV 钢锻后退火工艺

加热温度/℃	保温时间/h	冷却方式	退火硬度 HBW
880	2	炉冷至 650℃ 出炉空冷	100~105

2) 渗碳及淬火与回火。

① 渗碳工艺规范 (表 6-135)。

表 6-135 0Cr4NiMoV 钢渗碳工艺规范

渗碳温度/℃	渗后淬火			回火			
	淬火温度 /℃	淬火冷却 介质	硬度 HRC	回火温度 /℃	冷却方式	硬度 HRC	
						表面	心部
900 ~ 930 (罐冷)	850 ~ 870	油	≥60	160 ~ 180		≥58	27 ~ 29

② 碳氮共渗工艺规范 (表 6-136)。

表 6-136 0Cr4NiMoV 钢碳氮共渗工艺规范

碳氮共渗温度/℃	渗后淬火		回火	
	淬火温度/℃	硬度 HRC	回火温度/℃	硬度 HRC
840 ~ 860	出炉后直接油冷淬火	≥60	160 ~ 180	≥58

③ 渗碳温度和保温时间对渗层深度的影响 (表 6-137)。

表 6-137 0Cr4NiMoV 钢渗碳温度和保温时间对渗层深度的影响

渗碳温度/℃	下列保温时间下的渗层深度/mm						
	1h	2h	3 ~ 5h	6h	8h	11h	16h
900	0.11	0.39	0.65	0.84	1.11	1.50	2.05
925	0.39	0.81	1.30	1.61	1.95	2.51	渗透
950	0.52	1.04	1.56	1.95	2.45	渗透	渗入

(5) 力学性能

0Cr4NiMoV (LJ) 钢属于冷成形专用钢。含碳量很低,因而塑性好,变形抗力小,冷成形性与工业纯铁相似,用冷挤压法成形的模具型腔轮廓清晰、光洁、精度高。淬透性好,渗碳能力强,经渗碳及淬火、回火后,模具表面获得高硬度、高耐磨性,心部获得强韧性。

1) 淬火温度对渗碳后力学性能的影响 (表 6-138)。

表 6-138 0Cr4NiMoV 钢淬火温度对渗碳后力学性能的影响

淬火温度/℃	800	830	850	870	880	890	920
表面硬度 HRC	59.8	80.3	61.4	60.3		59.9	59.8
抗弯强度/MPa	1020	1100	1140	1110		1090	1070
心部强度/MPa	—	—	1001	—	1015	—	—

注:试样 925℃ 渗碳 6h, 淬火后回火 2h。

2) 渗碳淬火、回火后渗碳层硬度分布 (表 6-139)。

(6) 材料应用

0Cr4NiMoV (LJ) 钢属于冷成形专用钢。主要用来替代 10 钢、20 钢及工业纯铁等冷挤压成形的精密塑料模。由于渗碳淬硬层较深,整体硬度高,不会出现型腔表面塌陷和内壁咬伤现象,使用效果良好。常用于制造高精度、高镜面、型腔复杂的塑料模具。

表 6-139 0Cr4NiMoV 钢渗碳层硬度分布

与表面的距离 /mm	下列淬火温度下的渗层硬度 HV		
	800℃	850℃	920℃
0.05	794.9	817.5	794.9
0.10	759.4	809.9	759.4
0.20	739.2	802.3	739.2
0.40	697.0	759.4	707.2
0.60	638.6	695.0	638.6
0.80	544.4	654.8	—
1.00	444.1	574.4	—
1.20	406.6	501.3	459.8
1.40	374.8	444.1	406.6
1.60	324.6	401.4	352.1
1.80	294.3	449.0	332.5
2.00	276.9	330.5	332.5

注：试样经 925℃ 渗碳 6h，200℃ 回火 2h。

6.2.3 预硬型塑料模具钢

预硬型塑料模具钢在供货时已预先对模具钢进行了热处理使之达到了模具使用时的硬度。根据模具工作条件，硬度范围变化较大，较低硬度为 25 ~ 35HRC，较高硬度为 40 ~ 50HRC。在这种硬度条件下，可以把模具加工成形不再进行热处理而直接使用，从而保证了模具的制造精度。我国目前使用的预硬型塑料模具钢，大多数以中碳钢为基础，适当加入 Cr、Mn、Mo、Ni、V 等合金元素制成。为了解决在较高硬度下机械加工的困难，在冶炼时适当地向钢中加入 S、Ca、Pb、Se 等元素，以便改善钢的切削加工性能，从而冶炼成易切削的预硬化钢，使模具在较高硬度下顺利完成车、钻、刨、铣、镗、磨等加工过程。已经列入国家标准的预硬型塑料模具钢有 3Cr2Mo 和 3Cr2MnNiMo 两种，加上近年来研制引进钢种及一些传统中碳合金钢，预硬型塑料模具钢已基本上形成体系。常用预硬型塑料模具钢见表 6-140。

表 6-140 常用预硬型塑料模具钢

类别	钢 号
预硬型塑料模具钢	SM3Cr2Mo、SM3Cr2MnNiMo、40Cr、42CrMo、5CrNiMnMoVSCa、30CrMnSiNi2A、8Cr2MnWMoVS、Y55CrNiMnMoVS、20CrNi3AlMnMo、25CrNi3MoAl 等
冷热兼用型模具钢	5CrMnMo、5CrNiMo、4Cr5MoSiV、4Cr3Mo3SiV 等

- 注：1. 预硬化钢可以在模具加工成形后进行渗碳、渗氮热处理，在原有基体硬度的基础上，使模具的表面硬度和耐磨性提高。
2. 预硬型塑料模具钢虽然在钢厂就进行了最终热处理（淬火、中高温回火），但如果要进行改锻或进一步改变硬度和力学性能，可以重新进行淬火、回火，而且必须在锻造后进行退火热处理，所以在介绍预硬型模具钢时，按照常规钢材进行热加工和热处理。
3. 5CrMnMo、5CrNiMo、4Cr5MoSiV、4Cr3Mo3SiV 等钢号在冷作模具钢和热作模具钢中已经介绍，可参阅有关章节。

1. SM3Cr2Mo（P20）钢

（1）化学成分

SM3Cr2Mo 钢的化学成分见表 6-141。

表 6-141 SM3Cr2Mo 钢的化学成分（质量分数）（%）

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S	其他
中国（GB ^① ）	3Cr2Mo	0.28 ~ 0.40	0.20 ~ 0.80	0.60 ~ 1.00	1.40 ~ 2.00	0.30 ~ 0.55	≤0.030	≤0.030	—
美国	P20	0.28 ~ 0.40	0.20 ~ 0.80	0.60 ~ 1.00	1.40 ~ 2.00	0.30 ~ 0.55			
瑞典	618	0.32 ~ 0.38	0.20 ~ 0.40	0.60 ~ 1.00	1.60 ~ 2.00	0.40 ~ 0.60			V: 0.02 ~ 0.04 Ni: 0.04 ~ 0.05
德国	GSW-2311	0.35 ~ 0.45	0.20 ~ 0.40	1.30 ~ 1.60	1.80 ~ 2.10	0.15 ~ 0.25			
韩国	NP-4MA	0.32 ~ 0.38	0.20 ~ 0.40	0.60 ~ 1.40	1.60 ~ 2.00	0.15 ~ 0.25			
奥地利	M202	0.35 ~ 0.45	0.20 ~ 0.40	1.30 ~ 1.60	1.80 ~ 2.10	0.15 ~ 0.25			

① GB/T 1299—2000、YB/T 094—1997。

（2）物理性能

1) 临界点温度（表 6-142）。

表 6-142 SM3Cr2Mo 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	Ar_1	Ar_3	M_s	M_f
温度（近似值）/℃	770	825	640	760	335	180

2) 线膨胀系数（表 6-143）。

表 6-143 SM3Cr2Mo 钢线膨胀系数

温度/℃	18 ~ 100	18 ~ 200	180 ~ 300	18 ~ 400	18 ~ 500	18 ~ 600	18 ~ 700
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	11.90	12.20	12.50	12.81	13.11	13.41	13.71

3) 热导率（表 6-144）。

表 6-144 SM3Cr2Mo 钢热导率

温度/℃	20	100	200	300	400
热导率 $\lambda / [\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})]$	36.0	33.4	31.4	30.1	29.3

4) 其他物理性能（表 6-145）。

表 6-145 SM3Cr2Mo 钢其他物理性能

密度/(g/cm ³)	泊松比 μ	弹性模量(室温) E/MPa	剪切模量(室温) G/MPa
7.81	0.288	212000	825000

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-146。

表 6-146 SM3Cr2Mo 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1180 ~ 1200	1130 ~ 1150	≥850	坑冷
钢坯	1120 ~ 1160	1070 ~ 1100	≥850	砂冷或缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 6-147）。

表 6-147 SM3Cr2Mo 钢预备热处理方案

预备热处理方案	加热温度/℃	等温温度	硬度 HBW
等温退火	840 ~ 860℃ × 2h	710 ~ 730℃ × 4h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷	≤229
高温回火	720 ~ 740℃ × 2h	炉冷至 500℃ 以下出炉空冷。	≤229

2) 推荐的淬火及回火工艺规范（表 6-148）。

表 6-148 SM3Cr2Mo 钢推荐的淬火及回火工艺规范

淬火规范			回火规范		
淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
850 ~ 880	油冷	50 ~ 52	580 ~ 640	空冷	28 ~ 36

注：SM3Cr2Mo（P20）钢可进行渗碳、渗氮、氮碳共渗或离子渗氮后再抛光，表面粗糙度值 Ra 可以降低到 0.03 μm 左右，模具表面光亮度可以进一步提高，模具使用寿命提高。

(5) 力学性能

SM3Cr2Mo（P20）预硬化钢淬透性高，可以使截面尺寸较大的钢材获得较均匀的硬度，其综合力学性能较好。该钢具有很好的抛光性能，制成模具的表面粗糙度值低。该钢出厂时已进行预硬化处理，硬度为 28 ~ 35HRC（即预硬化），经冷加工制成模具后直接使用，避免了热处理引起模具的变形。经改锻后，根据模具性能要求重新进行热处理。其回火温度对力学性能的影响见表 6-149。

表 6-149 SM3Cr2Mo 钢回火温度对力学性能性能的影响

回火温度/℃	硬度 HRC	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	a_K /(J/cm ²)
450	42	—	—	—	—	50
500	41	1350	1200	11	52	60
550	38	1250	1200	14	58	80
600	33	1010	1140	17	65	115
650	26	900	720	20	58	150
700	21	790	600	23	69	180

(6) 材料应用

SM3Cr2Mo (P20) 钢综合力学性能较好、淬透性高, 可以使截面尺寸较大的钢材获得较均匀的硬度。该钢具有很好的抛光性能, 制成模具的表面粗糙值低。用该钢制造模具时, 一般先进行调质处理, 硬度为 28~35HRC (即预硬化), 再经冷加工制成模具后可直接使用, 避免了热处理引起模具的变形。因此该钢种适于制造大、中型和精密塑料模以及低熔点合金 (如锡、锌、铅合金) 压铸模等。

2. SM3Cr2MnNiMo (718) 钢

(1) 化学成分

SM3Cr2MnNiMo 钢的化学成分见表 6-150。

表 6-150 SM3Cr2MnNiMo 钢的化学成分 (质量分数) (%)

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S
中国 ^①	3Cr2MnNiMo	0.32 ~ 0.40	0.20 ~ 0.40	1.10 ~ 1.50	1.70 ~ 2.00	0.25 ~ 0.40	0.85 ~ 1.15	≤0.030	≤0.030
瑞典	718	0.32 ~ 0.40	0.20 ~ 0.80	1.00 ~ 1.50	1.70 ~ 2.00	0.25 ~ 0.40	0.85 ~ 1.11	—	—
法国	CLC2738	0.37	0.30	1.60	—	0.20	1.00	—	—
德国	GSW2738	0.35 ~ 0.45	0.20 ~ 0.40	1.30 ~ 1.60	1.80 ~ 2.50	0.15 ~ 0.25	0.90 ~ 1.20	—	—
奥地利	M238	0.35 ~ 0.45	0.20 ~ 0.40	1.30 ~ 1.60	1.80 ~ 2.10	0.15 ~ 0.25	0.90 ~ 1.20	—	—

① GB/T 1299—2000。

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 6-151)。

表 6-151 SM3Cr2MnNiMo 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	M_s
温度 (近似值) /℃	715	770	280

2) 弹性模量 (表 6-152)。

表 6-152 SM3Cr2MnNiMo 钢弹性模量

温度/℃	20	200
弹性模量 E /MPa	205000	200000

3) 热导率 (表 6-153)。

表 6-153 SM3Cr2MnNiMo 钢热导率

温度/℃	20	200
热导率 λ /[W/(m·K)]	29.0	29.5

4) 其他物理性能 (表 6-154)。

表 6-154 SM3Cr2MnNiMo 钢其他物理性能

密度/(g/m ³)	线膨胀系数 α (在 20 ~ 200℃ 范围内)/ $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	比热容 c_p (20℃)/[J/(kg · K)]
7.8	12.7	460

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-155。

表 6-155 SM3Cr2MnNiMo 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1140 ~ 1180	1050 ~ 1140	≥ 850	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-156)。

表 6-156 SM3Cr2MnNiMo 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	保温时间/h	等温温度/℃	冷却方式
锻后高温回火	690 ~ 710	4	—	炉冷至 500℃ 以下出炉空冷
锻后等温退火	840 ~ 870	2	690 ~ 710 (4h)	炉冷至 500℃ 以下出炉空冷

2) 淬火及回火。推荐的淬火及回火工艺规范见表 6-157。

表 6-157 SM3Cr2MnNiMo 钢推荐的淬火及回火工艺规范

淬火规范			回火规范		
淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
850℃ ± 20	油冷或空冷	≥ 50	550 ~ 650	空冷	30 ~ 38

(5) 力学性能

SM3Cr2MnNiMo (718) 预硬型塑料模具钢具有高的强韧性和耐蚀性, 该钢淬透性好, 可以使大截面尺寸的钢材在调质后具有较均匀的硬度分布, 有很好的抛光性能和低的表面粗糙度值。该钢制造模具时, 一般先进行调质热处理, 硬度为 28 ~ 35HRC (即预硬化), 加工成模具可直接使用, 保证了大型和特大型模具的使用性能, 避免了热处理引起模具的变形。

1) SM3Cr2MnNiMo (718) 钢的力学性能 (表 6-158)。

表 6-158 SM3Cr2MnNiMo 钢的力学性能

试验温度/℃	R_m /MPa	R_{el} /MPa	A (%)	Z (%)	a_K /(J/cm ²)	硬度 HRC
室温	1120	1020	16	61	96	35
200	1006	882	13.6	56	—	—
400	882	811	14.0	67	—	—

注: 860℃ 油淬, 650℃ 回火。

2) 回火温度对力学性能的影响 (表 6-159)

表 6-159 SM3Cr2MnNiMo 钢回火温度对力学性能的影响

回火温度/℃	硬度 HRC	R_m /MPa	R_{el} /MPa	A (%)	Z (%)	a_K /(J/cm ²)
450	45	1600	1300	12	52	40
500	42	1400	1250	13	53	50
550	38	1300	1150	14	60	70
600	36	1200	900	15	65	120
650	32	900	750	16	67	160
700	26	700	650	17	67	190

(6) 材料应用

SM3Cr2MnNiMo (718) 预硬型塑料模具钢为 P20 改进型钢号, 通过添加和增加某些元素的含量, 改进冶金工艺, 满足 P20 类钢达不到要求的场合, 成为具有中国特色的品牌产品。该钢制造模具时, 一般先进行调质处理, 硬度为 28~35HRC (即预硬化), 然后加工成模具可直接使用, 这既保证了大型和特大型模具的使用性能, 又避免了热处理引起模具的变形。适合制造特大型、大型塑料模具、精密塑料模具, 也可用于制造低熔点合金 (如锡、锌、铝合金) 压铸模等。

3. 40Cr 钢

(1) 化学成分

40Cr 钢的化学成分 (GB/T 3077—1999) 见表 6-160。

表 6-160 40Cr 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	P	S
0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.10	≤0.035	≤0.035

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 6-161)。

表 6-161 40Cr 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	M_s
温度 ^① (近似值) /℃	780	840	350
温度 ^② (近似值) /℃	770	805	328

① 试验用钢成分 (质量分数): C0.38%, Si0.30%, Mn0.66%, Cr0.95%, Ni0.18%, P0.016%, S0.028%。

② 试验用钢成分 (质量分数): C0.42%, Si0.29%, Mn0.69%, Cr0.87%, Ni0.14%, P0.010%, S0.013%。

2) 线膨胀系数 (表 6-162)。

表 6-162 40Cr 钢线膨胀系数

温度/℃	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600	20~700
线膨胀系数 $\alpha/\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	11.9	13.3	14.3	15.0	15.3	15.4

3) 热导率 (表 6-163)。

表 6-163 40Cr 钢热导率

温度/℃	100	200	300	400	500	600
热导率 λ / [W/ (m · K)]	32. 6	30. 9	29. 3	28. 0	26. 7	25. 5

4) 其他物理性能 (表 6-164)。

表 6-164 40Cr 钢其他物理性能

密度/ (g/cm ³)	弹性模量 E (20℃) /MPa	剪切模量 G (20℃) /MPa
7. 82	200 000 ~ 211 700	80800

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-165。

表 6-165 40Cr 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1150 ~ 1200	1100 ~ 1150	> 800	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-166)。

表 6-166 40Cr 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	保温时间/h	冷却方式	硬度 HBW
锻后退火	825 ~ 845	2	炉冷	≤207
正火	850 ~ 880	一定时间	空冷	≤250
高温回火	680 ~ 700	炉冷至 600℃ 空冷		≤207

2) 淬火及回火。

① 淬火及回火工艺规范 (表 6-167)。

表 6-167 40Cr 钢淬火及回火工艺规范

淬火规范			回火规范		
淬火温度/℃	淬火冷却介质	淬火后硬度 HRC	回火温度/℃	冷却方式	硬度 ^①
830 ~ 860	油	≥50	140 ~ 200	空冷	≥48

① 回火温度为 400 ~ 600℃ (按需要), 硬度为 25 ~ 43HRC。

② 热处理综合工艺规范 (表 6-168)。

表 6-168 40Cr 钢热处理综合工艺规范

项目	退火	正火	高温回火	淬火	回火	渗氮	回火
温度/℃	825 ~ 845	850 ~ 880	680 ~ 700	830 ~ 860	400 ~ 600	830 ~ 850	140 ~ 200
冷却方式	炉内冷却	空冷	炉冷至 600℃ 空冷	油淬	油淬或水淬	油淬	空冷
硬度 HBW	≤207	≤250	—	—	按需要	—	≥48HRC

③ 热处理晶粒长大倾向（表 6-169）。

表 6-169 40Cr 钢热处理晶粒长大倾向

加热温度/℃	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150
晶粒度级别	8	7~8	6~7	6~7	5~6	5~6	4~5	4~5

(5) 力学性能

40Cr 钢淬透性好，水淬时可淬透到 28~60mm，油淬时可淬透到 15~40mm。调质处理后具有较高的疲劳极限和抗多次冲击能力，低温冲击韧度良好，具有较好的综合力学性能和低的缺口敏感性。除调质处理外还可以进行渗氮和高频感应淬火处理。

1) 不同回火温度的力学性能（表 6-170）。

表 6-170 40Cr 钢不同回火温度的力学性能

回火温度/℃	硬度 HRC	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	Z (%)	A (%)	a_K /(J/cm ²)
350	45	1400	1190	44.5	9.5	41
400	43	1220	890	53	12	50
450	38	1120	820	55	13	60
500	34	1050	800	57	16.5	75
550	30	950	750	60	18	90
600	25	880	710	62	21	120
650	20	810	650	64	22.5	155

注：840℃油淬。

2) 疲劳极限（表 6-171）。

表 6-171 40Cr 钢疲劳极限

热处理工艺	硬度 HRC	R_m	R_{eL}	σ_{-1}	σ_{-1k}	疲劳应力 集中系数 K_1	形变强化 指数 m	疲劳缺口 敏感度 q
		/MPa						
840℃ 油 淬，200℃ 60min 回火空冷	50	2005	1610	640	500	1.28	0.130	0.54
840℃ 油 淬，390℃ 60min 回火油冷	45	1500	1400	610	430	1.41	0.052	0.79
840℃ 油 淬，500℃ 60min 回火油冷	35	1125	1065	530	370	1.41	0.037	0.79
840℃ 油 淬，670℃ 60min 回火油冷	24	810	725	400	270	1.48	0.028	0.93

3) 回火脆性（表 6-172）。

表 6-172 40Cr 钢回火脆性

热处理制度		870℃ 正火，840℃ 45min 油淬，回火保温 75min						
回火温度/℃		350	400	450	500	550	600	650
$a_K/(J/cm^2)$	回火（水冷）	16.3	32.6	56.0	72.5	116.0	148.0	189.0
	回火（炉冷）	15.0	27.6	52.5	63.8	98.0	137.5	161.3
回火脆性系数		10.9	11.8	10.7	11.9	11.9	10.8	11.7

注：试验用钢成分（质量分数）为 C0.43%，Si0.32%，Mn0.64%，Cr0.96%，S0.007%，P0.024%。

4）静拉伸性能和冲击韧度（表 6-173）。

表 6-173 40Cr 钢静拉伸和冲击韧度

热处理制度	硬度 HRC	R_m	R_{eL}	A	Z	$a_K/（J/cm^2）$
		/MPa		（%）		
840℃ 油淬，400℃ 回火	44	1430	1340	37	540	38
840℃ 油淬，600℃ 回火	23	844	750	100	690	115

（6）材料应用

40Cr 钢是机械制造业中使用最广泛的钢种之一。其淬透性良好，调质处理后具有良好的综合力学性能、低温冲击韧度和低的缺口敏感性，除调质处理外还可以进行渗氮和高频感应淬火处理。该钢的切削加工性能一般，当硬度为 174~229HBW 时，相对切削加工性为 60%。适宜制造中型塑料模具及型腔零件。

4. 42CrMo 钢

（1）化学成分

42CrMo 钢的化学成分（GB/T 3077—1999）见表 6-174。

表 6-174 42CrMo 钢的化学成分

C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
0.38~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	0.90~1.20	0.15~0.25	≤0.035	≤0.035

（2）物理性能

1）临界点温度（表 6-175）。

表 6-175 42CrMo 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	M_s
温度（近似值）/℃	730	800	310

注：奥氏体化温度为 860℃。

2）线膨胀系数（表 6-176）。

表 6-176 42CrMo 钢线膨胀系数

温度/℃	20~100	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600
线膨胀系数 $\alpha/\times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	11.1	12.1	12.9	13.5	13.9	14.1

3) 弹性模量 (表 6-177)。

表 6-177 42CrMo 钢弹性模量

温度/℃	20	300	400	500	600
弹性模量 E/MPa	210000	185000	175000	165000	155000

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-178。

表 6-178 42CrMo 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1150 ~ 1200	1130 ~ 1180	> 850	直径 > 50mm 缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-179)。

表 6-179 42CrMo 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	保温时间/h	冷却方式	硬度 HBW
退火	840 ~ 860	2	炉冷	≤ 217
正火	850 ~ 900	—	空冷	≤ 217
高温回火	680 ~ 700	—	空冷	≤ 217

2) 淬火及回火。

① 推荐的淬火及回火工艺规范 (表 6-180)。

表 6-180 42CrMo 钢推荐的淬火及回火工艺规范

工艺	加热温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
淬火	840 ~ 880	油冷	53	450 ~ 650	空冷	25 ~ 40
感应淬火	感应炉加热至 900℃, 同步喷乳化液冷却		≥ 53 (表面)	160 ~ 180	空冷	≥ 50

② 回火温度与硬度的关系 (表 6-181)。

表 6-181 42CrMo 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬火后	200	300	400	500	550	600	650
硬度 HRC	56	54	50	45	35	31	27	24

注: 850℃油淬。

(5) 力学性能

42CrMo 钢属于超高强度钢, 该钢具有高强度和韧性, 且淬透性较好, 无明显的回火脆性, 调质处理后有较高的疲劳极限和抗多次冲击能力, 低温冲击韧度好, 具有良好的综合力学性能。

1) 回火温度与力学性能的关系 (表 6-182)。

表 6-182 42CrMo 钢回火温度与力学性能的关系

回火温度 /℃	R_m	R_{eL}	A	Z	$a_K/ (J/cm^2)$
	/MPa		(%)		
450	1350	1250	41	48	60
500	1220	1120	44	52	80
550	1120	1050	46. 5	56	110
600	1040	950	52	60	140
650	950	880	56	64. 5	170

2) 不同尺寸截面热处理后的力学性能 (表 6-183)。

表 6-183 42CrMo 钢不同尺寸截面热处理后的力学性能

热处理 毛坯直径/mm	热处理制度	取样 位置	R_m	R_{eL}	A	Z	$a_K/(J/cm^2)$
			/MPa		(%)		
54	850℃ 22min 油冷，540℃ 90min 回火水冷	1/2R	762	574	23. 3	68. 8	191
		中心	788	556	21. 1	67. 0	189
55	850℃ 60min 油冷，540℃ 90min 回火水冷	1/2R	806	638	20. 7	62. 8	134
		中心	765	599	19. 4	62. 8	140
60	900 油淬，600℃ 回火油冷	中心	905	—	24	62. 0	108 (65) ^①

① 括号内为横向冲击韧度。

3) 低温冲击韧度 (表 6-184)。

表 6-184 42CrMo 钢低温冲击韧度

热处理工艺	R_m/MPa	下列温度的 $a_K/(J/cm^2)$							
		20℃	-20℃	-50℃	-80℃	-100℃	-140℃	-183℃	-253℃
880℃ 油淬, 580℃ 回火	1080	117	117	109	84	58	47	46	24

4) 高温力学性能 (表 6-185)。

表 6-185 42CrMo 钢高温力学性能

下列温度的 R_m/MPa					下列温度的 DVM 蠕变强度/MPa					
100℃	200℃	300℃	350℃	400℃	350℃	400℃	475℃	500℃	525℃	550℃
		360	330	300	320	250	140	100	70	40
		400	370	330	350	280	150	110	70	40
		440	400	360	380	300	160	110	70	40
		460	420	380	400	320	180	110	70	40
		480	440	400	420	350	200	110	70	40
		500	460			350		100		
650	600									

注：经调质至不同屈服强度 (20℃) 后，进行高温试验。

(6) 材料应用

42CrMo 钢具有高强度和韧性，且淬透性较好，无明显的回火脆性，调质处理后有较高的疲劳极限和抗多次冲击能力，低温冲击韧度良好，适宜制造要求一定强度和韧性的大、中型塑料模具，如制造各种类型的精密注射模、胶木模和橡胶模等。

5. 30CrMnSiNi2A 钢

(1) 化学成分

30CrMnSiNi2A 钢的化学成分见表 6-186。

表 6-186 30CrMnSiNi2A 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S
0.26 ~ 0.33	0.90 ~ 1.20	1.00 ~ 1.30	0.90 ~ 1.20	1.40 ~ 1.80	≤0.20	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度（表 6-187）。

表 6-187 30CrMnSiNi2A 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	M_s
温度（近似值）/℃	705	815	314

2) 弹性模量（表 6-188）。

表 6-188 30CrMnSiNi2A 钢弹性模量

温度/℃	20	100	200	250
弹性模量 E/MPa	211000	208000	204000	202000

3) 线膨胀系数（表 6-189）。

表 6-189 30CrMnSiNi2A 钢线膨胀系数

温度/℃	20	17 ~ 100	17 ~ 200	17 ~ 300	17 ~ 400	17 ~ 500	17 ~ 600	17 ~ 600	17 ~ 800	17 ~ 900
线膨胀系数 $\alpha/\times 10^{-6}\text{℃}^{-1}$	10.55	11.37	11.67	12.68	12.9	13.55	13.80	13.90	11.15	12.10

4) 热导率（表 6-190）。

表 6-190 30CrMnSiNi2A 钢热导率

温度/℃	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
热导率 $\lambda/[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	25.7	28.0	29.3	29.9	29.3	28.2	27.0	25.7	24.0	22.3

5) 比热容（表 6-191）。

表 6-191 30CrMnSiNi2A 钢比热容

温度/℃	20	100	200	300	400	500	600
比热容 $c_p/[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	472.3	526.6	581.0	639.5	698.0	752.4	831.8

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-192。

表 6-192 30CrMnSiNi2A 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1140 ~ 1180	1120 ~ 1160	≥850	缓冷

(4) 热处理

1) 热处理工艺规范（表 6-193）。

表 6-193 30CrMnSiNi2A 钢热处理工艺规范

项目	退火	正火	高温回火	淬火	回火	等温淬火	回火
加热温度/℃	650 ~ 680	900 ~ 920	650 ~ 680	880 ~ 900	240 ~ 330	900	250 ~ 300
冷却方式	炉冷	炉冷	空冷	油冷	空冷或油冷	180 ~ 220℃ 等温	空冷
硬度 HBW	≤255		≤255	≥50HRC	≥45HRC	47 ~ 48HRC	45HRC

2) 奥氏体晶粒长大倾向（表 6-194）。

表 6-194 30CrMnSiNi2A 钢淬火温度与奥氏体晶粒度级别的关系

加热温度/℃	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200
晶粒度级别	10	9 ~ 10	8 ~ 10	8	7 ~ 8	6 ~ 8	6 ~ 7	6

(5) 力学性能

30CrMnSiNi2A 钢属于超高强度钢，强度高，韧性好，淬透性较好，油淬并低温回火（250 ~ 300℃）后的强度高于 1700MPa，为了保证较高的屈服强度，最大限度地提高塑性和韧性，钢在等温淬火后应在高于残留奥氏体的分解温度且尽可能接近回火脆性下限的温度回火，这样可以保证模具有较高的断裂韧度和低的疲劳裂纹扩展速率。

1) 不同温度回火后的断裂韧度（表 6-195）。

表 6-195 30CrMnSiNi2A 钢不同温度回火后的断裂韧度

回火温度/℃	200	260	280	300	320	340	360	400
R_{eL}/MPa	1640	1670	1680	1620	1640	1610	1570	1410
$K_{IC}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	687	700	664	667	609	555	567	564

注：900℃ 等温淬火 60min。

2) 不同温度等温淬火后的力学性能（表 6-196）。

表 6-196 30CrMnSiNi2A 钢不同温度等温淬火后的力学性能

等温温度/℃	硬度 HRC	R_m/MPa	R_{eL}/MPa	$A (\%)$	$Z (\%)$	$a_K / (\text{J}/\text{cm}^2)$
油淬	48	1740	1500	13	48.5	80
180	48	1660	1300	13	51	84
210	48	1640	1320	14	50	95
300	47	1660	1200	14	51	105

注：900℃ 等温淬火 60min。

3) 不同温度回火后的力学性能 (表 6-197)。

表 6-197 30CrMnSiNi2A 钢不同温度回火后的力学性能

回火温度/℃	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	a_K / (J/cm ²)
150	1800	1490	12	46	76
200	1780	1450	13	47	81
250	1770	1430	14	49	82
300	1690	1420	14.5	50	78.5
350	1605	1400	14.5	50.5	62
400	1490	1310	14.5	51	57
450	1370	1200	14.5	52	52
500	1210	1070	15	53	47
550	1105	950	17	58	47
600	1005	860	20	63	70

注：900℃油淬，回火 2h。

4) 疲劳极限 (表 6-198)。

表 6-198 30CrMnSiNi2A 钢疲劳极限

热处理毛坯直径/mm	热处理制度	硬度/HRC	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	σ_{-1} /MPa
25	900℃油淬，230℃回火（空冷）	48	1660	1560	690 ^①
	900℃油淬，230℃回火（空冷）	49	1780	1640	740 ^②
	890℃油淬，200℃回火（空冷）				730
	890℃油淬，300℃回火（空冷）				710
	890℃加热，于 300℃等温淬火				740

① 试验用钢成分（质量分数）：C0.27%，Si1.05%，Mn1.06%，Cr1.05%，Ni1.66%，P0.013%，S0.005%。

② 试验用钢成分（质量分数）：C0.30%，Si1.10%，Mn1.07%，Cr1.06%，Ni1.50%，P0.014%，S0.005%。

5) 不同热处理制度的纵横向力学性能 (表 6-199)。

表 6-199 30CrMnSiNi2A 钢纵横向力学性能

钢坯尺寸/mm	取样方向	热处理制度	R_m /MPa	A (%)	Z (%)	a_K / (J/cm ²)	硬度 HBW
135 (方)	纵向	900℃ 60min 油淬， 300℃ 18min 回火（空冷）	1740 ~ 1760	12.0 ~ 13.5	47 ~ 48	69 ~ 72	444
	横向	900℃ 60min 油淬， 300℃ 18min 回火（空冷）	1730 ~ 1740	9.0 ~ 10.0	38 ~ 40	52 ~ 55	444

(6) 材料应用

30CrMnSiNi2A 钢属于超高强度钢，强度高，韧性好，淬透性较好，适宜制造要求强度高、韧性好的大、中型塑料模具。

6. 38CrMoAl 钢

(1) 化学成分

38CrMoAl 钢的化学成分 (GB/T 3077—1999) 见表 6-200。

表 6-200 38CrMoAl 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Mo	Cr	Al	P	S
0.35 ~ 0.42	0.20 ~ 0.45	0.30 ~ 0.60	0.15 ~ 0.25	1.35 ~ 1.65	0.70 ~ 1.10	≤0.035	≤0.035

(2) 物理性能

临界点温度见表 6-201。

表 6-201 38CrMoAl 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	Ar_1	M_s
温度 (近似值) /℃	880	940	730	330

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-202。

表 6-202 38CrMoAl 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
1200	1180	≥850	> φ75mm 缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-203)。

表 6-203 38CrMoAl 钢预备热处理工艺规范

预备热处理工艺	加热温度/℃	冷却方式	硬度 HBW
锻后退火	840 ~ 870	炉冷	≤229
正火	930 ~ 970	空冷	
高温回火	700 ~ 720	空冷	≤229

2) 淬火及回火。

① 淬火及回火工艺规范 (表 6-204)。

表 6-204 38CrMoAl 钢淬火及回火工艺规范

淬火规范			回火规范	
加热温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度/℃	硬度 HBW
930 ~ 950	油冷	≥55	600 ~ 680	241 ~ 321

② 回火温度与硬度的关系 (表 6-205)。

表 6-205 38CrMoAl 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬火后	200	300	400	500	550	600	650
硬度 HRC	56	55	51	45	40	35	31	30

注: 940℃油冷。

3) 渗氮。渗氮温度为 500 ~ 600℃, 表面硬度 $\geq 1000\text{HV}$ 。

(5) 力学性能

38CrMoAl 钢属于中碳耐热钢, 强度和韧性均高。低于 500℃ 时, 高温性能良好, 具有高的耐磨性和疲劳强度, 无热脆倾向, 淬透性较好, 切削加工性能尚可, 冷变形塑性中等, 焊接性差。有很好的渗氮性能, 渗氮处理后具有高的表面强度和良好的耐热性 (达 500℃) 及耐蚀性, 即使过热也难软化, 具有良好的综合力学性能和化学稳定性。

(6) 材料应用

38CrMoAl 钢属于中碳耐热钢, 强度和韧性均高, 具有较高的综合力学性能和化学稳定性。一般可在调质状态下使用, 也可在正火及高温回火后使用。该钢有很好的渗氮性能, 适宜制作要求高耐磨性、耐热性、热硬性、耐蚀性、疲劳强度以及处理后尺寸精度要求高的塑料模具及其零件。

7. 20CrNi3AlMnMo (SM2) 钢

(1) 化学成分

20CrNi3AlMnMo 钢的化学成分见表 6-206。

表 6-206 20CrNi3AlMnMo 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	P	S
0.17 ~ 0.23	≤ 0.40	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50	3.00 ~ 3.50	1.00 ~ 1.50	≤ 0.030	0.08 ~ 0.15

(2) 物理性能

临界点温度见表 6-207。

表 6-207 20CrNi3AlMnMo 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	M_s
温度 (近似值) /℃	710	795	405

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-208。

表 6-208 20CrNi3AlMnMo 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1140 ~ 1180	1080	≥ 850	缓冷
钢坯	1100 ~ 1150	1040	≥ 850	缓冷

(4) 热处理

1) 软化处理工艺规范 (表 6-209)。

表 6-209 20CrNi3AlMnMo 钢软化处理工艺规范

高温淬火		高温回火		
加热温度/℃	淬火冷却介质	回火温度/℃	冷却方式	硬度
870 ~ 930	油	680 ~ 700 (2h)	油冷	$\leq 30\text{HRC}$

2) 固溶处理。推荐的固溶处理工艺规范见表 6-210。

表 6-210 20CrNi3AlMnMo 钢推荐的固溶处理工艺规范

固溶处理			回火处理	
固溶温度/℃	冷却方式	固溶后硬度 HRC	回火温度/℃	回火后硬度 HRC
870 ~ 930	油冷	42 ~ 45	680 ~ 700	28

3) 推荐的时效处理工艺规范（表 6-211）。

表 6-211 20CrNi3AlMnMo 钢推荐的时效处理工艺规范

固溶温度/℃	时效时间/h	硬度 HRC
500 ~ 520	6 ~ 10	40

(5) 力学性能

20CrNi3AlMnMo（SM2）钢为时效硬化易切削塑料模具钢，切削加工性能优良，且镜面加工性良好，经渗氮或氮碳共渗，可进一步提高耐磨性、耐蚀性和抗咬合性。其力学性能见表 6-212。

表 6-212 20CrNi3AlMnMo 钢力学性能

热处理工艺	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	a_K / (J/cm ²)	硬度 HRC
900℃ 油淬，700℃ 回火油冷， 500 ~ 520℃ 时效 6h	1176	980	15	45	54	40
900℃ 油淬，520℃ 时效 6 ~ 10h	1147 ~ 1196	1058 ~ 1107	11 ~ 11.5	49 ~ 50	49 ~ 57	39 ~ 40.5

(6) 材料应用

20CrNi3AlMnMo（SM2）钢生产工艺简便易行，性能优良稳定，模具使用寿命长，主要用于热塑性塑料模，如电子、仪表、家电、日用、五金等行业塑料模具制造，使用性能优良，应用效果显著，并应用于照相机等光学制品及玩具、文具、线路板等塑料模具的成型零件。

6.2.4 易切削预硬型塑料模具钢

为了改善预硬型塑料模具钢的切削加工性能，可加入易切削元素。美国、日本、德国都发展了一些易切削预硬钢。国外易切削预硬钢主要是 S 系和 S2Se 系，但 Se 价格较高。S 系易切削钢在低、中速切削条件下具有良好的切削加工性能，但热变形后沿变形方向伸长的 MnS 增加了钢材的各向异性，显著降低钢的横向塑性和韧性，在截面增大时，硫化物的偏析比较严重。因此，德国开发了经钙处理的塑料模具钢，但其切削加工性能不如含硫钢。我国研制了一些含硫易切削预硬型塑料模具钢，如 8Cr2MnWMoVS（简称 8Cr2S）钢和 S2Ca 复合易切削塑料模具钢 5CrNiMnMoVSCa（简称 5NiSCa）。采用了 S2Ca 复合易切削系和喷射冶金技术，改善了硫化物的形态、分布和钢的各向异性，在大截面中硫化物的分布仍比较均匀，并可提高钢的淬透性。研究表明硫化物夹杂不影

响钢的抛光性能。该类钢可进行表面渗氮、氮碳共渗和渗硼处理,以提高耐蚀性、耐磨性和降低表面粗糙度值。常用易切削预硬型塑料模具钢见表 6-213。

表 6-213 常用易切削预硬型塑料模具钢

模具材料市场	钢 号
国产模具钢	5CrNiMnMoVSCa (5NiSCa) 钢、8Cr2MnWMoVS (8Cr2S) 钢、4CrNiMnMoVSCa (4NiSCa) 钢、Y55CrNiMnMoVS (SM1) 钢和 P20SRE、P20BSCa 钢
国外模具钢	德国 Thyssen 公司的 GS2312, 奥地利 Bobler 公司的 M20

1. 5CrNiMnMoVSCa (5NiSCa) 钢

(1) 化学成分

5CrNiMnMoVSCa 钢的化学成分见表 6-214。

表 6-214 5CrNiMnMoVSCa 钢化学成分 (质量分数) (%)

C	Cr	Ni	Mn	Mo	V	Ca	P	S
0.50 ~ 0.60	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	0.30 ~ 0.60	0.15 ~ 0.30	0.002 ~ 0.008	≤0.030	0.06 ~ 0.15

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 6-215)。

表 6-215 5CrNiMnMoVSCa 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	M_s
温度 (近似值) /℃	695	735	220

2) 线膨胀系数 (表 6-216)。

表 6-216 5CrNiMnMoVSCa 钢线膨胀系数

温度/℃	0 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 300
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	12.9	13.1	14.7

3) 其他物理性能 (表 6-217)。

表 6-217 5CrNiMnMoVSCa 钢其他物理性能

密度 / (g/cm^3)	弹性模量 E (20℃) /MPa	热导率 λ (400 ~ 600℃) / [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
7.82	214400	26.38

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-218。

表 6-218 5CrNiMnMoVSCa 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	1140 ~ 1180	1080	900	炉冷
钢坯	1100 ~ 1150	1040	850	炉冷 ($> \phi 60\text{mm}$), 砂冷 ($< \phi 60\text{mm}$)

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-219)。

表 6-219 5CrNiMnMoVSCa 钢预备热处理工艺规范

预备热处理 工艺	加热温度 /℃	保温时间 /h	等温温度 /℃	等温工艺	冷却方式	硬度 HBW
锻后退火	750 ~ 770	2	—	炉冷至 600℃ 以下出炉空冷	空冷	217 ~ 220
等温退火 ^①	750 ~ 770	4 ~ 5	670 ~ 690℃ × 4 ~ 6h	炉冷至 550℃ 以下出炉空冷	空冷	217 ~ 220

① 退火后组织为球状珠光体 + 易切削相。

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范 (表 6-220)。

表 6-220 5CrNiMnMoVSCa 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	淬火冷却介质	硬度 HRC
860 ~ 920	油	62 ~ 63

② 不同淬火温度下加热系数对硬度的影响 (表 6-221)。

表 6-221 5CrNiMnMoVSCa 钢不同淬火温度下加热系数对硬度的影响 (盐浴加热)

$a/(\text{min}/\text{mm})$		0.5	0.75	1.00	1.25	1.50	2.00
淬火温度/℃	硬度 HRC	62.0	62.5	63.0	63.0	63.0	63.0
		62.5	62.5	63.0	63.0	63.0	63.0
		62.5	62.5	63.0	63.0	63.0	63.0

③ 淬火温度对淬火变形的影响 (表 6-222)。

表 6-222 5CrNiMnMoVSCa 钢淬火温度对淬火变形的影响

淬火温度/℃	纵向变形		横向变形	
	/mm	(%)	/mm	(%)
860	+0.012	0.03	+0.014	0.038
880	+0.010	0.029	+0.014	0.038

注: 试样尺寸为 35mm (纵) × 37mm (横) × 36mm (高)。

④ 淬火温度对晶粒度的影响 (表 6-223)。

表 6-223 5CrNiMnMoVSCa 钢淬火温度对晶粒度的影响

淬火温度/℃	840	860	880	900	920
淬火晶粒度/级别	11	11	10 ~ 11	10 ~ 11	9 ~ 10

⑤ 淬透性试验 (模拟) 结果 (表 6-224)。

表 6-224 5CrNiMnMoVSCa 钢淬透性试验（模拟）结果

直径/mm	50	100	200	300	400	500
硬度 HRC	62.5	61.5	57.5	55	51	47.5
组织	M + C	M + C	M + C	M + C	M + C + B	M + C + B

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 6-225）。

表 6-225 5CrNiMnMoVSCa 钢推荐的回火工艺规范

回火温度/℃	回火介质	回火硬度 HRC
600 ~ 650	空气	35 ~ 45

② 回火温度对强度和塑性及韧度的影响（表 6-226）。

表 6-226 5CrNiMnMoVSCa 钢回火温度对强度和塑性及韧度的影响

回火温度/℃	性 能	
200	R_{eL}/MPa	1792
	R_m/MPa	2101
	压缩屈服强度/MPa	2135
	$A (\%)$	5.40
	$Z (\%)$	20.1
	$a_K / (\text{J}/\text{cm}^2)$	32
300	R_{eL}/MPa	1788
	R_m/MPa	2095
	压缩屈服强度/MPa	2005
	$A (\%)$	6.30
	$Z (\%)$	30.0
	$a_K / (\text{J}/\text{cm}^2)$	25
400	R_{eL}/MPa	1705
	R_m/MPa	1840
	压缩屈服强度/MPa	1890
	$A (\%)$	6.80
	$Z (\%)$	31.7
	$a_K / (\text{J}/\text{cm}^2)$	28
500	R_{eL}/MPa	1570
	R_m/MPa	1711
	压缩屈服强度/MPa	1776
	$A (\%)$	7.20
	$Z (\%)$	35.7
	$a_K / (\text{J}/\text{cm}^2)$	33.0

注：试样淬火温度为 880℃。

4) 碳化物相分析（表 6-227）。

表 6-227 5CrNiMnMoVSCa 钢碳化物相分析

热处理状态	碳化物类型	碳化物体积分数 (%)
退火	M ₂₃ C ₆ , MC, M ₃ C	9.13
880℃油淬	MC, M ₂₃ C ₆ , M ₃ C	1.86
880℃油淬, 625℃回火	M ₂₃ C ₆ , MC, M ₂ C, M ₃ C	7.38

5) 热处理工艺对硬度的影响 (表 6-228)。

表 6-228 5CrNiMnMoVSCa 钢热处理工艺对硬度的影响 (HRC)

淬火温度/℃ 回火温度/℃	840	860	880	900	920	940	960
淬火态	60	62	63	63	63	63	61.5
175	58	58	59	59.5	59.5	59.5	58.5
200	57.5	57.5	57.5	58	58	58	58
225	56	56	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5
250	55	55.5	55.5	56	56	56	56
300	53.5	53.5	54	54.5	54.5	54.5	54.5
400	50	50.5	50.5	51	51.5	51.5	51.5
500	46.5	47.5	48	48.5	48	50	50
525	45	46	47.5	48	48	49	49
550	44	45.5	46.5	47.5	47.5	48	48.5
575	43	44	45.5	47	47	48	48
600	40.5	41.5	43.5	45	45	45.5	46.5
625	36	39	39	41.5	42.5	43.5	44.5
650	33.5	33.5	36	37	37.5	38.5	40
675	30	31	32.5	33	33.5	34	35

(5) 力学性能

5CrNiMnMoVSCa (5NiSCa) 钢经调质处理后, 硬度为 35 ~ 45HRC, 具有良好的切削加工性能, 因此通常以预硬化钢状态供货, 可直接加工成模具, 避免了模具在制造过程中因热处理引起的变形。该钢淬透性高, 强韧性和抛光性能好, 有良好的渗氮和渗硼工艺性, 经渗氮处理后基体硬度变化不大, 而表面耐磨性大大提高, 耐蚀性也有所改善。不同温度回火后的力学性能见表 6-229。

表 6-229 5CrNiMnMoVSCa 钢不同温度回火后的力学性能

回火温度/℃	R _m /MPa	R _{eL} /MPa	R _{pc0.2} /MPa	A (%)	Z (%)	a _K /(J/cm ²)
200	2101	1792	2135	5.4	20.1	32
300	2095	1788	2005	6.3	30.0	25
400	1840	1205	1890	6.8	31.7	28
500	1711	1570	1776	7.2	35.7	33
575	1419	1352	1456	8.1	37.3	38
625	1300	1266	1297	8.8	42.1	47
650	1067	1029	1032	9.0	45.3	58

注: 淬火温度为 880℃。

(6) 材料应用

5CrNiMnMoVSCa (5NiSCa) 钢属于二元易切削预硬型塑料模具钢。该钢经调质处理后, 硬度为 35 ~ 45HRC, 具有良好的切削加工性能, 因此通常以预硬化钢状态供货, 可直接加工成模具, 避免了模具在制造过程中因热处理引起的变形, 并可缩短生产周期, 降低成本。该钢淬透性高, 强韧性和抛光性能好, 有良好的渗氮和渗硼工艺性, 适宜制造各种类型的塑料精密注射模具、胶木模、压塑模、橡胶模和薄板无间隙精密冲裁模等, 在家电、计算机行业的塑料制品中广泛应用, 见表 6-230。

表 6-230 5CrNiMnMoVSCa 钢用作注射模的使用情况

模具名称	硬度 HRC	使用情况
收录机外壳、后盖、面板音窗等制品模具	38 ~ 40	模具寿命提高 1 ~ 3 倍
收录机磁带仓门模	40 ~ 42	模具寿命提高, 表面粗糙度 Ra 值为 0.2 ~ 0.4 μm
插座基座模具型芯	52 ~ 54	寿命比 Cr12 钢提高 4 ~ 6 倍
洗衣机上盖模	36 ~ 38	模具比 40Cr (28HRC) 易加工, 使用性能好
洗衣机定时器齿轮、凸轮模具	36 ~ 40	模具使用寿命提高
L310 透明窗模具	40	进口 P20 钢寿命 20 万件, 5NiSCa 钢寿命 50 万件

2. 8Cr2MnWMoVS (8Cr2S) 钢

8Cr2MnWMoVS (8Cr2S) 钢属于易切削精密塑料模具钢, 是塑料模具和冷作模具兼用的易切削预硬型钢种。其成分设计采用了高碳多元微合金化原则, 以硫作为易切削元素。由于含硫量和含锰量有合适的配比, 所以 S 对钢性能的不良影响减小。钢中含碳量较高, 提高了耐磨性, 多元微合金化又保证了良好的淬透性和细化晶粒, 抛光后有光亮。可以进行渗氮 (包括离子渗氮和氮碳共渗), 进一步提高了耐磨性和耐蚀性。在我国市场上未见有国外同类钢号。详细介绍见第 4 章高碳低合金冷作模具钢中的 8Cr2MnWMoVS (8Cr2S) 钢。

(1) 力学性能

8Cr2MnWMoVS (8Cr2S) 含硫易切削塑料、冷作兼用模具钢中 S、Mn 形成 MnS 易切削相, 将钢预硬化处理到 40 ~ 45HRC, 可采用常规机械加工方法, 进行车、刨、铣、镗、钻、铰、攻螺纹等加工工艺, 模具加工后可直接使用。这对于形状复杂、要求加工精度高或要求尺寸配合精度高的模具特别适用。钢中含碳量较高, 热处理变形小, 淬火硬度高, 耐磨性好, 综合力学性能好。

- 1) 不同热处理温度下的屈服强度 (表 6-231)。
- 2) 不同热处理温度下的扭转性能 (表 6-232)。
- 3) 不同热处理温度下的弯曲性能 (表 6-233)。

表 6-231 8Cr2MnWMoVS 钢不同热处理温度下的压缩屈服强度

(单位: MPa)

淬火温度/℃ 回火温度/℃	860	880	900	920
160	2714	2656	2556	—
200	2445	2572	2622	2539

表 6-232 8Cr2MnWMoVS 钢不同热处理温度下的扭转性能

淬火温度/℃	860	880	900
回火温度/℃	200	200	200
τ_m /MPa	1690	1710	1710
$\phi_{\max}/(^{\circ})$	51.5	58.0	53.7

表 6-233 8Cr2MnWMoVS 钢不同热处理温度下的弯曲性能

淬火温度/℃	性能	回火温度/℃					
		200	550	580	600	620	630
860	弯曲屈服强度/MPa	—	2081	2273	2485	2037	—
	抗弯强度/MPa	3146	2925	2913	2775	2573	—
	挠度/mm	3.95	15.7	11.6	11.9	14.5	—
880	弯曲屈服强度/MPa	—	2750	2450	2223	2174	1929
	抗弯强度/MPa	3130	3000	3130	2851	2900	2475
	挠度/mm	4.01	9.50	11.4	13.8	15.5	13.3
920	弯曲屈服强度/MPa	—	—	—	—	—	—
	抗弯强度/MPa	3179	—	—	—	—	—
	挠度/mm	4.33	—	—	—	—	—

4) 压缩屈服强度与回火温度的关系 (表 6-234)。

表 6-234 压缩屈服强度与回火温度的关系

淬火温度/℃	880										
回火温度/℃	180	200	220	250	300	500	550	600	620	630	650
弯曲屈服强度/MPa	2618	2572	2412	2386	2302	1891	1860	1500	1522	1340	1056

(2) 材料应用

8Cr2MnWMoVS (8Cr2S) 钢作为预硬钢适于制造各种类型的塑料模具, 常用于制造精密塑料模和薄板无间隙精密冲裁模、压塑模等, 以及制造热固性、热塑性增强塑料的模具成型零件和冲模工作零件。

3. 4CrNiMnMoVSCa（4NiSCa）钢

(1) 化学成分

4CrNiMnMoVSCa 钢的化学成分见表 6-235。

表 6-235 4CrNiMnMoVSCa 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Cr	Ni	Mn	Mo	V	Ca	P	S
0.40 ~ 0.50	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	0.30 ~ 0.60	0.15 ~ 0.30	0.002 ~ 0.008	≤0.030	0.06 ~ 0.15

(2) 物理性能

1) 临界点温度（表 6-236）。

表 6-236 4CrNiMnMoVSCa 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}	M_s
温度（近似值）/℃	695	735	305	378	220

2) 线膨胀系数（表 6-237）。

表 6-237 4CrNiMnMoVSCa 钢线膨胀系数

温度/℃	0 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 300
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	12.9	13.1	14.7

3) 其他物理性能（表 6-238）。

表 6-238 4CrNiMnMoVSCa 钢其他物理性能

密度/（g/cm ³ ）	弹性模量 E （20℃）/MPa
7.82	214 400

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-239。

表 6-239 4CrNiMnMoVSCa 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1150	1050 ~ 1100	≥850	缓冷

注：4CrNiMnMoVSCa（4NiSCa）钢热塑性良好，变形抗力小，成材率高，易于锻造成形。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 6-240）。

表 6-240 4CrNiMnMoVSCa 钢预备热处理工艺规范

工艺	加热温度/℃	加热保温时间/h	等温工艺	退火后硬度
等温退火	760 ~ 780	2 ~ 4	等温温度为 660℃，保温 6 ~ 8h， 炉冷到 550℃出炉空冷	≤40HRC ^①

① 组织为球状珠光体 + 易切削相。

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范（表 6-241）。

表 6-241 4CrNiMnMoVSCa 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	冷却方式	淬火后硬度 HRC
840 ~ 900	油冷	55

② 淬火温度与硬度的关系（表 6-242）。

表 6-242 4CrNiMnMoVSCa 钢淬火温度与硬度的关系

淬火温度/℃	840	860	880	900
硬度 HRC	56.0	56.5	57.5	57.5

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 6-243）。

表 6-243 4CrNiMnMoVSCa 钢推荐的回火工艺规范

回火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
600 ~ 650	油冷或空冷	33 ~ 40

② 回火温度与硬度的关系（表 6-244）。

表 6-244 4CrNiMnMoVSCa 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	200	300	400	500	550	600	650
硬度 HRC	54.0	52.0	46.5	45.0	43.0	40.5	33.5

(5) 力学性能

4CrNiMnMoVSCa（4NiSCa）钢为二元易切削预硬型塑料模具钢。该钢淬透性、强韧性、抛光性能好，有良好的渗氮和渗硼性能，调质钢经渗氮处理基体硬度变化不大，为一种综合力学性能优良的易切削预硬型塑料模具钢，其力学性能见表 6-245。

表 6-245 4CrNiMnMoVSCa 钢力学性能

性能	硬度 HRC	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	$A(\%)$	$Z(\%)$
测试值	35 ~ 45	900 ~ 1393	967 ~ 1513	7.4 ~ 12.5	41.0 ~ 53.5

注：880℃油淬，500 ~ 650℃回火。

(6) 材料应用

4CrNiMnMoVSCa（4NiSCa）易切削预硬型塑料模具钢经调质后，硬度为 35 ~ 45HRC，具有良好的切削加工性能，因此用预硬后的钢可直接加工成模具，避免了模具热处理引起的变形。适宜制造各种类型的精密注射模、压塑模和橡胶模，如家电、计算机行业的塑料制品模具等。

4. Y55CrNiMnMoVS (SM1) 钢

(1) 化学成分

Y55CrNiMnMoVS 钢的化学成分见表 6-246。

表 6-246 Y55CrNiMnMoVS 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	S	P
0.50 ~ 0.60	≤0.40	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50	0.10 ~ 0.30	1.00 ~ 1.50	0.08 ~ 0.15	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 6-247。

表 6-247 Y55CrNiMnMoVS 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	M_s
温度 (近似值) /℃	712	772	290

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-248。

表 6-248 Y55CrNiMnMoVS 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1150	1050 ~ 1100	≥850℃	缓冷, 需球化退火

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-249)。

表 6-249 Y55CrNiMnMoVS 钢等温球化退火工艺规范

工艺	退火加热温度/℃	保温时间/h	等温温度/℃	回火冷却方式	退火后硬度 HBW
等温球化退火	810	2 ~ 4	680	保温 4 ~ 6h 炉冷至 550℃ 出炉空冷	≤235

2) 淬火及回火工艺规范 (表 6-250)。

表 6-250 Y55CrNiMnMoVS 钢淬火及回火工艺规范

淬火规范			回火规范		
淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
800 ~ 860	油冷	57 ~ 59	620 ~ 650	空冷	40

(5) 力学性能

Y55CrNiMnMoVS (SM1) 钢是我国研制的含 S 系易切削塑料模具钢, 其特点是预硬态交货, 预硬硬度为 35 ~ 40HRC, 具有较好的切削加工性能, 模具加工后不再进行热处理直接使用, 并具有较好的耐蚀性。钢的淬透性好, 淬火硬度高, 耐磨性好, 由于合金元素的固溶强化作用, 强韧性好, 具有较高的综合力学性能, 其回火后的力学性能见

表 6-251。

表 6-251 Y55CrNiMnMoVS 钢回火后的力学性能

性能	测试值	性能	测试值
硬度 HRC	35 ~ 40	磨削应力/MPa	7. 11
R_m /MPa	1049 ~ 1176	磨削比	19. 43
R_{eL} /MPa	1020 ~ 1156	表面粗糙度 $Ra/\mu m$	0. 27
A (%)	14. 5 ~ 15. 8	抛光阻应力/MPa	0. 84
Z (%)	40. 3 ~ 53	抛光表面粗糙度 $Ra/\mu m$	0. 029
α_K (J/cm ²)	62 ~ 67. 6		

注：840℃油淬，620℃回火。

(6) 材料应用

Y55CrNiMnMoVS (SM1) 易切削塑料模具钢在电子、仪表、塑料、轻工等行业的印制电路板凸凹模、胶木线路板孔模、精密冲压导向板及热固性塑料模具等方面得到广泛应用，并已取得了良好的效益。该钢可以渗碳，宜于制造耐磨性要求与冲击韧度要求相结合的模具。钢的抛光性能良好，表面粗糙度 Ra 值可达 $0.1\mu m$ 以下，模具的精度较高，可以取代从日本和瑞典进口的塑料模具钢，见表 6-252。

表 6-252 Y55CrNiMnMoVS 钢模具使用寿命比较

模具名称	原用材料	寿命	现用材料	寿命
量角器、三角尺模	38CrMoAl	5 万件报废	SM1	30 万次，尚完好无损
长命牌牙刷模	45	43 万支修模	SM1	259 万支开始修模
纱管模	CrWMn、45	10 万次报废	SM1	40 万次开始修模
出口玩具模	718、8407	—	SM1	满足出口要求
出口向阳牌保温瓶模	45	5 万次	SM1	30 万次，满足出口要求
香港环球公司出口模具	指定用预硬钢	—	SM1	满足出口要求
电路板冲模	CrWMn	—	SM1	用户满意

6.2.5 时效硬化型塑料模具钢

1) 经固溶处理或形变加工的金属材料在室温或较高温度下保持处理或加工状态而使强度和硬度明显提高的现象，称为时效硬化。随着时间的延长屈服强度和抗拉强度提高，伸长率和冲击韧度降低，获得所需的综合力学性能。不同类型材料的时效硬化过程和时间长短不同，可以是几小时到数十年。时效处理可分为人工时效和自然时效。

2) 时效硬化型塑料模具钢在固溶硬化后变软（一般为 28 ~ 34HRC），可进行切削加工，待冷加工成形后进行时效处理，可获得很高的综合力学性能，时效处理变形很小，而且这类钢一般具有焊接性好以及可以进行表面渗氮等优点，适于制造复杂、精密、高寿命的塑料模具，如热塑性塑料制品用模具。

3) 时效硬化型塑料模具钢分为马氏体时效硬化钢和析出（沉淀）硬化钢两大类。马氏体时效钢具有高的强度与密度比、良好的切削加工性能和焊接性、热处理工艺简单等优点，但其价格较高；析出硬化钢所含的合金元素比马氏体时效钢少，特别是 Ni 含量少得多。材料在固溶处理状态下硬度为 30HRC 左右，可进行切削加工，制成模具之后再进行时效处理。

① 典型的高合金马氏体时效硬化钢有 00Ni18Co8Mo3TiAl [18Ni (200)] 钢、00Ni18Co8Mo5TiAl [18Ni (250)] 钢、00Ni18Co9Mo5TiAl [18Ni (300)] 钢、(00Ni18Co13Mo4TiAl) [18Ni (350)] 钢等，固溶以后形成超低碳马氏体，硬度为 30 ~ 32HRC；时效处理以后，由于各种类型的金属间化合物的脱溶、析出，得到时效硬化，硬度可上升到 50HRC 以上。这类钢在高强度的条件下仍具有良好的塑性、韧性和高的断裂韧度。

② 为了降低材料原始成本，近年来开发了一类低钴、无钴、低镍的马氏体时效钢和低合金时效硬化钢，其代表钢种有 06Ni6CrMoVTiAl (06Ni) 钢、SM2CrNi3MoAl1S 钢、1Cr14Co13Mo5V (AFC - 77) 钢、25CrNi3MoAl 钢，SM1Ni3Mn2CuAlMo (PMS) 钢、0Cr16Ni4Cu3Nb (PCR) 钢、20CrNi3AlMnMo (SM2) 钢，以及美国的 P2 (20CrNi4AlV) 钢，日本大同特殊钢公司的 NAK (15Ni3MnMoAlCuS) 钢等，这类钢经固溶处理后，硬度为 30HRC 左右，时效处理后，由于金属间化合物 Ni_3Al 析出而强化，硬度可以上升到 38 ~ 42HRC。如再进行渗氮处理，可以使模具表面硬度达到 1100HV。典型时效硬化型塑料模具钢见表 6-253。

表 6-253 典型时效硬化型塑料模具钢

析出（沉淀） 硬化钢	高合金马氏体时效硬化钢	
	典型的高合金马氏体时效硬化钢	低钴、无钴、低镍的马氏体时效 钢和低合金时效硬化钢
0Cr17Ni4Cu4Nb、 1Cr17NiAl、 0Cr15Ni7Mo2Al、 SM2CrNi3MoAl1S、 1Cr14Co13Mo5V	18Ni(200) (00Ni18Co8Mo3TiAl) 、 18Ni(250) (00Ni18Co8Mo5TiAl) 、 18Ni(300) (00Ni18Co9Mo5TiAl) 、 18Ni(350) (00Ni18Co13Mo4TiAl)	06Ni6CrMoVTiAl (06Ni) 钢、1Cr14Co13Mo5V (AFC - 77) 钢、SM2CrNi3MoAl1S 钢、25CrNi3MoAl 钢、1Ni3Mn2CuAlMo (PMS) 钢、0Cr16Ni4Cu3Nb (PCR) 钢、20CrNi3AlMnMo (SM2) 钢，以及美国的 P2 (20CrNi4AlV) 钢、日本大同特殊钢公司的 NAK (15Ni3MnMoAlCuS) 钢等

1. SM2CrNi3MoAl1S 钢

(1) 化学成分

SM2CrNi3MoAl1S 钢的化学成分 (YB/T 094—1997) 见表 6-254。

表 6-254 SM2CrNi3MoAl1S 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Cr	Ni	Mo	Al	Si	Mn	S	P
0. 20 ~ 0. 30	1. 20 ~ 1. 80	3. 00 ~ 4. 00	0. 20 ~ 0. 40	1. 00 ~ 1. 60	0. 20 ~ 0. 50	0. 50 ~ 0. 80	≤ 0. 030	≤ 0. 030

(2) 物理性能

临界点温度见表 6-255。

表 6-255 SM2CrNi3MoAl1S 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	M_s
温度（近似值）/℃	710	795	405

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-256。

表 6-256 SM2CrNi3MoAl1S 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
1200	1180	≥ 850	缓冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 6-257）。

表 6-257 SM2CrNi3MoAl1S 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	冷却方式
钢材退火	760 ~ 800	保温 14 ~ 16h 炉冷至 $\leq 500^\circ\text{C}$ 空冷
软化退火	870 ~ 930	油冷，680 ~ 700℃ × 2h 高温回火，油冷，硬度 $\leq 30\text{HRC}$

注：一般锻后不退火。

2) 淬火及回火工艺规范（表 6-258）。

表 6-258 SM2CrNi3MoAl1S 钢淬火及回火工艺规范

淬火规范			回火规范		
淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度/℃	保温时间/h	硬度 HRC
880 ± 20	水冷或空冷	48 ~ 50	680	4 ~ 6	22 ~ 23

3) 渗碳及淬火与回火。

① 工艺 I：渗碳工艺规范见表 6-259。

表 6-259 SM2CrNi3MoAl1S 钢渗碳工艺规范

渗碳温度/℃	淬火			回火	
	淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度	硬度 HRC
900 ~ 920（罐冷）	820 ~ 840	油冷	≥ 60	160 ~ 180	≥ 58

② 工艺 II：碳氮共渗工艺规范见表 6-260。

表 6-260 SM2CrNi3MoAl1S 钢碳氮共渗工艺规范

碳氮共渗温度/℃	渗后淬火		回 火	
	淬火温度/℃	硬度 HRC	回火温度/℃	硬度 HRC
840 ~ 860	渗后直接油冷	≥ 60	160 ~ 180	≥ 58

4) 固溶处理工艺规范 (表 6-261)。

表 6-261 SM2CrNi3MoAl1S 钢固溶处理工艺规范

加热温度/℃	冷却方式	固溶后硬度 HRC	组织状态
870 ~ 930	空冷	42 ~ 45	晶粒度为 4 ~ 5 级, 组织为低碳马氏体 + 粒状贝氏体

5) 时效处理。

① 时效处理工艺规范 (表 6-262)。

表 6-262 SM2CrNi3MoAl1S 钢时效处理工艺规范

加热温度/℃	时效时间/h	冷却方式	硬度 HRC
500 ~ 520	6 ~ 10	空冷	40

② 固溶时效处理后的力学性能 (表 6-263)。

表 6-263 SM2CrNi3MoAl1S 钢固溶时效后的力学性能

热处理 工艺条件	力学性能					
	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_{eL} /MPa	断后伸长率 A (%)	断面收缩率 Z (%)	冲击韧度 a_K /(J/cm ²)	硬度 HRC
900℃ 固溶, 520℃ × 6 ~ 10h 时效	1147 ~ 1196	1058 ~ 1107	11.0 ~ 11.5	49.0 ~ 50.0	49.0 ~ 56.8	39.0 ~ 40.5

(5) 力学性能

SM2CrNi3MoAl1S 钢是低合金渗碳钢, 也属于 Ni - Mo - Al 系时效硬化型易切削塑料模具钢。其淬透性和热稳定性好 (表 6-264), 强度、韧性、塑性好。该钢经软化处理后, 易于挤压成形, 成形后经渗碳、淬火、回火后, 其表面硬度和耐磨性高, 心部强韧性好。

表 6-264 SM2CrNi3MoAl1S 钢热稳定性

温度/℃	250	550
时间/h	200	50
硬度 HRC	40.5	41.5

注: 试样原始硬度为 40.5HRC。

(6) 材料应用

SM2CrNi3MoAl1S 低合金渗碳钢强度、韧性好, 易于挤压成形。由于该钢中含有 S, 切削加工成形性好。常用于制造玩具、文具、牙刷、线路板等的塑料模具, 以及镜面要求高或表面要求光刻花纹的精密塑料模具, 也用于制造大、中型塑料模具。

2. SM1Ni3Mn2CuAlMo (PMS) 钢

(1) 化学成分

SM1Ni3Mn2CuAlMo 钢的化学成分见表 6-265。

表 6-265 SM1Ni3Mn2CuAlMo 钢化学成分 (质量分数/%)

C	Si	Mn	Mo	Ni	Al	Cu	P	S
0.06 ~ 0.20	≤0.35	1.40 ~ 1.70	0.20 ~ 0.50	2.80 ~ 3.40	0.70 ~ 1.05	0.80 ~ 1.20	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 6-266)。

表 6-266 SM1Ni3Mn2CuAlMo 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}	M_s
温度 (近似值) /℃	675	821	382	517	270

2) 线膨胀系数 (表 6-267)。

表 6-267 SM1Ni3Mn2CuAlMo 钢线膨胀系数

温度/℃	14 ~ 100	14 ~ 200	14 ~ 300	14 ~ 400	14 ~ 500	14 ~ 600
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	10.6	11.9	12.6	13.7	13.9	14.3

3) 热导率 (表 6-268)。

表 6-268 SM1Ni3Mn2CuAlMo 钢热导率

温度/℃	24	150	300
热导率 $\lambda / [\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})]$	22.19	35.59	36.43

4) 比热容 (表 6-269)。

表 6-269 SM1Ni3Mn2CuAlMo 钢比热容

温度/℃	24	150	300
比热容 $c_p / [\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})]$	460.5	669.9	711.8

5) 密度为 $7.74\text{g}/\text{cm}^3$ 。

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-270。

表 6-270 SM1Ni3Mn2CuAlMo 钢锻造工艺规范

项目	装炉温度/℃	加热温度/℃	始锻温度℃	终锻温度/℃	冷却方式
钢锭	<800	1140 ~ 1180	1080 ~ 1130	≥900	缓冷
钢坯	<900	1120 ~ 1160	1050 ~ 1100	≥850	缓冷

注：锻后空冷或砂冷，不必退火即可进行机械加工。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-271)。

表 6-271 SM1Ni3Mn2CuAlMo 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工艺参数
锻后退火工艺	加热温度为 750 ~ 770℃，保温 2 ~ 4h，炉冷至 600℃出炉空冷

2) 固溶处理。

① 推荐的固溶处理工艺规范（表 6-272）。

表 6-272 SM1Ni3Mn2CuAlMo 钢推荐的固溶处理工艺规范

固溶温度/℃	保温时间/h	冷却方式	硬度 HRC
840 ~ 900	3	空冷	28 ~ 33

注：固溶温度一般为 870℃。

② 固溶温度对硬度的影响（表 6-273）。

表 6-273 SM1Ni3Mn2CuAlMo 钢固溶温度对硬度的影响

固溶温度/℃	780	810	840	870	900	940
硬度 HRC	30. 8	32. 4	33. 1	32. 7	33. 1	31. 0

3) 时效处理。

① 推荐的时效处理工艺规范（表 6-274）。

表 6-274 SM1Ni3Mn2CuAlMo 钢推荐的时效处理工艺规范

时效温度/℃	时效时间/h	冷却方式	硬度 HRC
510 ± 10	4 ~ 8	空冷	40 ~ 45

② 不同温度时效处理后的硬度（表 6-275）。

表 6-275 SM1Ni3Mn2CuAlMo 钢不同温度时效处理后的硬度

时效温度/℃	280	300	400	450	500	520	550	600
硬度 HRC	32	33	37	40	43	40	35	30

注：850℃固溶。

(5) 力学性能

SM1Ni3Mn2CuAlMo（PMS）钢是一种低碳的镍铜铝铁合金时效硬化型塑料模具钢。属于低合金析出硬化钢。具有优良的镜面研磨抛光性能，抛光后可达到镜面（表面粗糙度 $Ra = 0.012 \sim 0.05 \mu m$ ）要求。热处理工艺简单，热处理后具有良好的综合力学性能，热处理变形小。也可通过渗氮进一步提高表面性能。

1) 不同温度时效钢的力学性能（表 6-276）。

表 6-276 SM1Ni3Mn2CuAlMo 钢不同温度时效钢的力学性能

时效温度/℃	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	$A(\%)$	$Z(\%)$	$a_K/(J/cm^2)$
400	1044. 41	1128. 75	16. 2	62. 9	49. 25
450	1193. 47	1303. 3	14. 6	49. 7	11. 82
510	1256. 23	1331. 47	14. 7	47. 8	21. 67
550	1103. 25	1167. 0	15. 7	56. 6	37. 43
600	835. 53	943. 4	18. 4	64. 1	94. 56

注：850℃固溶。

2) 高温力学性能 (表 6-277)。

表 6-277 SM1Ni3Mn2CuAlMo 钢高温力学性能

试验温度/℃	R_{eL}/MPa	R_{m}/MPa	$A(\%)$	$Z(\%)$
300	905.15	1019.9	26.0	56.2
400	812.0	870.83	24.0	74.0
500	619.78	659.0	21.6	78.8

注: 850℃固溶后, 500℃时效 2h。

3) 不同处理状态的力学性能 (表 6-278)。

表 6-278 SM1Ni3Mn2CuAlMo 钢不同处理状态的力学性能

热处理工艺	$R_{\text{p0.2}}/\text{MPa}$	R_{m}/MPa	$A(\%)$	$Z(\%)$	硬度 HRC
(850±20)℃淬火, 空冷	839.6	1017.1	15.4	55.1	31.5
(850±20)℃淬火, 空冷, 510℃回火	1026.9	1300.5	13.3	45.0	43
(850±20)℃淬火, 空冷, 600℃软化	699.3	798.4	21.0	60.0	25.3
(850±20)℃淬火, 600℃软化, 530℃回火	991.6	1095.5	17.3	49.8	39
850℃固溶, 530℃回火	1191.6	1292.7	14.6	52.7	41.8
850℃固溶, 510℃回火	1169	1304	16.0	49.2	43.5

(6) 材料应用

SM1Ni3Mn2CuAlMo (PMS) 钢具有良好的综合力学性能, 优良的镜面研磨抛光性能, 热处理工艺简单, 热处理变形小, 有良好的冷热加工性能、电加工性能、焊补及蚀刻性能。主要用于光学塑料镜片, 如照相机、望远镜、眼镜等镜片和外观光洁光亮家电的各种塑料壳体的注射模成型零件等。

3. 06Ni6CrMoVTiAl (06Ni) 钢

(1) 化学成分

06Ni6CrMoVTiAl (06Ni) 钢的化学成分见表 6-279。

表 6-279 06Ni6CrMoVTiAl 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Al	Si	Mn	P	S
≤0.06	1.30 ~ 1.60	5.50 ~ 6.50	0.90 ~ 1.70	0.08 ~ 0.16	0.90 ~ 1.30	0.50 ~ 0.90	≤0.50	≤0.50	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 6-280)。

表 6-280 06Ni6CrMoVTiAl 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r3}	M_{s}	M_{f}
温度 (近似值) /℃	705	836	535	512	395

2) 线膨胀系数 (表 6-281)。

表 6-281 06Ni6CrMoVTiAl 钢线膨胀系数

温度/℃	28 ~ 100	28 ~ 200	28 ~ 300	28 ~ 400	28 ~ 500
线膨胀系数 $\alpha/\times 10^{-6}\text{℃}^{-1}$	10.8	11.2	11.4	11.6	11.8

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-282。

表 6-282 06Ni6CrMoVTiAl 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1120 ~ 1170	1070 ~ 1120	≥850	砂冷或灰冷
钢坯	1100 ~ 1150	1050 ~ 1100	≥850	空冷或砂冷

(4) 热处理

1) 预备热处理。软化处理：可采用加热温度为 680℃ 的高温回火来化进行软化处理。

2) 固溶处理。

① 固溶处理工艺规范 (表 6-283)。

表 6-283 06Ni6CrMoVTiAl 钢固溶处理工艺规范

固溶温度/℃	冷却方式		
	空冷	油冷	水冷
	硬度 HRC		
850 ~ 880 (保温 1 ~ 2h 后)	26 ~ 28	24 ~ 25	22 ~ 23

② 固溶温度对硬度的影响 (表 6-284)。

表 6-284 06Ni6CrMoVTiAl 钢固溶温度对硬度的影响

固溶温度/℃	750	780	800	850	900	950	1000
硬度 HRC	21	22.5	23.5	25	25.5	25.5	25.5

3) 时效处理。

① 推荐的时效硬化处理工艺规范 (表 6-285)。

表 6-285 06Ni6CrMoVTiAl 钢推荐的时效硬化处理工艺规范

时效温度/℃ ^①	时效时间/h	冷却方式	硬度 HRC
500 ~ 540	4 ~ 8	空冷	42 ~ 45

① 时效处理后的组织是板条状马氏体 + 析出的强化相 NiAl₂、TiC 和 TiN。

② 时效温度对硬度的影响 (表 6-286)。

表 6-286 06Ni6CrMoVTiAl 钢时效温度对钢硬度的影响

温度/℃	200	300	350	400	450	475	500	525	550	575	600	650	680	700
硬度 HRC	26	27	28	30	41	44.5	45	44.5	43	39	30	24	22	21

注：850℃固溶，时效 8h。

(5) 力学性能

06Ni6CrMoVTiAl (06Ni) 钢固溶处理后变软，切削加工性能和冷加工性能好，成形后时效硬化，硬度为 43~48HRC，变形在 0.05% 之内，具有良好的综合力学性能，并可以渗氮、渗铬处理，可提高表面硬度和耐磨性及耐蚀性。

1) 不同温度下的力学性能（表 6-287）。

表 6-287 06Ni6CrMoVTiAl 钢不同温度下的力学性能

试验温度/℃	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A (%)	Z (%)	a_K /(J/cm ²)
室温	1478	1422	9.3	37.2	3.4
200	1292	1262	11.2	54.2	36.8
300	1238	1197	10.5	53.3	41.7
400	1153	1128	13.7	56.5	51.9

2) 时效温度对力学性能的影响（表 6-288）。

表 6-288 06Ni6CrMoVTiAl 钢时效温度对力学性能的影响

时效温度/℃	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)
480	1350	1260	9.5	48
500	1440	1400	9.5	50
520	1420	1390	10	51
540	1405	1380	10	53
560	1220	1210	13	55

注：850℃固溶，时效 6h。

(6) 材料应用

06Ni6CrMoVTiAl (06Ni) 低镍马氏体时效钢切削加工性能和冷加工性能好，成形后进行时效硬化，并可以渗氮、渗铬处理，可提高综合性能，热处理工艺简便，因合金含量低，其价格相对便宜，适宜制造高精度的塑料模具和轻非铁金属压铸模具等，如光学制品、玩具、文具、线路板等塑料模具的成型零件。

4. 25CrNi3MoAl 钢

(1) 化学成分

25CrNi3MoAl 钢的化学成分见表 6-289。

表 6-289 25CrNi3MoAl 钢的化学成分（质量分数） (%)

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	V	Ni	Al	Mo	P	S
中国	25CrNi3MoAl	0.20 ~ 0.30	0.20 ~ 0.50	0.50 ~ 0.80	1.20 ~ 1.80	—	3.00 ~ 4.00	1.00 ~ 1.60	0.20 ~ 0.40	≤0.030	≤0.030
美国 (ASTM)	P21	0.18 ~ 0.21	0.20 ~ 0.40	0.20 ~ 0.40	0.30 ~ 0.50	0.15 ~ 0.25	3.90 ~ 4.25	1.05 ~ 1.25	—	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 6-290。

表 6-290 25CrNi3MoAl 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_c	M_s
温度 (近似值) /℃	740	780	290

(3) 热处理

1) 固溶及回火。

① 推荐的固溶处理工艺规范 (表 6-291)。

表 6-291 25CrNi3MoAl 钢推荐的固溶处理工艺规范

固溶温度/℃	保温时间/h	冷却方式	硬度 HRC
880 ± 20	4 ~ 6	水冷或空冷	48 ~ 50

② 回火工艺规范 (表 6-292)。

表 6-292 25CrNi3MoAl 钢回火工艺规范

回火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
680	空冷或水冷	22 ~ 23

③ 经不同固溶处理后的硬度 (表 6-293)。

表 6-293 25CrNi3MoAl 钢经不同固溶处理后的硬度

加热温度 (保温 30min) /℃	830	880	920	960	1000
硬度 HRC	50	49	48.5	46.4	45.6

2) 时效处理。

① 时效处理工艺规范 (表 6-294)。

表 6-294 25CrNi3MoAl 钢时效处理工艺规范

时效温度/℃	时效时间/h	冷却方式	硬度 HRC	变形率 (%)
520 ~ 540	6 ~ 8	空冷	39 ~ 42	-0.039

② 不同时效温度处理后的硬度 (表 6-295)。

表 6-295 25CrNi3MoAl 钢不同时效温度处理后的硬度

时效温度/℃	500	520	540
硬度 HRC	35.5 ~ 38	39 ~ 41	39 ~ 42

注：对于需冷挤压成形的塑料模具，经固溶，高温回火软化处理后，即可对模具挤压面进行加工、研磨、打光和修整，最后对模具进行真空时效处理或表面渗氮处理后装配使用（工艺略）。

(4) 力学性能

25CrNi3MoAl 钢属于低 Ni 无 Co 时效硬化钢。该钢经固溶 + 时效，硬度为 39 ~

42HRC。热处理变形小，变形率为 -0.04% ；半精加工后，进行去应力回火，变形率减小至 $-(0.01 \sim 0.02)\%$ 。并可以渗氮处理，可提高综合力学性能。室温力学性能见表6-296。

表 6-296 25CrNi3MoAl 钢的室温力学性能

性能	硬度 HRC	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	a_K /(J/cm ²)
测试值	39 ~ 42	1260 ~ 1350	1170 ~ 1200	13 ~ 16.8	55 ~ 59	45 ~ 52

注：880℃固溶，680℃回火，540℃时效处理8h。

(5) 材料应用

25CrNi3MoAl 时效硬化钢适于制作变形率要求在 -0.05% 以下，镜面要求高或表面要求光刻花纹的精密塑料模。该钢经软化处理后，可制造冷挤压型腔。

5. 18Ni 系列钢

(1) 化学成分

18Ni 钢的化学成分见表6-297。

表 6-297 18Ni 钢的化学成分（质量分数） (%)

钢号	C	Ni	Co	Mo	Si	Mn	Ti	Al	P	S
18Ni (200)	≤ 0.03	18	8.50	3.30	≤ 0.12	≤ 0.12	0.20	0.10	≤ 0.010	≤ 0.010
18Ni (250)	≤ 0.03	17.50 ~ 18.50	7.00 ~ 8.00	4.25 ~ 5.25	≤ 0.12	≤ 0.10	0.30 ~ 0.50	0.05 ~ 0.15	≤ 0.010	≤ 0.010
18Ni (300)	≤ 0.03	18.0 ~ 19.00	8.50 ~ 9.50	4.60 ~ 5.20	≤ 0.12	≤ 0.10	0.50 ~ 0.80	0.05 ~ 0.15	≤ 0.010	≤ 0.010
18Ni (350)	≤ 0.03	17.00 ~ 19.00	11.00 ~ 12.75	4.00 ~ 5.00	≤ 0.10	≤ 0.10	1.20 ~ 1.45	0.05 ~ 0.15	≤ 0.010	≤ 0.010

(2) 物理性能

1) 临界点温度（表6-298）。

表 6-298 18Ni 钢临界温度

临界点	Ac_1	Ac_3	M_s	M_f
温度（近似值）/℃	540 ~ 610	740 ~ 750	154 ~ 210	90 ~ 100

2) 热导率（表6-299）。

表 6-299 18Ni 钢热导率

温度/℃	20	50	100
热导率 λ /[W/(m·K)]	19.7	20.1	20.9

3) 其他物理性能（表6-300）。

表 6-300 18Ni 钢其他物理性能

线膨胀系数 $\alpha/10^{-6}\text{℃}^{-1}$	电阻率 $\rho/\mu\Omega\cdot\text{cm}$		时效时 尺寸变化 (%)	弹性模量 $E/\text{GPa}(\text{kgf/mm}^2)$	剪切模量 $G/\text{GPa}(\text{kgf/mm}^2)$
	固溶状态	时效后			
10.1 (24~284℃)	60~70	36~60	-0.06	186 (19000)	71.0 (7240)

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-301。

表 6-301 18Ni 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
开坯	≤1260	≤1230	≥820	高于 750℃ 快冷而 后空冷或缓冷
锻轧	≤1230	≤1120	≥820	

(4) 热处理

1) 推荐的固溶强化工艺规范 (表 6-302)。

表 6-302 18Ni 钢推荐的固溶强化工艺规范

固溶温度/℃	加热时间	冷却方式	硬度 HRC
815~830	盐浴炉 1min/mm; 空气炉 2~2.51min/mm	油冷或空冷	28

2) 推荐的时效处理工艺规范 (表 6-303)。

表 6-303 18Ni 钢推荐的时效处理工艺规范

钢号	时效温度/℃	保温时间/h	冷却方式	硬度 HRC
18Ni (250)	480	3~6	水冷或空冷	43~52
18Ni (300)	480	3~6		43~52
18Ni (350)	510	6		57~60

3) 渗氮处理。18Ni (300) 钢气体渗氮工艺: 渗氮温度为 $(455\pm10)\text{℃}$, 时间为 24~28h。

(5) 力学性能

18Ni 钢固溶以后形成超低碳马氏体, 硬度为 28~30HRC, 时效处理以后, 由于各种类型的金属间化合物的脱溶析出得到时效硬化, 硬度可以上升到 50HRC, 这类钢在高强度的条件下, 仍具有良好的韧性和高的断裂韧度。同时这类钢无冷作硬化, 时效热处理变形小, 焊接性良好, 表面还可以进行渗氮处理等。

18Ni 钢的室温力学性能见表 6-304。

表 6-304 18Ni 钢的室温力学性能

钢号	固溶温度/℃	时效温度/℃	硬度 HRC	R_m/MPa	R_{eL}/MPa	$A(\%)$	$Z(\%)$
18Ni (250)	815~830	480±5	50~52	1850	1800	10~12	48~58
18Ni (300)	815~830	480±5	53~54	2060	2010	12	60
18Ni (350)	815~830	510±5	57~60	2490	2401	—	—

(6) 材料应用

18Ni 类低碳马氏体时效钢主要用来制造高精度、超镜面、型腔复杂、大截面、大批量生产的塑料模具，但由于价格昂贵，使应用受到限制。

6. 0Cr16Ni4Cu3Nb (PCR) 钢

(1) 化学成分

0Cr16Ni4Cu3Nb 钢的化学成分见表 6-305。

表 6-305 0Cr16Ni4Cu3Nb 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Nb	P	S	其他
≤0.07	≤1.00	≤1.00	15.00 ~ 17.00	3.00 ~ 5.00	2.50 ~ 3.50	0.25 ~ 0.40	≤0.030	≤0.030	添加特殊元素

(2) 物理性能

临界点温度见表 6-306。

表 6-306 0Cr16Ni4Cu3Nb 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	M_s	M_f
温度 (近似值) /℃	670	740	140	32

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-307。

表 6-307 0Cr16Ni4Cu3Nb 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1120 ~ 1180	1100 ~ 1150	≥1000	空冷或砂冷

注：0Cr16Ni4Cu3Nb (PCR) 钢的可锻性与含铜量有关，当 Cu 的质量分数 ≤3.5% 时可锻性良好，当 Cu 的质量分数 ≥4.5% 时，锻造易开裂。该钢锻造温度范围较窄，锻造时要热透。

(4) 热处理

1) 推荐的固溶处理工艺规范 (表 6-308)。

表 6-308 0Cr16Ni4Cu3Nb 钢推荐的固溶处理工艺规范

固溶温度/℃	加热时间	冷却方式	硬度 HRC
1050	盐浴炉 1min/mm	空冷	32 ~ 35

注：经固溶处理后基体组织为低碳马氏体，钢淬透性很好，在 φ100mm 断面上硬度分布均匀。

2) 推荐的时效处理工艺规范 (表 6-309)。

表 6-309 0Cr16Ni4Cu3Nb 钢推荐的时效处理工艺规范

时效温度/℃	时效时间/h	冷却方式	硬度 HRC	变形量	
				径向 $\Delta D/D$	轴向 $\Delta L/L$
420 ~ 480	3 ~ 6	空冷	42 ~ 44	-0.05%	-0.037% ~ 0.04%

(5) 力学性能

0Cr16Ni4Cu3Nb (PCR) 钢为马氏体沉淀硬化不锈钢, 因含碳量低, 耐腐蚀性和焊接性接近于奥氏体型不锈钢。固溶处理后可获得单一的板条状马氏体组织, 硬度为 32 ~ 35HRC, 具有良好的切削加工性能。该钢加工成形后在 460 ~ 480℃ 进行时效处理, 由于马氏体基体析出富铜相, 使强度和硬度进一步提高, 同时获得较好的综合力学性能 (表 6-310)。经过时效处理以后, 工件仅有微量变形, 抛光性能好, 抛光后可在 300 ~ 400℃ 温度下进行 PVD 表面离子镀处理, 处理后可获得大于 1600HV 的表面硬度。

表 6-310 0Cr16Ni4Cu3Nb 钢时效处理后的力学性能

热处理工艺	R_m /MPa	R_{el} /MPa	A (%)	Z (%)	a_K /(J/cm ²)	硬度 HRC
950℃ 固溶, 460℃ 时效	1321	1211	13	55	50	43
1000℃ 固溶, 460℃ 时效	1334	1261	13	55	50	43
1050℃ 固溶 460℃ 时效	1355	1273	13	56	47	43
1100℃ 固溶 460℃ 时效	1391	1298	15	45	41	45
1150℃ 固溶 460℃ 时效	1428	1324	14	38	28	46

(6) 材料应用

0Cr16Ni4Cu3Nb (PCR) 钢经固溶 + 时效后, 获得较好的综合力学性能和耐蚀性, 适用于制造高耐磨、高精度和耐腐蚀的塑料模, 如氟塑料模、聚氯乙烯成型模。

7. 05Cr17Ni4Cu4Nb 钢

(1) 化学成分

05Cr17Ni4Cu4Nb 钢的化学成分 (GB/T 1220—2007) 见表 6-311。

表 6-311 05Cr17Ni4Cu4Nb 钢化学成分

C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Nb	P	S
≤0.07	≤1.00	≤1.00	15.00 ~ 17.50	3.00 ~ 5.00	3.00 ~ 5.00	0.15 ~ 0.45	≤0.040	≤0.030

(2) 物理性能

临界点温度见表 6-312。

表 6-312 05Cr17Ni4Cu4Nb 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	M_s	M_f
温度 (近似值)/℃	690	750	140	35

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-313。

表 6-313 05Cr17Ni4Cu4Nb 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1180 ~ 1200	1100 ~ 1150	≥1000	空冷或砂冷

注: 05Cr17Ni4Cu4Nb 钢锻造温度范围较窄, 当 Cu 质量分数 ≥4.5% 时, 锻造易开裂, 因此加热时必须烧透, 锻造时要轻锤快打, 采用小变形量, 然后重锤, 加大变形量。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 6-314）。

表 6-314 05Cr17Ni4Cu4Nb 钢预备热处理工艺规范

预备热处理工艺	加热温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
高温回火	720 ~ 740	炉冷或空冷	28 ~ 32
退火	820 ~ 840	炉冷至 500℃ 以下出炉空冷	28 ~ 30

2) 固溶处理。推荐的固溶处理工艺规范表 6-315。

表 6-315 05Cr17Ni4Cu4Nb 钢推荐的固溶处理工艺规范

固溶温度/℃	冷却方式	固溶硬度 HRC	基体组织
1040	水冷	32 ~ 35	低碳马氏体

3) 时效处理。推荐的时效温度见表 6-316。

表 6-316 05Cr17Ni4Cu4Nb 钢推荐的时效温度

时效温度/℃	时效时间/h	硬度 HRC
480	4	40

4) 气体渗氮工艺规范见表 6-317。

表 6-317 05Cr17Ni4Cu4Nb 钢气体渗氮工艺规范

工艺	工艺参数
气体渗氮	加热温度为 510 ~ 520℃（48h），排气 30min，NH ₃ 流量为 0.4m ³ /h，炉压为 294 ~ 490Pa，渗氮层深度为 0.17mm，表面硬度为 966HV

(5) 力学性能

05Cr17Ni4Cu4Nb 钢属于马氏体沉淀硬化不锈钢，因含碳量低，固溶处理后可获得单一的板条状马氏体，硬度为 32 ~ 34HRC，具有良好的切削加工性能。经 460 ~ 480℃ 时效后，钢的硬度达到 40HRC，强度有所提高，具有良好的综合力学性能（表 6-318）。渗氮后表面硬度为 966HV。

表 6-318 05Cr17Ni4Cu4Nb 钢固溶时效后的力学性能

热处理工艺	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	硬度 HRC
1040℃ 固溶，620℃ 时效 4h	931	725	16	50	28
1040℃ 固溶，480℃ 时效 4h	1313	1176	10	40	40
1040℃ 固溶，495℃ 时效 4h	1176	1068	10	44	38
1040℃ 固溶，550℃ 时效 4h	1068	1000	12	45	35
1040℃ 固溶，580℃ 时效 4h	1000	862	13	45	31

(6) 材料应用

05Cr17Ni4Cu4Nb 钢是传统的不锈钢，具有良好的切削加工性能、耐蚀性和良好的综合力学性能。主要用于制造耐腐蚀、高耐磨、高精度的塑料模具。

8. 07Cr17Ni7Al 钢

(1) 化学成分

07Cr17Ni7Al 钢的化学成分 (GB/T 1220—2007) 见表 6-319。

表 6-319 07Cr17Ni7Al 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	Cu	P	S
≤0.09	≤1.00	≤1.00	16.00 ~ 18.00	6.50 ~ 7.75	0.75 ~ 1.50	—	≤0.040	≤0.030

(2) 热加工

锻造工艺规范见表 6-320。

表 6-320 07Cr17Ni7Al 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1180 ~ 1200	1100 ~ 1150	≥1000	空冷或砂冷

(3) 热处理

1) 推荐的固溶处理工艺规范 (表 6-321)。

表 6-321 07Cr17Ni7Al 钢推荐的固溶处理工艺规范

固溶温度/℃	冷却方式	硬度 HBW
1050	水冷或油冷	229

2) 推荐的时效处理工艺规范 (表 6-322)。

表 6-322 07Cr17Ni7Al 钢推荐的时效处理工艺规范

时效处理方法	时效硬度 HBW
760℃ × 90min 空冷 + 565℃ × 90min 空冷	363

3) 冷处理工艺规范 (表 6-323)。

表 6-323 07Cr17Ni7Al 钢冷处理工艺规范

冷处理工艺	硬度 HBW
950℃ × 10min + -73℃ × 8h + 510℃ × 300min 空冷	≥388

(4) 力学性能

07Cr17Ni7Al 钢属于沉淀硬化型不锈钢。该钢韧性好，在固溶状态下呈奥氏体组织，硬度较低，一般小于 229HBW，易于切削加工，便于冷变形或冷加工成形；通过时效处理，钢的硬度可达 38 ~ 40HRC，通过深冷处理可提高到 42 ~ 48HRC；通过渗氮处理，可提高表面硬度、耐磨性和抗咬合能力。

(5) 材料应用

07Cr17Ni7Al 钢是沉淀硬化不锈钢，在固溶状态下，韧性好，硬度低，便于切削加工、冷变形或冷加工成形。钢的纯净度高，冶金质量高，适合镜面研磨，且蚀刻加工性良好。主要用于制造耐腐蚀、高耐磨、高精度和蚀刻要求的塑料模具。

9. 07Cr15Ni7Mo2Al 钢

(1) 化学成分

07Cr15Ni7Mo2Al 钢的化学成分（GB/T 1220—2007）见表 6-324。

表 6-324 07Cr15Ni7Mo2Al 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	P	S
≤0.09	≤1.00	≤1.00	14.00 ~ 16.00	6.50 ~ 7.75	2.00 ~ 3.00	0.75 ~ 1.50	≤0.040	≤0.030

(2) 热处理

1) 推荐的固溶处理工艺规范（表 6-325）。

表 6-325 07Cr15Ni7Mo2Al 钢推荐的固溶处理工艺规范

固溶温度/℃	冷却方式	硬度 HBW
1050	水冷或空冷	≤269

2) 时效处理工艺规范（表 6-326）。

表 6-326 07Cr15Ni7Mo2Al 钢时效处理工艺规范

时效工艺	硬度 HBW
760℃ × 90min 空冷 + 565℃ × 90min 空冷	≥375

3) 冷处理工艺规范（表 6-327）。

表 6-327 07Cr15Ni7Mo2Al 钢冷处理工艺规范

冷处理工艺	硬度 HBW
950℃ × 10min + - 73℃ × 8h + 510 × 30 ~ 40min 空冷	≥388

(3) 力学性能

07Cr15Ni7Mo2Al 钢属于奥氏体析出沉淀硬化型镍铬不锈钢。在淬火状态下呈奥氏体组织，韧性较好，便于冷变形成形，时效后转变为马氏体，同时通过回火使金属间化合物脱溶析出得到沉淀硬化，硬度可达 40HRC 以上，并获得良好的综合力学性能。

固溶时效后的力学性能见表 6-328。

表 6-328 07Cr15Ni7Mo2Al 钢固溶时效后的力学性能

热处理工艺	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	硬度
1050℃ 固溶（水冷或空冷）	—	—	—	—	≤269HBW
1050℃ 固溶 + 760℃ × 90min + 565℃ × 90min 时效	1205	1098	7	25	≥375HBW

(续)

热处理工艺	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	硬度
1050℃固溶 + 950℃ × 10min + - 73℃冷处理 8h + 510℃回火 30 ~ 60min 时效	1323	1205	6	20	≥388HBW
1050℃固溶 + 950℃ × 15min + - 70℃冷处理 2h + 480℃ × 2h 时效	1588	1539	75.6	—	435 ~ 475HV
1050℃固溶 + 950℃ × 保温时间 (按 1.2min/ mm 计算) + - 75℃ × 1h + 510℃ × 2h 时效	1470	1323	—	—	—

(4) 材料应用

07Cr15Ni7Mo2Al 钢在淬火状态下韧性较好, 便于冷变形成形制成各种模具和零件。时效、冷处理、回火使金属间化合物脱溶析出得到沉淀硬化, 获得良好的综合力学性能。适宜制造冷变形模具和弹簧零件。

10. 1Cr14Co13Mo5V (AFC-77) 钢

(1) 化学成分

1Cr14Co13Mo5V 钢的化学成分见表 6-329。

表 6-329 1Cr14Co13Mo5V 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Co	Mo	V	Ni	S	P
0.15	0.15	0.20	14.50	13.50	5.00	0.50	0.20	≤0.030	≤0.030

(2) 热处理

1) 固溶处理工艺规范 (表 6-330)。

表 6-330 1Cr14Co13Mo5V 钢固溶处理工艺规范

工艺	工艺参数
固溶处理	固溶温度为 1040℃, 油冷。固溶后组织为马氏体 + 残留奥氏体, 其中残留奥氏体的体积分数为 50%

2) 冷处理工艺规范 (表 6-331)。

表 6-331 1Cr14Co13Mo5V 钢冷处理工艺规范

工艺	工艺参数
冷处理	固溶后进行冷处理, -73℃ × (6 ~ 8h), 冷处理后残留奥氏体大幅减少

3) 时效处理工艺规范 (表 6-332)。

表 6-332 1Cr14Co13Mo5V 钢时效处理工艺规范

工艺	工艺参数
时效处理	时效温度为 485 ~ 650℃, 但在 425 ~ 590℃ 范围内时效会引起韧性降低, 在使用时应予以注意。时效硬度为 50HRC

(3) 力学性能

1Cr14Co13Mo5V (AFC-77) 钢具有高强度、较高硬度和高韧性, 综合力学性能好, 但热处理不当会降低相应力学性能。

(4) 材料应用

1Cr14Co13Mo5V (AFC-77) 马氏体沉淀硬化不锈钢主要用于制造高硬度、高强度和耐蚀性机械零件和塑料模具。但钢的价格较高, 且耐蚀性相对较低, 使应用受到限制。

6.2.6 耐蚀性塑料模具钢

耐蚀性塑料模具钢用于制造在生产过程中会产生化学腐蚀性气体的塑料制品的塑料模具, 例如, 生产以聚氯乙烯、氟塑料、添加阻燃剂的阻燃塑料等为原料的塑料制品时, 由于塑料在熔融状态下, 会分解出氯化氢、氟化氢和二氧化硫等气体, 对模具型腔有一定的腐蚀作用, 因此模具材料必须具有较好的耐蚀性。目前耐蚀性塑料模具钢主要使用马氏体不锈钢及其改进型或中碳及高碳高铬马氏体不锈钢, 如 SM2Cr13、30Cr13、SM4Cr13 等, 该类钢具有较好的抗大气、水蒸气和耐蚀性气体的腐蚀, 热处理后能获得较高的硬度和耐磨性; 为提高耐腐蚀模具的加工精度, 常采用马氏体时效硬化钢 0Cr16Ni4Cu3Nb (PCR) 和 1Cr14Co13Mo5V (AFC-77) 钢, 这类钢适于制造要求高耐磨、高精度和耐腐蚀的塑料模具。国外同类产品有法国 CLC2316H、德国 X36CrMo17 等。常用耐蚀性塑料模具钢见表 6-333。

表 6-333 常用耐蚀性塑料模具钢

模具材料市场	钢 号
国产模具钢	SM2Cr13、30Cr13、SM4Cr13、95Cr18、102Cr17Mo、Cr14MoV、14Cr17Ni2、Cr18MoV、SM3Cr17Mo、0Cr16Ni4Cu3Nb (PCR)、1Cr14Co13Mo5V (AFC-77)
国外同类产品	法国 CLC2316H 钢、德国 X36CrMo17 (材料号 W-Nr. 1.2316)、奥地利百禄公司 M300、瑞典-胜百公司 S-136、日本大同特殊钢公司 S-STAR 等

1. SM2Cr13 钢

(1) 化学成分

SM2Cr13 钢的化学成分 (GB/T 094—1997) 见表 6-334。

表 6-334 SM2Cr13 钢化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	S	P
0.16~0.25	≤1.00	≤1.00	12.00~14.00	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 6-335)。

表 6-335 SM2Cr13 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	M_s
温度 (近似值) /℃	820	950	780	320

2) 弹性模量 (表 6-336)。

表 6-336 SM2Cr13 钢弹性模量

温度/℃	20	400	500	600
弹性模量 E/MPa	210000 ~ 223000	193000	184000	172000

3) 线膨胀系数 (表 6-337)。

表 6-337 SM2Cr13 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 500
线膨胀系数 $\alpha/\times 10^{-6}\text{℃}^{-1}$	10.5	11.0	11.5	12.0	12.0

4) 热导率 (表 6-338)。

表 6-338 2Cr13 钢热导率

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 500
热导率 $\lambda/[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	23.0	23.4	24.7	25.5	26.3

5) 电阻率 (表 6-339)。

表 6-339 SM2Cr13 钢电阻率

温度/℃	20	100
电阻率 $\rho/\times 10^{-6}\Omega\cdot\text{m}$	0.55	0.65

6) 其他物理性能 (表 6-340)。

表 6-340 SM2Cr13 钢其他物理性能

密度/ (g/cm^3)	比热容 $c_p/[(\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K})]$	熔点/℃
7.75	459.8	1450 ~ 1510

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-341。

表 6-341 SM2Cr13 钢锻造工艺规范

升 温	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
850℃前应缓慢加热, 冷装炉温度 $\leq 800\text{℃}$	1160 ~ 1200	≥ 850	砂冷或及时退火

注: 由于钢的导热性差, 加热温度低于 856℃, 应缓慢加热。

(4) 冷加工

冷状态的拉深、冲压工艺性良好。加工后, 应进行去应力退火。其工艺为将工件加热到 730 ~ 780℃空冷。

(5) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-342)。

表 6-342 SM2Cr13 钢预备热处理工艺规范

预备热处理工艺	加热温度/℃	冷却方式	硬度 HBW
软化退火	750 ~ 800	炉冷	—
完全退火	860 ~ 900	炉冷	160 ~ 187

2) 淬火及回火。

① 推荐的淬火及回火工艺规范 (表 6-343)。

表 6-343 SM2Cr13 钢推荐的淬火及回火工艺规范

淬火规范			回火规范		
淬火温度	冷却方式	硬度 HRC	回火温度	冷却方式	硬度 HRC
1000 ~ 1050	油冷或水冷	≥45	660 ~ 670	空冷	20 ~ 23

② 回火温度与硬度的关系 (表 6-344)。

表 6-344 SM2Cr13 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬火后	200	300	400	500	550	600	650
硬度 HRC	47	46	45	44	43	37	30	24

注：1050℃油淬。

(6) 力学性能

SM2Cr13 钢属于马氏体型不锈钢，具有较高的韧性和冷变形性能，机械加工性能良好，经热处理后具有较高的强度、硬度和优良的耐蚀性。

1) 不同回火温度的力学性能 (表 6-345)。

表 6-345 SM2Cr13 钢不同回火温度的力学性能

回火温度/℃	300	400	500	600	700	800
R_m /MPa	1580	1550	1460	1150	780	800
R_{eL} /MPa	1430	1390	1250	900	580	600
Z (%)	10	11	15	22	27	26
A (%)	5	5.5	7.5	14	19	16

注：100℃油淬。

2) 高温力学性能 (表 6-346)。

表 6-346 SM2Cr13 钢高温力学性能

热处理制度	试验温度/℃	R_m	R_{eL}	A	Z	$a_K/ (J/cm^2)$
		/MPa		(%)		
1000 ~ 1020℃ 油淬, 720 ~ 750℃ 回火	20	720	520	21.0	68.0	65 ~ 175
	300	555	400	18.0	66.0	120
	400	530	405	16.5	58.5	205
	450	495	380	17.5	57.0	240
	470	495	420	22.5	71.0	
	500	440	365	32.5	75.0	250
	550	350	285	36.5	83.5	223

3) 室温力学性能 (表 6-347)。

表 6-347 SM2Cr13 钢室温力学性能

截面尺寸 /mm	热处理制度	R_m	R_{eL}	A	Z	$a_K / (J/cm^2)$	硬度 HBW
		/MPa		(%)			
≤60	1000 ~ 1050℃ 淬火 (油、水冷), 600 ~ 770℃ 回火, 油、水、空冷	≥660	≥450	≥16	≥55	≤80	≤197
	1000 ~ 1050℃, 淬火 (油、水冷), 660 ~ 770℃ 回火	660 ~ 1155	450 ~ 975	16 ~ 33. 6	55 ~ 78 65	80 ~ 267	126 ~ 197 ^①
	860℃退火	500	250	22	45	90	
≤60	1050℃空淬, 500℃回火	1250	950	7	55	50	
	1050℃空淬, 600℃回火	850	650	10	63. 5	70	
	1050℃油淬, 660℃回火	860	710	19. 0	66. 5	130	
	1050℃油淬, 770℃回火	820	700	18. 0		150	

① 实际生产检验值, 硬度为退火后的硬度值。

4) 持久强度 (表 6-348)。

表 6-348 SM2Cr13 钢持久强度

试验温度/℃		450	470	500	530
R_m (1000h)	/MPa	330	260	230	160
R_m (10000h)		296	215	195	105
R_m (100000h)		260	190	160	76

5) 蠕变强度 (表 6-349)。

表 6-349 SM2Cr13 钢蠕变极限

试验温度/℃	450	475	500	550
σ_{-1} (100000h) /MPa	128	75	48	38

注: 试验用钢 1000 ~ 1020℃ 空冷, 720 ~ 730℃ 回火。

6) 耐蚀性 (表 6-350)。

表 6-350 SM2Cr13 钢耐蚀性

介质条件			试验延续时间/h	腐蚀深度/ (mm/a)
介质	浓度 (质量分数, %)	温度/℃		
硝酸	5	20	—	<0.1
硝酸	5	沸腾	—	3.00 ~ 10.0
硝酸	20	20	—	<0.1
硝酸	20	沸腾	—	1.0 ~ 3.0
硝酸	30	沸腾	—	<3.0

(续)

介质条件			试验延续时间/h	腐蚀深度/ (mm/a)
介质	浓度 (质量分数, %)	温度/℃		
硝酸	50	20	—	<0.1
硝酸	50	沸腾	—	<3.0
硝酸	65	20	—	<0.1
硝酸	65	沸腾	—	3~10
硝酸	90	20	—	<0.1
硝酸	90	沸腾	—	<10.0
柠檬酸	5	140	—	<10.0
柠檬酸	10	沸腾	—	>10.0
乳酸	相对密度 1.01~1.04	沸腾	72	>10.0
乳酸	相对密度 1.04	20	600	0.27
甲酸	10~50	20	—	<0.1
甲酸	10~50	沸腾	—	>10.0
水杨酸		20	—	<0.1
硬脂酸		>100	—	<0.1
焦性五倍子酸	稀~浓的溶液	20	—	<0.1
二氧化碳和碳酸	干燥的	<100	—	<0.1
二氧化碳和碳酸	潮湿的	<100	—	<0.1
纤维素	煮沸时	—	190	2.59
纤维素	在泄料池中		240	0.369
纤维素	同再生酸一起在槽中		240	22.85
氢氧化钠	20	50	—	<0.1
氢氧化钠	20	沸腾	—	<1.0
氢氧化钠	30	100	—	<1.0
氢氧化钠	40	100	—	<1.0
氢氧化钠	50	100	—	1.0~3.0
氢氧化钠	60	90	—	<1.0
氢氧化钠	90	300	—	>10.0
氢氧化钠	熔体	318	—	>10.0
硼酸	50~饱和溶液	100	—	<0.1
醋酸	1	90		<0.1
醋酸	5	20	—	<1.0
醋酸	5	沸腾	—	>10.0
醋酸	10	20	—	<1.0
醋酸	10	沸腾	—	>10.0
酒石酸	10~50	20		<0.1

(续)

介质条件			试验延续时间/h	腐蚀深度/ (mm/a)
介质	浓度 (质量分数, %)	温度/℃		
酒石酸	10 ~ 50	沸腾	—	< 1. 0
酒石酸	饱和溶液	沸腾	—	< 10. 0
柠檬酸	1	20	—	> 0. 1
柠檬酸	1	沸腾	—	—
氢氧化钾	25	沸腾	—	—
氢氧化钾	50	20	—	—
氢氧化钾	50	沸腾	—	—
氢氧化钾	68	120	—	—
氢氧化钾	熔体	300	—	> 10. 0
氨	溶液与气体	20 ~ 100	—	< 0. 1
硝酸铵	约 65	20	—	0. 0011
硝酸铵	约 65	125	—	1. 43
氯化铵	饱和溶液	沸腾	1269	< 10. 0
过氧化氢	20	20	110	0
碘	干燥的	20	—	< 0. 1
碘	溶液	20	—	> 10. 0
碘仿	蒸汽	60	—	< 0. 1
硝酸钾	25 ~ 50	20	—	< 0. 1
硝酸钾	25 ~ 50	沸腾	—	< 10. 0
硝酸钾	10	20	—	0. 07
硫酸钾	10	沸腾	—	1. 18
硝酸银	10	沸腾	720	< 0. 1
硝酸银	熔化的	250	96	> 10. 0
过氧化钠	10	20	—	< 10. 0
过氧化钠	10	沸腾	—	> 10. 0
明矾	10	20	—	0. 1 ~ 1. 0
明矾	10	100	—	< 10. 0
重铬酸钾	25	20	—	< 0. 1
重铬酸钾	25	沸腾	—	> 10. 0
氯酸钾	饱和溶液	100	—	< 0. 1

(7) 材料应用

SM2Cr13 钢属于马氏体型不锈钢, 具有优良的耐蚀性, 较好的强韧性, 适宜制造承受高负荷并存在腐蚀介质作用的透明和不透明塑料制品模具。

2. 30Cr13 钢

(1) 化学成分

30Cr13 钢的化学成分 (GB/T 1220—2007) 见表 6-351。

表 6-351 30Cr13 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	S	P
0.26 ~ 0.35	≤1.00	≤1.00	12.00 ~ 14.00	≤0.030	≤0.040

(2) 物理性能

临界点温度见表 6-352。

表 6-352 30Cr13 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	M_s
温度 (近似值) /℃	820	950	240

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-353。

表 6-353 30Cr13 钢锻造工艺规范

装炉炉温	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
冷装炉炉温≤800℃, 热装炉不限	1100 ~ 1150	≥850	炉冷

注: 30Cr13 钢的导热性差、内应力较大, 宜先慢加热到 850℃, 然后快速加热到 1120℃; 对于锻造后的制品, 应特别注意缓冷, 最好在热砂中或在炉中缓冷; 高温时压下量可小些, 终锻温度应稍高些。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-354)。

表 6-354 30Cr13 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	冷却方式	硬度 HBW
锻后退火	750 ~ 800	炉冷	≤207
完全退火	860 ~ 900	炉冷	≤207

2) 淬火及回火

① 推荐的淬火及回火工艺规范 (表 6-355)。

表 6-355 30Cr13 钢推荐的淬火及回火工艺规范

淬火规范			回火规范	
淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度/℃	硬度 HRC
1020 ~ 1050	油冷或空冷	52 ~ 54	200 ~ 300	50 ~ 52

② 回火温度与硬度的关系 (表 6-356)。

表 6-356 30Cr13 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬火后	200	300	400	500	550	600	650
硬度 HRC	53	52	51	50	49	43	31	27

注: 1050℃油淬。

(5) 力学性能

30Cr13 钢属于马氏体型不锈钢，其含碳量较高，因此强度、硬度较高，热强性和韧性好。该钢在热处理（淬火及回火）后可作为强度较高的结构件材料。

(6) 材料应用

30Cr13 钢适宜制造受到高机械载荷及腐蚀介质作用并在磨损条件下工作的透明或不透明塑料制品模具。

3. SM4Cr13 钢

(1) 化学成分

SM4Cr13 钢的化学成分见表 6-357。

表 6-357 SM4Cr13 钢的化学成分（质量分数）（%）

国家	钢号	C	Si	Mn	Cr	S	P	其他
中国 ^①	SM4Cr13	0.36 ~ 0.45	≤0.60	≤0.80	12.00 ~ 14.00	≤0.030	≤0.030	
瑞典 (-胜百)	S-136	0.38	0.90	0.50	13.60	—	—	V: 0.30
美国	420SS	0.30 ~ 0.40	≤1.00	≤1.25	12.00 ~ 14.00	—	—	—
德国 (德威)	GSW-2083	0.38 ~ 0.45	≤1.00	≤1.00	12.50 ~ 13.50	—	—	—
韩国	HEMS-1A	0.20 ~ 0.40	0.30 ~ 0.50	0.70 ~ 1.00	12.00 ~ 14.00	—	—	—
奥地利 (百禄)	M310	0.38 ~ 0.45	≤1.00	≤1.00	12.50 ~ 13.50	—	—	—
法国	CLC2083	0.40	0.40	0.30	13.00	—	—	—
日本 (大同)	S-STAR	0.38	0.90	—	13.50	—	—	Mo: 0.10, V: 0.30

① YB/T 094—1997。

(2) 物理性能

1) 临界点温度（表 6-358）。

表 6-358 SM4Cr13 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	M_s
温度（近似值）/℃	820	1100	270

2) 线膨胀系数（表 6-359）。

表 6-359 SM4Cr13 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 500
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	10.5	11.0	11.0	11.5	12.0

3) 热导率 (表 6-360)。

表 6-360 SM4Cr13 钢热导率

温度/℃	20	200	400	600
热导率 λ / [W/ (m · K)]	27.6	28.8	28.8	28.4

4) 弹性模量 (表 6-361)。

表 6-361 SM4Cr13 钢弹性模量

温度/℃	20	400	500	600
弹性模量 E /MPa	210000 ~ 223500	197000	185000	174000

5) 电阻率 (表 6-362)。

表 6-362 SM4Cr13 钢电阻率

温度/℃	20	100
电阻率 ρ / $\times 10^{-6} \Omega \cdot m$	0.55	0.65

6) 其他物理性能 (表 6-363)。

表 6-363 SM4Cr13 钢其他物理性能

密度 / (g/cm ³)	比热容 c_p (20℃) / [J/ (kg · K)]
7.7	459.8

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-364。

表 6-364 SM4Cr13 钢锻造工艺规范

升温	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
缓慢加热至 800℃, 然后 快速加热至 1200℃	1160 ~ 1200	≥850	灰冷或砂冷

注: 锻后应及时回火。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-365)。

表 6-365 SM4Cr13 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	冷却方式	硬度 HBW
锻后退火	750 ~ 800	炉冷至 500℃ 出炉空冷	≤217
去应力退火	650℃ × 2h 均热	缓慢冷却至 500℃, 然后出炉空冷	—

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范 (表 6-366)。

表 6-366 SM4Cr13 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
1000 ~ 1050	油冷	52 ~ 55

② 瑞典 S-136 钢淬火温度与硬度、晶粒大小、残留奥氏体量的关系（表 6-367）。

表 6-367 S-136 钢淬火温度与硬度、晶粒大小、残留奥氏体量的关系^①

淬火温度/℃	980	990	1000	1010	1020	1030
硬度 HRC	53.5	53.8	54	54.5	55	55.1
晶粒度级别/级	6	7	7.5	8	8.1	8.5
残留奥氏体量（体积分数，%）	1	2	4	6	7	7.5

① S-136 与我国的 40Cr13 相当。

3) 回火

① 推荐的回火工艺规范（表 6-368）。

表 6-368 SM4Cr13 钢推荐的回火工艺规范

回火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
200 ~ 300	空冷	50 ~ 53

② 回火温度与硬度的关系（表 6-369）。

表 6-369 SM4Cr13 钢回火温度与硬度的关系

回火温度/℃	淬火后	200	300	400	500	550	600	650
硬度 HRC	54	53	52	51	50	44	33	28

(5) 力学性能

SM4Cr13 钢属于马氏体型不锈钢，机械加工性能较好，淬透性高，经热处理（淬火及回火）后，具有较高的强度和耐磨性，优良的抛光性能和耐蚀性。

1) SM4Cr13 钢在不同温度下的力学性能（表 6-370）。

表 6-370 SM4Cr13 钢在不同温度下的力学性能

力学性能 \ 温度/℃	温度/℃					
	室温	200	300	400	500	600
R_m /MPa	1125	960	915	790	525	310
R_{eL} /MPa	905	820	720	680	470	260
A (%)	11	10.5	10	11.5	19	20
Z (%)	32	40	39	45	75	82
α_K /(J/cm ²)	10	50	70	71	80	105

注：1050℃空冷，650×3h 回火。

2) 室温力学性能 (表 6-371)。

表 6-371 SM4Cr13 钢室温力学性能

热处理制度	R_m	R_{eL}	A	Z	硬度 HRC	退火后硬度 HBW
	/MPa		(%)			
1050 ~ 1100℃ 油淬, 200 ~ 300℃ 回火 1050℃ 空冷, 600℃, 3h 回火、860℃ 退火	1140 480 ~ 560	910	12. 5 20 ~ 25	32. 0	≥50 50 ~ 67	≤229 143 ~ 229

3) 高温拉伸性能 (表 6-372)。

表 6-372 SM4Cr13 钢高温拉伸性能

热处理制度	试验温度/℃	R_m	R_{eL}	A (%)
		/MPa		
1030℃ 空冷, 500℃ 回火空冷	20	1800 ~ 1820	1630 ~ 1650	2. 5
	400	1660 ~ 1700	1450 ~ 1480	6
	450	1570 ~ 1600	1350 ~ 1420	5 ~ 6
	500	1310 ~ 1340	1250 ~ 1290	6. 5
1030℃ 空冷, 600℃ 回火空冷	20	1130 ~ 1160	970	9. 2 ~ 10
	400	920 ~ 960	790 ~ 830	8. 3 ~ 10
	450	800 ~ 820	620 ~ 650	10 ~ 12
	500	710 ~ 730	580 ~ 600	14. 5 ~ 15

4) 抗氧化性: 该钢可在 600 ~ 650℃ 长期使用。

(6) 材料应用

SM4Cr13 钢属于马氏体型不锈钢, 机械加工性能较好, 具有较高的强度和耐磨性, 优良的耐蚀性, 能抵抗水蒸气、弱有机酸、稀硫酸盐、碳酸盐等。抛光性能好, 适宜制造承受高负荷、高耐磨及在腐蚀性介质作用下的透明、不透明塑料制品模具, 如光学透镜、(腐蚀性) 树脂材料制品、添加助燃剂的树脂制品等。该钢被推荐用于所有的塑料模具制造, 由于其具有特殊性质, 因此更适合特殊环境的需求, 如耐腐蚀、耐锈蚀模具, 如加有腐蚀性醋酸盐类等注射原料的模具; 低表面粗糙度值要求的模具; 韧性、延展性较好的复杂模具; 需高淬透性的大型塑料模具等。

4. 95Cr18 钢

(1) 化学成分

95Cr18 钢的化学成分 (GB/T 1220—2007) 见表 6-373。

表 6-373 95Cr18 钢化学成分 (质量分数/%)

C	Si	Mn	Cr	S	P
0.90 ~ 1.00	≤0.80	≤0.80	17.00 ~ 19.00	≤0.030	≤0.040

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 6-374)。

表 6-374 95Cr18 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ar_1
温度（近似值）/℃	830	810

2) 线膨胀系数（表 6-375）。

表 6-375 95Cr18 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 500
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	10.5	11.0	11.0	11.5	12.0

3) 其他物理性能（表 6-376）。

表 6-376 95Cr18 钢其他物理性能

密度 $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	弹性模量 $E(20^\circ\text{C}) / \text{MPa}$	比热容 $c_p(20^\circ\text{C}) / [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	热导率 $\lambda(20^\circ\text{C}) / [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	电阻率 $\rho(20^\circ\text{C}) / \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$
7.7	203 890	459.8	29.3	0.60

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-377。

表 6-377 95Cr18 钢锻造工艺规范

装炉炉温	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
冷装炉温 $\leq 600^\circ\text{C}$ ，热装炉温不限	1050 ~ 1100	≥ 850	炉冷

注：热加工工艺加热速度不宜太快，应控制较高的停锻（轧）温度，并严格缓冷条件。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 6-378）。

表 6-378 95Cr18 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	冷却方式	硬度 HBW
软化退火	800 ~ 840	炉冷至 500°C 出炉空冷	≤ 255 ①
完全退火	840 ~ 860	炉冷	≤ 255 ①

① 退火组织为珠光体。

2) 淬火及回火。

① 淬火及回火工艺规范（表 6-379）。

表 6-379 95Cr18 钢淬火及回火工艺规范

淬火规范			回火规范	
淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度/℃	硬度 HRC
1030 ~ 1070	油冷	≥ 55	200 ~ 300	56

② 不同淬火温度后的硬度、残留奥氏体量及冲击韧度（表 6-380）。

表 6-380 95Cr18 钢不同淬火温度后的硬度、残留奥氏体量及冲击韧度

淬火温度/℃	800	900	950	1000	1050	1100	1150	1200
硬度 HRC	35	48	52	57	60	53	42	35
残留奥氏体量（体积分数，%）	—	—	1.7	5.2	29.2	93.9	97	99
$a_K/（J/cm^2）$	31	17	14	11	10	15	22	26

③ 回火温度对硬度、冲击韧度的影响（表 6-381）

表 6-381 95Cr18 钢不同回火温度对硬度、冲击韧度的影响

回火温度/℃	淬火后	100	200	300	400	450	500	550	600	650
硬度 HRC	60	60	58	55	56	57	54	47	40	32
$a_K/（J/cm^2）$	11.5	20	28	29	24	22	21	25	30	—

3) 冷处理

① 冷处理工艺规范（表 6-382）。

表 6-382 95Cr18 钢冷处理工艺规范

冷处理工艺	硬度 HBW
1000℃ × 10min + - 73℃ × 6 ~ 8h + 100 ~ 200℃ × 30 ~ 40min 空冷	55 ~ 60

② 冷处理对钢硬度的影响（表 6-383）。

表 6-383 95Cr18 钢冷处理对钢硬度的影响

淬 火		冷处理 冷至 - 75℃ 保持 1h 后硬度/HRC	下列温度回火后硬度 HRC		
淬火温度/℃	硬度 HRC		100℃	150℃	200℃
1000	58	—	58	57	55
1000	59	59.5	59.5	59	57
1050	60	61.5	61	61	59
1100	60.5	62	62	62	60.5

(5) 力学性能

95Cr18 钢属于高碳高铬马氏体型不锈钢，热处理后具有高强度、高硬度、高耐磨性和一定的耐蚀性。该钢为莱氏体钢，容易形成不均匀的碳化物偏析，所以在热加工时必须严格控制热加工工艺，注意选择适当的加工比。

(6) 材料应用

95Cr18 钢属于高碳高铬马氏体型不锈钢，具有较高的综合力学性能和一定的耐蚀性。适宜制造承受高负荷、高耐磨以及在腐蚀介质下工作的塑料模具。

5. 102Cr17Mo 钢

(1) 化学成分

102Cr17Mo 钢的化学成分（GB/T 1200—2007）见表 6-384。

表 6-384 102Cr17Mo 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P
0.95 ~ 1.10	≤0.80	≤0.80	16.00 ~ 18.00	0.40 ~ 0.70	≤0.030	≤0.040

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 6-385)。

表 6-385 102Cr17Mo 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{r1}	M_s
温度 (近似值) /℃	815 ~ 865	765 ~ 665	145

2) 线膨胀系数 (表 6-386)。

表 6-386 102Cr17Mo 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 500
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$	10.5	11.0	11.0	12.0

3) 热导率 λ (20℃) 为 29.3W/ (m · K)。

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-387。

表 6-387 102Cr17Mo 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1130 ~ 1150	1080 ~ 1100	850 ~ 900	砂冷
钢坯	1100 ~ 1120	1050 ~ 1080	850 ~ 900	砂冷

注: 102Cr17Mo 钢热加工工艺, 最好采用冷装炉加热, 当加热温度在 700℃ 以下时, 加热速度不宜太快, 在锻造 (或轧制) 时, 应采用较高的终锻温度, 并严格控制缓冷条件。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-388)。

表 6-388 102Cr17Mo 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	保温时间/h	冷却方式	硬度 HBW
锻后退火	850 ~ 870	4 ~ 6	炉冷至 600℃ 出炉空冷	≤255
再结晶退火	730 ~ 750		空冷	—

2) 淬火及回火

① 推荐的淬火及回火工艺规范 (表 6-389)。

表 6-389 102Cr17Mo 钢推荐的淬火及回火工艺规范

淬火规范			回火规范		
淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度/℃	保温时间/h	硬度 HRC
1050 ~ 1100	油冷	≥58	160 ~ 180	2 ~ 5	≥58

② 回火温度与硬度的关系（表 6-390）。

表 6-390 102Cr17Mo 钢回火温度与硬度的关系

淬火	下列温度回火后钢的硬度 HRC							
	未回火	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃
950℃空冷	50	47	48	48	47	47	38	25
1000℃空冷	56	51.5	52	50	49	49	40.5	27
1050℃空冷	58	56	56	53	52	52	43	29
1100℃空冷	60.5	57	58	56	54	55	47	32

3) 冷处理

① 冷处理工艺规范（表 6-391）。

表 6-391 102Cr17Mo 钢冷处理工艺规范

淬火温度/℃	冷处理		回火	
	冷处理温度/℃	保持时间/h	回火温度/℃	保温时间/h
1050	-75	1~4	160~180	保温 30min 空冷

② 淬火温度和冷处理对硬度的影响（表 6-392）。

表 6-392 102Cr17Mo 钢淬火温度和冷处理对硬度的影响

淬火温度/℃	1020	1040	1060	1080	1100
常规淬火后硬度 HRC	58.5	58	61.5	61	61
经冷处理后硬度 HRC	60	60.5	62	63	64

注：冷处理温度为 -75℃，保持 1h。

③ 淬火温度和冷处理对力学性能的影响（表 6-393）

表 6-393 102Cr17Mo 钢淬火温度和冷处理对力学性的影响

淬火温度/℃	未经冷处理		经 -75℃冷处理（保持 1h）	
	σ_{bb}/MPa	$a_K/(J/\text{cm}^2)$	σ_{bb}/MPa	$a_K/(J/\text{cm}^2)$
1020	3250	30	2750	30
1040	3000	37	3800	11
1060	3500	40	3300	6
1080	2750	25	2800	3
1100	2500	3	1750	2.5

(5) 力学性能

102Cr17Mo 高碳高铬马氏体型不锈钢具有高硬度、高耐磨性、耐回火性、耐蚀性和较好的高温尺寸稳定性，该钢属于莱氏体钢，容易形成不均匀碳化物偏析而影响模具使用寿命，所以在热加工时必须严格控制热加工工艺，并注意选取适当的热加工比。

1) 室温力学性能 (表 6-394)。

表 6-394 102Cr17Mo 钢室温力学性能

热处理制度	R_m /MPa	A (%)	Z (%)	a_K / (J/cm ²)	硬度
850℃退火	760	14.0	27.5	16	≤255HBW
1060℃淬火, 150℃回火	—	—	—	40	61HRC

2) 耐蚀性 (表 6-395)。

表 6-395 102Cr17Mo 钢耐蚀性

热处理制度	硬度 HRC	介质条件			腐蚀速度 / [g/ (m ² · h)]
		介质	浓度 (质量分数, %)	温度	
1050℃油淬	61.0	硫酸	2	沸腾	575.6
		硫酸	5	沸腾	1003.9
		硫酸	40	沸腾	1.15
1050℃油淬, 150℃回火 1h	60.0	硫酸	2	沸腾	502.0
		硫酸	5	沸腾	968.3
		硝酸	40	沸腾	1.04

(6) 材料应用

102Cr17Mo 高碳高铬马氏体型不锈钢淬火后有高硬度、高耐磨性和耐蚀性, 适宜制造要求承受高负荷、高耐磨及在腐蚀性介质作用下工作的塑料模具。

6. 14Cr17Ni2 钢

(1) 化学成分

14Cr17Ni2 钢的化学成分 (GB/T 1220—2007) 见表 6-396。

表 6-396 14Cr17Ni2 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
0.11 ~ 0.17	≤0.80	≤0.80	16.00 ~ 18.00	1.50 ~ 2.50	≤0.040	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 6-397)。

表 6-397 14Cr17Ni2 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{r1}	M_s
温度 (近似值) /℃	810	780	357

2) 线膨胀系数 (表 6-398)。

表 6-398 14Cr17Ni2 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 500
线膨胀系数 α / $\times 10^{-6} \text{C}^{-1}$	10.0	10.0	11.0	11.0	11.0

3) 热导率 (表 6-399)。

表 6-399 14Cr17Ni2 钢热导率

温度/℃	10	100	200	300	400	500	600	700	800	900
热导率 λ / [W/ (m · K)]	20.9	21.7	22.6	23.4	24.2	25.1	25.9	26.7	28.0	29.7

4) 其他物理性能 (表 6-400)。

表 6-400 14Cr17Ni2 钢其他物理性能

密度 / (g/cm ³)	弹性模量 E (20℃) /MPa	比热容 c_p (20℃) [J/ (kg · K)]	电阻率 ρ (20℃) / $\times 10^{-6} \Omega \cdot m$
7.75	210000	459.8	0.70

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-401。

表 6-401 14Cr17Ni2 钢锻造工艺规范

装炉炉温	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却条件
冷装炉温 <800℃, 热装炉温不限	1100 ~ 1150	>850	>150℃ 于砂内缓冷

注: 钢在 1100℃ 时的伸长率最大, 终锻温度应偏高一些, 并应控制较大的加工比。

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-402)。

表 6-402 14Cr17Ni2 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	冷却方式	硬度 HBW
低温退火 ^①	660 ~ 680	炉冷	—
高温退火	850 ~ 870	炉冷	≤250

① 退火组织为珠光体。

2) 淬火及回火工艺规范 (表 6-403)。

表 6-403 14Cr17Ni2 钢淬火及回火工艺规范

淬火规范			回火规范	
淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度/℃	硬度 HRC
980 ~ 1050	油冷或空冷	44 ~ 51	275 ~ 300	≥40
			560 ~ 605	26 ~ 34

(5) 力学性能

14Cr17Ni2 钢属于马氏体型不锈钢, 具有较高的强度、硬度和良好的韧性。该钢对硝酸、有机酸以及有机酸水溶液都具有良好的耐蚀性。

1) 室温力学性能 (表 6-404)。

表 6-404 14Cr17Ni2 钢室温力学性能

热处理制度	R_m /MPa	A (%)	a_K / (J/cm ²)	硬度 HBW
950 ~ 1050℃ 油淬, 275 ~ 350℃ 回火空冷	≥1100	≥10	≥50	≤285 ^①
950 ~ 1050℃ 油淬, 280 ~ 350℃ 回火空冷	1100 ~ 1730	10 ~ 22	50 ~ 25	187 ~ 286 ^②

注：硬度为退火或高温回火后的数值。

2) 回火温度对力学性能的影响（表 6-405）。

表 6-405 14Cr17Ni2 钢回火温度对力学性能的影响

回火温度/℃	硬度 HRC	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	Z (%)	A (%)	a_K / (J/cm ²)
480	33	1400	1200	65	20	81
520	33	1320	1070	65	19.5	75
560	32.5	1070	890	62	18	72
600	32	990	800	61	18	88
640	30.5	970	750	60	19	95
680	30	960	740	60	20	93
720	29.5	960	750	60.5	19.5	92
760	29	990	780	61	18	90

注：1030℃ 油淬。

3) 14Cr17Ni2 钢的高温力学性能（表 6-406）。

表 6-406 14Cr17Ni2 钢的高温力学性能

试验温度/℃	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A (%)	Z (%)
20	960	770	17	59
300	840	690	14	53
400	870	700	13	37
500	650	550	18	66
600	360	360	29	88

注：1030℃ 油淬，680℃ 回火。

4) 钢的蠕变性能（表 6-407）。

表 6-407 14Cr17Ni2 钢蠕变性能

试验温度/℃	482	593	649
σ_{-1} (1000h) /MPa	140	35	25

5) 钢的持久强度（表 6-408）。

表 6-408 14Cr17Ni2 钢持久强度

试验温度/℃	482	593	649
R_m (1000h)	240	75	40
R_m (10000h)	160	50	25

6) 钢的耐蚀性 (表 6-409)。

表 6-409 14Cr17Ni2 钢耐蚀性

介质条件			腐蚀速度 (mm/a)	介质条件			腐蚀速度 (mm/a)
介质	浓度 (质量分数, %)	温度/℃		介质	浓度 (质量分数, %)	温度/℃	
硝酸	10	50	<0.1	氢氧化钠	20	沸腾	<0.1
	10	85	<0.1		30	20	<0.1
	30	60	<0.1		30	100	<1.0
	30	沸腾	<1.0		40	90	<1.0
	50	50	<0.1		50	100	<1.0
	50	80	0.1~1.0		60	90	<1.0
	50	沸腾	<3.0	磷酸	5	20	<0.1
	60	60	<0.1		5	85	<0.1
硫酸	1	20	3.0~10.0		10	20	<3.0
	5	20	>10.0		25	20	3.0~10.0
	10	20	>10.0	盐酸	1	20	<3.0
醋酸	10	75	<3.0		2	20	3.0~10.0
	10	90	3.0~10.0		5	20	>10.0
	15	20	<1.0	氢氧化钾	25	沸腾	<0.1
	15	40	<3.0		50	20	<0.1
	25	50	<1.0		50	沸腾	<1.0
	25	90	<3.0		68	120	<1.0
	25	沸腾	3.0~10.0		溶体	300	>10.0
氢氧化钠	10	90	<1.0	硫酸铝	10	50	<0.1
	20	50	<1.0		10	沸腾	1.0~3.0

(6) 材料应用

14Cr17Ni2 钢具有较高的强度和硬度, 适宜制造硝酸、有机酸等腐蚀介质作用下的透明、不透明塑料制品成型模具。但该钢焊接性差, 易产生裂纹, 制造模具时不宜进行焊接。

7. SM3Cr17Mo 钢

(1) 化学成分

SM3Cr17Mo 钢的化学成分 (YB/T 094—1997) 见表 6-410。

表 6-410 SM3Cr17Mo 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P
0.28~0.35	≤0.80	≤1.00	16.00~18.00	0.75~1.25	≤0.030	≤0.030

(2) 热加工

锻造工艺规范见表 6-411。

表 6-411 SM3Cr17Mo 钢锻造工艺规范

加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
1130 ~ 1180	1100 ~ 1150	> 850	炉冷

(3) 热处理

1) 预备热处理工艺规范（表 6-412）。

表 6-412 SM3Cr17Mo 钢预备热处理工艺规范

预备热处理方案	加热温度/℃	保温时间/h	冷却方式
锻后退火	850 ~ 870	4 ~ 6	炉冷至 550℃ 以下出炉空冷
再结晶退火	730 ~ 750	—	空冷

2) 淬火及回火

① 推荐的淬火及回火工艺规范（表 6-413）。

表 6-413 SM3Cr17Mo 钢推荐的淬火及回火工艺规范

淬火规范			回火规范	
淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC	回火温度/℃	硬度 HRC
1000 ~ 1050	油冷或空冷	48 ~ 50	160 ~ 180	47 ~ 48HRC

② 不同淬火、回火温度的硬度（表 6-414）。

表 6-414 SM3Cr17Mo 钢不同淬火、回火温度的硬度（HRC）

回火温度/℃ 淬火温度/℃	100	200	300	400	450	500	520	550	600
1000	44.5	44	43.5	44	44	44	39	35	30.5
1030	50.5	47	47.5	47.5	48	47	44	38	34
1050	54	52	48.5	50	50	50	48	39	35
1100	58	54	52	52.5	53	53.5	52	43	35.5

(4) 力学性能

SM3Cr17Mo 钢属于马氏体型不锈钢，经淬火和低温回火后，有较好的强度、硬度和耐磨性，有优良耐蚀性，是预硬型和淬硬型通用耐蚀性塑料模具钢。

该钢具有较好的强度和硬度且耐蚀性能优良。

(5) 材料应用

SM3Cr17Mo 钢属预硬型和淬硬型通用耐腐蚀性塑料模具钢。该钢耐蚀性能好，强度高、硬度大，切削加工性能优良，适宜制造要求具有耐腐蚀性和较高强度、高耐磨性要求的塑料模具。

8. Cr14Mo4V 钢

(1) 化学成分

Cr14Mo4V 钢的化学成分见表 6-415。

表 6-415 Cr14Mo4V 钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	S	P
1.00 ~ 1.15	≤0.60	≤0.60	13.40 ~ 15.00	3.75 ~ 4.25	0.10 ~ 0.20	≤0.030	≤0.030

(2) 物理性能

1) 临界点温度 (表 6-416)。

表 6-416 Cr14Mo4V 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	$A_{c_{em}}$	A_{r1}	A_{r3}
温度 (近似值) /℃	856	915	722	777

2) 线膨胀系数 (表 6-417)。

表 6-417 Cr14Mo4V 钢线膨胀系数

温度/℃	20 ~ 200	20 ~ 250	20 ~ 300	20 ~ 350	20 ~ 400	20 ~ 450	20 ~ 500	20 ~ 550	20 ~ 600	20 ~ 650	20 ~ 700
线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	10.9	11.1	11.3	11.6	11.65	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.3

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-418。

表 6-418 Cr14Mo4V 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢锭	1140 ~ 1160	1130 ~ 1150	≥950	坑冷
钢坯	1120 ~ 1140	1110 ~ 1130	≥950	坑冷

(4) 热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 6-419)。

表 6-419 Cr14Mo4V 钢锻后退火工艺

加热温度/℃	加热保温时间/h	冷却方式	硬度 HBW
880 ~ 1000	4 ~ 6	炉冷至 600℃, 保温 2 ~ 5h, 出炉空冷	197 ~ 241

2) 淬火。

① 推荐的淬火工艺规范 (表 6-420)。

表 6-420 Cr14Mo4V 钢推荐的淬火工艺规范

淬火温度/℃	冷却方式	硬度 HRC
1100 ~ 1120	油冷	≥58

② 淬火温度与硬度的关系（表 6-421）。

表 6-421 Cr14Mo4V 钢淬火温度与硬度的关系

淬火温度/℃	1050	1075	1090	1100	1125	1138	1150	1175	1200	1240
硬度 HRC	56	57	57.5	58	60.5	61	60.5	58	54	49

3) 回火。

① 推荐的回火工艺规范（表 6-422）。

表 6-422 Cr14Mo4V 钢推荐的回火工艺规范

回火温度/℃	保温时间/h	回火次数/次	硬度 HRC
500 ~ 525	2	4	61 ~ 63

② 高温回火温度与硬度的关系（表 6-423）。

表 6-423 Cr14Mo4V 钢不同淬火、回火温度的硬度（HRC）

回火温度/℃ 淬火温度/℃	淬火后	450	475	500	520	530	540	560
1050	55	54	54.5	53.5	51	48	45.5	37.5
1080	57	58	57.5	57	52.5	50.5	48	48
1100	59	58	59	58	56	53	52	47
1120	61	59	60	60	56.5	54	53	47.5
1150	58	58	59	58	56	53.5	52	47
1200	48	48	49	51.5	52.5	56	60	53

(5) 力学性能

Cr14Mo4V 属于高碳高铬马氏体型不锈钢经热处理后具有高硬度、高耐磨性和红硬性以及良好的耐蚀性。室温力学性能见表 6-424。

表 6-424 Cr14Mo4V 钢室温力学性能

热处理制度	R_m /MPa	A	Z	硬度 HBW
		(%)		
1050 ~ 1100℃ 淬火 890℃ 退火	790	14. 2	19. 1	240

(6) 材料应用

Cr14Mo4V 高碳高铬马氏体型不锈钢具有高硬度、高耐磨性、热硬性和良好的耐蚀性，适宜制造腐蚀性介质情况下承受高负荷、高耐磨性的塑料模具。

6.2.7 淬硬型塑料模具钢

1) 淬硬型塑料模具钢作为塑料模具专用钢且已纳入行业标准的有 SM4Cr5MoSiV、

SM4Cr5MoSiV1、SMCr12Mo1V1 钢三种。这一组钢本来就是热作模具钢 4Cr5MoSiV 和 4Cr5MoSiV1 钢以及冷作模具钢 Cr12Mo1V1 钢。为了适应塑料模具对抛光性能、蚀刻性能等的特殊要求,通过提高冶金质量,经过了 ESR、VAR 等精炼加工,使杂质含量大大降低,韧性和等向性提高。

2) 常用的淬硬型塑料模具钢有碳素工具钢(如 T7A、T8A)、低合金冷作模具钢(如 9SiCr、9Mn2V、CrWMn、GCr15、7CrSiMnMoV)、Cr12 型钢(如 Cr12MoV 钢)、高速工具钢(如 W6Mo5Cr4V2)、基体钢和某些热作模具钢等。这些钢的最终热处理一般是淬火和低温回火(少数采用中温回火或高温回火),热处理后的硬度通常在 45 ~ 50HRC 以上。

3) 上述专用淬硬型塑料模具钢或代用淬硬型塑料模具钢,其实是冷作与热作模具钢,其化学成分除专用淬硬型塑料模具钢根据用户需要可作微量调整外,基本相同。这类钢的各项性能参数和工艺参数可查阅相关章节。

6.2.8 非调质塑料模具钢

1) 非调质塑料模具钢是在中碳钢化学成分的基础上添加微量合金元素(V、Ti、Nb、N 等),通过控温轧制(锻制)、控温冷却,在铁素体和珠光体中弥散析出碳(氮)化物作为强化相,使之在轧制(锻制)之后不经调质处理即可获得调质后良好的综合力学性能。

2) 随着塑料工业的迅速发展,塑料模具也正在向大截面、复杂型腔、高精度、高表面质量方向发展,对塑料模具钢提出了越来越高的技术要求。针对塑料件尺寸逐渐增大,塑料模具制造能力不断提升,开发模块厚度大于 300mm、硬度为 36 ~ 42HRC 的大截面高硬度的非调质预硬型塑料模具钢,可适应市场的需求。

3) 非调质塑料模具钢由于在模具制造过程中不需要热处理(淬火、回火),避免了热处理可能产生的变形开裂现象,提高了产品质量和成品率,减少了热处理造成的污染,降低了制造成本,改善了劳动条件,具有良好的社会经济效应。

4) 非调质塑料模具钢的切削加工性能优于 45 钢调质,钢中形成 S 系、S-RE 系和 S-Ca-RE 系钢的易切削相,这些易切型夹杂物在切削中起应力集中源、包裹和润滑作用。该类钢还具有良好的磨削、抛光性能。

5) 目前,我国研制成功的非调质塑料模具钢有上海宝钢的 B20、B30 钢,并树立了自己的品牌,有了自己企业的牌号和注册商标,商标为草书“红”字。此外,还有清华大学研制的 Y82 钢和本钢的空冷 12 钢等。

1. B20 系列钢

B20 系列钢包括 B20、B20H、B25,属于铁素体+珠光体类型的非调质钢。为上海宝钢研制生产的微合金非调质塑料模具钢,以预硬化型供应市场。其切削加工性能、抛光性能、焊接性、耐蚀性均比非合金塑料模具钢 SM45 及 S45C、S50C(日本牌号)钢好。B20H 是在 B20 基础上调整成分,使抛光性能、耐蚀性、渗氮性能比 B20 更好。该类钢均含微量合金元素 V,具备调质性能,钢不经热处理(淬火+低温回火)可直接

加工模具零件。

(1) 化学成分

B20 系列钢的化学成分见表 6-425。

表 6-425 B20 系列钢的化学成分（质量分数）（%）

钢号	C	Mn	Si	Cr	V	交货状态硬度 HRC
B20	0.30 ~ 0.40	≥1.20	0.20 ~ 0.60	≥0.30	≥0.05	20 ~ 23
B20H	0.30 ~ 0.40	≥1.20	0.20 ~ 0.60	≥1.00	≥0.05	24 ~ 27
B25	≤0.40	≤2.00	≤0.50	—	≤0.20	210 ~ 240HBW

(2) 切削加工性能

1) B20 钢切削加工性能（表 6-426）。

表 6-426 B20 加工性能

钢种	铣削加工（高速工具钢）	焊接	改锻
B20	粗铣：切削速度 15 ~ 30m/min，切削深度 3 ~ 4mm	J507 焊条，预热 300 ~ 400℃，焊后 300 ~ 400℃ 回火 2 ~ 4h	按照 40Cr 工艺锻后空冷至 300℃ 缓冷。不用热处理仍然保持交货硬度
	精铣：切削速度 35 ~ 50m/min，切削深度 1 ~ 2mm		

2) B20H 钢切削加工性能（表 6-427）。

表 6-427 B20H 加工性能

钢种	铣削加工（高速工具钢）	焊接	改锻
B20H	粗铣：切削速度 15 ~ 30m/min，切削深度 3 ~ 4mm	J507 焊条，预热 300 ~ 400℃，焊后 300 ~ 400℃ 回火 2 ~ 4h	按照 40Cr 工艺锻后空冷至 300℃ 缓冷。不用热处理仍然保持交货硬度
	精铣：切削速度 35 ~ 50m/min，切削深度 1 ~ 2mm		

(3) 材料应用

B20 系列钢主要用于要求不高的塑料模具零件和模架，如家电外壳，电话、手机、寻呼机外壳，车辆门内板，仪表板，果皮箱，塑料椅，塑料桶、盆、盒等。

2. B30 系列钢

B30 系列钢包括 B30、B30H，是贝氏体类型的非调质钢。为上海宝钢研制生产的微合金非调质塑料模具钢，以预硬化型供应市场（B30 硬度为 28 ~ 32HRC，B30H 硬度为 33 ~ 37HRC）。其组织和硬度沿模块截面分布均匀，在重新热加工后，组织和硬度基本不变，型腔加工后不需要热处理，有利于加工成形、抛光、修整一次性完成。缩短生产周期，降低加工成本。该钢有良好的机械加工性能和焊接性，具有极佳的抛光性能，较好的耐蚀性和渗氮性能。B30H 是在 B30 基础上调整成分，组织和硬度比 B30 更加均匀，性能优于 2738（DIN）和 718（一胜百）。

(1) 化学成分

B30 系列钢的化学成分见表 6-428。

表 6-428 B30 系列钢的化学成分 (质量分数) (%)

钢号	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu
B30	0.20 ~ 0.30	0.20	≥1.50	≥0.50	≥0.20	≥0.05	≥0.05	≥0.10
B30H	0.10 ~ 0.20	0.60	—	—		—	≥1.00	≥0.50

(2) 热加工

锻造工艺规范见表 6-429。

表 6-429 B30 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢坯	1250	1200	≥850	300℃后坑冷

(3) 热处理

1) 锻后回火工艺规范 (表 6-430)。

表 6-430 B30 钢锻后回火工艺规范

工艺名称	回火温度/℃	回火保温时间/h	冷却方式
锻后回火	500 ~ 550	4 ~ 6	空冷

2) 渗氮工艺规范 (表 6-431)。

表 6-431 B30 钢渗氮工艺规范

工艺名称	渗氮温度/℃	保温时间/h	表面硬度 HV
渗氮	575	2	650

(4) 切削加工性能

1) B30 钢切削加工性能 (表 6-432)。

表 6-432 B30 钢切削加工性能

钢种	铣削加工		焊接	渗氮	改锻
	高速工具钢	硬质合金			
B30	粗铣: 切削速度 12 ~ 18m/min, 切削 深度 3 ~ 4mm	粗铣: 切削速度 70 ~ 90m/min, 切削 深度 3 ~ 4mm	J107 焊条, 预 热 300 ~ 400℃, 焊后 300 ~ 400℃ 回火 2 ~ 4h	575℃ 氮碳共渗 2h, 表面硬度在 650HV 以上	按照 P20 工 艺锻后空冷至 300℃ 缓冷。 不用热处理仍 然保持交货 硬度
	精铣: 切削速度 20 ~ 35m/min, 切削 深度 1 ~ 2mm	精铣: 切削速度 90 ~ 100m/min, 切削 深度 1 ~ 2mm			

2) B30H 钢切削加工性能 (表 6-433)。

表 6-433 B30H 钢切削加工性能

钢种	铣削加工（硬质合金）	焊接	渗氮	改锻
B30H	粗铣：切削速度 60 ~ 80m/min，切削深度 3 ~ 4mm	J107 焊条，预热 300 ~ 400℃，焊后 300 ~ 400℃回火 2 ~ 4h	575℃氮碳共渗 2h，表面硬度在 650HV 以上	按照 P20 工艺锻后空冷至 300℃缓冷。不用热处理仍然保持交货硬度
	精铣：切削速度 90 ~ 100m/min，切削深度 1 ~ 2mm			

(5) B30H 与 2738（DIN）钢性能对比（表 6-434）。

表 6-434 B30H 与 2738（DIN）钢性能对比

钢种	对 比 项 目								
	金相组织	硬度 HRC	沿截面硬度分布	切削加工性能	抛光性能	电火花加工后变质层	焊接性	耐回火性	切削加工刀具磨损
B30H	贝氏体	33 ~ 37	≤3	良好	良好	少	良好	稳定	较小
2738	索氏体	30 ~ 35	≤3	一般	良好	多	不好	不太好	较大

(6) 材料应用

B30 系列钢主要用于要求不高的塑料模具零件和模架，如家电外壳，电话、手机、寻呼机外壳，车辆门内板，仪表板及各种日用塑料制品模具。

3. F45V 和 YF45V 钢

F45V 系列钢包括 F45V、YF45V，属于微合金化非调质预硬型塑料模具钢。这两种钢是在 45 优质碳素结构钢成分的基础上添加质量分数为 0.06% ~ 0.13% 的 V 元素，主要是形成 V 元素的碳化物 VC，通过控制轧制或锻造，使碳化物 VC 从晶界析出，钉扎于晶界，使再结晶组织得到细化，起到细化晶粒、改善钢的强韧性的作用。YF45V 钢中加入了 S 元素，使钢变得易于切削加工，属于易切削型钢。该类钢具有良好的综合力学性能，满足塑料模具使用要求，适宜制造塑料模具、模架等。

(1) 化学成分

F45V 钢的化学成分见表 6-435。

表 6-435 F45V 系列钢的化学成分（质量分数）（%）

钢号	C	Si	Mn	V	P	S
F45V	0.42 ~ 0.49	0.20 ~ 0.40	0.60 ~ 1.00	0.06 ~ 0.13	≤0.035	≤0.035
YF45V	0.42 ~ 0.49	0.20 ~ 0.40	0.60 ~ 1.00	0.06 ~ 0.13	≤0.035	0.035 ~ 0.075

(2) 物理性能

临界点温度见表 6-436。

表 6-436 F45V 系列钢临界点温度（近似值）（单位:℃）

钢号	Ac_1	Ac_{cm}	Ar_1	Ar_3	M_s
F45V	749	800	680	747	
YF45V	740	797			310

(3) 热加工

1) F45V 钢锻造加热温度和终锻温度对钢力学性能的影响（表 6-437）。

表 6-437 F45V 钢锻造加热温度和终锻温度对钢力学性能的影响

加热温度/℃	终锻温度/℃	冷却方法	力学性能				
			R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	a_K /(J/cm ²)
1200	900	散冷	565	788.9	45.7	17.2	51.0
	1000		508.6	800.7	46.1	18.0	49.5
1090	960	散冷	520.4	752.0	47.6	17.8	59.8
	990		514.5	741.9	47.3	19.1	58.3
标准			≥490	≥686	≥45	≥15	≥49

2) YF45V 钢不同锻造温度和锻后冷却速度下的显微组织（表 6-438）。

表 6-438 YF45V 钢不同锻造温度和锻后冷却速度下的显微组织

加热温度 /℃	冷却速度 / (℃/min)	显微组织					
		奥氏体 晶粒度/级	珠光体量 (体积分数,%)	铁素体晶粒 尺寸/μm	珠光体片 间距/nm	渗碳体片 厚度/nm	硬度 HRC
900	50	10	64.21	6.03	192	19.3	16
1000	50	8	85.23	8.36	254	19.2	22
1050	50	6	92.83	4.40	220	15.3	27
1100	50	6	92.08	7.86	394	27.6	26
1200	50	5	94.09	8.36	298	20.4	28
1200	6	5	78.72	19.83	210	17.2	19
1200	12	5	80.56	14.28	197	15.9	23
1200	24	5	89.79	10.50	192	13.8	28
1200	48	5	92.66	6.33	182	12.7	31
1200	120	5	96.55	4.92	185	12.4	25

(4) 力学性能

F45V、YF45V 属于微合金化非调质预硬型塑料模具钢。钢中添加微量的 V 元素，使形成的碳化物 VC 通过控制轧制或锻造从晶界析出，钉扎于晶界，使再结晶组织得到细化，起到细化晶粒、改善钢的强韧性的作用，具有良好的综合力学性能。

F45V 热轧钢的低温冲击韧度见表 6-439。

表 6-439 F45V 热轧钢的低温冲击韧度

试验温度/℃	室温	0	- 20	- 30	- 40	- 60
$a_K / (J/cm^2)$	43	40	38	30	19	8

(5) 材料应用

F45V 和 YF45V 微合金化非调质预硬型塑料模具钢直接利用正火态组织进行模具加工，之后不再经过热处理，利用渗氮处理可以进一步改善模具表面的化学性能。该类钢适宜制造承受中、小载荷的塑料模具和受力较大的机械零件，常用于制造塑料模具、模架等。

4. YF45MnV 钢

YF45MnV 钢属于微合金化非调质预硬型易切削塑料模具钢。钢中加入 V 元素，主要是形成碳化物 VC，通过控制轧制或锻造，使碳化物 VC 从晶界析出，钉扎于晶界，起到细化晶粒、改善钢的强韧性的作用；Mn 元素，固溶于基体组织中，起到固溶强化作用；S 元素主要是形成硫化物（FeS、MnS），利于断屑，起到改善钢的切削加工性能的作用。该钢在热轧状态下，具有铁素体 + 珠光体的显微组织，具有良好的综合力学性能和切削加工性能。钢直接利用正火态组织进行模具加工，之后不再经过热处理，利用渗氮处理可以进一步改善模具表面的性能。主要用于制作仪器仪表、手表零件、汽车、机床和其他各种机器上使用的，对尺寸精度和表面粗糙度要求严格，而对力学性能要求相对较低的标准件及机床丝杠、塑料成型模具等。

(1) 化学成分

YF45MnV 钢的化学成分见表 6-440。

表 6-440 YF45MnV 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	V	P	S
0. 42 ~ 0. 49	0. 30 ~ 0. 60	1. 00 ~ 1. 50	0. 06 ~ 0. 13	≤0. 035	0. 035 ~ 0. 075

(2) 物理性能

临界点温度见表 6-441。

表 6-441 YF45MnV 钢临界点温度

临界点	Ac_1	Ac_3	M_s
温度（近似值）/℃	740	790	260

(3) 热加工

锻造工艺规范见表 6-442。

表 6-442 YF45MnV 钢锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却
钢坯	850℃ 前应缓慢加热，冷装炉温度 ≤ 800℃	1180 ~ 1220	≥ 850	砂冷或及时退火

1) YF45MnV 钢热轧后不同冷却条件下的力学性能 (表 6-443)。

表 6-443 YF45MnV 钢热轧后不同冷却条件下的力学性能

规格/mm	冷却方式	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)
φ38	缓冷	814	540	18.2	37.7
		795	518	19.4	39.6
	空冷	878	574	16.0	36.7
		873	587	16.8	38.4
	风冷	893	614	17.4	42.5
		908	631	17.6	40.8

2) YF45MnV 钢热轧后不同冷却条件下的显微组织 (表 6-444)。

表 6-444 YF45MnV 钢热轧后不同冷却条件下的组织定量分析

规格/mm	冷却方式	铁素体		奥氏体	
		面积百分比 (%)	平均厚度/ μm	平均直径/ μm	晶粒度/级
φ38	缓冷	28.56	7.26	68.28	5.0
	空冷	23.27	6.92	68.57	5.0
	风冷	24.76	5.37	44.14	6.0

3) 低温加热脱氢处理工艺与力学性能的关系 (表 6-445)。

表 6-445 YF45MnV 钢低温加热脱氢处理工艺与力学性能的关系

处理工艺	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	a_K /(J/cm ²)
未经自然放置和 加热处理	550	810	16.2	39.9	50
	555	820	19.0	41.2	60
长时间自然放置	545	800	20.8	48.7	46
	555	800	20.6	48.8	52
250℃ × 1h	545	810	19.2	45.7	53
	555	805	20.2	45.6	55
250℃ × 2h	555	810	21.0	48.5	59
	550	805	20.8	48.6	52
250℃ × 3h	555	810	20.8	49.2	47
	560	815	21.4	49.2	55
250℃ × 4h	550	805	21.2	49.1	56
	550	805	20.8	49.1	57

(4) 力学性能

YF45MnV 钢属于微合金化非调质预硬型易切削塑料模具钢。该钢在热轧状态下，

具有铁素体 + 珠光体并以珠光体为主的细晶显微组织，强韧性好，具有良好的综合力学性能。

(5) 材料应用

YF45MnV 微合金化非调质预硬型易切削塑料模具钢具有良好的综合力学性能，适宜制造承受中、小载荷的塑料模具和受力较大的机械零件，常用于制造塑料模具、模架及标准件等。

5. GF40MnSiVS 钢

GF40MnSiVS 钢为微合金化非调质预硬型易切削塑料模具钢。钢中 Si、Mn 元素主要是固溶强化基体组织，改善钢的强度；V、Ti 元素主要是形成强碳化物和强氮化物，作为钢中的强化相，改善钢的强度、硬度与耐磨性；S 元素主要是形成硫化物，利于断屑，改善钢的切削加工性能，提高表面质量；N 元素主要是形成氮化物，兼有固溶于基体组织中强化基体组织的作用。需要控制轧制，在轧制过程中有 V、Ti 元素的碳化物和氮化物形成，并从奥氏体中析出，钉扎于晶界，可有效地改善再结晶组织的晶粒大小，使钢获得良好的综合力学性能，相当于钢经过了调质处理。多以轧后正火状态供货，生产厂家可将其直接用于模具加工生产，不需要热处理，有时为了提高表面强度、硬度与耐磨性或耐蚀性，可进行渗氮处理或物理气相沉积工艺。

(1) 化学成分 GF40MnSiVS 钢的化学成分见表 6-446。

表 6-446 GF40MnSiVS 钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	V	Ti	N	P	S
0.37 ~ 0.42	0.40 ~ 0.70	1.00 ~ 1.50	0.08 ~ 0.15	0.01 ~ 0.03	0.01 ~ 0.02	≤0.035	0.04 ~ 0.07

(2) 物理性能

临界点温度见表 6-447。

表 6-447 GF40MnSiVS 钢临界点温度

临界点	A_{c1}	A_{c3}	M_s	M_f
温度（近似值）/℃	735	800	345	150

(3) 热加工

1) 不同热加工工艺状态下钢的显微组织（表 6-448）。

表 6-448 GF40MnSiVS 钢不同热加工工艺状态下钢的显微组织

规格 /mm	状态	显微组织				
		铁素体 （体积分数，%）	铁素体 晶粒尺寸/ μm	珠光体片 间距/nm	渗碳体片 厚度/nm	硬度 HRC
$\phi 60$	锻后空冷	8.23	4.50	323	12.0	22
$\phi 60$	锻后风冷	8.57	3.39	325	17.4	27
$\phi 60$	锻后灰冷	9.93	3.97	330	12.9	26
$\phi 60$	锻后正火	16.00	3.85	298	14.2	—

2) GF40MnSiVS 钢与 40Cr 钢（花键轴）表面粗糙度比较（表 6-449）。

表 6-449 GF40MnSiVS 钢与 40Cr 钢（花键轴）表面粗糙度比较

背吃刀量 a_p/mm	进刀量 $f/(\text{mm/r})$	表面粗糙度/ μm			
		非调质 GF40MnSiVS 钢		调质 40Cr 钢	
		R_a	R_z	R_a	R_z
1.0	0.10	1.85	11.00	2.90	21.05
1.0	0.20	4.15	26.45	5.45	34.05
1.0	0.30	5.50	39.45	6.00	39.00
1.0	0.36	6.15	38.35	7.30	48.55
1.0	0.41	7.25	50.40	8.00	52.05
1.0	0.46	7.65	50.70	7.80	50.75

(4) 力学性能

GF40MnSiVS 钢为微合金化非调质预硬型易切削塑料模具钢。由于钢中合金元素固溶于基体组织中，细化了晶粒，改善了钢的强度、硬度与耐磨性，改善了钢的切削加工性能，使钢获得良好的综合力学性能。

GF40MnSiVS 钢与 40Cr 钢力学性能比较（表 6-450）。

表 6-450 GF40MnSiVS 钢与 40Cr 钢力学性能比较

钢种	力学性能					取样部位
	R_m/MPa	R_{eL}/MPa	$A(\%)$	$Z(\%)$	$a_K/(\text{J}/\text{cm}^2)$	
非调质 GF40MnSiVS 钢	682.1 ~ 905	545 ~ 615	20 ~ 22.5	49.5 ~ 56.0	50 ~ 70	中心
非调质 GF40MnSiVS 钢	897	607	20	49.6	68	1/2 半径处
40Cr 钢	682.1 ~ 696.8	421.4 ~ 509.6	23.2 ~ 27.6	52.1 ~ 56.4	43 ~ 51	中心
40Cr 钢	787.9 ~ 803.6	515.5 ~ 522.3	21.44 ~ 26.8	54.6 ~ 60.4	52 ~ 57	1/2 半径处

注：试验材料规格均为 $\phi 60\text{mm}$ 。

(5) 材料应用

GF40MnSiVS 微合金化非调质预硬型易切削塑料模具钢具有良好的综合力学性能和切削加工性能，适宜制造塑料模具和模架等。

第 7 章 其他模具材料的性能与应用

模具制造材料中主要选用钢材，但在制造中考虑到性能和价格因素常选用其他模具材料如铸铁、铸钢、非铁金属及其合金（包括低熔点合金、锌合金、高温合金、超塑性合金、铜合金、铝合金等）、硬质合金和钢结硬质合金、陶瓷、环氧塑料及聚氨酯橡胶等。

7.1 铸铁材料

铸铁是碳的质量分数大于 2.11% 的铁碳合金，并含有较多的 Si、Mn、S、P 等元素，在凝固过程中经历共晶转变，是用于生产铸件的铁基合金的总称。它具有一定的力学性能和良好的工艺性。工艺简单、适应性强，投资少、成本低；有良好的抗振性、减摩性和切削加工性能。经合金化后，具有耐热、耐蚀和耐磨等特殊性能。常用来制造各种拉深模、压型模、玻璃模、塑料模及模具配件，为模具制造中常用的金属材料之一。使用比较多的铸铁有灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、可锻铸铁及特殊性能铸铁如合金铸铁、耐热铸铁、耐磨铸铁、耐蚀铸铁等。

7.1.1 模具常用铸铁材料

1. 铸铁材料的分类（表 7-1）

表 7-1 铸铁材料的分类

铸铁类型	特 点	应 用
灰铸铁	石墨呈片状，有效承载面积比较小，石墨尖端易产生应力集中，所以灰铸铁的强度、塑性、韧性都低于其他铸铁。具有优良的减振性、低的缺口敏感性和高的耐磨性	制造玻璃模及其他模具中的配套零件，如冲孔模、落料模、弯曲模、塑料模结构中的上下模板、模柄、推料板前后架、底板定位板等辅助模具零件
球墨铸铁	石墨呈球状，对基体割裂作用小，强度可达基体强度的 70% ~ 90%，所以力学性能相对优良，可以与碳素钢相媲美。耐磨性比较好。有很好的热处理效果，可利用多种热处理工艺来改善其性能	制造各种压型模、冲模、玻璃模等
蠕墨铸铁	蠕墨铸铁石墨呈蠕虫状，所以其性能也介于灰铸铁和球墨铸铁之间。对壁厚敏感性比较小，导热性优于球墨铸铁，抗热和抗氧化性均优于其他铸铁	制造玻璃模等
可锻铸铁	可锻铸铁是将白口铸铁通过石墨化或氧化脱碳退火处理得到的一种高强铸铁。其石墨呈团絮状，具有较高强度、塑性和冲击韧度。化学成分是决定白口化、退火周期、铸造性能与力学性能的根本因素。为了保证白口化和力学性能，碳质量分数应较低，为了缩短退火周期，锰含量不宜过高，特别要严格控制严重阻碍渗碳体分解的强碳化物形成元素，如铬等	常用于代替碳素钢制造形状较复杂的模具和玻璃模等

(续)

铸铁类型	特 点	应 用
特殊性能 铸铁	合金铸铁根据加入合金元素的不同而具有耐热、耐蚀、耐磨等不同的特殊性能。性能类似于相应的合金钢，但力学性能低于铸钢，脆性大，容易破裂。生产工艺简单，成本低。模具用合金铸铁的性能要求以耐热为主，也常要求较高的耐蚀性和耐磨性	制造小批量生产的拉深模和受冲击比较小的热作模具，如玻璃模、热压模及塑料模等

2. 模具常用铸铁材料的力学性能（表 7-2）

表 7-2 模具常用铸铁材料的力学性能

牌号或名称	抗拉强度 /MPa	抗弯强度 /MPa	抗压强度 /MPa	冲击韧度 /（J/cm ² ）	硬度 HBW	应用举例
HT200	200	400			170 ~ 241	壁厚小于 60mm 的底板模座类零件
HT250	250	470			170 ~ 241	壁厚大于 60mm 的底板模座类零件
QT500 - 7	500			15	197 ~ 269	中小批量生产的拉深模铸件
RuT300	300				140 ~ 217	适于铸造钢锭模、玻璃模具
KTH350 - 10	350				120 ~ 163	玻璃模具、井盖模具及耐冲击薄壁模具等
镍铬铸铁（一）					179 ~ 255	大批量生产壁厚小于 100mm 的拉深模铸件
镍铬铸铁（二）					179 ~ 255	大批量生产壁厚大于 100mm
镍铬铸铁（三）	≥240	≥440			179 ~ 255	的拉深模铸件
钼铬铸铁（一）	≥280	≥480	≥1000		时效后 179 ~ 255	大批量生产壁厚小于 100mm 的拉深模铸件
钼铬铸铁（二）	≥280	≥480	≥1000			大批量生产壁厚大于 100mm 的拉深模铸件

7.1.2 铸铁模具材料的性能与应用

1. 灰铸铁

灰铸铁石墨呈片状，有效承载面积比较小，石墨尖端易产生应力集中，所以灰铸铁的强度、塑性、韧性都低于其他铸铁。但具有优良的减振性、低的缺口敏感性和高的耐磨性。

（1）化学成分

灰铸铁的化学成分见表 7-3。

表 7-3 灰铸铁的化学成分（质量分数）（%）

类别	牌号	铸件壁厚 /mm	化学成分				
			C	Si	Mn	S	P
铁素体灰铸铁	HT100	—	3.4 ~ 3.9	2.1 ~ 2.6	0.5 ~ 0.8	≤0.15	≤0.30
铁素体 + 珠光体灰铸铁	HT150	<30	3.3 ~ 3.5	2.0 ~ 2.4	0.5 ~ 0.8	≤0.12	≤0.20
珠光体灰铸铁	HT200	30 ~ 50	3.1 ~ 3.4	1.5 ~ 1.8	0.8 ~ 1.0	≤0.12	≤0.15
	HT225	30 ~ 50	3.0 ~ 3.5	1.7 ~ 2.4	0.3 ~ 1.0	≤0.12	≤0.15
	HT250	30 ~ 50	2.9 ~ 3.2	1.3 ~ 1.6	0.9 ~ 1.1	≤0.12	≤0.15
	HT275	30 ~ 50	3.0 ~ 3.4	1.7 ~ 2.4	0.3 ~ 1.0	≤0.12	≤0.15
孕育铸铁	HT300	30 ~ 50	2.9 ~ 3.2	1.2 ~ 1.5	0.9 ~ 1.1	≤0.10	≤0.15
	HT350	30 ~ 50	2.9 ~ 3.2	1.1 ~ 1.4	0.9 ~ 1.1	≤0.10	≤0.15

注：生产中主要是控制碳和硅的质量分数。碳、硅质量分数过低，铸铁易出现白口组织，力学性能和铸造性能都很低；碳、硅质量分数过高时，石墨片过多且粗大，甚至在铁液表面出现石墨的漂浮，降低铸件的性能和质量。因此，灰铸铁中的碳、硅质量分数一般控制在 $w_C = 2\% \sim 4\%$ 、 $w_{Si} = 1.0\% \sim 2.0\%$ 、锰的质量分数一般为 $0.5\% \sim 1.4\%$ 。

(2) 灰铸铁的热处理工艺规范（表 7-4）

表 7-4 灰铸铁的热处理工艺规范

热处理工艺	目 的	工 艺 参 数
去应力退火	铸件凝固冷却时，因壁厚不同等原因造成冷却不均，产生内应力，或工件要求精度高时，应进行去应力退火	加热温度为 $550 \sim 600^{\circ}\text{C}$ ，加热速度为 $60 \sim 120^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，温度不宜过高，以免发生共析渗碳体的球化和石墨化。保温时间则取决于加热温度和铸件壁厚，一般壁厚 $\leq 20\text{mm}$ 时，保温时间为 2h，壁厚每增加 25mm，保温时间增加 1h，随炉以 $20 \sim 50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 冷却速度缓冷至 $150 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 以下出炉空冷
正火	增加铸铁中的珠光体数量，以提高强度、硬度及耐磨性	加热温度为 $880 \sim 920^{\circ}\text{C}$ ，保温 1 ~ 3h 后出炉空冷
消除白口退火	铸件较薄截面处，因冷速较快会产生白口，使切削加工困难，应进行降硬度退火使渗碳体分解，以降低硬度	退火在共析温度以上进行，其工艺是：加热温度 $850 \sim 900^{\circ}\text{C}$ ，保温 2 ~ 5h，随炉冷至 $250 \sim 400^{\circ}\text{C}$ 出炉空冷。退火铸铁的硬度可下降 20 ~ 40HBW
表面淬火	提高铸件表面硬度和耐磨性	常用方法有火焰淬火、高频感应淬火、接触电阻加热淬火和激光淬火等。淬火后铸件表面硬度可达 50 ~ 55HRC

注：灰铸铁的热处理只能改变基体组织，不能改变石墨形状、数量、大小和分布。用于钢的热处理工艺原则上可应用于灰铸铁，其目的是消除应力，改善切削加工性能，提高表面硬度和耐磨性等。

(3) 灰铸铁的力学性能（表 7-5）

表 7-5 常用灰铸铁模具材料的力学性能

类别	牌号	抗拉强度 /MPa	抗剪强度 /MPa	冲击初度 / (J/cm ²)	疲劳极限 /MPa	硬度 HBW
铁素体 + 珠光体灰铸铁	HT150	≥150	150 ~ 250	—	60 ~ 90	150 ~ 200
珠光体灰铸铁	HT200	≥200	200 ~ 300	2 ~ 5	80 ~ 90	170 ~ 241
	HT250	≥250	250 ~ 350	4 ~ 8	100 ~ 140	190 ~ 241
孕育铸铁	HT300	≥300	300 ~ 450	7 ~ 10	120 ~ 160	210 ~ 260
	HT350	≥350	350 ~ 500	9 ~ 11	140 ~ 180	230 ~ 280

注：在一定的铸造工艺条件下，铸件的冷却速度对石墨化程度影响很大。随着壁厚的增加，铸件冷却速度减慢，室温组织不同。

(4) 灰铸铁的应用（表 7-6）

表 7-6 灰铸铁在模具中的应用

牌号	铸件壁厚/mm	R _m /MPa	硬度 HBW	工作条件	用途举例
HT100	2.5 ~ 10	130	110 ~ 160	承受中等负荷以及摩擦面间的单位面积压力不大于 490kPa	适用于中等应力的模具零部件，如轴瓦铁套消失模及正形模等
	10 ~ 20	100	93 ~ 140		
	20 ~ 30	90	87 ~ 131		
	30 ~ 50	80	82 ~ 122		
HT150	2.5 ~ 10	175	130 ~ 205	承受中等负荷以及摩擦面间的单位面积压力不大于 490kPa	适用于中等应力的模具零部件，如轴瓦套消失模及正形模等
	10 ~ 20	145	119 ~ 179		
	20 ~ 30	130	110 ~ 166		
	30 ~ 50	120	105 ~ 157		
HT200	2.5 ~ 10	220	157 ~ 236	承受中等负荷以及摩擦面间的单位面积压力大于 490kPa，要求有一定气密性或耐蚀性的重要铸件	适用于制造玻璃模具和中等应力的模具、中小批量生产的拉深模及其他模具中的配套零部件，如冲孔模、落料模、弯曲模、塑料模模具结构中的上下模板、模柄、推料板前后架、模具底板定位板或模座等辅助模具零件和壁厚小于 60mm 的底板模座类零件
	10 ~ 20	195	148 ~ 222		
	20 ~ 30	170	134 ~ 200		
	30 ~ 50	160	129 ~ 192		
HT250	4 ~ 10	270	175 ~ 262	承受高弯曲力和高拉力以及摩擦面间的单位面积压力不大于 1960kPa，要求耐磨、高气密性的重要铸件	适用于制造玻璃模具和受力较大的模具零部件，如冲孔模、落料模、弯曲模、塑料模模具结构中的上下模板、模柄、推料板前后架、模具底板定位板或模座等辅助模具零件和壁厚大于 60mm 的底板模座类零件及大中型拉深模
	10 ~ 20	240	164 ~ 247		
	20 ~ 30	220	157 ~ 236		
	30 ~ 50	200	150 ~ 225		
HT300	10 ~ 20	290	182 ~ 272		
	20 ~ 30	250	168 ~ 251		
	30 ~ 50	230	161 ~ 241		
HT350	10 ~ 20	240	199 ~ 298		
	20 ~ 30	290	182 ~ 272		
	30 ~ 50	260	171 ~ 257		

2. 球墨铸铁

球墨铸铁是在铁液浇注前，加入一定量的球化剂（稀土镁合金）和少量的孕育剂（硅铁或硅钙合金），凝固后得到石墨呈球状的铸铁。球化剂的加入使铸铁中石墨呈球状，兼有除气和脱硫的作用，使铁液净化，减少了夹渣、疏松等缺陷，从而提高了球墨铸铁的力学性能，为模具制造中应用较多的铸铁材料。

(1) 化学成分

球墨铸铁的化学成分见表 7-7。

表 7-7 球墨铸铁的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mo	S	P	Mg	RE
3.6 ~ 4.0	2.0 ~ 2.8	0.6 ~ 0.8	0.04	0.1	0.03 ~ 0.05	0.03 ~ 0.05

(2) 球墨铸铁的热处理

1) 球墨铸铁的热处理工艺规范（表 7-8）。

表 7-8 球墨铸铁的热处理工艺规范

热处理工艺	工 艺 参 数
去应力退火	球墨铸铁由于内部组织的不同，可采用不同的退火处理。可采用去应力退火、低温石墨化退火、高温石墨化退火。其目的是消除制造内应力，获得铁素体基体，消除成分偏析，提高韧性和塑性。将工件加热至 550 ~ 600℃，保温 2 ~ 5h，随炉冷至 200℃ 以下出炉空冷
正火	球墨铸铁正火分为高温正火（完全奥氏体化）和低温正火（不完全奥氏体化），其目的是为了获得珠光体基体并提高其弥散度，同时也消除白口组织获得高强度和耐磨性。将工件加热至 880 ~ 950℃，保温 1 ~ 3h，空冷（或风冷、喷水雾）。正火后需要回火，以消除正火内应力
调质处理	对于一些受力比较复杂、综合力学性能要求较高的模具零件，可采用调质处理。其目的得到回火索氏体基体，获得较高的综合力学性能。主要用于小尺寸的铸件，尺寸过大时，内部淬不透，不能保证性能要求，也用于大截面模具铸件的预处理。回火索氏体不仅强度高，而且塑性、韧性比正火得到的珠光体基体组织好。将工件加热至 860 ~ 920℃，油冷（形状简单的水冷）
等温淬火	对于一些要求综合力学性能较高且外形比较复杂、一般淬火后易变形和开裂的模具零件，可采用等温淬火。其目的是获得下贝氏体基体组织，使其具有高硬度、高强度和较好的韧性。将工件加热至 860 ~ 920℃，保温一定时间，在 260 ~ 320℃ 硝酸盐中保温 2 ~ 3h，空冷。等温淬火可以不回火
表面淬火	为了提高球墨铸铁模具的表面硬度、耐磨性，还可进行表面淬火（如感应淬火、火焰淬火）
气体氮碳共渗	气体氮碳共渗后球墨铸铁件表面硬度可达 550 ~ 570HV，渗层深为 0.02 ~ 0.05mm。疲劳强度可提高一倍左右，耐磨性则可提高 2 ~ 4 倍以上，铸件寿命大大提高。其具体热处理工艺规范与钢相同

注：球墨铸铁的热处理与钢的热处理相似。但因含碳、硅量高，有石墨存在，导热性较差，因此，热处理时，加热温度要略高，保温时间要略长，加热及冷却速度相对较慢。

2) 球墨铸铁调质与正火后的组织和性能（表 7-9）。

表 7-9 球墨铸铁调质与正火后的组织和性能

热处理工艺	显微组织	力学性能			
		R_m /MPa	A (%)	a_K /(J/cm ²)	HBW
调质：980℃ 退火，900℃ 油淬 +580℃ 回火	回火索氏体 + 石墨	800 ~ 1000	1.7 ~ 2.7	260 ~ 320	240 ~ 340
正火：980℃ 退火，900℃ 正火 +580℃ 去应力退火	细珠光体 +5%（体积分数）铁素体 + 石墨	700	2.5	100	317 ~ 321

(3) 球墨铸铁的性能

1) 球墨铸铁的力学性能（表 7-10）

表 7-10 球墨铸铁的牌号和力学性能

序号	牌号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率 (%)	硬度 HBW
1	QT900 - 2	≥900	≥600	≥2	280 ~ 360
2	QT800 - 2	≥800	≥480	≥2	245 ~ 335
3	QT700 - 2	≥700	≥420	≥2	225 ~ 305
4	QT600 - 3	≥600	≥370	≥3	190 ~ 270
5	QT500 - 7	≥500	≥320	≥7	170 ~ 230
6	QT450 - 10	≥450	≥310	≥10	160 ~ 210
7	QT400 - 15	≥400	≥250	≥15	120 ~ 180
8	QT400 - 18	≥400	≥250	≥18	120 ~ 175
9	QT400 - 18L	≥400	≥250	≥18	120 ~ 175

- 注：1. 由于球墨铸铁中石墨呈球状，对基体割裂作用比普通灰铸铁小得多，所以其力学性能相对优良，强度可以与碳素钢相比，屈强比（ $R_{0.2}/R_m$ ）比钢高，为 0.7 ~ 0.8（钢一般只有 0.3 ~ 0.5）。塑性、韧性虽然大为改善，但仍比钢差。
2. 球墨铸铁有很好的热处理效果，它不仅可以进行一般的去应力退火、石墨化、正火、表面淬火等热处理，而且可以进行调质、等温淬火、化学热处理等，通过热处理在很大范围内改善其性能，从而获得更广泛的应用。

2) 球墨铸铁与 45 钢疲劳强度对比（表 7-11）。

表 7-11 球墨铸铁与 45 钢的疲劳强度对比

材料	对称弯曲疲劳强度/MPa			
	光滑试样	光滑带孔试样	带台肩试样	带孔、带台肩试样
珠光体球墨铸铁	255（100%）	205（80%）	175（68%）	155（61%）
45 钢	305（100%）	225（74%）	195（64%）	155（51%）

注：特别是带孔和台肩的工件其扭转疲劳强度甚至超过 45 钢，在模具制造中具有重要意义。

(4) 球墨铸铁的应用 (表 7-12)

表 7-12 球墨铸铁的应用

类 型	牌 号	应 用
铁素体	QT400 - 18	常用于制造受力复杂、性能要求高的 压形模、冲模、玻璃模、正形模、拉深 模、汽车覆盖件拉深模及壁厚大于 60mm 的模具底板模座类零件等, 是机 械制造业中的常用材料
	QT400 - 15	
	QT450 - 10	
铁素体 + 珠光体	QT500 - 7	
	QT600 - 3	
珠光体	QT700 - 2	
珠光体或索氏体	QT800 - 2	
回火马氏体或托氏体 + 索氏体	QT900 - 2	

注: 由于球墨铸铁力学性能相对优良, 且可通过热处理在很大范围内改善其性能, 从而获得更广泛的应用。

3. 蠕墨铸铁

蠕墨铸铁是近年来使用的一种新型铸铁模具材料。在高碳、低硫、低磷的铁液中加入适量的蠕化剂和少量的孕育剂进行蠕化处理, 凝固后得到石墨形态呈蠕虫状的铸铁, 其性能介于灰铸铁和球墨铸铁之间, 其耐热性极优, 为一种高强铸铁材料。对壁厚敏感性比较小, 导热性优于球墨铸铁, 抗热和抗氧化性均优于其他铸铁。

(1) 化学成分

蠕墨铸铁的化学成分见表 7-13。

表 7-13 蠕墨铸铁的化学成分^① (质量分数) (%)

C	Si	Mn	P	S
3.5 ~ 3.9	2.2 ~ 2.8	0.4 ~ 0.8	<0.1	<0.1

① 蠕墨铸铁要求高碳、高硅、低硫、低磷, 并含有一定的稀土元素与镁。为了提高珠光体的体积分数, 加入微量的 Cu、Ni、Sn 稳定元素, 使珠光体量达到 90% ~ 95% (体积分数)。

(2) 蠕墨铸铁的热处理

1) 预备热处理工艺规范 (表 7-14)。

表 7-14 蠕墨铸铁预备热处理工艺规范

预备热处理方案	工 艺 参 数
石墨化退火工艺	为了获得铁素体基体, 可以按照球墨铸铁石墨化退火处理进行。退火工艺: 920℃ 加热, 保温 3h, 快冷, 冷却速度为 40℃/h, 冷至约 700℃ 后在炉内缓慢冷却, 500℃ 后出炉空冷
正火工艺	对于需要进行表面热处理或整体热处理的工件需要进行正火处理。其工艺: 880 ~ 900℃ 加热, 保温 2 ~ 4h, 风冷, 珠光体体积分数约为 80%; 约 1000℃ 加热, 保温 >2.5h, 风冷, 珠光体体积分数 >90%

2) 淬火与回火工艺规范 (表 7-15)。

表 7-15 蠕墨铸铁淬火与回火工艺规范

工 艺	工 艺 参 数	
	淬 火	回 火
常规淬火	加热温度为 850 ~ 870℃, 硅含量较高时加热温度应适当提高。盐浴炉加热时保温时间可按 1min/mm 计算, 在气体介质炉中按 1.5min/mm 计算。形状复杂和厚度较大的铸件采用油冷, 形状简单的零件可用水冷。淬火后的硬度 ≤55HRC	回火温度应低于 550℃, 以免发生石墨化。保温时间应根据装炉量和铸件厚度确定, 但不应短于 1h
等温淬火	加热温度及保温时间与淬火相同, 等温温度一般为 250 ~ 270℃, 保温时间约 2h	

3) 硬环化处理工艺规范 (表 7-16)。

表 7-16 蠕墨铸铁硬环化处理工艺规范

工 艺	工 艺 参 数
硬环化处理	蠕墨铸铁零件经石墨化退火获得铁素体基体后, 再通过高频感应加热至 950℃, 保温 10 ~ 20s, 淬火, 可在石墨周围形成环状硬质组织, 使零件表面具有良好的耐磨性

(3) 蠕墨铸铁的力学性能 (表 7-17)

表 7-17 蠕墨铸铁牌号及力学性能

序号	牌号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率 (%)	硬度 HBW
1	RuT420	≥420	≥335	≥0.75	200 ~ 280
2	RuT380	≥380	≥300	≥0.75	193 ~ 274
3	RuT340	≥340	≥270	≥1.0	170 ~ 249
4	RuT300	≥300	≥240	≥1.5	140 ~ 217
5	RuT260	≥260	≥195	≥3.0	121 ~ 197

(4) 蠕墨铸铁的应用 (表 7-18)

表 7-18 蠕墨铸铁的应用

牌号	基体组织	应 用
RuT260	铁素体	蠕墨铸铁的力学性能优于灰铸铁，低于球墨铸铁。但其导热性、抗热疲劳性和铸造性能均比球墨铸铁好，易于得到致密的铸件，具有独特的用途。适于铸造钢锭模、玻璃模具、内燃机缸盖、阀体、泵体、汽车发动机排气管等
RuT300	铁素体 + 珠光体	
RuT340	铁素体 + 珠光体	
RuT380	珠光体	
RuT420		

4. 可锻铸铁

可锻铸铁是将白口铸铁通过石墨化或氧化脱碳退火处理得到的一种高强铸铁。其石

墨呈团絮状，具有较高强度、一定的塑性和冲击韧度，常用于代替碳素钢制造形状较复杂的模具。

(1) 化学成分

可锻铸铁的化学成分见表 7-19。

表 7-19 可锻铸铁的化学成分^① (质量分数) (%)

可锻铸铁名称	化 学 成 分					
	C	Si	Mn	S	P	Cr
黑心可锻铸铁	2.3 ~ 3.2	1.0 ~ 1.6	0.32 ~ 0.6	0.05 ~ 0.15	0.04 ~ 0.1	0.02 ~ 0.05
珠光体可锻铸铁	2.8 ~ 3.4	0.3 ~ 1.0	0.3 ~ 0.8	0.05 ~ 0.25	0.04 ~ 0.1	0.03 ~ 0.1

① 化学成分是决定白口化、退火周期、铸造性能与力学性能的根本因素。为了保证白口化和力学性能，碳质量分数应较低，为了缩短退火周期，锰含量不宜过高，特别要严格控制严重阻碍渗碳体分解的强碳化物形成元素，如铬等。

(2) 可锻铸铁生产和热处理 (表 7-20)

表 7-20 可锻铸铁生产和热处理

工艺过程 ^①	工 艺 参 数
珠光体可锻铸铁的退火	将白口铸铁加热到 900 ~ 960℃，进行长时间保温，使共晶渗碳体分解成团絮状石墨，完成第一阶段石墨化过程。随后以较快的速度 (100℃/h) 冷却通过共析转变温度区，得到珠光体基体的可锻铸铁
铁素体可锻铸铁的退火	若第一阶段石墨化完成后，进行保温慢冷，使奥氏体中的碳充分析出，完成第二阶段石墨化，并在冷至 720 ~ 760℃时继续保温，使共析渗碳体充分分解，完成第三阶段石墨化，在 650 ~ 700℃出炉冷却至室温，得到铁素体基体的可锻铸铁

① 可锻铸铁的生产分两个步骤：第一步，先铸造白口铸铁，不允许有石墨出现，否则在随后的退火中，碳在已有的石墨上沉淀，得不到团絮状的石墨；第二步，进行长时间的石墨化退火处理，其组织与石墨化退火方法有关。

(3) 可锻铸铁的力学性能 (表 7-21)

表 7-21 可锻铸铁的力学性能

种类	牌号	力学性能 (不小于)			
		抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率 δ (%)	硬度 HBW
黑心可锻铸铁	KTH275 - 05	≥275	—	5	≤150
	KTH300 - 06	≥300	—	6	
	KTH330 - 08	≥330	—	8	
	KTH350 - 10	≥350	≥200	10	
	KTH370 - 12	≥370	—	12	

(续)

种类	牌号	力学性能 (不小于)			
		抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率 δ (%)	硬度 HBW
珠光体 可锻铸铁	KTZ450 - 06	≥ 450	≥ 270	6	150 ~ 200
	KTZ500 - 05	≥ 500	≥ 300	5	165 ~ 215
	KTZ550 - 04	≥ 550	≥ 340	4	180 ~ 230
	KTZ600 - 03	≥ 600	≥ 390	3	195 ~ 245
	KTZ650 - 02	≥ 650	≥ 430	2	210 ~ 260
	KTZ700 - 02	≥ 700	≥ 530	2	240 ~ 290
	KTZ800 - 01	≥ 800	≥ 600	1	270 ~ 320
白心 可锻铸铁 ($\phi 12\text{mm}$)	KTB350 - 04	≥ 350	—	4	≤ 230
	KTB360 - 12	≥ 360	≥ 190	12	≤ 200
	KTB400 - 05	≥ 400	≥ 220	5	≤ 220
	KTB450 - 07	≥ 450	≥ 260	7	≤ 220
	KTB550 - 04	≥ 550	≥ 340	4	≤ 250

注：可锻铸铁的牌号由“KT”（可铁）和代表类别的字母 H、B、Z 及后面两组数字组成。其中“H”表示“黑心”，“B”表示“白心”，“Z”表示珠光体基体，两组数字分别代表最低抗拉强度 R_m 和最低伸长率 A 。铁素体基体（黑心）可锻铸铁具有较好的塑性、韧性，珠光体基体可锻铸铁具有较高的强度。

(4) 可锻铸铁的应用（表 7-22）

表 7-22 可锻铸铁的应用

种 类	牌 号	应 用
黑心 可锻铸铁	KTH300 - 06	黑心可锻铸铁塑性、韧性好，用于载荷不大、承受较高冲击、振动的模具零件
	KTH330 - 08	
	KTH350 - 10	
	KTH370 - 12	
珠光体 可锻铸铁	KTZ450 - 06	珠光体可锻铸铁因具有高的强度、硬度，用于载荷较高、耐磨损并有一定韧性要求的重要场合。适宜制造薄壁、形状复杂的铸件，在模具中可用于玻璃模具、井盖模具等的制造
	KTZ550 - 04	
	KTZ650 - 02	
	KTZ700 - 02	

注：由于石墨化退火工艺复杂，生产率低，可锻铸铁的应用受到了限制，有时常采用球墨铸铁来代替。

5. 合金铸铁

在铸铁中加入一定量的合金元素，使其获得某种特殊性能的铸铁称为合金铸铁（也称为特殊性能铸铁）。合金铸铁性能相似于相应的合金钢，但力学性能低于铸钢，脆性较大，容易破裂，然而浇注方便，生产工艺简单、成本低。常用来制作小批量生产

的拉深模和受冲击比较小的热作模具，如玻璃模、塑料模、热压模等。

(1) 耐磨铸铁

在铸铁中加入适量的 Cr、Mo、Cu、W、Ni、Mn 等合金元素，形成一定数量的硬化相的合金耐磨铸铁。耐磨铸铁的组织具有均匀的高硬度和耐磨性，并有一定的韧性。

1) 常用耐磨铸铁化学成分（表 7-23）。

表 7-23 常用耐磨铸铁化学成分（质量分数）（%）

牌 号		化 学 成 分							
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	Cr
MT-4		3.00 ~ 3.40	1.50 ~ 2.00	0.60 ~ 0.90	≤0.030	≤0.140	1.00 ~ 1.30	0.40 ~ 0.60	—
Cu-Cr-Mo		3.20 ~ 3.60	1.30 ~ 1.80	0.50 ~ 1.00	≤0.030	≤0.150	0.60 ~ 1.10	0.30 ~ 0.70	0.20 ~ 0.60
中锰抗磨 球墨铸铁	MQTMn6	—	—	5.50 ~6.50	—	—	—	—	—
	MQTMn7	—	—	6.50 ~7.50	—	—	—	—	—
	MQTMn8	—	—	7.50 ~9.00	—	—	—	—	—

2) 耐磨铸铁的类型。

① 减摩铸铁（表 7-24）。

表 7-24 减摩铸铁

类 型	性 能 特 点
珠光体减摩铸铁	细片状珠光体为基体，灰铸铁的组织为软基体上分布有坚硬相。珠光体中铁素体为软基体，在磨损后形成的沟槽可保持连续油膜，有利于润滑；渗碳体为硬组织坚硬相，承受摩擦。同时石墨片起储油和润滑作用，可有效地实现减摩
磷共晶减摩铸铁	在珠光体灰铸铁的基础上，提高 P 的质量分数（0.4% ~ 0.6%），生成磷共晶体（F + Fe ₃ P，P + Fe ₃ P 或 F + P + Fe ₃ P），呈断续网状的形态分布在珠光体基体上，磷共晶硬度高，有利于耐磨
磷铜钛减摩铸铁	生成磷共晶体（F + Fe ₃ P，P + Fe ₃ P 或 F + P + Fe ₃ P），呈断续网状的形态分布在珠光体基体上，铜能促进第一阶段石墨化并能细化珠光体，钛能促进石墨化，并可形成高硬度的 TiC，可有效地实现减摩

注：含高磷的铬铜铸铁也是一种有价值的减摩铸铁。

② 抗磨铸铁（表 7-25）。

3) 耐磨铸铁的热处理。

① 耐磨铸铁热处理工艺规范（表 7-26）。

表 7-25 抗磨铸铁

类 型	性 能 特 点
冷硬铸铁	在生产中常用激冷的方法获得铸铁。普通白口铸铁就是一种抗磨性高的铸铁，但其脆性大，因此常加入适量的 Cu、Cr、Mo、W、Ni、Mn 等合金元素，以提高其韧性，并具有更高的硬度和耐磨性。对于要求具有耐磨表面的铸件，耐磨表面使用金属型铸造，其余部位采用砂型铸造。金属型与砂型冷却速度不同，且耐磨表面必要时可附加冷却，使铸件在不同冷却条件下获得不同的组织。同时调整铁液的化学成分，利用高碳、低硅，保证白口层的深度，而心部为灰铸铁组织，有一定的强度
中锰球墨铸铁	中锰球墨铸铁是在稀土镁球墨铸铁中加入质量分数为 5% ~ 9.5% 的锰，硅的质量分数控制在 3.3% ~ 5.0% 范围内，经球化和孕育处理，适当控制冷却速度，使铸铁在浇注后得到马氏体和大量残留奥氏体加碳化物与球状石墨的组织，具有较高的冲击韧度、强度和高耐磨性
高铬抗磨铸铁	在珠光体灰铸铁的基础上，加入 Cr、Mo、W、Cu 等合金元素，改善组织，提高基体强度和韧性，从而使铸铁的耐磨性得到提高

表 7-26 耐磨铸铁热处理工艺规范

工 艺		工 艺 参 数
常规热处理工艺		加热温度为 950 ~ 1000℃，保温时间为 1 ~ 3h，空冷淬火。回火温度为 200 ~ 260℃，保温 3 ~ 4h，空冷。回火后硬度为 56 ~ 58HRC，抗拉强度为 352.8MPa，冲击韧度为 5.4J/cm ²
高温回火工艺		奥氏体高铬铸铁随着回火温度的提高，显微组织发生了由奥氏体向 $\alpha + M_{23}C_6$ 型混合组织的转变。在 525℃ 回火处理可获得 $\alpha + M_{23}C_6$ 型混合组织，硬度为 560HV，冲击韧度为 7.39J/cm ²
高铬铸铁固溶处理	工艺 I	加热温度为 1050℃，保温时间为 8h，缓慢冷却（空冷），硬度为 62 ~ 63HRC。该工艺适合于在室温下工作的高铬铸件
	工艺 II	加热温度为 1050℃，保温时间为 8h，快速冷却（风冷），然后回火，650℃ × 2h 回火 5 次，组织稳定，硬度为 55 ~ 58HRC。该工艺适于在较高温度连续工作的模具

注：高铬铸铁的耐磨性主要依赖于该材料易形成 Cr_7C_3 型为主的硬化相，同时具有支撑碳化物相的各种基体，如马氏体、珠光体、索氏体、贝氏体和奥氏体等，通过适当的热处理来改善碳化物的分布和形态并改善基体组织，从而提高硬度、耐磨性和韧性。

② 稀土高铬铸铁热处理工艺（表 7-27）。

表 7-27 稀土高铬铸铁热处理工艺

热处理工艺	工艺规范	冲击韧度/（J/cm ² ）	硬度 HRC
常规工艺	淬火加热温度 920 ~ 960℃、保温 2 ~ 4h，油冷； 回火温度 200 ~ 300℃，保温 2h，空冷	7.4	60.94
新热处理工艺	淬火温度 920 ~ 960℃，保温 2 ~ 4h，空冷 一次回火温度 400 ~ 500℃，保温 2h，空冷 二次回火温度 200 ~ 300℃，保温 1h，空冷	7.9	62.06

注：化学成分（质量分数）为 C2.52%，Cr15.21%，Mo1.89%，Cu0.87%，Si1.05%，Mn0.45%，P ≤ 0.005%，S ≤ 0.05%，RE0.143%。用稀土元素对高铬铸铁进行变质处理，并进行合适的热处理，可使这种铸铁冲击韧度和硬度提高。

4) 耐磨铸铁的性能。

① 合金白口耐磨铸铁的化学成分 (GB/T 8263—2010) 及力学性能 (表 7-28)。

表 7-28 合金白口耐磨铸铁的化学成分与性能

序号	类别	化学成分 (质量分数, %)						抗拉强度 /MPa	硬度 HRC	可淬硬的 最大截面/mm
		Cr	Si	Cr	Ni	Mo	Cu			
1	镍铬 (低碳)	2.7 ~ 3.2	0.3 ~ 0.8	2.0 ~ 3.0	3.0 ~ 5.0	≤1.0	—	320 ~ 390	45 ~ 62	200
2	镍铬 (高碳)	3.2 ~ 3.6	0.3 ~ 0.8	2.0 ~ 3.0	3.0 ~ 5.0	≤1.0	—	280 ~ 350	45 ~ 62	200
3	高镍铬	2.5 ~ 3.6	1.5 ~ 2.2	8.0 ~ 10.0	4.5 ~ 6.5	≤1.0	—	500 ~ 600	45 ~ 62	300
4	高铬钼	2.0 ~ 2.8	≤1.0	13.0 ~ 18.0	≤1.0	≤3.0	≤1.2	450 ~ 1000	39 ~ 62	75
5	高铬钼	2.8 ~ 3.5	≤1.0	13.0 ~ 18.0	≤1.0	0.5 ~ 3.0	≤1.2	450 ~ 1000	39 ~ 62	75
6	高铬钼	2.0 ~ 3.0	≤1.0	18.0 ~ 22.0	≤1.5	1.5 ~ 2.5	0.8 ~ 1.2	450 ~ 1000	39 ~ 62	300
7	高铬	2.3 ~ 3.0	≤1.0	23.0 ~ 28.0	≤1.5	≤1.0	≤2.0	560 ~ 960	39 ~ 62	200

② 常用冷硬铸铁的成分及力学性能 (表 7-29)。

表 7-29 常用冷硬铸铁的成分及力学性能

铸铁类型	化学成分 (质量分数, %)						白口层 硬度 HRC	抗拉强度/MPa	抗弯强度/MPa
	Cr	Si	Mn	P	S	其他			
				≤					
普通 冷硬铸铁	3.5 ~ 3.7	1.8 ~ 2.0	0.7 ~ 1.0	0.2	0.12		≥50	200 ~ 250	400 ~ 470
普通 冷硬铸铁	3.5 ~ 3.7	1.7 ~ 2.1	0.5 ~ 0.9	0.15	0.15	B: 0.003 ~ 0.007	48 ~ 50	> 150	> 330
镍铬钼 冷硬铸铁	3.2 ~ 3.4	1.9 ~ 2.1	0.65 ~ 0.85	0.12	0.10	Ni: 0.4 ~ 0.5 Cr: 0.9 ~ 1.1 Mo: 0.4 ~ 0.55	铸态: 53 ~ 56 600℃ 回火: 50 ~ 55	200 ~ 250	400 ~ 470
铬钼稀土 冷硬铸铁	3.5 ~ 3.8	1.7 ~ 2.0	0.6 ~ 0.9	0.2	0.09	Cr: 0.5 ~ 0.8 Mo: 0.5 ~ 0.7 稀土硅铁: 0.5 ~ 0.7	≥53	250	470

(续)

铸铁类型	化学成分 (质量分数, %)						白口层 硬度 HRC	抗拉强度/MPa	抗弯强度/MPa
	Cr	Si	Mn	P	S	其他			
				≤					
硼冷硬 铸铁	3.75	1.7	0.6	0.13	0.07	B: 0.02 ~ 0.04	50 ~ 51	150	330
稀土冷硬 铸铁	3.3 ~ 3.5	2.6 ~ 2.8	1.2 ~ 1.6	0.2	0.12	稀土硅铁: 1.7 ~ 2.0	42	400 ~ 500	700 ~ 900

5) 耐磨铸铁的应用。

耐磨铸铁主要用于犁铧、耙片、机床导轨、气缸套等耐磨、耐热磨损零部件，也用于制造玻璃模具、耐火制品模具和受冲击力较小、要求耐磨性好的冷作模具、热压模具、塑料模具等。

(2) 耐热铸铁

铸铁中加入 Al、Si、Cr 等合金元素，使铸件表面生成一种致密的保护性氧化膜（如 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Cr_2O_3 ）以提高铸铁件的抗氧化能力，改善铸件的耐热性。

1) 耐热铸铁的化学成分（YB/T 036.2—1992）（表 7-30）。

表 7-30 耐热铸铁的化学成分（质量分数） (%)

牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al
			≤				
HTRCr (RTCr)	3.0 ~ 3.8	1.5 ~ 2.5	1.0	0.20	0.12	0.50 ~ 1.00	—
HTRCr2 (RTCr2)	3.0 ~ 3.8	2.0 ~ 3.0	1.0	0.20	0.12	>1.00 ~ 2.00	—
HTRCr16 (RTCr16)	1.6 ~ 2.4	1.5 ~ 2.2	1.0	0.10	0.05	15.00 ~ 18.00	—
HTRSi5 (RTSi5)	2.4 ~ 3.2	4.5 ~ 5.5	0.8	0.20	0.12	0.50 ~ 1.00	—
QTRSi4 (RQTSi4)	2.4 ~ 3.2	3.5 ~ 4.5	0.7	0.10	0.03	—	—
QTRSi4Mo (RQTSi4Mo)	2.7 ~ 3.5	3.5 ~ 4.5	0.5	0.10	0.03	Mo: 03 ~ 07	—
QTRSi5 (RQTSi5)	2.4 ~ 3.2	>4.5 ~ 5.5	0.7	0.10	0.03	—	—
QTRAl4Si4 (RQTAI4Si4)	2.5 ~ 3.0	3.5 ~ 4.5	0.5	0.10	0.02	—	4.0 ~ 5.0
QTRAl5Si5 (RQTAI5Si5)	2.3 ~ 2.8	>4.5 ~ 5.2	0.5	0.10	0.02	—	>5.0 ~ 5.8
QTRAl22 (RQTAI22)	1.6 ~ 2.2	1.0 ~ 2.0	0.7	0.10	0.02	—	20.0 ~ 24.0

2) 耐热铸铁的类别与性能（表 7-31）。

3) 常用耐热铸铁的力学性能（表 7-32）。

4) 耐热铸铁的应用。

常用于制作介质温度低于 550℃ 的加热炉附件，如炉底板、坩埚、换热器、送链构件等，也用于制作小批量生产和受冲击比较小的热作模具，如塑料模具、玻璃模具、热压模等。

表 7-31 耐热铸铁的类别与性能

类别	名称	主要合金元素 (质量分数, %)	抗拉强度 /MPa	硬度 HBW	适用温度/℃
硅系	中硅球墨铸铁	Si: 5.0 ~ 6.0	100	140 ~ 255	850
	中硅球墨铸铁	Si: 3.5 ~ 4.5	450	157 ~ 239	600 ~ 750
	中硅球墨铸铁	Si: 4.5 ~ 5.5	350	197 ~ 282	750 ~ 900
	中硅球墨铸铁	Si: 5.0 ~ 6.0	220	228 ~ 321	900 ~ 950
	中硅球墨铸铁	Si: 6.0 ~ 6.5	200	270 ~ 301	950 ~ 1000
铝系	中铝铸铁	Al: 5.5 ~ 7.0	—	—	700
	高铝铸铁	Al: 20 ~ 24	110 ~ 170	170 ~ 200	900 ~ 950
	高铝球墨铸铁	Al: 20 ~ 24	250 ~ 420	260 ~ 300	1000 ~ 1100
铝硅系	铝硅球墨铸铁	Si: 4.4 ~ 5.4 Al: 4.0 ~ 5.0	220 ~ 275	—	900 ~ 1050
铬系	高铬铸铁	Cr: 30 ~ 33	347 ~ 409	250 ~ 350	1000 ~ 1100

表 7-32 常用耐热铸铁的力学性能

牌号	室温力学性能		高温短时力学性能 R_m /MPa				
	R_m /MPa	硬度 HBW	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃
HTRCr (RTCr)	200	189 ~ 288	225	114	—	—	—
HTRCr2 (RTCr2)	150	207 ~ 288	243	166	—	—	—
HTRCr16 (RTCr16)	340	400 ~ 450	—	—	—	144	88
HTRSi5 (RTSi5)	140	160 ~ 270	—	—	41	27	—
QTRSi4 (RQTSi4)	480	187 ~ 269	—	—	75	35	—
QTRSi4Mo (RQTSi4Mo)	540	197 ~ 280	—	—	101	46	—
QTRSi5 (RQTSi5)	370	228 ~ 302	—	—	67	30	—
QTRAl4Si4 (RQTAI4Si4)	250	285 ~ 341	—	—	—	82	32
QTRAl5Si5 (RQTAI5Si5)	200	302 ~ 363	—	—	—	167	75
QTRAl22 (RQTAI22)	300	241 ~ 364	—	—	—	130	77

(3) 耐蚀铸铁

1) 高硅耐蚀铸铁。

① 高硅耐蚀铸铁的化学成分 (GB/T 8491—2009) (表 7-33)。

表 7-33 高硅耐蚀铸铁的化学成分

牌 号	化学成分 (质量分数, %)					
	C	Si	Mn	Cr	Cu	稀土
HTSSi15R	0.50 ~ 0.85	14.0 ~ 15.5	0.3 ~ 0.8	—	—	0.01 ~ 0.03
HTSSi11Cu2CrR	1.0 ~ 1.2	10.0 ~ 12.0	0.3 ~ 0.6	0.6 ~ 0.8	1.8 ~ 2.2	0.01 ~ 0.03

注: 在高硅耐蚀铸铁中加入质量分数为 6.5% ~ 8.5% 的 Cu, 可改善其在碱性介质中的耐蚀性; 加入质量分数为 2.5% ~ 4.0% 的 Mo, 可改善在沸腾的盐酸中的耐蚀性。为了提高力学性能, 还可以向高硅耐蚀铸铁中加入微量的硼和加入稀土镁进行球化处理。

② 高硅耐蚀铸铁的力学性能（表 7-34）。

表 7-34 高硅耐蚀铸铁的力学性能

牌 号	力学性能			
	抗拉强度/MPa	f/mm	断面收缩率（%）	硬度 HRC
HTSSi15R	≥ 245	≥ 0.9	2.3 ~ 2.8	40 ~ 45
HTSSi11Cu2CrR	≥ 272	≥ 1.2	1.5 ~ 2.0	30 ~ 42

注：高硅耐蚀铸铁在含氧酸（如硝酸、硫酸）中，其耐蚀性不亚于 1Cr18Ni9Ti 不锈钢。

2) 奥氏体耐蚀铸铁。

① 奥氏体耐蚀铸铁的化学成分（表 7-35）。

表 7-35 奥氏体耐蚀铸铁的化学成分

石墨形状	化学成分（质量分数，%）					
	C $\leq$	Si	Mn	Ni	Cr	Cu
片状	3.0	1.0 ~ 2.8	0.5 ~ 1.5	13.5 ~ 17.5	1.0 ~ 2.5	5.5 ~ 7.5
	3.0	1.0 ~ 2.8	0.5 ~ 1.5	18.0 ~ 22.0	1.0 ~ 2.5	≤ 0.5
	2.5	4.5 ~ 5.5	0.5 ~ 1.5	18.0 ~ 22.0	1.5 ~ 4.5	≤ 0.5
	2.4	1.0 ~ 2.0	0.5 ~ 1.5	34.0 ~ 36.0	≤ 0.2	≤ 0.5
球状	3.0	1.5 ~ 3.0	0.5 ~ 1.5	18.0 ~ 22.0	1.0 ~ 1.5	≤ 0.5
	3.0	4.5 ~ 5.5	0.5 ~ 1.5	18.0 ~ 22.0	1.0 ~ 2.5	≤ 0.5
	2.6	5.0 ~ 6.0	0.5 ~ 1.5	28.0 ~ 32.0	4.5 ~ 5.5	≤ 0.5

② 奥氏体耐蚀铸铁的力学性能（表 7-36）。

表 7-36 奥氏体耐蚀铸铁的力学性能

石墨形状	力学性能		
	抗拉强度/MPa $\geq$	$f/mm \geq$	硬度 HBW
片状	170 ~ 210	—	140 ~ 220
	170 ~ 210	—	120 ~ 215
	190 ~ 280	—	140 ~ 250
	120 ~ 180	—	120 ~ 140
球状	370 ~ 470	210 ~ 250	140 ~ 220
	370 ~ 430	210 ~ 260	180 ~ 230
	390 ~ 490	240 ~ 310	170 ~ 250

3) 耐蚀铸铁的应用。

耐蚀铸铁具有较好的力学性能，可用一般的机械加工方法进行生产。在浓度大于或等于 10%（质量分数）的硫酸、浓度小于或等于 46%（质量分数）的硝酸或由上述两

种介质组成的混合酸、浓度大于或等于 70%（质量分数）的硫酸 + 氯、苯、苯磺酸等介质中具有较稳定的耐蚀性，但不能承受急剧的交变载荷、冲击载荷。常用于有耐蚀性要求的场合，如卧式离心机、潜水泵、旋塞、阀门、冷却排水管等。在模具制造中高硅耐蚀铸铁主要用于塑料模具和热作模具零件，奥氏体铸铁常用于铸造塑料模具。

(4) 铸铁玻璃模具材料

1) 铸铁玻璃模具材料的成分（表 7-37）。

表 7-37 铸铁玻璃模具材料的成分

应用	化学成分（质量分数，%）													
	C 总	石墨	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	Al	Se	其他
口模 1	3.68	3.67	2.21	0.56	0.26	0.12	0.1	0.2	0.69	0.06	0.05	0.02	1.04	—
口模 2	3.42	3.31	2.29	0.4	0.23	0.06	0.26	0.2	0.78	0.42	0.06	0.04	0.97	—
初形模	3.64	3.46	2.18	0.52	0.05	0.08	0.3	0.25	0.36	0.03	0.05	0.05	1.02	—
使用过的初形模	3.60	2.93	1.80	0.60	0.18	0.06	0.36	0.65	0.32	0.06	0.13	0.02	0.98	—
使用过的初形模	3.31	2.78	2.49	0.56	0.18	0.08	0.69	0.14	0.84	0.06	0.05	0.03	0.96	—
使用过的初形模	3.49	3.31	1.96	0.57	0.07	0.07	0.13	0.06	0.10	0.03	0.1	0.04	0.97	—
成形模	3.09	2.21	1.73	0.72	0.22	0.09	0.25	0.13	0.54	—	0.25	—	0.84	
压模环 1	1.94	—	2.86	0.41	0.06	0.01	0.02	1.86	0.12	0.06	0.14	—	0.60	V: 0.03 Ce: 0.12 Mg: 0.18
压模环 2	2.20	—	2.68	0.34	0.03	0.02	0.06	0.14	0.22		0.07	—	0.65	—
使用过的初形模	2.68	—	3.27	0.38	0.03	0.01	0.07	0.1	0.11	0.06	0.02	—	0.90	V: 0.16 Mg: 0.04

2) 球墨铸铁玻璃模具材料。与灰铸铁相比，球墨铸铁中的石墨呈球状，提高了材料的致密性，减小了石墨对基体的切割作用，其力学性能优于其他铸铁，但由于石墨呈孤立的球状，导热性较差，限制了在玻璃模具中的应用，故只用于制造小型玻璃模具，如化妆品容器之类的模具。

3) 蠕墨铸铁玻璃模具材料。蠕墨铸铁的力学性能与球墨铸铁相近，且具有较高的导热性、抗氧化性和抗生长能力，又有像灰铸铁那样良好的铸造性能和机械加工性能，其综合性能优良。且蠕墨铸铁的合金化进一步提高了使用性能，已成为制造玻璃模具的重要材料，如低锡蠕墨铸铁、含铝蠕墨铸铁等。

4) 灰铸铁与 D 型石墨铸铁玻璃模具材料。

① 灰铸铁由于具有优良的铸造性能和加工性能，而被广泛用于制造玻璃模具，最常用的是 HT200 灰铸铁。但普通灰铸铁的石墨呈 A 型，长期受热会出现生长和膨胀，结构疏松，强度降低，脆性增大，常因氧化剥落、磨损、变形失效。通过向铸铁中加入 Cu、Cr、Sn 元素，促进了珠光体的形成，并形成致密的氧化膜，提高了模具的抗氧化性、耐磨性。

② D 型石墨铸铁较 A 型石墨铸铁提高了抗拉强度、耐磨性和抗氧化性。D 型石墨在奥氏体树枝晶间生长，割裂了石墨片的连续性，使石墨与基体间的间隙减小，D 型石墨组织中的初生奥氏体具有骨架结构，共晶奥氏体像网络一样将初生奥氏体各个枝干连在一起，具有较高的强度，提高了模具的使用寿命。

7.2 铸钢

铸钢是在凝固过程中不经历共晶转变的用于生产铸件的铁基合金的总称，是铸造合金的一种。铸钢分为铸造碳钢、铸造低合金钢和合金铸钢 3 类，在模具制造中已成为重要的模具材料。

7.2.1 铸钢模具材料

1. 常用铸钢模具材料的性能和应用（表 7-38）

表 7-38 模具常用铸钢的性能和应用

牌号	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断后伸长率 (%)	断面收缩率 (%)	冲击韧度 / (J/cm ²)	硬度 HRC	应用举例
ZG270 - 500	270	500	18	25	35		较高强度和塑性，用于负荷较大的底板、模座类零件
ZG310 - 570	310	570	15	21	30		
ZG45Mn2	调质 > 700	调质 > 1000	调质 > 8	调质 > 20	≥ 30	调质 29 ~ 33	强度高，堆焊锻模模体
ZG50Cr3Mo							热硬性好，堆焊锻模的焊条（板极）
ZG50CrMnMo							热硬性好，中小批量生产小型锻模
ZG50CrNiMo	调质 900	调质 > 1100	调质 ≥ 6		调质 20 ~ 40	调质 39	中小批量生产的锻模
ZG8Cr3	350	600	20	30			热强性、耐蚀性，制造热切边模
ZG30Cr2W8							高强度、高硬度，制造大型压铸模
ZG6CrMnMoCuTi						火焰淬火 58 ~ 61	综合力学性能好，制造大型翻边模

2. 美国专用铸造模具钢的化学成分（表 7-39）

表 7-39 美国 ASTM A597—1987 铸造模具钢化学成分

钢号	化学成分（质量分数，%）								
	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	V	Co	Ni
CA-2	0.95 ~ 1.05	≤0.75	≤1.50	4.75 ~ 5.50	0.90 ~ 1.40		(0.20 ~ 0.50)		
CD-2	1.40 ~ 1.60	≤1.00	≤1.50	11.0 ~ 13.0	0.70 ~ 1.20		(0.40 ~ 1.00)	(0.70 ~ 1.00)	
CD-5	1.35 ~ 1.60	≤0.75	≤1.50	11.0 ~ 13.0	0.70 ~ 1.20		0.35 ~ 0.55	2.50 ~ 3.50	(0.40 ~ 0.60)
CS-5	0.50 ~ 0.65	0.60 ~ 1.00	1.75 ~ 2.25	≤0.35	0.20 ~ 0.80		≤0.35		
CS-7	0.45 ~ 0.55	0.40 ~ 0.80	0.60 ~ 1.00	3.00 ~ 3.50	1.20 ~ 1.60				
CH-12	0.30 ~ 0.40	≤0.75	≤1.50	4.75 ~ 5.75	1.25 ~ 1.75	1.00 ~ 1.70	0.20 ~ 0.50		
CH-13	0.30 ~ 0.42	≤0.75	≤1.50	4.75 ~ 5.75	1.25 ~ 1.75		0.75 ~ 1.20		
CO-1	0.85 ~ 1.00	1.00 ~ 1.30	≤1.50	0.40 ~ 1.00		0.40 ~ 0.60	≤0.30		

注：所有材料中 S≤0.03，P≤0.03；括号内是根据需要可加入的合金元素。

3. 我国几种陶瓷型精铸模具钢材料的力学性能（表 7-40）

表 7-40 我国几种陶瓷型精铸模具钢材料的力学性能

材 料	抗拉强度 /MPa	断后伸长率 (%)	断面收缩率 (%)	冲击韧度 / (J/cm ²)	硬度 HRC
ZG5CrNiMo	1308	8.2	35	7.7	37
ZG5CrMnMo	1307	4.5	9.7	1.1	34
ZG5CrMnMoV	1457	7.7	13.6	2.1	37

7.2.2 铸钢的分类

1. 铸造碳钢（GB/T 11352—2009）

(1) 铸造碳钢的化学成分（表 7-41）

表 7-41 铸造碳钢^①的化学成分（质量分数）（%）

牌号	化学成分					残余元素				
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V
	≤									
ZG200 - 400	0.20	0.60	0.80	0.035	0.035	0.40	0.35	0.40	0.20	0.05
ZG230 - 450	0.30	0.60	0.90	0.035	0.035	0.40	0.35	0.40	0.20	0.05
ZG270 - 500	0.40	0.60	0.90	0.035	0.035	0.40	0.35	0.40	0.20	0.05
ZG310 - 570	0.50	0.60	0.90	0.035	0.035	0.40	0.35	0.40	0.20	0.05
ZG340 - 640	0.60	0.60	0.90	0.035	0.035	0.40	0.35	0.40	0.20	0.05

① 以碳为主要合金元素并含有少量其他元素的铸钢，碳质量分数小于 0.2% 的为铸造低碳钢，碳质量分数为 0.2% ~ 0.5% 的为铸造中碳钢，碳质量分数大于 0.5% 的为铸造高碳钢。随着含碳量的增加，铸造碳钢的强度增大，硬度提高。铸造碳钢具有较高的强度、塑性和韧性，成本较低，在重型机械和模具制造中主要用于制造承受大负荷的零件。

(2) 铸造碳钢的力学性能（表 7-42）

表 7-42 铸造碳钢的力学性能

牌号	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断后 伸长率（%）	断面 收缩率（%）	冲击吸收能量 A_{KV}/J	应用举例
ZG200 - 400	200	400	25	40	30	承受载荷不大有韧性要求的模具零件
ZG230 - 450	230	450	22	32	25	有一定强度和较好塑性的模具零件
ZG270 - 500	270	500	18	25	22	承受负荷较大的底板模座类零件
ZG310 - 570	310	570	15	21	15	
ZG340 - 640	340	640	10	18	10	

2. 铸造低合金钢（GB/T 14408—1993）（表 7-43）

表 7-43 铸造低合金钢^①P、S 控制及力学性能

牌号	P、S 含量（质量分数，%）		屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断后伸长率 （%）	断面收缩率 （%）
	P	S				
ZGD270 - 480	≤0.040	≤0.040	270	480	18	35
ZGD290 - 510			290	510	16	35
ZGD345 - 570			345	570	14	35
ZGD410 - 620			410	620	13	35
ZGD535 - 720			535	720	12	30
ZGD650 - 830			650	830	10	25
ZGD730 - 910	≤0.035	≤0.035	730	910	8	22
ZGD840 - 1030			840	1030	6	20

① 铸造低合金钢含有锰、铬、铜等合金元素，合金元素总量一般小于 5%（质量分数），具有较大的冲击韧度，并能通过热处理获得更好的力学性能。铸造低合金钢比铸造碳钢具有更优的使用性能，能减小零件质量，提高使用寿命。

3. 合金铸钢 (JB/T 6402—2006)

(1) 合金铸钢的化学成分 (表 7-44)

表 7-44 合金铸钢的化学成分 (质量分数)

(%)

材料牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
ZG20Mn	0.16 ~ 0.22	0.60 ~ 0.80	1.00 ~ 1.30	≤0.030	≤0.030	—	≤0.40	—	—
ZG30Mn	0.27 ~ 0.34	0.30 ~ 0.50	1.20 ~ 1.50	≤0.030	≤0.030	—	—	—	—
ZG35Mn	0.30 ~ 0.40	0.60 ~ 0.80	1.10 ~ 1.40	≤0.030	≤0.030	—	—	—	—
ZG40Mn	0.35 ~ 0.45	0.30 ~ 0.45	1.20 ~ 1.50	≤0.030	≤0.030	—	—	—	—
ZG40Mn2	0.35 ~ 0.45	0.20 ~ 0.40	1.60 ~ 1.80	≤0.030	≤0.030	—	—	—	—
ZG45Mn2	0.42 ~ 0.49	0.20 ~ 0.40	1.60 ~ 1.80	≤0.030	≤0.030	—	—	—	—
ZG50Mn2	0.45 ~ 0.55	0.20 ~ 0.40	1.50 ~ 1.80	≤0.030	≤0.030	—	—	—	—
ZG35SiMnMo	0.32 ~ 0.40	1.10 ~ 1.40	1.10 ~ 1.40	≤0.030	≤0.030	—	—	0.20 ~ 0.30	≤0.30
ZG35CrMnSi	0.30 ~ 0.40	0.50 ~ 0.75	0.90 ~ 1.20	≤0.030	≤0.030	0.50 ~ 0.80	—	—	—
ZG20MnMo	0.17 ~ 0.23	0.20 ~ 0.40	1.10 ~ 1.40	≤0.030	≤0.030	—	—	0.20 ~ 0.35	≤0.30
ZG30Cr1MnMo	0.25 ~ 0.35	0.17 ~ 0.45	0.90 ~ 1.20	≤0.030	≤0.030	0.90 ~ 1.20	—	0.20 ~ 0.30	—
ZG55CrMnMo	0.50 ~ 0.60	0.25 ~ 0.60	1.20 ~ 1.60	≤0.030	≤0.030	0.60 ~ 0.90	—	0.20 ~ 0.30	≤0.30
ZG40Cr1	0.35 ~ 0.45	0.20 ~ 0.40	0.50 ~ 0.80	≤0.030	≤0.030	0.80 ~ 1.10	—	—	—
ZG34Cr2Ni2Mo	0.30 ~ 0.37	0.30 ~ 0.60	0.60 ~ 1.00	≤0.030	≤0.030	1.40 ~ 1.70	1.40 ~ 1.70	0.15 ~ 0.35	—
ZG15Cr1Mo	0.12 ~ 0.20	≤0.60	0.50 ~ 0.80	≤0.030	≤0.030	1.00 ~ 1.50	—	0.45 ~ 0.65	—
ZG20CrMo	0.17 ~ 0.25	0.20 ~ 0.45	0.50 ~ 0.80	≤0.030	≤0.030	0.50 ~ 0.80	—	0.45 ~ 0.65	—
ZG35Cr1Mo	0.30 ~ 0.37	0.30 ~ 0.50	0.50 ~ 0.80	≤0.030	≤0.030	0.80 ~ 1.20	—	0.20 ~ 0.30	—
ZG42Cr1Mo	0.38 ~ 0.45	0.30 ~ 0.60	0.60 ~ 1.00	≤0.030	≤0.030	0.80 ~ 1.20	—	0.20 ~ 0.30	—

(续)

材料牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
ZG50Cr1Mo	0.46 ~ 0.54	0.25 ~ 0.50	0.50 ~ 0.80	≤0.030	≤0.030	0.90 ~ 1.20	—	0.15 ~ 0.25	—
ZG65Mn	0.60 ~ 0.70	0.17 ~ 0.37	0.90 ~ 1.20	≤0.030	≤0.030	—	—	—	—
ZG28NiCrMo	0.25 ~ 0.30	0.30 ~ 0.80	0.60 ~ 0.90	≤0.030	≤0.030	0.35 ~ 0.85	0.40 ~ 0.80	0.35 ~ 0.55	—
ZG30NiCrMo	0.25 ~ 0.35	0.30 ~ 0.60	0.70 ~ 1.00	≤0.030	≤0.030	0.60 ~ 0.90	0.60 ~ 1.00	0.35 ~ 0.50	—
ZG35NiCrMo	0.30 ~ 0.37	0.60 ~ 0.90	0.70 ~ 1.00	≤0.030	≤0.030	0.40 ~ 0.90	0.60 ~ 0.90	0.40 ~ 0.50	—

注：为适应特殊需要而炼制的合金铸钢，品种繁多，通常含有一种或多种高含量合金元素，以获得某种特殊性能。例如，锰质量分数为11%~14%的高锰钢能耐冲击磨损，多用于耐磨零件；以铬或铬镍为主要合金元素的各种不锈钢，用于在有腐蚀或650℃以上高温条件下工作的零件，如化工用阀体、泵、容器或大容量电站的汽轮机壳体等场合。

(2) 合金铸钢的力学性能（表 7-45）

表 7-45 合金铸钢的力学性能

材料牌号	热处理 状态	R_{ch}/MPa ≥	R_{m}/MPa ≥	$A(\%)$ ≥	$Z(\%)$ ≥	A_{KU}/J ≥	A_{KV}/J ≥	A_{KDV}/J ≥	硬度 HBW ≥
ZG20Mn	正火 + 回火	285	495	18	30	39	—	—	145
	调质	300	500 ~ 650	24	—	—	45	—	150 ~ 190
ZG30Mn	正火 + 回火	300	558	18	30	—	—	—	163
ZG35Mn	正火 + 回火	345	570	12	20	24	—	—	—
	调质	415	640	12	25	27	—	27	200 ~ 240
ZG40Mn	正火 + 回火	295	640	12	30	—	—	—	163
ZG40Mn2	正火 + 回火	395	590	20	40	30	—	—	179
	调质	685	835	13	45	35	—	35	269 ~ 302
ZG45Mn2	正火 + 回火	392	637	15	30	—	—	—	179
ZG50Mn2	正火 + 回火	445	785	18	37	—	—	—	—
ZG35SiMnMo	正火 + 回火	395	640	12	20	24	—	—	—
	调质	490	690	12	25	27	—	27	—
ZG35CrMnSi	正火 + 回火	345	690	14	30	—	—	—	217
ZG20MnMo	正火 + 回火	295	490	16		39	—	—	156
ZG30Cr1MnMo	正火 + 回火	392	686	15	30	—	—	—	—
ZG55CrMnMo	正火 + 回火	不规定	不规定	—	—	—	—	—	—

(续)

材料牌号	热处理 状态	R_{CH}/MPa ≥	R_{m}/MPa ≥	$A(\%)$ ≥	$Z(\%)$ ≥	A_{KU}/J ≥	A_{KV}/J ≥	A_{KDVM}/J ≥	硬度 HBW ≥
ZG40Cr1	正火 + 回火	345	630	18	26	—	—	—	212
ZG34Cr2Ni2Mo	调质	700	950 ~ 1000	12	—	—	32	—	240 ~ 290
ZG15Cr1Mo	正火 + 回火	275	490	20	35	24	—	—	140 ~ 220
ZG20CrMo	正火 + 回火	245	460	18	30	30	—	—	135 ~ 180
	调质	245	460	18	30	24	—	—	—
ZG35Cr1Mo	正火 + 回火	392	588	12	20	23.5	—	—	—
	调质	510	686	12	25	31	—	27	201
ZG42Cr1Mo	正火 + 回火	343	569	12	20	—	30	—	—
	调质	490	690 ~ 830	11	—	—	—	21	200 ~ 250
ZG50Cr1Mo	调质	520	740 ~ 880	11	—	—	—	34	200 ~ 260
ZG65Mn	正火 + 回火	不规定	不规定	—	—	—	—	—	—
ZG28NiCrMo	—	420	630	20	40	—	—	—	—
ZG30NiCrMo	—	590	730	17	35	—	—	—	—
ZG35NiCrMo	—	660	830	14	30	—	—	—	—

7.2.3 铸钢的工艺特点

1. 铸钢的铸造工艺 (表 7-46)

表 7-46 铸钢的铸造工艺

工 艺 特 点	工 艺 措 施
钢液的流动性差	为防止铸钢件产生冷隔和浇注不足, 铸钢件的壁厚不能小于 8mm。浇注系统的结构力求简单, 且截面尺寸应尽量大。适当提高浇注温度, 一般为 1520 ~ 1600℃。因为浇注温度高, 钢液的过热度大, 保持液态的时间长, 流动性可得到改善; 但是浇注温度过高, 会引起晶粒粗大、热裂、气孔和粘砂等缺陷。因此一般小型、薄壁及形状复杂的铸件, 其浇注温度比钢的熔点温度高出 150℃; 大型、厚壁铸件的浇注温度比其熔点高 100℃ 左右
铸钢的收缩性大	为防止铸件出现缩孔、缩松缺陷, 在铸造工艺上大都采用冒口和冷铁等措施, 以实现顺序凝固; 为防止铸钢件产生缩孔等缺陷, 在进行结构设计时, 应使其壁厚均匀、避免尖角和直角结构; 在铸型用型砂中加锯末、在型芯中加焦炭, 以及采用空心型芯和油砂芯等来改善砂型或型芯的退让性和透气性
铸钢的熔点高	铸钢的熔点高, 相应的浇注温度也高。高温下钢液与铸型材料相互作用, 极易产生粘砂缺陷。因此, 应采用耐火度较高的人造石英砂制作铸型, 并在铸型表面刷涂由石英粉或铅砂粉制得的涂料。为减少气体来源、提高钢液流动性及铸型强度, 大多铸钢件用干型或快干型来铸造

2. 铸钢的热处理工艺

一般小型铸钢模具的热处理与普通模具钢热处理工艺相同。按加热和冷却条件不同,铸钢件的主要热处理方式有:退火(工艺代号 5111)、正火(工艺代号 5121)、均匀化处理、淬火(工艺代号 5131)、回火(工艺代号 5141)、固溶处理(工艺代号 5171)、沉淀硬化、去应力处理及脱氢处理等。大型锻模、水压机砧模等大型模具零件,常用铸钢 ZG5CrMnMo、ZG5CrNiMo、ZG5CrMnMoV 钢制造,热处理一般为正火、回火。铸钢的热处理工艺见表 7-47。

表 7-47 铸钢的热处理工艺

工 艺	工 艺 参 数
退火	将铸钢件加热到 A_{c3} 以上 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$, 保温一定时间。其目的是消除铸造组织中的柱状晶、粗等轴晶、魏氏组织和树枝状偏析,以改善铸钢的力学性能。铸造碳钢退火后的组织:亚共析铸钢为铁素体+珠光体,共析铸钢为珠光体,过共析铸钢为珠光体+碳化物。适用于所有牌号的铸钢件
正火	将铸钢件加热到 A_{c1} 以上 $30 \sim 50^{\circ}\text{C}$, 保温一定时间,使之完全奥氏体化,然后在静止空气中冷却。其目的是细化钢的组织,使其具有所需的力学性能,也可作为后续热处理的预备热处理
淬火	将铸钢件加热到奥氏体化后,保持一定时间,以适当方式冷却,获得马氏体或贝氏体组织的热处理工艺。常见的有水冷淬火、油冷淬火和空冷淬火等。铸钢件淬火后应及时进行回火处理,以消除淬火应力及获得所需的综合力学性能
回火	将淬火或正火后的铸钢件加热到 A_{c1} 以下的某一选定温度,保温一定时间后,以适宜的速率冷却,使淬火或正火后得到的不稳定组织转变为稳定组织,消除淬火(或正火)应力,提高铸钢的塑性和韧性 1) 淬火后的铸钢件必须及时进行回火,而正火后的铸钢件必要时才予以回火处理。回火后铸钢件的性能取决于回火温度、时间及次数。随着回火温度的提高和时间的延长,除使铸钢件的淬火应力消除外,还使不稳定的淬火马氏体转变成回火马氏体、托氏体或索氏体,使铸钢的强度和硬度降低,而塑性显著提高 2) 对于一些含有强烈形成碳化物的合金元素(如铬、钼、钒和钨等)的中合金铸钢,在 $400 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 回火时出现硬度升高、韧性下降的现象,产生二次硬化,使回火状态铸钢的硬度达到最大值。一般有二次硬化特性的中合金铸钢需要进行多次(1~3次)回火处理
固溶处理	一般奥氏体不锈钢耐热钢、奥氏体锰钢及沉淀硬化不锈钢耐热钢铸件均需经固溶处理。其目的是使碳化物或其他析出相溶解于固溶体中,获得过饱和的单相组织。固溶温度的选择取决于钢种的化学成分和相图,奥氏体锰钢铸件一般为 $1000 \sim 1100^{\circ}\text{C}$,奥氏体镍铬不锈钢铸件为 $1000 \sim 1250^{\circ}\text{C}$ 。铸钢中含碳量越高,难熔合金元素越多,则其固溶温度应越高。含铜沉淀硬化铸钢,在铸态有硬质富铜相在冷却过程中沉淀,致使铸钢件硬度升高。常采用的固溶温度为 $900 \sim 950^{\circ}\text{C}$,经快冷后得到铜的质量分数为 $1.0\% \sim 1.5\%$ 的过饱和单相组织,可以软化组织、改善加工性能

(续)

工 艺	工 艺 参 数
时效处理	铸件经固溶处理或淬火后, 在室温或高于室温的适当温度保温, 在过饱和固溶体中形成溶质原子偏聚区和(或)析出弥散分布的强化相而使金属硬化的处理称为时效处理(或沉淀硬化处理)。在高于室温下进行的称为人工时效, 其实质是在较高的温度下, 自过饱和固溶体中析出碳化物、氮化物、金属间化合物及其他不稳定的中间相, 使其弥散分布于基体中, 因而使铸钢的综合力学性能和硬度提高。时效处理的温度直接影响铸钢件的最终性能
去应力处理	其目的是消除铸造应力、淬火应力和机械加工形成的应力, 稳定尺寸。一般加热到 A_{c1} 线以下 $100 \sim 200^{\circ}\text{C}$, 保温一定时间, 随炉慢冷。铸件的组织没有变化。铸造碳钢、低合金铸钢或高合金铸钢铸件均可以进行去应力处理, 以利于尺寸稳定和使用性能稳定
脱氢处理	目的是去除氢气, 防止氢脆, 提高铸钢的塑性。其工艺是将铸件加热到 $170 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 或 $280 \sim 320^{\circ}\text{C}$, 进行长时间保温。脱氢处理过程中没有组织变化。主要用于易于产生氢脆倾向的低合金铸钢件

3. 铸钢在模具中的应用

(1) 铸造模具的特点

1) 铸造模具是采用电弧炉或感应炉冶炼, 砂型、陶瓷型等各种铸造方法直接铸造出接近成品形状的模具铸件, 加工余量不太大。相同成分的材料直接铸造成形模具可改善某些性能, 简化工艺, 提高铸造质量。

2) 铸造的锻模和热挤压模一般比采用锻轧工艺生产的模具具有更高的抗冷热疲劳裂纹的性能。这是由于铸造模具没有明显的组织方向性, 不存在锻轧态模具钢的各向异性问题。

3) 一些专用的铸造模具材料, 如显像管玻璃外壳的成型模具, 由于外形十分复杂, 用锻造模块加工, 成本高, 现在一般都采用砂型或陶瓷型铸造的方法生产。为提高模具的使用寿命, 近年来日本研究了一种新型镍基合金铸造模具材料, 采用 Mo、W、Al 强化的 NiMoWAl 铸造合金, 在 1100°C 以下的高温强度与钼基合金相近, 而且抗氧化性良好, 可满足在大气下等温锻造模具的要求, 显著地简化了装备和工艺。

4) 塑料模具用量很大, 大多数塑料模具都是由滚压或铸造制造, 特别是在制造大型模具时机械加工量比较大。采用铸造工艺生产铸造模具可以铸造出公差较小、后续加工少的毛坯, 既经济又合理。铸造模具的另外一个优势是可以直接在毛坯上铸造出冷却流道, 简化了后续工艺, 提高了质量, 降低成本, 提高经济效益。

(2) 铸钢材料在模具制造中的应用

铸钢材料性能优良, 适应性强, 工艺简单, 成本低廉, 使用寿命长, 为模具制造的重要材料。常用于制造有较高强度和塑性要求、承受较大冲击载荷的模具底板、模座类零件; 中小批量生产小型锻模; 大型压铸模、大型翻边模; 具有热强性、耐蚀性要求的

热切边模；各种类型的塑料模等。

7.3 硬质合金和钢结硬质合金

7.3.1 硬质合金

硬质合金是以难熔高硬度碳化物的粉末与少量的粘结剂粉末混合后加压成形再经烧结而成的粉末冶金材料。硬度高，耐磨性好，具有很高的弹性模量、较小的膨胀系数及良好的化学稳定性，其工作温度可达 800℃ 以上。用于制造模具，寿命比工具钢高 10 倍以上。但硬质合金较脆，抗弯强度和韧性较差，且不能进行机械加工。主要用于制造拉丝模、冷挤压模等。

1. 硬质合金的种类（表 7-48）

表 7-48 硬质合金的种类

种 类 ^①	合 金 组 成
钨钴类硬质合金（YG）	由 WC 和 Co 粉末烧结制成。YG 后的数字表示 Co 含量。含 Co 量越高，韧性越好，但硬度和耐磨性稍有下降
钨钛钴类硬质合金（YT）	由 WC、TiC 和 Co 粉末烧结制成。YT 后的数字表示 TiC 含量
钨钼钽类硬质合金（YW）	由 TaC、TiC、WC 三种粉末和 Co 粘结剂烧结制成

① YG 硬质合金的韧性好，YT 硬质合金的热硬性高，YW 硬质合金的性能比较全面，兼有 YG 和 YT 硬质合金二者的优点，适应于多种用途，所以又称为万能硬质合金。

2. 硬质合金的特点（表 7-49）

表 7-49 硬质合金的特点

特 点	性 能
硬度高，耐磨性好	硬质合金的硬度一般为 85 ~ 95HRC，长时间工作无显著磨损。高温硬度高，在 500℃ 以下硬度基本不变，在 600℃ 和 1000℃ 时仍然分别超过高速工具钢和碳素钢的室温硬度。硬质合金的耐磨性是高速工具钢的 15 ~ 20 倍
抗压强度高	Co 质量分数为 15% 的 W - Co 类合金抗压强度可达到 3590MPa 以上。例如 YG6 硬质合金的抗压强度可达到 4510MPa
热导率低及线膨胀系数小	热导率低有利于用作切削刀具和硬质合金与钢的焊接。较小的线膨胀系数有利于提高零件的尺寸稳定性。密度一般为 60 ~ 160g/cm ³ ，根据其密度可以确定硬质合金的化学成分和牌号
弹性模量高	具有很高的弹性模量
不需要热处理	不需要热处理，不存在尺寸和硬度等变化问题
耐蚀性、抗氧化性好	化学稳定性好，耐酸、耐碱，用于制造模具，寿命比工具钢高 10 倍以上

(续)

特 点	性 能
脆性大，冲击韧度很低	硬质合金较脆，抗弯强度和韧性较差，且不能进行机械加工。硬质合金的冲击韧度随合金中含 Co 量增加及 WC 晶粒的增大而提高。所以在设计、制造、使用时都要充分考虑此特性
材料昂贵，加工困难	材料昂贵，加工困难，主要采用电加工，切削和磨削采用高硬度硬质合金刀具和金刚石磨具加工；只能制造小型的、形状简单的模具零件或镶块

3. 硬质合金的化学成分

常用模具用国产硬质合金的化学成分（见表 7-50）。

表 7-50 常用模具用国产硬质合金的化学成分

类别	牌号	化学成分（质量分数，%）			
		WC	TiC	TaC	Co
钨钴类合金	YG3X	96.5		≤0.5	3
	YG6	94.0			6
	YG8C	92.0			8
	YG15	85.0			15
钨钛钴类合金	YT5	85.0	5		10
	YT15	79.0	15		6
	YT30	66.0	30		4
通用合金	YW1	84~85	6	3.4	6
	YW2	82~83	6	3.4	8

4. 硬质合金的性能

（1）模具用国产硬质合金（表 7-51）。

表 7-51 模具用国产硬质合金的性能

牌号	物理和力学性能							
	密度 / (g/cm ³)	硬度 HRA	抗弯强度 /MPa	抗压强度 /MPa	冲击韧度 / (J/cm ²)	热导率 / [W/(m·K)]	线膨胀系数 / ×10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹	矫顽力 [(×1000/4π) A/m]
YG3X	15.0~15.3	91.5	1078				4.1	170~200
YG3	14.9~15.3	91	1176					
YG4C	14.9~15.2	90	1370					
YG6X	14.6~15.0	91	1372			79.5	4.4	200~250
YG6A	14.7~15.1	91.5	1372					

(续)

牌号	物理和力学性能							
	密度 / (g/cm ³)	硬度 HRA	抗弯强度 /MPa	抗压强度 /MPa	冲击韧度 / (J/cm ²)	热导率 / [W/(m·K)]	线膨胀系数 / ×10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹	矫顽力 [(×1000/4π) A/m]
YG6	14.6 ~ 15.0	89.5	1421	4510	2.6	79.5	4.5	130 ~ 160
YG8N	14.5 ~ 14.9	89.5	1519					
YG8	14.4 ~ 14.8	89	1470	4385	2.5	75.4	4.5	140 ~ 160
YG8C	14.35	88	1720	3825	3	75.4	4.8	50 ~ 70
YG10C	14.3 ~ 14.6	86	1764					
YG10H	14.5	91.5	2156					
YG11C	14.0 ~ 14.4	87	1960		3.8			80 ~ 95
YG15	13.9 ~ 14.2	87	2058	3590	4	58.6	5.3	80 ~ 90
YG20	13.4 ~ 13.7	85.5	2550	3430	4.8		5.7	
YG20C	13.4 ~ 13.7	82	2156		7.0			
YG25	12.9 ~ 13.2	84.5	2650	3240			4	

(2) 国外钨钴类 (YG) 硬质合金 (表 7-52)

表 7-52 国外钨钴类 (YG) 硬质合金的性能

合金 类型	合金代号	化学成分 (质量分数, %)			物理、力学性能				相当中国 牌号
		WC	TaC + TiC	Co	密度 /(g/cm ³)	维氏硬度 HV30	抗弯强度 /MPa	抗压强度 /MPa	
K	K01	92	4 ^①	4	15	1800			YG3X
	K05	91	3 ^①	6	14.5	1750	1323	5782	YG6A
	K10	92	2 ^①	6	14.8	1650	1470	5586	YG6A
	K20	92	2	6	14.8	1550	1666	4900	YG8N
	K30	89	2	9	14.4	1400	1862	4606	YG8
	K40	88		12	14.3	1300	2058	4410	YG10H
G	G05	94		6	14.8	1600	1470		YG6X
	G10	94		6	14.8	1550	1568		YG6
	G15	91		9	14.5	1450	1862		YG8
	G20	88		12	14.0	1300	2058		YG11C
	G30	85		15	13.8	1200	2352		YG15
	G40	80		20	13.5	1100	2548		YG20
	G50	75		25	13.1	1000	2646		YG25
	G60	70		30	12.8	900	2744		YG30

① 含 TaC 合金。

5. 硬质合金的应用

(1) YG 类硬质合金的使用性能及用途（表 7-53）

表 7-53 YG 类硬质合金的使用性能及用途^①

合金牌号	使用性能	用 途
YG3	使用强度和冲击韧度中等，耐磨性比 YG3X 稍差	应力不大条件下的拉丝模，适于控制直径 <6mm 的钢丝、非铁金属丝及其合金线材或棒材
YG3X	硬度高，耐磨性好，但强度低，冲击韧度较低	应力不大条件下的拉丝模，适于控制直径 <2mm 的钢丝、非铁金属丝及其合金丝
YG6	耐磨性较好，使用强度及冲击韧度较高	应力较大条件下的拉深模，适于控制直径 <20mm 的钢丝、非铁金属及其合金线材或棒材，也适于控制直径 <10mm 的管材
YG6X	耐磨性优于 YG6，使用强度及冲击韧度稍低	要求高耐磨性的拉丝模，适于控制钢丝、非铁金属丝及其合金线材或棒材
YG8	耐磨性良好，使用强度及冲击韧度优于 YG6	应力较大条件下的拉深模，尺寸较小和工作载荷不大的冲模和铆钉顶锻模，直径 <50mm 的钢、非铁金属拉丝模
YG8C	属于粗晶粒碳化钨合金，使用性能和耐磨性均与 YG11C 相近	应力较大条件下的拉深模，也用于螺钉、螺栓、铆钉等的顶锻模
YG11C	属于粗晶粒碳化钨合金，耐磨性和使用强度较高	载荷较大条件下的顶锻模及冲模，用于螺钉、螺栓、铆钉等的顶锻模
YG15	使用强度及冲击韧度较好	载荷大条件下的顶锻模，也用于冲模、挤压模
YG20	使用强度高，耐磨性较差	载荷大的顶锻模，也用于冲模
YG20C	使用强度高，耐磨性较好	用于顶锻模、冲模、冷锻模
YG25	使用强度最高，耐磨性差	载荷不大的顶锻模，也用于冲模
YG30	使用强度高，耐磨性低	载荷不大的顶锻模，也用于冲模

① 硬质合金材料可以按照所设计模具的形状、尺寸向生产厂商订货。

(2) 不同使用条件下各种模具推荐选用的硬质合金（表 7-54）

表 7-54 不同使用条件下各种模具推荐选用的硬质合金

模具种类	被冲材料	小型模具		中大型模具	
		凹模	凸模	凹模	凸模
冲裁模 切断模 冲孔模和盒形件落料模 复杂形状落料模	<0.5mm 的硅钢板	YG8	YG8	YG15	YG15
	<0.5mm 的硅钢板	YG11	YG15		
	<4mm 的 45 钢板等	YG20	YG25		
	<0.5mm 的硅钢板	YG15	YG20	YG20	YG25
	<4mm 的 45 钢板等	YG20	YG25	YG25	YG30
弯曲模		YG11	YG11	YG15	YG15
拉深模		YG8	YG8	YG11	YG11
冷挤压模		YG25、YG30	YG15、YG20		
冷镦模		YG15、YG20	YG25、YG30		

(3) WC - Co 类硬质合金制造的拉丝模坯的使用范围 (表 7-55)

表 7-55 WC - Co 类硬质合金制造的拉丝模坯的使用范围

合金 牌号	化学成分 (质量分数, %)			硬度 HRA	抗弯强度 /MPa	使用范围
	WC	Co	TaC			
YG3X	96.5	3	0.5	91.5	1078	在 WC - Co 合金中硬度最高, 耐磨性好, 强度低, 冲击韧度低, 适于在应力不大的条件下拉拔直径 2.0mm 以下的细丝, 拉拔直径 0.6mm 以下的细丝效果更好
YG3	97	3		91	1176	耐磨性仅次于 YG3X, 使用强度及冲击韧度中等, 适于在应力不大的条件下, 拉拔直径 6.0mm 以下的钢丝、非铁金属丝及其合金的线材、棒材
YG6X	93.5	6	0.5	91	1325	耐磨性优于 YG6, 使用强度和冲击韧度稍低, 适于在要求耐磨性较好的条件下拉拔钢丝、非铁金属丝及其合金的线材、棒材
YG6	94	6		89.5	1421	耐磨性比较好, 使用强度和冲击韧度较高。适于在应力较大的条件下拉拔直径 20mm 以下的钢、非铁金属及其合金的线材及棒材, 也适于拉拔直径 10mm 以下的管材
YG8	92	8		89	1470	耐磨性良好, 使用强度和冲击韧度较 YG6 高, 适于在应力大的条件下拉拔直径 50mm 以下的钢、非铁金属及其合金的线材及棒材, 以及直径 35mm 以下的管材, 也适用于直径较小、工作载荷不大的冲模和铆钉顶锻模
YG15	85	15		87	2058	耐磨性比较差, 使用强度和冲击韧度较高, 适于在应力很大的条件下拉拔钢棒、钢管及合金钢螺栓和铆钉顶锻

(4) 冷镦模使用寿命比较（表 7-56）

表 7-56 冷镦模的使用寿命比较

材 料	Ti10	Cr12MoV	YG20C	GCr15	GW50
9. 52mm 螺栓下冷镦模平均寿命/万件	0. 2 ~ 0. 3	10	20 ~ 30	—	—
9. 52mm 螺栓下冷镦模最高寿命/万件	3. 2	18. 2	—	—	—
7. 93mm 螺栓下冷镦模平均寿命/万件	0. 4 ~ 0. 5	—	40	—	—
7. 93mm 螺栓下冷镦模最高寿命/万件	3. 6	—	120	—	—
9. 52mm 钢球冷镦组合凹模的平均寿命/万件	—	5. 7	30 ~ 50	1 ~ 5	20 ~ 40
9. 52mm 钢球冷镦组合凹模的最高寿命/万件	—	12	180	8	179

7.3.2 钢结硬质合金

1) 钢结硬质合金是以 TiC、WC 等为硬质相，以合金钢粉末为粘结剂，经混合压制烧结而成的粉末冶金材料。其性能介于钢和硬质合金之间，既具有钢的高强韧性、又具有硬质合金的高硬度、高耐磨性。

2) 钢结硬质合金具有钢的特性，可以锻造、热处理、退火软化后可进行机械加工。可以在制造模具时通过焊接、镶嵌等方法将合金和钢材连接起来制成组合式模具。钢结硬质合金可以通过热处理来改变其性能并可进行各种机械加工，具有良好的综合性能。已在冲模、冷挤压模、整形模、冷镦模和热作模具上得到广泛应用。

1. 钢结硬质合金的分类（表 7-57）

表 7-57 钢结硬质合金的分类

分类	生产工艺与类型的关系
TiC 基 ^①	1) 钢结硬质合金粘结相主要有各种成分的碳素钢、合金钢、工具钢、高速工具钢、高锰钢、耐热钢和不锈钢等。硬质相分数最高可达 92%，高速工具钢基体分数最高可达 90%。通过选择不同钢种和成分作粘结剂，可制取不同类型及具有特定性能的合金，以适应各种不同应用领域的要求 2) 钢结硬质合金可采用普通粉末冶金法、熔渗法、热压法和热等静压法生产。其性能取决于合金的成分和烧结及热处理工艺。根据性能要求设计钢结硬质合金类型时，选择适当钢基体的钢种和成分是重要环节 3) 在钢结硬质合金中，硬质相颗粒的大小、分布、形态与工件韧性密切相关。碳化物相越少，韧性越好，但碳化物相的质量分数不得低于 30%，否则会降低钢结硬质合金的耐磨性。在碳化钛系钢结硬质合金中，碳化钛颗粒细而圆整。碳化钨系钢结硬质合金中，碳化钨颗粒多呈尖角形，晶粒之间易产生搭桥现象，严重时甚至毗连成片，使合金脆化，造成机械加工困难 4) 钢结硬质合金的硬度是通过淬火处理来保证的或是通过弥散强化、马氏体时效来达到
TiN 基	
TiCN 基	
WC 基 ^②	
WC - Co 基	

① 目前开发的钢结硬质合金以 TiC 基钢结硬质合金为主。

② 以 WC 为硬质相的钢结硬质合金又简称 DT 合金。

2. 钢结硬质合金的化学成分

(1) 冷作模具常用钢结硬质合金的化学成分（表 7-58）

表 7-58 冷作模具常用钢结硬质合金的化学成分

类型	牌号	化学成分（质量分数，%）							
		硬质相	钢基体粘结相						
			C	Cr	Mo	Ni	W	V	Fe
WC 型	TLMW50	WC：50	0.80 ~ 0.90	1.25	1.25	—	—	—	余量
	TMW50	WC：50	1.00	2.00	—	—	—	—	余量
	GJW50	WC：50	0.25	0.50	0.25	—	—	—	余量
	GW50	WC：50	0.80	1.10	0.30	0.30	—	—	余量
TiC 型	GT35	TiC：35	0.90	3.00	3.00	—	—	—	余量
	R5	TiC：30 ~ 40	0.70	6.00 ~ 13.00	0.50 ~ 3.00	—	—	0.10 ~ 0.50	余量
	D1	TiC：25 ~ 40	0.40 ~ 0.80	2.40 ~ 4.00	—	—	10.0 ~ 15.0	0.50 ~ 1.00	余量
	T1	TiC：25 ~ 40	0.40 ~ 0.80	2.00 ~ 5.00	—	—	3.00 ~ 6.00	1.00 ~ 2.00	余量

(2) 常用国产模具用钢结硬质合金和国外相近牌号的成分对照（表 7-59）

表 7-59 常用国产模具用钢结硬质合金和国外相近牌号的成分对照

牌号	化学成分（质量分数，%）								
	TiC	WC	C	Cr	Mo	V	W	其他	Fe
GT35	35		0.9	3.0	3.0				余量
美国 Ferro - TiC - C	33		0.40	2.0	2.0				余量
荷兰 Ferro - TiC - C 特	33		0.45	2.0	2.0			Cu：0.8	余量
德国 Ferro - TiC - C 特	33		0.45	2.0	2.0			Cu：0.8	余量
GT33	33		0.9	3.0	3.0	3.0		NbC：2.2	余量
G	35	高速工具钢							
GJW50		50	0.25	0.50	0.25				余量
R5	30 ~ 40		0.70	6.0 ~ 13.0	0.5 ~ 3.0	0.1 ~ 0.5			余量
美国 Ferro - TiC - CM	34		8.0	6.6	2.0				余量

(续)

牌号	化学成分 (质量分数, %)								
	TiC	WC	C	Cr	Mo	V	W	其他	Fe
ST60	60		0.56						
荷兰 Ferro – TiC – U70	70	奥氏体不锈钢							
D1	25 ~ 40		0.4 ~ 0.8	2.4 ~ 4.0				Ni: 3.5 Cu: 0.8 Nb: 0.3	余量
L	33		0.4 ~ 0.8	2 ~ 4		0.5 ~ 1.0	10 ~ 15		余量
T1	25 ~ 40		0.4 ~ 0.8	2.0 ~ 5.0		1.0 ~ 2.0	3.0 ~ 6.0		余量
TLMW50		50	0.8 ~ 0.9	1.25	1.25				余量
TMW50		50	1.0	2.0					余量
TW50		50	1.0	2.0					余量
T10W50		50	1.0						余量
W50		50	1.0	2.5	2.5				余量
GW50		50	0.8	1.1	0.3			Ni: 0.3	余量
Cr1Mo2W50		50	1.0	2.0	4.0				余量

3. 钢结硬质合金的物理性能

常用钢结硬质合金的临界点温度见表 7-60。

表 7-60 常用钢结硬质合金的临界点温度

牌号	临界温度 (近似值) /℃				
	Ac_1	Ac_3	Ac_{cm}	Ar_1	Ar_3
TLMW50	761	788	—	690	730
GW50	745	790	—	710	770
GJW50	760	810	—	710	763
GT35	740	770	—	—	—
R5	780	—	820	—	700
T1	780	—	800	—	730

4. 钢结硬质合金的锻造工艺性能

钢结硬质合金具有钢的特性，烧结态的合金必须经过锻造成形，以提高合金的密度，改善硬质相的分布，降低严重的碳化物偏析，并使材料成形。钢结硬质合金的可锻性，取决于硬质相和钢基体的比例，并与钢基体的可塑性有关，中低合金钢结硬质合金具有良好的可锻性。锻造工艺规范见表 7-61。

表 7-61 钢结硬质合金锻造工艺规范

项目	加热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
模坯	1180 ~ 1200	1150 ~ 1200	900 ~ 950	空冷（或坑冷）

- 注：1. 锻前要对原材料进行检验，去除有孔洞、鼓泡、裂纹、分层、欠烧、严重渗碳、金属流散等粉末冶金生产中常见缺陷的坯料。
2. 由于钢结硬质合金导热性较差，加热应缓慢均匀，预热要充分，要防止氧化脱碳。始锻温度可以适当提高，以提高毛坯的塑性。在第一、二次锻打时，尽量采用轻锤快打，以免锻造时产生破裂。每次锻打变形量控制在 5% 左右，改形锻打时变形量可适当增大到 10% ~ 15%。
3. 锻造时模坯冷到终锻温度，应及时停锻，重新回炉加热后继续锻打。锻后必须缓冷。始锻温度过高、终锻温度过低、变形量过大、加热速度太快等，会使模坯出现表面裂纹、中心裂纹、轴向裂纹和角裂等缺陷。锻造后要缓慢冷却，严禁水冷、空冷。

5. 钢结硬质合金的力学性能

钢结硬质合金的性能介于钢和硬质合金之间，既具有钢的高强韧性，又具有硬质合金的高硬度、高耐磨性。但与合金工具钢相比，它仍是一种脆性材料。

（1）常用钢结硬质合金的力学性能（表 7-62）

表 7-62 常用钢结硬质合金的力学性能

类型	牌号	密度/（g/cm ³ ）	硬度 HRC		σ_{bb} /MPa	a_K /（J/cm ² ）
			退火状态	淬火、回火状态		
WC 型	TLMW50	10. 21 ~ 10. 37	35 ~ 40	66 ~ 68	≥2000	≥8. 0
	TMW50	10. 20	35 ~ 40	63	1770 ~ 2150	7. 0 ~ 10
	GJW50	10. 20 ~ 10. 30	35 ~ 38	65 ~ 66	1520 ~ 2200	7. 1
	GW50	10. 30 ~ 10. 60	35 ~ 42	68 ~ 72	2300 ~ 2800	12
TiC 型	GT35	6. 40 ~ 6. 60	39 ~ 46	67 ~ 69	1300 ~ 2300	5. 0 ~ 8. 0
	R5	6. 35 ~ 6. 45	44 ~ 48	68 ~ 69	1176 ~ 1370	2. 9
	D1	6. 90 ~ 7. 10	40 ~ 48	66 ~ 69	1370 ~ 1570	4. 0 ~ 5. 0
	T1	6. 60 ~ 6. 80	44 ~ 48	68 ~ 72	1370 ~ 1470	2. 9 ~ 5. 0

（2）常用国产模具用钢结硬质合金与国外相近牌号的性能对比（表 7-63）

表 7-63 常用国产模具用钢结硬质合金与国外相近牌号的性能对比

牌号	密度/（g/cm ³ ）	硬度 HRC		抗弯强度① /MPa	冲击初度/ （J/cm ² ）	临界温度/℃	
		退火态	淬火态			Ac ₁	Ac ₃
GT35	6. 40 ~ 6. 60	39 ~ 46	68 ~ 72	1400 ~ 1800	5. 0 ~ 8. 0	740	770
美国 Ferro - TiC - C	6. 60	40	70	206			
荷兰 Ferro - TiC - C 特	6. 60	38 ~ 42	69 ~ 72	221 ~ 226			
德国 Ferro - TiC - C 特	6. 60	40 ~ 44	66 ~ 73				
GT33	6. 40 ~ 6. 60	38 ~ 45	67 ~ 70	1400	4. 0		

(续)

牌号	密度/ (g/cm ³)	硬度 HRC		抗弯强度 ^① /MPa	冲击初度/ (J/cm ²)	临界温度/℃	
		退火态	淬火态			Ac ₁	Ac ₃
R5	6.35 ~ 6.45	44 ~ 48	70 ~ 73	1200 ~ 1400	2.9	780	
D1	6.90 ~ 7.10	40 ~ 48	69 ~ 73	1400 ~ 1600	4.0 ~ 5.0	780	
T1	6.60 ~ 6.80	44 ~ 48	68 ~ 72	1300 ~ 1500	3.0 ~ 5.0 ^②	780	
L	6.50	39 ~ 43	68 ~ 70	1500 ~ 2000			
G		40 ~ 43	69 ~ 73	1500 ~ 1900			
ST60	5.80 ~ 5.84		70	1540	26.0 ~ 40.0		
荷兰 Ferro - TiC - U70	5.1	供货 68 ~ 70					
GJW50	10.2 ~ 10.30	35 ~ 38	65 ~ 66	1520 ~ 2200	7.1	760	810
TLMW50	10.21 ~ 10.37	35 ~ 40	66 ~ 68	2000	≥8.0	761	788
TMW50	10.20	35 ~ 40	63	1770 ~ 2150	7.0 ~ 10.0		
TW50	10.20			1830	11.2		
T10W50				2950	12.0 ~ 15.0		
W50	10.20 ~ 10.40	38 ~ 42	66 ~ 68	≥2000	≥8.0		
GW50	10.20 ~ 10.30	38 ~ 43	69 ~ 70	1700 ~ 2300	12.0 ^②	745	790
Cr1Mo2W50	10.23 ~ 10.35			1870	6.5		

① 国产模具用钢结硬质合金抗弯强度是指淬火态性能。

② 为淬火态性能。

(3) DT 合金的力学性能 (表 7-64)

表 7-64 DT 合金的力学性能

性 能	退火态	淬火、回火态	等温淬火态
硬度 HRC	32 ~ 36	62 ~ 64 ^①	55 ~ 62
抗弯强度/MPa		2450 ~ 3530	3140 ~ 3720
抗压强度/MPa		3920 ~ 4120	2350 ~ 2740
抗拉强度/MPa		1470 ~ 1570	—
冲击初度 (J/cm ²)		147 ~ 196	176 ~ 246
弹性模量/GPa		265 ~ 274	265 ~ 274
切变模量/GPa		94 ~ 98	94 ~ 98
泊松比		0.39	0.39
抗热裂性 (1000℃ ⇌ 水冷)		循环 20 次以上	循环 20 次以上

① DT 合金淬火后硬度为 68HRC。

(4) DT 合金与其他钢结硬质合金的性能比较 (表 7-65)

表 7-65 DT 合金与其他钢结硬质合金的性能比较

合金牌号	硬质相类型	硬度 HRC		密度 / (g/cm ³)	抗弯强度 /MPa	冲击韧度 / (J/cm ²)
		加工态	使用态			
DT 合金	WC	32 ~ 36	62 ~ 64	9. 7	2450 ~ 3530	147 ~ 196
TLMW50	WC	35 ~ 42	66 ~ 68	10. 2	1960	78 ~ 98
GT35	TiC	39 ~ 46	67 ~ 69	6. 5	1372 ~ 1764	58 ~ 59

(5) DT 大负荷碳化钨钢结硬质合金与美国钢结硬质合金比较 (表 7-66)

表 7-66 DT 大负荷碳化钨钢结硬质合金与美国钢结硬质合金比较

合金牌号	硬质相类型	硬度 HRC		抗弯强度 /MPa	弹性模量/MPa	抗热裂性/次数
		加工态	使用态			
DT 合金	WC	32 ~ 36	62 ~ 64	3600 ~ 3800	2.8×10^5	20
G	TiC	40	69	1900 ~ 2280	3.0×10^5	4
GM	TiC	45	68	1750 ~ 2100	3.0×10^5	1
SK	TiC	35	64	3000 ~ 3500	2.7×10^5	15

注：DT 大负荷碳化钨钢结硬质合金 (WC 质量分数为 40%)，其特点是在保持足够的硬度、耐磨性的基础上，大幅度提高了强度和韧性，在急冷、急热的热交变冲击下有极好的抗热裂能力。组织中，硬质颗粒尺寸细小、均匀，弥散分布，与其相比，TLMW50 及 GT35 等钢结硬质合金中，硬质颗粒呈明显的聚集状态，分布均匀度较差。

6. 钢结硬质合金的应用

(1) 钢结硬质合金的应用特点 (表 7-67)

表 7-67 钢结硬质合金的应用特点

应用特点		性 能
工艺特点	可加工	1) 钢结硬质合金因为具有钢的特性，在进行退火软化后可进行车、铣、刨、钻、铰、攻螺纹等机械加工。机械加工时，应采用低转速大背吃刀量和中等进给速度，不宜采用切削液润滑，以免冷却过激引起硬化甚至开裂。由于导热性差、硬度高、磨削困难，所以在淬火前应将模具加工至最终尺寸或留有极少余量，以便淬火后不再磨削或只稍微研磨即可 2) 钢结硬质合金具有可锻性，且烧结态的合金必须经过锻造成形，提高合金的密度，同时降低严重的碳化物偏析
	可进行热处理	钢结硬质合金经过软化后才能进行机械加工，又必须进行淬火、回火处理后才能使用。在加热、冷却过程中一定数量的硬质相颗粒会溶解到钢的基体中，或者从钢的基体中析出一定量的碳化物颗粒。热处理的目的主要是通过改变钢基体的组织结构来改变合金的性能
	可焊接	在制造模具时可以采用焊接连接或镶嵌等方法将合金和钢制模具外壳连接起来，制成组合式模具

(续)

应用特点		性 能
使用性能 缺陷	不能承受较大的冲击载荷	钢结硬质合金模具不能承受较大的冲击载荷，在用作凹模时，应尽量减少模具承受的拉伸应力。由于断裂韧度较低，在模具使用过程中，会因卡模等产生裂纹以致扩展、碎裂
	生产工艺复杂	与模具钢相比，钢结硬质合金可使模具的使用寿命提高数倍甚至上百倍。但生产工艺复杂，因此只有在进行大批量生产时比较适用。在冲模、冷挤压模、整形模、冷镦模和热作模具上得到广泛应用

(2) 常用钢结硬质合金的使用性能及用途（表 7-68）

表 7-68 常用钢结硬质合金的使用性能及用途

牌号	使用性能	用 途
R5	具有较高的硬度和耐磨性，有二次硬化现象，耐回火、抗氧化，且具有一定的耐蚀性	用于抗氧化、耐腐蚀模具零部件及中温热作模具
T1 D1	具有较高的硬度和耐磨性，有二次硬化现象，且有一定的耐热性	用于热作模具，如热挤压模等
GT35	具有较高的硬度和耐磨性，但耐高温性和耐蚀性差	用于冷镦模、冷挤压模、冲模等冷作模具
GW50 GJW50	具有钢的可锻性和可加工性及热处理性能，具有较高的硬度和耐磨性	用于冷镦模、冷挤压模、冲模等冷作模具

(3) 钢结硬质合金应用情况比较（表 7-69）

表 7-69 钢结硬质合金应用情况比较

序号	模具名称	工具钢模具及寿命/万件（次）	钢结硬质合金模具寿命/万件（次）	提高倍数
1	冷镦 M4、M5 半圆头模具	T8A；8	250	31
2	冷镦 M22 六角螺母模具	Cr12MoV；0.4	22.5	56
3	铁心（035H12 硅钢片）冲裁模	Cr12；30	625	20.8
4	冷挤压凹模	Cr12MoV；1.5	200	133
5	冷挤压轮胎螺钉凹模	Cr12；0.2	1	5
6	冷挤压链条滚子凹模	W18Cr4V；2	10	5
7	φ6mm×20mm 铆钉冷挤压模	T10；10	60	6
8	防尘盖成形凹模	GCr15；0.5	15	30

(4) DT 合金制垫圈冲裁模应用及使用寿命（表 7-70）

表 7-70 DT 合金制垫圈冲裁模应用及使用寿命

模具材料	使用条件		使用寿命			失效形式
	设备公称压力 / ×9.8kN	凸模允许磨耗量 /mm	刃磨寿命 /万次	刃磨量/mm	总寿命 /万次	
Cr12	100	10.5	2.3	0.4 (12 次)	27.6	磨损
GW50 钢结硬质合金			13.5	—	—	崩刃碎裂
DT 合金			30	0.2 (25 次)	750	磨损

(5) DT 合金制 A071 - 2 级电动机定、转子片复合落料模的使用寿命 (表 7-71)

表 7-71 DT 合金制 A071 - 2 级电动机定、转子片复合落料模的使用寿命

模具材料	设备公称压力 / ×9.8kN	使用寿命			失效形式
		刃磨寿命/万次	刃磨次数/次	总寿命/万次	
Cr12	63	1	36	36	磨损
DT 合金		10	60	600	磨损

(6) DT 合金制 E、T 形铁心 (0.35H12 硅钢片) 冲裁模的使用寿命 (表 7-72)

表 7-72 DT 合金制 E、T 形铁心 (0.35H12 硅钢片) 冲裁模的使用寿命

模具材料	刃磨寿命/万次	总寿命/万次
Cr12	0.5	30.0
YG20C	31.0	365.0
GT35	32.0	625.0
DT 合金	25.0	690.0

(7) 不同模具材料制冷镦 M4、M5 半圆头螺钉模具的寿命比较 (表 7-73)

表 7-73 不同模具材料制冷镦 M4、M5 半圆头螺钉模具的寿命比较

模具材料	每套模具总 寿命/万件	模具失效形式	一套模具材料 成本费/元	1 万件产品所分摊的 模具材料费用/元
T10A	8	磨损 0.05mm	3.12	0.39
DT 合金	250	磨损 0.05mm	15.02	0.06
YG20C	150	破裂	推测最低 15.00	0.10

7.4 非铁金属及合金

非铁金属及合金模具材料的应用日益增多，尤其广泛地用于仪器仪表、电子通信、汽车、轻工、塑料制品及工艺美术等行业的新产品试制。非铁金属及合金模具材料主要

包括低熔点合金模具材料、锌合金模具材料、超塑性合金模具材料、铜合金模具材料、铝合金模具材料 and 高温合金模具材料等。

7.4.1 低熔点合金

低熔点合金是指熔点在 300℃ 以下的金属及其合金，通常由 Bi、Sn、Pb、In 等低熔点金属元素组成。这些合金常用来制造塑料模、拉深模和成形模。

1. 低熔点合金模具材料的特点（表 7-74）

表 7-74 低熔点合金模具材料的特点

工 艺 特 点	材 料 应 用
工艺简单，制造周期短	铸造工艺简单，周期短，适用于新产品的试制和多品种、小批量生产，可解决钢制模具周期长的问题，有利于新产品的开发。特别适用于薄板冲压件和不规则曲面的冲压件
凸模和凹模可以采用同一个样模	铸模时凸模和凹模可以采用同一个样模，一次性铸成，不需要研配，模具调试方便，可以在机床上直接对模具进行修整
制造成本低，合金材料可反复重熔使用	低熔点合金模具的制造成本低，合金材料可以反复重熔使用，制造工艺简化

2. 常用低熔点合金模具材料的化学成分（表 7-75）

表 7-75 常用低熔点合金模具材料的化学成分

合 金	化学成分（质量分数，%）					熔点 /℃	硬度 HRC
	Bi	Sn	Cd	Pb	In		
Bi - Pb	55.5			44.5		124	20
Bi - Sn	58	42				138.5	
Bi - Cd	60		40			144	
Sn - Pb		61.9		38.1		183	
Pb - Cd			17.5	82.5		248	
Sn - Cd		67.8	32.2			176	
Bi - Pb - Sn	52	17		31		95	
Sn - Pb - Cd		49.8	18.2	32		145	
Bi - Sn - Cd	53.9	25.9	20.2			102.5	
Bi - Pb - Cd	51.7		8.1	40.2		91.5	
Bi - Pb - In	57			17	26	79	
Bi - Pb - Sn	46	34		20		100	
Bi - Pb - Sn	50	18.5		31.5		227	
Bi - Pb - Sn	52.5	15.5		32		95	

(续)

合 金	化学成分 (质量分数, %)					熔点 /℃	硬度 HRC
	Bi	Sn	Cd	Pb	In		
Bi - Pb - Sn - Cd	50	13.3	10	26.7		70	9.2
Bi - Pb - Sn - Cd	42	11	8	38		88	
Bi - Pb - Sn - In	49	12		18	21	58	
Bi - Pb - Sn - Cd - In	45	8	5	23	19	47	
Bi - Pb - Sn - Cd - In	48	13	10	25	4	65	

注：铋 (Bi) 是稀有金属，通过在铋合金中加入其他元素来降低铋含量，以改善性能，可使合金的胀缩性接近于零，提高精度。为了少用或不用铋，也有其他低熔点合金材料得到了应用。随着生产技术的发展，低熔点合金也在不断地发展以适应需要。主要的发展趋势是提高合金的熔点，以提高模具的使用寿命，少用或不用铋，可解决铋供应紧张和价格比较昂贵的问题。

3. 低熔点合金模具材料的性能

1) 常用低熔点合金模具材料的性能 (表 7-76)

表 7-76 常用低熔点合金模具材料的力学性能

合金牌号	化学成分 (质量分数, %)				熔点 /℃	胀缩率 (%)	硬度 HBW	抗拉强度 R_m /MPa
	Bi	Sn	Sb	Pb				
Bi - Sn - Sb	57	42	1		138	+0.05	20	63
Sn - Bi - Sb	44	50	6		139 ~ 170	-0.08	25	95
Sn - Bi - Sb	15	78	7		199 ~ 219	-0.2	30	106
Bi - Sn - Pb - Sb	50	13.3	10	26.7	200 ~ 205		24	60
Bi - Sn	40	60			138 ~ 155	0	22	

2) 常用低熔点合金模具材料供货商品的主要性能 (表 7-77)

表 7-77 常用低熔点合金模具材料供货商品的主要性能

参考商品名称 (合金类别)	熔点 /℃	密度 / (g/cm ³)	硬度 HBW	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A (%)	胀缩率 (%)	主要用途
Cerro. 117 (铋基多元合金)	47	8.9	12	38	1.5	-0.0002	
Cerrobend (铋基多元合金)	70	9.4	9.2	41	200	+0.0051	电火花穿孔用电极装夹; 浇注仿形线电极用电气靠模
Cerrosafe (铋基多元合金)	70 ~ 90	9.4	9	38	220	+0.0022	

(续)

参考商品名称 (合金类别)	熔点 /℃	密度 / (g/cm ³)	硬度 HBW	抗拉强度 <i>R_m</i> /MPa	断后伸长率 <i>A</i> (%)	胀缩率 (%)	主要用途
Cerromatrix (铋基多元合金)	103 ~ 227	9.5	19	91	<1	+0.0051	固定冲模的凸模、凹模、导套
Cerrobaze (铋铅合金)	124	10.3	10.2	44	60 ~ 70	+0.0022	
Cerrottrue (铋锡合金)	138	8.7	22	55	200	+0.0005	浇注成形模型面; 电铸模的衬垫料
Cerrocact (锡铋合金)	130 ~ 170	8.2	22	55	200	-0.0001	

3) 低熔点合金模具材料供货商品应具有的使用性能 (表 7-78)

表 7-78 低熔点合金模具材料供货商品应具有的使用性能

应具有的性能	工 艺 要 求
容易熔化	合金易熔化, 合金液流动性好, 充填能力强, 便于制模, 成形清晰
胀缩率小	合金胀缩率小, 模具型腔间隙和制模精度高, 对于复合结构的低熔点合金模具, 要求合金具有一定的冷凝胀性, 以便固定模具的镶块及其他部件
具有一定的强度	具有一定的强度, 与工件不粘连, 便于脱模

4. 其他低熔点合金模具材料 (表 7-79)

表 7-79 其他低熔点合金模具材料的化学成分

合金种类	化学成分 (质量分数, %)							熔点 /℃
	Bi	Sn	Pb	Cd	Zn	Sb	Ag	
铅基三元合金	21.0	37.0	42.0					120 ~ 152
锡基三元合金	5.0	45.0	32.0	18.0				132 ~ 139
锡基三元合金		51.2	30.6	18.2				142
铅基三元合金	12.6	39.9	47.5					145 ~ 176
锡镉合金		67.75		32.25				177
锡铅合金		61.86	38.14			13.0		183
锡锌合金		91.0			9.0			199
锡银合金		96.5					3.5	221
铅铋合金			87.0			13.0		247
铅镉合金			82.5	17.5				248

注: 单熔点的为共晶型合金, 其余为非共晶型合金。

5. 低熔点合金的应用

1) 长期以来, 低熔点合金主要在医疗上用来制作特定形状的防辐射专用挡块; 也可用于制作电子电气自动控制的热敏元件、保险材料、火灾报警装置等; 在折弯金属管时, 作为填充物料; 制作金相试样时, 作为嵌镶剂。

2) 低熔点合金模具材料用于制作拖拉机与汽车拉深、成形等模具。因其具有容易制造、成本低等许多特点, 常用于制作生产批量较少的薄板成形模、薄板冲模和大型切边、冲孔、活动弯形模具。并可以用于固定凸模、凹模、导套及浇注卸料板导向孔等。

3) 低熔点合金模具的成形工艺有铸造加压法和机上熔压法。低熔点合金模具一般可用于冲压 1~3mm 铝、铜、不锈钢、钛合金和普通碳素钢板。冲压 1mm 厚的 08Al 钢板可达 1000~3000 件。

4) 低熔点合金模具材料熔点低, 因此强度也低, 且 Bi 价格昂贵, 资源匮乏, 使这类合金模具的推广受到一定的限制。

7.4.2 锌合金

以锌为基加入其他元素如 Al、Cu、Mg、Cd、Pb、Ti 等组成的合金。熔融法制备, 压铸或压力加工成材 (型)。锌合金是为克服低熔点合金所存在的强度低、硬度低、寿命低的缺点而发展起来的模具材料, 多用于制造冲裁模、拉深模、修边模、弯曲模、吹塑和注射模具的型腔或大型注射模具模体的组合件以及其他简易模具。

1. 锌合金的特点 (表 7-80)

表 7-80 锌合金的特点

工 艺 特 点	使 用 性 能
锌合金属于一种软质材料, 作为冲裁模刃口来冲裁比自身强度、硬度高的钢板, 其原理不同于钢模冲裁模冲裁	锌合金熔点低 (约 380℃), 熔液流动性好, 制备技术比较简单, 易熔焊、钎焊和塑性加工, 强度、硬度接近于低碳钢, 耐压性、耐磨性比较好
锌合金冲裁模的间隙值很小, 其初始间隙为零, 称为无间隙冲裁模。其过程可以看成是光洁冲裁与挤压冲裁相复合的形式, 是单向裂纹扩展分离的冲裁机理	有良好的重熔性和重铸性, 废料便于回收重熔反复利用, 且性能变化不大。机械加工性能好, 容易得到光亮的表面。价格比低熔点合金便宜, 原料供应方便
对于落料工序, 凹模使用锌合金, 凸模仍用钢模; 对于冲孔工序, 凸模使用锌合金, 凹模仍用钢模。冲裁厚度为 0.1~0.5mm, 增大轮廓尺寸可达 7000mm。冲裁材质有金属、非金属等	有一定的收缩性, 且收缩不够稳定, 蠕变强度低, 耐蚀性较差, 易发生自然时效引起尺寸变化, 所以不适于制造高精度及大型的成形模具

注: 1. 锌合金按制造工艺可分为铸造锌合金和变形锌合金; 按成分可分为锌铝共晶合金、锌铝共析合金和其他成分的锌铝合金。

2. 在钢板冲裁模冲裁过程中, 凸、凹模之间有一个合理的间隙值, 以使冲裁力最小、冲裁件断面质量符合技术要求以及使模具使用寿命长为标准, 其工作过程分为对象材料的弹性变形、塑性变形、裁裂和分离四个阶段。

2. 锌合金的化学成分和性能

(1) 常用国产锌合金的化学成分和性能 (表 7-81)

表 7-81 常用国产锌合金的化学成分和性能

合金	化学成分 (质量分数, %)			抗拉强度	断后伸长率	硬度	密度	熔点	凝固收
	Al	Cu	Mg	R_m /MPa	A (%)	HBW	/(g/cm ³)	/℃	缩率 (%)
Zn-4Al-3Cu	4	3	0.03 ~ 0.08	240 ~ 280	1.3 ~ 2	120 ~ 130	6.7	380	1 ~ 1.2
Zn-4Al-1Cu	4	1	0.03 ~ 0.08	240 ~ 280		110	6.7	380	1 ~ 1.2
Zn-12Al-1Cu	10.5 ~ 11.5	0.5 ~ 1.25	0.015 ~ 0.03	280 ~ 350	1 ~ 3	105 ~ 125	6.03	377 ~ 432	
Zn-27Al-2Cu	25 ~ 28	0.01 ~ 2.5	0.01 ~ 0.02	400 ~ 450	3 ~ 6	110 ~ 125	5.01	376 ~ 493	

(2) 国外代表性锌合金性能的比较 (表 7-82)

表 7-82 国外代表性锌合金性能的比较

国家及牌号	熔点 /℃	密度 /(g/cm ³)	硬度 HBW	抗拉强度 /MPa	抗压强度 /MPa	抗剪强度 /MPa	断后伸长率 A (%)	线膨胀系数 / $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	凝固收 缩率 (%)
日本 ZAS	380	6.7	100 ~ 115	245 ~ 295	540 ~ 590	235	1.1 ~ 3.4	26	1.1 ~ 1.2
美国 Kirksite	380	6.7	100	260	410 ~ 518	240	3.0	27	0.7 ~ 1.2
美国 Gmoo-dei	399 ~ 403		130 ~ 150	255 ~ 294			3.0		0.91
英国 Kayem	380	6.7	109	230	755		3.0	28	1.1
英国 Kayem-2	358	6.6	140	146	672		1.25		1.1
德国 Z-430	390	6.7	60 ~ 70	216 ~ 235		295		27	1.1
前苏联 LL1AM-53			100 ~ 110	196 ~ 235	540 ~ 638		1.0		
前苏联 Mazak			110 ~ 115	216 ~ 255	588 ~ 688				
中国 ZMC	370 ~ 415	6.2	≥ 150	295	695 ~ 888	295 ~ 310		25.8	0.74

3. 锌合金的超细化处理工艺 (表 7-83)

表 7-83 锌合金的超细化处理工艺

工 艺		工 艺 参 数
超塑性合金超细化处理		按质量配置合金→熔炼→水冷铜模浇注→均匀化退火→轧制或热处理超细化处理。处理后锌铝共晶合金具有超塑性
超细化处理工艺	ZnAl122 超塑热处理工艺	加热温度 360℃, 保温 1h 后盐水冷至 250℃, 保温 0.5h 后空冷
	ZnAl4-1 超塑热处理工艺	加热温度 (310±10)℃, 保温 7h 后空冷

注: 1. 锌合金模具和锌合金超塑成形所需设备能量低、模具寿命长, 材料利用率高 (90% ~ 95%) 和成本低, 模具型腔精度高, 属于无、少切削加工的新技术。

2. 锌合金的超细化处理就是它的正常组织 ($\alpha + \beta$ 相) 的晶粒尺寸达到微细化, 然后在超塑性温度下以超塑性变形速度变形, 可获得 2000% ~ 3000% 的伸长率。

4. 锌合金的应用

锌合金是为克服低熔点合金所存在的强度低、硬度低、寿命低的缺点而发展起来的模具材料, 主要用于制造冲裁模的凸模或凹模, 拉深模的凸模和凹模、弯曲模的凸模和凹模、修边模、多冲头冲孔模、冲孔落料复合模及吸塑、吹塑和注射模的型腔或大型注射模模体的组合件, 钢带 (皮) 冲模的凸、凹模的固定板, 钢带 (皮) 层叠冲模的凹模基体与其他简易模具。

7.4.3 超塑性合金

超塑性是指材料在一定的内部 (组织) 条件 (如晶粒尺寸及形状、相变等) 和外部 (环境) 条件下 (如温度、应变速率等), 呈现出异常低的流变抗力、异常高的流变性能的现象。其特点是有大伸长率, 无缩颈 (小缩颈), 小应力, 易成形。超塑性成形工艺在航天、汽车、车厢制造等部门中广泛采用, 所用的超塑性合金包括铝、镁、钛、碳素钢、不锈钢和高温合金等。

1. 超塑性合金的化学成分与性能

(1) 常用的模具用超塑性非铁性合金的化学成分 (表 7-84)

表 7-84 常用的模具用超塑性非铁合金的化学成分

超塑性合金牌号	化学成分 (质量分数, %)				
	Al	Cu	Mg	Pb	Zn
ZAS (日本)	3.9 ~ 4.3	2.85 ~ 3.35	0.03 ~ 0.06	—	余量
ZnAl22	20 ~ 24	0.4 ~ 1.0	0.001 ~ 0.04	—	余量
ZnAl22Cu0.5Mg0.02	21 ~ 22	0.45 ~ 0.55	0.015 ~ 0.03	—	余量
ZnAl4-1	3.5 ~ 4.5	0.73 ~ 1.25	0.03 ~ 0.08	—	余量
HPb59-1	—	57.0 ~ 60.0	—	0.8 ~ 1.9	—

注: 在模具制造中应用较多的超塑性非铁合金为共析型锌铝合金 ZnAl22。为改善 ZnAl22 合金的性能, 加入其他微量元素 Cu、Mg、Ti、Mn、Cr、Si 等。如英国 MISA 的 Al2 合金, 具有高温硬度, 常用于注射成型尼龙、氯化橡胶等; 铅黄铜材料供应比较方便, 在供应状态已有超塑性, 不必另行超塑性处理。经过超塑性处理而采取超塑性成形工艺制成的零件模具称为超塑性合金模具。

(2) 常用的模具用超塑性非铁合金的力学性能 (表 7-85)

表 7-85 常用的模具用超塑性非铁合金的力学性能

超塑性合金牌号	在超塑性温度时			超塑性处理后常温			强化处理后		
	温度 /℃	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 A (%)	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 A (%)	硬度 HBW	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 A (%)	硬度 HBW
ZAS (日本)	250 ± 10	9.5	≥2000						
ZnAl122	250	2 ~ 8	>1000	295 ~ 325	28 ~ 33	59 ~ 79	392 ~ 422	7 ~ 11	84 ~ 110
ZnAl122Cu0.5 Mg0.02	250 ± 10	≤6	≥1000	≥420	≥10	≥120			
ZnAl14-1	340 ± 10	5.5	≈2000						
HPh59-1	620	23 ~ 49							

2. 实现超塑性的主要条件 (表 7-86)

表 7-86 实现超塑性的主要条件

类 型	主 要 条 件
组织超塑性	组织超塑性的主要条件是一定的变形温度和低的应变速率,这时合金本身还要具有极为细小的等轴晶粒(直径在 5 μm 以下),这种超塑性称为超细晶粒超塑性。超塑性非铁合金属于组织超塑性。组织超细化是组织超塑性的关键。超塑性合金要经过超塑性处理,在超塑性成形后要进行强化处理以延长模具的使用寿命。超塑性非铁合金的缺点是制成的模具工作零件强度较低。超塑性合金作为模具材料的主要用途是制作型腔模的型腔
相变超塑性	钢在一定的温度下组织中发生相变,在相变点附近加工也能完成超塑性,称为相变超塑性。产生超塑性的相变过程,无论是扩散型的还是非扩散型的,都具有可逆性,都可以在外部低的应力作用下,通过温度循环而使金属的伸长率或变形量积累而增高到惊人的程度。因此,纯金属的同素异构转变,钢中的珠光体相变、贝氏体相变以及具有可逆性的马氏体相变等都可以通过温度循环产生超塑性

3. 超塑性成形工艺的类型 (表 7-87)

表 7-87 超塑性成形工艺的类型

类 型	工 艺 特 点
超塑性气胀成形	超塑性气胀成形是用气体的压力使板坯料(也有管坯料或其他形状坯料)成形为壳型件,如仪表壳、抛物面天线、球形容器、美术浮雕等。美国 Superform 公司在超塑性气胀成形及其应用方面达到了较高水平,常年批量生产超塑性气胀成形的壳型零件,其整个生产过程都实现了计算机控制,成形的零件在航空、航天、火车、汽车、建筑等行业都得到应用

(续)

类 型	工 艺 特 点
超塑性体积成形	超塑性体积成形包括不同的方式(例如模锻、挤压模等),主要是利用了材料在超塑性条件下流变抗力低、流动性好等特点。一般情况下,超塑性体积成形中模具与成形件处于相同的温度,因此它也属于等温成形的范畴,只是超塑性成形中对材料、应变速率及温度有更严格的要求。俄罗斯超塑性研究所首创的回转等温超塑性成形工艺和设备在成形某些轴对称零件时具有其他工艺不可比拟的优越性。这种方法利用自由运动的辊压轮对坯料施加载荷使其变形,使整体变形变为局部变形,降低了载荷,扩大了超塑性工艺的应用范围。采用这样的方法成形出了钛合金、镍基高温合金的大型盘件以及汽车轮毂等用其他工艺难于成形的零件

4. 超塑性成形工艺的应用

1) 超塑性加工具有很大的实用价值,只要很小的压力就能获得形状非常复杂的制件。用于难变形的合金,采用超塑法所需的压力很小,只相当于正常压力加工时的几分之一到几十分之一,从而节省了能源和设备。使用超塑性加工制造零件的另一优点是可以一次成形,省掉了机械加工、铆、焊等工序,达到节约原材料和降低成本的目的。

2) 在模压超塑性合金薄板时,只需要具备一种阴模或阳模即可,节省一半模具费用。超塑性加工的缺点是加工时间较长,由普通热模锻的几秒增至几分钟。

3) 超塑性的铝合金已经商品化,如英国的 Supral100 (Al-6Cu-0.4Zr) 和加拿大的 Alcan08050 (Al-5Ca-5Zn)。铝板可在 300~600℃ 时利用超塑性成形为复杂形状,所用模具费用降低至普通压力加工模具费用的十分之一,因此它具有和薄钢板、铝压铸件及塑料模压件相竞争的能力。

7.4.4 其他非铁金属合金

1. 铜合金

铜合金具有良好的导热性、尺寸稳定性和加工性能,适用于钢铁压铸模、不锈钢拉深模等模具。目前主要应用的有铜铍合金、铜钴铍合金、铜铬钴钒合金和铜铬钴镁合金。铜铍合金主要制造锌合金压铸模和塑料模,铜钴铍合金多用于制造形状简单而尺寸比较大的压铸模,铜铬钴钒合金和铜铬钴镁合金多用于制造小型压铸模。

(1) 铜铍合金

1) 铜铍合金的化学成分与性能 (表 7-88)

表 7-88 铜铍合金^①的化学成分与性能

合金	化学成分 (质量分数, %)			状态	硬度 HBW	屈服强度 R_{el}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	伸长率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$
	Be	Co	Si						
20C 合金	1.90 ~ 2.15	0.35 ~ 0.65	0.20 ~ 0.35	铸态	137 ~ 165	280 ~ 350	490 ~ 595	15 ~ 30	20 ~ 25
				固溶 + 时效	352 ~ 426	805 ~ 1085	1050 ~ 1225	1 ~ 3	<2

(续)

合金	化学成分 (质量分数,%)			状态	硬度	屈服强度	抗拉强度	伸长率	断面收缩
	Be	Co	Si		HBW	R_{el}/MPa	R_m/MPa	$A(\%)$	率 $Z(\%)$
275C 合金	2.50 ~	0.35 ~	0.20 ~	铸态	150 ~ 185	350 ~ 420	630 ~ 735	15 ~ 25	18 ~ 25
	2.75	0.65	0.35	固溶 + 时效	293 ~ 460	770 ~ 910	980 ~ 1155	1	< 1

① 铜铍合金是一种过饱和固溶体铜基合金，是力学性能、物理性能、化学性能及耐蚀性良好结合的非铁合金，经固溶和时效处理后，具有与特殊钢相当的高强度、弹性极限、屈服强度和疲劳极限，同时又具有高的电导率、热导率，高硬度和耐磨性，高的蠕变抗力及耐蚀性，广泛应用于制造各类模具镶嵌件，替代钢材制作精度高、形状复杂的模具，焊接电极材料压铸机、注射成型机冲头，耐磨、耐蚀工件，微型电动机电刷，手机电池、计算机接插件，各类开关触点等，是国民经济建设中不可缺少的重要工业材料。

2) 铜铍合金的特点 (表 7-89)

表 7-89 铜铍合金的特点

性能特点	技 术 指 标
综合性能良好	铜铍合金是过饱和固溶体铜基合金，力学、物理、化学综合性能良好，合金密度为 $8.3\text{g}/\text{cm}^3$ ，电导率 $\geq 18\%$ IACS，热导率 $\geq 105\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，无磁性，硬度为 36 ~ 42HRC。固溶时效处理后具有很高的强度、耐磨性、耐热性、耐寒性、弹性极限和疲劳极限，弹性滞后小，撞击时无火花，易于焊接和钎焊
耐蚀性好	铜铍合金在大气、淡水和海水中耐蚀性极好，海水耐蚀速度为 $(1.1 \sim 1.4) \times 10^{-2}\text{mm}/\text{年}$ ，腐蚀深度为 $(10.9 \sim 13.8) \times 10^{-3}\text{mm}/\text{年}$ 。腐蚀后，合金强度、伸长率均无变化。在硫酸介质中，浓度 $< 80\%$ (质量分数) 的硫酸中 (室温) 年腐蚀深度为 0.0012 ~ 0.1175mm，浓度 $> 80\%$ 则腐蚀稍加快

3) 铜铍合金的热处理工艺 (表 7-90)

表 7-90 铜铍合金的热处理工艺

热处理工艺流程	工 艺 参 数
固溶处理	铜铍工件加热到 $800 \sim 815^\circ\text{C}$ ，并恒温 $2 \sim 3\text{h}$ ，使铍完全溶解于铜中，形成均匀分布状态
淬火	出炉后，将工件在水中急速冷却，使铍原子来不及扩散，形成过饱和状态
时效处理	在真空热处理炉中将过饱和状态的工件加热至较低的时效温度 $(340 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，因过饱和状态不稳定，额外的铍原子短距地扩散并析出，经保温 $2 \sim 3\text{h}$ ，析出的过量铍和铜将达到平衡，此时的机械性能明显提高

4) 铜铍合金的应用。铜铍合金具有优良的使用性能和工艺性能。常用来制造锌合金压铸模，不锈钢器皿的拉深模，注射成型模具的镶件、型芯、热流道冷却系统、导热嘴，吹塑模具的整体型腔、磨耗板等，也用于制造膜片、膜盒、弹簧管、弹簧等各种弹

性元件。

(2) 其他模具用铜合金的化学成分、性能及热处理 (表 7-91)

表 7-91 其他模具用铜合金的化学成分、性能与热处理规范

合金种类	化学成分 (质量分数, %)	热处理规范	抗拉强度 R_m /MPa
铜钴铍合金	CuBe: 2 Co: 0.5 ~ 1	700 ~ 850℃ 固溶 + 350 ~ 400℃ 时效	985
	CuBe: 0.5 ~ 1 Co: 2 ~ 3	900 ~ 1000℃ 固溶 + 470 ~ 490℃ 时效	755
铜铬锆钒合金	CuCr: 0.5 ~ 0.8 Zr: 0.2 ~ 0.5 V: 0.2 ~ 0.6	980℃ 水冷固溶 + 480℃ 时效	—
铜铬锆镁合金	CuCr: 0.25 ~ 0.6 Zr: 0.11 ~ 0.25 Mg: 0.03 ~ 0.1	960 ~ 980℃ 水冷固溶 + 430 ~ 480℃ 时效	—

2. 铝合金

在轻金属中, 铝合金在模具制造行业得到了广泛的应用。铝合金的熔点低, 具有良好的热传导性能、耐蚀性及机械加工工艺性, 并且具有合理的价格体积比, 易于回收, 材料的循环性比较好, 能充分利用环境资源。铝合金容易实现锻造和铸造, 锻造或铸造生产的铝合金材料都可以制造一些注射模、吹塑模等模具。铝合金按成分和工艺特点可分为变形铝合金和铸造铝合金两大类。

(1) 变形铝合金

1) 变形铝合金的分类 (表 7-92)

表 7-92 变形铝合金^①的分类

变形铝合金	主加元素	性 能
防锈铝	Cu、Mg 或 Mn	耐蚀性好, 塑性优良, 可通过冷变形进行强化, 不能进行热处理强化
硬铝	Cu、Mg	能热处理强化, 通过固溶处理 + 时效处理, 硬度较高
超硬铝	Cu、Mg 和 Zn	固溶时效后抗拉强度高达 600MPa
锻铝	Cu、Mg、Si	力学性能与硬铝相似, 热塑性较好, 能进行热处理强化

① 变形铝合金又可分为不能热处理强化铝合金和能热处理强化铝合金。

2) 常用变形铝合金的化学成分 (GB/T 3190—2008) (表 7-93)。

表 7-93 常用变形铝合金的化学成分

类别	合金 牌号	旧牌号	化学成分（质量分数，%）						
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	其他
防锈铝	5A05	LF5	0.50	0.50	0.10	0.30~0.60	4.8~5.5	0.20	
	3A21	LF21	0.60	0.70	0.20	1.00~1.60	0.05	0.10	Ti: 0.15
硬铝	2A11	LY11	0.70	0.70	3.80~4.80	0.40~0.80	0.40~0.80	0.30	Ni: 0.10; Ti: 0.15
	2A12	LY12	0.50	0.50	3.80~4.90	0.30~0.90	1.20~1.80	0.30	Ni: 0.10; Ti: 0.15
超硬铝	7A04	LC4	0.50	0.50	1.40~2.00	0.20~0.60	1.80~2.80	5.0~7.0	Cr: 0.10~0.25; Ti: 0.10
锻铝	2A50	LD5	0.70~1.20	0.70	1.80~2.60	0.40~0.80	0.40~0.80	0.30	Ni: 0.10; Ti: 0.15
	2A70	LD7	0.35	0.90~1.50	1.90~2.50	0.20	1.40~1.80	0.30	Ni: 0.90~1.50; Ti: 0.02~0.10

3) 常用变形铝合金的力学性能（表 7-94）。

表 7-94 常用变形铝合金的力学性能

类型	合金牌号	旧牌号	材料状态	力学性能（固溶 + 时效）		
				抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 A (%)	硬度 HBW
防锈铝	5A05	LF5	O	280	20	70
	3A21	LF21	O	130	20	30
硬铝	2A11	LY11	T4	420	15	100
	2A12	LY12	T4	480	11	131
超硬铝	7A04	LC4	T6	600	12	150
锻铝	2A50	LD5	T6	420	13	105
	2A70	LD7	T6	440	12	120

注：O 表示退火，T4 表示固溶处理 + 自然时效；T6 表示固溶处理 + 人工时效。

(2) 铸造铝合金

1) 常用铸造铝合金的化学成分（GB/T 1173—1995）（表 7-95）。

表 7-95 常用铸造铝合金^①的化学成分

类别	合金牌号	合金 代号	化学成分（质量分数，%）						
			Si	Cu	Mg	Zn	Mn	其他	Al
铝硅 合金	ZAlSi7Mg	ZL101	6.5~7.5		0.25~0.45				其余
	ZAlSi12	ZL102	10.0~13.0						其余
	ZAlSi9Mg	ZL104	8.0~10.5		0.17~0.35		0.2~0.5		其余
铝铜 合金	ZAlCu5Mn	ZL201		4.5~5.3			0.6~1.0	Ti: 0.15~ 0.35	其余
	ZAlCu4	ZL203		4.0~5.0					其余

(续)

类别	合金牌号	合金代号	化学成分 (质量分数,%)						
			Si	Cu	Mg	Zn	Mn	其他	Al
铝镁合金	ZAlMg10	ZL301			9.5 ~ 11.0				其余
	ZAlMg5Si1	ZL303	0.8 ~ 1.3		4.5 ~ 5.5		0.1 ~ 0.4		其余
铝锌合金	ZAlZn11Si7	ZL401	6.0 ~ 8.0		0.1 ~ 0.3	9.0 ~ 13.0			其余

① 按主加元素不同分为 Al-Si 系、Al-Cu 系、Al-Mg 系和 Al-Zn 系四类。

2) 常用铸造铝合金的力学性能 (表 7-96)。

表 7-96 常用铸造铝合金的力学性能

类别	合金牌号	合金代号	铸造方法	合金状态	力学性能 不低于		
					抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 A (%)	布氏硬度 HBW (5/250/30)
铝硅合金	ZAlSi7Mg	ZL101	S、R、J、K	F	155	2	50
			S、R、J、K	T2	135	2	45
			JB	T4	185	4	50
			S、R、K	T4	175	4	50
			J、JB	T5	205	2	60
			S、R、K	T5	195	2	60
			SB、RB、KB	T5	195	2	60
			SB、RB、KB	T6	225	1	70
			SB、RB、KB	T7	195	2	60
			SB、RB、KB	T8	155	3	55
	ZAlSi12	ZL102	SB、JB、RB、KB	F	145	4	50
			J	F	155	2	50
			SB、JB、RB、KB	T2	135	4	50
			J	T2	145	3	50
	ZAlSi9Mg	ZL104	S、J、R、K	F	145	2	50
			J	T1	195	1.5	65
			SB、RB、KB	T6	225	2	70
			J、JB	T6	235	2	70

(续)

类别	合金牌号	合金代号	铸造方法	合金状态	力学性能 不低于		
					抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 A (%)	布氏硬度 HBW (5/250/30)
铝铜合金	ZAlCu5Mn	ZL201	S、J、R、K	T4	295	8	70
			S、J、R、K	T5	335	4	90
			S	T7	315	2	80
	ZAlCu4	ZL203	S、R、K	T4	195	6	60
			J	T4	205	6	60
			S、R、K	T5	215	3	70
			J	T5	225	3	70
			铝镁合金				
ZAlMg10	ZL301	S、J、R	T4	280	10	60	
ZAlMg5Si1	ZL303	S、J、R、K	F	145	1	55	
铝锌合金	ZAlZn11Si7	ZL401	S、R、K	T1	195	2	80
			J	T1	245	1.5	90

注：1. 合金状态代号含义：F—铸态，T1—人工时效，T2—退火，T4—固熔处理加自然时效，T5—固熔处理加不完全人工时效，T6—固熔处理加完全人工时效，T7—固熔处理加稳定化处理，T8—固熔处理加软化处理。

2. 铸造方法代号含义：S—砂型铸造，J—金属型铸造，R—熔模铸造，K—壳型铸造，B—变质处理。

3) 德国常用的铝合金模具材料（表 7-97）。

表 7-97 德国常用的铝合金模具材料

锻造铝合金（DN1725part1）		铸造铝合金（DIN1725part2）	
非硬化	硬化	非硬化	硬化
AlMg3 AlMg4.5Mn	AlMgSi1 AlCuMg1 AlZn4.5Mg1 AlZnMgCu0.5 AlZnMgCu1.5 AlZnMgCu	G - AlSi12 G - AlSi9Cu3	G - AlSi7Mg G - AlSi10Mg（Cu） G - AlCu4Ti G - AlCu4TiMg

4) 铸造铝合金的热处理规范（表 7-98）。

表 7-98 铸造铝合金的热处理规范

工 艺	工 艺 规 范
固溶处理	将铝合金加热到 α 相区, 保温一定时间后在水中快冷, 获得单相过饱和固溶体组织的工艺 (或称为淬火)。铝合金固溶处理后, 强度和硬度并不立即升高, 而塑性有所上升。但固溶处理后在一定温度 (如室温) 下保持足够时间, 其强度和硬度会随时间延长显著提高, 而塑性明显降低, 称为时效
回归处理	将已经时效强化的铝合金, 重新加热到稍高于时效温度 (200 ~ 270℃) 经短时间保温, 使强化相重新溶入固溶体中, 然后在水中急冷, 使合金恢复到固溶处理状态的工艺。主要是便于对已发生变形的模具零件进行修复
形变热处理	形变热处理是将塑性变形的变形强化和热处理时的相变强化相结合, 使成形工艺与获得的最终性能统一起来的一种综合方法, 是变形与相变既互相影响又相互促进的一种工艺。合理的形变热处理工艺将有利于发挥材料潜力, 是金属材料强韧化的重要方法之一

(3) 铝合金在模具中的应用

1) 主要用于注射成型、树脂传递模塑成型及结构泡沫成型等为代表的低压成型模具, 如发泡聚苯乙烯模具、门窗型材挤出的定型模、结构泡沫塑料仪表板模具、定型模和阳模的定位器等。高强度铝合金也适用于制造模锻件与自由锻件和建筑、测量工具、量规、夹具以及低应力下的钻孔夹具和机械加工复制模型等。第三代铝合金已应用于大型注射模、汽车防冲板等。

2) 吹塑模具是铝合金在模具制造行业中最大的应用领域, 如瓶子、罐筒、体积可达 10m^3 的容器和玩具娃娃等。铝合金吹塑型腔不仅制造成本低, 而且比加工钢模具腔体节省 30% 的制造周期, 也可以制造具有较低应力 ($< 7\text{MPa}$) 的注射模和生产过程不太长的模具 (小于 100 000 次循环), 例如, 生产超市检验用的销售显示器的模具是钢铝组合模具, 模具基体用钢, 腔体嵌件使用铝合金。

3. 高温合金

高温合金是在 600 ~ 1200℃ 高温下能承受一定的应力并具有抗氧化或耐蚀性的合金。按基体元素主要可分为铁基高温合金、镍基高温合金和钴基高温合金。按制备工艺可分为变形高温合金、铸造高温合金和粉末冶金高温合金。按强化方式有固溶强化型、沉淀强化型、氧化物弥散强化型和纤维强化型等。

(1) 典型的铁基、镍基和钴基高温合金模具材料的化学成分 (表 7-99)

表 7-99 高温合金模具材料的化学成分

牌号	化学成分（质量分数，%）										工作温度 /℃
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Ti	Al	Co	Fe	
A-286（铁基）	0.05	1.35	0.5	15	20	1.25	2.0	0.2		其余	>650
Waspaloy（镍基）	0.08			19	其余	4.4	3.0	1.3	13.5		815~1000
Rene41（镍基）	0.10			15	其余	5.2	3.5	4.3	18.0		815~1000
S-816（钴基）	0.38			20	20	4			其余	4	≥1000

- 注：1. A-286 铁基合金经热处理后可被有效硬化，常用于热挤压黄铜模具，其使用寿命可达铬系热作模具钢的两倍以上。
2. Waspaloy 镍基高温合金的工作温度可达 815~1000℃，可用于挤压耐热钢零件或用于挤压钢管的凹模或芯棒等。
3. 钴基高温合金在 1000℃ 以上可保持很高的强度和抗氧化能力，S-816 合金经固溶处理和时效后，具有比镍基高温合金更高的疲劳抗力，多用于热挤压模具，可获得较高的使用寿命。

(2) 常用的钨钼基高温合金的化学成分（表 7-100）

表 7-100 常用的钨钼基高温合金的化学成分

牌号	化学成分（质量分数，%）							工作温度/℃
	W	Mo	Ti	Zr	C	Ni	Nb	
TZM		>99	0.5	0.08	0.03			>1000
AnViloy1150	95					3.5	1.5	>1000

注：钨钼基合金的特点是熔点很高，高温强度高，耐热性与耐蚀性较高，膨胀系数小，耐疲劳性好，塑性好，便于加工成形，不粘合熔融金属。但在 500℃ 以下易氧化，在再结晶温度以上将发生脆化。主要用于制造在较高温度下使用的模具，如铜合金、钢铁材料的压铸模和钛合金、耐热钢的热挤压模等。

(3) 高温合金的热处理规范（表 7-101）

表 7-101 高温合金的热处理规范

热处理工艺	工 艺 参 数
固溶处理	固溶处理温度一般为 1040~1220℃。合金在时效处理前多经过 1050~1100℃ 的中间处理，其目的是在晶界析出碳化物和 γ 相以改善晶界状态，与此同时有的合金还析出一些颗粒较大的 γ 相与时效处理时析出的细小 γ 相形成合理搭配
时效处理	时效处理温度一般为 700~1000℃，目的是使过饱和固溶体均匀析出 γ 相或碳化物（钴基合金）以提高高温强度

注：高温合金一般需经过热处理。沉淀强化型合金通常经过固溶处理和时效处理。固溶强化型合金只经过固溶处理。有些合金在时效处理前还要经过一两次中间处理。固溶处理首先是为了使第二相熔入合金基体，以便在时效处理时使碳化物（如钴基合金）等强化相均匀析出，其次是为了获得适宜的晶粒度以保证高温蠕变性能和持久性能。

(4) 高温合金模具材料的应用

1) 铁基、镍基和钴基高温合金的工作温度可达到 $650 \sim 1100^{\circ}\text{C}$ ，广泛应用于制造铜热挤压模、钛合金热压成形模等。

2) 钼基合金常用的有钼钛钨合金，在钼中加入质量分数分别为 $0.4\% \sim 0.5\%$ 、 $0.08\% \sim 0.10\%$ 和 $0.02\% \sim 0.03\%$ 的钛、钨和碳，适用于工作温度高于 900°C 的模具。

3) 钨基合金也是一种难熔金属合金，在钨中加入质量分数分别为 $5\% \sim 10\%$ 、 $8\% \sim 10\%$ 和 3% 的钼、钴和钛，适用于铜合金、钢铁压铸模，奥氏体耐热合金的挤压模等，可获得良好的使用效果。

7.5 其他模具材料

有机高分子材料、陶瓷材料、复合材料和功能材料等新型材料，在模具制造中得到广泛应用，而且简化了工艺，缩短了制造周期，降低了成本，成为模具工程材料的重要补充。

7.5.1 环氧塑料

环氧塑料是以环氧树脂为基材的塑料。环氧树脂泛指分子中含有两个或两个以上环氧基团的有机高分子化合物，除个别外，它们的相对分子质量都不高。环氧树脂的分子结构以分子链中含有活泼的环氧基团为特征，环氧基团可以位于分子链的末端、中间或成环状结构。由于分子结构中含有活泼的环氧基团，因此它们可与多种类型的固化剂发生交联反应而形成不熔的具有三向网状结构的高聚物。

1. 环氧塑料的主要成分

(1) 模具用环氧塑料的几种参考配方（表 7-102）

表 7-102 模具用环氧塑料的几种参考配方

组成部分	冲 模			注 射 模		
	材料	配比（质量比）	备注	材料	配比（质量比）	备注
粘结剂	环氧树脂 6101	100	三者选一	环氧树脂 634	17	
	环氧树脂 634	100		环氧树脂 6207	83	
	环氧树脂 637	100				
填充剂	铁粉（200 目）	250	三者选一	铝粉	220	二者选一
	三氧化二铝（200 目）	40		铝粉	150	
	石英粉（200 目）	20		铁粉	100	
	石英粉（200 目）	50		钢丝绒	适量	
增塑剂	邻苯二甲酸二丁酯	15 ~ 20				

(续)

组成部分	冲 模			注 射 模		
	材料	配比 (质量比)	备注	材料	配比 (质量比)	备注
固 化 剂	β-羟乙基乙二胺	16 ~ 18		顺丁烯二酸酐	48	
	聚酰胺 (200 目)	50 ~ 100				
	间苯二胺	12 ~ 16				
	邻苯二甲酸酐	40 ~ 50				
	2-乙基-4-甲基咪唑	5 ~ 10				
催化剂				甘油	5.8	

(2) 市场供应的几种环氧树脂商品使用配比 (表 7-103)

表 7-103 市场供应的几种环氧树脂商品使用配比

商品牌号	填充剂、增塑剂配比 (质量分数)	固化剂配比 (质量分数)	备注
国产 EMC	100%	10%	室温固化 24h
美国 Epocast4-D	100%	牌号 9633 为 25% ~ 30% (体积分数)	压缩强度为 98 ~ 103MPa 收缩率为 0.02% ~ 0.03%
Devconβ	9 (质量比)	1 (质量比)	18℃ 固化 3 ~ 4h; 21℃ 固化 2h; 24℃ 固化 1.5h; 29℃ 固化 1h
德国 Epo33A	100%	10%	

2. 环氧塑料的主要技术指标

(1) 冲模常用环氧塑料的主要技术指标 (表 7-104)

表 7-104 冲模常用环氧塑料的主要技术指标

牌 号	液态黏度 (25℃) /Pa · s	软化点 /℃	环氧当量	环氧值/ (当量 /100g 树脂)	平均相对 分子质量
618 (E-51)	≤2.5	14 ~ 22 20 ~ 28 30 ~ 38		0.48 ~ 0.54	350 ~ 400
6101 (E-44)				0.40 ~ 0.47	350 ~ 450
634 (E-42)				0.38 ~ 0.47	350 ~ 600
637 (E-33)				0.28 ~ 0.38	
美国 Epon828	5 ~ 15	40 ~ 50	175 ~ 210	0.48 ~ 0.57	350 ~ 400
美国 Epon834	液态		225 ~ 290	0.34 ~ 0.44	450
美国 Epon864			300 ~ 375	0.27 ~ 0.33	700
瑞士 Araldite6010	16		195	0.51	
瑞士 Araldite6030	35		225	0.44	

(续)

牌号	液态黏度 (25℃) /Pa·s	软化点 /℃	环氧当量	环氧值/ (当量 /100g 树脂)	平均相对 分子质量
英国 Epirez510	9 ~ 18		180 ~ 200	0.50 ~ 0.56	350 ~ 400
英国 Epirez515		20 ~ 28	235 ~ 275	0.36 ~ 0.43	460

(2) 几种常用环氧塑料固化剂的比较 (表 7-105)

表 7-105 几种常用环氧塑料固化剂的比较

类别	名称	性 能				固化条件	使用量/ (g/100g 树脂)
		沸点/℃	熔点/℃	毒性	其 他		
脂肪胺	乙二胺 (EDA)	116 ~ 117	液态	剧毒	无色, 有刺激性气味, 挥发性大, 应在低温时混合。固化发热量大, 室温固化性能比较差, 使用寿命短	25℃ 1 天; 60℃ 12h 或 150℃ 2h	6 ~ 8
	β-羟乙基 乙二胺	240	液态	低毒	深棕色, 挥发性小, 有刺激性气味, 容易吸收空气中的二氧化碳和水分	25℃ 1 天; 60℃ 12h 或 150℃ 2h	14 ~ 18
	己二胺 (六次甲 基二胺)	196	39 ~ 40	剧毒	无色片状透明结晶, 有刺激性气味, 容易吸收空气中的二氧化碳和水分	25℃ 1 天; 60℃ 12h 或 150℃ 2h	13 ~ 15
	二乙烯三胺 (二次乙 基三胺)	207	液态	剧毒	淡黄色, 有刺激性气味, 因沸点比乙二胺高而挥发性及危害性比乙二胺小	25℃ 1 天; 60℃ 12h 或 150℃ 2h	9 ~ 11
芳香胺	间苯二胺 (MPDA)	284 ~ 287	61 ~ 63	剧毒	淡黄色结晶, 吸潮后变深, 可与树脂分别在 65℃ 下熔化后混合或将树脂加热至 80℃ 将间苯二胺溶入搅拌再冷至室温使用	室 温 6h 再 150℃ 4h 或 80℃ 4h	14 ~ 16
	间苯二甲胺 (MXD)	248	液态	低毒	使用寿命长	室 温 4 天 + 150℃ 1h 或 室 温 1 天 + 70℃ 1h	16 ~ 20

(续)

类别	名称	性 能				固化条件	使用量/ (g/100g 树脂)
		沸点/℃	熔点/℃	毒性	其 他		
酸酐类	邻苯二甲酸酐 (PA)	295 (升华)	128 ~ 131	剧毒	白色针状结晶, 固化发热量最小而温度低, 使用寿命长, 将树脂加热至 130 ~ 140℃ 加入搅匀固化后树脂耐酸性强, 耐碱性差	环氧当量为 210 ~ 230, 100℃ 48h; 环氧当量为 380 ~ 450, 120℃ 18h	30 ~ 45
	顺丁烯二酸酐 (MA)	202	51 ~ 53	剧毒	白色结晶, 固化发热量小, 使用寿命长。因熔点低, 配制时树脂只要加热至 60℃, 然后逐渐加固化剂	室温固化 2 ~ 3 天或 160 ~ 200℃ 2 ~ 4h	30 ~ 40
	均苯四甲酸酐 (PMDA)		286		白色粉末, 常与顺丁烯二酸酐混合使用, 将脂肪族环氧树脂 6207 先与顺丁烯二酸酐在 70 ~ 80℃ 混熔, 加入甘油搅拌, 再加环氧树脂 634 和填充剂	90℃ 3h 升至 120℃ 3h 再 180℃ 20h	20 ~ 35
591 固化剂		液态, 低毒, 可替代乙二胺, 发热低, 弯曲强度高				80℃ 12h	20 ~ 25
593 固化剂		液态, 低毒, 强度及电性能好, 弹性好				室温固化	22 ~ 25
120 固化剂		液态, 低毒, 强度及电性能好, 凝胶快, 容易吸潮					16 ~ 18
590 固化剂		液态, 可克服间苯二胺的缺点, 改善树脂性能				150℃ 2h 或室温固化	15 ~ 20

3. 环氧塑料的基本性能

环氧塑料粘接力强, 耐蚀性强, 尺寸稳定性好, 电绝缘性能好, 能溶于一些溶剂。环氧塑料的缺点是有脆性, 冲击强度低, 硬度低, 不能承受大的压力, 不耐高温, 一般使用温度低于 100℃。使用的固化剂有的毒性大。纯环氧树脂固化后的基本性能见表 7-106。

表 7-106 纯环氧树脂固化后的基本性能

性能	数值	性能	数值
密度/ (g/cm ³)	1.2 ~ 1.3	冲击强度/ (J/cm ²)	依氏 (I _{3od}) 0.2 ~ 0.9
硬度 HBW	10 ~ 30	线膨胀系数/℃ ⁻¹	(2 ~ 6) × 10 ⁻⁵
拉伸强度/MPa	35 ~ 85	传热系数/[W/(m ² · K)]	(17 ~ 21)

(续)

性能	数值	性能	数值
压缩强度/MPa	55 ~ 250	弹性模量/MPa	1400 ~ 3450
弯曲强度/MPa	65 ~ 130	收缩率 (%)	0.05 ~ 1
剪切强度/MPa	12 ~ 45	电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}$	$10^{16} \sim 10^{17}$

4. 环氧塑料的应用

环氧塑料在模具上的应用有两个方面，即作为模具材料和模具制造上的辅助材料。作为模具材料主要用于冷作模，如弯曲模、拉深模等凹、凸模的型面，热压模方面的注射模、注蜡模的型腔面等。作为模具制造上的辅助材料，主要用于粘接固定凸模、凸凹模、凹模拼块及导套，浇注冲模的卸料板及导向板的导向部分型面等。

7.5.2 聚氨酯橡胶

聚氨酯橡胶是聚氨基甲酸酯橡胶的简称，是一种高分子弹性材料。由聚酯（或聚醚）与二异氰酸脂类化合物聚合而成。它的化学结构比一般弹性聚合物复杂，除反复出现的氨基甲酸酯基团外，分子链中往往还含有酯基、醚基、芳香基等基团，是主链以氨基甲酸酯基（—NHCOO—）为结构特征基团的一类聚合物弹性体。通常为含端羟基的低相对分子质量聚醚或聚酯多元醇和二异氰酸酯的缩聚产物，故有聚醚型和聚酯型之分。

1. 聚氨酯橡胶的特点（表 7-107）

表 7-107 聚氨酯橡胶的特点

特 点	性 能
高硬度和高耐磨性	具有高硬度和高耐磨性，耐磨性能是所有橡胶中最高的。实验室测定结果表明，聚氨酯橡胶的耐磨性是天然橡胶的 3 ~ 5 倍，实际应用中往往高达 10 倍左右
强度高，耐撕裂，弹性好	在硬度为 60 ~ 70 邵尔 A 时强度、弹性和摩擦因数较高，摩擦因数一般在 0.5 以上
缓冲减振性好	室温下减振元件能吸收 10% ~ 20% 振动能量，振动频率越高，能量吸收越大
耐低温，耐老化，抗辐射，电绝缘	耐低温、耐臭氧、耐老化、抗辐射、电绝缘、粘接性能良好，是一般橡胶所不能比的
耐油性和耐药品性良好	与矿物油的亲和性较小，在燃料油（如煤油、汽油）和机械油（如液压油、润滑油等）中几乎不受侵蚀。缺点是在醇、酯、酮类及芳香烃中的溶胀性较大

2. 国产聚氨酯橡胶的力学性能（表 7-108）

表 7-108 国产聚氨酯橡胶的力学性能

牌号 ^②	硬度 邵尔 A	伸长率 (%)	断裂 强度 /MPa	300% 定伸强度 /MPa	冲击回 弹性 (%)	撕裂 强度 /MPa	脆性 温度 /℃	老化系 数 (100℃ × 72h)	耐油性 ^① (%)	断裂永 久变形 (%)
8295	95 ± 3	400	44	15	15 - 30	10	- 40	≥0. 9	≤3	18
8290	90 ± 3	450	44	13	15 - 30	9	- 40	≥0. 9	≤3	15
8280	83 ± 5	450	44	10	15 - 30	8	- 50	≥0. 9	≤4	12
8270	83 ± 5	500	39	5	15 - 30	7	- 50	≥0. 9	≤4	8
8260	83 ± 3	550	30	2. 5	15 - 30	5	- 50	≥0. 9	≤4	8

注：聚氨酯橡胶的许用压力为 100MPa，实际常用 50 ~ 60MPa。

① 耐油性是指煤油室温 72h 的增重率。

② 所有牌号的阿克隆磨耗均为 0. 1cm³/1. 61km。

3. 聚氨酯橡胶的应用

1) 聚氨酯橡胶作为模具材料时，一般以模垫形式安装在模框内，代替相应的钢模零件，如冲裁模和弯曲模中作为凹模与钢凸模相配，在拉深模、翻边模中作为凸模与钢凹模相配，在复合冲裁中与凸凹模相配，同一块聚氨脂橡胶兼作落料凹模和冲孔凸模。

2) 作为弹性元件时，聚氨酯橡胶一般代替卸料或顶料的钢弹簧以及在简易冲模中用作压边圈的弹簧，作为压力源。例如，在汽车模具标准件中广泛且大量地使用弹性元件作为推料力、顶料力、卸料力、复位力的来源。

3) 在冲压加工技术中，冲裁、弯曲、成形和拉深等工艺越来越多地应用聚氨酯橡胶代替钢制偶合模具，获得了较好的效果。

7.5.3 陶瓷材料

陶瓷材料是用天然或合成化合物经过成形和高温烧结制成的一类无机非金属材料。具有高熔点、高硬度、高耐磨性、抗氧化等优点。可用作结构材料、刀具材料和模具材料，由于陶瓷还具有某些特殊的性能，因此又可作为功能材料。

1. 陶瓷材料的分类（表 7-109）

表 7-109 陶瓷材料的分类

分类 ^①	性 能
普通陶瓷	普通陶瓷又称为传统陶瓷，其主要原料是粘土（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）、石英（ SiO_2 ）和长石（ $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ）。通过调整三者比例，可得到不同的抗电性能、耐热性能和力学性能。一般普通陶瓷坚硬，但脆性大，绝缘性和耐蚀性极好。普通陶瓷通常分为日用陶瓷和工业陶瓷两类
特种陶瓷	特种陶瓷又称为现代陶瓷，按应用分为特种结构陶瓷和功能陶瓷两类，如压电陶瓷、磁性陶瓷、电容器陶瓷、高温陶瓷等。工程上最重要的高温陶瓷，包括氧化物陶瓷、碳化物陶瓷、硼化物陶瓷和氮化物陶瓷

① 陶瓷材料目前尚无统一的分类方法，通常把陶瓷材料分为玻璃、玻璃陶瓷和工程陶瓷三类。其中工程陶瓷又分为普通陶瓷和特种陶瓷两大类。

2. 特种陶瓷的性能（表 7-110）

表 7-110 特种陶瓷的性能

种 类		性 能
氧化物陶瓷	氧化铝陶瓷	氧化铝的结构是 O^{2-} 排成密排六方结构， Al^{3+} 占据间隙位置。自然界很少有纯氧化铝，根据含杂质的多少，氧化铝可呈红色或蓝色。实际生产中，氧化铝陶瓷根据 Al_2O_3 含量可分为 75、95、99 等几种。氧化铝的熔点高达 2050°C ，而且抗氧化性好，硬度高，微晶刚玉热硬性可达 1200°C 。常用于制造金属拔丝模及切削淬火钢刀具
	氧化铍陶瓷	以氧化铍为主要成分的陶瓷。纯氧化铍（ BeO ）属于立方晶系。密度为 $3.03\text{g}/\text{cm}^3$ ，熔点为 2570°C ，具有很高的导热性，几乎与纯铝相等，还有很好的抗热震性。粉末有毒，且使接触伤口难于愈合。氧化铍陶瓷以氧化铍粉末为原料加入氧化铝等配料经高温烧结而成。制造这种陶瓷需要良好的防护措施。氧化铍在含有水蒸气的高温介质中，挥发性会提高， 1000°C 开始挥发，并随温度升高挥发量增大，这就给生产带来困难，有些国家已不生产。制品性能优异，虽价格较高，但仍有相当大的需求量。主要用作大规模集成电路基板、大功率气体激光管、晶体管的散热片外壳、微波输出窗和中子减速剂等材料。在模具应用方面用于制造精密玻璃模具
	氧化锆陶瓷	氧化锆陶瓷的熔点在 2700°C 以上，能耐 2300°C 的高温，其推荐使用温度为 $2000 \sim 2200^\circ\text{C}$ 。因此，可以作为反应堆绝热材料。氧化锆作为添加剂可大大提高陶瓷的强度和韧性，生产出氧化锆增韧陶瓷（PSZ）。氧化锆增韧陶瓷具有多相结构，在不同温度和压力下可有三种不同的晶型结构，从而在合适的条件下应力可诱发相变和相变韧化，大幅度地提高断裂韧度。氧化锆增韧氧化铝陶瓷材料，其强度达 1200MPa ，断裂韧度为 $15\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。氧化锆增韧陶瓷具有满足热挤压模具要求的性能，具有耐高温、耐腐蚀、耐磨损的特点，特别是可承受高温高压，永久变形小，比碳化钨、镍基或钴基硬质合金更为适合热挤压模。氧化锆增韧陶瓷硬度超过金属，韧性比一般陶瓷高，有很高的化学稳定性，至少耐 800°C 高温。金属粉末挤压模温度可达到 600°C ，铜棒挤压模工作在 950°C ，氧化锆增韧陶瓷制造的模具可比硬质合金模使用寿命高几十倍。含氧化镁的 PSZ 抗弯强度可达 400MPa 。氧化锆增韧陶瓷的缺点是无延展性，热导率低，热膨胀与金属材料不匹配，在设计和使用时应加以考虑。氧化锆由于其优良的使用性能而用于生产拉丝模、拉深模等，常用于不锈钢拉深工艺

(续)

种 类		性 能
碳化物 陶瓷	碳化硅陶瓷	碳化硅陶瓷密度为 $3.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，抗弯强度为 200 ~ 250MPa，抗压强度为 1000 ~ 1500MPa，莫氏硬度为 9.2，热导率很高，热膨胀系数很小，在 900 ~ 1300℃ 缓慢氧化
	碳化硼陶瓷	碳化硼陶瓷硬度极高，抗磨粒磨损能力很强；熔点达 2450℃，高温下会快速氧化，与热或熔融钢铁材料发生反应，使用温度限定在 980℃ 以下。主要用作磨料，有时用于制造超硬质工具材料
	其他碳化物 陶瓷	碳化钼、碳化铌、碳化钽、碳化钨和碳化锆陶瓷的熔点和硬度都很高，在 2000℃ 以上的中性或还原性气氛中用作高温材料；碳化铌、碳化钛用作 2500℃ 以上的氮气气氛中的高温材料。碳化物陶瓷主要用于化工、汽车工业、核工业、微电子工业、激光等领域作为高温材料或高功率材料。在模具制造中，常用于耐磨性、耐蚀性拉丝模、成形模、热压铸模具、蜂窝陶瓷模具等
氮化物陶瓷		氮化物陶瓷是氮与金属或非金属元素以共价键结合形成的以难熔化合物为主要成分的陶瓷。应用较广的陶瓷有四氮化三硅 (Si_3N_4)、氮化硼 (BN)、氮化铝 (AlN) 等陶瓷。以四氮化三硅陶瓷的抗氧化能力最佳，1400℃ 时开始活性氧化，耐化学腐蚀性很好。有的还具有特殊的力学、介电或导热性能。烧结较困难，先制出优质粉末原料，然后采用氮化反应烧结法和热压烧结法、热等静压烧结法等制成陶瓷制品

3. 陶瓷材料在模具中的应用

1) 氧化锆增韧陶瓷具有满足热挤压模具要求的性能，制造的模具可比硬质合金模使用寿命高几十倍。含氧化镁的氧化锆增韧陶瓷其抗弯强度可达 400MPa。其缺点是无延展性，热导率低，热膨胀与金属材料不匹配，在设计和使用时应加以考虑。例如，用氧化锆增韧陶瓷材料制造内径 26.8mm、外径 60mm、圆角半径 4mm 的凹模，并采用 J500 (5W-30) SL 润滑油，拉深厚度为 0.4mm 的 SUS304L (日本 JIS G4303: 2005 牌号) 工件时，当拉深约 150 万件后，工件表面仍然没有看到明显的表面粗糙度恶化现象。

2) 烧结氮化硅陶瓷制造的模具可用于拉深不锈钢。氮化硅陶瓷材料可以作为一种不锈钢器皿的拉深模具材料，

3) 精铸锻模的模具材料是陶瓷，其由粘结剂、耐火材料和固化剂三部分组成。通常以水解的硅酸乙酯为粘结剂，以刚玉粉、锆砂或硅-铝系材料为耐火材料，以有机和无机铵盐、氧化镁等作固化剂。陶瓷型浇注的模具尺寸精度高 (5 ~ 7 级)，表面粗糙度值小， $Ra = 1.25 \sim 6.3 \mu\text{m}$ ，与机械加工方法制造的模具相比具有显著的优点。在工艺上具有生产周期短、节约工时、节约原材料、容易生产与供货、生产成本低的优点。在铸造的模具产品性能方面，无方向性，具有较高的热疲劳强度，使用寿命比较高。与锻钢模具相比寿命提高 0.5 ~ 1 倍，甚至高达 3 倍。陶瓷型精铸制模也广泛地用来生产玻璃模、塑料模、橡胶模等类的模具铸件。

4) 由于陶瓷模具必须使用专用设备进行加工，模具的形状、尺寸又受到烧结设备的限制，尤其对于尺寸比较大的模具，烧结和加工的难度更大，模具制造成本显著提高，而且加工周期是铸造模具的 3 ~ 4 倍，所以尽管陶瓷模具拉深不锈钢时具有优异的性能和高的使用寿命，但还需要继续降低成本，缩短生产周期。

第 8 章 模具材料与模具零件的热处理

热处理是模具制造过程中不可缺少的加工工艺，对模具的质量和制造成本有很大影响。模具的热处理包括两个方面，即模具材料的热处理和模具零件（工件）的热处理。

1) 材料热处理在钢厂完成，以钢材产品供应市场。必须保证钢材的质量，如基本力学性能、金相组织等都要符合国家或行业标准规定的要求，或者满足用户订货时与钢厂签订合同的协议要求。

① 在大型工业炉中大批量生产的型材、轧材、锻件、模块等，应保证毛坯质量，节约生产成本，缩短生产周期。

② 预硬化型模具钢作为钢厂的预硬化产品供应市场，其热处理（淬火、回火）工艺规范（特别是奥氏体化温度和冷却介质）必须符合国家标准或行业标准的规定，不能随意更改（除非用户订货协议规定另有特殊要求）。

③ 其他工艺参数，例如加热时间、加热介质等，根据具体情况（钢的特性、钢材尺寸、加热炉的类型、生产批量等）而变化。只有工艺规范化才能保证生产出符合国家标准的合格产品。

2) 模具零件热处理是在模具制造过程中由制造厂或热处理专业厂完成的。其特点是小批量或单件生产，工艺多样复杂，必须具有精良设备，相对而言属于精工细作。模具通常是由几种不同的零件组合而成的，可分为结构零件和工作零件两大类。工作零件承受着复杂的应力和冷热温度变化的影响、介质或工作对象的腐蚀作用以及需要满足其他（如磁性、弹性等）特性要求。而这些性能的获得不仅需要模具材料本身具有相应性能，而且往往通过正确的热处理工艺才能保证。即使是同一种模具材料，热处理工艺不同，获得的性能也不同。因此，合理地选用模具材料并采用恰当的热处理工艺，可以充分发挥模具材料的潜力，可以改善模具的使用性能，延长模具的使用寿命。

8.1 钢的热处理

热处理是采用适当的方式对金属材料（或工件）进行加热、保温和冷却以获得预期的组织结构与性能的工艺。热处理可改善钢的加工性能，能显著提高钢的力学性能，满足零件性能要求和延长使用寿命，因此在机械制造中有 70% ~ 80% 的零件要进行热处理，各种刀具、量具、模具等几乎全部要进行热处理。

8.1.1 钢的热处理原理

1. 钢在加热时的组织转变

在热处理工艺中，加热是钢热处理的第一道工序，退火、正火、淬火都应将钢加热

到临界点以上,其目的是使钢全部或大部分组织转变成均匀的奥氏体,并尽量得到细小的晶粒。这对随后奥氏体冷却时转变产物的性能有很大的影响。

(1) 钢的奥氏体化

将钢加热到 A_{c3} 或 A_{c1} 线以上时,钢中的珠光体将向奥氏体转变。奥氏体形成过程与液态金属结晶过程相似,包括形核和晶核长大过程。工件加热至 A_{c3} 或 A_{c1} 以上,以全部或部分获得奥氏体组织的过程称为奥氏体化。

1) 奥氏体化分为四个阶段,如图 8-1 所示。

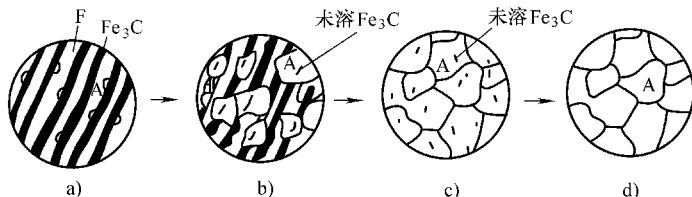


图 8-1 共析钢奥氏体化的过程

a) 界面形核 b) 奥氏体晶核长大 c) 残留 Fe_3C 溶解 d) 奥氏体成分均匀化

① 奥氏体晶核的形成。奥氏体晶核最容易在铁素体与渗碳体的相界面处优先形成。这是由于相界面上原子排列紊乱,处于不稳定状态,为奥氏体的形核提供了有利条件,如图 8-1a 所示。

② 奥氏体晶核的长大。奥氏体晶核形成之后,与奥氏体相邻的铁素体中的铁原子通过扩散运动,转移到奥氏体晶核上来,使奥氏体晶核长大,同时与奥氏体相邻的渗碳体通过分解,不断溶入生成的奥氏体中,使奥氏体逐渐长大,如图 8-1b 所示。

③ 残留渗碳体的溶解。由于渗碳体的晶体结构和碳含量都与奥氏体相差很大,故渗碳体的溶解必定落后于铁素体向奥氏体的转变,即在铁素体全部消失后,仍有部分渗碳体尚未溶解。随着时间的延长,残留渗碳体继续向奥氏体溶解,直至全部消失为止,如图 8-1c 所示。

④ 奥氏体成分均匀化。当残留渗碳体全部溶解时,实际上奥氏体的成分还是不均匀的,在原来的渗碳体处碳含量较高,在原来的铁素体处碳含量较低。只有继续延长保温时间,通过碳原子进一步扩散,才能得到成分均匀的奥氏体组织。因此热处理过程中,加热后的保温阶段,不仅为了使工件热透,也是为了使组织转变完和奥氏体成分均匀化,如图 8-1d 所示。

2) 奥氏体晶粒度与力学性能的关系。钢在具体加热条件下获得的奥氏体晶粒大小,称为奥氏体的实际晶粒度。其大小对冷却转变后钢的性能有明显影响。奥氏体晶粒细小,冷却后转变产物组织的晶粒也细小,其强度和韧性都较高;反之,粗大的奥氏体晶粒,冷却后获得粗晶粒的组织,使钢的力学性能降低,特别是冲击韧度变坏,甚至在淬火时产生变形、开裂。所以,热处理加热时获得细小而均匀的奥氏体晶粒,往往是保证模具热处理质量的重要环节。

3) 影响奥氏体晶粒长大的因素。奥氏体的晶体结构、组织形态和性能与材料的化学成分、奥氏体形成的热力学条件、形成过程、形成机制、奥氏体形成的动力学特点等相关, 这些也是控制奥氏体晶粒度大小的的重要因素。

① 钢的化学成分的影响。当加热温度相同时, 碳含量越低, 奥氏体晶粒越细小; 相反, 碳含量越高, 越增加碳原子和铁原子的扩散速度, 促使奥氏体晶粒长大。但当碳含量超过在奥氏体中的溶解度时, 析出的碳化物或渗碳体会阻碍晶界的推移, 又重新使奥氏体晶粒细化。

合金元素对奥氏体晶粒长大的影响是显著的, 除了 Mn、P 等以外, 大多数合金元素会使钢在不同程度上得到细化, 尤其是与碳结合力较强的碳化物形成元素, 如 Cr、W、Mo、Ti、Zr、Nb 等, 都有细化奥氏体晶粒和强烈阻碍奥氏体晶粒长大的作用。

② 加热温度和保温时间的影响。加热温度越高, 晶粒长大速度越快, 奥氏体晶粒越粗大; 反之, 加热温度越低, 晶粒越细小。在一定的加热温度下, 随着保温时间的延长, 晶粒不断长大, 但长到一定尺寸后便几乎不再长大。所以延长保温时间对晶粒长大的影响不如提高加热温度显著, 因此要严格控制加热温度。

③ 加热速度的影响。在加热温度相同的情况下, 加热速度越快则过热度越大 (即奥氏体化的实际温度越高), 形核率越高, 奥氏体的起始晶粒度越小; 另外, 加热速度越快则加热时间越短, 晶核来不及长大。所以, 快速加热是细化晶粒的手段之一, 感应加热和激光加热的热处理都是根据这一原理细化晶粒的实例。但模具材料多为多元金属材料, 钢中碳化物多, 快速加热难以使钢中碳化物均匀受热, 难以完成奥氏体化过程, 因此, 在加热时常采用等温加热或适当延长保温时间。

(2) 钢在加热时出现的缺陷

1) 过热。当钢的加热温度过高, 或在高温下保温时间过长时, 奥氏体晶粒显著粗化的现象称为过热。过热后的钢冷却后, 强度、塑性, 尤其是冲击韧度明显降低, 而且容易出现变形与裂纹。过热的钢需要重新进行正确的退火或正火, 使奥氏体晶粒重新细化。

2) 氧化脱碳。当模具在空气炉中未加保护气氛或在保护不良的情况下加热时, 或在未经脱氧或脱氧不充分的盐浴炉中加热时, 钢件表面与氧化性炉气 (如氧、水蒸气、二氧化碳等) 相互作用, 会产生氧化脱碳现象。使工件表面形成氧化皮, 造成钢的烧损, 使工件的尺寸减小, 表面粗糙, 还会严重影响淬火时的冷却速度, 造成软点或硬度不足, 影响模具质量。温度越高, 时间越长, 氧化越严重, 表层被烧损, 表层碳含量降低, 甚至形成大量铁素体组织。

为了防止以上氧化脱碳现象的出现, 可采取以下措施:

- ① 进行预热, 以缩短高温加热时间。
- ② 采用保护气氛加热, 在盐浴炉中加热时必须充分做好盐浴的脱氧工作。
- ③ 可在模具表面涂覆保护层或将模具装入密封箱中加热。
- ④ 高合金钢和精密模具最好采用真空加热。

3) 过烧。钢的加热温度远远超过正常的加热温度, 接近固相线温度, 奥氏体的晶

界发生氧化，甚至局部熔化，这种现象称为过烧。钢的过烧组织，晶粒极为粗大，在晶界上出现氧化物网络。过烧后的钢件性能急剧降低，通常是无法挽救的，只能报废。因此，在热处理加热时，应该经常检验测温仪表，严防炉子超温。

4) 加热不足。这种缺陷表现为淬火后硬度不足，在金相组织中存在着未溶铁素体，以及出现托氏体或索氏体，甚至出现未转变的珠光体区。对于高合金钢，则表现为合金碳化物未能充分溶解。这些主要是由于加热温度偏低或加热时间太短而造成的。在实际操作中，常由仪表指示偏高或炉温不均匀以致实际工作温度较低引起。

纠正措施：对于一般碳素钢及合金结构钢，可再次按正确的温度加热足够的时间后重新淬火；对于高合金钢，必须退火或正火后重新淬火。

2. 钢在冷却时的组织转变

冷却是热处理的关键工序。成分相同的钢，奥氏体化后，采用不同方式冷却，将获得不同的力学性能。T8 钢不同方式（速度）冷却后的硬度见表 8-1。

表 8-1 T8 钢不同方式（速度）冷却后的硬度（ $\phi 10\text{mm}$ ，加热至 800°C ）

冷却方法	随炉缓冷	空冷	油冷	水冷
冷却速度	$10^{\circ}\text{C}/\text{min}$	$10^{\circ}\text{C}/\text{s}$	$150^{\circ}\text{C}/\text{s}$	$600^{\circ}\text{C}/\text{s}$
所得硬度 HRC	(12)	26	41	63

在实际生产中，奥氏体冷却速度较快，要过冷到 A_1 温度以下才发生转变，在 A_1 温度以下暂存的奥氏体称为过冷奥氏体。过冷奥氏体冷却转变方式有两种，即等温转变与连续冷却转变。等温转变是指工件奥氏体化后，冷却到临界点（ A_{r1} 或 A_{r3} ）以下等温保持时过冷奥氏体发生的转变；连续冷却转变是指工件奥氏体化后以不同冷却速度连续冷却时过冷奥氏体发生的转变。

(1) 过冷奥氏体的等温转变

1) 等温转变图（C 曲线）。等温转变图是用试验方法求得的。将若干钢试片奥氏体化后，分别迅速放入到 A_1 以下不同温度（如 710°C 、 650°C 、 600°C ……）的恒温盐浴槽中，等温不同时间后淬水，观察、测定其组织，将试验结果在温度 - 时间坐标图上绘制成曲线，即等温转变图，又称“C 曲线”，如图 8-2 所示。

由图 8-2 可以看出，左边曲线为过冷奥氏体等温转变开始线，右边曲线为过冷奥氏体等温转变终了线。 A_1 线以上是奥氏体稳定区； A_1 线以下，转变开始线左方是过冷奥氏体区； A_1 线以下，转变终了线右方是转变产物区；转变开始线和转变终了线之间是过冷

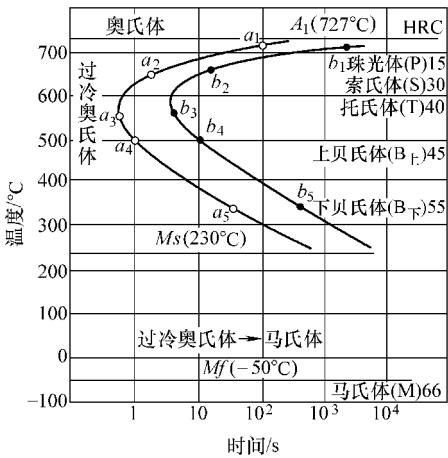


图 8-2 共析钢等温转变图（C 曲线）

奥氏体与转变产物共存区。转变开始线与纵坐标轴之间的时间为孕育期，在等温转变图拐弯的“鼻尖”处（约 550℃），孕育期最短，过冷奥氏体最不稳定。水平线 M_s 为过冷奥氏体转变为马氏体的开始线，约 230℃；水平线 M_f 为马氏体转变终了线，约 -50℃。

2) 过冷奥氏体等温转变产物的组织与性能。按温度高低和产物组织不同，过冷奥氏体转变可分为珠光体转变，贝氏体转变，见表 8-2。

表 8-2 共析钢过冷奥氏体等温转变产物的组织与性能

转变类型	转变温度	过冷度	转变产物	符号	组织形态	清晰鉴别的放大倍数	硬度
珠光体转变	$A_1 \sim 650^\circ\text{C}$	小	珠光体	P	粗片状	< 500	160 ~ 250HBW
	650 ~ 600℃	中	索氏体 (细珠光体)	S	细片状	1000 ~ 1500	25 ~ 35HRC
	600 ~ 550℃	较大	托氏体 (极细珠光体)	T	极细片状	10000 ~ 100000	35 ~ 40HRC
贝氏体转变	550 ~ 350℃	大	上贝氏体	$B_{\text{上}}$	羽毛状	> 400	40 ~ 45HRC
	350℃ ~ M_s	更大	下贝氏体	$B_{\text{下}}$	黑片（针）状	400	45 ~ 55HRC

注：1. 共析钢过冷奥氏体在 $A_1 \sim 550^\circ\text{C}$ 范围内等温转变成珠光体。其转变过程也是形核和晶核长大过程。等温过程温度越低，形成的珠光体越细，强度、硬度越高，塑性、韧性有所改善。

2. 共析钢过冷奥氏体在 550℃ ~ M_s 范围内等温转变成贝氏体。在 550 ~ 350℃ 等温形成的上贝氏体组织呈羽毛状，强度、塑性、韧性较差，生产上很少使用；在 350℃ ~ M_s 等温形成的下贝氏体呈黑色针（片）状，有较高的强度、良好的塑性和韧性。

3. 亚共析钢碳含量低于共析成分，过冷奥氏体等温转变的特征为经过一段孕育期，在等温转变图“鼻尖”上部区域等温时，亚共析钢先析出铁素体，然后进行珠光体转变，得到铁素体和珠光体组织；同样的道理，过共析钢碳含量高于共析成分，过冷奥氏体等温转变时先析出渗碳体，然后进行珠光体转变，得到渗碳体和珠光体组织。

(2) 过冷奥氏体的连续冷却转变

在热加工或热处理工艺中，加热到奥氏体状态的钢，大多数是以不同方式连续冷却下来的，例如在炉内、空气、油或水槽中冷却。

1) 连续冷却转变图。将奥氏体化的钢以不同冷却速度冷至室温，并在冷却过程中记录下开始和终止转变点（以及相同转变量的点）连成曲线，便得到连续冷却转变图。共析钢连续冷却转变图只出现珠光体和马氏体转变区，而无奥氏体转变区。因为贝氏体转变的孕育期随温度下降而延长，在连续冷却时，温度下降很快，在贝氏体转变区停留时间很短，达不到所要求的孕育期的缘故。

2) 等温转变图在连续转变中的应用。由于测定连续冷却转变图比较困难，所以目前在热处理实践中，还常应用等温转变图近似地分析奥氏体在连续冷却中的转变情况。共析钢的连续冷却转变如图 8-3 所示。

图 8-3 中 v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 、 v_k 和 v_c 为不同冷却速度下的冷却曲线。 v_1 的冷却速度相当于

钢件在炉中缓冷，根据它与等温转变曲线相交的位置，可估计出过冷奥氏体将转变为珠光体； v_2 相当于空冷，奥氏体将转变为索氏体； v_3 相当于油冷，一部分奥氏体先转变为托氏体，其余的奥氏体将冷却到 M_s 线以下变成马氏体，最后转变产物为托氏体 + 马氏体的混合组织； v_4 相当于水冷，它不与等温转变曲线相交，一直冷到 M_s 线以下转变成马氏体。冷却速度 v_c 与等温转变曲线（左）相切，为钢的上临界冷却速度。 v_k 为钢的下临界冷却速度。临界冷却速度是过冷奥氏体全部过冷到 M_s 线以下转变为马氏体的最低冷却速度，在热处理工艺中有着十分重要的意义。

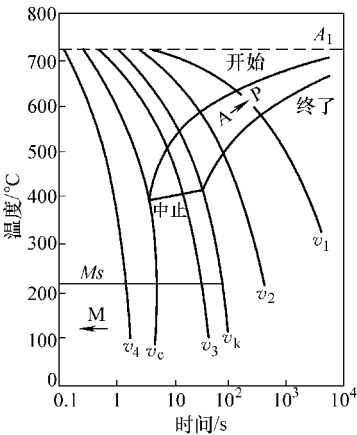


图 8-3 共析钢的连续冷却转变

3) 过冷奥氏体连续冷却转变产物的组织与性能（表 8-3）。

表 8-3 共析钢过冷奥氏体连续冷却转变产物（估计）的组织与性能

冷却速度	速度值	相当于冷却条件	转变产物	符号	硬度
v_1	10℃/min	炉冷	珠光体	P	170 ~ 220HBW
v_2	10℃/s	空冷	索氏体	S	25 ~ 35HRC
v_3	150℃/s	油淬	托氏体 + 马氏体	T + M	45 ~ 55HRC
v_4	600℃/s	水淬	马氏体 + 少量残留奥氏体	M + A'	55 ~ 65HRC
v_c	马氏体上临界冷却速度		马氏体 + 少量残留奥氏体	M + A'	55 ~ 65HRC
v_k	马氏体下临界冷却速度		珠光体 + 少量残留奥氏体	P + A'	180 ~ 220（HBW）

4) 马氏体转变 ($M_s \sim M_f$)。

① 由图 8-3 可知，当冷却速度大于 v_c 时，奥氏体被过冷到 M_s 线以下，发生马氏体转变。因温度低，碳原子难以扩散， $\gamma - \text{Fe}$ 迅速转变为 $\alpha - \text{Fe}$ 晶格，原来固溶在奥氏体中的碳被迫全部保留在 $\alpha - \text{Fe}$ 晶格中，形成碳在 $\alpha - \text{Fe}$ 中的过饱和固溶体，称为马氏体，用“M”表示。

② 马氏体的形态有两种，主要取决于奥氏体中的碳含量，当 $w_c > 1.0\%$ 时，形成片状（针状）高碳马氏体，性能硬而脆；当 $w_c < 0.20\%$ 时，形成板条状低碳马氏体，有较好的强韧性；当 $w_c = 0.20\% \sim 1.0\%$ 时，形成片状 + 板条状马氏体的混合组织。马氏体的强度、硬度随碳含量增加而升高，当 $w_c > 0.60\%$ 后，强度、硬度升高不明显。

③ 马氏体转变是在 $M_s \sim M_f$ 温度范围内连续冷却时进行的。随着温度的降低，马氏体数量增多，冷却停止，马氏体转变也终止。因此，淬火至室温时，马氏体转变不能进行到底，总有少量残留奥氏体（符号 A' 或 $A_{\text{残}}$ ）存在。残留奥氏体的存在降低了淬火钢的硬度、耐磨性，且在零件长期使用中残留奥氏体会继续转变为马氏体，使零件尺寸变化、精度降低。高精度零件（如精密丝杠、精密模具等）淬火后要进行冷处理，尽量减少残留奥氏体。

3. 钢在回火时的组织转变

过冷奥氏体快速冷却获得马氏体组织和一部分残留奥氏体组织。马氏体处于碳的过饱和状态，残留奥氏体处于过冷状态，其组织是不稳定的，有向更稳定状态变化的趋势。此外，组织中存在大量高密度位错、过饱和空位、大量相界面和亚晶界等晶体缺陷及较大的内应力，都有自发地向稳定状态转化的倾向。但是这种转变必须依靠原子扩散才能实现，而在室温条件下原子扩散非常困难，只有重新加热即回火提高温度，增大原子的活动能力，才能促使淬火组织的转变。

在回火时淬火钢组织的变化大致有如下五个主要的过程。

(1) 碳原子偏聚 (20 ~ 100℃)

在 100℃ 以下回火时，马氏体晶体内将进行碳原子的偏聚。在此温度范围内，碳原子只能作短距离的扩散迁移，向晶体缺陷中或马氏体的一定晶面上偏聚。在低碳板条状马氏体中，碳原子绝大部分都偏聚到高密度的位错线上，这样既减小了碳原子造成的晶格畸变，也减小了晶体缺陷处的应力场，使晶格的畸变能降低，所以晶格不出现正方度的变化。在高碳片状马氏体中，碳原子多偏聚在马氏体的一定晶面上，形成薄片状偏聚区。这些偏聚区的碳含量高于马氏体的平均碳含量，所以伴随有正方度增大。过饱和碳原子的偏聚过程为马氏体的分解做了准备。

(2) 马氏体分解 (100 ~ 200℃)

当回火温度超过 100℃ 时，马氏体就要发生分解，即碳以极细薄的 ϵ 碳化物从过饱和的 α 固溶体中逐渐析出。随着回火温度上升，马氏体分解加快，析出的碳化物增多，马氏体的碳含量逐渐降低，马氏体的正方度也随之减小，晶格畸变降低，使淬火内应力有所减小。由于回火温度较低，固溶在马氏体中的碳不能全部析出， α 固溶体仍然是过饱和固溶体。这种由过饱和程度较低的 α 固溶体和极细的 ϵ 碳化物所组成的混合组织，称为回火马氏体。

(3) 残留奥氏体转变 (200 ~ 300℃)

在 200 ~ 300℃ 回火时，马氏体继续分解一直延续到 350℃ 以上，在高合金钢中甚至可延续到 600℃。除马氏体继续分解外，残留奥氏体还要逐渐转变为下贝氏体。如果处于 M_s 点以下温度，残留奥氏体可转变为马氏体，随后马氏体再分解。在此温度范围内，钢的硬度没有明显降低，但淬火内应力进一步减小。此阶段的基本组织仍是回火马氏体。

(4) 碳化物转变 (300 ~ 400℃)

当回火温度在 300 ~ 400℃ 时，碳原子已能进行长距离的扩散，亚稳定的 ϵ 碳化物随着温度的升高逐渐转变为稳定的渗碳体，并且渗碳体由刚形成的细片状逐渐集聚长大成细粒状。马氏体分解在 350℃ 左右结束， α 固溶体的碳含量降到平衡成分。同时，晶格畸变逐渐消除，内应力减小， α 固溶体恢复为铁素体与细粒状渗碳体的机械混合物，称为回火托氏体。

(5) 渗碳体球化长大和铁素体回复与再结晶 (> 400℃)

当回火温度升高到 400℃ 以上时，渗碳体微粒集聚球化成细粒状，并随着温度的

升高, 渗碳体颗粒逐渐长大。450℃以上, 由于铁原子扩散能力增强, 铁素体细小的亚晶逐渐长大, 同时晶格内位错密度下降, 晶格畸变逐渐消失, 即发生铁素体的回复过程。回复后的铁素体仍具有条状或片状的特征。回火温度升高到 600℃以上时, 铁素体便发生再结晶, 由位错密度低的等轴晶粒的铁素体取代回复组织。通常在 500~600℃形成的铁素体与分布在它上面的细粒状渗碳体组成的组织, 称为回火索氏体组织。在 650℃~ A_1 温度回火形成的由多边形的铁素体和较大粒状渗碳体组成的组织称为回火珠光体。

8.1.2 钢的热处理分类

热处理一般分为预备热处理和最终热处理两大类。给予钢或零件最终性能的热处理称为最终热处理, 如淬火、回火等; 为最终热处理做组织或性能准备的称为预备热处理, 如退火、正火等。但也不是绝对的, 如淬火并高温回火, 即调质处理, 有时是预备热处理, 有时可作为最终热处理; 预硬钢的热处理, 在钢厂是最终热处理, 对制造厂而言又是预备热处理。

钢铁是工业上应用最广的金属, 而且钢铁的显微组织也最为复杂, 因此钢铁热处理工艺种类繁多。根据热处理目的与作用不同, 金属热处理工艺可分为整体热处理、表面热处理和化学热处理三类。但根据加热介质、加热温度和冷却方法的不同, 每一类又可分为若干不同的热处理工艺。同一种金属采用不同的热处理工艺, 可获得不同的组织, 从而具有不同的性能。

(1) 整体热处理

整体热处理指对工件进行穿透的整体加热, 然后以适当的速度冷却, 获得需要的金相组织, 以改变其整体力学性能的金属热处理工艺。主要包括退火、正火、淬火和回火等。

(2) 表面热处理

表面热处理指为改变工件表面的组织和性能, 仅对其表面进行热处理的工艺。主要包括火焰淬火、感应淬火等。

(3) 化学热处理

化学热处理指将工件置于适当的活性介质中加热、保温, 使一种或几种元素渗入它的表层, 以改变其表层化学成分、组织和性能的热处理。主要包括渗碳、渗氮、碳氮共渗、渗金属等。

8.2 模具钢热处理基本工艺

钢常用的热处理方法是退火、正火、淬火、回火四种基本工艺, 它们是模具制造中常采用的基本热处理工艺。

8.2.1 钢的退火

把钢加热到高于临界温度 20~30℃以上, 保温一定时间, 然后缓慢冷却 (一般为

随炉冷却) 到室温以获得接近于平衡状态组织的热处理工艺称为退火。

(1) 退火的目的

1) 降低钢的硬度、提高塑性, 以利于切削加工和冷变形加工。

2) 消除钢件中的残余应力, 以稳定钢件的尺寸, 防止和减少模具最终热处理后的变形和开裂。

3) 细化晶粒, 均匀钢的组织 and 成分, 改善钢的组织与性能, 为后续的热处理做好组织准备。

(2) 退火的分类

根据退火的目的不同, 模具钢常用的退火方法有完全退火、不完全退火、等温退火、球化退火、均匀化退火、中间退火、再结晶退火、去应力退火等。

1. 完全退火

(1) 完全退火工艺

将亚共析钢加热到 A_{c3} 以上, 保温足够的时间, 使之完全奥氏体化, 随之缓慢冷却到 600°C 以下, 再出炉在空气中冷却的热处理工艺称为完全退火。

(2) 完全退火的目的

在加热和保温过程中, 使钢的组织全部转变为细小的奥氏体晶粒, 并在随后的缓冷中转变为细小而均匀的珠光体和铁素体组织。其目的是细化晶粒、降低硬度、消除内应力, 以便于以后的机械加工或塑性变形加工, 以及为淬火准备适宜的组织。

(3) 完全退火的应用

主要用于亚共析钢, 常用于中碳钢及中低碳合金结构钢的锻件、铸件、热轧型材、焊接件等。过共析钢不宜采用完全退火, 因为过共析钢完全退火需要加热到 $A_{c_{em}}$ 以上, 在缓慢冷却时, 钢中析出网状渗碳体, 破坏钢的力学性能, 增大淬火脆裂的危险。

2. 不完全退火

(1) 不完全退火工艺

亚共析钢加热温度在 $A_{c1} \sim A_{c3}$ 之间, 过共析钢则在 $A_{c1} \sim A_{c_{em}}$ 温度, 保温一定时间后随炉缓冷至 $500 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 出炉空冷的热处理工艺称为不完全退火。

(2) 不完全退火的目的

主要是降低硬度, 改善切削加工性能, 消除内应力, 改善珠光体组织, 为后续热处理做好组织准备。

(3) 不完全退火的优点

加热温度低, 操作条件好, 节省燃料和退火时间。但不能完全重结晶, 所以在细化晶粒方面不如完全退火。主要用于过共析钢, 一般亚共析钢使用较少。

3. 等温退火

(1) 等温退火工艺

将钢件加热到临界温度以上 $30 \sim 50^{\circ}\text{C}$ (亚共析钢加热到 A_{c3} 以上, 共析钢和过共析钢加热到 A_{c1} 以上) 保持一定时间, 使其奥氏体化和奥氏体均匀化。然后放入另一温度稍低于 A_{r1} 的炉中, 或者在原加热炉中使钢迅速随炉冷至稍低于 A_{r1} 的温度进行等温。在

等温过程中奥氏体将根据所采用等温温度的高低而转变成所需的层片厚薄适宜的珠光体或球化体。当转变完成后,即可从炉中取出空冷。

(2) 等温退火工艺的三个阶段

等温退火工艺的三个阶段为:奥氏体化加热和保温,快冷至等温温度并保持一定时间,出炉空冷。奥氏体化温度除与钢种有关外,还必须根据技术要求和钢的原始组织来调整。

1) 较高的奥氏体化温度可以促进形成层状组织,较低的奥氏体化温度容易得到球化体,奥氏体化后钢的等温温度应根据最终欲获得的性能,从该钢种的等温转变图来确定。

2) 等温温度距 A_1 越近,所获得珠光体的层片越粗(钢的硬度越低);距 A_1 越远,则珠光体的层片越细(钢的硬度越高)。所以,为了得到最软的组织,可采用较低的奥氏体化温度和较高的等温温度。

3) 选择等温温度时还需考虑过冷奥氏体完成珠光体转变的时间,也就是应尽量选择所需时间较短而又能获得所需硬度的等温温度。钢在等温温度所保持的时间较长,可以保证过冷奥氏体的转变完全,尤其是截面较大的钢材更应如此。因为从奥氏体化温度冷却时必须经过一段时间,钢的心部才能冷至等温温度。

4) 等温后其组织转变完成,此时钢材从炉中取出,无论用什么冷却方法,其组织都不会再有变化。不过冷却速度太大,钢材可能因受应力而发生变形,所以通常多在空气中冷却。退火时,对于温度的控制和准确性,都必须有较高的要求。

(3) 等温退火的应用

可以代替完全退火,主要用于合金钢。在钢材生产或加工的各个阶段,都可以利用等温退火,如高合金模具钢的钢锭或热轧钢坯,当自由冷却到室温时,容易出现裂纹,在这种情况下,可将热的钢锭或钢坯放到温度为 700°C 左右的等温退火炉中(该温度相当于钢的珠光体转变温度),转变完成以后再自由地冷却到室温。模具用合金渗碳钢常进行等温退火。

4. 球化退火

(1) 球化退火工艺

将钢加热到 A_{c1} 以上 $20 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 保温一定时间,使其奥氏体化,然后缓慢冷却或在 A_{r1} 以下 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 等温一段时间后出炉空冷,获得球状珠光体组织的退火工艺过程称为球化退火,是使钢获得球化体的热处理工艺方法。其目的是使渗碳体(或碳化物)球化以降低硬度,改善加工性能,并为淬火做好组织准备。

(2) 球化退火的影响因素

1) 球化退火成功与否,与奥氏体化温度有关。奥氏体化的温度越高,越不容易得到球化体。而只有奥氏体化温度接近 A_1 时,因奥氏体晶粒很小,浓度又不均匀,且有大量的未溶解的碳化物作为质点存在,在随后稍低于 A_1 的保温过程中,才容易得到球化体。

2) 由于球化退火的奥氏体化温度仅稍高于临界温度,因此应密切注意加热温度是

否准确。若实际温度偏低,此时钢很可能没有奥氏体化,球化就不会完全。若为具有网状碳化物的过共析钢,由于上述情况,网状碳化物就不可能消除,因而达不到球化退火的目的。若钢在退火前,其组织中有明显的网状碳化物,则应先进行正火处理。

3) 球化退火的应用

多用于过共析钢及合金工具钢(如制造刀具、量具、模具所用的钢种)。应根据其用途不同采用不同的退火工艺参数。常用球化退火工艺有下列几种,其工艺曲线如图 8-4 所示。

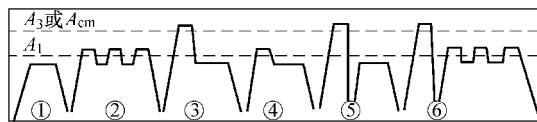


图 8-4 常用球化退火方法示意图

① 将钢加热到稍低于 A_1 长时间保温。此法主要用于淬火或冷加工后钢的球化。

② 将钢加热到稍高于 A_1 保温一段时间,而后冷至略低于 A_1 保温。然后再升温至第一次加热温度,再冷至略低于 A_1 保温。如此重复多次,使钢中原晶界上的碳化物和珠光体中的渗碳体经过溶解和重新析出、集聚而达到球化的目的。处理时最好采用容易控制温度的小型炉子,此法适用于原为珠光体组织的钢。

③ 将钢加热到稍高于 A_{cm} ,使所有碳化物溶解,而后快速冷却以防网状碳化物析出,至略低于 A_1 并长时间保温。

④ 将钢加热到稍高于 A_1 ,保温后,再冷至略低于 A_1 并长时间保温。

⑤ 将钢加热到稍高于 A_{cm} ,使钢中的网状碳化物或大块碳化物完全溶解,然后快速冷至较低温度。随后将钢再加热到稍低于 A_1 保温。

⑥ 与第⑤种方法相似,只是球化时采用第②种方法。

5. 均匀化退火

(1) 均匀化退火工艺

将钢件加热到 $Ac_3 + (150 \sim 250)^\circ\text{C}$,进行长时间保温(一般 $10 \sim 15\text{h}$),然后随炉冷却至 350°C 以下出炉空冷。均匀化退火要求较高的温度,具体的加热温度需根据偏析程度而定,一般在 $1100 \sim 1200^\circ\text{C}$ 。保温时间也与偏析程度和钢种有关。通常可按最大有效截面,每 25mm 保温 1h 计算。

(2) 均匀化退火的特点

成本高,工件易氧化、脱碳;由于均匀化退火时,钢的晶粒已过度长大,如不再进行热加工,尚需进行一次完全退火或正火以细化其晶粒。

(3) 均匀化退火的应用

主要应用于质量要求高的合金钢锭、铸件或锻坯以消除浇注(或锻轧)过程中产生的不同程度的偏析(枝晶偏析),减少化学成分和组织的不均匀性。

6. 中间退火

1) 在冷加工过程中,钢材随加工道次(或变形量)的增加而硬度逐渐增高和延展性逐渐降低,以致加工不能继续进行,为了消除冷加工所导致的硬化,就需要进行中间退火(也称为软化退火),使钢软化,然后再继续冷加工,以达到预期的尺寸。这种退

火常在先后两次冷加工中间进行, 所以称为中间退火。

2) 中间退火是将钢材加热到 A_1 以下的温度 (约 650°C) 并保持适当的时间然后冷却。根据情况, 冷却也可以在空气中进行。

7. 再结晶退火

(1) 再结晶退火工艺

将钢件加热到稍低于 A_{c1} 的温度, 一般为 $650 \sim 700^{\circ}\text{C}$, 保温一定时间, 随后缓冷或空冷, 使其内部发生再结晶, 以获得与原来相同的晶体结构 (没有相变), 并消除内应力, 形成稳定组织的退火工艺称为再结晶退火。

(2) 再结晶退火的目的

通过再结晶退火, 使变形的铁素体晶粒变成新的等轴晶粒, 珠光体中的渗碳体粒状化, 消除由冷加工造成的内应力, 消除加工硬化, 降低钢的硬度和强度, 提高钢的塑性和韧性, 为再加工或使用做好组织和性能上的准备。

(3) 再结晶退火的应用

用于一般冷轧钢板、钢带、冷拔钢丝、钢棒、冷轧和冷拔无缝钢管或冲压件等的软化处理。冷轧硅钢片正是利用这种再结晶退火得到不同的组织和性能。

8. 去应力退火

1) 工件加工后存在内应力, 容易引起变形、开裂等缺陷, 通过去应力退火可以消除应力并取得平衡。其工艺是将钢加热至 A_1 以下的 $500 \sim 650^{\circ}\text{C}$, 保温一定时间后缓慢冷却, 在退火中钢的组织不发生变化。

2) 模具零件存在内应力是十分有害的, 如不及时消除, 模具零件在加工及使用过程中将发生变化, 影响模具的精度和使用寿命。此外内应力与外加载荷叠加在一起还会引起模具材料发生断裂。因此, 锻造、铸造、焊接以及切削加工后的模具零件应采取去应力退火, 以消除加工过程中产生的内应力。

8.2.2 钢的正火

正火是将钢加热到 A_{c1} 或 A_{cm} 以上 $30 \sim 50^{\circ}\text{C}$, 保温一定时间, 使钢奥氏体化并均匀化后, 出炉在静止空气中冷却的热处理工艺。

1. 正火工艺的特点

1) 正火可以改善或消除钢在铸造、轧制、锻造、焊接等过程中所造成的各种组织缺陷, 细化晶粒, 并使组织均匀化, 提高力学性能; 降低硬度 (对于低碳钢是提高硬度), 便于切削加工, 并为最终热处理做好组织准备, 常作为较重要零件的预备热处理。

① 低碳钢正火可以细化晶粒, 提高硬度, 改善切削加工性能 (适宜的切削加工硬度为 $170 \sim 230\text{HBW}$)。

② 中碳钢正火可以减少工件淬火时的变形与开裂, 可代替调质处理作为最终热处理, 也可作为用感应加热方法进行表面淬火前的预备热处理。

③ 过共析钢球化退火前进行一次正火, 可消除网状二次渗碳体, 以保证球化退火时渗碳体全部球化。

④ 工具钢、模具钢、轴承钢、渗碳钢等正火，可以减少或抑制网状碳化物的形成，从而得到球化退火所需的良好组织。

⑤ 铸钢件可以细化铸态组织，改善切削加工性能；用于球墨铸铁，使硬度、强度、耐磨性得到提高。

2) 正火处理的结果随钢材和钢件的钢种、状态和截面尺寸的不同而有很大的差别。因此对于状态和尺寸不同的钢材，可以用正火方法来获得不同的效果。对性能要求不高的普通结构零件、大型锻件，正火可以作为最终热处理。对于某些淬透性不高的钢种、大截面工件，常用正火处理来代替淬火，可避免淬火时较大的变形开裂倾向。但对于截面尺寸较大的过共析钢，在经过正火处理后，常在晶界上形成碳化物网，以致影响其性能，在此种情况下则应避免采用正火处理。

2. 正火与退火工艺比较

正火比退火生产周期短，节约能源，成本低，操作方便，因此在可能的情况下应首先考虑采用正火工艺。

1) 常用结构钢的退火及正火工艺规范比较（表 8-4）。

表 8-4 常用结构钢退火及正火工艺规范比较

钢号	临界点温度/℃			退火			正火	
	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	加热温度/℃	冷却方式	硬度 HBW	加热温度/℃	硬度 HBW
20	735	855	680	880 ~ 900	炉冷	—	890 ~ 920	≤156
35	724	802	680	850 ~ 880	炉冷	≤187	860 ~ 890	≤191
45	724	780	682	800 ~ 840	炉冷	≤197	840 ~ 870	≤226
45Mn	715	770	640	810 ~ 840	炉冷	≤217	820 ~ 860	187 ~ 241
40Cr	743	782	693	830 ~ 850	炉冷	≤207	850 ~ 870	≤250
35CrMo	755	800	695	830 ~ 850	炉冷	≤229	850 ~ 870	≤240
40MnB	730	780	650	820 ~ 860	炉冷	≤207	850 ~ 900	179 ~ 207
40CrNiMo	732	774	—	840 ~ 880	炉冷	≤229	890 ~ 920	—
65Mn	726	765	689	780 ~ 840	炉冷	≤229	820 ~ 860	≤269
40CrNi	731	769	660	820 ~ 850	炉冷	—	870 ~ 900	≤250
60Si2Mn	755	810	700	—	—	—	830 ~ 860	≤254
50CrV	752	788	688	—	—	—	850 ~ 880	≤288
20Cr	766	838	702	860 ~ 890	炉冷	≤179	870 ~ 900	≤207
20CrMnTi	740	825	650	—	—	—	950 ~ 970	156 ~ 207
20CrMnNb	710	830	620	850 ~ 870	炉冷	—	870 ~ 900	—
38CrMoAl	800	940	730	840 ~ 870	炉冷	≤229	930 ~ 970	—

2) 常用工具钢退火及正火工艺规范比较（表 8-5）。

表 8-5 常用工具钢退火及正火工艺规范比较

钢号	临界点温度/℃			退火			正火	
	A_{c1}	A_{cm}	A_{r1}	加热温度/℃	冷却温度/℃	硬度 HBW	加热温度/℃	硬度 HBW
T8A	730	—	700	740 ~ 760	650 ~ 680	≤187	760 ~ 780	241 ~ 302
T10A	730	800	700	750 ~ 770	680 ~ 700	≤197	800 ~ 850	255 ~ 321
T12A	730	820	700	760 ~ 780	680 ~ 700	≤207	850 ~ 870	269 ~ 341
9Mn2V	736	765	652	790 ~ 810	670 ~ 690	≤229	870 ~ 880	—
9SiCr	770	870	730	770 ~ 790	700 ~ 720	197 ~ 241	—	—
CrWMn	750	940	710	790 ~ 810	680 ~ 700	207 ~ 255	—	—
GCr15	745	900	700	850 ~ 870	710 ~ 720	207 ~ 255	—	270 ~ 390
Cr12MoV	810	—	760	850 ~ 870	720 ~ 750	207 ~ 255	—	—
W6Mo5Cr4V2	845 ~ 880	—	805 ~ 840	850 ~ 880	740 ~ 750	≤255	—	—
W18Cr4V	820	—	760	780 ~ 860	730 ~ 750	207 ~ 255	—	—
5CrMnMo	710	760	650	780 ~ 860	≈680	197 ~ 241	—	—
5CrNiMo	710	770	680	780 ~ 860	≈680	197 ~ 241	—	—
3Cr2W8V	820	1100	790	850 ~ 860	720 ~ 740	—	—	—

注：钢的退火与正火工艺可参阅热处理工艺国家标准 GB/T 16923—2008《钢的正火与退火处理》。

8.2.3 钢的淬火

将钢或合金钢工件加热到临界点 (A_{c3} 或 A_{c1}) 以上某一温度, 保温一定时间, 使钢的组织全部或大部分奥氏体化, 以适当方式冷却获得马氏体或贝氏体组织的热处理工艺称为淬火。

1) 淬火的主要目的是把奥氏体化的钢淬成马氏体 (或贝氏体), 以提高钢的硬度、强度和耐磨性, 然后与不同的回火温度相配合, 获得所需要的组织以满足零件的使用性能。

2) 淬火是模具钢或模具零件强化的最主要手段, 即最终热处理。但是, 模具钢一般是以退火状态交货的, 甚至少数钢种允许不热处理 (轧制状态) 交货, 所以钢厂一般不进行淬火、回火处理。自从模具钢精品化, 易切削钢、非调质钢以及预硬型模具钢推广应用以来, 钢厂也进行钢的最终热处理。

1. 钢的淬火加热

(1) 淬火加热温度的选择

模具零件淬火加热温度主要取决于钢的化学成分, 结合具体的工艺因素进行确定。

1) 亚共析钢的淬火加热温度一般为 A_{c3} 以上 30 ~ 50℃。这是为了得到细晶粒的奥氏体, 以便淬火后获得细小的马氏体组织。如果加热温度过高, 则钢的氧化脱碳严重, 奥氏体晶粒粗化, 淬火后马氏体组织粗大, 使钢的性能脆化, 而且在淬火冷却时很容易

引起变形和裂纹。如果在 $Ac_1 \sim Ac_3$ 之间加热，组织中将先有一部分共析铁素体存在，在随后的淬火冷却中，由于铁素体不发生转变而使淬火组织中存在铁素体，造成钢的硬度不足、强度不高。

2) 共析钢和过共析钢的淬火加热温度为 Ac_1 以上 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ 。过共析钢在淬火加热以前都要经过球化退火，故加热到 Ac_1 以上时，其组织是奥氏体和一部分未溶的细粒状渗碳体。淬火后的组织为细小马氏体加上颗粒状渗碳体和少量残留奥氏体。弥散分布的颗粒状渗碳体对钢的硬度和耐磨性有利。如果将过共析钢加热到 Ac_{cm} 以上，则由于奥氏体晶粒粗大，碳含量提高，会使淬火后的马氏体也粗大，且残留奥氏体量增加，这不仅降低钢的硬度、耐磨性和韧性，而且还会增加模具变形和开裂的倾向，因此共析钢和过共析钢加热到 Ac_1 以上是适宜的。常用的淬火加热温度和淬火冷却介质见表 8-6。

表 8-6 常用的淬火加热温度和淬火冷却介质

类别	钢号	淬火加热温度/ $^\circ\text{C}$	淬火冷却介质	类别	钢号	淬火加热温度/ $^\circ\text{C}$	淬火冷却介质
工 模 具 钢	T7 ~ T12	780 ~ 800	盐水	工 模 具 钢	Cr12MoV	1020 ~ 1050	油或硝酸盐
		810 ~ 830	碱浴、硝酸盐			1100 ~ 1150	盐浴分级
	GCr15	830 ~ 850	油		W18Cr4V	1000 ~ 1100	盐浴分级
		840 ~ 860	碱浴、硝酸盐			1260 ~ 1280	盐浴分级
	9SiCr	850 ~ 870	油	结 构 钢	45	820 ~ 850	盐水
	5CrNiMo	840 ~ 860	油		40Cr	830 ~ 860	油
	3Cr2W8V	1050 ~ 1100	油		35CrMo	830 ~ 860	油
		1100 ~ 1150	油		65Mn	780 ~ 840	水或油
					38CrMoAl	930 ~ 950	油

(2) 加热介质

在淬火加热时，使用的加热炉不同，其加热介质也不同，因而工件的加热速度及所受到的化学作用（如氧化、脱碳等）也不同，这将直接影响钢的热处理工艺制度和模具的热处理质量。

按加热介质的不同有空气中的氧化加热淬火（如普通的箱式电炉和井式电炉）、可控气氛保护加热淬火（目前我国常用的可控气氛有吸热式气氛、放热式气氛、放热-吸热式气氛、有机液体裂解气氛、氨制备气氛、氮基气氛、氢气、木炭制备气氛等）、盐浴加热淬火（常用盐浴成分及工作温度见表 8-7）、真空加热淬火等。模具零件采用真空加热淬火已是高精度模具提高产品质量的重要途径之一。

表 8-7 常用盐浴成分及工作温度

盐浴成分（质量分数，%）	熔点/ $^\circ\text{C}$	工作温度/ $^\circ\text{C}$
BaCl ₂ 100%	960	1000 ~ 1350
BaCl ₂ 50% + NaCl 50%	600	650 ~ 1000

(续)

盐浴成分 (质量分数, %)	熔点/℃	工作温度/℃
NaCl 100%	808	850 ~ 1000
NaCl44% + KCl 56%	660	700 ~ 870
NaCl 50% + KCl 50%	670	720 ~ 1000
KCl 50% + Na ₂ CO ₃ 50%	560	590 ~ 820
Na ₂ CO ₃ 80% + NaCl 20% 另加 SiCl ₂ 1.3%	680	730 ~ 930

(3) 淬火加热速度

加热速度太慢, 工件易氧化、脱碳, 生产率低, 成本高; 但升温速度太快, 模具表面和中心会产生温差, 温差越大, 热应力越大, 因而产生变形和开裂的可能性也越大。应根据工件材质和尺寸选择合适的加热方法与加热速度。

(4) 淬火加热时间

淬火温度确定以后, 就应确定加热时间, 加热保温时间太短, 工件内部没有热透, 淬火后硬度达不到要求; 加热时间太长, 则不仅造成电能和工时的浪费, 而且增大奥氏体晶粒粗大和工件氧化脱碳的倾向。因此必须确定一个适当的加热保温时间。

1) 加热时间的计算。加热时间包括升温、均温和保温时间。为了使模具内外各部分均完成组织转变、碳化物溶解和奥氏体均匀化, 就必须在模具淬火加热阶段保温一定的时间。

在具体生产条件下, 模具加热时间与钢的成分、原始组织、工件形状和尺寸、加热介质、升温特点、预热与否及预热温度和次数、装炉方式及装炉量等许多因素有关, 因此常借助于经验数据和公式。常用的经验公式为

$$\tau = \alpha KD$$

式中 τ ——加热时间 (min);
 α ——工件加热系数 (min/mm), 见表 8-8;
 K ——工件装炉系数, 一般由经验而定, 常取 1 ~ 2;
 D ——工件的有效厚度 (mm)。

表 8-8 工件加热系数 α (单位: min/mm)

钢种	工件直径 /mm	<600℃ 箱式炉预热	750 ~ 900℃ 盐浴加热或预热	800 ~ 900℃ 箱式或井式炉加热	1100 ~ 1300℃ 高温盐浴炉加热
碳素钢	≤50	—	0.3 ~ 0.4	1.0 ~ 1.2	—
	>50	—	0.4 ~ 0.45	1.2 ~ 1.5	—
合金钢	≤50	—	0.45 ~ 0.5	1.2 ~ 1.5	—
	>50	—	0.5 ~ 0.55	1.5 ~ 1.8	—
高合金钢	—	1.0 ~ 1.5	0.35 ~ 0.5	—	0.17 ~ 0.25
高速工具钢	—	—	0.3 ~ 0.5	—	0.14 ~ 0.25

2) 主要考虑因素。由于具体加热条件不同, 确定比较复杂, 差别也较大, 在不同加热条件下加热可应用经验公式, 但更应考虑如下因素: 钢的特性; 加热炉及加热介质的特性; 奥氏体化温度的高低; 升温特点, 预热与否及预热温度及次数; 装炉方式及装炉量。

2. 淬火冷却介质

把加热到奥氏体化状态的模具钢淬入淬火冷却介质中要求得到马氏体组织, 因此模具零件在淬火冷却介质中的冷却速度必须大于其临界冷却速度。但是冷却过快, 模具的体积变化及组织转变都很剧烈, 不可避免地要产生很大的内应力, 使工件变形甚至开裂。而且由于各种钢过冷奥氏体的稳定性和工件的形状、尺寸不同, 所以对淬火冷却介质的冷却能力的要求也不同。

(1) 对淬火冷却介质的基本要求

- 1) 在钢的过冷奥氏体稳定性最小的温度范围内应具有足够的冷却能力。
- 2) 钢在低温相变化温度区域具有较低的冷却速度, 避免变形、开裂发生。
- 3) 介质成分稳定, 经济、易得, 在使用过程中不易变质或降低冷却性能, 在使用条件下有合适的黏度。
- 4) 不易腐蚀工件, 工件淬火后表面光亮, 易于清洗。
- 5) 在使用中, 不易燃、易爆, 无毒、无味, 使用安全, 不易腐蚀工件。

影响淬火冷却介质冷却能力的外界因素有介质温度、浓度、压力、污染和搅拌条件等。

(2) 常用淬火冷却介质的性能 (表 8-9)

表 8-9 常用淬火冷却介质的性能

名 称	最大冷却速度时		平均冷却速度/ (°C/s)	
	所在温度/°C	冷却速度/(°C/s)	650 ~ 500°C	300 ~ 200°C
静止自来水 (20°C)	340	775	135	450
静止自来水 (40°C)	285	545	110	410
静止自来水 (60°C)	220	275	80	185
10% (质量分数) NaCl 水溶液 (20°C)	580	2000	1900	1000
15% (质量分数) NaOH 水溶液 (20°C)	560	2830	2750	775
5% (质量分数) Na ₂ CO ₃ 水溶液 (20°C)	430	1640	1140	820
L - AN15 全损耗系统用油 (20°C)	430	230	60	65
L - AN15 全损耗系统用油 (80°C)	430	230	70	55
L - AN32 全损耗系统用油 (20°C)	500	120	100	50

注: 冷却速度由 $\phi 20\text{mm}$ 钢球测得。各冷却速度均根据有关冷却特性曲线估算得到。

1) 水。由于水价廉、易得、使用安全、洁净, 故目前仍是碳素钢最常用的淬火冷却介质。水在 650 ~ 550°C 有很强的冷却能力, 但在 300 ~ 200°C 需要慢冷时, 它的冷却

能力过强,所以水淬时工件容易发生变形或开裂。水冷时,水温为 15 ~ 40℃ 为宜,超过 40℃,在 650 ~ 550℃ 冷却能力大大降低,而 300℃ 以下的冷却能力仍然很强。此外较大的碳素钢工件在水中淬火时,容易在工件表面形成蒸汽膜,如果没有及时清除破坏它,将降低局部冷却速度,造成软点。

2) 食盐水溶液。在水中加入质量分数为 10% ~ 15% 的食盐,可显著提高 650 ~ 550℃ 范围内的冷却能力。这是因为食盐微粒依附在红热的淬火零件上,产生爆裂,破坏了蒸汽膜,因而能消除淬火零件的软点。盐水在 300 ~ 200℃ 冷却能力仍很大,而且盐水对工件及淬火槽有一定的腐蚀作用,淬火后零件必须清洗干净。盐水主要用于碳素钢模具零件的淬火。

3) 矿物油。矿物油也是目前工厂普遍应用的淬火冷却介质。常用的矿物油为 L-AN15 或 L-AN32 全损耗系统用油、变压器油、锭子油、柴油等。油在 300 ~ 200℃ 冷却速度远低于水,这对减少淬火工件的变形和开裂是有利的。但在 650 ~ 550℃ 冷却速度不够大,因此只能用于过冷奥氏体稳定性较大的合金钢件或碳素钢小型薄壁工件的淬火。淬火时油的常用温度为 20 ~ 80℃。它的缺点是成本高、易燃、污染环境、工件表面清洗困难等。

4) 新型淬火冷却介质。近年来,国内外在研制新型淬火冷却介质方面取得很大进展,如饱和氯化钙水溶液、过饱和硝酸盐水溶液、聚醚水溶液、水玻璃溶液、聚合物淬火冷却介质等,对提高模具的质量起了很大作用。

① 氯化钙水溶液。

配制:将含有水分的氯化钙 ($m\text{CaCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) 或块状氯化钙溶于水中,配成饱和溶液。

性能: CaCl_2 饱和水溶液与常用淬火冷却介质性能的比较见表 8-10。

表 8-10 CaCl_2 饱和水溶液与常用淬火冷却介质性能的比较

淬火冷却介质	平均冷却速度/ (℃/s)	
	650 ~ 550℃	300 ~ 200℃
CaCl_2 饱和水溶液	1000	150
水 (18℃)	600	270
10% (质量分数) NaCl 水溶液, (20℃)	1100	300
15% (质量分数) NaOH 水溶液, (20℃)	1200	300
50℃ 菜籽油	200	35
50℃ L-AN15 全损耗系统用油	150	30
50℃ 变压器油	120	25

② NQ-1 聚合物。NQ-1 聚合物是以高分子聚合物为基体的水溶液,含有多种合成添加剂,通过对浓度的调整可以实现从盐水至油的冷却速度。其使用浓度可根据所处理的钢种、工件尺寸、形状和热处理要求来决定。可替代目前热处理行业使用的水、盐

水、油等淬火冷却介质。

NQ-1 聚合物淬裂敏感性试验：采用 T8 钢标准试样，外形尺寸为 $\phi 30\text{mm} \times 30\text{mm}$ ，加热温度为 $(840 \pm 10)^\circ\text{C}$ ，保温 30min，淬火后用磁粉检测。NQ-1 聚合物淬裂敏感性比较见表 8-11。

表 8-11 NQ-1 聚合物淬裂敏感性比较

淬火冷却介质	水	5% (质量分数) NQ-1	15% (质量分数) NQ-1	25% (质量分数) NQ-1	L-AN15 全损耗 系统用油
试样件数	3	3	3	3	3
开裂件数	3	1	0	0	0

NQ-1 聚合物淬透性试验：采用 45 钢为淬透性试验材料，热处理加热温度为 $(840 \pm 10)^\circ\text{C}$ ，保温时间为 30min，淬火后沿试样轴线剖切开，横断面上的硬度值见表 8-12。

表 8-12 NQ-1 聚合物淬透性试验

试样尺寸	淬火冷却介质	表面硬度 HRC	1/2R 处硬度 HRC	中心处硬度 HRC
$\phi 20\text{mm} \times 60\text{mm}$	水	60	54	52
	5% (质量分数) NQ-1	61	57	53
	15% (质量分数) NQ-1	61	57	54
	25% (质量分数) NQ-1	58	52	50
	L-AN15 全损耗系统用油	54	48	45
$\phi 30\text{mm} \times 90\text{mm}$	水	56	33	31
	5% (质量分数) NQ-1	59	40	34
	15% (质量分数) NQ-1	58	38	33
	25% (质量分数) NQ-1	54	33	30
	L-AN15 全损耗系统用油	50	25	23

淬火变形试验：采用 45 钢标准试样，外形尺寸为 $\phi 50\text{mm} \times 10\text{mm}$ ，在电炉中加热，加热温度为 $(840 \pm 10)^\circ\text{C}$ ，保温 15min。试样加热后在不同介质中淬火。试样淬火后变形大小及淬火后硬度见表 8-13。

表 8-13 试样淬火后变形大小及淬火后硬度

淬火冷却介质	平均变形值/mm	表面硬度 HRC
水	+0.80	60
5% (质量分数) NQ-1	+0.61	61
15% (质量分数) NQ-1	+0.12	60
25% (质量分数) NQ-1	+0.26	58
L-AN15 全损耗系统用油	+0.09	54

3. 淬火冷却方法

淬火分为两个主要阶段,即加热和冷却。为了使模具零件淬火冷却时最大限度地减少变形和开裂,除正确地进行加热和合理选择淬火冷却介质外,还应根据工件的成分、尺寸、形状和技术要求选用合适的淬火方法。常用的淬火方法有单液淬火法、双液淬火法、喷射淬火法、分级淬火法和等温淬火法等。

(1) 单液淬火法

将钢或零件加热到奥氏体化后淬入水、油或其他淬火冷却介质中,经过一定时间冷却(冷却到低于珠光体转变温度区域或马氏体转变温度区域)取出空冷。由于冷却过程在单一的淬火冷却介质中完成,故称为单液淬火法。

单液淬火时碳素钢零件一般淬水,合金钢零件一般在油中冷却。单液淬火操作简单,应用普遍,易于实现机械化和自动化。但钢件在马氏体转变区冷却较快,容易产生较大的组织应力,从而增大工件的变形,甚至开裂。形状复杂的模具在单液淬火冷却时可在空气中预冷一段时间再淬火冷却,预冷时以不引起高温转变为宜。

(2) 双液淬火法

淬火冷却过程是在两种淬火冷却介质(最常用的是水、油)中配合完成的,冷却过程较为理想,即在珠光体转变区域快速冷却,在马氏体转变区域缓慢冷却。具体做法是,将加热到奥氏体化温度的钢或零件先淬入高温区快冷的第一种介质中(通常是水或盐水溶液),以抑制过冷奥氏体的珠光体转变,当冷却到 400°C 左右时,迅速取出转入低温区缓冷的第二种介质中(通常为油)。由于马氏体转变在较缓和的冷却条件下进行,可有效地缓解或防止变形和开裂,俗称“水淬油冷”。此法需要较高的操作技巧。有时可理解为三种介质,即先水、后油、最终是空气。

双液淬火的优点是工件在马氏体转变温度区缓冷,产生的组织应力比较小,可以降低工件淬火时内应力、变形和裂纹的危险。但此法的缺点是工件在第一种介质中冷却的停留时间较难控制,如果停留时间过长,工件的温度已降至 M_s 点以下,已发生马氏体转变,就相当于单液淬火,容易产生变形与开裂;如果停留时间过短,则缓冷时奥氏体可能发生珠光体转变,工件淬不硬。根据实践经验,工件在水中停留时间,可按每 $3\sim 5\text{mm}$ (直径或厚度)为 1s 计算。水、油双液淬火主要用于高碳钢零件和合金钢制大型零件。

(3) 喷射淬火法

大型复杂特别是厚薄相差大的工件,为使冷却均匀,避免过大的淬火应力,控制好冷却过程不同阶段不同部位的冷却速度,可采用喷液(水或水溶液)、喷雾(压缩空气和水经雾化喷射到零件不同部位)、气淬等多种方式。其优点是控制不同介质或不同流量、压力来调节各温度区域的冷却速度,或改变喷嘴数量和位置使冷却均匀。

(4) 分级淬火法

将加热到奥氏体化的模具零件淬入温度在马氏体转变温度附近的淬火冷却介质(常用的为盐浴)中,停留一段时间,待模具的内外层都达到介质温度后取出空冷,以

较低的冷却速度完成马氏体转变，此法能显著减少变形并且提高钢的韧性，是模具零件常用的淬火方法。

分级淬火的温度选择有两种：一种是取被处理工件钢种的马氏体转变开始温度（ M_s 点）以上 $10 \sim 30^\circ\text{C}$ ；另一种是选取 M_s 点以下 $80 \sim 100^\circ\text{C}$ 。分级的停留时间一定要掌握好，过短则温度不够均匀，未能达到分级淬火的目的；过长则可能发生非马氏体相变而降低硬度。

但是分级淬火时由于盐浴、碱浴的冷却能力差，对于奥氏体不稳定的碳素钢，只能用于厚度和直径不超过 10mm 的模具零件。如果尺寸较大，冷却速度较低，容易形成珠光体组织而达不到淬火的目的。分级淬火最适合用于奥氏体稳定性较大的合金钢工件，特别是形状复杂、尺寸要求精确的模具。

（5）等温淬火法

将加热到奥氏体化温度的模具零件淬入温度稍高于被淬火钢种 M_s 点的盐浴或碱浴中，保温足够时间，完成相变以获得下贝氏体组织或下贝氏体和马氏体混合组织，然后取出空冷，这种方法称为等温淬火。

等温淬火产生的内应力很小，工件不易产生变形和开裂，而且下贝氏体组织具有较高的硬度、强度、耐磨性和韧性。一般情况下，等温淬火可不再进行回火处理。

由于碱浴或盐浴的冷却能力低，故等温淬火只适用于处理形状复杂和尺寸要求精确的较小工件，如刀具、模具等。对于硬度要求高的模具钢，此法硬度往往达不到要求。

4. 淬火操作程序

淬火时除了根据钢种、工件的形状、尺寸大小和技术要求合理地选择淬火工艺外，还应重视淬火操作，如果操作不当，也会造成工件硬度不足、变形和开裂等缺陷。

（1）淬火前的准备工作

1) 首先检查模具表面，不允许有过深的刀痕、折叠、裂纹、锈斑及其他缺陷。

2) 模具形状复杂、有不需淬硬的和易开裂的部位，如孔洞、键槽、螺纹、轴肩、尖角、薄壁和焊接处等部位，可用粘土、石棉堵塞，钢丝和石棉绳捆扎，或用薄钢板及石棉布包裹。

3) 模具在盐炉或井式炉中加热时，可用钢丝扎牢、焊吊环、料筐等方式吊装。

4) 工件表面不允许氧化、脱碳时，可在盐浴炉或保护气氛炉中加热。若在空气炉（如箱式电炉）中加热，可在模具表面涂抗氧化防脱碳涂料，或将模具放在填满旧渗碳剂、木炭或干铁屑的铁箱内再放于炉内加热。

（2）淬火时冷却注意事项

1) 模具从炉中取出时应持稳，防止摇晃或相互碰撞。一般工件（细小件除外）应在空气中停留片刻，这能起到预冷作用。浸入淬火冷却介质的操作应使冷却均匀，否则将造成较大的应力和变形。

2) 细长形、圆筒形的工件应按轴向垂直淬入，圆盘形工件应使其轴向与淬火冷却介质液面保持水平淬入，长方体有贯通孔的工件（如冲模），应垂直斜向淬入，以增加孔部的冷却。

3) 厚薄不均的工件, 应使厚的部分先淬入, 以免开裂; 有凹面或不通孔的工件, 应使凹面或孔朝上浸入, 以利于排除蒸汽; 薄刃工件应使整个刃口同时先淬入; 薄片件应垂直淬入, 使薄片同时冷却; 大型薄件应快速垂直淬入。速度越快, 变形越小。

4) 工件浸入淬火冷却介质后, 需作适当的上、下运动或先上下再前后移动, 以增强淬火冷却介质的对流, 加速蒸汽膜的破裂, 从而提高工件的冷却速度。若工件移动不当, 使单方向冷却较快, 就会引起变形。

5) 淬火冷却介质的温度不宜超过规定范围, 否则会降低其冷却能力。水及水溶液应不超过 40°C , 油温控制在 $20 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围内, 碱浴温度以不超过 200°C 为宜。淬火冷却介质可采用循环和机械搅动, 以保证温度均匀。

5. 钢的淬硬性和淬透性

(1) 淬硬性

淬硬性是指钢在淬火后能达到的最高硬度, 即在淬火时的硬化能力, 它主要取决于马氏体中的碳含量, 而合金元素对淬硬性影响不大。这是因为合金元素在马氏体的晶格中不是处于间隙位置, 而是置换了某些铁原子, 对马氏体晶格的扭曲作用远不及碳大。例如碳含量低的高合金钢淬成马氏体后, 硬度一般不超过 50HRC; 碳含量高的碳素工具钢淬成马氏体, 能达到 65HRC 的高硬度。

(2) 淬透性

淬透性是指在一定淬火条件下, 钢材淬硬层深度和硬度分布的特性。它反映钢在淬火时, 奥氏体转变为马氏体的容易程度。在同一条件下淬火, 淬透性好的钢, 其淬硬深度深; 淬透性差的钢, 其淬硬层深度浅。

钢的淬透性是由钢的内在因素决定的, 是钢的固有属性。而钢的实际淬透层深度除受自身淬透性影响外, 还与热处理工艺条件等外界因素有关, 例如工件尺寸的大小、介质冷却能力的强弱等因素, 均对淬火后得到的实际淬透层产生影响。所以钢的淬透性与钢的实际淬透层深度是两个不同的概念。在生产中常用临界淬透直径 (D_0) 和钢的淬透性曲线两种方法来表示。临界直径是指钢在某种介质中淬火时, 心部能淬透的最大直径 (心部为半马氏体)。

1) 半马氏体硬度 (表 8-14)。

表 8-14 钢的半马氏体硬度

(HRC)

w_c (%)	碳素钢	合金钢	w_c (%)	碳素钢	合金钢
0.08 ~ 0.17	—	25	0.33 ~ 0.42	40	45
0.18 ~ 0.22	25	30	0.43 ~ 0.52	45	50
0.23 ~ 0.27	30	35	0.53 ~ 0.62	50	55
0.28 ~ 0.32	35	40	> 0.62	50 ~ 55	—

2) 常用钢的临界直径 (表 8-15)。

表 8-15 常用钢的临界直径 D_0

(单位: mm)

钢号	静油	20℃ 水	40℃ 水	20℃, 5% NaCl (质量 分数) 水溶液	钢号	静油	20℃ 水	40℃ 水	20℃, 5% NaCl (质量 分数) 水溶液
20	3	8	6	8	38CrMoAl	47	69	65	70
45	10	20	15	21.5	12Cr2Ni4	36	56	52	57
60	12	24	19.5	25.5	60Si2Mn	22	38	35	40
40Mn	16	29	25	30	50CrVA	32	51	47	52
65Mn	20	36	31.5	37	GCr15	15	28	24	29
35SiMn	25	42	38	43	T10	14	26	22	28
20Cr	10	20	16	27.5	9SiCr	32	51	47	52
40Cr	22	38	35	40	Cr2	22	38	35	40
35CrMo	25	42	38	43	9Mn2V	33	42	50	54
42CrMo	40	58	54.5	59	9CrWMn	75	95	90	96

3) 端淬法试验。利用临界直径 D_0 很容易判断一定尺寸的工件能否被淬透, 但对于尺寸超过临界直径的工件, D_0 就无法提供硬度在截面分布的情况, 故应用上受到一定限制。常用端淬法试验绘制淬透性曲线来反映钢的淬透性。国家标准 GB/T 225—2006 规定了端淬法的试样形状尺寸及试验方法, 其试验装置如图 8-5 所示。

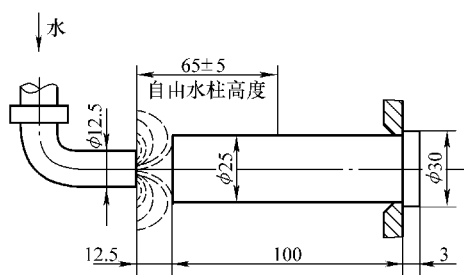


图 8-5 端淬法试验装置示意图

试验时, 按规定将加热到淬火温度的

试样迅速放在端淬装置上, 进行喷水冷却。此时沿试样长度各处的冷却速度不一样, 末端处冷速最快, 离末端越远冷速越慢。试样冷透后取下, 磨平两侧 (深约 0.4mm), 自离末端 1.5mm 处开始沿长度逐点测定硬度, 所获得的硬度分布曲线称为淬透性曲线。端淬法以钢的淬透性曲线表示钢的淬透性。各种钢的淬透性曲线可查阅相关手册, 避免重复试验。

根据 GB/T 225—2006 规定, 钢材的淬透性可用钢材淬透性值 JHRC - d 表示, 其中 HRC 表示硬度值, d 表示离末端距离。例如 J40 - 15, 即表示该钢种离末端 15mm 处的硬度为 40HRC。

8.2.4 钢的回火

回火是淬火的后续工序, 是将淬火后的钢加热到 A_{c1} 以下某一温度 (根据回火后要求的金相组织和性能而定), 充分保温 (使转变完成) 后冷却的热处理工艺过程。回火

是淬火后不可缺少的后续工序,对钢在使用状态下的组织和性能起着决定性作用。生产中把淬火和回火的联合工艺称为最终热处理。

1. 回火的目的

(1) 消除应力

减少或消除模具零件淬火时产生的应力,防止模具零件变形和开裂。

(2) 稳定尺寸

淬火组织中的马氏体和残留奥氏体都是不稳定组织,通过回火使淬火组织变为稳定组织,从而保证模具零件在使用过程中不再发生形状和尺寸的变化。

(3) 提高力学性能

通过回火改变淬火组织,可降低钢的硬度和脆性,提高其塑性和韧性,以获得模具零件所需要的组织和力学性能。

2. 回火的分类

根据模具零件的性能要求,按回火温度高低,可将回火分为三类。

(1) 低温回火

回火温度一般为 250°C 以下,其目的是在尽可能保留模具高硬度的条件下,消除或降低其淬火内应力,恢复一定的韧性而不致过脆,一般有高耐磨性要求的冷作模具零件采用。

(2) 中温回火

回火温度一般为 $350\sim 500^{\circ}\text{C}$ 。使淬火钢既有一定的强度和弹性,又有足够的韧性和塑性,常为受冲击的模具零件采用。

(3) 高温回火

回火温度一般为 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ 或更高些,目的是调整钢的强韧性(即综合力学性能),使其达到最佳配合,也称调质处理。作为预备热处理时,也可为以后的表面淬火、渗氮等做好组织准备,并可改善钢的加工性能。此外,对于某些高合金钢可获得二次硬化效果,提高硬度、耐磨性和尺寸稳定性,消除残留奥氏体。一般为热作模具钢和塑料模具零件采用,目的是提高模具在工作温度下的韧性和耐磨性。

3. 回火保温时间

1) 模具淬火后,必须进行充分的回火保温,回火保温时间一般是根据模具的材料、工件尺寸、回火温度和模具的性能要求及加热炉型来确定的。

2) 保温时间不足往往造成不良后果,有时需要多次回火,一般规定不得小于1h。对于消除应力为主要目的的低温回火,则需要更长的时间。高速工具钢或高合金模具钢具有二次硬化效应,必须反复回火2~4次。

3) 回火后的冷却一般采取空冷,缓慢冷却效果更好,因为细微的二次碳化物在此过程中析出。钢的淬火与回火工艺可参阅GB/T 16924—2008。

4. 钢的回火脆性

淬火钢在某些温度区间回火或从回火温度缓慢冷却通过该温度区间的脆化现象称为回火脆性。回火脆性可分为第一类回火脆性和第二类回火脆性。

(1) 第一类回火脆性 (低温回火脆性)

有些合金钢在 250 ~ 400℃ 温度范围内回火后其冲击韧度显著下降, 这种现象称为第一类回火脆性。

1) 第一类回火脆性的特点。

① 具有不可逆性。这种回火脆性产生以后无法消除。但如果加热至 400℃ 以上脆性便消失, 再把它重新加热到 250 ~ 400℃ 回火时, 脆性也不再出现。

② 与回火后的冷却速度无关。在此温度 (低温) 范围内回火时, 在所有的钢中总会有不同程度的脆性发生, 与回火后的冷却速度无关。

③ 断口为沿晶脆性断口。当发生脆化时, 断口为沿晶界脆性断口, 钢强度、硬度和塑性与回火温度的关系不变。

2) 第一类回火脆性的产生机理。

① 残留奥氏体转变理论。一些高碳高合金钢 (如高速工具钢) 淬火后常有相当数量的残留奥氏体。在 250 ~ 400℃ 回火时, 残留奥氏体沿马氏体边界转变, 使钢的硬度提高, 并造成马氏体条间偏聚, 增加了第一类回火脆性的可能性。

② 碳化物析出理论。一般认为, 在 250 ~ 400℃ 回火时沿马氏体边界析出极细的薄片合金碳化物是产生第一类回火脆性的重要原因。

③ 杂质偏聚理论。杂质元素向马氏体条间偏聚增加了第一类回火脆性的可能性。

3) 第一类回火脆性的防止方法。

① 第一类回火脆性无法消除, 一般认为不在这一温度区间内回火。第一类回火脆性的严重程度与钢种有关, 中、低碳高强度合金钢和弹簧钢具有明显的第一类回火脆性。为了避免第一类回火脆性, 回火时应避开此温度范围, 或采用等温淬火代替淬火回火工艺。对于一些模具钢零件有时为了获得好的力学性能, 必须在脆化温度区回火时, 可采取等温淬火工艺。

② 对于冶金质量要求较高的模具材料, 可与生产企业签订合同, 严格保证钢的质量, 降低钢中杂质元素的含量。选材时, 应尽量选用加入 Al 或 Nb、V、Ti、Cr、Si、Mo、W 等元素的材料。这些元素不仅可以细化奥氏体晶粒, 而且可以调整温度范围, 减轻回火脆性, 保证模具热处理后在获得高强度的同时获得高韧性。

高碳钢和合金工具钢低温回火后都是比较脆的, 但在一般冲击试验条件下, 显示不出第一类回火脆性。只有在扭转冲击试验条件下, 才表现出回火脆性。实际工件的损坏形式往往有很大差别, 故应根据工件实际受力情况和工件的结构、尺寸和强度进行全面考虑。例如 CrWMn 钢制六角螺母冷锻模在 180℃ 回火, 硬度在 60HRC 以上, 使用中极易产生开裂, 而改为 260℃ 回火, 硬度为 56 ~ 58HRC, 却避免了开裂现象, 寿命大为提高。因此对于承受拉伸、压缩或弯曲应力的冷作模具, 在选材和制订热处理工艺方案时, 主要应考虑在保证适当韧性的条件下, 材料应具有尽可能高的强度, 而不必过多地考虑第一类回火脆性区的影响。

(2) 第二类回火脆性 (高温回火脆性)

有些钢种, 例如锰钢、铬钢、镍钢、硅钢等在 450 ~ 650℃ 实行高温回火时出现冲

击韧度下降的现象,而且回火后的冷却速度越缓慢,脆化现象越严重,称为第二类回火脆性。这种回火脆性在 500 ~ 550℃ 温度范围最显著。

1) 第二类回火脆性的特点。

① 具有可逆性。这种回火脆性是可逆的,因为只要把高温回火后缓冷的钢件重新加热到 600℃ 左右的温度,并随之快冷,即可显著减少或消除回火脆性。已经消除了回火脆性的钢,如果再重新加热到脆性温度区回火,然后缓慢冷却,则脆性又会出现。

② 与化学成分有关。第二类回火脆性主要与锑 (Sb)、磷 (P)、锡 (Sn)、砷 (As) 等杂质在晶界上的偏聚和析出有关。钢中含有锰 (Mn)、铬 (Cr)、镍 (Ni) 等合金元素时,更容易出现第二类回火脆性。

③ 与回火后的冷却速度有关。回火保温后,缓冷出现,快冷不出现,出现脆性后可重新加热后快冷消除。

2) 第二类回火脆性的产生机理

① 高温回火时, Ni、Cr、Sb、Sn、P 等都向原奥氏体晶界偏聚,都集中在 2 ~ 3 个原子厚度的晶界上,这是产生第二类回火脆性的主要原因,回火脆性随杂质元素的增多而增大。

② Ni、Cr 不仅促进杂质元素的偏聚,且本身也偏聚,从而降低了晶界的断裂强度,产生回火脆性。

3) 第二类回火脆性的防止方法。

① 合金元素 Mo、W 能抑制杂质元素向奥氏体晶界偏聚,而且自身也不偏聚。要求较高耐回火性的模具零件宜选用含钨和钼的钢制造。回火脆性敏感的钢不宜采用高温回火。

② 采用高温形变热处理,使晶粒超细化,晶界面积增大,降低杂质元素偏聚的浓度。对于尺寸小、形状简单的零件,采用回火后快冷的方法,可防止第二类回火脆性发生。

8.2.5 钢的冷处理

冷处理或深冷处理是将淬火后的钢继续冷至零度以下,使在室温尚未转变的残留奥氏体继续转变为马氏体的热处理工艺。为了减少或消除淬火组织中的残留奥氏体,应在淬火 1h 内把钢冷却到马氏体转变开始的 M_s 线以下某一温度,一般为 -60 ~ -196℃,使在室温未完成转变的奥氏体转变成马氏体。

1. 冷处理的目的

冷处理是材料科学中改善金属工件性能的一种工艺,有大幅度提高工件稳定性、降低淬火应力、提高强度的作用。

1) 使模具零件具有精度保持性和尺寸稳定性,防止室温下残留奥氏体转变而发生尺寸变化。

2) 使未转变的奥氏体更多地转变为马氏体,进一步提高硬度,从而提高模具零件的耐磨性和使用寿命。

2. 冷处理介质

常在工业冰箱或特制的冷处理设备中的空气介质中冷却；也可在将干冰（固体 CO_2 ）加入酒精的溶液中冷却（一般只能冷却到 -60°C 左右），此法不易控温，能耗大；也可在液氮中（ -196°C 左右）冷却，此时为强调深冷，区别于一般的冷处理，称为深冷处理。冷处理常用介质及其达到的温度见表 8-16。

表 8-16 冷处理常用介质及其达到的温度

介 质	达到的温度/ $^\circ\text{C}$	介 质	达到的温度/ $^\circ\text{C}$
20% NH_4Cl + 80% H_2O （质量分数）	-15.4	丙烷	-42.1
干冰（固体 CO_2 ）+ 酒精	-78	F-12（ CF_2Cl_2 ）	-29.8
液氮	-195.8	F-13（ CFS_3Cl ）	-81.5
液氮	-252.8	F-14（ CFS_4 ）	-128
液氮	-33.4	F-22（ CHF_2Cl ）	-40.8

3. 冷处理工艺

1) 冷处理温度根据模具零件所采用的钢种而定，一般取 $-60 \sim -80^\circ\text{C}$ 即可，温度过低不能使奥氏体全部转变，反而增加成本和模具开裂的危险。特殊情况下，可冷却到更低的温度，如 -196°C 左右（深冷处理）。

2) 冷处理时间，以钢表里温度达到均匀一致为准，不需要特别延长保温时间。一般单件和小批量工件达到冷处理温度后，转变即完成，不需保温。

3) 当批量较大时，为使所有工件的心部都能达到冷处理温度，可根据情况保温 1~3h。冷处理时钢中残留奥氏体向马氏体转变主要发生在冷却过程中，中间停留会使奥氏体稳定化而影响马氏体转变的彻底完成。

冷处理应在工件淬火后立即进行，以避免在室温停留引起残留奥氏体稳定化。室温停留时间越长，奥氏体稳定化越严重，冷处理效果越差。但为了节约能源，应先用冷水冲洗数分钟，逐渐降温后再放入冷处理设备或介质中。降温宜缓慢，冷却速度过快易造成开裂。冷处理完成后，取出工件在空气中自然缓慢地升到室温，并及时进行回火，以获得稳定的回火马氏体，并使残留奥氏体进一步转变、稳定化，防止开裂。

4. 冷处理在工、模具上的应用

冷处理主要用于冷作模具的精密零件。

1) Cr12MoV 钢冲模经 1030°C 加热淬火， 200°C 回火， -196°C 深冷处理， 200°C 回火，其 a_k 值比常规热处理提高 21%，使冲模寿命提高 1.5~2 倍。

2) Cr12MoV 钢 M12 螺母冷锻模经 1030°C 加热淬火， 100°C 回火， -160°C 深冷处理 2h， 500°C 回火两次，硬度提高 1~2HRC，抗弯强度提高约 5%，耐磨性大幅度提高，寿命提高 2 倍。

3) 9SiCr 钢冲模经 870°C 加热淬火， 200°C 回火， -196°C 深冷处理 1h 后，模具寿命提高 2 倍。

8.2.6 模具真空热处理

真空热处理是在低于一个大气压的环境中进行加热的热处理工艺,是真空技术与热处理技术相结合的新型热处理技术。真空热处理所处的真空环境指的是低于一个大气压的气氛环境,包括低真空、中等真空、高真空和超高真空,实际上是属于控制气氛热处理。

1. 真空热处理工艺特点

真空热处理是指热处理工艺的全部和部分在真空状态下进行,可以实现几乎所有常规热处理所涉及的热处理工艺。

1) 与常规热处理相比,真空热处理具有高效率、低能耗、无污染、劳动强度低、产品质量高等特点,工件在真空加热中无氧化、无脱碳、可脱脂、可除气(特别是模具内部的有害气体氢等),表面洁净光亮,表面性能得到明显改善,可提高耐磨性、疲劳强度等。

2) 真空加热中升温速度可控,模具截面温差小,由热应力引起的变形小,比盐浴淬火变形量小70%左右,淬火时冷却气体可在360°范围内对工件进行喷射冷却,冷却较均匀,工件不会出现软点,淬火硬度均匀。

3) 金属零件在真空中的热处理能防止氧化脱碳。真空热处理炉的加热室在工作时处于接近真空的状态,仅存在微量的一氧化碳和氢气等,它们对于加热的金属是还原性的,不发生氧化脱碳反应;同时还能使已形成的氧化膜还原,因此加热后的金属工件表面可以保持原来的金属光泽和良好的表面性能。

4) 具有脱气效应。金属零件在真空环境中加热时,金属中的有害气体,例如钛合金中的氢和氧,会在高温下逸出,有利于提高金属的力学性能。

5) 金属元素蒸发。各种元素都有自身的蒸气压,如果环境中的压力低于某种元素的蒸气压,这种元素就会蒸发。在真空热处理时,应根据钢中所含合金元素的蒸气压来选择加热时的真空度或温度,以避免合金元素蒸发。

2. 模具真空热处理工艺

模具零件采用真空热处理是目前最佳方式。由于模具对表面质量和畸变的高要求,真空高压气淬几乎已成为模具热处理不可替代的技术。

(1) 真空热处理设备

真空热处理炉有真空退火炉、真空淬火炉和真空回火炉。

1) 真空退火炉。真空退火炉的主要特点是真空度要求高($10^{-2} \sim 10^{-3}$ Pa),炉内的传动机构要平稳,炉内的升降可用计算机自动控制,若有快冷装置,则可提高生产率。工艺与非真空炉退火基本相同。

2) 真空淬火炉。真空淬火炉有两种,即气淬炉和油淬炉。一般真空气淬炉较油淬炉好。气淬的表面质量好、变形小,不需清洗,炉子结构也简单。油淬模具表面会出现白亮层,其组织为大量残留奥氏体,不能用一般回火温度(约560℃)加以消除,需要更高的温度(700~800℃)才能消除。一般处理高合金模具钢或高速工具钢模具工件

选用高压气淬炉或气淬炉较为理想。如采用压力为 0.5 ~ 0.6MPa 的高压气淬时, $\phi 80 \sim \phi 110\text{mm}$ 的工件都能淬硬。

3) 真空回火炉。真空回火炉在真空热处理中是不可缺少的, 在真空淬火后若采用普通电炉回火, 往往会再出现表面质量差、硬度不均匀、回火不足等缺陷。真空回火炉应具有快冷装置, 以避免某些有回火脆性的钢材产生回火脆性。

(2) 真空热处理工艺

1) 处理前的准备。

① 应了解模具的钢号、技术要求、预备热处理状况及热处理工艺规范。

② 应对工件和热处理设备进行检查, 工件应无碰伤、铁锈及其他不允许的表面缺陷, 设备应处于正常状态。

③ 应对工件和夹具进行清洗和烘干, 以防止污垢和水分留在炉内, 造成真空度下降并影响工件的表面质量。清洗采用真空脱脂方法是目前最先进和可靠的方法。

2) 工件装炉。装料时工件应置于炉子的有效加热区。考虑到真空加热以辐射为主, 向着发热体的面加热快, 背阴处加热慢。所以, 工件在炉内应保持间距, 减小相互遮阴, 以防加热不均匀。小零件要用金属网分层隔开, 以期加热和冷却均匀。不应使高速工具钢工件 (尤其是表面粗糙度值较低的平面) 相互接触, 以避免加热时产生粘连。

3) 加热与预热。真空加热炉的真空度是重要的工艺参数, 工件入炉后待真空度达到 6.67Pa 时, 方能升温加热。在高温高真空度下, 钢中的合金元素易蒸发, 会影响模具零件的表面质量。根据工件的材料及加热温度, 用回充高纯氮气的方法控制加热时的真空度。模具钢加热温度与真空度要求的关系见表 8-17。

表 8-17 模具钢加热温度与真空度要求的关系

加热温度/℃	≤900	>900 ~ 1100	>1100 ~ 1300
真空度/Pa	≥0.133	13.3 ~ 1.33	13.3 ~ 666.0

模具达到预定的加热温度之前应进行预热。真空热处理的加热温度为 1000 ~ 1100℃ 时, 一般采用 800℃ 一次预热。加热温度在 1200℃ 以上时, 形状简单、小型的零件, 在 850℃ 预热一次; 较大的或形状复杂的零件, 应进行两次预热, 第一次 500 ~ 600℃, 第二次 850℃ 左右。

4) 保温。

① 加热温度。真空淬火的加热温度一般取盐浴炉和空气炉的下限。真空回火、真空退火、真空固溶处理及真空时效的加热温度一般与常规热处理时的加热温度相同。

② 保温时间。由于真空加热主要靠辐射, 而低温时辐射慢, 故平均加热速度比有对流的炉子慢, 加热时间相应延长。一般认为真空淬火加热保温时间比盐浴炉加热时间长 5 ~ 6 倍, 比空气炉长 2 倍; 真空回火加热的保温时间略长于空气炉加热保温时间, 比硝盐炉长 1 ~ 2 倍; 真空退火加热的保温时间一般比空气炉长 1 倍。

真空加热淬火的保温时间可按下式计算为

$$C = KD + T$$

式中 C ——加热保温时间 (min);
 K ——保温时间系数 (min/mm);
 T ——时间裕量 (min);
 D ——零件有效厚度 (mm)。

K 值和 T 值见表 8-18。

表 8-18 真空加热淬火保温时间计算参数

钢材	保温时间系数 K / (min/mm)	时间裕量 T /min	备注
碳素工具钢	1.9	5 ~ 10	560℃ 预热一次
低合金工具钢	2.0	10 ~ 20	560℃ 预热一次
高合金工具钢	0.48	20 ~ 40	560℃ 预热一次, 800℃ 预热一次
高速工具钢	0.33	15 ~ 25	560℃ 预热一次, 850℃ 预热一次

③ 真空回火时待炉内达到某一真空度 (一般为 0.133Pa) 时, 向炉内通入高纯氮气到 6.6×10^4 Pa 左右, 并采用风扇循环, 保持这种状态到回火结束。

5) 冷却。

① 淬火油应进行充分地脱气, 必要时适当加热。淬火时应充气 (高纯氮气或氩气) 到 5.3×10^4 Pa 左右, 淬火油要进行搅拌。

② 根据工艺要求可采用正压气淬或负压气淬。真空炉常用冷却气体为 H_2 、He、 N_2 、Ar。如 H_2 的冷却时间为 1, 则 He、 N_2 、Ar 的冷却时间分别为 1.2、1.5、1.75。空气中氢气体积分数大于 5% 时, 就会有爆炸的危险。所以 H_2 虽然冷却最快, 但人们仍然很少采用。 H_2 的价格为 N_2 的 10 倍, 国外最佳气体选择为 60% ~ 70% (体积分数) 的 He 和 30% ~ 40% (体积分数) 的 N_2 。0.6MPa 以上真空炉冷却气体可采用净化装置再生, 气体可多次循环利用 (一般可达 50 次), 可降低热处理成本。国内真空炉采用高纯氮 (99.99%) 较多, 正压气淬时通入 $2 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5$ Pa 的高纯氮气, 负压气淬时通入 $7.9 \times 10^4 \sim 9.3 \times 10^4$ Pa 的高纯氮气进行淬火冷却。高速工具钢工件宜采用正压气淬方法。

③ 回火加热结束后, 应采用气体强迫快冷。

④ 退火加热结束后, 按工艺要求进行冷却, 在冷却过程中继续抽真空到一定温度后方可停止。

6) 出炉。一般工件应冷态出炉, 油淬工件出炉后应进行脱脂清理。常用模具钢零件真空热处理工艺规范见表 8-19。

表 8-19 常用模具钢零件真空热处理工艺规范

钢号	预热		淬火			回火温度/℃	硬度 HRC
	温度/℃	真空度/Pa	温度/℃	真空度/Pa	冷却		
9SiCr	500 ~ 600	0.1	850 ~ 870	0.1	油 (40℃以上)	170 ~ 190	61 ~ 63
CrWMn	500 ~ 600	0.1	820 ~ 840	0.1	油 (40℃以上)	170 ~ 185	62 ~ 63
9Mn2V	500 ~ 600	0.1	780 ~ 820	0.1	油	180 ~ 200	60 ~ 62
5CrNiMo	500 ~ 600	0.1	840 ~ 860	0.1	油或高纯 N ₂	480 ~ 500	39 ~ 44
Cr6WV	一次 500 ~ 550 二次 800 ~ 850	0.1	970 ~ 1000	10 ~ 1	油或高纯 N ₂	160 ~ 200	60 ~ 62
3Cr2W8V	一次 480 ~ 520 二次 800 ~ 850	0.1	1050 ~ 1100	10 ~ 1	油或高纯 N ₂	560 ~ 580 600 ~ 640	42 ~ 47 39 ~ 44
4Cr5W2VSi	一次 480 ~ 520 二次 800 ~ 850	0.1	1050 ~ 1100	10 ~ 1	油或高纯 N ₂	600 ~ 650	38 ~ 44
7CrSiMnMoV	500 ~ 600	0.1	880 ~ 900	0.1	油或高纯 N ₂	450 200	52 ~ 54 60 ~ 62
4Cr5MoSiV1	一次 500 ~ 550 二次 800 ~ 820	0.1	1020 ~ 1050	10 ~ 1	油或高纯 N ₂	560 ~ 620	45 ~ 50
Cr12	500 ~ 550	0.1	960 ~ 980	10 ~ 1	油或高纯 N ₂	180 ~ 240	60 ~ 64
Cr12MoV	一次 500 ~ 550 二次 800 ~ 850	0.1	980 ~ 1050 1080 ~ 1120	10 ~ 1	油或高纯 N ₂	180 ~ 240 500 ~ 540	60 ~ 64 58 ~ 60
W6Mo5Cr4V2	一次 500 ~ 600 二次 800 ~ 850	0.1	1100 ~ 1150 1150 ~ 1250	10	油或高纯 N ₂	200 ~ 300 540 ~ 600	58 ~ 62 62 ~ 66
W18Cr4V	一次 500 ~ 600 二次 800 ~ 850	0.1	1000 ~ 1100 1240 ~ 1300	10	油或高纯 N ₂	180 ~ 220 540 ~ 600	58 ~ 62 62 ~ 66

(3) 模具真空热处理注意事项

1) 模具材料含有较多的合金元素, 蒸气压较高的元素 (如 Al、Mn、Cr、Si、Ph、Zn、Cu 等) 在真空中加热时易发生蒸发现象, 所以要适当控制淬火加热时的真空度, 以防止合金元素的挥发, 尤其是含 Cr 量高的钢种。

2) 为减少加热模具零件因内外温差而产生的热应力和组织应力, 对复杂的或大截面的模具零件要进行多次预热, 而且升温速度也不能太快, 这是减少或防止变形的关键之一。

3) 高速工具钢、高 Cr 钢和 3Cr2W8V 钢等较大截面的气淬钢模具零件, 推荐在高压气淬炉内进行处理。如气冷速度不够要进行油淬时, 必须采用气冷油淬工艺, 以防油淬后工件表面出现白亮层组织。

4) 真空淬火加热温度基本上可与盐浴加热和空气加热的温度相同或略低一些。但应注意,升温时工件升温速度远比炉温(指示温度)慢,故均温、保温时间视装炉情况应适当延长。

5) 装料的合理与否与热处理质量关系很大,考虑到真空加热是以辐射为主,小零件需要用金属网分隔,使真空加热和冷却均匀。

钢的真空热处理工艺,可参阅热处理工艺国家标准 GB/T 22561—2008《真空热处理》。

3. 模具真空热处理应用

模具零件经真空热处理后,畸变小,质量高,且工艺本身操作灵活,无公害。因此真空热处理不仅是某些特殊合金热处理的必要手段,而且在一般工程用钢的热处理中也获得应用,特别是工具、模具和精密耦件等,经真空热处理后使用寿命较一般热处理有较大的提高。例如某些模具经真空热处理后,其寿命比原来盐浴处理提高40%~400%,许多工具的寿命可提高3~4倍。此外,真空加热炉可在较高温度下工作,工件可以保持洁净的表面,因而能加速化学热处理的吸附和反应过程。因此,某些化学热处理,如渗碳、渗氮、渗铬、渗硼以及多元共渗等,都能得到更快、更好的效果。

8.3 冷作模具钢的热处理

冷作模具的工作零件承受着拉压、弯曲、冲击、疲劳、摩擦等多种机械力的作用,模具零件易发生脆断、坍塌、磨损、咬合、啃伤、软化等现象而失效。因此冷作模具用钢应在相应的热处理后具备高的变形抗力、断裂抗力、耐磨性、抗疲劳、不咬合等性能。

8.3.1 冷作模具钢的合金化特点

1) 含有较多的提高钢淬透性的合金元素如 Cr、Ni、Mn、Mo 等,多元素的综合作用,形成钢的综合力学性能。

2) 合金元素降低钢的马氏体相变点 M_s , 淬火后有一定量的残留奥氏体,有利于减少淬火变形,也有利于提高韧性。

3) 碳是提高钢淬硬性的最主要元素,要求高硬度的冷作模具钢大多数是高碳的过共析钢,淬火后的组织中除了含碳马氏体和残留奥氏体外,还有过剩的碳化物相,它对钢的硬度、强度、耐磨性、耐回火性、二次硬化能力、细化晶粒等都有影响。因此要特别重视碳化物尤其是合金碳化物的作用,控制碳化物的种类、形态和分布状态。碳化物分为直径几个微米的一次碳化物和直径 $0.1\mu\text{m}$ 以下的细微二次碳化物。模具钢中碳化物的类型和性质见表 8-20。

表 8-20 模具钢中碳化物的类型和性质

碳化物类型	典型结构	硬度 HV	性 质
M_3C	Fe_3C	1150 ~ 1340	模具钢中最基本的碳化物。在合金钢中, Fe_3C 中的 Fe 原子一部分被合金元素如 Cr、W、Co 等置换, 所以用 M_3C 表示。淬火后在 200℃ 左右回火时, 先析出 ϵ 碳化物 (Fe_2C 或 Fe_4C), 再经 300℃ 以上回火时, 变成 Fe_3C
$M_{23}C_6$	$(Cr, Fe)_{23}C_6$	1000 ~ 1520	高 Cr 钢中的主要碳化物, 如高铬不锈钢、高速工具钢等。经淬火或固溶处理后很容易溶入基体中, 高温回火时析出。高铬钢含有 W 或 Mo 时, 则呈 $(Cr, Fe, W)_{23}C_6$ 或 $(Cr, Fe, Mo)_{23}C_6$ 形态, 使硬度提高
M_7C_3	$(Cr, Fe)_7C_3$	1600 ~ 1820	高 Cr 钢中存在的碳化物, 比其他碳化物粗大, 淬火后难于溶入基体, 残留于基体上, 对提高耐磨性作用很大, 含有这种碳化物的钢在锻造时呈纤维状排列, 使钢在淬火后尺寸变化和冲击韧度值有方向性差异
M_2C	Mo_2C W_2C	1800 ~ 2200 3000	W_2C 或 Mo_2C 是其代表性碳化物。存在于高速工具钢中, 在回火时析出, 对高速工具钢的二次硬化作用很大。回火温度过高则形成 M_6C
M_6C	Fe_4Mo_2C	1670	存在于含 W、含 Mo 钢中, 如高速工具钢等, 对提高耐磨性作用很大
MC	$VC \sim V_4C_3$ WC TiC	2400 ~ 3200	含 V 钢中, 碳化物以 $VC \sim V_4C_3$ 各种形态存在, 淬火时不溶于基体, 对含 V 钢的耐磨性有重大贡献。含 W 的高速工具钢、热作模具钢等, 高温退火析出稳定的 WC, 恶化淬火性能。MC 是所有碳化物中硬度最高的

4) 冷作模具钢一般以退火状态交货供应市场, 所以在钢厂都经过良好的退火处理, 保证达到国家或行业标准中规定的质量要求。

8.3.2 冷作模具钢的热处理特点

淬火、回火是冷作模具零件强韧化的最主要方法。模具零件淬火工艺参数如淬火的奥氏体化温度或淬火温度偏离常规的温度范围是常有的, 有时是必要的, 就是说零件的热处理工艺过程必须结合生产实际情况。回火的工艺规范, 则取决于模具零件的热处理技术要求。

1) 冷作模具钢含合金元素量大且品种多, 合金化较复杂。钢的导热性差, 而奥氏体化温度又高, 因此加热过程宜缓慢, 多采用预热或阶梯式升温。

2) 为保证钢的表面质量, 应重视加热介质, 所以控制气氛炉、真空炉等先进加热设备和方法普遍采用, 盐浴加热应充分脱氧、净化。

3) 在达到淬火目的的前提下, 应采用较缓和的冷却方式。等温淬火、分级淬火、高压气淬、空冷淬火等是常用的方法。

4) 为了进一步强化, 采用效果显著的冷处理或渗氮等表面处理方法。

5) 盐浴处理后应及时清理, 工序间的防护工作很重要。

6) 冷作模具钢价格昂贵, 冷作模具零件加工复杂、制造周期长、综合成本高。所

以工艺制订和操作应十分慎重,避免质量事故,保证生产全过程的安全。

8.3.3 碳素冷作模具钢的热处理

碳素冷作模具钢,即碳素工具钢,也称非合金工具钢。碳素工具钢(T7~T13)用来制造小型、简单的冷作模具零件非常普遍,应用最多的是T8A和T10A。该类钢虽然不含合金元素,但由于经精心冶炼、加工和良好的热处理而成为模具零件的重要材料之一。

1. 碳素工具钢的特点

1) 碳素工具钢碳的质量分数为0.7%~1.3%,原料来源方便,价格便宜,具有良好的切削和研磨加工性能,淬火温度低,热处理后具有较高的表面硬度和耐磨性,适宜于制造形状简单、尺寸不大、受轻载荷的模具零件。

2) 按钢中含P、S和Si、Mn的量和纯净度可分为三个等级。即优质钢、高级优质钢(钢号后带“A”)或特级优质钢(钢号后带“E”)。我国碳素工具钢只有优质钢和高级优质钢,其成分中P、S和Si、Mn以及合金元素Cr、Ni、Cu的含量,国家标准有具体规定。

3) 从碳素工具钢的等温转变图(参见图8-2)中可以看出,在转变倾向最大的温度范围,转变的孕育时间是很短的,淬透性很差。为了避免在马氏体形成之前发生非马氏体转变,需要极高的临界冷却速度,为了达到完全淬硬,需要用剧烈的淬火冷却介质,一般是水和水溶液。为了防止产生软点,可在水中添加质量分数为10%的NaCl(食盐)或质量分数为50%的NaOH(氢氧化钠),以提高淬火烈度。即使如此,马氏体淬硬层仍然很浅,仅有2~3mm。在心部区域则低于临界冷却速度,转变在珠光体、贝氏体区域进行,因此,碳素工具钢淬火后心部具有良好的韧性。

4) 碳素工具钢在800~1050℃之间进行热加工变形,温度过高,则产生粗晶粒组织,过共析钢还会形成粗的渗碳体。此时,可进行一次正火或调质处理加以改善。锻造以后,为了改善可加工性,应进行退火。退火后形成的组织是淬火的最佳原始组织。有时为了消除加工应力,要进行去应力退火。

2. 碳素工具钢的热处理工艺

(1) 淬火

1) 加热。将工件缓慢均匀地加热到淬火温度。一般是将预热过的工件转到已经处于淬火温度的炉子中。对于盐浴炉加热,这很重要,一是可避免因工件潮湿(含水分)直接放进盐浴中而容易爆炸;二是可以避免初始升温应力。碳素工具钢在加热初的低温阶段($\leq 600^{\circ}\text{C}$)预热,进一步加热,钢在高温下就有相当好的塑性了。无法给出准确的初始升温时间数据,因为与热处理设备的种类有关。最好是在脱氧良好的盐浴炉或真空炉或带保护气氛的炉内加热。

2) 淬火温度。过共析钢取780~800℃。形状复杂或小尺寸的工件取下限;形状简单的大工件则取上限,甚至稍高的温度如820℃。保温适当时间,然后淬入水或盐水中,视工件具体情况作适当运动。水温以20~30℃(即室温)为宜。淬油时,油温以50~60℃为宜,可获得最佳淬火效果。容易产生较大应力或淬裂工件,最好采用水、油

双液淬火,但需要有相当高的操作技术。

(2) 回火

淬火以后应立即回火,最好是工件淬火冷却到 100°C 时即从淬火冷却介质中取出,然后在 $150 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 取一合适温度回火到符合要求的硬度和韧性。回火需保温足够长的时间,然后在静止空气中冷却。局部淬火的工件一般整体回火。对于模具工作零件,不可采用“快速回火”、“自回火”、“局部回火”等工艺方式,回火必须充分。淬火应力消除不彻底,在后续加工如磨削、线切割时,容易产生裂纹,即使在后续加工中不出现问题,也易发生早期失效,缩短模具寿命。

3. 碳素工具钢热处理应用实例

(1) T10A 钢冲裁凹模热处理

1) 模具的结构形式。冲裁凹模为组合凹模,孔多,尺寸较大,其中 15mm 处为配合尺寸,如图 8-6 所示。

2) 热处理工艺。

① 工件厚度为 32mm ,超过了 T10 钢碱淬的临界尺寸,不能淬透,若用水淬油冷销钉处又易开裂,宜采用预冷后三液淬火。

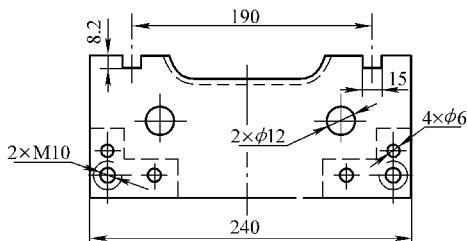


图 8-6 T10A 钢组合凹模

② 延迟淬火。在淬火过程中,热应力起主要作用,延迟淬火是减少热应力的措施之一。模具奥氏体化后先空冷,至 740°C 左右进行淬火,此时,模具呈樱桃色,表面挂白盐。具体工艺如图 8-7 所示。

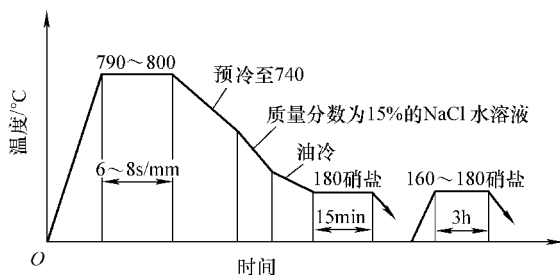


图 8-7 T10A 钢组合凹模的淬火工艺曲线

③ 刃口水淬。冲裁模要求刃口部位硬度高,因此,可采用刃口局部淬硬的方法,以减少模具淬火后的体积变化,有利于防止淬火变形。水冷时间按 $0.16 \sim 0.12\text{s/mm}$ 计算。

④ $\phi 6\text{mm}$ 销钉孔壁薄,并不要求太硬,用薄钢板在两直角处包扎,减缓冷却速度。M10 螺孔用石棉堵塞, $\phi 12\text{mm}$ 孔不堵塞,可均衡冷却速度,经淬火后变形小,符合公差要求。

(2) T8A 钢凹模等温淬火

1) 模具的结构形式：凹模外形尺寸为 150mm × 180mm × 45.5mm。

2) 热处理工艺：采用氯化钙、硝酸盐两步淬火法，获得比较好的效果。氯化钙水溶液的密度为 1.20 ~ 1.24g/cm³，硝酸盐浴组成（质量分数）为 KNO₃50% + NaNO₂50%，另加 3% 的水，使用温度为 150 ~ 180℃。

① 在有保护气氛的箱式炉中加热 840℃ × 4.5h，出炉后开箱取模，在空气中预冷 1min。

② 先淬入 20 ~ 40℃ 的氯化钙水溶液中 50s，立即转入 160℃ 的硝酸盐中等温 1.5h。

③ 180℃ × 3h 硝酸盐回火，空冷至室温清洗干净，硬度为 58 ~ 60HRC。

8.3.4 低合金冷作模具钢的热处理

该类钢俗称油淬钢，为 GB/T 1299—2000 标准中的低合金工具钢。低合金冷作模具钢的热处理（淬火、回火）原则上与非合金工具钢基本相同。

1. 铬钨锰钢热处理

铬钨锰钢指 CrWMn 钢和 9CrWMn 钢两钢种。两者碳含量和合金元素含量均有差异。国内的 9CrWMn 相当于美国 AISI 的 O1 钢。

(1) 常规热处理工艺规范（表 8-21）

表 8-21 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
锻后退火工艺	常规退火	加热温度为 780 ~ 790℃，保温 1 ~ 2h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度为 207 ~ 255HBW
	等温退火	加热温度为 770 ~ 790℃，保温 1 ~ 2h，等温温度为 680 ~ 700℃，保温 1 ~ 2h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷。硬度为 207 ~ 255HBW
	高温回火	高温回火又称低温退火。加热温度为 600 ~ 700℃，炉冷或空冷，其目的是消除冷变形加工硬化（或称为再结晶退火）、加工内应力，二次淬火的模具也需先经高温回火
淬火工艺	推荐淬火	淬火温度为 820 ~ 840℃， $\phi 40 \sim \phi 60$ mm 尺寸零件油冷能淬透，淬透性较好。由于淬火温度低，又在油中冷却，变形小且尺寸稳定性好。淬火温度应根据模具零件的尺寸大小、形状及其他生产条件作适当调整
	等温淬火	加热温度为 800 ~ 840℃，等温温度为 260 ~ 300℃，等温时间 ≤ 1 h。等温淬火后，基体组织为马氏体 + 残留奥氏体 + 剩余碳化物，适量的下贝氏体分布在高强度的马氏体基体上，从而提高材料的强韧性
回 火 工 艺		回火温度一般取 170 ~ 200℃，回火后硬度可达 60HRC 左右。在 250 ~ 350℃ 回火，会使韧性下降，应避免。低温回火，保温时间要充分，最好进行两次回火。高精度（1 ~ 2 μ m）工件，应在粗磨加工后再进行回火（时效）。高于 250℃ 回火，不用冷处理即可保证工件的尺寸稳定性

(2) 热处理应用实例

1) CrWMn 钢制光阑片冲模热处理工艺。

① 模具性能要求。光阑片是光学仪器中的零件，用 0.06~0.08mm 的低合金冷轧钢带冲制而成。要求严格控制制造精度，端面表面粗糙度 Ra 值要求低于 $0.8\ \mu\text{m}$ ，因而对冲模有很高的技术要求。冲模外形尺寸为 $\phi 50\text{mm} \times 57\text{mm} \times 26\text{mm}$ 。

② 模具制造工艺流程：毛坯→球化退火→粗加工→调质→半精加工→淬火+回火→精磨。

③ 热处理工艺规范。

a. 预备热处理方案。

i. 球化退火： $830^\circ\text{C} \times 3 \sim 4\text{h}$ ，炉冷， $720^\circ\text{C} \times 2 \sim 3\text{h}$ ，炉冷至 500°C 出炉空冷。

ii. 调质处理： $830^\circ\text{C} \times 15\text{min}$ ，油淬， $700 \sim 720^\circ\text{C} \times 2\text{h}$ 回火，硬度为 22~26HRC。

iii. 去应力退火：淬火前进行 $640^\circ\text{C} \times 4\text{h}$ 去应力退火，低于 300°C 出炉空冷。

b. 最终热处理（淬火+回火）： $400^\circ\text{C} \times 1\text{h}$ 预热， $830^\circ\text{C} \times 15\text{min}$ 加热，淬入 $80 \sim 100^\circ\text{C}$ 热油 4~5min， $170 \sim 180^\circ\text{C} \times 2 \sim 4\text{h}$ 回火，硬度为 61~64HRC。其工艺路线如图 8-8 所示。

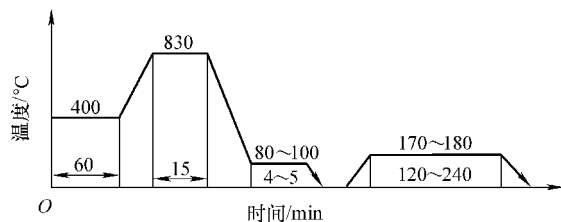


图 8-8 CrWMn 钢制光阑片冲模淬火、回火工艺

2) CrWMn 钢制冷挤压模预淬等温淬火工艺。

① 模具结构形式与要求：冷挤压模外形尺寸为 $\phi 88\text{mm} \times 50\text{mm}$ ，用于自行车上档的冷挤压成形，硬度要求 58~62HRC。

② 预淬等温淬火工艺： 840°C 加热，保温一定时间，在 $160 \sim 170^\circ\text{C}$ 的碱溶液中预淬 70s，擦干净后，迅速置入 $240 \sim 260^\circ\text{C}$ 硝酸盐中等温 40min 后空冷，淬火硬度为 59~62HRC。 $240^\circ\text{C} \times 2\text{h} \times 2$ 次回火，硬度为 59~60HRC。

2. 锰钒钢热处理

9Mn2V 钢是不含 Cr、Ni 的经济型低合金冷作模具钢，相当于德国的 90MnV8 (DIN)。热处理工艺性良好，变形开裂倾向小，在 100°C 左右的热油中淬火效果更好。但淬透性、淬硬性、耐回火性、强度、磨裂倾向等均不如 CrWMn 系的钢好。9Mn2V 钢的油淬临界直径为 $D_0 = 30\text{mm}$ 。钢的耐回火性差且不宜在 $200 \sim 250^\circ\text{C}$ 温度范围内回火，因为其有低温回火脆性。

(1) 常规热处理工艺规范（表 8-22）

表 8-22 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
预备热处理方案	锻后退火	加热温度为 750 ~ 770℃，保温 2 ~ 8h；以冷却速度 < 30℃/h 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，硬度 ≤ 229HBW
	等温退火	加热温度为 760 ~ 780℃，保温 3h；以冷却速度 < 30℃/h 至 680 ~ 700℃，保温 4 ~ 5h；以冷却速度 < 30℃/h 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷
淬 火		780 ~ 820℃ 淬火，硬度可达 63 ~ 65HRC
回 火		一般取 180 ~ 200℃，硬度 ≥ 59HRC。若两次回火，效果更好。硬度要求较低的塑料模具零件，可采用 350℃ 回火

(2) 热处理应用实例

1) 9Mn2V 钢制精冲模等温淬火工艺。

① 模具外形尺寸：外形尺寸为 210mm × 130mm × 60mm 的精冲模。

② 热处理工艺：600℃ 盐浴预热，790℃ 加热，180 ~ 190℃ × 2h 硝盐等温，200℃ × 2h 回火后空冷。硬度为 59 ~ 61HRC，使用寿命达 95 万件，较常规热处理工艺提高 2 倍以上。

2) 9Mn2V 钢制冷轧辊优化热处理工艺。

① 轧辊外形尺寸：φ180mm × 240mm × 560mm，质量 71kg。

② 热处理工艺。

a. 锻后退火：箱式炉加热，加热温度为 760 ~ 780℃，保温 3 ~ 4h，炉冷至 500℃ 出炉空冷，硬度为 207 ~ 229HBW。

b. 淬火、回火：450℃ 空气炉中预热 2h，650℃ 盐浴炉中预热 1.5h，800 ~ 810℃ 盐浴炉中加热 1h，在 20℃ 左右的 10%（质量分数）NaCl 水溶液中冷却 30s，立即转入油中冷却至 150℃ 左右出油空冷；擦干净后，160℃ × 2h × 2 次硝盐回火，至室温清洗干净。硬度为 60 ~ 64HRC。

c. 注意事项。

i. 整体预热，800 ~ 810℃ 加热时，提出辊的上端，仅加热辊身与下端；出炉后，进入 650℃ 预热炉中以使下端硬度降低，既预冷，又使下端韧性提高。

ii. 因直径超过临界淬火直径，必须水淬，掌握好水冷时间。

iii. 及时回火冷至室温，清洗应用热水。

3. 高碳铬钢热处理

高碳铬钢 Cr2 钢和滚动轴承钢 GCr15 钢化学成分和性能基本相同，价廉易得，是经济型淬油淬水通用的冷作模具钢。其淬火临界直径 D_0 （油）= 15 ~ 25mm， D_0 （水）= 30 ~ 50mm。冲模型腔变形趋势是薄型趋胀，一般模具零件油淬或碱浴淬火趋缩。用硝盐浴或热油浴分级淬火，内孔趋胀，但变形量小。Cr2 钢模具零件壁厚 ≤ 25mm 可用油淬。φ180mm 以下的可用煤油或碱浴或盐水溶液淬硬。回火温度一般取 160 ~ 180℃，强

韧性好。250℃左右回火，韧性下降。9Cr2 钢是 Cr2 钢的低碳品种。GCr15 是滚动轴承专门用钢，冶金质量比 Cr2 钢高，应用普遍。

(1) 常规热处理工艺规范（表 8-23）

表 8-23 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
预备热处理方案	锻后等温退火	缓慢加热至 770 ~ 790℃，保温 1 ~ 2h；炉冷至 680 ~ 700℃ 保温 3 ~ 4h 后，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度为 180 ~ 229HBW
	高温回火	加热温度为 600 ~ 700℃，保温 2 ~ 3h；炉冷或空冷，硬度为 187 ~ 229HBW。主要用于消除淬火前的切削加工应力
	正火	加热温度为 930 ~ 950℃，空冷，硬度为 302 ~ 388HBW。用于细化过热钢的晶粒和消除网状碳化物
	调质处理	淬火温度为 840 ~ 860℃，油冷；回火温度为 660 ~ 680℃，炉冷或空冷，硬度为 197 ~ 217HBW
淬火	常规淬火工艺	加热温度为 830 ~ 850℃，油冷，硬度为 62 ~ 65HRC
	等温淬火工艺	加热温度为 830 ~ 850℃，240 ~ 300℃ 等温淬火。回火温度为 180 ~ 200℃，硬度为 58 ~ 62HRC
推荐回火工艺规范		加热温度为 150 ~ 190℃，硬度为 58 ~ 62HRC
碳化物超细化处理		固溶温度为 1050℃，淬入 300 ~ 350℃ 的等温槽中进行等温处理，使之获得下贝氏体组织。回火温度为 720℃ 左右，回火时间为 2h，但硬度偏高加工困难。可以改用短时等温球化工艺，720℃ 加热，保温 1h，再升温到 780℃ 保温 1h，然后冷却到 720℃ 再保温 1h，最后炉冷到 500℃ 出炉，可以获得超细化的球状碳化物

(2) 热处理应用实例

1) Cr2 钢制轧辊水淬空冷淬火工艺。

① 模具工作条件及技术要求：轧辊主要承受轧制力、磨损和热疲劳。辊身工作硬度为 60 ~ 65HRC，淬硬层深度 ≥ 6mm，不许有软点、裂纹。

② 热处理工艺：轧辊采用电阻炉加热，炉膛放置一定数量的木炭。其工艺路线如图 8-9 所示。

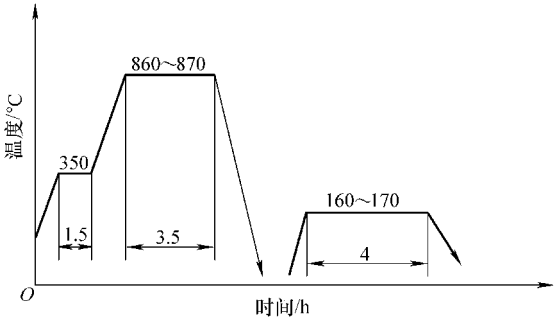


图 8-9 Cr2 钢轧辊热处理工艺路线图

2) GCr15 钢制冲模双细化热处理工艺。

① 高温固溶处理：1040 ~ 1050℃ × 30 ~ 50min 盐浴加热后，在 640 ~ 650℃ 的中性盐浴中冷却 20min 后出炉空冷。

② 循环加热淬火：820℃ × 5min 淬热油，空冷，循环 4 次。

③ 回火：150 ~ 160℃ × 2h，空冷。

4. 铬硅钢热处理

9SiCr 钢中的 Cr、Si 提高钢在贝氏体转变区的变形抗力。Si 还可细化碳化物，有利于提高耐磨性、耐回火性和塑性变形抗力。该钢易于消除网状碳化物且使碳化物细小均匀，淬透性和淬硬性较好，淬火后残留奥氏体少，回火时随温度升高硬度下降平缓，缺点是易氧化、脱碳，淬火加热时应采取防止钢氧化、脱碳的措施。该钢适宜于等温淬火和分级淬火，常用于制造形状复杂、变形小、耐磨性要求高的低速切削刀具和制造冷作模具，如冲模、拉深模、打印模、搓丝模、滚丝模等。

(1) 常规热处理工艺规范（表 8-24）

表 8-24 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
锻后退火工艺	常规退火	加热温度为 790 ~ 810℃，保温 1 ~ 2h；炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 197 ~ 241HBW
	等温退火	加热温度为 790 ~ 810℃，保温 1 ~ 2h；等温温度为 720 ~ 770℃，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷
	高温回火	加热温度为 600 ~ 700℃，保温 2 ~ 4h，炉冷或空冷，利于消除冷变形加工硬化
	调质处理	加热温度为 880 ~ 900℃，回火温度为 680 ~ 700℃，保温 2 ~ 4h；炉冷或空冷
淬火、回火工艺	方案 I	加热温度为 860 ~ 870℃，油淬，硬度可达 63 ~ 64HRC。硬度要求为 61 ~ 63HRC 时，回火温度取 160 ~ 180℃；中等载荷模具零件，硬度要求为 56 ~ 58HRC，取 280 ~ 320℃ 回火；要求韧性较高时，硬度要求为 54 ~ 56HRC，回火温度取 350 ~ 400℃
	方案 II	温度 600℃ 预热 30min，860℃ 加热保温 30min，210℃ × 2h 等温，250 × 2h × 2 次回火。硬度可达 58 ~ 59HRC
强韧化处理		950℃ 加热油淬，金相组织为马氏体 + 残留奥氏体；380 ~ 400℃ × 2h 回火，使残留奥氏体转变，并获得极细粒状碳化物（碳化物颗粒为 0.1 ~ 0.3 μm）；860℃ 加热油淬，200℃ × 2h 回火

(2) 热处理应用实例

1) 9SiCr 钢制硅钢片冲裁凸模盐浴淬火工艺。

① 冲裁凸模外形尺寸为 105mm × 18mm × 6mm。

② 热处理工艺：用盐浴炉加热，600℃ × 40s/mm 预热；830 ~ 850℃ × 20s/mm 加

热。加热结束后从炉中取出,将刃口部位 10mm 左右长度淬入盐水,冷却至略高于 550℃ 从盐水中立即转入油中冷却,至 160℃ 左右,再转入 190℃ 硝酸盐中保温 1.5h。180 ~ 220℃ × 2h × 2 次回火。刃部硬度为 64 ~ 66HRC。

2) 9SiCr 钢制冲模碳化物超细强韧化处理工艺。

950℃ 加热淬油,获得 M + A' 组织;380 ~ 400℃ × 2h 回火,使 A' 转变,获得极细颗粒碳化物;860℃ 加热淬油;200℃ × 2h 回火。

冲模经超细化处理,获得马氏体基体上均匀分布细小碳化物的组织(碳化物颗粒为 0.1 ~ 0.3 μm)。模具寿命提高 1 倍以上。

5. 硅锰钢热处理

弹簧钢 60Si2MnA 制作韧性要求较高的冷作模具零件(如内六角圆柱头螺钉冷镦冲头等)有良好的效果,故广为采用。由于含 Si 钢有脱碳敏感性,因此即使有轻微的脱碳,对耐磨性和疲劳抗力也有明显损害。

(1) 常规热处理工艺规范(表 8-25)

表 8-25 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
锻后预备 热处理方案	快速球化退火	450 ~ 550℃ × 2min/mm 预热, 780 ~ 800℃ × 1.5min/mm 加热, 淬油, 580 ~ 620℃ × 2h 回火, 出炉后空冷。退火后硬度 ≤ 229HBW。组织为均匀细小的点状和粒状珠光体
	正 火	加热温度为 830 ~ 860℃, 空冷, 硬度 ≤ 254HBW
淬火、回火工艺	方案 I	淬火温度为 850 ~ 870℃, 油冷。硬度为 60 ~ 62HRC。回火温度根据模具零件的硬度要求而定。回火温度一般为 200 ~ 350℃, 硬度为 58 ~ 52HRC, 但应避开 300℃ 左右回火脆性区域; 400℃ 回火, 硬度为 46HRC; 500℃ 回火, 硬度为 40HRC; 600℃ 回火, 硬度为 34HRC
	方案 II	淬火温度为 870℃, 250 ~ 350℃ × 1.5h 硝酸盐等温, 硬度为 58 ~ 38HRC。等温淬火后应回火
微细化预处理 + 等温淬火		可有效地提高模具使用寿命。其工艺过程见下面实例 2)

(2) 热处理应用实例

1) 60Si2MnA 钢制冷镦冲模高温淬火工艺。

60Si2MnA 钢制造冷镦螺母四序冲模, 采用高温淬火工艺可提高模具的使用寿命。其工艺为: 800℃ × 0.6min/mm 预热, 920 ~ 950℃ × 0.4min/mm 加热, 油淬, 250℃ × 4h 硝酸盐回火。硬度为 57 ~ 59HRC, 使用寿命比常规热处理提高 2 ~ 3 倍。

2) 60Si2MnA 钢制六角螺母冷镦下模微细化预处理 + 等温淬火工艺。

① 微细化预处理: 将模坯在 870℃ 保温 20min 后淬油, 再升温至 790℃, 保温 5min 后, 以 40℃/h 的冷却速度冷至 680℃, 再保温 30min, 炉冷至 500℃ 出炉空冷。

② 淬火、回火: 870℃ 加热, 250℃ × 1.5h 硝酸盐等温, 240℃ × 2h 回火, 硬度为 55 ~ 57HRC。

8.3.5 高合金冷作模具钢的热处理

1. 高碳高铬钢热处理

这一组钢属于高级冷作模具钢，应用最多最广。代表性钢号有 Cr12、Cr12MoV、Cr12Mo1V1、Cr12W 等。Cr12Mo1V1 钢 Mo、V 的含量比 Cr12MoV 钢高且又含少量 Co，品质更高，淬透性极高，具有微变形性。Cr12MoV 钢 $\phi 100\text{mm}$ 以下或 Cr12 钢 $\phi 50\text{mm}$ 以下在空气中即可淬硬。热处理后可获得高的耐磨性、抗压强度和热稳定性。

由于含高碳高铬，故含有大量碳化物。预备热处理欠佳时，易形成共晶碳化物偏析，促使淬火异常变形或脆化倾向。正常淬火状态下，一般含 10% ~ 12%（体积分数）未溶碳化物；15% ~ 20%（体积分数）残留奥氏体。

（1）常规热处理工艺规范（表 8-26）

表 8-26 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
锻后退火方案	常规退火	加热温度为 850 ~ 870℃，保温 1 ~ 2h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 207 ~ 255HBW，组织为细珠光体 + 碳化物
	等温退火	加热温度为 830 ~ 850℃，保温 1 ~ 2h，炉冷至 720 ~ 750℃，保温 3 ~ 4h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，组织为细珠光体 + 碳化物。可采用高温回火，加热温度为 760 ~ 790℃，保温 2 ~ 3h，炉冷或空冷
淬火 + 回火工艺	常规淬火工艺	温度为 950 ~ 980℃。如果淬火后进行冷处理，则获得最高硬度的淬火温度要稍高一些。加热时可采用二次预热，即 350 ~ 600℃ 一次预热，840 ~ 860℃ 二次预热，再加热至淬火温度。淬火冷却介质为油或熔融硝酸盐
	回火工艺	温度均取 180 ~ 200℃，以保持高硬度（60HRC）。但在高硬度时仍有一定韧性，这是由于含有较多残留奥氏体。回火温度升高，硬度下降。如果淬火温度较高（如 1100℃），则回火曲线上出现二次硬化峰值
渗氮处理		高碳高铬钢在淬火、回火后可用渗氮处理进一步强化，详见第 9 章

（2）热处理应用实例

1) Cr12MoV 钢制微型汽车摆臂挤压模高温淬火工艺。

① 模具性能要求：ZH110 微型汽车前桥上下摆臂冷挤压模，热处理后的尺寸变化要求在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内，以保证被挤压工件的精度要求。

② 热处理工艺。

a. 锻后球化退火：860℃ $\times 3 \sim 4\text{h}$ 炉冷至 740℃ 保温 5 ~ 6h，炉冷至 450℃ 出炉空冷。退火后硬度为 215 ~ 255HBW。

b. 调质处理：830℃ 预热，1100℃ 加热淬油，650 ~ 700℃ $\times 2 \sim 3\text{h}$ 回火。

c. 淬火前去应力：400 ~ 450℃ $\times 3\text{h}$ 去应力处理。

d. 高温分级淬火：加热温度为 1050 ~ 1080℃（经 500℃、830℃ 两次预热），随炉冷至 830℃ × 4 ~ 6s/mm 高温分级。从高温出炉后再回到 830℃ 预热炉停留片刻，然后出炉入缓冷箱中慢冷。

e. 回火：在 170 ~ 180℃ 油中回火 2 次，每次 2h。硬度为 60HRC，尺寸精度高，表面质量好。

2) Cr12MoV 钢制较大型冷作模具盐浴淬火工艺。

① 模具外形尺寸：模具有效直径 ≥ 400mm，厚度 ≥ 200mm，单件质量为 200kg。

② 热处理工艺。

方案 I：盐浴炉热处理，450℃ × 1 ~ 2h 空气炉预热 + 850℃ × 12 ~ 15s/mm 预热，980 ~ 1020℃ × 10 ~ 12s/mm 加热，淬入 40 ~ 90℃ 的热油中，200℃ 左右出油空冷；200 ~ 220℃ × 3 ~ 4h × 2 次回火。硬度 59 ~ 61HRC。

方案 II：气体渗碳炉热处理工艺，800℃ 进炉，为防止脱碳，以 75 滴/min 的速度加入煤油，升温到 980℃ 保温，保温阶段以 13 滴/min 的速度加入煤油，保温结束后即开炉淬入 40 ~ 90℃ 的热油中，油冷至 200℃ 左右出炉空冷。200 ~ 220℃ × 3 ~ 4h × 2 次回火。硬度为 59 ~ 61HRC。

2. Cr6WV 钢热处理

Cr6WV 钢介于莱氏体钢和过共析钢之间，淬透性与 Cr12 钢相近，在不同场合作为 Cr12 钢或 Cr12MoV 钢的代用品，应用较多。

(1) 热处理工艺

淬火温度为 960 ~ 980℃。加热时，应在 500 ~ 600℃ 进行预热，再加热至淬火温度，淬油，200 ~ 300℃ 回火。也可采用分级淬火，在硝盐浴或热油中分级淬火，尺寸 φ100mm 以下的零件可淬硬且变形小。

(2) 热处理特点

残留奥氏体少，碳化物均匀，变形小，有好的强韧性。与 Cr12MoV 钢相比，其淬透性、耐磨性、二次硬化能力、淬火变形可调节性等较差。

3. Cr4W2MoV (120) 钢热处理

Cr4W2MoV (120) 钢为高碳高铬型冷作模具钢改进型钢号。已列入合金工具钢国家标准 GB/T 1299 - 2000。其成分特点是降低碳和铬的含量，合金元素总量减少 1/3，Cr 含量减少 2/3，但性能与 Cr12 或 Cr12MoV 接近，碳化物细小均匀，使用成本降低。

(1) 常规热处理工艺规范（表 8-27）

表 8-27 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
锻后等温退火		加热温度为 850 ~ 870℃，保温 3 ~ 6h；炉冷至 750 ~ 770℃，保温 6 ~ 8h，炉冷至 600℃ 以下出炉空冷。退火后硬度 ≤ 269HBW
淬火、回火	方案 I	加热温度为 960 ~ 980℃，油冷或空冷（油温 20 ~ 40℃），回火温度为 280 ~ 300℃，硬度为 60 ~ 62HRC
	方案 II	加热温度为 1020 ~ 1040℃，油或熔融硝盐冷却，500 ~ 540℃ 回火硬度为 60 ~ 62 HRC

(2) 热处理应用实例

1) Cr4W2MoV 钢制弹簧钢板冲孔凸模等温淬火工艺。

将工件 850℃ 预热, 1020℃ 加热, 260℃ × 1h 硝盐等温, 220℃ × 2h × 2 次回火。硬度为 58 ~ 59HRC, 使用寿命为 1500 多件, 失效形式为崩刃。

2) Cr4W2MoV 钢制冷锻压球模盐浴淬火工艺。

① 球化退火: 850 ~ 870℃ × 3 ~ 4h, 炉冷至 750 ~ 760℃, 保温 5 ~ 6h, 500℃ 出炉空冷。硬度为 229 ~ 255HBW。

② 淬火、回火工艺如图 8-10 所示。

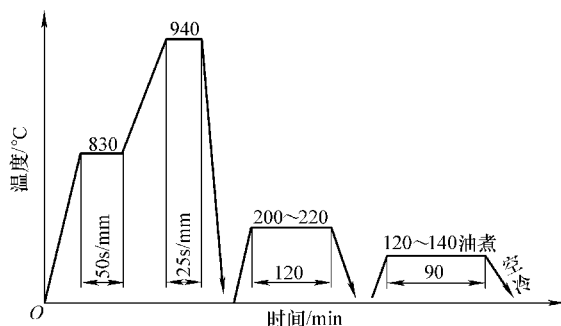


图 8-10 Cr4W2MoV 钢冷锻压球模淬火、回火工艺

4. Cr5Mo1V 钢热处理

高碳中铬钢 Cr5Mo1V 已列入 GB/T 1299—2000 标准, 为空冷淬硬冷作模作钢, 与美国的 A2 钢, 德国及欧盟的 X100CrMoV51 相当, 是国际上通用的钢种。正常热处理后其耐磨性优于 CrWMn、9CrWMn, 而韧性优于 Cr12、Cr12MoV、Cr12Mo1V1。既有较好的耐磨性, 又有一定的韧性和耐回火性。

常规热处理工艺如下。

1) 方案 I: 300 ~ 400℃ 预热, 800 ~ 850℃ 二次预热, 加热至 940 ~ 960℃, 空冷或油淬, 硬度为 62 ~ 65HRC。180 ~ 220℃ 回火, 硬度为 60 ~ 64HRC。

2) 方案 II: 300 ~ 400℃ 预热, 800 ~ 850℃ 二次预热, 加热至 980 ~ 1010℃, 空冷或油淬, 硬度为 62 ~ 65HRC。510 ~ 520℃ 回火, 硬度为 57 ~ 60HRC。

8.3.6 火焰淬火型冷作模具钢的热处理

为了简化大型、特大型冷作模具的生产过程, 国内外都有专门的火焰淬火钢。我国应用较普遍的是 7CrSiMnMoV (CH1) 钢, 其热处理工艺性特点是: 淬火温度范围很宽, 为 850 ~ 1000℃, 在相差约 150℃ 的温度范围内淬火, 都能获得满意的结果, 因此适宜手工操作淬火; 淬透性很高, 空冷后表面硬度高, 心部性能好; 淬火变形小。

1. 常规热处理工艺规范（表 8-28）

表 8-28 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
锻后退火工艺		加热温度为 840 ~ 860℃，保温 3 ~ 4h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷；等温退火工艺：加热温度为 820 ~ 840℃，保温 2 ~ 4h，炉冷至 680 ~ 700℃，保温 3 ~ 5h，然后炉冷至 550℃ 以下出炉空冷。硬度为 217 ~ 241HBW
淬火、回火	方案 I	整体淬火工艺。淬火温度为 860 ~ 920℃，油冷；回火温度为 180 ~ 200℃，硬度为 58 ~ 62HRC
	方案 II	火焰淬火。淬火前模具必须经过 180 ~ 200℃ 的温度预热 2h，再用乙炔火焰进行淬火。加热温度为 900 ~ 1000℃，空冷淬火；回火温度为 180 ~ 200℃

2. 热处理应用实例

1) 7CrSiMnMoV（CH1）钢制汽车零件冲挤模火焰淬火工艺。

400 ~ 500℃ 空气炉预热，890 ~ 910℃ × 45s/mm 加热，淬 80℃ 左右热油，200 ~ 220℃ × 2h × 2 次硝盐回火。硬度为 59 ~ 62HRC。

2) 7CrSiMnMoV（CH1）钢制轴承拉深模盐浴淬火工艺。

① 球化退火：按常规球化退火工艺进行，退火硬度为 175 ~ 220HBW。

② 淬火回火：600℃ 盐浴炉预热，890℃ 加热油淬，200 × 2h × 2 次回火。硬度为 60HRC。

8.3.7 模具用基体钢的热处理

基体钢的化学成分设计与普通高速工具钢正常淬火后的基体成分相似。含碳量比高速工具钢低，碳质量分数为 0.5% ~ 0.7%，所以剩余碳化物少。通过正确的热加工，碳化物细小而均布，具有较高的硬度和耐磨性，而且韧性和抗弯强度明显优于高速工具钢，工件的淬火变形也减少，在冷作模具材料中受到重视和应用。

1. 6Cr4W3Mo2VNb（65Nb）钢热处理

6Cr4W3Mo2VNb 钢（65Nb）是我国自行研制开发的高强韧冷作模具钢，1985 年已纳标。其特点是加入 Nb 元素阻止奥氏体晶粒长大，起到细化晶粒的作用，还改善了钢的工艺性能。

（1）常规热处理工艺规范（表 8-29）

表 8-29 常规热处理工艺规范

热处理工艺	工 艺 参 数
锻后等温退火	加热温度为 (860 ± 10)℃，保温 3 ~ 4h，炉冷至 (740 ± 10)℃，保温 5 ~ 6h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度 ≤ 241HBW，组织为球状珠光体。如果等温时间由 6h 延长到 9h，硬度还可进一步降低，有利于冷挤压成形

(续)

热处理工艺	工 艺 参 数
淬火	正常淬火温度为 1080 ~ 1160℃，油冷。硬度 ≥ 61HRC
回火	一般取 520 ~ 560℃，回火保温时间为 1 ~ 2h，回火二次。回火温度取上限，韧性较好；取下限，则强度较高

(2) 热处理应用实例

1) 6Cr4W3Mo2VNb (65Nb) 钢制弹簧钢板冲模盐浴淬火工艺。

方案 I：600℃、850℃ 两次预热，加热系数为 30s/mm，1150℃ × 15s/mm 加热，260℃ 硝盐分级 10min，580℃ × 2h × 2 次回火。硬度为 56 ~ 60HRC。使用寿命为 800 ~ 2700 件，失效形式为折断、弯曲。

方案 II：加热温度为 1100℃，回火温度为 560℃，热处理后硬度为 57 ~ 59HRC，使用寿命为 2300 件左右。失效形式为折断、弯曲。

2) 6Cr4W3Mo2VNb (65Nb) 钢制内六角三序冲头盐浴淬火工艺。

① 模具工作特点：多工位冷镦机用内六角三序冲头，服役中要承受很大的压缩应力、弯曲应力，并产生磨损，要求模具具有高的强度、硬度和耐磨性。

② 热处理工艺如图 8-11 所示。

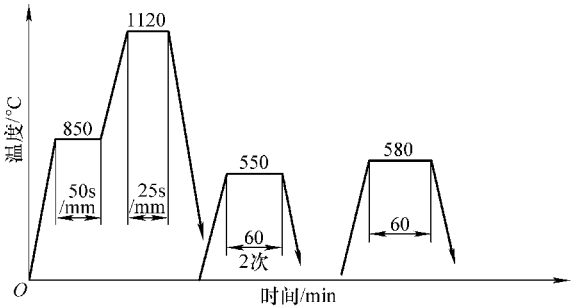


图 8-11 65Nb 钢制内六角三序冲头热处理工艺

2. 5Cr4W5Mo2V (RM2) 钢热处理

5Cr4W5Mo2V (RM2) 钢是新型冷热兼用模具钢。该钢具有较高的热硬性、高温强度和较高的耐磨性，常用于制造热挤压模具、精锻模、热冲模、冲头等，可进行一般的热处理或化学热处理。必须进行充分的预热，并应避免喷水冷却，否则容易出现早期热疲劳开裂。以油冷、水雾冷却和水冷为主。

(1) 常规热处理工艺规范 (表 8-30)

表 8-30 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
锻后退火工艺	球化退火	加热温度为 900℃，保温 2h，炉冷至 720 ~ 730℃ 等温 4h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷
	快速球化退火	1030 ~ 1090℃ 加热，油冷，然后再 860 ~ 900℃ 加热，炉冷

(续)

热处理工艺	工 艺 参 数
淬火	600℃、850℃两次盐浴预热，1080 ~ 1120℃加热，油冷淬火，硬度为 57 ~ 61HRC
回火	450℃ × 2h × 2 次回火，硬度为 54 ~ 58HRC

(2) 热处理应用实例

1) 5Cr4W5Mo2V (RM2) 钢制不锈钢餐刀热辊轧模中温回火工艺。

① 模具工作条件：热轧成形尺寸小，工作面是光面，无深的型腔，在无润滑、无冷却、中温条件下工作。

② 热处理工艺：600℃、850℃两次盐浴预热，1130 ~ 1140℃加热，淬油，在低于二次硬化区温度进行 450℃ × 2h × 2 次回火，硬度为 54 ~ 58HRC。

2) 5Cr4W5Mo2V (RM2) 钢制轴承套圈热锻模冲头盐浴淬火工艺。

① 模具结构与工作条件：冲头外形尺寸为 $\phi 43.5\text{mm} \times 150\text{mm}$ ，轴承套圈在 5000kN 多工位压力机上锻造成形时，压力机热锻频率为 27 次/min，锻造温度为 850 ~ 1050℃，在热冲过程中进行强烈水冷，工作条件十分恶劣。

② 热处理工艺如图 8-12 所示。

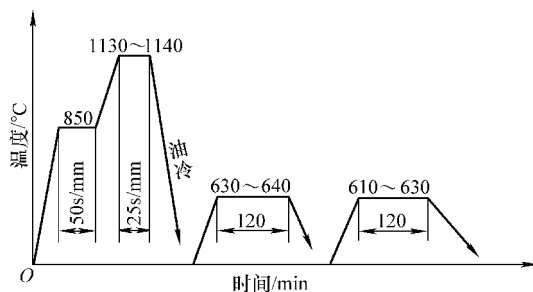


图 8-12 5Cr4W5Mo2V 钢制轴承套圈热锻模冲头热处理工艺

3. 7Cr7Mo2V2Si (LD) 钢热处理

7Cr7Mo2V2Si (LD) 钢是我国自行研制开发的高强韧性冷作模具钢，尚未纳标，但应用已相当普遍并获得了较好的经济效益。

(1) 常规热处理工艺规范 (表 8-31)

表 8-31 常规热处理工艺规范

热处理工艺	工 艺 参 数
预备热处理方案	一般退火 加热温度为 840 ~ 860℃，保温 2 ~ 3h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度为 210 ~ 270HBW
	等温球化退火 加热温度为 840 ~ 860℃，保温 2 ~ 3h，炉冷至 700 ~ 720℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 220 ~ 250HBW，组织为铁素体基体 + 球状碳化物

(续)

热处理工艺	工 艺 参 数
淬火	淬火温度为 1100 ~ 1150℃，油冷或空冷。淬火后约有体积分数为 34% 的残留奥氏体，淬火变形小
回火	530 ~ 540℃ 回火 2 ~ 3 次，每次保温 1 ~ 2h，硬度为 57 ~ 63HRC

注：推荐热处理工艺有两种，高淬高回：淬火温度为 1150℃，550℃ 回火 3 次，强韧性综合指标最佳；低淬低回：淬火温度为 1050 ~ 1080℃，回火温度为 180 ~ 220℃，回火 2 次，硬度为 58 ~ 60HRC。

(2) 热处理应用实例

1) 7Cr7Mo2V2Si (LD) 钢制汽车起动离合器花键套筒冷挤压成形模热处理工艺。

① 模具性能要求：具有高的抗压强度、抗弯强度和足够的韧性、疲劳抗力及 300℃ 左右的耐回火性。

② 热处理工艺：600℃、850℃ 两次盐浴预热，1100℃ 加热，油淬，550℃ × 1h × 3 次回火。硬度为 60 ~ 61HRC。

2) 7Cr7Mo2V2Si (LD) 钢制切边模盐浴淬火工艺。

① 600℃、850℃ 两次盐浴预热，1080℃ 加热，淬油，300 ~ 400℃ 出油后空冷。

② 400 ~ 450℃ × 2h 硝盐回火 + 540℃ × 1h × 3 次回火。硬度为 56 ~ 58HRC。使用寿命为 2 万 ~ 3 万件。

4. 5Cr4Mo3SiMnVAI (012Al) 钢热处理

5Cr4Mo3SiMnVAI (012Al) 钢是可用于冷作模具和热作模具零件的两用型基体钢。利用铝来细化晶粒和提高钢的韧性，此钢宜渗氮进一步提高表面硬度和耐磨性，1985 年纳标。制作冷作模具工件零件时，可替代高速工具钢 (W18Cr4V)；制作热作模具工件零件时，是 3Cr2W8V 钢的替代品。

(1) 常规热处理工艺规范 (表 8-32)

表 8-32 常规热处理工艺规范

热处理工艺	工 艺 参 数
等温退火	加热温度为 850 ~ 870℃，保温 4h，炉冷至 710 ~ 720℃，保温 6h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度 ≤ 229HBW
淬火	常规淬火加热温度 1090 ~ 1120℃，油冷。温度过高，晶粒长大而硬度不提高；温度过低，淬火后硬度偏低
回火	一般取 500 ~ 520℃，回火二次，硬度 60 ~ 62HRC

(2) 热处理应用实例

1) 5Cr4Mo3SiMnVAI (012Al) 钢制轴承套圈毛坯扩孔精冲模热处理工艺。

600℃ × 50s/mm + 850℃ × 50s/mm 两段盐浴预热，1100 ~ 1120℃ × 25s/mm 加热，淬油，油冷至 200℃ 左右出油空冷；630℃ × 2h + 650℃ × 2h 各一次回火，回火后油冷。回火硬度为 42 ~ 45HRC。

2) 5Cr4Mo3SiMnVAI (012Al) 钢制螺栓冲模等温淬火工艺。

1060℃加热油淬, 320 ~ 330℃ × 2h 等温, 350℃ × 2h × 1 次回火, 硬度为 51 ~ 52HRC。冲模寿命超过 5000 件。

8.3.8 模具用高速工具钢的热处理

高速工具钢属于莱氏体钢, 通过正常的热处理方法不能消除鱼骨状莱氏体共晶碳化物, 因而出现各向异性, 强度、韧性降低, 需要通过改锻、反复墩粗和拔长, 来改善碳化物分布。锻后需要进行退火, 以利于切削并消除应力, 获得索氏体和粒状碳化物组织, 为淬火做好组织准备。淬火温度很高, 以保证碳化物溶解, 使碳和合金元素充分地溶于奥氏体, 在淬火后形成合金程度较高的马氏体。由于钢淬火后残留奥氏体较多, 需经 500 ~ 600℃ 的 3 次回火才能使残留奥氏体转变消除, 产生最佳的二次硬化效果, 其硬度、抗压强度和耐磨性高, 获得较好的综合力学性能。采用低温淬火、快速加热淬火等工艺措施可以有效地改善其韧性, 因此越来越多地用于制造要求承受重载荷、高寿命的冷作模具。常用的钢号有 W18Cr4V (W18)、W6Mo5Cr4V2 (M2)、W12Mo3Cr4V3N (V3N)、W9Mo3Cr4V (W9) 和为提高韧性而降碳降钒的 6W6Mo5Cr4V (6W6) 钢等。

1. W18Cr4V (W18) 钢热处理

W18Cr4V (W18) 钢简称 18-4-1 钢, 为莱氏体钨系高速工具钢。具有高硬度、高强度、高抗压性、高耐磨性和高热稳定性。其热处理温度范围较宽, 淬火不易过热, 热处理过程中不易氧化、脱碳, 磨削加工性能好。在 500℃ 及 600℃ 时, 硬度分别保持在 57 ~ 58HRC 及 52 ~ 53HRC, 可对大多数的被加工材料进行良好的切削加工。钢中有较多的共晶碳化物, 虽经轧制, 但仍呈不均匀分布。大截面钢材的碳化物偏析尤为严重, 高温塑性较差。适于制造有高硬度、高耐磨性、高抗压强度和高热强性要求, 承受高载荷, 加工硬质材料的刀具、模具, 如重载冲头、冷挤压模等。

(1) 常规热处理工艺规范 (表 8-33)

表 8-33 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
锻后退火工艺方案	常规球化退火	加热温度为 860 ~ 880℃, 保温 2h, 缓慢冷却至 500 ~ 550℃ 出炉, 退火后硬度 ≤ 277HBW
	等温球化退火	加热温度为 860 ~ 880℃, 保温 2 ~ 4h; 炉冷至 740 ~ 760℃, 保温 4 ~ 6h, 炉冷至 500 ~ 550℃ 出炉空冷, 退火硬度 ≤ 255HBW
推荐淬火工艺		840 ~ 860℃ 预热, 1200 ~ 1240℃ 加热, 油冷或分级淬火, 硬度为 62 ~ 64HRC
冷处理工艺		淬火后 2h 内进行冷处理, 冷却温度为 -70 ~ -80℃, 到整个零件截面冷却为止。硬度为 63 ~ 65HRC。复杂的薄刃成形工具可不进行冷处理
推荐回火工艺		560 ~ 580℃ × 2.5h 回火, 空气炉或煤气炉, 加热介质为熔融硝酸钾、熔碱, 回火后硬度 ≥ 62HRC。高速工具钢在该温度回火, 硬度显著提高并达到最高值, 即发生所谓“二次硬化”现象

(2) 热处理应用实例

1) W18Cr4V (W18) 钢制电池壳冷挤压凸模等温淬火工艺。

① 模具结构与技术要求：外形尺寸为 $\phi 30\text{mm} \times 200\text{mm}$ ，在高压冲挤条件下，要求有较高的强度、硬度和韧性。

② 热处理工艺

方案 I：低温淬火低温回火，1200℃ 加热，淬油，540 ~ 560℃ 回火。

方案 II：常温淬火高温回火，1240℃ 加热，淬油，580℃ 回火。

方案 III：下贝氏体淬火，1240℃ 加热，先在 560℃ 中性盐中分级 5min，置于 260℃ 硝盐中等温 4h，560℃ $\times 1\text{h} \times 3$ 次回火。硬度为 62 ~ 64HRC。金相组织（体积分数）为 55% 贝氏体 + 35% 马氏体 + 少量残留奥氏体 + 碳化物。

2) W18Cr4V (W18) 钢制钢板冲头低温淬火工艺。

① 模具结构与工作条件： $\phi 11.7\text{mm} \times 65\text{mm}$ 冲头，用于冲制 6mm 厚 Q235 钢板。

② 热处理工艺：1180℃ 加热，淬油，580℃ $\times 2\text{h} \times 2$ 次回火。冲头硬度为 60 ~ 62HRC。

2. W12Mo3Cr4V3N (V3N) 钢热处理

W12Mo3Cr4V3N (V3N) 钢是钨钼系含氮超硬型高速工具钢。具有硬度高、耐磨性好、热硬性高、热强性好等优点，为刀具、模具的常用材料。常被用作冷作模具的工作零件，如冲头、冲裁模的刀片、冷挤压模和冷镦模的凹模和凸模等。

(1) 常规热处理工艺规范（表 8-34）

表 8-34 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
预备热处理方案	常规退火	加热温度为 840 ~ 860℃，保温 3 ~ 4h，缓慢冷却到 550℃ 以下炉冷或空冷，退火后硬度 $\leq 293\text{HBW}$
	等温退火	加热温度为 840 ~ 860℃，保温 3 ~ 4h，740 ~ 750℃ 等温 4 ~ 6h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，硬度 $\leq 285\text{HBW}$
推荐淬火工艺		850℃ 预热，1220 ~ 1280℃ 加热，油冷。硬度为 66 ~ 68HRC
推荐回火工艺		550 ~ 570℃ $\times 1\text{h} \times 4$ 次回火，硬度 $\geq 65\text{HRC}$

(2) 热处理应用实例

1) W12Mo3Cr4V3N (V3N) 钢制硅钢片冲裁凹模分级淬火工艺。

① 球化退火：850 ~ 870℃ $\times 2 \sim 3\text{h} \rightarrow 740 \sim 750^\circ\text{C} \times 4 \sim 6\text{h}$ ，炉冷至 500℃ 出炉空冷。硬度 $\leq 265\text{HBW}$ 。

② 淬火、回火：600℃、850℃ 两次盐浴预热，1215 ~ 1220℃ 加热，580 ~ 620℃ 中性盐分级 3 ~ 5min 后，入 400℃ 硝盐再分级 5min，空冷；550 ~ 570℃ $\times 1\text{h} \times 4$ 次回火，硬度 $\geq 65 \sim 67\text{HRC}$ 。

2) W12Mo3Cr4V3N (V3N) 钢制螺母冷挤压模热处理工艺。

① 真空渗硼工艺：渗硼剂为 B_2O_3 ，涂于工作面；渗硼工艺为 1250℃ $\times 30\text{min}$ ，真

空度为 0.13 ~ 1.3Pa。

② 淬火、回火：渗硼出炉后，淬油， $560 \times 1\text{h} \times 3$ 次回火，硬度 $\geq 1050\text{HV}$ 。

3. W9Mo3Cr4V (9341) 钢热处理

W9Mo3Cr4V (9341) 钢为通用型钨钼系高速工具钢。有良好的热、冷塑性，成材率高。由于热、冷塑性良好，因而能满足机械制造中采用多次锻拔改锻、高频加热塑性成形工艺和冲压变形工艺的要求。切削性能好，磨削性能和焊接性较优，热处理过热敏感性低。常用于制造工具、刃具，在适当改变淬火、回火工艺后，也用于制造高载荷模具，如冷压模等。

(1) 常规热处理工艺规范 (表 8-35)

表 8-35 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
预备热处理方案	缓冷退火	加热温度为 $830 \sim 850^{\circ}\text{C}$ ，保温 $3 \sim 4\text{h}$ ，炉冷至 600°C 以下出炉空冷
	等温退火	加热温度为 $830 \sim 850^{\circ}\text{C}$ ，保温 $3 \sim 4\text{h}$ ；等温温度为 $740 \sim 760^{\circ}\text{C}$ ，保温 $4 \sim 6\text{h}$ ，炉冷至 600°C 出炉空冷
淬火工艺		850°C 预热， $1160 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 加热，油冷，硬度为 $58 \sim 64\text{HRC}$
回火工艺		回火温度为 560°C ，回火 3 次，每次 $1 \sim 1.5\text{h}$ 。回火后硬度：工具为 $65 \sim 66.5\text{HRC}$ ，模具为 $58 \sim 64\text{HRC}$

(2) 热处理应用实例

1) W9Mo3Cr4V (9341) 钢制钢板冲头低温淬火工艺。

① 模具结构形式：外形尺寸为 $\phi 15\text{mm} \times 74\text{mm}$ ，冲头工作部位尺寸为 $\phi 8\text{mm} \times 22\text{mm}$ ，被冲孔材料为厚度 1.8mm 的 M2 高速工具钢热轧钢带。

② 热处理工艺： $600^{\circ}\text{C} \times 7\text{min} + 850^{\circ}\text{C} \times 7\text{min}$ 两次盐浴预热， $1180 \sim 1190^{\circ}\text{C} \times 3.5\text{min}$ 加热，淬油， $550 \sim 560^{\circ}\text{C} \times 1\text{h} \times 3$ 次回火，回火后空冷。回火后硬度为 $58 \sim 60\text{HRC}$ 。

2) W9Mo3Cr4V (9341) 钢制机用锯条冲模等温淬火工艺 (图 8-13)。

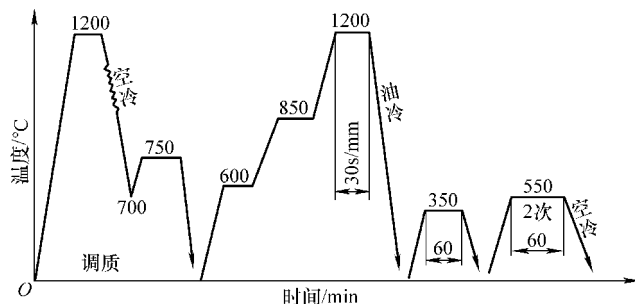


图 8-13 9341 钢制机用锯条冲模等温淬火工艺

4. W6Mo5Cr4V2（M2）钢热处理

W6Mo5Cr4V2（M2）钢为钨钼系通用高速工具钢的代表性钢号。属于高强韧性降碳、降钒钢。该钢碳化物细小均匀，淬火后产生残留奥氏体，回火后残留奥氏体转变，产生二次硬化效应。韧性、强度、热塑性高，硬度、耐磨性、热硬性好，具有优良的室温和高温力学性能。但钢易于氧化、脱碳，在热加工及热处理时应加以注意。主要用于制造各种类型的工具、刀具，如制作大型、热塑性成形刀具，以及制造大型、高载荷下耐磨损的冷挤压模等冷作模具及热塑性成形模具。

（1）常规热处理工艺规范（表 8-36）

表 8-36 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
预备热处理方案	常规退火	加热温度为 840 ~ 860℃，保温 2 ~ 4h，缓慢冷却至 500℃ 出炉空冷或炉冷至室温，硬度≤285HBW
	等温退火	加热温度为 840 ~ 860℃，保温 2 ~ 4h；炉冷至 740 ~ 760℃，保温 4 ~ 6h，炉冷到 500℃ 以下出炉空冷，硬度≤255HBW
推荐淬火工艺		800 ~ 850℃ 预热，1150 ~ 1200℃ 加热，淬油，硬度为 62 ~ 64HRC。模具零件淬火温度不要高于 1200℃，否则冲击韧度会下降
冷处理		淬火后 2h 内进行深冷处理，冷却温度为 - 196℃，硬度增量为 0 ~ 1HRC
推荐回火工艺		在回火硬化峰值 560℃ 左右回火 3 次，空冷，硬度为 62 ~ 66HRC

（2）热处理应用实例

1) W6Mo5Cr4V2（M2）钢制螺栓切边模低温淬火工艺。

600℃、850℃ 两次盐浴预热，1160 ~ 1170℃ 加热，580 ~ 620℃ 中性盐分级后空冷，580℃ × 1h + 550℃ × 1h 回火，回火硬度为 61 ~ 62HRC。

2) W6Mo5Cr4V2（M2）钢制冷镦冲头低温淬火高温回火工艺。

① 淬火：600℃、850℃ 两次盐浴预热，1170 ~ 1175℃ 加热，600 ~ 620℃ 中性盐分级后空冷。

② 回火：600℃ × 1h + 570℃ × 1h + 540℃ × 1h + 540℃ × 1h 四次回火，回火硬度为 60 ~ 62HRC。

5. 6W6Mo5Cr4V（6W6）钢热处理

6W6Mo5Cr4V（6W6）钢是为了提高韧性而研制出来的一种降碳、降钒的低碳高速工具钢类型的冷热兼用模具钢。该钢淬透性好，有类似于高速工具钢的高硬度、高耐磨性、高强度和良好的热硬性，韧性又比高碳高速工具钢高，通常用于制造剪刀片、冷挤压模、冷镦模的凸模等，具有较高的使用寿命。

（1）常规热处理工艺规范（表 8-37）

表 8-37 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
预备热处理方案	普通退火	加热温度为 850 ~ 860℃，保温 2 ~ 4h，缓冷（20 ~ 30℃/h）至低于 500℃ 出炉空冷。退火后硬度为 197 ~ 229HBW
	等温退火	加热温度为 850 ~ 860℃，保温 24h；等温温度为 740 ~ 750℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷。硬度为 197 ~ 229HBW
推荐淬火工艺		830 ~ 850℃ 盐浴预热，1180 ~ 1200℃ 加热，油冷或盐浴分级淬火（小尺寸工件也用空冷）。硬度为 58HRC 左右
推荐回火工艺		一般取 560 ~ 580℃ 每次 1h，回火应充分，回火 3 次，至少 2 次，大尺寸零件甚至采用 4 次回火。硬度为 58 ~ 63HRC。550℃ 回火时有二次硬化现象

(2) 热处理应用实例

1) 6W6Mo5Cr4V（6W6）钢制冷镦模分级淬火工艺。

① 球化退火：840 ~ 860℃ × 2 ~ 3h，炉冷，740 ~ 750℃ × 4 ~ 5h 保温，炉冷至 500℃ 出炉空冷。硬度为 197 ~ 299HBW。

② 淬火、回火：600℃、850℃ 两次盐浴预热，1180 ~ 1200℃ 加热，600 ~ 620℃ 中性盐分级 3 ~ 5min 后，入 280 ~ 300℃ 硝盐再分级，分级时间按 15s/mm 估算，淬火后硬度为 62 ~ 64HRC。580 ~ 600℃ × 1.5h × 3 次回火，硬度为 58 ~ 60HRC。

2) 6W6Mo5Cr4V（6W6）钢制钟表模具盐浴淬火工艺。

① 普通退火：锻后 850 ~ 860℃ × 3 ~ 4h 加热，炉冷至 500℃，出炉空冷。退火后硬度 ≤ 255HBW。

② 淬火、回火：600℃、850℃ 两次盐浴预热，1180 ~ 1200℃ 加热，600℃ 中性盐分级后空冷，淬火后硬度为 62 ~ 63HRC；回火温度为 560 ~ 570℃，回火 3 次，每次 1h。回火温度应根据模具要求硬度而定。

③ 去应力处理：线切割以后的模具应进行 150 ~ 180℃ × 4h 去应力处理。

8.4 热作模具钢的热处理

热作模具主要有锤锻模、机锻模、热挤压模、压铸模和热冲裁模五大类。各种模具的服役条件差异较大，失效形式主要有断裂、热疲劳、塑性变形或型腔坍塌、热磨损、热熔损等，有时多种失效形式同时出现。因此，要求热作模具在不同温度条件下，具有高的强度、韧性、耐磨性、抗疲劳性能以及热稳定性等综合性能。这些性能除了由钢的化学成分和冶金质量保证外，还必须正确地选择合理的热处理工艺。

8.4.1 热作模具钢的合金化特点

1) 热作模具钢多为中碳合金钢，碳的质量分数一般为 0.3% ~ 0.6%，碳含量较

低，含多种合金元素如 Cr、Mo、V、W、Ni、Si、Mn、Co、Nb、RE 等，即多元合金化。但各种元素的配比相当讲究，相互补偿，可以使多种元素发挥最大作用，对热处理的影响较大。

2) 热作模具钢中的 Ni、Si、Co 三元素可固溶于基体中形成其他化合物，不形成碳化物，为非碳化物形成元素。Si 主要固溶于基体中，不形成碳化物，也不溶于其他碳化物，除了提高钢的淬透性外，还有助于提高在高温回火过程中析出特殊碳化物的弥散度，可使二次硬化峰值增高，因此 Si 对提高基体的强度及耐回火性有利；Ni 能提高钢的冲击韧度、塑性和淬透性，但 Ni 能使淬火冷却过程中的碳化物形成减少，会降低钢的热稳定性；Co 一般固溶于 α -Fe 中，不溶于碳化物，在回火时能有效地使二次硬化峰值增高。

3) Cr、W、Mo、V 等为碳化物形成元素，除固溶于基体外，还可与碳形成特殊碳化物。Cr 固溶于奥氏体中，有助于提高过冷奥氏体的稳定性，且固溶于马氏体中，有助于提高马氏体的耐回火性；W 和 Mo 均可提高钢的高温强度和热稳定性，但 W 的质量分数超过 3% 时，会使钢的冷热疲劳抗力明显下降；V 可提高钢的过热敏感性，在高温回火中易形成二次硬化峰值。这些碳化物有很高的硬度和热稳定性，因此，在热作模具钢中必须含有 Cr、W、Mo、V 元素，保证热作模具钢的性能。

热作模具钢各种碳化物的硬度见表 8-38。

表 8-38 热作模具钢各种碳化物的硬度

种类	碳 化 物	硬度 HV
M ₃ C	Fe ₃ C、(Fe, Mn) ₃ C、(Fe, Cr) ₃ C	860 ~ 1050
M ₂₃ C ₆	Cr ₂₃ C ₆ 、(Cr, Fe, Mo, W, V) ₂₃ C ₆	1000 ~ 1100
M ₇ C ₃	Cr ₇ C ₃ 、(Cr, Fe, Mo, W, V) ₇ C ₃	1600 ~ 1800
M ₆ C	(Cr, Fe, Mo, W, V) ₆ C	1200 ~ 1300
MC	VC、TiC	200 ~ 2800

4) Mn 可固溶于基体中也可无限地固溶于渗碳体中，直到完全取代 Fe，形成 Mn₃C。Mn 可提高淬透性，但质量分数超过 1.5% 时，会使冲击韧度降低。Nb 能有效地细化晶粒，增加晶界扩散激活能；RE 在钢中起净化、变质、合金化的作用，可明显地提高热加工性能。

8.4.2 热作模具钢的热处理特点

1) 热作模具含合金元素较多，导热性差，而奥氏体化温度高，因此，应缓慢加热，宜采用多次预热或阶梯式升温。

2) 模具零件如果在无保护气氛的条件下加热，其表面会发生氧化、脱碳现象，使硬度和耐磨性降低。因此，对于氧化、脱碳敏感性强的模具钢，可采用特种热处理，如可控气氛热处理、真空热处理、盐浴加热等。

3) 热作模具淬火应采用较缓慢的冷却方法，如分级淬火、双液淬火、等温淬火、

高压气淬等都是减少变形的行之有效的冷却方案。

4) 热作模具对淬透性和淬硬性的要求应根据工作条件不同有所侧重,对于小型模具,由于尺寸小,容易淬透,所以只要求高硬度,偏重于高淬硬性;对于尺寸较大的模具,如果截面未淬透,则回火后未淬透部分的屈服强度和韧性会显著变化,因此淬透性更为重要。

5) 零件在淬火过程中会产生体积、形状变化,为保证模具质量,要求模具钢的变形小,各个方向的变化相近,且组织稳定,这主要取决于热处理工艺和钢的冶金质量。

8.4.3 低合金热作模具钢的热处理

低合金热作模具钢韧性较好,主要制造受冲击载荷较大的热作模具的工作零件。其代表性钢号是 5CrNiMo 和 5CrMnMo。

1. 5CrNiMo 钢热处理

5CrNiMo 钢具有良好的韧性、强度以及高耐磨性和良好的淬透性,是冷热兼用的模具钢,常用来制造各种大、中型锻模。由于抛光性能好,有时也用于制作塑料模具零件。该钢在空气中冷却即可淬硬,但易形成白点,需要严格控制冶炼工艺、锻轧后的冷却及热处理。

(1) 常规热处理工艺规范 (表 8-39)

表 8-39 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
预备热处理方案	锻后常规退火	加热温度为 760 ~ 780℃, 保温 4 ~ 6h, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷, 退火后硬度为 197 ~ 241HBW, 组织为珠光体 + 铁素体
	锻后等温退火	加热温度为 850 ~ 870℃, 保温 4 ~ 6h, 等温温度为 680℃, 保温 4 ~ 6h, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷, 退火后硬度为 197 ~ 241HBW, 组织为珠光体 + 铁素体
	锻模翻新退火	加热温度为 710 ~ 730℃, 保温 4 ~ 6h, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷。退火后硬度为 197 ~ 241HBW
淬火、回火	常规淬火、回火	加热温度为 830 ~ 860℃, 先在空气中预冷至 750 ~ 780℃, 然后再油冷到 150 ~ 180℃, 取出并立即回火。硬度为 53 ~ 58HRC
	等温淬火	热锻模加热油淬。当模具表面温度冷到 150 ~ 200℃ 时, 即带温转入 280 ~ 300℃ 等温槽, 保温 2 ~ 3h。由于淬火时先获得少量马氏体 + 下贝氏体 + 残留奥氏体组织, 回火温度为 420 ~ 550℃, 回火 2 次, 硬度为 38 ~ 47HRC。回火后马氏体转变为下贝氏体组织。该工艺降低了模具的开裂倾向, 提高了模具的使用寿命
	高温淬火	温度为 890 ~ 910℃, 油冷, 淬火硬度为 61.5HRC。淬火后组织为板条马氏体 + 体积分数为 9.2% 左右的残留奥氏体, 晶粒度为 7 ~ 8 级。回火温度为 420 ~ 550℃, 回火 2 次, 硬度为 38 ~ 47HRC

注: 回火后应油冷, 以防回火脆性的产生, 为了消除油冷时产生的应力, 可在 160 ~ 180℃ 再回火一次。大型锻模无论淬火还是回火都不能在油中冷到室温, 否则容易开裂。当模块在 380 ~ 450℃ 回火时, 心部的过冷奥氏体即转变为上贝氏体组织, 冲击韧性极差。

(2) 热处理应用实例

1) 5CrNiMo 钢制热锻模高温加热预冷等温淬火工艺。

① 热锻模外形尺寸：450mm×280mm×280mm 的大型热锻模。

② 热处理工艺：930~950℃×6~7h 高温加热（在空气炉中应注意保护，防止氧化、脱碳），随炉冷却至 800℃左右油淬，油冷至 180~200℃，立即投入 240~280℃硝盐中等温 6h，等温后空冷至室温，再进行 470℃×5h×2 次回火。其热处理工艺如图8-14所示。

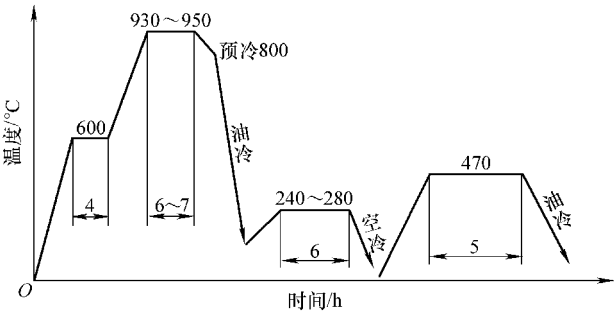


图 8-14 5CrNiMo 钢制热锻模热处理工艺

2) 5CrNiMo 钢制锤锻模水 - 气混合淬火工艺。

锻模有效厚度为 500mm，在滚底式煤气炉中加热。

① 加热规范：600℃装炉，并保温 1.5h，升温至 860℃×3.5h，用桥式起重机将模具吊到水 - 气淬火装置上，中转时间不超过 3min。

② 淬火规范：耗水量为 80~120L/h 时，自淬火温度冷却 40~50min；接着在耗水量为 40~70L/h 时，冷却 30~40min，最后用压缩空气冷却 60min。整个冷却过程水压为 0.2~0.3MPa，空气压力为 0.15~0.25MPa，空气消耗量为 50~70m³/h，淬火层达 150~180mm。

③ 回火工艺：540℃×2h×2 次回火。模具表面硬度为 388~415HBW，心部硬度为 229~285HBW。

2. 5CrMnMo 钢热处理

5CrMnMo 钢是为节约贵重的 Ni 元素，以 Mn 代 Ni 而研制的。该钢除淬透性、耐热疲劳性稍差外，具有与 5CrNiMo 钢类似的性能，适于制作要求具有较高强度和高耐磨性的各种类型锻模。要求韧性较高时，可采用电渣重熔钢。

(1) 常规热处理工艺规范（边长小于 300mm 的小型模块）（表 8-40）

表 8-40 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
预备热处理方案	一般退火	加热温度为 760~780℃，保温 2~4h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 197~241HBW
	等温退火	加热温度为 850~870℃，保温 2~4h；炉冷至 680℃，保温 4~6h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 197~241HBW

(续)

热处理工艺		工 艺 参 数
淬火、回火	推荐淬火工艺 ^①	820 ~ 850℃，油冷至 150 ~ 180℃，小型模具空冷，大型模具立即回火。回火温度取 490 ~ 530℃，硬度为 40 ~ 45HRC；锻模燕尾回火温度取 600 ~ 620℃，硬度为 34 ~ 37HRC
	等温淬火工艺 ^②	方案 I 加热温度为 840 ~ 860℃，加热后将模具放于 160 ~ 180℃ 硝盐中分级停留，使之发生部分马氏体转变，然后再转入 280 ~ 300℃ 硝盐中保温停留 2 ~ 3h
		方案 II 加热温度为 840 ~ 860℃，淬入油中，待模具表面冷到 150 ~ 200℃ 时，带温转入等温槽，在 280 ~ 300℃ 保温 2 ~ 3h
	高温淬火、回火工艺	

- ① 大、中型模具淬火加热温度采用上限值，小型模具采用加热温度下限值。为了避免工件在淬火过程中和淬火后产生大的应力和变形，淬火时最好先在空气中预冷至 740 ~ 760℃，然后再油冷至 150 ~ 180℃，取出并立即回火。
- ② 采取以上两种淬火方法后，模具钢的组织为马氏体 + 下贝氏体 + 残留奥氏体，420 ~ 550℃ 回火 2 次后，获得回火下贝氏体组织。这种工艺减少了模具使用过程中的开裂，提高了模具的使用寿命。

(2) 热处理应用实例

1) 5CrMnMo 钢制连接环热锻模复合等温淬火工艺。

① 模具结构及应用场合：煤矿用井下运输机连接环热锻模外形尺寸为 230mm × 175mm × 91mm，硬度要求为 42 ~ 44HRC，在 2t 蒸汽机上使用。锻件材料为 20CrMnTi，坯料加热到 1100 ~ 1200℃，在锻模膛内直接锻压成形，每件工件两火锻打完毕。

② 复合等温淬火工艺如图 8-15 所示。

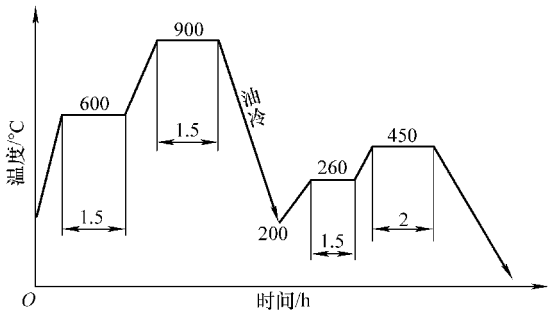


图 8-15 5CrMnMo 钢制连接环热锻模复合等温淬火工艺

2) 5CrMnMo 钢制铝合金尾翅热锻模高温淬火工艺。

① 模具结构及工作条件：铝合金尾翅热锻模外形尺寸为 250mm × 270mm × 480mm。

在锻造加工 7A04（LC4）超硬铝尾翘时，由于成形零件形状复杂，大小头截面面积比为 48:1，表面质量要求高，模具要承受复杂的应力，在模腔的转接处易产生应力集中和裂纹。

② 高温淬火工艺如图 8-16 所示。

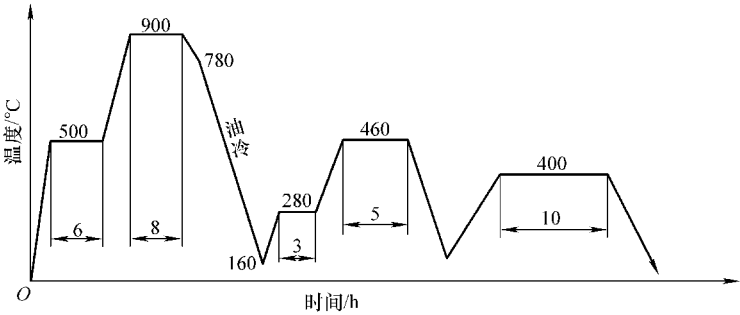


图 8-16 5CrMnMo 钢制铝合金尾翘锻模高温淬火工艺

3. 4CrMnSiMoV 钢热处理

4CrMnSiMoV 钢是 5CrMnSiMoV 钢的改进型。原钢中的合金元素种类及含量均未变动，只是碳质量分数下降约 0.10%，其目的是在保持原有强度水平的基础上提高韧性。其高温性能、耐回火性以及抗热疲劳性能与 5CrNiMo 钢相似，常用于制造大型锻模。

(1) 常规热处理工艺规范（表 8-41）

表 8-41 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
锻后等温退火		加热至 840 ~ 860℃，保温 3h，700 ~ 720℃ 等温，保温 5h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷
淬火		加热至 860 ~ 890℃，保温，油冷，硬度为 56 ~ 58HRC
回火	小型锻模	加热至 520 ~ 580℃，保温 2h，油冷；中型锻模：加热至 580 ~ 630℃，保温 2h，油冷
	大型锻模	加热至 610 ~ 650℃，保温 2h，油冷；特大锻模：加热至 620 ~ 660℃，保温 2h，油冷，硬度为 43 ~ 49HRC

(2) 热处理应用实例

1) 4CrMnSiMoV 钢制齿轮锻模盐浴淬火工艺。

① 预热：500 ~ 550℃，保温时间（空气炉）按 2min/mm 计。

② 加热：870 ~ 880℃，保温时间（盐浴炉）按 0.5min/mm 计。

③ 冷却：40 ~ 80℃ 油冷，至 160 ~ 200℃ 出油空冷，淬火硬度为 56 ~ 58HRC。

④ 回火：在带风扇的井式炉中进行，560 ~ 590℃ × 2h × 2 次回火，硬度为 44 ~ 47HRC。

⑤ 去应力退火：第二次回火后冷却到室温，将模具清洗干净，置于硝酸盐液中进行 $200^{\circ}\text{C} \times 3 \sim 4\text{h}$ 去应力退火。

2) 4CrMnSiMoV 钢制连杆热锻模等温淬火工艺。

① 预热：在空气炉中进行，加热时间按 $1\text{min}/\text{mm}$ 计。

② 加热：在盐浴中加热至 870°C ，保温时间按 $0.5\text{min}/\text{mm}$ 计。

③ 淬火：出炉后空冷数秒淬入 60°C 油中。

④ 等温：油冷至 200°C 左右，立即投入 360°C 硝酸盐中等温 2h，出炉冷至室温，清洗工件。

⑤ 回火：在带有风扇的井式炉中回火， $580^{\circ}\text{C} \times 3\text{h} \times 2$ 次回火，回火后空冷，硬度为 44 ~ 46HRC。

⑥ 去应力退火： $200^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ 去应力退火。

8.4.4 中合金热作模具钢的热处理

中合金热作模具钢主要制作压铸模、机锻模等重要热作模具的工作零件，要求有较高的高温性能，如热强性、热疲劳、热熔损、耐回火性、热稳定性等。这类钢含有 Cr、W、Si、Mo、V 等多种合金元素，碳含量中等，因而韧性好。我国标准中应用最多且具有代表性的钢号有 4Cr5MoSiV1、4Cr5MoSiV、4Cr5W2VSi 等。

1. 4Cr5MoSiV1 (H13) 钢热处理

4Cr5MoSiV1 (H13) 钢是一种空冷硬化型热作模具钢，高温强度和高温硬度好，在中温条件下具有很好的韧性、热疲劳性能和一定的耐磨性；在较低的奥氏体化温度下空淬，热处理变形小，产生的氧化倾向小，还可以抵抗熔蚀铝的冲蚀作用。广泛应用于各种热挤压模具，如芯棒、模锻锤锻模、锻造压力机模具、精锻模和铝、铜及其合金模具。

(1) 常规热处理工艺规范 (表 8-42)

(2) 热处理应用实例

1) 4Cr5MoSiV1 (H13) 钢制汽车转向前接头热锻模盐浴淬火工艺。

① 模具结构及工作条件：模具外形尺寸为 $250\text{mm} \times 210\text{mm} \times 190\text{mm}$ ，模具在 4000kN 摩擦压力机上使用。锻模在工作前先经预热，在热锻过程中，用水剂石墨进行冷却润滑；锻坯材料为 40Cr 钢。

② 热处理工艺：盐浴加热至 1030°C ，油淬， $620 \sim 640^{\circ}\text{C}$ 回火，硬度为 42 ~ 47HRC。

2) 4Cr5MoSiV1 (H13) 钢制汽车发动机凸轮轴锻模箱式炉加热淬火工艺。

① 模具结构及工作条件：汽车发动机凸轮轴锻模外形尺寸为 $950\text{mm} \times 200\text{mm} \times 160\text{mm}$ ，模具型腔的尺寸公差和表面粗糙度有很高的要求，热处理后硬度要求为 37 ~ 41HRC。凸轮轴锻模在 40MN 机械锻压机上使用，锻件材料为 45 钢，始锻温度为 1180°C ，终锻温度为 850°C 。

② 热处理工艺如图 8-17 所示。

表 8-42 常规热处理工艺规范

热处理工艺	工 艺 参 数
锻后等温退火	860 ~ 890℃加热，充分保温后随炉冷却（必要时控制冷却速度 $\leq 30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ），炉冷至 500℃ 以下出炉，空冷，退火后硬度 $\leq 299\text{HBW}$ 。组织为球化珠光体 + 少量碳化物
推荐淬火工艺	熔融盐浴或空气炉加热至 1020 ~ 1080℃，油冷或空冷，硬度为 56 ~ 58HRC。油冷时，介质温度为 20 ~ 60℃。晶粒度为 11 ~ 8 级
推荐回火工艺	熔融盐浴或空气炉加热至 560 ~ 580℃，空冷，通常采用两次回火，第二次回火温度比第一次回火温度低 20℃。回火硬度为 47 ~ 49HRC

- 注：1. 市场上供应的 4Cr5MoSiV1 钢（H13 钢）的钢材或模坯，在钢厂都经过了良好的锻造或轧制以及热处理，保证了具有良好的金相组织，适当的硬度，良好的可加工性，因此原料不必在制造厂再进行退火处理。但制造厂改锻成毛坯后，破坏了原来的组织和性能，必须重新退火。
2. 在淬火加热和冷却时，相变产物不同而产生体积变化，是产生淬火变形和开裂的重要原因。4Cr5MoSiV1 钢（例如压铸模）淬火过程中的体积变化（或变形）是有规律的，应对这种规律加以利用，以实现变形量的控制和调整。另一种变形是由内应力引起的尺寸变化，通常进行去应力退火。淬火加热时一定要充分预热，并防止氧化、脱碳。
3. 最常用的淬火冷却方法是分级淬火，在 370℃ 左右的盐液中冷却，直到模具零件各部位的温度均匀，然后取出空冷。冷却到 80℃ 左右，要立即回火。回火两次，保温时间按 1h/25mm 计算，每次不应少于 4h。
4. 热处理后清理或精加工以后的模具零件要进行去应力退火（也称第三次回火）。温度比前几次回火低 17℃ 左右，宜在空气炉中加热；若进行渗氮来进一步强化，则可替代去应力退火，效果尤佳。
5. 模具零件在淬火、回火后进行精加工，如磨削、电火花加工等过程中，常常产生磨削裂纹、表面软化（冷却不良、磨削温度超过回火温度），再次引起内应力。所以精加工时不仅要注意执行正确工艺，而且精加工后要及时进行去应力退火。

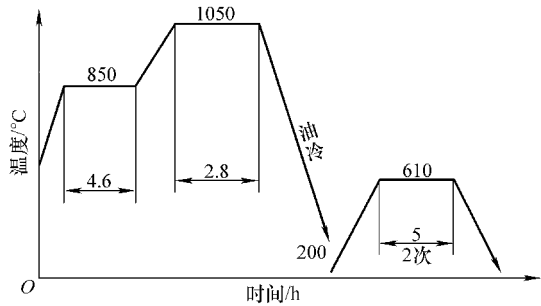


图 8-17 H13 钢制汽车发动机凸轮轴锻模箱式炉热处理工艺

2. 4Cr5MoSiV（H11）钢热处理

4Cr5MoSiV（H11）钢属于空冷硬化型热作模具钢，在中温条件下有很好的韧性、较好的热强度、疲劳性能和一定的耐磨性，在较低的奥氏体化温度下空淬，热处理变形小，产生氧化皮倾向小，而且可以抵抗熔蚀铝的冲蚀作用，常用于制造铝制品压铸模、

热挤压模、压力机锻模及塑料模。

(1) 常规热处理工艺规范（表 8-43）

表 8-43 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
预备热处理方案	一般退火	加热温度为 860 ~ 890℃，保温 2 ~ 4h；炉冷至 500℃ 以下出炉空冷，退火后硬度 ≤229HBW
	去应力退火	加热温度为 730 ~ 760℃，保温 3 ~ 4h，炉冷或空冷
推荐淬火工艺		(790 ± 15)℃ 预热，(1000 ± 6)℃（盐浴）或 (1010 ± 6)℃（炉控气氛）加热，保温 5 ~ 15min，空冷淬火，硬度为 53 ~ 55HRC
推荐回火工艺		熔融盐浴或空气炉 550 ~ 560℃ 加热，空冷，2 次回火，硬度为 47 ~ 49HRC。第二次回火温度通常比第一次低 20 ~ 30℃

(2) 表面处理规范（表 8-44）

表 8-44 4Cr5MoSiV 钢推荐的表面处理规范

工艺	温度/℃	时间/h	介质	渗层厚度/mm	表面硬度 HV
渗氮	560	2	KCN50% + NaCN50%（质量分数）	0.04	640 ~ 690
渗氮	580	8	天然气 + 氮	0.25 ~ 0.30	830 ~ 860
渗氮	540	12 ~ 20	氮的分解率 30% ~ 60%	0.15 ~ 0.20	550 ~ 760

(3) 热处理应用实例

1) 4Cr5MoSiV（H11）钢制连杆锻模盐浴淬火工艺。

① 模具结构与工作条件：汽车发动机连杆锻模外形尺寸为 340mm × 180mm × 70mm。模具的直线度与平面度均为 0.02mm，垂直度要求为 0.05mm，模具型槽尺寸公差和表面粗糙度要求较严，热处理有一定难度。

② 热处理工艺如图 8-18 所示。

2) 4Cr5MoSiV（H11）钢制铝压铸模等温淬火工艺。

① 模具工作条件：铝合金压铸模型腔的工作温度可达 600℃ 左右，其失效形式主要为粘模、开裂。

② 热处理工艺。

- a. 预热：在 620℃、850℃ 盐液中两次预热，保温时间按 0.6min/mm 计。
- b. 加热：1030℃ 加热，保温时间按 0.32min/mm 计。
- c. 冷却：先在 600℃ 中性盐中分级 3 ~ 4min，立即转入 320℃ 硝盐中等温 2 ~ 2.5h。

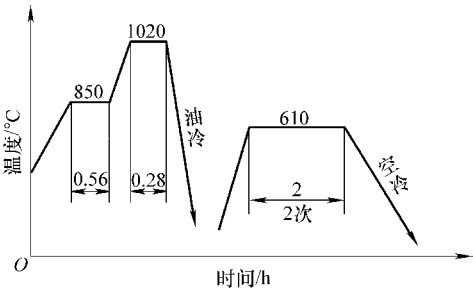


图 8-18 H11 钢制连杆锻模盐浴淬火工艺

d. 回火：在带风扇有保护装置的井式炉中回火，600℃ × 2h × 2 次回火。硬度为 40 ~ 42HRC。

3. 4Cr5W2VSi 钢热处理

4Cr5W2VSi 钢是空冷硬化型热作模具钢，是含 Cr 中钨系列钢种，以 W 代 Mo，所以对脱碳不太敏感，可在没有良好防脱碳措施时显示其优点。该钢热稳定性较高（最高达 600 ~ 610℃），其韧性和抗热疲劳性能稍低于 H13 钢，淬火变形倾向较大，主要用于制作热挤压模具和铝、锌压铸模等。

(1) 常规热处理工艺规范（表 8-45）

表 8-45 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
预备热处理方案	等温退火	加热温度为 860℃，保温 2 ~ 4h，等温温度为 750℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷
	普通退火	加热温度为 860 ~ 880℃，保温 3 ~ 4h。炉冷至 500℃ 以下出炉空冷
最终热处理方案	方案 I	淬火温度为 1030 ~ 1050℃，油冷，硬度为 53 ~ 56HRC。回火 2 次，第一次回火 560 ~ 580℃ 保温 2h；第二次回火 530 ~ 540℃ 保温 2h，回火后硬度为 47 ~ 49HRC
	方案 II	淬火温度 1060 ~ 1080℃，油冷或空冷，硬度 56 ~ 58HRC。第一次回火温度 590 ~ 610℃，保温 2h，第二次回火 570 ~ 590℃，保温 2h，回火后硬度为 48 ~ 52HRC

(2) 表面强化处理

渗氮温度为 530 ~ 550℃，渗氮时间为 12 ~ 20h，渗层深为 0.12 ~ 0.20mm，表面硬度为 115 ~ 650HV，可显著提高模具的耐磨性和使用寿命。

8.4.5 高合金热作模具钢的热处理

高合金热强型热作模钢具有较高的高温强度、高温韧性和热稳定性。这些高温性能与淬火温度有关，随着淬火温度的提高而提高。但高温淬火给模具零件热处理带来一连串的困难，如导热性差，易开裂，韧性、塑性、热疲劳性能均有所下降等。常用的高合金热作模具钢主要有 3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V、5Cr4W5Mo2V、5Cr4Mo3SiMnVAI 等。几种常用高合金热作模具钢的热处理工艺规范见表 8-46。

表 8-46 几种常用高合金热作模具钢的热处理工艺规范

序号	钢号	奥氏体化温度/℃	冷却	回火温度 /℃	回火时间 × 回火次数/h × 次	冷却	硬度 HRC
1	3Cr2W8V	1050 ~ 1100	油	560 ~ 580	2 × 2	空气	49 ~ 52
2	5Cr4W5Mo2V	1100 ~ 1140	油	560 ~ 580	2 × 2	空气	50 ~ 54
3	3Cr3Mo3W2V	1030 ~ 1090	油	600 ~ 630	2 × 2	空气	53 ~ 56
4	5Cr4Mo3SiMnVAI	1090 ~ 1120	油	600 ~ 640	2 × 2	空气	53 ~ 56

1. 3Cr2W8V（H21）钢热处理

3Cr2W8V（H21）钢又称半高速工具钢，是典型的热强型高耐磨热作模具钢，应用极为广泛。合金元素含量高，具有热硬性和良好的抗热磨损性，并具有较高的高温强度、高温韧性和热稳定性。淬透性好，截面尺寸为 80mm 时可以淬透。淬透性与淬火温度有关，随着淬火温度的提高而提高。但高温淬火若掌握不好，会带来变形、开裂、疲劳性能下降等问题，必须根据不同情况，制订不同的热处理工艺规范。

(1) 常规热处理工艺规范（表 8-47）

表 8-47 常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
预备热处理方案	锻后退火工艺	加热温度为 800 ~ 820℃，保温 2 ~ 4h，以 < 30 ~ 40℃/h 炉冷，至 600℃ 以下出炉空冷，退火硬度为 207 ~ 255HBW，组织为珠光体 + 碳化物
	等温退火工艺	加热温度为 840 ~ 880℃，保温 2 ~ 4h；等温温度为 720 ~ 740℃，保温 2 ~ 4h（或 2h + 1min/mm），炉冷至 550℃ 以下出炉空冷，退火后硬度为 207 ~ 255HBW
淬火	常规淬火工艺	正常奥氏体化温度为 1100 ~ 1150℃，为减少应力和变形，除缓慢升温外，大件或复杂件应在 800 ~ 850℃ 预热均温。或者在奥氏体化后在空气中预冷到 900 ~ 950℃ 再淬油。若用盐浴炉加热，则盐液应有良好的脱氧净化。在盐浴炉内加热，奥氏体化温度可稍降低
	等温淬火工艺	加热温度为 1150℃，在 350 ~ 450℃ 等温后油冷。组织为下贝氏体 + 马氏体的混合组织，硬度可达 47HRC 以上。等温淬火以后以低温回火为宜，温度取 340 ~ 380℃。等温淬火后获得的贝氏体组织有较高的强韧性，耐回火性也比常规热处理好得多，抗热冲击性能比较高，模具变形小。可提高模具的使用寿命
	高温淬火工艺	常取 1140 ~ 1150℃ 加热奥氏体化，油冷淬火后硬度可高达 55HRC，分级淬火硬度为 47HRC。3Cr2W8V 钢的淬火加热温度提高，马氏体合金化程度也提高，模具热强性特别好，但韧性稍差，一般用于制造铜合金和铝合金挤压模、压铸模、压型模等受冲击力不太大，而要求有高热强性的模具
推荐回火工艺		回火温度取 560 ~ 580℃，每次保温时间不应少于 2h，硬度为 48 ~ 52HRC；610 ~ 630℃ 回火两次，硬度为 47 ~ 49HRC；650 ~ 655℃ 回火两次，硬度为 42 ~ 44HRC
固溶超细化处理		将锻造毛坯在 1200 ~ 1250℃ 加热固溶，使碳化物基本溶入奥氏体中，然后淬入热油或沸水中，并立即进行高温回火或短时间等温球化处理。高温回火温度为 720 ~ 850℃（毛坯加工选上限，模具成品选下限）。最终热处理可以选用常规热处理工艺，1100℃ 油冷淬火

(2) 热处理应用实例

1) 3Cr2W8V（H21）钢制望远镜外壳压铸模高温淬火工艺。

① 奥氏体化温度的确定：热稳定性试验表明，当温度升到 1180℃ 时，热疲劳抗力达到最大值，确定淬火温度为 1180℃。

② 回火温度的确定：生产实际证明，望远镜外壳压铸模 1180℃ 淬火，600℃ 回火，热疲劳抗力最大，因此，选定回火温度为 600℃。回火后硬度为 50 ~ 52HRC。

③ 批量生产时的热处理工艺：600℃、850℃ 两次预热，1180℃ 加热，淬油，油冷至 200℃ 左右出油空冷，600℃ × 2h × 2 次回火。

2) 3Cr2W8V (H21) 钢制 M16 六角螺母热冲模高温淬火高温回火工艺。

3Cr2W8V (H21) 钢制 M16 六角螺母热冲模在工作时使用频率达 45 ~ 50 次/min，模具型腔采用喷水冷却，受到强烈的急冷急热作用，易出现早期脆性断裂、热疲劳和边角塌陷等失效形式。采用高温淬火高温回火热处理工艺，可得到板条马氏体组织，有较高的耐回火性、高温强度、高温耐磨性和热疲劳性能。热处理工艺如图 8-19 所示。

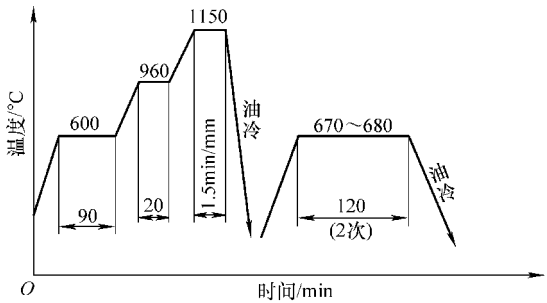


图 8-19 H21 钢制 M16 六角螺母热冲模高温淬火高温回火热处理工艺

2. 3Cr3Mo3W2V (HM1) 钢热处理

3Cr3Mo3W2V (HM1) 钢冷加工、热加工性能良好，淬火温度范围较宽，具有较高的热强性、热疲劳性能，良好的耐磨性和耐回火性等特点，是综合性能优良的高强韧性热作模具钢。适合制造锻锻、压力机锻造、挤压等热作模具，模具使用寿命较高。

(1) 常规热处理工艺规范（表 8-48）

表 8-48 常规热处理工艺规范

热处理工艺	工 艺 参 数
预备热处理	(870 ± 10)℃ × 2 ~ 4h 加热，随炉降温至 (730 ± 10)℃ × 4 ~ 6h 保温，炉冷至 550℃，出炉空冷，退火后硬度为 207 ~ 255HBW
淬火	淬火温度为 1050℃，硬度为 52 ~ 55HRC，细晶粒 ≥ 10 级
回火	回火温度为 600℃，回火 2 次，每次 1.5h，空冷，硬度为 51 ~ 55HRC

(2) 热处理应用实例

1) 3Cr3Mo3W2V (HM1) 钢制轴承套圈毛坯热挤压模盐浴淬火工艺。

① 预备热处理：大模块锻后进行 1060 ~ 1130℃ 正火处理，加热时间按 1min/mm 计算。退火工艺为 870 ~ 880℃ × 2h + 730 ~ 740℃ × 4 ~ 6h，炉冷至 500℃ 出炉。硬度

为 255HBW。

② 淬火：500℃、800℃ 两次预热，1060 ~ 1130℃ 加热，加热时按 30s/mm 计算，油淬。

③ 回火：620 ~ 650℃ × 2h × 2 次回火，硬度为 46 ~ 51HRC。

2) 3Cr3Mo3W2V (HM1) 钢制热剪刀片盐浴淬火工艺。

① 剪刀片尺寸与工作条件：外形尺寸为 280mm × 220mm × 70mm，刀片刃口温度达 700℃ 以上。

② 热处理工艺如图 8-20 所示。

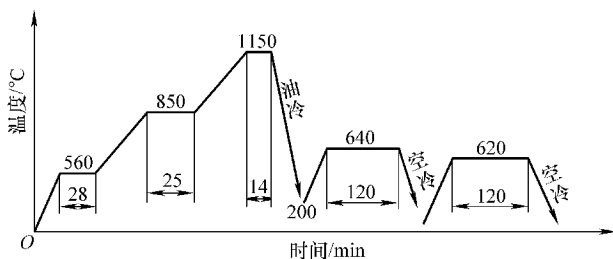


图 8-20 HM1 钢制热剪刀片盐浴淬火工艺

8.5 塑料模具钢的热处理

8.5.1 塑料模具钢的合金化特点

(1) 钢材的冶金质量高

塑料模具成型零件对表面质量要求非常高，要求有良好的抛光性能和镜面质量，所以对钢的纯净度，碳化物的数量、大小、形态要严格控制。钢中的非金属夹杂物、气泡、氧化物、硫化物等是影响模具钢镜面抛光和研磨时形成针眼和孔洞的主要原因，因此，凡是表面粗糙度要求很高的塑料模具，一般不得采用加硫的易切削钢；即使不是易切削钢，若钢中氧化物、硫化物夹杂含量较高，在研磨过程中也容易脱落形成针孔。所以，采用真空冶炼或电渣重熔等工艺，将有效地提高钢的纯净度，从而提高钢材的抛光性能。

(2) 钢的含碳量低

用冷挤压成形方法制造塑料模具零件时所采用的渗碳钢，非一般普通渗碳钢（结构钢）可比，是特别设计的专门钢种，如美国的 P2、P4、P6 钢，瑞典的 8416 钢，我国代号为 LJ 的钢等。碳含量非常低、塑性变形能力非常强，渗碳质量要求比普通结构零件高，必须采用有效的碳势控制，以免增加热处理难度和成本。

(3) 微合金化非调质塑料模具钢 微合金化非调质钢的原理是加入少量合金元素并降低碳当量，使其具有较高淬透性，轧/锻后不必调质处理，只进行空冷即可使大截面模

块整个截面获得粒状贝氏体组织及较好的力学、切削加工性能。代表性钢号有上海宝钢的贝氏体非调质塑料模具钢 B30 及其改造型，在塑料模具制造中逐渐得到推广应用。

8.5.2 预硬型塑料模具钢的热处理

预硬型塑料模具专门用钢已自成体系，在我国即在钢号前冠以 SM（塑模两字汉语拼音的首位字母）。其化学成分与合金工具钢（钢号不冠 SM）基本相同，但冶金质量较高，加工精良，所以对热处理十分有利。

1. 预硬型钢的特点

(1) 预硬型钢已进行最终热处理

预硬型钢泛指钢厂已进行最终热处理（淬火、回火或形变热处理）的钢材。SM3Cr2Mo 钢是我国最早纳标，也是应用很广的预硬型塑料模具钢。我国某些钢厂可接受用户委托，按标准或质量要求生产预硬型塑料模具钢，如宝钢集团上海五钢有限公司的 SWP20，攀钢集团江油长城特殊钢有限公司的 SCP20，国外如日本大同特钢公司的 PX4、PX5，一胜百公司的 718、S-136，法国的 CLC2738，德国的 40CrMnNiMo7 等。

(2) 预硬型钢为“不热处理钢”

预硬型模具钢（包括我国的非调质塑料模具钢）是以预硬态供货的，一般不需要热处理。但有时需要进行改锻，改锻后的模坯必须进行热处理。其目的就是要省却用户热处理，从而避免了热处理带来的种种麻烦。所以，预硬型钢在进行预处理后供货。如果用户在塑料模具成型零件图样上，采用了预硬型钢，又提出热处理技术要求，这是十分不妥的。但在图样上可标注规定代码，如预处理易切削钢（前加 Y）和保证淬硬性钢（后加 H），以防止在完成零件产品加工后入库检查时漏检。

(3) 预硬型模具钢多数采用调质处理

预硬型模具钢的预硬处理工艺简单，多数采用调质处理，调质后获得回火索氏体组织。高温回火的温度范围很宽，能够满足模具的各种工作硬度要求。由于这类钢淬透性良好，淬火时可采用油冷、空冷或硝盐分级淬火。

(4) 预硬型钢的微合金化

预硬型钢的另一品种是通过微合金化（添加微量合金元素如 B、V 等）然后控制轧制（变形量）和控制轧后的冷却等方法生产的非调质钢，代表性钢号有上海宝钢的贝氏体非调质塑料模具钢 B30 及其改造型。

(5) 易切削钢一般为预硬型钢

易切削钢是指有目的地添加 Pb（铅）、Se（硒）、Ca（钙）等元素或者提高含 S 量改善钢的可加工性的钢种。主要用于自动切削机床以提高切削效能。易切削塑料模具钢则不然，它主要是配合预硬型钢的应用而产生的，钢预硬化后，从性能角度而言希望硬度高，但与切削加工性能有矛盾，所以易切削塑料模具钢是使用性能、切削加工性能、成本三者最佳配合的产物。易切削塑料模具钢一般为预硬型钢。

2. 模具材料市场的供货状况

(1) 我国塑料模具钢标准钢交货状态

我国实施的三个塑料模具钢标准规定钢的交货状态有多种不同的形式。

1) 扁钢。YB/T 094—1997 规定非合金塑料模具钢 SM45、SM50、SM55 以热轧状态交货；合金塑料模具钢（除 SM3Cr2Mo、SM3Cr2NiMo、SM2Cr13 经供需双方协商后可供应预硬型钢材外）以退火状态交货。

2) 模块。YB/T 129—1997 规定在订货合同中协商规定，可以是退火状态，或预硬状态，或粗加工状态等几种形式。

3) 塑料模具用厚钢板。塑料模具用厚钢板根据 YB/T 107—1997 规定，全部七个钢号均以热轧、热轧缓冷或退火状态交货，即使是 SM3Cr2Mo 和 SM3Cr2Ni1Mo 也没有预硬状态交货的。

上海宝钢供应的预硬贝氏体非调质钢 B20（20~23HRC）、B20H（24~27HRC）、B30（28~32HRC）分两个硬度等级，以适应不同用途的需要。

(2) 国外厂商预硬型钢供应状况

国外厂商供应的以 P20 为代表的预硬型钢，均以预硬状态供货。不仅如此，为适应不同用途或用户的需要，预硬化的硬度也有等级。以一胜百公司为例，有 718（普通预硬化等级，硬度为 290~330HBW）和 718HH（稍高硬度等级，硬度为 330~370HBW）。日本大同特钢公司的 Cr-Mo 系塑料模具钢、日立金属公司的 HPM 系列及 FDAC（易切削预硬型 H13 钢）和奥地利的 M200、M738 均如此。可见我国的模具钢供应厂商与外商相比还存在差距。

8.5.3 易切削塑料模具钢的热处理

我国 20 世纪 90 年代研制开发的 S-Ca 复合易切削预硬型塑料模具钢（代号 P20BSCa）是在 P20 钢基础上添加 B、S、Ca 的经济型钢种，具有优良的热加工性能，易于锻造，热处理工艺性能良好，有高的淬透性（B 的质量分数约为 0.002%），淬火温度取 860~880℃，油冷。在 500~650℃回火，硬度可达 30~40HRC，截面尺寸为 600mm 时，预硬化处理后心部硬度可达 30HRC 以上。由于用 S、Ca 元素改善切削加工性能，因此在高、低各种切削条件下均可顺利进行加工。研磨抛光性能好，焊接性和花纹蚀刻性能均好。

我国机械行业标准 JB/T 6057—1992《塑料模具成型部分用钢及其热处理 技术条件》中推荐的两种易切削塑料模具钢 8Cr2MnWMoVS 和 5CrNiMnMoVSCa 钢，但均未纳入国家标准。

1. 8Cr2MnWMoVS（8Cr2S）钢热处理

8Cr2MnWMoVS（简称 8CrMn 或 8Cr2S）钢，是含 S 易切削钢，当热处理到 40~42HRC 时，其切削加工性能相当于退火态的 T10A 钢（200HBW）。综合力学性能好，可研磨抛光到 $Ra = 0.025\mu\text{m}$ ，该钢有良好的蚀刻性能。

(1) 常规热处理工艺规范（表 8-49）

表 8-49 常规热处理工艺规范

热处理工艺	工 艺 参 数
锻后退火	(800 ± 10)℃ 保温 2 ~ 4h, 降温到 700 ~ 720℃ 等温, 保温 4 ~ 6h, 炉冷。硬度 ≤229HBW
淬火 ^①	加热温度为 880 ~ 920℃ (盐浴炉 1.5 ~ 2.0min/mm; 气体介质炉 2.0 ~ 2.5 min/mm) 空冷, 硬度为 63HRC
回火 ^①	一般取 160 ~ 200℃ 空冷, 硬度 ≥58HRC (冷作模具); 550 ~ 650℃ 回火, 硬度为 40 ~ 48HRC (塑料模具)

① 指常规淬火、回火, 预硬钢淬火、回火: 加热温度为 860 ~ 880℃, 油淬或空冷, 硬度为 62 ~ 63HRC, 回火温度为 620℃, 硬度为 44 ~ 46HRC。

(2) 热处理应用实例

1) 8Cr2MnWMoVS (8Cr2S) 钢制塑料注射模盐浴淬火工艺。

① 淬火: 加热温度为 860 ~ 880℃, 空冷, 硬度为 62 ~ 63HRC; 淬热油 (60 ~ 90℃), 硬度为 62.5 ~ 63.5HRC; 240 ~ 250℃ × 40min 硝盐等温, 硬度为 62 ~ 63HRC。

② 回火: 加热温度为 160 ~ 200℃, 空冷, 硬度 ≥58HRC; 250 ~ 300℃ 空冷, 硬度为 55 ~ 57HRC; ≥550℃ 空冷, 硬度为 43 ~ 47HRC。

2) 8Cr2MnWMoVS (8Cr2S) 钢制精密模具复合强化处理工艺。

① 淬火: 600 ~ 620℃ × 1min/mm 盐浴预热, 890 ~ 900℃ × 0.5min/mm 盐浴加热, 450 ~ 500℃ → 220 ~ 250℃ 硝盐分级淬火, 硬度为 63 ~ 64HRC。

② 回火: 580 ~ 600℃ × 2h 硝盐回火, 硬度为 46 ~ 48HRC。

③ 表面处理: 550 ~ 560℃ × 24h 气体碳氮 (加入稀土催渗剂) 共渗。

2. 5CrNiMnMoVSCa (5NiSCa) 钢热处理

5CrNiMnMoVSCa (简称 5NiSCa) 钢为高韧性易切削钢。在预硬状态下 (42HRC) 仍有良好的可加工性和良好的抛光性能, 抛光可达 $Ra = 0.040\mu\text{m}$, 且补焊性能好。

(1) 常规热处理工艺规范 (表 8-50)

表 8-50 常规热处理工艺规范

热处理工艺	工 艺 参 数
锻后等温退火	加热温度为 760 ~ 780℃, 保温 2h, 670 ~ 690℃ 保温 6 ~ 8h, 炉冷至 ≤530℃ 出炉空冷, 硬度为 217 ~ 220HBW
淬火 ^①	加热温度为 860 ~ 920℃, 油冷或空冷 (小零件), 硬度 ≥58HRC, 抗拉强度 ≥2100MPa
回火 ^①	加热温度一般取 600 ~ 650℃, 空冷, 硬度为 35 ~ 45HRC

① 指改锻后常规淬火、回火。

(2) 热处理应用实例

1) 5CrNiMnMoVSCa (5NiSCa) 钢制精密热塑性塑料模预硬化处理工艺。

① 锻后等温退火: 模具锻后 760 ~ 780℃ 加热, 保温 2 ~ 3h, 炉冷至 670 ~ 690℃ 保

温 4 ~ 6h, 冷至 500℃ 出炉空冷。硬度为 217 ~ 230HBW, 显微组织为球状珠光体 + 易切削相。

② 预硬化工艺。

a. 淬火: 盐浴炉 880℃ × 1min/mm 加热 (箱式炉取 2min/mm), 淬油, 硬度为 61 ~ 63HRC。

b. 回火: 回火温度根据硬化要求的硬度来决定, 见表 8-51。

表 8-51 5CrNiMnMoVSCa 钢制精密热塑性塑料模回火温度与回火硬度的关系

回火温度/℃	575	600	625	650
回火硬度 HRC	45 ~ 46	43 ~ 44	39 ~ 40	34 ~ 35

注: 回火时间为 2h。

2) 5CrNiMnMoVSCa (5NiSCa) 钢制弯曲模盐浴淬火工艺。

① 淬火: 650℃ × 2min/mm 盐浴预热, 880 ~ 890℃ × 1min/mm 加热, 淬热油, 淬火后硬度为 62 ~ 63HRC。

② 回火: 250℃ × 2h 硝盐回火, 回火硬度为 56HRC。

8.5.4 非合金中碳塑料模具钢的热处理

非合金中碳塑料模具钢其实质是冶金质量 (纯净度) 更高的中碳碳素结构钢。碳的质量分数为 0.40% ~ 0.60%, 我国已有行业标准 YB/T 094—1997、YB/T 107—1997 等, 主要钢种有 SM45、SM50、SM55 等。

宝钢集团上海五钢有限公司生产的塑料模具钢 SM50, 其碳的质量分数范围由原来的 (优质碳素结构钢 50 钢) 0.47% ~ 0.53% 缩小到 0.49% ~ 0.52%, P、S 质量分数也降到 ≤ 0.025%, 气体、夹杂和宏观缺陷少, 锻造比大, 这样的精制钢对热处理工艺和操作是很有利的。对于小型、精度不太高的塑料模具零件, 碳素钢是首选钢种。对于要求耐磨性较高的塑料模具成型零件, 则采用碳素工具钢 (T8A 或 T10A) 制造。

(1) 常规热处理工艺规范

其热处理工艺与碳素工具钢常规工艺无异。大型塑料模具, 一般用热轧、热锻或正火状态, 模具硬度低, 耐磨性较差; 小型塑料模具, 用调质处理可获得较高的硬度和较高的强韧性。淬火加热时必须防止氧化、脱碳, 故采用真空热处理炉或控制气氛炉为宜。钢中碳含量较高, 水淬易开裂且变形大, 大多采用水淬油冷。

(2) 热处理应用实例

1) SM45 钢制蒸发器冲管冲头氯化钙水溶液淬火工艺。

① 冲头外形尺寸: $\phi 68\text{mm} \times 160\text{mm}$ 。

② 热处理工艺。

a. 淬火冷却介质: 5% (质量分数) CaCl_2 水溶液。

b. 淬火、回火工艺: 830 ~ 850℃ 加热, 淬盐水, 230℃ × 1h 回火, 硬度为 50 ~ 55HRC。

2) SM45 钢制冷镦模固体碳氮共渗工艺。

① 模具外形尺寸：外形尺寸为 $\phi 50\text{mm} \times 60\text{mm}$ ，内孔为 $\phi 22\text{mm} \times 20\text{mm} \rightarrow \phi 10\text{mm} \times 40\text{mm}$ 通孔。

② 碳氮共渗处理： $790 \sim 800^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$ ，可获得 $0.6 \sim 0.7\text{mm}$ 共渗层，渗后炉冷至室温再用盐浴淬火。

③ 淬火工艺： $830 \sim 840^{\circ}\text{C} \times 0.5\text{min/mm}$ ，内孔喷 10%（质量分数）NaCl 水溶液冷却。共渗层硬度为 $780 \sim 800\text{HV}$ ，内孔变形率 $\leq 0.04\%$ 。

8.5.5 渗碳型塑料模具钢的热处理

渗碳型塑料模具钢含碳量很低，主要用于挤压成形塑料模具。要求冷塑性好，有高的挤压性能，成形后表面渗碳淬火提高表面硬度，使用寿命长。而心部仍保持超低碳，韧性好，并可使淬火时变形量最小。我国的渗碳型塑料模具钢采用结构钢类的合金渗碳钢，主要有 SM1CrNi3（12CrNi3A）、0Cr4NiMoV 钢等。国外有美国的 P1、P2、P3、P4、P5、P6，日本的 CH1、CH2、CH41 等。

1. 渗碳型塑料模具钢的应用与要求

1) 塑料模具成型零件采用渗碳钢的目的在于采用冷挤压成形，以缩短制造周期和降低加工成本，采用碳平均含量（质量分数）0.10% 左右塑性变形抗力很小的钢种，中间退火后硬度 $\leq 160\text{HBW}$ 、复杂型腔硬度 $\leq 130\text{HBW}$ ，然后再通过渗碳淬硬来提高使用性能，满足零件服役需要。冷挤压成形带来的好处，足以补偿渗碳淬硬工艺的损失。

2) 塑料模具成型零件采用低碳冷挤压钢渗碳工艺，必须保证成型面有良好的表面质量，渗碳层的碳含量和碳化物的形态、数量、大小、分布要严格控制，具有良好的抛光性能和镜面质量。为此，热处理设备是关键，严格控制工艺过程，特别是碳势控制，以保证渗碳层的组织要求。渗碳层表面碳质量分数控制在共析成分为佳，取 $0.7\% \sim 0.9\%$ ；碳化物应细小均匀，不允许有网状或链状、粗大的碳化物；无晶内氧化，无过量的残留奥氏体以及其他组织缺陷。对于表面质量要求很高的塑料模具成型零件，宜采用专用钢。

渗碳型塑料模具钢热处理工艺与常规热处理工艺基本相同，其工艺可参阅机械行业标准 JB/T 3999—2007《钢件的渗碳与碳氮共渗淬火回火》。

2. 渗碳型塑料模具钢的热处理工艺

(1) SM1CrNi3（12CrNi3A）钢

1) 退火。退火温度为 $670 \sim 680^{\circ}\text{C}$ ，硬度 $\leq 229\text{HBW}$ 。

2) 挤压成形后渗碳。 $900 \sim 920^{\circ}\text{C}$ ，保温 $6 \sim 8\text{h}$ ，罐内缓冷。

3) 淬火。方案 I：加热温度为 860°C ，油冷。方案 II：加热温度为 $850 \sim 870^{\circ}\text{C}$ ，油冷。

4) 回火。回火温度为 $160 \sim 180^{\circ}\text{C}$ ，空冷。表面硬度可达 $58 \sim 64\text{HRC}$ ，心部硬度为 $26 \sim 40\text{HRC}$ 。

(2) 0Cr4NiMoV 钢

1) 预备热处理。加热温度为 $870 \sim 890^{\circ}\text{C}$ ，保温 2h ，炉冷至 600°C 以下出炉空冷。

硬度为 100 ~ 105HBW。可进行冷挤压成形。

2) 渗碳淬火、回火。渗碳温度为 900 ~ 930℃, 保温 6 ~ 8h, 渗碳后 850 ~ 870℃ 油淬, 回火温度为 200 ~ 220℃, 保温 2h。表面硬度为 58 ~ 60HRC, 心部硬度为 27 ~ 29HRC, 热处理变形甚微。

8.5.6 时效硬化型塑料模具钢的热处理

为了减少或避免模具零件热处理变形和提高模具零件的尺寸稳定性(精度保持性), 形状复杂、高精度要求、长寿命的塑料模具零件常采用时效硬化钢制造。

时效硬化钢的热处理分两步进行: 首先对模坯进行固溶处理, 即把钢加热到高温, 使各种合金元素溶入奥氏体中, 完成奥氏体转化后淬火获得马氏体组织, 此时硬度较低(硬度为 28 ~ 34HRC), 便于机械加工。模具加工成形后进行时效处理硬化, 可获得较高的硬度并具有优良的综合力学性能。

与通常进行的淬火处理相比, 这一强化过程引起的尺寸、形状变化极小。固溶处理一般在盐浴炉、箱式炉中进行, 淬火采用油冷, 淬透性好的也可采用空冷, 锻造后一般可直接进行固溶淬火。

时效硬化钢有马氏体时效硬化钢和析出硬化型时效硬化钢两大类。

1. 马氏体时效硬化钢

马氏体时效硬化钢有高的强度和屈强比, 良好的切削加工性能和焊接性, 热处理工艺简单。典型的钢种有 00Ni18Co8Mo3TiAl、00Ni18Co8Mo5TiAl、00Ni18Co9Mo5TiAl、00Ni18Co12Mo4Ti2Al 和美国的 18Ni 系列等。它是通过析出金属间化合物而强化的。屈服强度可高达 1400 ~ 3500MPa。这类钢价格昂贵, 只在制造的模具质量高、寿命长、综合经济效益很高时才采用。

(1) 18Ni 系列钢热处理工艺规范

为保证模具零件的表面质量, 热处理应在保护气氛炉内加热。其工艺为 820℃ 固溶处理, 350℃ 时效 3 ~ 6h。

时效处理后的尺寸变化是有规律的, 在工艺设计时可预留变形量来适当控制。如 18Ni (200) 钢, 长度方向收缩约为 0.04%; 18Ni (250) 钢长度方向收缩约为 0.06%; 18Ni (300) 钢和 18Ni (350) 钢长度方向收缩约为 0.08%。

18Ni 系列钢时效强化效果很明显。如 18Ni (250) 钢在固溶状态下, 硬度为 28HRC, 经 480℃ 时效 3h, 硬度可提高到 43HRC, 保温时间延长 3h 或更长, 硬度可达 52HRC。

(2) 18Ni (300) 钢制大截面塑料模固溶处理实例

1) 固溶处理。盐浴加热前经 450 ~ 500℃ × 3min/mm 预热, 815 ~ 830℃ × 3min/mm 加热, 淬油, 硬度为 28 ~ 30HRC。

2) 时效处理。470 ~ 490℃ × 6h, 时效后硬度为 52 ~ 54HRC。

18Ni 系列时效钢还可以通过渗氮进一步强化。18Ni (300) 钢的气体渗氮工艺为 (455 ± 10)℃, 24 ~ 28h。

2. 析出硬化型时效硬化钢

析出硬化型钢是通过固溶处理和时效析出第二相而强化的,以满足塑料模具成型零件的要求。市场以 40HRC 级预硬钢供应,仍然有良好的切削加工性能。这类钢冶金质量高,一般采用特殊冶炼,所以纯净度、镜面研磨性、蚀刻性能良好,使模具具有良好的精度和尺寸稳定性。表面和心部的硬度均匀,具有良好的焊接性。析出硬化型钢一般含 Ni 较低,其代表钢种有 25CrNi3MoAl,属于低碳中合金钢,相当于日本 N3M 钢和美国 P21 钢。

(1) 25CrNi3MoAl 钢

25CrNi3MoAl 钢属于低 Ni 无 Co 析出硬化型时效钢。适用于制作变形率要求在 -0.05% 以下,镜面要求高或表面要求光刻花纹的精密塑料模具。

1) 热处理工艺。25CrNi3MoAl 析出硬化型塑料模具钢热处理可分为三部分。

① 第一次固溶处理(也称淬火): $850 \sim 950^{\circ}\text{C}$ 固溶处理(45HRC),获得细小的板条状马氏体,提高钢的强韧性。奥氏体化温度越高,保温时间越长,固溶处理后的硬度越低,板条状马氏体越粗大。

② 第二次固溶处理(也称回火): $670 \sim 690^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$,硬度为 28~30HRC,目的是使马氏体分解又不使 Ni、Al 相脱溶析出。经第二次固溶处理后,淬火马氏体分解转变成回火马氏体。第二次固溶处理时随着回火温度的升高和回火时间的延长,硬度逐渐下降。在 690°C 回火 4h,硬度降到 28HRC; 690°C 回火 6h,硬度降到 23HRC。此时极利于切削加工。市场上供应的是经过第二次固溶处理的钢材。

③ 时效处理: $530 \sim 560^{\circ}\text{C}$ 时效 8h,目的是使 Ni、Al 相析出而强化,硬度为 42~46HRC。

25CrNi3MoAl 钢时效变形率可控制在 0.05% 以下(收缩),如果在机械加工后经消除应力处理,变形率还可进一步减少到 $0.01\% \sim 0.02\%$ 。

④ 表面处理:析出硬化型钢制的模具零件还可通过渗氮处理进一步提高耐磨性、抗咬合能力和模具使用寿命。

美国 P21 钢的渗氮温度可取与时效温度相同($510 \sim 525^{\circ}\text{C}$),渗氮时间取 20~24h。渗氮后,有效渗氮层深度约为 0.15mm,表面硬度接近 94HRB。

25CrNi3MoAl 钢如果也取渗氮温度与时效温度($520 \sim 540^{\circ}\text{C}$)相同,则同样可获得最佳硬度、强度和较高的韧性,渗氮层深度约为 0.2mm,渗氮层表面硬度可高达 1100HV。

2) 25CrNi3MoAl 钢制塑料模具的时效处理工艺。

① 工艺 I:一般精密塑料模具处理。

淬火加热温度为 880°C ,空冷或水冷淬火,淬火后硬度为 48~50HRC; $680^{\circ}\text{C} \times 4 \sim 6\text{h}$ 高温回火,空冷或水冷,回火后硬度为 22~23HRC。经机械加工成形,再进行时效处理, $520 \sim 540^{\circ}\text{C} \times 6 \sim 8\text{h}$,时效后硬度为 39~42HRC。再经研磨、抛光或光刻花纹后装配使用,时效变形率约为 -0.039% 。

② 工艺 II:高精密切塑料模具热处理。

淬火加热温度为 880℃, 空冷或水冷淬火, 淬火后硬度为 48 ~ 50HRC; 680℃ × 4 ~ 6h 高温回火, 空冷或水冷, 回火后硬度为 22 ~ 23HRC。经粗加工和半精加工后, 补充 650℃ × 1h 去应力退火, 消除加工后的残余应力, 然后进行精加工。时效处理为 520 ~ 540℃ × 6 ~ 8h, 空冷, 时效后硬度为 39 ~ 42HRC。再经研磨、抛光或光刻花纹后装配使用, 时效变形率约为 -0.01% ~ -0.02%。

③工艺Ⅲ: 冲击韧性要求不高的塑料模具热处理。

锻坯退火后直接进行粗加工、精加工, 加工获得成品后进行时效处理: 520 ~ 540℃ × 6 ~ 8h, 空冷, 时效后硬度为 39 ~ 42HRC。再经研磨、抛光或光刻后装配使用, 硬度为 40 ~ 43HRC。时效变形率 ≤ 0.05%。

④工艺Ⅳ: 冷挤压塑料模具热处理。

锻坯退火软化后, 对模具挤压面进行加工、研磨、抛光, 然后对冷挤压模型腔和模具外形进行修整, 最后对模具进行真空时效或表面渗氮处理, 装配使用。

(2) SM1Ni3Mn2CuAlMo (PMS) 钢

SM1Ni3Mn2CuAlMo (PMS) 钢与日本 NAK55、NAK80 相似, 但不含贵重金属元素 Co, 未纳标。常用于制造工作温度 300℃ 左右, 硬度 45HRC, 截面尺寸 ≤ 150mm, 要求高镜面、高精度、光蚀刻性能的热塑性模具或增强工程塑料模具。钢经过感应炉熔炼后再经电渣重熔, 添加易切削元素 S 后, 可进一步改善切削加工性能, 而对力学性能无明显影响。

1) 固溶处理。固溶处理的目的是为了使合金元素在基体内充分溶解, 使固溶体均匀化, 并达到软化, 便于切削加工。经 840 ~ 850℃ 加热 3h 固溶处理, 空冷后的硬度为 28 ~ 30HRC。

2) 时效处理。钢的最终使用性能是通过时效处理获得的, 钢出现硬化峰值的温度为 $(510 \pm 10)^\circ\text{C}$, 时效后硬度为 40 ~ 42HRC。

PMS 的变形率很小, 收缩率 < 0.05%, 总变形率径向为 -0.11% ~ 0.041%, 轴向为 -0.021% ~ 0.026%, 接近马氏体时效钢。

该钢以 40HRC 级预硬化钢供应市场, 抗拉强度为 1000 ~ 1300MPa。金相组织为板条状马氏体基体、弥散分布大量细小化合物。

(3) SM2CrNi3MoAl1S 钢

SM2CrNi3MoAl1S 钢是一种时效硬化易切削塑料模具钢。钢中添加易切削元素 S, 效果明显, 加入 Al 时效时可析出硬化相 Ni_3Al , 已纳标。热处理工艺过程如下:

1) 软化处理。目的是便于加工成形, 为后续处理做好组织准备。870 ~ 930℃ 加热, 油冷, 680 ~ 700℃ 高温回火 2h, 硬度 ≤ 30HRC。

2) 固溶处理。870 ~ 930℃ 加热, 油冷, 硬度为 42 ~ 45HRC。回火温度为 680 ~ 700℃, 油冷, 硬度为 28HRC。

3) 时效处理。时效温度为 500 ~ 520℃, 时效时间为 6 ~ 10h, 硬度为 40HRC。

8.5.7 耐蚀塑料模具钢的热处理

在生产会产生化学腐蚀性介质的塑料制品时, 模具工作零件采用耐蚀钢制造。常用

钢种有已纳标的 SM2Cr13、SM4Cr13 和 SM3Cr17Mo 等可强化的马氏体型不锈钢。

常用的几种耐蚀塑料模具钢热处理工艺规范见表 8-52。

表 8-52 耐蚀塑料模具钢热处理工艺规范

序号	钢号	热处理	硬度	备注
1	Cr13 系列	920 ~ 1050℃ 油冷，600 ~ 750℃ 回火，可进行渗氮提高表面硬度和耐磨性，但耐蚀性会下降	229 ~ 341HBW	SM2Cr13 以预硬状态供应
2	SM3Cr17Mo	850℃ 预热，1000 ~ 1050℃ 奥氏体化，油冷，-80℃ 冷处理，200 ~ 300℃ 回火 3h，空冷	43HRC	
3	S - STAR	第一次预热 500℃ 第二次预热 800℃ 奥氏体化温度为 1020 ~ 1070℃ 空冷、油冷或气冷均可 回火：①要求耐蚀性时，200 ~ 400℃ 回火，时间按 60 ~ 90min/25mm 计；②要求高硬度时，490 ~ 510℃ 回火，时间按 60 ~ 90min/25mm 计尺寸稳定性高的模具零件需进行冷处理	预硬状态交货：31 ~ 34HRC 淬火、回火状态交货：≤ 229HBW	日本大同特殊钢公司产品
4	GS - 083ESR	软化退火 760 ~ 800℃，炉冷 淬火 1000 ~ 1050℃，油冷或 500 ~ 550℃ 热浴 回火（按硬度需要）300 ~ 500℃	≤230HBW 51 ~ 52HRC	德国蒂森克虏伯集团产品

如果需要进一步改变硬度和力学性能，可以重新淬火、回火，淬火温度取 985 ~ 1020℃，油冷或气冷，回火温度按力学性能要求而定，回火需两次，空冷。

耐蚀性塑料模具钢零件的热处理与一般不锈钢制品的热处理基本相同，其热处理工艺可参考我国机械行业标准 JB/T 9197—2008 《不锈钢和耐热钢热处理》。

8.6 模具零件的热处理

8.6.1 模具零件的热处理特点

1) 通常所谓模具热处理实际上是指模具零件的热处理。模具结构零件的热处理与普通机械零件无异。模具受力复杂、服役条件恶劣，热处理技术要求高、难度大的工作零件或成形部分零件，如冲头、凸模、凹模、型腔、型芯、刀片等，除了结构设计和选用的材质外，热处理前后工序的配合与要求、热处理选用的设备和工装、装炉量及装炉方式、生产组织及操作者的水平等，都对热处理结果有重大影响。所以即使是同一材料

的模具零件，在不同的生产条件下，工艺也会有所差异。

2) 选用材料的品种是热处理工艺制订的最主要依据。材料的品质和热处理前的冷加工质量是热处理质量优劣的基础。不管热处理生产条件有何不同，在整个热处理工艺过程中，都应遵照有关技术标准和工艺规范严加控制。

3) 对于原材料或毛坯，在性能和金相组织上已达到要求时，制造者就不必再进行预备热处理。多余的、重复的热处理不仅是浪费而且有害无益。采用预硬钢的零件也同样如此。

4) 热处理变形是模具零件热处理的关键问题之一，要解决需从多方面着手。

① 模具设计是首要方面。要使零件结构工艺性良好；选材要讲究价廉物美，用其所长，价廉不单纯是材料成本价格，物美是有良好的使用性能和工艺性能；零件的热处理技术要求应科学合理，既要满足零件的服役性能要求，又不增加热处理的难度。

② 尽可能采用预硬型钢、微合金非调质钢、时效硬化钢、微变形钢、易切削钢。这些钢种就是为减少零件热处理变形而开发、推广应用的。采用微变形的热处理工艺，如渗氮、等温淬火、分级淬火等。

③ 利用高科技控制装置和仪器仪表检测热处理装备，使热处理工艺的全过程控制达到智能化、人性化和网络化。采用先进的热处理设备和工装来保证工艺的贯彻和质量控制是模具热处理的发展方向，在现阶段已成为可能和必要。以往在热处理生产中主要依靠操作工人的经验和技巧，这种生产方式已难以满足现代化生产的要求了。

8.6.2 模具零件热处理实例解析

模具零件热处理工艺具有一定的多样性和相对性，是科研和生产一线的工程技术人员在热处理理论方面的深化研究与生产实践的总结。经验往往滞后于先进技术和带有一定的局限性，但它可以给以启迪和借鉴。

(1) 例1 碳素工具钢 T10A 制作的铆钉机风窝头高温淬火

T10A 钢制作的铆钉机风窝头，硬度要求为 59 ~ 62HRC。原工艺是 780℃ 奥氏体化，碱液淬火，180 ~ 200℃ 回火。将奥氏体化温度改为 840℃，用水淬油冷双液淬火，200℃ 回火 2h，同样达到硬度要求，但用改进工艺处理的风窝头使用寿命为原来的 2 ~ 3 倍。

此例说明最终热处理与预备热处理要匹配，从工艺上来看，只是采用了较高的奥氏体化温度和快冷。此例钢的预备热处理（退火）是 840℃ 完全退火，获得的组织是片状珠光体，硬度为 185HBW。因此在片状珠光体原始组织条件下采用 840℃ 淬火和低温回火使风窝头的抗压强度、断裂韧度提高，从而提高了模具寿命。实践证明此工艺适用于 M22 铆钉机风窝头，加工 $\phi 16 \sim \phi 22\text{mm}$ 的 Q235 钢铆钉和 Z47 - 12 型多工位联合冷锻机工序冲模。

水油双液淬火方法在操作上是比较难控制的，对于操作水平低的情况或形状复杂、尺寸较大的模具零件不太适宜。

(2) 例2 3Cr3Mo3W2V 钢制精密锻造喷管模高温正火

这一类钢（尤其是较大截面时）在锻后缓冷过程中碳化物易形成链状或网状，在

以后的正常退火时难以改善或消除。具有这样组织的模具零件毛坯在淬火、回火处理时，虽然也能达到规定的硬度要求，但使用中模具仍有早期失效（脆断）。高温正火的目的是改善碳化物形态。因此，在退火前先进行高温正火，称为组织预处理，是简单易行的有效方法。对于类似服役条件的模具如辊锻成形模、C 形轴承环成形模等也可见效。

3Cr3Mo3W2V 钢精密锻造喷管模的热处理工艺过程：锻后高温正火（1130℃，空冷）→球化退火→淬火（1060 ~ 1130℃，油冷）→回火（600 ~ 680℃，两次回火，每次 1 ~ 2h，回火温度和时间针对不同对象可作调整），硬度为 38 ~ 52HRC。

(3) 例 3 CrWMn 钢冲模凸模低温淬火

CrWMn 钢冲模是冲压高硬度带钢（硬度≥240HV）的冲模，其常规工艺和低温淬火工艺比较见表 8-53。

表 8-53 CrWMn 钢冲模不同热处理工艺的使用寿命

工 艺	热处理参数	硬度 HRC	寿命/万件
常规工艺	控制气氛炉内加热至 830 ~ 840℃，150℃热油冷却，230 ~ 240℃回火 1.5h	58 ~ 60	5 ~ 8
低温淬火工艺	控制气氛炉内加热至 800 ~ 810℃，150℃热油冷却，230℃回火 1.5h	58 ~ 59	10 ~ 15

由表 8-53 可见，其他条件不变，仅把淬火温度降低约 30℃，就能取得很好的效果，因此针对零件特点制订工艺是很重要的。

(4) 例 4 20 钢齿模（锯齿锁紧垫圈冲模）

该冲模冲压 65Mn 钢带（硬度为 179 ~ 217HBW），冲模采用三种材料、不同工艺时，有着不同的使用效果，见表 8-54。

表 8-54 齿模使用寿命比较

材 料		热 处 理	硬度 HRC	寿命/千次
Cr12MoV	轧材	(1010 ± 10)℃，油冷，(610 ± 10)℃回火	48 ~ 50	2
	锻材	(1010 ± 10)℃，油冷，(610 ± 10)℃回火	48 ~ 50	3
	锻材	(850 ± 10)℃，10%（质量分数）盐水冷却，(310 ± 10)℃回火	47 ~ 49	1
T10	轧材	(770 ± 10)℃，10%（质量分数）盐水冷却，(340 ± 10)℃回火	48 ~ 50	1.5
		(810 ± 10)℃，(310 ± 10)℃硝盐浴等温淬火（30min），(210 ± 10)℃回火	49 ~ 51	0.5
20	轧材	(910 ± 10)℃，10%（质量分数）盐水冷却，不回火	46 ~ 48	30 ~ 40

此例表明,只要有合适的热处理工艺配合,采用价廉易得的 20 钢也可获得良好的技术经济效益。Cr12MoV、T10A 钢都是制造各类冲模的优良材料,但工艺不当,效果就不好。可见,模具的选材和热处理有多种途径,应充分考虑。

(5) 例 5 Cr12MoV 钢滚丝模

表 8-55 中的三种工艺,硬度都符合图样的热处理技术要求,都是合格品,但使用寿命相差较大,其中等温淬火最好,因等温淬火获得下贝氏体组织,有较好的强韧性。由此可见,只符合硬度指标是不够的。

表 8-55 Cr12MoV 钢滚丝模的三种热处理工艺及使用寿命的比较

序号	热 处 理	硬度 HRC	寿命/万件
1	1000℃奥氏体化,280℃分级淬火,400℃回火	57 ~ 59	0.5 ~ 1.0
2	1000℃奥氏体化,280℃分级淬火,530 ~ 560℃回火	54 ~ 56	1.0 ~ 2.0
3	1000℃奥氏体化,280℃等温淬火,400℃回火	54 ~ 56	5.0 ~ 8.0

(6) 例 6 6Cr4W3Mo2VNb 钢冲模

6Cr4W3Mo2VNb (65Nb) 钢的性能优于一般的冲模钢。制造多工位镦机用螺栓压角凸凹模,热处理工艺为 1120℃油淬,560℃回火 2h 两次,硬度为 57 ~ 59HRC。其使用寿命比 Cr12MoV 钢制造的凸凹模(淬火、回火并经气体氮碳共渗处理)高出 3 ~ 4 倍。

但是,65Nb 钢制十字槽螺钉平圆头冲模用类似上述热处理工艺效果并不理想,主要是质量不稳定,部分出现早期失效。改用二次淬火,第一次 1200℃油淬,第二次用低温 900℃油淬,然后经 450℃一次回火,效果较好,使用寿命提高,且质量稳定。

65Nb 钢制 203 轴承套圈温锻模凸模,同样条件下与 3Cr2W8V、W18Cr4V 和 H13 三种钢进行对比,其使用寿命见表 8-56。

表 8-56 几种钢的性能对比

材料	热处理	硬度 HRC	温锻温度/℃	平均寿命/次
3Cr2W8V	1100℃淬油,580℃×1.5h 回火 2 次	51	< 720	3000
W18Cr4V	1280℃加热,560℃盐浴分级淬火,560℃×1.5h 回火 3 次	66	< 720	2000
H13	1060℃淬油,540℃×1.5h 回火 2 次	54	< 720	12 000
65Nb	1200℃淬油,200℃×1.5h 回火,580℃×1.5h 回火 2 次,尾部 780℃快速回火	64	< 720	40 000

此例特点是高温加热淬火(比正常淬火温度高 20 ~ 120℃),多一次 200℃低温回火,凸模尾部软化。

对 65Nb 钢的多种热处理工艺进行比较,获得较高强韧性的工艺是 1120℃加热淬油,560℃×1h 回火 3 次,抗拉强度为 4800MPa,冲击韧度为 108J/cm²。

(7) 例7 Cr12MoV 钢制蜗壳拉深成形模凹模热处理工艺

1) 球化退火: 860℃ 加热, 保温 3h, 740℃ 等温 4h, 炉冷至低于 500℃ 空冷。

2) 淬火、回火: 550℃ 预热, 1030℃ 奥氏体化, 淬油, 200℃ 回火 1h, 硬度为 61HRC。

3) 离子渗氮: LD-60 型离子渗氮炉, 通入氨分解气 (炉外裂化), 炉压保持在 $5 \times 10^2 \sim 8 \times 10^2 \text{ Pa}$, 电压为 500~600V, 电流密度为 1 mA/cm^2 。渗氮温度为 500℃, 时间 5h。渗氮层总深度为 0.12mm, 白亮层深度为 0.015mm, 表面硬度为 1200HV。

与未经渗氮的同样凹模相比, 使用寿命提高 2.5 倍。此例说明表面强化处理有良好的作用。

(8) 例8 5CrMnMo 钢制热锻模预冷淬火工艺比较

工艺 I: 500℃ $\times$ 2min/mm 预热, 890℃ $\times$ 1min/mm 加热, 出炉后预冷至 780~810℃, 淬油, 冷至 180~200℃, 立即转入 280℃ 硝盐浴中 2~3h, 出炉后空冷。第一次回火时 500℃ $\times$ 2min/mm 加热, 转入 280℃ 硝盐浴 2~3h。第二次回火重复第一次操作。适用于小型热锻模。

工艺 II: 500℃ $\times$ 2min/mm 预热, 890℃ $\times$ 1min/mm 加热, 出炉后预冷至 780~810℃, 淬油冷至 180~200℃, 立即转入带有风扇的 280℃ 空气炉中等温 4~5h, 出炉后空冷。进行 500℃ $\times$ 2min/mm 油冷回火两次; 第三次回火 300℃ $\times$ 2~3h 空冷。模具使用一段时间后再进行 500℃ $\times$ 2min/mm 油冷回火。适用于中、小型热锻模。

工艺 III: 500℃ $\times$ 2min/mm 预热, 890℃ $\times$ 1min/mm 加热, 出炉后预冷至 780~810℃, 淬油, 冷至 180~200℃, 立即转入 280℃ 空气炉中缓冷 4~5h, 出炉后空冷。进行 500℃ $\times$ 2min/mm 回火两次, 每次出炉后油冷; 第三次回火 300℃ $\times$ 3~4h, 出炉空冷。适用于冲击较大、模具强度低的强韧化处理。

工艺 IV: 500℃ $\times$ 4min/mm 预热, 890℃ $\times$ 1min/mm 加热, 随炉降温至 810~820℃, 淬油, 冷至 180~200℃, 立即转入 280℃ 空气炉中缓冷 5~6h, 随炉升温, 进行 500℃ $\times$ 2min/mm 回火两次, 每次出炉油冷。冷至 300℃ 保温 6h, 进行去应力回火。适用于大型、特大型热锻模热处理。但在热处理中要注意防止工件开裂。

(9) 例9 稀土蠕墨铸铁制医用盐水瓶模具热处理工艺

1) 模具性能要求: 具有高的精度、耐磨性、耐热疲劳性、抗氧化性和抗生长性。

2) 热处理工艺: 950℃ $\times$ 2h, 炉冷至 750℃ 保温 4h, 炉冷至 500℃ 出炉空冷。

稀土元素应用于球墨铸铁或蠕墨铸铁之中, 对提高铸铁的性能起重要作用。

8.6.3 新型模具钢应用示例

随着模具工业的发展, 科研部门和生产企业研制的新型模具钢已用于多种模具零件制造, 目前虽然大部分尚未纳标, 但使用性能、工业性能和经济效果很好, 正在生产实践中快速推广 (表 8-57)。

表 8-57 新型模具钢的应用及效果示例

钢 号	热处理工艺	模具	寿命/万次	备注
3Cr3Mo3W2V (HM1)	550℃第一次预热, 800℃第二次预热, 1030 ~ 1060℃加热油淬, 600 ~ 620℃回火 3 次, 硬度为 44 ~ 48HRC	轴承套圈热挤压凸凹模	1 ~ 3	—
	550℃第一次预热, 800℃第二次预热, 1110 ~ 1130℃加热油淬, 640 ~ 660℃回火 3 次, 硬度为 38 ~ 42HRC	高强度钢形状复杂锻件精锻模	≈0.1	
3Cr3Mo3VNb (HM3)	550℃第一次预热, 800℃第二次预热, 1040 ~ 1060℃加热油淬, 560 ~ 640℃回火, 硬度为 48 ~ 42HRC	易脆裂的轴承套圈热挤压模	1 ~ 3	该钢属于超高强韧热作模具钢, 在 600℃ 以上强韧性超过常用高强韧热作模具钢 3Cr2W8V
		连杆辊锻模	1 ~ 2	
		压铸铝合金模具	15 ~ 20	
	550℃第一次预热, 800℃第二次预热, 1040 ~ 1060℃加热油淬, 560 ~ 600℃回火 2 次, 硬度为 48 ~ 46HRC	耐热不锈钢制弯管头、支板销、叶片锻件等的热作模具		
5Cr4W5Mo2V (RM2)	550℃第一次预热, 800℃第二次预热, 1120 ~ 1140℃加热油淬, 610 ~ 630℃回火 2 次, 硬度为 50 ~ 52HRC	轴承套圈热锻模	1 ~ 2	—
5Cr4Mo3SiMnVAI (012Al)	550℃第一次预热, 800℃第二次预热, 1090 ~ 1110℃加热油淬, 520 ~ 540℃ × 120min 回火 3 次, 硬度为 60 ~ 62HRC	M12 六角螺母下冲	11	该钢为基体钢
6Cr4W3Mo2VNb (65Nb)	550℃第一次预热, 800℃第二次预热, 1150 ~ 1170℃加热油淬, 540 ~ 570℃回火 3 次, 硬度为 58 ~ 60HRC	M10 螺栓冷锻模	16 ~ 20	该钢为基体钢
		平圆头十字槽螺钉冲模	3	
		不锈钢异形件冷锻模	2 ~ 2.5	
Cr4W2MoV	550℃第一次预热, 800℃第二次预热, 900 ~ 1000℃加热油淬, 400 ~ 420℃回火 2 次, 硬度为 56 ~ 58HRC	钢板弹簧冲孔凸模	≈0.08	—
8Cr2MnW MoVS (8Cr2S)	在预硬状态使用: 860 ~ 880℃加热空冷, 硬度为 60 ~ 64HRC, 560℃回火硬度为 36 ~ 44HRC, 560℃离子渗氮 480min, 硬度为 1000 ~ 1100HV0.1	胶木模、陶土模		—
		电阻连接复合模	60 ~ 150	
	在高硬状态使用: 550℃第一次预热, 800℃第二次预热, 860 ~ 900℃空淬, 160 ~ 250℃回火, 硬度为 58 ~ 60HRC	倒顺开关级进模		

(续)

钢 号	热处理工艺	模具	寿命/万次	备注
7Cr7Mo2V2Si (LD)	550℃ 第一次预热, 800℃ 第二次预 热, 1090 ~ 1100℃ 加热油淬, 520 ~ 540℃ 回火 2 次, 硬度为 58 ~ 60HRC	M10 六角螺 母 冲模	18	—
		M12 六角头螺栓 冷镦模	40	
		3/4in (1in = 0.0254m) 轴 承 钢 球冷镦模	3.5 ~ 4	

8.7 其他模具材料的热处理

在模具材料中主要选用钢材料，但在一些情况下考虑到性能和价格因素也选用其他模具材料，如铸铁、铸钢、非铁金属及合金、硬质合金及钢结硬质合金、陶瓷材料、环氧塑料以及聚氨酯橡胶等。

8.7.1 铸铁材料的热处理

铸铁具有一定的力学性能和优良的工艺性能，其主要特点是铸造性能好，易浇注成形，并能铸造出形状复杂的模具，而且工艺简单、适应性强、投资少、成本比较低，有良好的抗振性、减摩性和切削加工性能。经过合金化后，还可具有耐热、耐蚀和耐磨等特殊性能。因此近年来逐渐广泛地用作模具材料，常用来制造各种压形模、玻璃模、塑料模及模具的有关配件。

1. 灰铸铁的热处理

灰铸铁的石墨呈片状，有效承载面积比较小，石墨尖端易产生应力集中，所以灰铸铁的强度、塑性、韧性都比其他铸铁低。铸铁中片状石墨的大小、数量和分布是影响铸铁力学性能的主要因素。

由于灰铸铁的石墨是片状，因此靠热处理方法不能明显地提高其强度和韧性。热处理主要用来消除铸件的内应力，改善加工性能，消除白口和麻口，提高硬度和耐磨性。

(1) 常规热处理工艺规范（表 8-58）

表 8-58 灰铸铁常规热处理工艺规范

热处理工艺	工 艺 参 数
去应力退火	加热温度为 500 ~ 550℃，保温 1 ~ 3h，炉冷至 100℃ 以下出炉空冷
正火	加热温度为 880 ~ 920℃，保温 1 ~ 3h 后出炉空冷。可增加铸铁中的珠光体数量，因此可以提高强度、硬度及耐磨性
淬火及回火	加热温度为 850 ~ 900℃，保温 1 ~ 3h，出炉后水冷或油冷；回火温度为 400 ~ 500℃，保温 1 ~ 3h，出炉后空冷，回火后获得回火索氏体组织，硬度为 400 ~ 500HBW。淬火和回火可提高铸铁件的硬度、强度和耐磨性

(2) 热处理应用实例

灰铸铁制电动机风扇罩拉深模铬钼共渗热处理工艺。

1) 铬钼共渗剂。铬钼共渗剂成分(质量分数): 铬铁粉 60% + 三氧化二铝粉 30% + 钼粉 5% + 氯化铵 5%。三种粉的粒度均为 200 目, 无杂质。铬铁粉的铬质量分数不低于 60%, 碳质量分数为 0.1%。三氧化二铝粉需经 1000℃ 焙烧脱水。

2) 热处理工艺如下:

① 把准备好的工件装入箱中, 工件与箱之间、工件与工件之间留 20 ~ 30mm 空隙, 把上述搅拌好的渗剂填实后, 放入 300℃ 炉中烘干, 再用水玻璃调制的耐火泥密封箱盖。

② 装炉后升温至 500℃ 保温 2 ~ 3h, 再升温至 1080℃ 保温 5h, 炉冷到 950℃ 保温 1h 后出炉开箱。油冷至 180 ~ 200℃ 时转入预先升温的 (220℃) 回火炉中进行回火, 保温 2 ~ 3h, 空冷。渗层厚度为 0.02 ~ 0.025mm, 基体硬度为 50 ~ 53HRC, 表面硬度为 1003 ~ 1006HV。

2. 球墨铸铁的热处理

球墨铸铁与普通灰铸铁的区别在于石墨呈球状分布, 对基体的割裂作用比普通灰铸铁小得多。球墨铸铁有很好的热处理效果, 它不仅可以进行一般的去应力退火、石墨化、正火、表面淬火等热处理, 而且可以进行调质、等温淬火、化学热处理等, 通过热处理可在很大范围内改善它的性能, 从而获得更广泛的应用。

(1) 常规热处理工艺规范

球墨铸铁由于其内部组织的不同, 可采用不同的退火处理。球墨铸铁常规热处理工艺规范见表 8-59。

表 8-59 球墨铸铁常规热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
退火	去应力退火	加热温度为 550 ~ 600℃, 保温时间按 2h + 铸件厚度 (mm) / 25 (单位为 h) 计算, 炉冷至 200℃ 以下出炉空冷。适用于形状复杂、截面差悬殊的铸件
	低温石墨化退火	加热温度为 720 ~ 760℃, 保温时间为 3 ~ 4h, 充分石墨化, 炉冷至 600℃ 以下出炉空冷。主要用于要求高韧性的铸件
	高温石墨化退火	加热温度为 900 ~ 950℃, 保温时间为 3 ~ 4h, 炉冷至 600℃ 以下出炉空冷。主要目的是充分石墨化, 消除成分偏析。适用于易产生部分白口、自由渗碳体和局部成分偏析的铸件
正火	完全奥氏体化正火	加热温度为 880 ~ 950℃, 保温 1 ~ 3h, 然后空冷 (或吹风、喷水雾) 以获得珠光体为基体的球墨铸铁。高温正火后, 球墨铸铁有较高的强度、硬度和耐磨性, 但塑性、韧性较差。适用于要求珠光体多、强度高的铸件
	不完全奥氏体化正火	加热温度为 840 ~ 860℃, 保温 1 ~ 3h, 然后空冷。获得以珠光体 + 铁素体为基体的球墨铸铁。低温正火后有较好的塑性和韧性, 但强度稍低, 主要适用于要求改善铸铁塑性和韧性的铸件

(续)

热处理工艺		工 艺 参 数
调质处理		加热温度为 860 ~ 920℃，一般在油中冷却，形状简单的可用水或热水冷却。淬火后组织为细片状马氏体 + 球状石墨。回火温度为 600 ~ 650℃，保温 2 ~ 6h，回火后快冷以防止产生回火脆性。回火后得到索氏体 + 球状石墨。常用于一些受力比较复杂、综合力学性能要求较高的模具零件，主要用于大截面模具铸件
淬火	等温淬火	加热温度为 860 ~ 920℃，保温一定时间（约是钢的一倍）后，在 260 ~ 320℃ 硝盐中冷却 2 ~ 3h，然后取出空冷，等温淬火后可以不回火。淬火后的组织为下贝氏体 + 少量残留奥氏体 + 少量马氏体 + 球状石墨。对于要求综合力学性能较高且外形比较复杂、一般淬火后易变形和开裂的模具零件，可采用等温淬火
	表面淬火	为了提高球墨铸铁模具的表面硬度、耐磨性，还可进行表面淬火（如感应淬火、火焰淬火）
表面强化处理	气体氮碳共渗	加热温度为 560 ~ 580℃，保温 4 ~ 6h，出炉后油冷，球墨铸件表面硬度可达 550 ~ 570HV，渗层深为 0.02 ~ 0.03mm。铸件气体氮碳共渗后，疲劳强度可提高一倍左右，耐磨性则可提高 2 ~ 4 倍以上，铸件寿命大大提高
	气体碳氮共渗	拉深模（球墨铸铁件）经 900℃ 正火，560℃ 回火，硬度为 240 ~ 300HBW，采用 700℃ × 4h 碳氮共渗，硝盐水冷，200℃ × 1h 回火。化合物层深度为 0.05mm，硬度为 760 ~ 850HV

(2) QT600 - 3 球墨铸铁拉深模的热处理应用实例

1) 模具的性能要求。汽车发动机油底壳拉深模为大型模具，热处理要求平面变形量 ≤ 1.0mm，表面淬火硬度为 42 ~ 48HRC，渗氮硬度 ≥ 420HV10。

2) 热处理工艺。

① 预备热处理：900℃ × 3h 高温正火，风冷，回火温度为 600℃，保温 2h 后出炉空冷。

② 去应力退火：拉深模半精加工或精加工后，进行 600℃ × 3h 去应力退火。

③ 最终热处理：火焰淬火。由于淬火后硬度不均匀，变形较大，模具使用寿命较短，可拉深 2500 件。

④ 化学热处理：最终热处理后，进行气体氮碳共渗处理，加热温度为 580℃，保温 5h，渗后表面硬度为 433 ~ 464HV10，变形量 < 0.1mm。模具使用寿命提高，可拉深 18 000 件。

3. 蠕墨铸铁的热处理

蠕墨铸铁是向高碳、低硫、低磷的铁液中加入适量的蠕化剂进行蠕化处理，使石墨形态呈蠕虫状，所以其性能介于灰铸铁和球墨铸铁之间，为一种高强铸铁材料。对壁厚敏感性比较小，导热性优于球墨铸铁，抗热和抗氧化性均优于其他铸铁。

在铸态蠕墨铸铁的基体组织中铁素体量约为 50%（体积分数）或更高，通过加入 Cu、Ni、Sn 等珠光体稳定元素，可使铸态组织中的珠光体量提高至 70%（体积分数）

左右。其热处理主要是采用正火，消除铸造应力，细化组织，可使珠光体量达到 90% ~ 95%（体积分数）。蠕墨铸铁的热处理工艺规范见表 8-60。

表 8-60 蠕墨铸铁的热处理工艺规范

热处理工艺		工 艺 参 数
预备热处理	石墨化退火	为了获得铁素体基体，可以按照球墨铸铁石墨化退火处理进行。退火工艺为：920℃加热，保温 3h，快冷，快冷速度为 40℃/h，冷至约 700℃后在炉内缓慢冷却，500℃后出炉空冷
	正火	对于需要进行表面热处理或整体热处理的工件，需要进行正火处理。其工艺为：880 ~ 900℃加热，保温 2 ~ 4h，风冷，珠光体含量约为 80%（体积分数）；约 1000℃加热，保温超过 2.5h，风冷，珠光体含量 > 90%（体积分数）
淬火	常规淬火规范	加热温度为 850 ~ 870℃，硅含量较高时加热温度应适当提高。盐浴炉加热时保温时间可按 1min/mm 计算，在气体介质炉中按 1.5min/mm 计算。形状复杂和厚度较大的铸件采用油冷，形状简单的零件可用水冷。淬火后硬度 ≥ 55HRC
	等温淬火	加热温度为 850 ~ 870℃。盐浴炉加热时保温时间可按 1min/mm 计算，在气体介质炉中按 1.5min/mm 计算，等温温度一般为 250 ~ 270℃。保温时间约为 2h
回 火		回火温度应低于 550℃，以免发生石墨化。保温时间应根据装炉量和铸件厚度确定，但不应少于 1h
硬环化处理		蠕墨铸铁零件经石墨化退火获得铁素体基体后，再通过高频感应加热至 950℃，保温 10 ~ 20s，淬火，可在石墨周围形成环状硬质组织，使零件表面具有良好的耐磨性。这种工艺称为硬环化处理

4. 可锻铸铁石墨化退火

可锻铸铁是将白口铸铁通过石墨化或氧化脱碳退火处理得到的一种高强铸铁。其石墨呈团絮状，具有较高的强度、塑性和冲击韧度，常用于代替碳素钢制造形状较复杂的模具。

可锻铸铁的组织与石墨化退火方法有关。

1) 珠光体可锻铸铁的退火过程。将白口铸铁加热到 900 ~ 960℃，进行长时间保温，使共晶渗碳体分解成团絮状石墨，完成第一阶段石墨化过程。随后以较快的速度（100℃/h）冷却通过共析转变温度区，得到珠光体基体的可锻铸铁。

2) 铁素体可锻铸铁的退火过程。第一阶段石墨化完成后，进行保温慢冷，使奥氏体中的碳充分析出，完成第二阶段石墨化，再在 650 ~ 700℃出炉冷却至室温，则得到铁素体基体的可锻铸铁。

8.7.2 铸钢材料的热处理

1. 铸钢材料的特点

1) 铸造模具是采用电弧炉或感应炉冶炼，采用砂型、陶瓷型或熔模等各种铸造方

法直接铸造出的接近于成品形状的模具铸件。相同成分的材料直接铸造成模具可改善某些性能,降低成本,简化工艺,提高企业经济效益。

2) 铸造的锻模和热挤压模一般比采用锻轧工艺生产的模具具有更高的抗冷热疲劳裂纹的性能。由于铸造模具没有明显的组织方向性,不存在锻轧态模具钢的各向异性问题,因此在热处理过程中,变形也比较均匀,尺寸容易控制,加工余量较小。

3) 一般小型铸钢模具的热处理和普通模具钢热处理工艺相同。大型锻模、水压机砧模等大型、特大型模具零件,热处理一般为正火和回火。正常工艺为 $830 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 奥氏体化后空冷, $630 \sim 650^{\circ}\text{C}$ 回火。

2. 常用铸造模具用钢的热处理

(1) ZG4Cr13Ni 钢的热处理 (砂型铸造)

工艺 1: 铸造后立即在 700°C 回火 2 次,回火组织为铁素体和均匀分布的细粒状碳化物,硬度为 24HRC。

工艺 2: 将铸造模具加热至 1000°C 空冷淬火后,再在 700°C 回火 2 次,热处理后硬度为 25HRC,其碳化物分布较工艺 1 更加均匀。

(2) ZG4Cr3Mo2WV 钢的热处理 (陶瓷型精铸锻模用钢)

1) 预备热处理。预备热处理的目的是消除铸造、清理、切割浇口时产生的组织应力和热应力,使模具的组织及性能均匀,以减少模具最终热处理时发生的变形及开裂,也为了降低硬度,便于机械加工。

由于铸态组织中存在柱状晶组织及树枝偏析,铸态组织往往不均匀,冷却过程中产生的热应力也较大,所以铸造模具的退火温度比同一牌号的锻造模具退火温度要偏高 $30 \sim 50^{\circ}\text{C}$,而且升温较慢、时间偏长,以利于消除树枝偏析及应力,为最终热处理打下基础。

2) 淬火及回火。加热到 500°C 等温 $0.5 \sim 1\text{h}$,然后以 $50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速度加热到 $1050 \sim 1100^{\circ}\text{C}$,淬油冷却,硬度 $\geq 50\text{HRC}$ 。回火温度为 $570 \sim 650^{\circ}\text{C}$,硬度为 $45 \sim 50\text{HRC}$ 。

由于铸造模块应力较大,因此淬火时的加热速度应缓慢,加热时间稍长。

铸造模具浇注时,可能发生氧化、脱碳及组织不均匀,也可能产生疏松、裂纹等问题。因此热处理时应特别注意防止继续氧化、脱碳、热处理变形及开裂。

(3) ZGMn13 钢的热处理

ZGMn13 钢是一种高耐磨性钢,因其切削加工困难,多为铸造成形。ZGMn13 钢 $w_{\text{C}} = 1.0\% \sim 1.4\%$, $w_{\text{Mn}} = 10\% \sim 14\%$ 。碳含量高可以提高耐磨性;锰是扩大奥氏体相区的合金元素,锰含量很高,可以保证处理后得到单相的奥氏体组织。此外,锰与碳能形成碳化物 Mn_3C 或 $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$,在铸态组织中,有碳化物沿奥氏体晶界分布,使钢的力学性能变坏。为了提高钢的强度、韧性和耐磨性,消除晶界上的碳化物,必须对 ZG120Mn13 钢进行水韧处理。

1) 水韧处理。 $1050 \sim 1100^{\circ}\text{C}$ 加热,经水冷可得到均匀单一的奥氏体组织,硬度为 $180 \sim 220\text{HBW}$,塑性、韧性好。但受到强烈的冲击、很大的压力和剧烈的摩擦时,表面会因塑性变形而产生强烈的加工硬化,使表面硬度迅速升到 $500 \sim 600\text{HBW}$,从而极

大地提高其耐磨性。同时伴有马氏体产生及沿滑移面形成 ε 相,从而使表面层高度耐磨,而心部仍有很高的强韧性。

2) 细晶化处理。将铸件加热到 $1000 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 固溶处理后,再在 $500 \sim 700^{\circ}\text{C}$ 进行珠光体处理,最后在 $950 \sim 1100^{\circ}\text{C}$ 再进行固溶处理,从而使晶粒细化、提高其韧性及耐磨性。

3) 弥散处理。含有强碳化物形成元素的高锰钢,通过弥散处理,可获得奥氏体基体上弥散分布着第二相硬质点的组织,能阻碍位错运动,提高钢的加工硬化能力,进而提高钢的耐磨性。其工艺是 1100°C 水韧处理后, $460 \sim 480^{\circ}\text{C}$ 时效 $4 \sim 6\text{h}$,再加热至 850°C 保温 $3 \sim 6\text{h}$ 水冷淬火。这种方法能有效地使晶粒内的弥散碳化物析出,可大大提高钢的耐磨性。

(4) ZG4Cr3Mo2WV 铸造锻模的热处理

ZG4Cr3Mo2WV 铸造锻模在加热时碳化物稳定,具有较高的热硬性、耐磨性,并且有相当高的断裂韧度和高温冲击吸收能量。

1) 常规热处理。加热温度为 1080°C ,油冷,回火温度为 700°C 。回火后硬度为 43HRC。处理后汽车前梁锻模变形大,硬度高,加工困难。

2) 铸态直接高温回火。在铸态 700°C 时,直接高温回火,硬度为 32HRC,减少了变形,而且获得高的综合性能。

8.7.3 锌合金模具材料及热处理

锌合金是为了克服低熔点合金所存在的硬度低、强度低、使用寿命低的缺点而发展起来的。锌合金多用于冲模,如拉深模、修边模、弯曲模,也用于吹塑模和注射模的型腔或大型注射模模体的组合件,以及其他简易模具。

1. 锌合金模具材料的特点

1) 锌合金模具材料是无铋的中熔点合金材料,性能比低熔点的铋锡合金明显提高。按成分可分为锌铝共晶合金、锌铝共析合金和其他成分的锌铝合金三种。

2) 锌合金模具材料主要是锌、铝、铜合金,它的熔点低(约为 300°C),有很好的铸造性能,强度、硬度接近于低碳钢,具有耐压、耐磨和自润滑性能。

3) 锌合金模具和锌合金超塑成形所需设备能量低、模具寿命长、材料利用率高($90\% \sim 95\%$)和成本低,模具型腔精度高,属于少无切削加工的新技术。

4) 有良好的重熔和重铸性,可反复使用,且性能变化不大。具有铝合金的易切削性、易机械加工性,价格比低熔点合金便宜,原料来源方便。

5) 硬度、耐磨性比钢模低,有一定的收缩性和不稳定性,所以不适宜制造高精度及大型的成形模具。

2. 锌合金的超细化处理

锌合金的超细化处理就是使它的正常组织($\alpha + \beta$ 相)的晶粒尺寸达到微细化,然后在超塑温度下以超塑变形速度变形,可获得 $2000\% \sim 3000\%$ 的伸长率。

(1) 超细化处理工艺流程

按质量配制合金→熔炼→水冷铜模浇注→均匀化退火→轧制或热处理超细化处理。

处理后锌铝共晶合金具有很好的超塑性。

(2) 超细化处理工艺实例

1) ZnAl22 超细化处理工艺：加热至 360℃ 保温 1h 后盐水冷，然后 250℃ 保温 0.5h 后空冷。

2) ZnAl4-1 超细化处理工艺：加热至 $(310 \pm 10)^\circ\text{C}$ ，保温 7h 后空冷。

8.7.4 铜合金模具材料及热处理

1. 铜合金的性能及类型

铜合金具有良好的力学性能、减摩性能、耐蚀性、导热性、尺寸稳定性，并易于加工，适用于钢铁压铸模、不锈钢拉深模等模具。目前主要应用的有铜铍合金、铜钴铍合金、铜铬锆钒合金和铜铬锆镁合金。铜铍合金常用来制造锌合金压铸模和塑料模等，铜钴铍合金多用于制造形状简单而尺寸较大的压铸模，铜铬锆钒合金和铜铬锆镁合金多用于制造小型压铸模。

2. 铜合金的热处理

铜合金的热处理工艺规范见表 8-61。

表 8-61 铜合金的热处理工艺规范

合金种类	化学成分（质量分数，%）	热处理工艺规范	抗拉强度 /MPa
铜铍合金	Be: 2.50 ~ 2.70, Co: 0.35 ~ 0.65, Si: 0.25 ~ 0.35, 余量为 Cu	粗加工后进行 $800^\circ\text{C} \times 2 \sim 3\text{h}$ 加热保温并急冷（水冷）的固溶处理，精加工后进行 $315^\circ\text{C} \times 2 \sim 3\text{h}$ 时效处理，出炉空冷	—
铜钴铍合金	CuBe: 2, Co: 0.5 ~ 1	$700 \sim 800^\circ\text{C}$ 固溶 + $350 \sim 400^\circ\text{C}$ 时效	985
	Be: 0.5 ~ 1, Co: 2 ~ 3, 余量为 Cu	$900 \sim 1000^\circ\text{C}$ 固溶 + $470 \sim 490^\circ\text{C}$ 时效	755
铜铬锆钒合金	Cr: 0.5 ~ 0.8, Zr: 0.2 ~ 0.5, V: 0.2 ~ 0.6, 余量为 Cu	980°C 水冷固溶 + 480°C 时效	—
铜铬锆镁合金	Cr: 0.25 ~ 0.6, Zr: 0.11 ~ 0.25, Mg: 0.03 ~ 0.1, 余量为 Cu	$960 \sim 980^\circ\text{C}$ 水冷固溶 + $430 \sim 480^\circ\text{C}$ 时效	—

8.7.5 铝合金模具材料及热处理

1. 铝合金的性能及类型

纯铝的强度很低，不适宜制作承受载荷的结构和零件，为提高强度，在铝中加入适量的铜、镁、硅等合金元素形成铝合金。这些铝合金具有密度小、耐腐蚀性好、导热性好及易机械加工的特点。经适当的热处理后可达 400 ~ 700MPa 的高强度，与低合金钢的强度相当。因此在模具制造行业得到了广泛应用。

铝合金按其成分和工艺特点可分成变形铝合金和铸造铝合金两大类。其中变形铝合金中的锻造铝合金，以及铸造铝合金材料可以制造注射模、吹塑模等模具。

2. 铝合金的热处理

(1) 固溶处理

铝合金加热到 α 相区, 保温一定时间后在水中快冷, 得到单相过饱和固溶体组织, 这种热处理称为固溶处理 (或称为淬火), 铝合金淬火后, 强度和硬度并不立即升高, 而塑性有所上升。淬火后的铝合金在一定温度下保持足够时间其强度和硬度随时间延长显著提高, 而塑性明显降低, 此工艺称为时效。

(2) 回归处理

将已经时效强化的铝合金, 重新加热到稍高于时效温度 ($200 \sim 270^{\circ}\text{C}$) 经短时间保温, 使强化相重新溶入固溶体中, 然后在水中急冷, 使合金恢复到淬火状态, 称为回归处理。主要是便于对已发生变形的模具进行修复。

8.7.6 钢结硬质合金的热处理

钢结硬质合金的基体是钢, 所以钢结硬质合金的热处理与合金工具钢基本相同。钢结硬质合金出厂前要先进行球化退火, 锻造成毛坯后也要进行球化退火。其目的是为了降低硬度, 改善机械加工性能, 并为后续工序和淬火、回火强化提供有利条件。

1. 钢结硬质合金的热处理工艺

(1) 预备热处理

1) 钢结硬质合金锻造后进行球化退火, 必须在真空炉或有保护气氛的热处理炉内进行, 以防止氧化、脱碳, 如果没有保护气氛炉, 而在箱式电阻炉内进行, 则应采用装箱法, 箱内填充良好的保护剂。

2) 等温球化退火的加热温度不宜过高, 保温时间不宜过长, 以防止碳化物聚集粗化并稳定化, 给最终热处理带来困难。关键是延长等温时间使过冷奥氏体充分分解, 获得弥散度高的索氏体组织。

3) 基本工艺是缓慢加热到 $820 \sim 880^{\circ}\text{C}$, 保温足够时间 (一般为 4h) 炉冷到 730°C 左右, 保温 6h, 炉冷至 500°C 以下时可出炉空冷。退火后的组织为硬质相 + 点状珠光体 + 合金碳化物, 退火后硬度约为 40HRC。常用钢结硬质合金的退火工艺规范见表 8-62。

表 8-62 常用钢结硬质合金的退火工艺规范

牌号	加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	等温温度/ $^{\circ}\text{C}$	退火硬度 HRC
TLMW35	860 ~ 880	720 ~ 740	32 ~ 38
TLMW50	860 ~ 880	720 ~ 740	35 ~ 40
GW50	860	700	35 ~ 42
GJW50	840 ~ 850	720 ~ 730	35 ~ 38
GT35	860 ~ 880	720	39 ~ 46
R5	820 ~ 840	720 ~ 740	44 ~ 48
T1	820 ~ 840	720 ~ 740	44 ~ 48

(2) 淬火及回火

1) 钢结硬质合金的导热性较差, 淬火加热必须经过预热, 较大的工件要采取两段

预热。钢结硬质合金中的碳化物对奥氏体晶粒长大能起到阻碍作用。粘结相（钢基体）中的合金碳化物溶解于奥氏体后，阻碍铁和碳原子的扩散，也对奥氏体晶粒长大起抑制作用，因此钢结硬质合金淬火加热时过热倾向比合金工具钢小，淬火加热温度范围宽。

2) 为使奥氏体化过程充分进行，淬火加热温度可以高一些，保温时间可以长一些。尤其是制造冷作模具工作零件时，高温和充分保温可以使合金元素和碳化物充分溶解于奥氏体，提高淬火马氏体的合金化程度，提高耐回火性。对于 WC 型钢结硬质合金，淬火温度通常为 1020 ~ 1050℃；对于 TiC 型钢结硬质合金，淬火温度通常取 960 ~ 980℃；以高速工具钢为粘结相的 G 型钢结硬质合金，淬火温度通常为 1200 ~ 1280℃。

3) 钢结硬质合金在盐浴炉中的加热保温时间一般选取 0.5 ~ 1min/mm，在箱式炉中的加热保温时间加倍，且必须采取措施防止氧化和脱碳。淬火方法一般采取热油或分级淬火，对于形状复杂或截面尺寸变化较大的模具，为了减少热应力和相变应力，宜采用等温淬火，可以避免开裂和减少变形。

4) 钢结硬质合金模具淬火后应尽快进行回火，特别是大型复杂件，以消除应力，防止开裂，同时回火也是为了调整组织得到需要的力学性能。回火温度通常取 180 ~ 200℃，保温时间取 1.0 ~ 1.5h。

5) 要求较高韧性时，采用较高温度如 500 ~ 650℃回火时，由于有合金碳化物弥散析出和残留奥氏体的转变，会出现二次硬化现象。但在高温回火时，有大量碳化物析出并发生连接现象而使冲击韧度降低，这是钢结硬质合金有别于合金工具钢的重要性能差异，因此回火温度切忌过高。

(3) 常用钢结硬质合金的热处理工艺规范（表 8-63）

表 8-63 常用钢结硬质合金的热处理工艺规范

牌号	淬火加热温度/℃	淬火硬度 HRC	回火温度/℃	回火硬度 HRC
TLMW35	1020 ~ 1050	68	180 ~ 200	64 ~ 66
TLMW50	1020 ~ 1050	68 ~ 70	200 500	66 ~ 68 63 ~ 64
GW50	1050 ~ 1100	68 ~ 72	—	68 ~ 70
GJW50	1020	70	180 ~ 200	67
GT35	960 ~ 980	69 ~ 72	180 ~ 200 400 ~ 500	67 ~ 71 61 ~ 64
R5	1000 ~ 1050	70 ~ 73	200 450 ~ 500	68 ~ 69 67 ~ 70
T1	1240	68 ~ 72	500℃加热回火三次	70 ~ 72
D1	1220 ~ 1240	69 ~ 73	500℃加热回火三次	66 ~ 69

(4) 钢结硬质合金热处理应用实例

1) GW50 钢结硬质合金制拉深模盐浴淬火工艺。

① 退火工艺。在箱式电阻炉中进行,应用木炭进行加热保护,并予以密封防止氧化。 $860^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$,以 $<10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的冷却速度炉冷至 680°C ,保温 5h,炉冷至 200°C 出炉空冷。硬度为 38~41HRC。金相组织为索氏体基体 + 弥散分布的 WC 硬化相 + 复杂的合金碳化物。

② 淬火、回火工艺如图 8-21 所示。

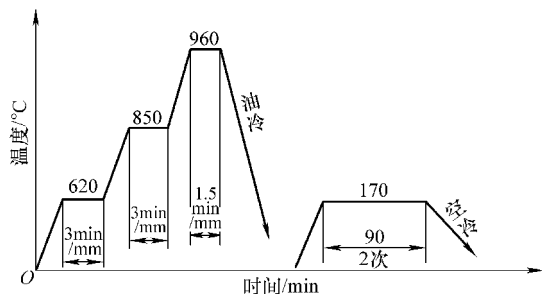


图 8-21 GW50 钢结硬质合金制拉深模盐浴淬火、回火工艺

2) GT35 钢结硬质合金制电动机转子单槽冲模预冷淬火工艺。

① 模具技术要求。键槽直角处应用圆角过渡,切忌用直角;孔和键槽用石棉绳堵塞,淬火后应及时回火。

② 去应力退火。在空气炉中加热,并加入保护剂, $550 \sim 600^{\circ}\text{C} \times 4\text{min}/\text{mm}$,炉冷至 200°C 出炉空冷。

③ 淬火、回火工艺。 600°C 、 840°C 两次盐浴预热,加热系数按 $2\text{min}/\text{mm}$ 计, $960 \sim 970^{\circ}\text{C} \times 1\text{min}/\text{mm}$ 加热,保温,按 $1\text{s}/2 \sim 4\text{mm}$ 预冷至 900°C ,淬油(油温控制在 $60 \sim 90^{\circ}\text{C}$),油冷至 120°C 左右出油空冷。 $160^{\circ}\text{C} \times 2\text{h} \times 2$ 回火,硬度为 67~70HRC。

2. DT 大负荷碳化钨钢结硬质合金及其热处理

我国研制的大负荷碳化钨钢结硬质合金 DT 合金(WC 的质量分数为 40%),其特点是在保持足够的硬度、耐磨性的基础上,大幅度提高了强度和韧性,在急冷急热的交变冲击下有极好的抗热裂能力。合金组织中,硬质颗粒尺寸细小、均匀、弥散分布,DT 合金中尺寸小于 $2\mu\text{m}$ 的小颗粒碳化物约占碳化物总数的 50%,小于 $5\mu\text{m}$ 的约占总数的 80%。

(1) 预备热处理

等温球化退火工艺:加热温度为 $860 \sim 880^{\circ}\text{C}$,保温 2~3h,炉冷至 $700 \sim 720^{\circ}\text{C}$,等温 6h 后,炉冷到 500°C 以下出炉空冷。硬度为 32~36HRC。退火后组织为粒状珠光体 + 弥散碳化物。

(2) 淬火及回火

1) 加热淬火前应进行一段预热(大型复杂模具应二段预热),预热温度为 $800 \sim 850^{\circ}\text{C}$,保温系数为 $2\text{min}/\text{mm}$,淬火温度为 $1000 \sim 1020^{\circ}\text{C}$,保温时间按 $1\text{min}/\text{mm}$ 计算,油冷,根据模具使用要求采取 $200 \sim 650^{\circ}\text{C}$ 回火,保温 2h。DT 合金在 600°C 回火时,有高温回火脆性,应予以注意。

2) 为了防止 DT 合金模具变形可采用 $200 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 等温淬火工艺。

第 9 章 模具表面强化技术

模具在使用过程中承受着各种形式的复杂应力，其表面更是处于较大的应力状态下，服役条件非常恶劣，模具的失效和损坏往往发生在模具的表面，因此模具的表面性能直接关系到模具的使用寿命。合理地选用模具材料并采用正确的热处理工艺，可以改善模具表面的使用性能，大幅度提高模具的使用寿命。但是，其耐久性和表面耐磨性仍难以满足日益提高的性能要求。

表面强化技术不仅能达到模具的表面高精度、高硬度、高耐磨性要求，而且能使模具保持足够的韧性。这对发挥模具材料的潜力，改善模具的综合性能，降低模具制造成本是十分有利的。生产实践表明：表面强化技术是提高模具质量、延长模具使用寿命的重要手段，是提高模具表面耐磨性、抗冲击性、抗咬合性、抗冷热疲劳性、抗热粘附性及耐蚀性等综合性能的重要措施。

模具表面强化处理按其原理可分为化学热处理、表面涂覆热处理和表面加工强化处理。根据国家自然科学基金委员会的《金属材料科学》将表面工程技术分成三类，即表面改性、表面处理和表面涂覆。模具表面强化的方法见表 9-1。

表 9-1 模具表面强化的方法

改变表面化学成分	改变表面性能	表面涂覆
1) 渗碳 2) 渗氮 3) 渗硼 4) 渗硫 5) 渗金属 6) 复合渗（多元共渗） 7) TD 法 8) 离子注入等	1) 高频感应淬火 2) 火焰淬火 3) 激光淬火 4) 电子束相变硬化 5) 加工硬化（如喷丸硬化等） 6) 电解液淬火	1) 镀金属 2) 离子镀 3) 堆焊 4) 电火花强化 5) 化学气相沉积（CVD） 6) 物理气相沉积（PVD）

随着表面强化技术的发展，又出现了运用上述三类技术的复合表面工程技术和纳米表面工程技术，分类越来越细。目前常用的表面技术有：堆焊技术、熔结技术（低真空熔结、激光熔覆等）、电镀技术、电刷镀技术、化学镀技术、非金属镀技术、热喷涂技术（火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂、爆炸喷涂、超声速喷涂、低压等离子喷涂等）、化学热处理、激光相变硬化、激光非晶化、激光合金化、电子束相变硬化和等离子注入等。

9.1 模具的化学热处理

化学热处理是指将金属或合金工件置于特定的活性介质中，加热到适当温度并进行

保温,使一种或几种元素的原子被模具表面吸收,并向内部扩散,从而使模具在一定深度的表层发生化学成分改变和组织变化的热处理技术。

根据渗入元素的不同,模具钢的化学热处理可分为渗碳、渗氮、碳氮共渗、氮碳共渗、渗硫、硫氮共渗、渗硼、碳氮硼三元共渗、硫氮碳三元共渗、渗金属(渗铝、渗铬、渗钒、渗锌或多元金属共渗)等。它们对提高模具的性能有一定的作用。常用化学热处理方法及其作用见表9-2。

表9-2 常用化学热处理方法及其作用

名称	渗入元素	作 用
渗碳	C	提高模具的耐磨性、硬度及疲劳强度
渗氮	N	提高模具的耐磨性、硬度、疲劳强度及耐蚀性
碳氮(氮碳)共渗	C、N	提高模具的耐磨性、硬度及疲劳强度
渗硫	S	减摩,提高抗咬合性能
硫氮共渗	S、N	减摩,提高抗咬合性能、耐磨性和改善疲劳性能
硫氮碳三元共渗	S、C、N	减摩,提高抗咬合性能、耐磨性和改善疲劳性能
渗铝	Al	提高模具抗氧化及抗含硫介质腐蚀的能力
渗铬	Cr	提高模具抗氧化能力及耐蚀性和耐磨性
渗硼	B	提高模具耐磨性、硬度及耐蚀性
渗硅	Si	提高工件耐蚀性
渗锌	Zn	提高工件抗大气腐蚀的能力

化学热处理可以大幅度、多方面提高模具性能,延长使用寿命,因此具有极大的经济价值,所以化学热处理技术在国内外受到了普遍的重视。特别是近年来在化学热处理工艺中引入了感应加热、真空技术、离子技术、气相沉积等先进技术,以及从渗入单一元素发展到同时渗入多种元素的复渗,对渗层碳氮浓度的自动调节控制等。目前化学热处理工艺正向着高质量、高速度、无公害、机械化和自动化方向发展。

9.1.1 模具零件的渗碳

渗碳是将低碳钢或低碳合金钢模具在增碳的活性介质(渗碳剂)中加热并保温,使活性碳原子渗入工件表面,并获得高碳渗层的化学热处理工艺。

(1) 渗碳的目的

渗碳主要是为了增加工件表层的含碳量和一定的碳浓度梯度,渗碳后淬火并低温回火,可以获得很高的表面硬度、耐磨性、接触疲劳强度和弯曲疲劳强度,而心部仍保持低碳,具有良好的塑性和韧性。因此,渗碳后工件表层与心部具有不同成分、组织和性能。从而使模具零件既能承受磨损较高的表面接触应力,又能承受弯曲应力及冲击载荷的作用,为目前模具制造中应用最广泛的一种表面强化工艺。

(2) 工艺参数

主要工艺参数是渗碳温度、保温时间、渗碳气氛碳势和钢的化学成分等。

1) 渗碳温度。渗碳温度升高,铁原子的自扩散加剧,使钢的表面脱位原子和空位数量增加,有利于碳的吸收和扩散,使渗碳速度加快,因而获得一定渗碳层厚度所用的时间缩短。当温度超过一定值时,碳的扩散速度将大于在工件表面的吸收速度,这时渗碳层表面的碳浓度就要下降。渗碳温度过高会造成钢的晶粒长大、工件畸变增加、设备寿命降低等负面效应。

2) 保温时间。渗碳层的厚度主要取决于渗碳温度和保温时间。随着时间的延长,渗碳层的厚度增加,渗碳速度逐渐降低。

3) 渗碳气氛碳势。对于一定成分的钢,其表层中的碳浓度与渗碳温度和渗碳剂的成分有关,渗碳剂活性强,表层中碳浓度下降的极限温度越高。因此,在较高温度下渗碳时,为了保证表层碳浓度不致下降,必须采用活性较大的渗碳剂,或增加渗碳剂的供给量。

4) 钢的化学成分。工件中所有合金元素对渗碳层内碳的浓度、渗碳层的厚度、渗碳层的淬硬深度、表面硬度、渗层组织、渗层和工件心部的晶粒度等都有一定的影响。凡是能形成碳化物的元素,如铬、钨、钼等,都能增加渗碳层的含碳量;不能形成碳化物的元素,如镍等元素,将使渗碳层的含碳量减少。

(3) 渗碳方法。

根据渗碳介质状态不同,渗碳可分为固体渗碳、液体渗碳和气体渗碳,近期又发展了真空渗碳、可控气氛渗碳、离子渗碳等。

1. 气体渗碳

气体渗碳是将工件置于含有气体渗碳介质(渗碳剂)的密封高温炉罐中,渗碳剂裂化分解,产生活性碳原子并渗入工件表面的化学热处理工艺。气体渗碳生产率高,劳动条件好,渗碳过程易于控制,渗层质量好,适于大批量生产,应用最广。

(1) 气体渗碳的基本过程

无论用何种渗碳介质进行渗碳,它们都有分解、吸收、扩散三个基本过程。

1) 渗碳介质的分解过程。分解就是活性介质在一定温度下,进行化学分解,析出活性原子(或离子)的过程。在气体渗碳时,煤油在高温热分解时产生甲烷(CH_4),在钢件的表面按如下反应分解出活性碳原子 $[\text{C}]$ 。



化学介质分解的速度取决于化学介质的性质、数量、分解的温度、压力以及有无催化剂等。

2) 活性碳原子被金属表面吸收的过程。吸收就是活性原子(或离子)与金属原子产生键合而进入金属表层的过程。吸收的方式可以是活性原子向钢的固溶体中溶解或形成化合物。渗碳时,渗碳介质所分解的活性碳原子吸附在钢件表面后,溶于奥氏体中并形成间隙固溶体。当碳浓度超过该温度下奥氏体饱和浓度时可形成金属化合物(碳化物)。

吸收的强弱与活性介质的分解速度、渗入元素的性质、扩散速度、钢件的成分及其表面状态有关。

3) 渗入元素的扩散过程。扩散就是被钢件表面所吸收的活性原子（或离子）向钢件深处迁移，以形成一定厚度的扩散层（即渗层）。

分解、吸收、扩散是各种化学热处理所共有的基本过程，同样适用于其他化学热处理，例如渗氮、碳氮共渗、渗金属等。

(2) 气体渗碳的工艺参数

主要工艺参数为渗碳温度、保温时间、炉气换气次数和碳势选定与控制等。

1) 渗碳温度。气体渗碳温度一般为 880 ~ 930℃。较低的渗碳温度有利于减少渗碳工件变形和渗碳深度与渗碳浓度控制；较高的渗碳温度，可以加快渗碳速度，缩短渗碳周期，节约能源。但渗碳温度过高容易使碳化物呈网状，并使晶粒长大，降低力学性能。

2) 保温时间。气体渗碳保温时间主要取决于渗碳温度和要求渗碳层的厚度。当温度一定时，渗层深度 δ 与保温时间 t 的平方根成正比，即

$$\delta = K \sqrt{Dt}$$

式中 D ——扩散系数；

K ——常数，均须由试验确定。

计算出的渗碳时间只能供操作参考。在渗碳时，应随工件装入若干试样，定时抽取试样检测渗碳层深度和渗层的碳质量分数，并与技术要求指标进行比较，以确定出炉时间。

3) 炉气换气次数。炉内渗碳气氛要不断更换，以保持炉气的活性。换气次数等于单位时间送入炉内渗碳气体的量除以炉膛的容积。换气次数多，炉气活性大，但是渗碳剂量和电耗增大。通常炉气的换气次数 ≥ 2 ，同时要保证炉内气压为正压，以防止炉外空气窜入炉内，破坏渗碳气氛。

4) 碳势选定与控制。渗碳过程中，炉气碳势高，则渗碳工件表面碳的质量分数高，碳浓度梯度大，因而可以提高渗碳速度。但是，过高的碳势会导致在渗层出现网状碳化物，使渗层的脆性增大。为此，在渗碳工艺上采用分段控制碳势的工艺方法。将渗碳时间分为两段：第一阶段采用较高的碳势进行强渗，称为强渗期；第二阶段采用较低的碳势，以降低渗层表面含碳量并增加渗层深度，称为扩散期。

(3) 气体渗碳的工艺过程

气体渗碳时，将工件装挂在密闭的井式渗碳炉中，如图 9-1 所示。滴入易于热分解和汽化的液体（如煤油、丙酮等），加热到 900 ~ 950℃，按 0.15 ~ 0.30mm/h 估算保温时间，渗碳剂在高温下分解产生活性碳原子，活性碳原子被工件的表面吸收，并向心部扩散，形成一定深度的渗碳层。渗碳层的深度根据零件尺寸及工作性能要求而定，通过控制保温的时间来达到，一般为 0.5 ~ 2.5mm。

渗碳工艺过程一般由排气、强烈渗碳、扩散及降温 4 个阶段组成，如图 9-2 所示。

1) 排气。模具零件入炉后必将引起炉温降低，同时带入大量空气。排气阶段的作

用在于恢复炉温到规定的渗碳温度。在此阶段应尽快排除炉内空气,通常采取加大渗碳剂流量的措施以使炉内氧化性气氛迅速减少。在仪表温度达到渗碳要求的温度后排气往往尚需延长 30~60min,以使炉内成分达到要求,并使炉内温度均匀及工件烧透,排气不好会造成渗碳速度减慢或质量不合格等缺陷。

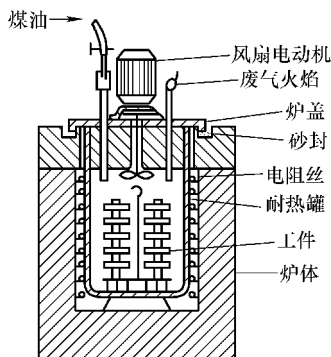


图 9-1 气体渗碳示意图

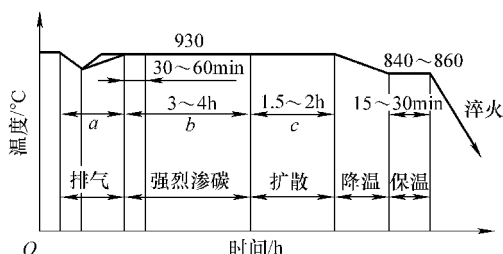


图 9-2 井式气体渗碳工艺

2) 强烈渗碳。排气阶段结束后,即进入强烈渗碳阶段。其特点是渗碳剂滴量较多或气氛较浓,使工件表面的碳浓度高于最后要求,增大表面的碳浓度梯度以提高渗碳速度。强烈渗碳时间主要取决于模具钢渗碳层的要求。

3) 扩散。渗碳进入扩散阶段是以减少渗碳剂滴量或浓度为标志的。此时炉气渗碳能力降低,表层过剩的碳继续向内部扩散,最后得到要求的深度及合适的碳浓度分布。扩散阶段所需时间由中间试棒的渗碳层深度确定。

4) 降温。渗碳后的冷却,对于可直接淬火的零件应随炉冷至适宜的淬火温度(一般在 840~860℃),并保温 15~30min 使零件内外温度均匀后出炉淬火。对于需要重新加热淬火的模具零件,可自渗碳温度出炉放入缓冷罐中。

(4) 气体渗碳的操作要点

1) 为了保证渗碳质量,模具零件在进入渗碳炉前应清除表面污垢、铁锈及油脂等。常用热水或含 Na_2CO_3 的水溶液清洗,锈蚀工件可采用喷砂清理。

2) 工件应装在料筐或挂具上,彼此间应留出 5~10mm 的间隙,以保证渗碳介质能与零件充分接触和循环流通。

3) 渗碳炉密封性要好,并始终保持炉内气氛为正压力[一般为 20~60mm 水柱高 ($1\text{mmH}_2\text{O} = 9.80665\text{Pa}$)]；风扇应始终运转,以使工件能经常与新鲜气氛接触；排气口要点燃,以免废气污染空气,并便于观察判断炉内工作情况。有条件的,应经常进行炉气分析。根据生产实践,用煤油渗碳时,炉内气氛成分(体积分数)控制在下列范围： $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ 1.0%~1.5%, $\text{C}_n\text{H}_{2n} \leq 0.6\%$, $\text{CO} 20\% \sim 35\%$, $\text{H}_2 50\% \sim 65\%$, $\text{CO}_2 \leq 0.5\%$, $\text{O}_2 \leq 0.5\%$, N_2 余量。

4) 零件出炉时间根据随炉试样的层深检查结果决定。试样材料应与零件相同。不同钢种或层深不宜同炉渗碳,另外对于新渗罐、新的工夹具或未使用过的炉罐应预先渗

碳。在正常生产情况下，停炉再升温时也应进行炉腔渗碳。

5) 渗碳件通常为 $w_c = 0.15\% \sim 0.20\%$ 的低碳钢或合金渗碳钢，渗碳后表层的 w_c 可达 $0.85\% \sim 1.05\%$ 。渗碳层由表层向心部依次为过共析层、共析层、亚共析过渡层和心部原始组织。

(5) 气体渗碳后的热处理

渗碳只能改变模具零件表面的化学成分，而零件表面的最终强化则必须经过适当的热处理才能实现，通过热处理使零件的高碳表层获得细小的马氏体、适量的残留奥氏体和弥散分布的粒状碳化物；而零件的心部由低碳马氏体、托氏体、索氏体等组织所组成。渗碳后可采用不同的热处理方法，如直接淬火、一次淬火、两次淬火等。

1) 直接淬火。直接淬火是指工件渗碳后随炉降温或出炉预冷到高于 A_{r1} 或 A_{r3} 温度 ($760 \sim 850^\circ\text{C}$) 然后直接淬火 (油)，淬火后在 $150 \sim 200^\circ\text{C}$ 回火 $2 \sim 3\text{h}$ 。

随炉降温或出炉预冷的目的是为了减少淬火内应力，从而减小工件的变形。同时，还使高碳的奥氏体中析出一部分碳化物，降低奥氏体中的碳浓度，从而减少淬火后的残留奥氏体，获得较高的表面硬度。

直接淬火的优点是：减少加热和冷却的次数，使操作简化，生产率高，还可以降低淬火变形及表面氧化、脱碳倾向。直接淬火适用于 20CrMnTi 等本质细晶粒钢。不适用于本质粗晶粒钢及渗碳时表面碳浓度高的零件。

2) 一次淬火。模具零件渗碳后立即出炉或降温到 $860 \sim 880^\circ\text{C}$ 出炉，在冷却坑内冷却至室温，然后再重新加热淬火。适宜于本质粗晶粒钢零件和不宜直接淬火的零件。

3) 两次淬火。对于本质粗晶粒钢或使用性能要求很高的零件，要采用两次淬火，或一次正火加一次淬火，以保证模具零件心部和渗层都达到高的性能要求。第一次淬火 (或正火) 温度碳素钢为 $880 \sim 900^\circ\text{C}$ ，合金钢为 $850 \sim 870^\circ\text{C}$ ，目的是细化心部组织，并消除表面网状碳化物。第二次淬火温度则根据高碳的表层来决定，一般选择在稍高于 A_{c1} 的温度。

两次淬火有可能出现较大的淬火缺陷，工艺较复杂，生产周期长，故仅用于表面耐磨性和疲劳强度及心部韧性等要求较高的重载荷零件。

2. 离子渗碳

(1) 离子渗碳的工艺原理

离子渗碳是在压力低于 10^5Pa 的渗碳气氛中，利用阴极 (工件) 和阳极间产生的辉光放电进行渗碳的工艺。当阴极 (工件) 与阳极 (炉体) 之间加上高压直流电时，炉体内的低压渗碳气体在高压电场的作用下发生电离，成为带正电的 C^+ 离子、 H^+ 离子和电子。阳离子在高压电场的作用下定向移动，以极快的速度轰击阴极，并吸附于工件表面，且在工件表面发生一系列的物理化学反应，形成渗层。

(2) 离子渗碳的工艺参数

离子渗碳是属于等离子体化学热处理范畴的技术。其渗碳介质为甲烷、丙烷等，渗碳温度为 $900 \sim 960^\circ\text{C}$ (采用炉内电阻辐射加热方式)。例如， 15CrNi6 钢制塑料模具在 950°C 进行离子渗碳，渗碳过程时间为 90min ，扩散过程为 210min ，淬火后可得到

1.4mm 厚的渗碳层, 表面硬度可达 64HRC。

(3) 离子渗碳的特点

离子渗碳具有高浓度渗碳和深渗层渗碳以及对于不锈钢等难渗件进行渗碳的能力, 渗碳速度快; 渗层碳浓度和深度容易控制, 渗层致密性好, 无晶界氧化, 表面清洁光亮, 畸变小; 处理后的工件耐磨性与疲劳强度比常规渗碳工艺高, 环境污染小, 夹缝和小孔都能处理。目前离子渗碳在塑料模和冲模中应用较多。

3. 真空渗碳

将处理的工件在真空中加热到奥氏体化, 并在渗碳气氛中渗碳, 然后扩散, 淬火。其渗碳基本过程由分解、吸收和扩散三个阶段组成。

(1) 真空渗碳的特点

真空渗碳是在高温渗碳的基础上发展起来的。由于渗碳前在真空中加热, 因此钢材表面很干净, 非常有利于碳原子的吸附和扩散。与气体渗碳相比, 具有工艺周期短、气体消费量小、渗层质量好、工件变形小、对环境污染小、自动化程度高、劳动条件好等优点。

(2) 工艺参数的选择

主要工艺参数有渗碳温度、真空度、渗碳时间、扩散时间及周期数等。

1) 渗碳温度。真空渗碳温度可以较高, 一般为 $900 \sim 1100^{\circ}\text{C}$, 因为真空加热可以不考虑工件的氧化问题, 以提高渗碳速度, 缩短渗碳时间。适用于外形简单、要求渗层较深, 且变形量要求不严的场合。若工件外形复杂, 有变形要求、渗层深度要求、渗层均匀性要求的渗碳, 则采用较低的渗碳温度。

2) 真空度。真空度的选择包括起始真空度、渗碳时炉内气氛真空度、扩散阶段真空度等。装炉后, 宜采用较高的真空度 ($1.33 \sim 0.33\text{Pa}$), 防止工件加热氧化并活化工件表面; 扩散阶段通常为 133Pa , 其目的是排除炉内渗碳气氛, 降低碳势, 借助碳原子由渗层表面向内的扩散, 降低渗碳层浓度梯度, 增大渗碳层厚度。

3) 渗碳时间。渗碳时间取决于渗碳温度和要求的渗碳深度。渗碳时间与扩散时间之比称为渗扩比, 是调整渗碳层的碳浓度和碳浓度梯度的主要工艺参数。在炉气真空度一定的条件下, 渗扩比大, 则渗碳层的碳浓度高, 碳浓度梯度大, 渗层不均匀, 但渗碳速度快。

(3) 真空渗碳工艺的应用

真空渗碳主要用于承受很大冲击载荷、要求高强度的模具和小型冷作模具及冷挤压成形的各类塑料模具, 其使用硬度一般为 $58 \sim 62\text{HRC}$ 。

实例 基体钢 65Nb 钢制连杆挤压模的真空渗碳。

1) 工艺目的。基体钢 65Nb 钢强韧性好, 但耐磨性差, 渗碳可使基体钢在保持高强韧性的同时具有高的耐磨性, 是提高基体钢模具寿命的重要手段之一。

2) 技术要求。根据模具承受冲击力的大小, 选择渗碳层的碳质量分数为 $0.95\% \sim 1.6\%$; 不允许存在网状和块状碳化物; 渗碳层厚度为 0.6mm 左右; 渗碳设备为内热式小型真空渗碳炉。

3) 工艺要点。渗碳介质采用体积分数为 70% 的甲烷, 加入体积分数为 30% 的 H_2 作为稀释气; 起始真空度高, 其值通常为 1.33Pa, 有利于防止工件氧化和较快提高炉气碳势; 炉内通入介质后其真空度下降, 则炉气碳势高, 故应确定强渗期炉内真空度大小, 通常为 $(2.7 \sim 4) \times 10^4 Pa$; 低浓度渗碳 (渗碳层碳质量分数 $\leq 0.95\%$) 时, 渗扩比为 1:4 ~ 1:5, 中浓度渗碳渗扩比为 1:2 ~ 1:3。

65Nb 钢 (基体钢) 渗碳时, 一般不会产生晶粒粗化, 因此, 常采用渗碳后直接淬火的工艺, 为获得钢的热硬性, 宜采用常规温度淬火、回火和回火次数, 如图 9-3 所示。

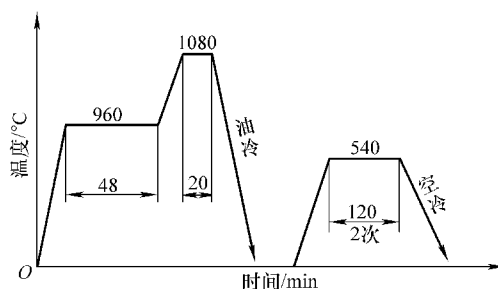


图 9-3 65Nb 钢制连杆挤压模真空渗碳工艺

4. 碳氮共渗

碳氮共渗是在模具零件表层同时渗入碳、氮的热处理过程。与单一渗碳相比, 碳氮共渗有许多特点, 如碳氮共渗温度较渗碳温度低, 因而共渗过程中奥氏体晶粒较细小, 共渗后一般可直接淬火。因此简化了生产工序, 节约能源, 并减少了模具零件的变形。

(1) 碳氮共渗的分类

1) 碳氮共渗根据使用介质的物理状况不同, 可以分为气体碳氮共渗, 液体碳氮共渗、固体碳氮共渗三类。

2) 根据共渗温度的不同, 又可分为低温 (500 ~ 600℃)、中温 (700 ~ 800℃) 和高温 (900 ~ 950℃) 碳氮共渗三种。其中低温碳氮共渗即目前广泛应用的氮碳共渗 (软氮化) 法, 其表层主要以渗氮为主, 用以提高模具零件的表面耐磨性和抗咬合性; 中温碳氮共渗, 其目的与渗碳相似, 主要是提高模具零件的表面硬度, 它与渗碳相比, 将使零件具有更好的耐磨性和抗疲劳性能; 高温碳氮共渗, 以渗碳为主。在我国热处理厂家中以中温气体碳氮共渗和氮碳共渗应用较广。

(2) 中温气体碳氮共渗

中温气体碳氮共渗的介质实际上是渗碳和渗氮用的混合气体。目前在热处理生产中常用的方法是在井式气体渗碳炉中滴入煤油, 使其热分解出渗碳气体, 同时向炉中通入氨气。在共渗温度下, 煤气与氨气除了单独进行渗碳和渗氮的作用外, 它们相互之间还可发生化学反应产生活性碳、氮原子。可采用渗碳富化气 (甲烷、丙烷、城市煤气等) + 氨、三乙醇胺、丙酮 + 甲醇 + 尿素等作为共渗剂。

碳氮共渗温度随钢种而异, 一般在 820 ~ 870℃ 范围内选择。碳氮共渗时间取决于渗层浓度、共渗温度、共渗介质及钢的化学成分。

(3) 氮碳共渗（软氮化）

氮碳共渗（软氮化）是在含有活性碳、氮原子的介质中同时渗入氮和碳，并以渗氮为主的工艺。

1) 气体氮碳共渗的工艺参数是氮碳共渗温度和时间以及渗入介质的活性和加入量，同样是根据模具的技术要求来选择。目前，热处理厂气体氮碳共渗的介质主要是：50%（体积分数）氨气 + 50%（体积分数）吸热型气体。

2) 氮碳共渗的温度通常为 530 ~ 580℃，在 570℃ 左右氮在 α 相中具有最大溶解度。对于高速工具钢和高铬模具钢，为保持工件的整体强度和热硬性，氮碳共渗温度不能超过其回火温度。

3) 氮碳共渗时间为 1 ~ 6h。氮碳共渗后的工件一般采用快冷（油冷）。快冷不仅使工件表面色泽好，而且能进一步提高零件的疲劳强度。对于要求变形小的工件，氮碳共渗后应当缓冷。

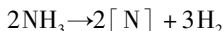
4) 氮碳共渗赋予工件耐磨损、耐疲劳、抗咬合和擦伤的性能，具有处理时间短、温度低、变形小的特点，而且不受钢种限制，适用于碳素钢、合金钢、铸铁及粉末冶金等材料。现已普遍地用于对模具、量具、刀具以及耐磨零件进行化学热处理，并获得了良好的效果。

9.1.2 模具零件的渗氮

渗氮是向钢的表面层渗入氮原子的过程。渗氮温度较低，渗氮后模具零件变形较小，能使模具零件获得比渗碳更高的表面硬度、耐磨性、疲劳性能和热硬性，可提高工件的耐蚀性。渗氮方法分为气体渗氮、液体渗氮、固体渗氮、离子渗氮和真空渗氮等。

1. 渗氮的基本原理

渗氮通常利用专门的设备或井式渗碳炉来进行，氨气加热分解可以产生大量的活性氮原子，在 400℃ 以上时氨发生分解反应



分解出的活性氮原子 $[\text{N}]$ 部分被工件吸收，然后向内部扩散，经过一段时间后，工件表面形成一定深度的渗氮层。渗氮温度常用 560 ~ 570℃，因为该温度下渗氮层硬度最高。渗氮时间常为 2 ~ 3h，因为超过 2.5h，随时间延长，渗氮层深度增加很慢。

1) 钢中的碳元素和合金元素对渗氮层质量的影响。含碳量增加，会使渗氮层的含氮量下降，使渗氮层的脆性明显降低，但硬度、耐磨性和耐蚀性基本保持不变。钢铁中的多数合金元素，如 Al、Cr、Mo、Ti、V 等均可与氮形成硬度高、稳定性好的氮化物，具有更高的硬度和耐磨性。例如，碳素钢渗氮层硬度约为 600HV，合金钢 38CrMoAl 渗氮层硬度可达 1050HV。

2) 渗氮温度是影响渗氮层质量的主要因素。渗氮温度低，氮原子在钢中扩散困难，容易形成一层很薄的高浓度、高硬度、高脆性的渗氮层；提高渗氮温度可以加速渗氮过程，但温度过高（>560℃）时，渗氮层组织粗大，硬度降低，还将使心部组织变粗大。渗氮温度升高使氨气分解率超过一定范围时，分解的大量氮原子迅速结合成氮分

子,而不能被吸收,导致工件表面氮浓度、硬度降低。

2. 渗氮的特点

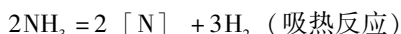
1) 渗氮后的工件具有高的表面质量、高硬度(1000~1200HV)与耐磨性、高的疲劳抗力和耐蚀性,并能保持在600℃左右不明显下降。渗氮温度低,渗后不再进行其他热处理,工件变形小,适合精密模具的表面强化。渗层浅(<0.7mm),脆性较大。

2) 为了使渗氮有较好的效果,模具必须选择含有Cr、Mo、V、Al元素的钢种,钢中的这些元素与氮有较强的亲和力,并形成稳定的氮化物或氮碳化合物,如AlN、CrN和Mo₂N等。模具常用渗氮钢种有Cr12、Cr12MoV、3Cr2W8V、38CrMoAl、4Cr5MoSiV、4Cr5W2VSi、5CrNiMo等。

3) 常规气体渗氮周期长、生产率低、费用高、对材料要求严格;液体渗氮温度低、时间短、模具变形小,但盐浴或盐浴反应产物有一定的毒性,需考虑盐浴的危害及防止措施。长期以来人们不断努力寻求新的渗氮方法,目前有许多新的工艺已经日趋成熟,正在生产中被广泛应用,例如离子渗氮、真空渗氮和电解催渗氮等。

3. 气体渗氮

气体渗氮是把模具零件置于含氮的气体介质中,加热到520~560℃进行渗氮处理的化学热处理工艺。在处理时,部分氨分解成活性氮原子和氢,其分解反应为



活性氮原子[N]只有一小部分被钢吸收,大部分都互相结合成N₂,与H₂一起排出炉外。NH₃的分解率定义为

$$\text{NH}_3 \text{分解率} = \frac{(\text{N}_2 + \text{H}_2) \text{体积}}{(\text{NH}_3 + \text{N}_2 + \text{H}_2) \text{体积}}$$

向渗氮炉中供给的NH₃气流量越大,则NH₃的分解率越小;反之则分解率越大。通过调节NH₃的流量便可以控制NH₃的分解率,这在渗氮过程中是非常重要的。

(1) 渗氮前的准备

1) 在模具的整个制造过程中,渗氮往往是最后一道工序。为使工件心部具有必要的性能,消除加工应力,减少渗氮过程中的变形,以及为获得最好的渗氮层性能做组织准备,模具在渗氮前一般都需要进行预备热处理,即进行调质处理,以获得回火索氏体组织。热作模具钢仅是提高表面耐磨性,淬火后的回火温度一般高于渗氮温度。

2) 对于形状复杂的精密模具,在机械加工后应进行1~2次去应力处理以减少渗氮过程中的变形。处理温度应低于回火温度,以免降低模具硬度。热作模具钢工件淬火后即进行高温回火再渗氮,同样渗氮温度不得高于高温回火温度。

3) 脱碳层将导致模具渗氮后脆性增大及硬度不足等疵病,模具在预备热处理前应将工件脱碳层通过机械加工切除,为此模具应有足够的加工余量,以保证机械加工时将脱碳层全部去除。

4) 为使渗氮过程顺利进行,模具在装炉前要用汽油或酒精等脱脂。经过清洗后模具表面不能有锈蚀及洗涤不净的脏物。如果模具某些部位不需要渗氮,则可用涂料防渗。

5) 为了检查渗氮质量,可在渗氮罐的适当部位,放置与模具同材质,并经过预备热处理的试样,以便于检查渗氮层深度、表面硬度和金相组织。

(2) 渗氮介质及设备

1) 渗氮用氨气是工业合成液氨(瓶装)。用氨气分解率测定计量废气中氮和氢的体积与废气总体积之比,用以表示氨气分解的程度。

能提供氮原子的气体介质较多,但目前应用最多的且便宜的是氨气。除此之外也可用氨气加稀释气体,稀释气体可以用氢氮混合气体(氨气的预先分解体,或者渗氮的废气),也可以用渗碳气氛如丙烷或者丙烷与空气制备的吸热式气氛(即RX气体)。

氨气有强烈的刺激作用和恶臭,只要在空气中的浓度达到万分之一,即可使人咳嗽、头痛、流眼泪,对人体有一定的危害。但氨气比空气轻,逸出后都上升到大气中去了,在通风条件好的工作场所不会造成不良后果。如果氨气中毒,喝一些柠檬汁或醋溶液,能起到缓解作用。

2) 渗氮可在密封的箱式炉或井式炉中进行。设备由两部分组成,一部分是炉体及附带的测量仪表,另一部分为输送渗氮气体和排废气的管路系统。氨气由液氨瓶经过流量计、干燥箱进入渗氮罐。

气体渗氮设备的特点和基本要求如下:

① 渗氮罐与管路系统要有良好的密封性。

② 加热炉工作温度不高,一般不超过700℃。但对炉体的炉温均匀度要求很高,一般规定在有效加热区内温差应 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 。

③ 炉温的测量和控制应精确。

④ 管路系统应合理和畅通。渗氮介质应均匀地与零件表面接触。在可能的条件下,应装有风扇或气体循环装置。

我国电炉制造已有标准的气体渗氮炉和氮碳共渗炉供应,也可接受特殊订货,可满足模具渗氮处理的要求。

(3) 渗氮工艺参数

1) 渗氮温度:渗氮温度一般为500~570℃,渗氮时间根据模具渗氮层的深度要求而定,渗氮温度为510℃、渗氮层深度 $\leq 0.4\text{mm}$ 时,38CrMoAl钢的渗氮速度为0.01~0.015mm/h。

温度对渗氮层表面硬度及层深的影响显著。温度越低,渗氮层表面硬度越高,渗氮层越浅,变形量越小;反之温度越高,渗氮层表面硬度越低,层深越深,变形量越大。同时渗氮后的硬度不仅取决于温度,还与氨气的分解率有关。

2) 渗氮时间。渗氮时间取决于所要求的渗氮深度及渗氮温度。由于渗氮是在较低的温度下进行的,因此渗氮速度很低。与渗碳相比,渗氮层深度较浅(一般在0.5mm左右),更深的渗氮层则需要更长的渗氮时间。

(4) 生产中常采用的渗氮方法

1) 一段渗氮法。一段渗氮法又称为等温渗氮法。在渗氮过程中渗氮温度和氨气分解率保持不变。渗氮温度一般为450~530℃。适用于要求高硬度、低变形的浅层渗氮,

渗氮层氮含量分布比较陡峻。

2) 二段渗氮法。第一阶段采用较低的渗氮温度和较低的氨气分解率,使工件表层先形成弥散度高的高硬度合金氮化物层;第二阶段再稍微提高渗氮温度和氨气分解率,使氮的扩散速度加快,以便缩短渗氮时间。二段渗氮法处理的工件变形稍大,硬度梯度较平缓,但渗速较快,生产周期较短。

3) 三段渗氮法。在二段渗氮法的基础上再增加一段低温阶段,可以适当提高氨气分解率,以降低模具表面的高氮脆性;或者采取与第一阶段相同的氨气分解率,以补充模具表面的氮含量消耗。

为了降低渗氮层的脆性,可在渗氮结束前 2~3h 进行退氮处理,即将氨气分解率提高至 90% 以上。

几种模具钢的气体渗氮工艺规范见表 9-3。

表 9-3 几种模具钢的气体渗氮工艺规范

钢号	处理 方法	渗氮工艺规范				渗氮层深度/mm	表面硬度 HV
		阶段	温度/℃	时间/h	氨气分解率 (%)		
38CrMoAl	一段	I	510 ± 5	80	30 ~ 50	0.50 ~ 0.60	> 1000
	二段	I	510 ± 10	25	18 ~ 25	0.50 ~ 0.70	> 900
		II	550 ± 10	35	50 ~ 60		
			550 ± 10	2	> 90		
	三段	I	520 ± 5	10	20 ~ 25	0.40 ~ 0.60	> 1000
		II	570 ± 5	16	40 ~ 60		
		III	530 ± 5	18	30 ~ 40		
			530 ± 5	2	> 90		
3Cr2W8V	二段	I	480 ~ 490	20 ~ 22	15 ~ 25	0.20 ~ 0.35	≥ 600
		II	520 ~ 530	20 ~ 24	30 ~ 50		
			600 ~ 620	2 ~ 3	100		
Cr12MoV	二段	I	490 ~ 500	15	15 ~ 25	0.15 ~ 0.25	≥ 750
		II	520 ~ 530	30	35 ~ 40		
			540 ~ 550	2	100		
40Cr	二段	I	470 ~ 480	10	15 ~ 25	0.20 ~ 0.28	≥ 480
		II	510 ~ 520	25	30 ~ 50		
			550 ~ 560	2	100		
30CrMnSiA	一段	I	500 ± 5	25 ~ 30	20 ~ 30	0.20 ~ 0.30	> 58HRC
4Cr5MoSiV1	一段	I	530 ~ 550	12	30 ~ 60	0.15 ~ 0.20	760 ~ 800

注: 气体渗氮工艺可参阅热处理工艺标准 GB/T 18177—2008 《钢件的气体渗氮》、GB/T 22560—2008 《钢铁件的气体氮碳共渗》。

4. 离子渗氮

离子渗氮是在低真空的含氮气氛中,以炉体为阳极,被处理工件为阴极,在阴阳极间加上数百伏的直流电压,使之产生辉光放电进行渗氮处理的化学热处理工艺。离子渗氮有多种名称,如离子氮化、辉光放电氮化、离子轰击渗氮、等离子体渗氮等。

(1) 离子渗氮的特点

离子渗氮是在低真空含氮气氛中,利用模具(阴极)和阳极之间产生的辉光放电进行渗氮的工艺,与气体渗氮相比,有以下特点。

1) 工作环境好。由于离子渗氮法不是依靠化学反应作用,而是利用离子化的含氮气体进行渗氮处理,所以工作环境十分清洁而不需要防止公害的特别设备。因而,离子渗氮法也被称为21世纪的“绿色”渗氮法。

2) 渗入速度快。由于离子渗氮法利用离子化的气体的溅射作用,因而可显著缩短处理时间(离子渗氮的时间仅为普通气体渗氮时间的 $1/5 \sim 1/3$)。

3) 能源消耗少。由于离子渗氮法利用辉光放电直接对工件进行加热,因此也不需要特别的加热和保温设备,且可以获得均匀的温度分布,与间接加热方式相比加热效率可提高2倍以上,达到节能效果(能源消耗仅为气体渗氮的40%~70%),可大大降低处理成本。

4) 零件变形小。由于离子渗氮是在真空中进行的,因而可获得无氧化的加工表面,也不会损害被处理工件的表面质量。而且由于是在低温下(400°C 左右)进行处理,被处理工件的变形量极小,处理后无须再行加工,极适合于成品的处理。

5) 渗氮组织易于控制。通过调节渗氮气体的成分,可自由地调节化合物层的相组成,从而获得预期的力学性能。

6) 适应范围广泛。从 380°C 起即可进行离子处理。可用于不锈钢模具的渗氮,利用离子的轰击作用,可以自动去除不锈钢、耐热钢模具表面的钝化膜,可直接进行不锈钢模具的渗氮。此外,也可以对钛等特殊材料在 850°C 的高温下进行渗氮处理。

7) 易于实现局部渗氮。用机械屏蔽法即可对非渗氮部位进行有效的保护。比气体渗氮采用电镀、涂料保护法经济、简便。

8) 操作比气体渗氮复杂,需要控制的工艺参数多,测量温度和控制温度均匀比较难;装炉有严格要求,装炉不妥或形状不同、大小不同的零件混装炉容易出现渗氮层不均匀等毛病,造成废品或返修;设备费用高,有时需要配置辅助阳极等。

(2) 离子渗氮的原理

离子渗氮装置包括炉体设备和辅助系统。炉体设备为带微机装置的钟罩炉,辅助系统有真空系统和输气系统,其结构如图9-4所示。

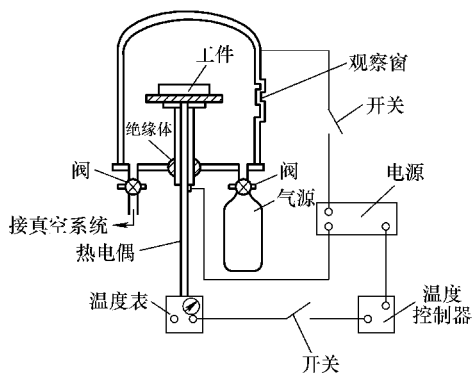


图 9-4 离子渗氮装置结构示意图

离子渗氮是在低真空度下,向炉中通入氨气或氮氢混合气体。以工件为阴极,炉壁为阳极,在阴阳极间加上 400 ~ 1000V 的直流电压,在高压电场作用下引起辉光放电,氮被离子化,具有高能量的氮离子以高速向工件表面轰击,一方面使工件表面产生离子溅射,造成晶格缺陷;另一方面,轰击产生热能,加热工件表面。氮离子被工件表面擒获、吸收,并向工件内部扩散,形成渗氮层。

(3) 离子渗氮的主要工艺参数

1) 真空度。一般为 1.33 ~ 13.3Pa。

2) 气体压力。气体压力常用为 266 ~ 798Pa。

3) 电流密度。电流密度为 0.5 ~ 5mA/cm²。

4) 辉光电压。加热电压为 550 ~ 750V。在保温阶段,电压应比加热阶段略低,通常为 550 ~ 650V,形状简单的取 650V,形状复杂的取 550V。

5) 渗氮温度。可以取 350 ~ 570℃,即使在 400℃ 以下也能进行渗氮处理。渗氮温度低时渗氮层薄,温度过高则氮化物粗化、硬度下降并降低抗粘模能力。多采用 510 ~ 550℃,渗氮层深度以 ≤0.3mm 为宜。

6) 渗氮时间。离子渗氮时间主要取决于所选用的材料、要求的渗氮层深度以及渗氮的温度。模具的离子渗氮时间一般取 1 ~ 6h。

7) 渗氮气氛。目前离子渗氮一般使用的是预先经过热分解的氨气,可以较好地解决直接通氨气进行离子渗氮时所产生的一些缺陷,而且方法简便。采用 N₂ 和 H₂ 的混合气体进行渗氮, H₂ 作为稀释气体加入可调节渗氮气氛的氮势 (N₂ 与 H₂ 的体积比可以在 20:80 ~ 80:20 之间变化),从而较容易地对渗氮层组织进行控制。

(4) 离子渗氮前的准备工作

为了提高离子渗氮质量,不仅要求操作人员严格按照工艺操作规程进行渗氮操作,而且还必须对模具的预备热处理、设备性能进行严格控制。

1) 模具零件调质处理。模具调质后其基体为回火索氏体组织,可提高模具基体强度、韧性及疲劳性能。同样条件下,调质后渗氮层深度可增加 20% 以上,硬度也有所提高。如 38CrMoAl 模具 520℃ × 8h 离子渗氮,调质试样渗氮层平均硬度为 1288HV,渗氮层深度为 0.36mm,未调质试样渗氮层平均硬度为 1028HV,渗氮层深度为 0.28mm。

2) 模具零件去应力退火。为了减少零件渗氮后的变形,在半精加工后,进行去应力退火处理。加热温度为 550 ~ 600℃,保温 3 ~ 5h,可减小模具渗氮变形量。

3) 模具渗氮前应脱脂除锈,清理飞边,消除弧光放电源。

4) 应进行设备极限真空度试验,炉子应在限定的时间内达到 6.65Pa。若没有足够的极限真空度,则易引起模具零件在渗氮和冷却过程中氧化,加大氮原子的扩散阻力。

5) 炉子的真空保持能力(即压升率)为炉压每分钟上升 0.133 ~ 0.266Pa,即能满足渗氮工艺要求。一般开炉后应进行一次真空保持试验。

(5) 离子渗氮的应用

离子渗氮法是在模具上应用较多和使用效果较好的一种表面强化方法,在热锻模、

压铸模、冷热挤压模、冲模、冷镦模、滚丝模、拔丝模等模具上,获得了较好的应用效果。离子渗氮工艺与使用效果见表9-4。

表9-4 离子渗氮工艺与使用效果

模具名称	模具材料	渗氮工艺	使用效果
冲头	W18Cr4V	500 ~ 520℃ × 6h	较气体渗氮提高2~4倍
铝合金压铸模	3Cr2W8V	500 ~ 520℃ × 6h	较气体渗氮提高1~3倍
热锻模	5CrMnMo	480 ~ 500℃ × 6h	较气体渗氮提高3倍
冷挤压模	W6Mo5Cr4V2	500 ~ 550℃ × 6h	较气体渗氮提高1.5倍
压延模	Cr12MoV	500 ~ 520℃ × 6h	较气体渗氮提高5倍

实例 Cr12MoV 钢制拉深模的凹模采用离子渗氮表面强化处理工艺。

① 工艺路线。下料→锻造→球化退火→机械加工→淬火、回火→精加工→离子渗氮→装配。

② 凹模预备热处理。球化退火消除锻造残余应力,改善组织,降低硬度,便于机械加工。退火工艺为860℃加热3h,在740℃保温4h,进行退火;机械加工后,模具工作面涂WAC-1型防氧化脱碳涂料;550℃预热40min,再加热至1030℃,保温30min,在油中淬火;然后在520℃回火1h,此时模具硬度为61HRC。

③ 离子渗氮处理。在LD-60炉中进行,通入氨分解气,气压保持在 $(5 \sim 8) \times 10^2 \text{ Pa}$,辉光放电电压为500~600V,电流密度为 1 mA/cm^2 。在500℃温度下,经5h渗氮,渗氮层深度为0.12mm,渗氮层硬度为1200HV。

④ 凹模经淬火、回火、离子渗氮处理后,拉深工件质量提高,其表面不再有拉毛现象。模具使用寿命由原2000件提高到50000件。

⑤ 结论。离子渗氮提高了拉深模的使用寿命,其原因在于:模具零件表面渗氮层有很高的硬度和耐磨性;渗氮处理使模具表面形成了一层化合物保护层,降低了模具凹模与材料之间的摩擦因数;化合物层降低了摩擦副之间的互溶性,避免了咬合的出现。

5. 真空渗氮

真空渗氮是在真空度为 $1.3 \times 10 \sim 1.3 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 的真空炉内,将模具加热到500~560℃,通入氨气,压力保持为 $9.1 \times 10^3 \sim 6.5 \times 10^4 \text{ Pa}$,然后进行保温,其保温时间根据工艺要求而定(一般为3~5h)。保温结束,停止加热,抽真空到65.0~1.3Pa,使零件在分解的氨气中冷却至200℃出炉。经处理后,模具可获得0.12mm、显微硬度为1000~1100HV的均匀渗氮层。

(1) 真空渗氮的特点

1) 真空渗氮是通过真空技术,使金属表面活化和清净化。在加热、保温、冷却的整个热处理过程中,不纯的微量气体被排出,含活性物质的纯净气体(或复合气体)被送入,使表面层相结构的调整和控制、质量的改善、效率的提高成为可能。

2) 经 X 射线衍射分析证实, 真空渗氮处理后, 渗氮层中的化合物层是 ϵ 单相组织, 没有其他脆性相 (如 Fe_3C 、 Fe_3O_4) 存在, 所以硬度高, 韧性好, 分布也均匀。

3) 单相 ϵ 化合物层 (白层) 可达到的硬度与材质成分有关。材质中含 Cr 量越高, 硬度也越高。Cr 质量分数为 13% 时, 硬度可达到 1200HV; 含 Cr 质量分数为 18% 时, 硬度可达到 1500HV; Cr 质量分数为 25% 时, 硬度可达到 1700HV。

4) 单相 ϵ 化合物层的耐磨性比气体氮碳共渗组织的耐磨性高, 抗磨损烧伤、抗热咬合、抗熔敷、抗熔损性能都很优良。但该白层的存在对有些模具和零件也有不利之处, 易使锻模在锻造初期产生龟裂, 焊接修补时易生成针孔。

5) 真空渗氮通过对送入炉内的含活化物质的复合气体的种类和量的控制, 可以得到几乎没有化合物层 (白层), 而只有 0.1 ~ 1mm 扩散层的组织。该组织是在真空炉排气至 0.133Pa (1×10^{-3} Torr) 后形成的, 是带有活性物质的复合气体在短时间内向钢中扩散而形成的组织。

(2) 真空渗氮的应用

1) 真空渗氮技术是利用真空加热时工件表面清洁、无氧化等特点, 采用真空热处理在负压下进行渗氮, 渗氮后工件表面硬度高, 脆性小, 渗氮层均匀, 能满足尖锐刃口刀具与冲模的技术要求。真空渗氮多采用负压下脉冲式渗氮, 工件上的不通孔及压紧的平面均能正常渗氮, 炉室中各部位工件渗氮层比较均匀。

2) 真空渗氮后形成的扩散层组织耐热冲击性、抗龟裂性能优异。因而对于实施高温回火的热作模具, 如用高速工具钢或 4Cr5MoSiV1 (H13) 钢制造的模具可以得到表面硬度高、耐磨性好、耐热冲击性好、抗龟裂而又有韧性的综合性能。但仅有扩散层组织时, 模具的抗咬合、抗熔敷、抗熔损性能较差。由于模具或机械零件的服役条件和对性能的要求不一, 在进行表面热处理时, 必须调整表面层的组织和性能。

3) 真空渗氮除应用于工具、模具外, 对提高精密齿轮和要求耐磨、耐蚀的机械零件以及弹簧等的性能都有明显效果, 可接受处理的材质也比较广泛。

9.1.3 模具零件的渗钒

渗钒是将模具零件置于能产生活性钒的介质中, 在一定温度下加热并保温适当时间, 渗剂热分解使钒或多种金属元素的活性原子被吸附到工件表面, 并向心部扩散, 从而改变工件表层的化学成分、组织和性能的化学热处理工艺。

1. 盐浴渗钒

盐浴渗钒是在中、高碳钢或合金钢模具表面, 被覆硬度达 2800 ~ 3200HV 的钒碳化合物层, 以提高模具的硬度、耐磨性和抗咬合性能。

(1) 渗钒设备、渗剂、材料及工艺

渗钒可在高温坩埚电阻炉内进行。盐浴渗钒工艺、盐浴成分及模具材料见表 9-5。

(2) 影响渗层深度的因素

1) 渗钒温度。三种模具材料渗钒温度与渗层深度的关系见表 9-6。

表 9-5 盐浴渗钒工艺、盐浴成分及模具材料

模具材料	盐浴成分（质量分数）	工艺	渗层深度/ μm	硬度 HV0.1
T8、T10、CrWMn、Cr12、W18Cr4V、45	80% ~ 85% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ + 15% ~ 20% Fe - V 粉 (钒铁含钒 43%，粒度为 0.100 ~ 0.154mm)	850 ~ 1000℃ × 2 ~ 6h	4 ~ 16.5	2800 ~ 3200
T10	10% V_2O_5 + 6% Al + 9% NaF + 27% NaCl + 48% BaCl_2	950℃ × 4h	10 ~ 20	2300 ~ 2800
GCr15	90% BaCl_2 + 6% ~ 8% V_2O_5 + 2% ~ 3% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ + 少量 Al 粒	950℃ × 4h + 860℃ × 2h + 950℃ × 4h	20	2500
T10	87% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ + 10% V_2O_5 + 3% B_4C	950℃ × 4h	10 ~ 20	2000 ~ 3000
T8	44.4% 中性盐 (KCl: NaCl = 1:1) + 11.2% Al_2O_3 + 44.4% Fe - V 粉	1000℃ × 5h	8.5	2200 ~ 2800
T8	22.2% KCl + 22.2% NaCl + 44.4% Fe - V + 11.2% Al_2O_3	1000℃ × 5h	8.5	2200 ~ 3000
T10	10% Fe - V 粉 + 72% 硼砂 + 3% B_4C + 15% Na_2SiF_6	950℃ × 6h	24	2000 ~ 3000
T10	15% Fe - V 粉 (67% V) + 85% 硼砂	950℃ × 6h	22	2000 ~ 3000
T10	10% V_2O_5 + 5% Al + 85% 硼砂	950℃ × 6h	17	2200 ~ 3000
T10	86% BaCl_2 + 14% 无水硼砂 + 10% Fe - V 粉 + 5% CaF_2	950℃ × 6h	10 ~ 15	2200 ~ 3000
T10	55% NaCl + 45% KCl + 40% Fe - V 粉 + 10% Al_2O_3	950℃ × 6h	10 ~ 15	2200 ~ 3000
T10	33% NaCl + 67% CaCl_2 + 15% Fe - V 粉	850℃ × 8h	10	2000 ~ 3000

表 9-6 三种模具材料渗钒温度与渗层深度的关系

渗钒温度/℃	渗层深度/ μm		
	T10	Cr12	W18Cr4V
900	13.2	6.8	4.0
950	14.8	12.2	6.5
100	16.5	15.9	6.5

注：渗钒时间为 6h。

2) 渗钒时间。三种模具材料渗钒时间与渗层深度的关系见表 9-7。

表 9-7 三种模具材料渗钒时间与渗层深度的关系

渗钒时间/h	渗层深度/ μm		
	T10	Cr12	W18Cr4V
4	11.96	11.80	4.91
6	14.64	13.22	6.76
8	16.68	14.60	7.63

注：渗钒温度为 950℃。

(3) 盐浴渗钒的应用

模具渗钒，表面硬度较高（ $\geq 2000\text{HV}$ ），具有良好的耐蚀性、抗氧化性、耐热粘性、耐冲击性和耐剥落性，比渗硼有更高的耐蚀性和耐磨性。广泛应用于冲裁模、弯曲模、挤压模、切边模、深冲模、冷锻模、制管模和粉末冶金模等，使用寿命与渗氮处理的模具相比，可提高几倍到几十倍。例如：

① GCr15 模具渗钒后油淬比渗硼后油淬耐磨性提高 13.7 倍。

② 冷镦 M20 六角螺母用的凹模，渗钒后的使用寿命为 15 万件，比常规热处理的模具提高 9 倍，比盐浴渗硼的模具提高 0.5 倍，且无剥落和起皮现象发生。

③ M4 螺栓的 Cr12MoV 钢冷镦模使用寿命比常规热处理的模具提高 2 倍。

④ 轴碗拉深模（GCr15）经 $950^{\circ}\text{C} \times 6\text{h}$ 渗钒处理比常规热处理使用寿命提高 23 倍。

2. 铬钒共渗

(1) 固体铬钒共渗工艺

5CrNiMo 钢热作模具采用固体铬钒共渗工艺，渗剂与工件装入密封的渗罐中，在箱式炉内加热，渗剂成分（质量分数）为 50% Cr - Fe + 43% Al_2O_3 + 2% NH_4Cl + 5% 钒粉。共渗工艺： $1050^{\circ}\text{C} \times 5\text{h}$ 铬钒共渗。

(2) 盐浴铬钒共渗工艺

盐浴配方和共渗工艺见表 9-8。

表 9-8 盐浴配方和共渗工艺

模具材料	盐浴成分（质量分数）	工艺	渗层深度/ μm	硬度 HV0.1
T8	65% NaB_4O_7 + 10% V_2O_5 + 10% Cr + 10% NaF + 5% B_4C	$950^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$	10	1950
T10	63% NaB_4O_7 + 15% Cr_2O_3 + 15% V_2O_5 + 2% NaF + 300gAl 粒	$910^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ + $950^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$	30	2256

(3) 不同材料渗铬、渗钒及铬钒共渗效果比较（表 9-9）

表 9-9 不同材料渗铬、渗钒及铬钒共渗效果比较

钢 号	45	T10	GCr15	Cr12MoV
渗铬层深度/ μm	12.5	14.55	1056	7
渗铬层硬度 HV	1604	1537	1680	1765
渗钒层深度/ μm	8	14.4	14	10
渗钒层硬度 HV	1850 ~ 2290	2290 ~ 2400	2290 ~ 2600	2700 ~ 2900
铬钒共渗层深度/ μm	20	30	20	16
铬钒共渗层硬度 HV	2125	2256	2472	2850

注：铬钒共渗能显著改善钢件的表面层特性，改善渗层铬钒成分分布及硬度梯度，降低渗层脆性。获得具有高硬度、高耐磨性、高耐蚀性及抗高温氧化和热疲劳性能良好的复合渗层。

9.1.4 模具零件的盐浴渗铌

盐浴渗铌使金属表面得到一层高硬度、低摩擦因数、耐磨、抗咬合、耐腐蚀的金属碳化物渗层，是近年发展起来的一种表面强化工艺。可用于冲模、成形模、弯曲模、拔管模、热锻模和粉末冶金模等模具，渗铌后可大幅度提高模具使用寿命。

1. 盐浴渗铌的特点

1) 渗铌层组织。GCr15、Cr12MoV、W18Cr4V、3Cr2W8V、20、45 和 20Cr 钢等材料渗铌后，可得到一层铌含量（质量分数）为 80% 的金黄色碳化铌（NbC）层。

2) 渗铌层的硬度。不同基体材料渗铌层的显微硬度不一。例如，GCr15 为 2900 ~ 3500HV，45 钢为 2100 ~ 2600HV，Cr12MoV 钢为 3200 ~ 3500HV。渗铌层可以刻划玻璃。

3) 渗铌层的性能。模具钢经盐浴渗铌后，比渗硼和气相沉积碳化钛有更好的耐磨、抗咬合、抗氧化和抗热疲劳等性能。

4) 渗铌工艺的的优点。设备和工艺简单，渗层性能优异，渗铌层与基体结合牢固，不易剥落。

5) 渗铌工艺中采用的纯铌粉，价格昂贵、成本高。

2. 盐浴渗铌渗剂、设备及工艺

(1) 盐浴渗铌渗剂及设备

盐浴渗铌可在坩埚电阻炉中进行。坩埚可用 2mm 厚的不锈钢板焊接。盐浴渗铌剂的配方（质量分数）为：Nb 粉 7% ~ 10%， $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ （脱水）90% ~ 93%；或者 Nb_2O_5 粉 10% + Al 粉 9% + $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 81%；或者无水硼砂 95% + Nb 粉（>98% 铌）4% + Al 粉 1%。

(2) 盐浴渗铌工艺

先将无水硼砂熔化，然后放入干燥的铌粉，在 900 ~ 1000℃ 下加入铝粉后，即可把模具放入盐浴内进行渗铌。渗层厚度符合要求后，取出直接淬火再回火，并清理表面。

渗铌工艺注意事项如下：

- 1) 渗硼温度一般以 $900 \sim 1050^{\circ}\text{C}$ 为宜。
- 2) 保温时间以 $4 \sim 10\text{h}$ 为宜, 应根据不同材料和渗层深度要求而定。例如: GCr15 钢 $900^{\circ}\text{C} \times 6\text{h}$ 渗硼后渗层厚度为 $24\mu\text{m}$, 而 W18Cr4V 钢渗层深度仅为 $5\mu\text{m}$ 。
- 3) 盐浴可重复使用, 每次在使用前要加入 $1\% \sim 2\%$ 盐浴质量的铝粉。
- 4) 模具表面应有低的表面粗糙度值, 以免渗硼层深度不均匀和引起剥落。

9.1.5 模具零件的渗硼

渗硼是一种在高温下 ($800 \sim 1000^{\circ}\text{C}$) 使硼元素渗入金属表面获得硼化合物硬质层的化学热处理技术。为模具制造行业常用的一种表面强化手段。渗硼层硬度高, 耐磨性优于其他表面热处理工艺; 渗硼层热稳定性好, 在 800°C 以下能保持高硬度, 耐蚀性和抗氧化性能较好。金属材料经渗硼处理可获得相当于硬质合金硬度的表层, 以改善材料的耐磨性和耐蚀性。渗硼工艺可分为固体渗硼、盐浴渗硼、膏剂渗硼、真空渗硼、气体渗硼和电解渗硼以及硼氮复合渗等。

1. 渗硼工艺的特点

- 1) 硬度高、耐磨性好。FeB 层硬度为 $1700 \sim 2000\text{HV}$, Fe_2B 层硬度为 $1200 \sim 1500\text{HV}$, 合金钢渗层硬度可达 3000HV 以上。渗硼层耐磨性可超过渗碳层和渗氮层。
- 2) 耐热性好、热硬性高。在 600°C 不氧化, 800°C 氧化极微。工件工作温度达 $600 \sim 800^{\circ}\text{C}$ 硬度仍不降低。
- 3) 耐蚀性高。在酸、碱、盐中耐蚀性都很高, 但不耐硝酸腐蚀。
- 4) 渗硼层的脆性大 (FeB 的脆性大于 Fe_2B 的脆性), 渗硼工件在承受大的冲击载荷时, 容易发生渗层剥落与开裂。

2. 渗硼质量的影响因素

渗硼层质量的主要影响因素为钢材化学成分、工艺参数及工艺操作过程等方面。

(1) 钢材化学成分

低碳钢的渗硼速度最快, 钢中含有 Cr、Mn、V、W 等元素, 还使渗硼层富硼化合物相对增多。钢在渗硼时, 硼化物呈针状晶体而楔入基体材料中, 与基体间保持较大的接触区域, 使硼化物不易剥落。但随着钢中碳和合金元素的增多, 不仅渗硼层减薄, 而且硼化物楔入程度也降低, 渗硼层与基体的接触面因而平坦, 结合力变差了。一般含硅的钢不宜制作渗硼模具。

(2) 工艺参数

1) 渗硼温度过低或保温时间过短、渗硼介质活性不够、固体渗硼箱密封不好等都会导致渗硼层厚度太薄; 介质活性差、固体渗剂混合不均匀、渗硼盐浴流动性差或成分偏析等会造成渗硼层厚度不均匀, 甚至渗层剥落, 而且耐磨性、耐蚀性很差; 渗剂中增加氧化性组分, 如 Na_2CO_3 及 H_2O 等也容易导致形成孔洞。

2) 渗硼层厚度确定。模具使用寿命与渗硼层厚度有一定的关系。当渗硼层厚度超过一定值后, 模具使用寿命反而降低, 故应根据基体材料和模具使用情况确定适当的渗硼层厚度。

3) 加热温度参数选择。高合金钢模具的加热温度更应严格控制, 因为 $\text{Fe}-\text{Fe}_2\text{B}$ 在 1149°C 发生共晶转变, 因此淬火加热温度应严格控制, 否则渗硼层会出现熔化现象。对于一些基体性能要求不高的模具, 渗硼后可直接加热、保温一定时间后进行淬火。

4) 淬火、回火冷却速度。渗硼后, 应进行淬火、回火处理以改善基体的性能。由于硼化物 FeB 、 Fe_2B 与基体的热膨胀系数不同, 因此在淬火时要充分预热, 冷却时按照基体材料的不同采用尽可能低的冷却速度, 以免渗硼层开裂和脱落。

3. 固体渗硼

固体渗硼常以碳化硼 (B_4C) 或硼铁 ($\text{B}-\text{Fe}$) 等为供硼剂; 氟硼酸钾 (KBF_4) 和碳酸氢氨 (NH_4HCO_3) 为催渗剂, 工业纯氧化铝 (Al_2O_3) 为填充剂, 金属工件在渗硼箱中升温至 $800 \sim 950^\circ\text{C}$, 保温 $2 \sim 6\text{h}$, 使硼元素渗入金属表面, 从而获得深 $0.08 \sim 0.12\text{mm}$ 的渗硼层。

(1) 固体渗硼的特点

1) 固体渗硼具有设备简单、操作方便、适应性强的特点, 尤其适于处理大型模具; 渗硼层组织基本为单相的 Fe_2B 或 $(\text{Fe}, \text{M})_2\text{B}$, 硼化层硬度可达 $1600 \sim 2100\text{HV}$, 渗硼件表面清洁, 不用清洗, 渗剂无毒、可重复使用, 应用广泛。

2) 固体渗硼劳动强度大, 工作条件差, 模具多是单件生产, 一般批量不大; 渗硼速度慢, 热扩散时间较长, 且温度高, 渗层浅; 碳化硼、硼化铁等价格昂贵, 成本较高。

(2) 固体渗硼工艺

1) 渗硼工艺过程。配制渗硼剂→装箱→热炉装箱→加热保温→冷却。

2) 渗硼温度。渗硼温度为 $850 \sim 950^\circ\text{C}$ (加热温度按工艺要求而定), 若温度为 $950 \sim 1000^\circ\text{C}$, 则渗硼时间可缩短, 但会造成晶粒粗大, 影响基体化学性能。

3) 保温时间。保温时间为 $3 \sim 5\text{h}$, 最长不超过 6h 。一般为 850°C 保温 4h (保温时间不包括渗箱透热时间)。渗箱与工件的透热时间应视其体积大小而定。

4) 渗硼剂用量。渗硼剂一般由供硼剂、活化剂和填充剂组成。渗硼剂要根据工件的失效形式和受力状况来确定。工作中承受静压, 以磨损为主要失效形式的工件应选择活性大的渗硼剂。承受冲击载荷或大挤压力的工件, 应选用活性适中的渗硼剂。渗硼剂可重复使用, 一般新、旧渗硼剂的配比 (质量分数) 为旧渗硼剂 $70\% +$ 新渗硼剂 30% 。

5) 操作过程。工件用汽油或酒精或碱液清洗去油后晾干。在渗箱底部撒 5mm 厚的渗硼剂, 垂直放置工件, 以减少弯曲变形, 然后填满渗硼剂 (非工作面可用旧渗硼剂填充, 以减少渗硼剂用量), 用水玻璃调和粘土封箱。出炉或随炉冷却至室温开箱, 渗硼后开箱直接淬火也可。

6) 质量检查。用三钾试剂或硝酸酒精溶液腐蚀后, 检查硼化层厚度及硬度。

常用固体渗硼渗剂成分及工艺见表 9-10。

表 9-10 常用固体渗硼渗剂成分及工艺

钢号	渗剂成分 (质量分数, %)									温度 × 时间 /°C × h	组织	厚度 /μm
	B ₄ C	B - Fe	Na ₂ B ₄ O ₇	KBF ₄	NH ₄ HCO ₃	SiC	Al ₂ O ₃	木炭	活性炭			
45		7		6	2	余量		20		850 × 4	双相	140
45		5		7		余量		8	2	900 × 5	单相	95
45		10		7		余量		8	2	900 × 5	单相	95
45	1			7		余量		8	2	900 × 5	单相	90
45	2			5		余量	Mn - Fe: 10			850 × 4	单相	110
45		20		5	5		70			850 × 4	单相	85
45	5			5		余量	Fe ₂ O ₃ : 3			950 × 4	双相	120
45		25		5		余量				850 × 4	单相	
45			30		Na ₂ CO ₃ : 3	Si: 7		石墨: 60		850 × 4	单相	160
45	5			10		85				850 × 4	双相	160 ~ 170
Q235	2			10		88				850 × 4	单相	110 ~ 120
Q235	5			5		90				850 × 4	双相	160 ~ 170
Q235			B - Fe: 15	10		75				870 × 4	单相	100 ~ 120
45			15	8	Si: 2	55		石墨: 15	RE: 5	900 × 6	单相	140 ~ 150
45	3			5	Na ₂ CO ₃ : 1.0	87	Al 粉: 0.5 ~ 1.0	CeO ₂ : 0.67	La ₂ O ₃ : 2.33	900 × 5	单相	170 ~ 180
45	3			5		91.5			Na ₂ CO ₃ : 0.5	900 × 3	单相	120 ~ 130
45			13		10	54	Si - Fe: 10	石墨: 10	Na ₂ CO ₃ : 3.0	850 × 4	单相	100 ~ 120
45	5			5		80	Mn - Fe: 10			850 × 4	双相	160 ~ 170

(3) 固体渗硼的操作要点

- 1) 渗剂严禁受潮, 受潮后必须低温烘干。
- 2) 渗硼件装箱时必须双层密封, 防止空气进入, 使工件氧化。
- 3) 防止杂质混入渗剂。重用的必须筛选, 块状研细, 每次添加的新渗剂, 应尽量靠近工件。
- 4) 热开箱淬火的渗剂易出现结块现象, 应予以捣碎, 以备再用。

4. 盐浴渗硼

盐浴渗硼是在坩埚炉内进行的。以硼砂为基，约占70%（质量分数）以上，添加5%~15%（质量分数）氯化盐及碳酸盐、氟化物、氟氯酸钠等，可以改善盐浴的流动性。以金刚砂、铝粉、硅钙合金、硅铁等作为还原剂。盐浴渗硼的温度一般为950~1000℃，时间一般不超过6h，时间过长易使渗硼层变脆。

(1) 盐浴渗硼的特点

1) 盐浴渗硼设备比较简单，操作方便；可通过调整渗硼盐浴的配比来调整渗硼层的组织结构、深度和硬度。

2) 渗层与基体结合较牢，渗层致密，模具表面粗糙度不受影响。

3) 工艺温度低，加热均匀，且渗硼速度快，渗后可直接淬火。

4) 盐浴流动性较差，粘附于工件上的盐垢不易清洗，甚至直到淬火后仍可局部残存，应仔细清洗干净。带有小孔、不通孔的模具不宜进行盐浴渗硼。

(2) 盐浴渗硼工艺

常用盐浴渗硼渗剂成分及工艺见表9-11。

表9-11 常用盐浴渗硼渗剂成分及工艺

序号	渗剂成分（质量分数）	温度×时间 /℃×h	渗层深度 /mm	钢号
1	70% 硼砂 + 20% SiC + 10% Na ₃ AlF ₆	950×4	0.13	20
2	80% 硼砂 + 13% SiC + 3.5% Na ₂ CO ₃ + 3.5% KCl	950×3	0.12	20
3	70% 硼砂 + 20% SiC + 10% NaF	950×3	0.10	45
4	85% 硼砂 + 6.5% Na ₂ CO ₃ + 8.5% SiC	950×3	0.15	T10
5	87% 硼砂 + 10% Si-Fe 粉 + 1.5% NaCl + 1.5% Na ₂ CO ₃	930×3	0.13	45
6	75% ~ 79% Na ₂ B ₄ O ₇ + 10% KCl + 11% ~ 15% (SiC + Si-Fe)	850×1	0.022	45
7	71% Na ₂ B ₄ O ₇ + 12% NaCO ₃ + 6% NaCl + 11% SiC	930×3	0.06~0.08	40Cr
8	38% BaCl ₂ + 26% NaCl + 12% FeB + 24% 硼砂	950×3	0.10~0.12	20
9	5% ~ 10% Al + 10% NaF + 80% ~ 85% 硼砂	950×4	0.15	45
10	60% 硼砂 + 10% Si-Fe 粉 + 15% NaCl + 15% Na ₂ CO ₃	950×4	0.13~0.17	45
11	80% 硼砂 + 8% SiC（绿色）+ 5% Si-Ca 合金粉 + 3.5% Na ₂ CO ₃ + 3.5% K ₂ CO ₃	930×4	0.07~0.08	45

5. 膏剂渗硼

膏剂渗硼是固体渗硼的一种发展，渗硼剂是用固体渗硼剂粉末与粘结剂调制而成的。被渗模具表面涂上厚1~2mm的渗硼剂，装箱加热或在保护气氛中加热保温。

膏剂渗硼既保持了固体渗硼的优点，又可减少渗硼剂的消耗量，而易于局部渗硼，因此特别适宜于模具渗硼。常用膏剂渗硼渗剂成分及工艺见表9-12。

表 9-12 常用膏剂渗硼渗剂成分及工艺

序号	渗剂成分（质量分数）	温度 × 时间 /℃ × h	渗层深度 /mm	钢号
1	70% B ₄ C + 30% Na ₃ AlF ₆	950 × 4	0.14	20
2	60% B ₄ C + 40% Na ₃ AlF ₆	950 × 4	0.12	20
3	50% B ₄ C + 50% Na ₃ AlF ₆	950 × 4	0.10	T10
4	10% B ₄ C + 10% Na ₃ AlF ₆ + 80% CaF ₂	950 × 4	0.10	45
5	50% B ₄ C + 25% Na ₃ AlF ₆ + 25% CaF ₂	950 × 4	0.12	45
6	50% B ₄ C + 15% Na ₃ AlF ₆ + 35% CaF ₂	950 × 4	0.13	45
7	70% B ₄ C + 26% Na ₃ AlF ₆ + 4% CaF ₂	950 × 3	0.14	40Cr
8	60% ~ 80% B - Fe + 10% ~ 15% Na ₃ AlF ₆ + 5% ~ 10% NaF + 2% ~ 5% (NH ₂) ₂ CS, 粘结剂为硼胶	800 × 3	0.10	45
9	25% ~ 35% H ₃ BO ₃ + 40% ~ 50% 稀土合金 + 10% ~ 15% B ₄ C + 8% ~ 15% Al ₂ O ₃ + 20% ~ 25% Na ₃ AlF ₆ , 粘结剂为呋喃树脂	980 × 8	0.50	45
10	10% B ₄ C + 80% CaF ₂ + 10% Na ₂ SiF ₆ , 粘结剂为 30% 松香 + 70% 酒精	930 × 3	0.10	45
11	95% B ₄ C + 5% KBF ₄ + 等量的 3% ~ 4% 硝化纤维粘结剂	1000 × 5	0.05	GT35 硬质合金

6. 真空渗硼

真空渗硼又称为真空硼化，是在真空环境中，将硼原子渗入工件表面形成极高硬度和耐磨性的热处理技术。与普通热处理相比，其渗速快，渗层质量好。真空渗硼方法有真空气相渗硼、真空固相渗硼两种。

(1) 真空气相渗硼

真空气相渗硼采用冷壁式电阻真空炉，以三氯化硼和氢气按 1:5（体积比）混合的气体作为渗剂，气体流量为 40L/h（与炉子大小、装料量有关）。真空度控制在 2.6×10^4 Pa 左右。在 2.6×10^4 Pa 以下，随压力升高，渗层厚度增加。一般渗硼温度为 850 ~ 900℃，保温 2h，渗层厚度为 0.08mm，保温 6h，渗层厚度为 0.18mm。

(2) 真空固相渗硼

真空固相渗硼设备如图 9-5 所示。

通常以非结晶硼粉（纯度 > 99.5%）+ 硼砂（质量分数为 16% ~ 18%）+ 碳化物（质量

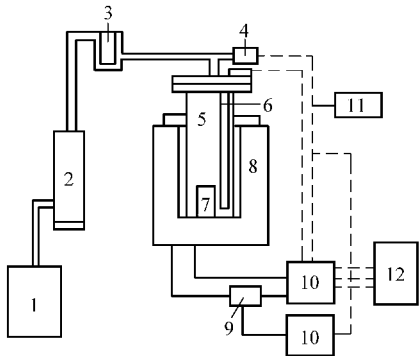


图 9-5 真空固相渗硼设备

- 1、2—真空泵 3—分离器 4—真空规管
5—真空马弗炉 6—热电偶 7—试样及渗剂杯
8—电阻炉 9—磁力起动器 10—真空电位计
11—真空压力表 12—电源

分数为 12% ~ 14%) 的粉末为渗硼剂。

真空渗硼可使钢表面形成极硬的硼化铁渗层, 其硬度高达 1600 ~ 2000HV, 具有高耐磨性、耐热性和耐蚀性。许多要求高耐磨性的机械零件与工具、模具均可采用真空渗硼处理, 以提高使用寿命。

7. 气体渗硼

气体渗硼是指将工件置于含硼气体介质中加热实现渗硼的化学热处理工艺。具有渗透快、渗层均匀致密、气氛可调、易于实现批量生产等优点。

渗硼气体为 BCl_3 , 载气为 H_2 , 体积比为 $\text{BCl}_3 : \text{H}_2 = 0.05 \sim 0.10$, 在渗硼温度下通入密封炉内, 从而发生化学反应, 生成活性硼原子 $[\text{B}]$ 渗入钢内与 Fe 形成 Fe_2B 或 FeB 。

该法采用的供硼剂三氯化硼、烷基硼化物等有剧毒或易爆, 且腐蚀性较强, 导致气体渗硼设备复杂, 因此气体渗硼在工业上使用较少。

目前, 有一种滴注式气体渗硼的方法。采用普通滴注式气体渗碳炉, 将炉子加热到渗硼温度, 同时向炉内滴入由硼酸三甲酯、甲醇和氯化稀土配制的渗硼剂, 并使其分解。由硼酸三甲酯分解出的硼原子通过吸附、扩散在钢件表面形成硼化物。该方法渗层均匀、致密, 表面质量好; 渗层深度和表面含硼量均可控制; 工件渗后无须清理, 并可渗后直接淬火; 渗剂无剧毒、无爆炸性, 工作环境相对较好, 劳动强度低; 不需要专门设备, 常用的渗碳炉即能满足要求; 可以处理各种形状和尺寸的工件, 可容易地实现自动控制, 生产率高, 操作方便, 适用性强。

8. 电解渗硼

用电解法在熔融含硼介质中进行渗硼的化学热处理工艺称为电解渗硼。电解渗硼法是在渗硼盐浴中, 以工件为阴极, 以耐热钢或不锈钢坩埚为阳极, 通以直流电进行渗硼处理的一种方法。

(1) 电解渗硼的特点

- 1) 设备简单, 渗硼速度快, 安全防护较容易。
- 2) 渗层厚度和渗层的相组成可以用调整电流密度的办法予以控制。
- 3) 可以利用价格便宜的渗剂。因此, 电解渗硼法自 1934 年问世以来发展迅速, 多用于工具、模具和耐磨、耐蚀工件。
- 4) 由于电解法只适用于形状比较简单的工件, 且对坩埚材料有腐蚀性, 同时存在盐浴易老化和工件清洗困难等问题, 因此电解渗硼技术的广泛使用受到一定的限制。

(2) 电解渗硼工艺

电解渗硼在生产中应用较为方便, 有下列几种方法。

1) 硼砂浴中电解渗硼。在硼砂浴中电解渗硼时, 以工件为阴极, 预先用硼砂浸渍过的石墨作阳极 (或以石墨衬里、耐热钢外套的坩埚作阳极)。电流密度为 $0.15 \sim 0.35 \text{ A/cm}^2$, 处理温度为 $930 \sim 950^\circ\text{C}$, 时间为 $2 \sim 6 \text{ h}$, 渗层厚度为 $0.15 \sim 0.35 \text{ mm}$ 。

2) 硼砂浴中加入 $\text{NaCl} 7.5\%$ 或 $\text{NaF}_2 0.5\%$ (质量分数), 可改善硼砂浴的流动性, 加速工艺过程, 工件上也不结硬壳。所用电规范与 1) 相同。

3) 以 LiF 、 NaF 、 KF 等作为溶剂, 将块状硼装在钢筐内作阳极, 工件为阴极, 在

Ar 或 H_2 及 N_2 的气氛保护下进行电解渗硼。电流密度为 $0.5 \sim 2.5 A/cm^2$ ， $800 \sim 900^\circ C$ 保持 $15min \sim 5h$ ，可得 $0.0125 \sim 0.5mm$ 的渗层。

4) 两种较新的电解盐浴配方（质量分数）及电参数。

I 号浴： $B_2O_3 55\% + Na_2B_4O_7 35\% + NaF 10\%$ 。

II 号浴： $B_2O_3 55\% + Na_2B_4O_7 35\% + NaF 10\% + NaCl 5\%$

渗硼条件：电流密度为 $0.1 \sim 0.25 A/cm^2$ ，温度为 $650 \sim 850^\circ C$ ，渗硼时间为 $1.5 \sim 3.5h$ 。渗后用清水煮沸 $10 \sim 15min$ ，即可将粘在工件上的残盐完全清除，工件表面光洁。这种渗剂使用寿命较长，对环境无污染。当其渗硼能力下降时，加入 $AlF_3 1\% \sim 2\%$ （质量分数），即可恢复其原有能力。

5) 低温电解渗硼工艺。其过程是在成分（质量分数）为 $Na_2B_4O_7 60\% \sim 75\%$ 和 $PbO 25\% \sim 40\%$ 的盐浴中工件接阴极，于 $550 \sim 600^\circ C$ 、电流密度为 $0.1 \sim 0.2 A/cm^2$ 的条件下渗硼 $5 \sim 10h$ ，可得到较满意的结果。

9. 硼氮复合渗

模具进行硼氮共渗，可有效地提高模具使用寿命。渗硼后的模具既具有渗硼层的高硬度、高耐磨性和高耐热性，同时渗层脆性较小，从而提高了过渡层的强韧性，而且较单独渗硼层更深，具有更高的压缩应力和更高的抗拉强度，并具有一定的塑性和韧性。

(1) 工艺 I

实例 3Cr2W8V 钢模具零件复合渗工艺。

1) 复合渗渗剂：工业纯高硼铁、尿素、SiC、氟硼酸钾等。

2) 设备：复合渗容器可用碳素钢或不锈钢焊成，可在 RJX309 型电阻炉和 SRJX813 型高温电阻炉中进行。

3) 复合渗工艺：将模具工件加热 $570^\circ C \times 3h + 900^\circ C \times 8h$ 。复合渗结束后，升温至 $1050^\circ C$ 保温 $2h$ ，油淬； $550 \sim 650^\circ C \times 2h$ ，回火三次。

复合渗温度对 3Cr2W8V 钢渗层深度的影响见表 9-13。

表 9-13 复合渗温度对 3Cr2W8V 钢渗层厚度的影响

温度/ $^\circ C$	850	900	950
渗层厚度/mm	0.0435	0.0497	0.0750

注：复合渗时间为 $4h$ 。

复合渗保温时间对 3Cr2W8V 钢渗层厚度及冲头寿命的影响见表 9-14。

表 9-14 复合渗保温时间对 3Cr2W8V 钢渗层厚度及冲头寿命的影响

保温时间/h	渗层厚度/mm	寿命/件
4	0.0497	5000 ~ 9000
5	0.071	7000 ~ 10 000
8	0.0923	6000 ~ 9000
10	0.1071	6000 ~ 9000

4) 结果: 复合渗后的硼化合物硬度为 1400 ~ 1800HV, 其表层组织主要是 Fe_2B 相, 过渡层是碳的富集区, 主要是 Fe_3C 相; 氮的富集区主要是 Fe_3N 。复合渗后形成的复合组织, 使模具的使用寿命有较大提高。

(2) 工艺 II

实例 1Cr18Ni9Ti 不锈钢模具零件复合渗工艺。

1) 复合渗剂 (质量分数): 5% B_4C + 5% KBF_4 + 1% 活性炭 + 0.5% NH_4Cl + 5% $(\text{NH}_3)_2\text{CO}_3$, 其余为 SiC 。

2) 工艺: 将工件清洗干净, 烘干, 装入共渗箱内。模具经 $580^\circ\text{C} \times 3\text{h} + 900^\circ\text{C} \times 8\text{h}$ 加热, 炉冷至 400°C 出炉冷却。

3) 结果: 模具表层显微硬度为 1553 ~ 1980HV, 共渗层厚度为 0.05 ~ 0.08mm。表层组织为 $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$, 次层为 $\text{Fe}_2\text{B} + \alpha - \text{Fe}$, 第三层为 $\text{Fe}_2\text{B} + \alpha - \text{Fe} + \gamma - \text{Fe}$ 。经硼氮共渗处理的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢模具, 使用寿命提高 1.5 ~ 2 倍。

10. 渗硼工艺的应用

渗硼工艺是现代发展起来的一种新型热处理工艺。渗硼后由于具有高硬度和良好的热硬性, 其耐磨性优于渗碳、渗氮, 高温下抗氧化性好, 并具有一定的耐蚀性, 已经成为模具表面扩散渗入处理的常用工艺。但渗层薄, 脆性大, 与基体的结合方式是机械楔合, 很不牢固, 加上各种不同硼化物与基体之间膨胀系数不同, 在受力情况下, 容易剥落和开裂, 应用受到一定限制。模具渗硼工艺及使用寿命见表 9-15。

表 9-15 模具渗硼工艺及使用寿命

模具名称	材料	渗硼工艺参数	使用寿命	备 注
拉深凹模	CrWMn 9CrWMn	930 ~ 950℃ 3 ~ 4h	7 万 ~ 10 万次	未渗硼的使用寿命约为几千次
冷镦六角螺母用凹模	Cr12MoV	950 ~ 960℃ 6h	5 万 ~ 10 万次	未渗硼的使用寿命为 3000 ~ 5000 次
落料拉深凹、凸模	CrWMn 9CrWMn	900 ~ 930℃ 2 ~ 3h	7 万 ~ 10 万次	未渗硼的使用寿命约为几千件
拉深模	T8A	930 ~ 950℃ 3 ~ 5h	1000 ~ 1 万件	未渗硼的使用寿命为几十至 1000 件
拉深模	T10A	930 ~ 950℃ 3 ~ 5h	5000 件后 仍可使用	未渗硼的使用寿命仅为几百件
冷镦模	T8A	930 ~ 950℃ 3 ~ 5h	10 万件后 仍可使用	未渗硼的 T8A 钢使用寿命为 3000 ~ 4000 件 未渗硼的 Cr12 钢使用寿命为 3000 ~ 5000 件
冷挤压模	W18Cr4V	970 ~ 990℃ 5h	4000 件还未 损坏	原用 Cr12MoV 钢未渗硼, 使用寿命为 500 件左右

注: 1. 渗硼剂原料选用化学纯的氟硼酸钾和碳化硅。渗剂配比 (质量分数) 为 7% KBF_4 + 93% SiC 。旧渗剂在添加质量分数为 20% 的新渗剂后, 可重复使用。模具渗硼后表面为银灰色, 硬度为 1468HV0.05, 渗层厚度为 0.09 ~ 0.11mm, 渗层金相组织为单相 Fe_2B 。

2. 由于渗层脆性高, 淬火时易产生裂纹。渗硼温度与淬火温度相近时, 最好是渗硼与淬火结合进行。

9.1.6 模具零件的渗铬

渗铬是通过加热扩散使铬元素渗入工件表面而形成无孔隙铬合金层的一种化学热处理方法。其工艺是将模具置于渗铬介质中,在高温下通过表面吸收以及 Cr、Fe、C 相互扩散,在模具表面形成一层高 Cr 银灰色化合物渗铬层。主要用于处理黑色金属,如不锈钢、镍基合金及难熔金属等的表面强化。渗铬层具有如下特点:

1) 具有高硬度。高温渗层的硬度均为 2000 ~ 2400HV,低温渗层一般为 1200 ~ 1700HV。在铬碳化合物中, $M_{23}C_6$ 的硬度为 1300 ~ 1400HV,且该碳化物层易处于拉应力状态。 M_7C 的硬度随成分有所变化,一般为 1800 ~ 2300HV,且有较高的韧性,渗铬后处于压缩应力状态,因此这种碳化物渗层有较好的性能。

2) 提高耐磨性。对钢来说,基体中碳化物的成分、类型、形状、大小和分布状态对其耐磨性均有影响,其中以碳化物的硬度和数量的影响为最大。渗铬层中的铬碳化合物有很高的硬度,并且含量大且比较致密,一般都有较好的耐磨性。

3) 具有较高的耐蚀性。渗铬后形成一层致密的铬碳化合物层,具有较高的耐蚀性。但是渗铬层的耐蚀性对不同的介质表现出不同的抵抗能力,如各种钢渗铬后对硝酸的耐蚀性均很好,对盐酸的耐蚀性则很差。

4) 具有抗高温氧化性。渗铬能提高抗高温氧化性。其中铬铝共渗比单纯渗铬或渗铝具有更好的抗氧化性和耐蚀性,适用于钢铁、镍基合金、钴基合金等。铬铝硅三元共渗可获得更好的高温抗氧化性、高温耐蚀性和热疲劳抗力。

5) 提高热硬性。高碳钢渗铬得到的铬碳化合物层具有良好的热硬性,在 800℃ 以下能保持高硬度。但是单纯渗铬的高碳钢在高温长时间工作将导致渗铬层的铬向钢心部再扩散,从而导致渗层表面硬度的下降。为了防止铬的再扩散,可采取复合渗减缓铬的再扩散过程。

根据介质的物理状态不同可分为固体渗铬、盐浴渗铬和气体渗铬三大类。

1. 固体渗铬

(1) 固体渗铬工艺

1) 模具零件的固体渗铬是在渗铬罐内进行的,渗铬罐用不锈钢或耐热钢制成。模具工件渗铬前需除净其表面油污、锈斑后与渗剂一起放入罐中,工件间距大于 1mm,模具装箱后,先盖上内层箱盖,经 300℃ 烘烤 40 ~ 60min,使 NH_4Cl 部分分解,排除渗罐内残留空气,然后立即用水玻璃耐火泥封住内层箱盖,并在 80℃ 以下烘干,内、外层间用铸铁屑填满,以减少和防止渗剂和试样氧化,再以耐火泥封好外层箱盖。

2) 模具工件罐密封后在电炉中升温,于 200℃ 左右焙烘,缓冷后再次加固密封,升温到 950 ~ 1000℃,并保温 5 ~ 10h,然后随炉冷至 600℃,将工件罐取出空冷,到室温后取出工件可用加热的 Na_2CO_3 液体清洗。需热处理的模具重新加热淬火。渗铬层厚度为 0.02 ~ 0.04mm,表面硬度为 1300 ~ 1500HV。

(2) 固体渗铬剂

固体颗粒渗铬剂市场上有供应,铬铁粉的粒度和 Al_2O_3 粉的粒度均为 0.075 ~

0.150mm。但渗铬剂一般都是自行配制，目前常用的配方（质量分数）为：50% 铬粉，2% 氯化铵，48% 氧化铝。使用前氧化铝粉需经 1100 ~ 1200℃ 焙烘。市场上销售的颗粒状渗铬剂是上述三种成分混匀后加入粘结剂制成的颗粒，低温烘干，使用时比自配的粉末方便，劳动条件也较好。粉末渗铬剂可重复使用，但重复使用时，需外加质量分数为 20% 的 NH_4Cl 与质量分数为 5% ~ 15% 的新剂料。固体渗铬的工艺与配方见表 9-16。

表 9-16 固体渗铬的工艺与配方

序号	渗剂成分（质量分数）	渗铬温度 × 时间/℃ × h	渗层厚度 /μm	备注
1	50% Cr - Fe + 47% ~ 48% Al_2O_3 + 2% ~ 3% NH_4Cl	950 × 4	14 ~ 15	含 Si、Mo、W 等的合金钢
2	67% Cr - Fe + 30% Al_2O_3 + 3% NH_4Cl	950 × 4	10 ~ 12	各种钢制工件
3	75% Cr - Fe + 22% Al_2O_3 + 3% NH_4Cl	950 × 4	10 ~ 14	工业纯铁
4	65% Cr - Fe + 30% Al_2O_3 + 5% NH_4Cl	950 × 4	8 ~ 15	工具钢
5	65% ~ 70% Cr - Fe + 30% ~ 35% 硅胶 + 2% NH_4Cl	950 × 4	6 ~ 8	中碳钢及合金钢
6	50% Cr - Fe + 0.5% NaBF_4 + 47.5% Al_2O_3 + 2% NH_4Cl	1100 × 6.5	25	45 钢
7	50% Cr 粉 + 50% Al_2O_3 + 5% ~ 7% NH_4Cl	1050 × 8	28	Cr12 钢

（3）固体渗铬的应用

固体渗铬层厚、无孔、与基体结合牢固，渗层光洁、致密，且可以在形状复杂的工件上得到均匀的渗层。模具经渗铬后寿命可显著提高。

3Cr2W8V 钢热作模具 1050℃ × 15h 渗铬，渗铬后 550℃ × 1h 预热，1050℃ 加热后淬入热油，冷至 100 ~ 200℃ 后用沸腾的 Na_2CO_3 液体清洗 1h。上冲头于 550℃ × 3h（冲头顶部先于 650℃ × 0.5h 回火）空冷到室温后再 180℃ × 2h 回火，下模 650℃ × 3h 回火。模具使用寿命较常规热处理提高 7 ~ 8 倍。

2. 盐浴渗铬

盐浴渗铬是以二氧化铬为供铬剂、铝或硅钙稀土等为还原剂，加入硼砂熔盐中，经加热保温，可获得 15 ~ 18μm 的渗铬层。具有优良的耐磨性、抗高温氧化性和耐磨性。适用于碳素钢、合金钢和镍基或钴基合金工件的表面强化处理。

（1）盐浴渗铬工艺

盐浴渗铬在坩埚内进行，较固体渗铬方便易行。盐浴渗铬渗剂的成分配比（质量分数）一般为 Cr_2O_3 粉 10% ~ 12%、Al 粉 3% ~ 5%、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 85% ~ 90%。处理工艺温度为 1000 ~ 1050℃，保温 6 ~ 8h。盐浴渗铬剂成分与工艺见表 9-17。

表 9-17 盐浴渗铬剂成分与工艺

序号	钢种	盐浴成分 (质量分数)	渗铬温度 × 时间 /℃ × h	渗层厚度/μm
1	45	5% 铬粉 + 95% 硼砂	950 × 4	14 ~ 16
2	45	10% 铬粉 + 90% 硼砂	950 × 4	17
3	45	15% 铬粉 + 85% 硼砂	950 × 4	15
4	45	10% Cr ₂ O ₃ + 5% Al + 85% 硼砂	950 × 4	15
5	T8	70% ~ 80% BaCl ₂ + 10% ~ 15% NaCl + 10% ~ 15% CrCl ₂	1000 × 4	30 ~ 35
6	T10	70% BaCl ₂ + 20% CaCl ₂ + 10% CrCl ₂	1000 × 4	40
7	45	15% Cr ₂ O ₃ + 12.5% 稀土硅镁 + 72.5% 硼砂	950 × 4	15
8	45	65% Na ₂ B ₄ O ₇ + 20% Cr ₂ O ₃ + 5% B ₄ C + 10% NaF	950 × 4	15 ~ 17
9	65Mn	10% ~ 12% Cr ₂ O ₃ + 3% ~ 5% Al 粉 + 85% ~ 90% Na ₂ B ₄ O ₇	1000 × 6	15 ~ 18
10	Cr12MoV	12% Cr ₂ O ₃ + 5% Al 粉 + 85% Na ₂ B ₄ O ₇	980 × 6	8 ~ 10
11	W18Cr4V	12% Cr ₂ O ₃ + 5% Al 粉 + 90% Na ₂ B ₄ O ₇	980 × 6	10 ~ 15

渗铬后可直接淬火，或冷却后重新加热淬火。回火后，再清理表面。

(2) 盐浴渗铬与材料的关系 (表 9-18)

表 9-18 不同材料盐浴渗铬后渗铬层厚度及硬度比较

材料	45	T10	5CrNiMo	CrWMn	GCr15	Cr12MoV	3Cr2W8V
渗层厚度/μm	12.50	14.55	8.1	8.1	10.56	7	5
渗层硬度 HV	1604	1537	1498	1498	1665	1532	1600

注：950℃ × 4h。渗剂配方为 15% Cr₂O₃ + 12.5% 稀土硅镁 + 72.5% 硼砂。

(3) 盐浴渗铬的应用

1) 中、高碳钢及合金钢渗铬后，形成高硬度、高耐磨性、高耐蚀性和抗高温氧化性的铬化合物层，表层硬度分别可提高到 1300 ~ 1500HV 和 1700 ~ 1800HV。耐磨性、抗磨粒磨损性能优良。例如，45 钢渗铬处理后比调质态的磨损量降低 95% 左右。

2) 高碳钢或中、高碳合金钢冷、热作模具应用比较广泛。

① H13 钢制造铝型材热挤压模，经盐浴渗铬后，在表面形成了 5 ~ 6μm 的碳化铬层，且在次表层呈贫碳区，形成软带。这样的复合组织，使模具使用寿命有很大提高。

② 若 H13 钢热作模具先经 930℃ × 4h 渗碳，再经 980℃ × 4h 盐浴渗铬（盐浴配方见表 9-17 中的第 7 种）后，次表层有了足够的含碳层并有利于碳化铬层的形成。模具经渗碳、渗铬后淬火、回火，模具使用寿命较原渗氮模具使用寿命提高 50% 以上。

③ T8A 钢制造的罩壳拉深模，经常规热处理，每拉深 100 ~ 200 件需修磨一次，但经盐浴渗铬处理后，可拉深 1000 件以上。

3. 气体渗铬

气体渗铬将工件放于密封渗铬罐内，抽真空，加热，把干燥氢气（或氩气）通过

浓盐酸得到 HCl 气体后引入渗铬罐,在罐的进气口处放置铬铁粉。在 980 ~ 1100℃ 高温加热时,铬铁粉与 HCl 生成氯化亚铬气体。当生成的氯化亚铬气体掠过零件表面时,通过 4 ~ 8h 的置换、还原、热分解等反应,在零件表面沉积铬,从而获得渗铬层。

气体渗铬速度较快,但氢气容易爆炸,氯化氢具有腐蚀性,故应注意安全。一般采用半真空渗铬法。将铬粒或铬铁颗粒先装入渗铬罐中,装入真空室,抽真空。加热升温到 980 ~ 1100℃ 渗铬,保温 8 ~ 12h 后,随炉冷至 250℃ 出炉空冷,清洗后进行最终热处理。

气体渗铬适用于大规模生产,固体渗铬适用于单件生产,涂覆渗铬适用大型设备渗铬,盐浴渗铬方便易行。

无论是粉末法或盐浴、熔盐法渗铬,处理温度都较高,可达 1000 ~ 1150℃,因此模具在渗铬后需进行正火或淬火、回火,以改善其心部组织性能。近年来还出现了各种快速渗铬的研究,例如真空渗铬、膏剂高频加热渗铬、在活性粉末混合物中快速渗铬等。

9.1.7 电火花表面强化处理

电火花表面强化是利用工具电极与工件间在气体中产生的火花放电作用,把作为电极的导电材料熔渗进工件表层,形成合金化的表面强化层,改善工件表面的物理及化学性能的工艺。

1. 电火花表面强化处理的特点

1) 电火花表面强化层的性能主要取决于模具本身和电极材料,通常所用的电极材料有 TiC、WC、ZrC、NbC、Cr₃C₂、硬质合金等。

2) 电火花强化的表面因电极材料的沉积而发生有规律的、较小的长大,除此之外,模具没有其他变形,其心部的组织与性能也不发生变化,因此十分适合用于模具表面强化处理。

2. 电火花表面强化的原理与过程

金属电火花表面强化的原理是在工具电极与模具之间接上直流电源或交流电源,由于振动器的作用使电极与模具间的放电间隙频繁变化,工具电极与工件间不断产生火花放电,从而实现对金属表面的强化,如图 9-6 所示。

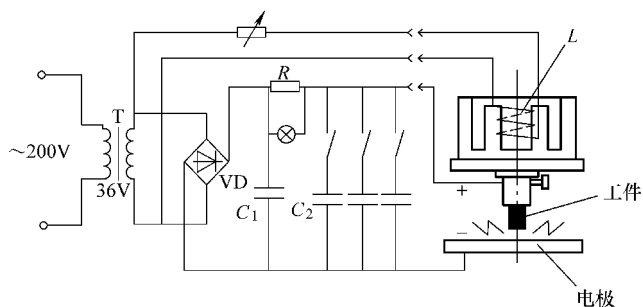


图 9-6 金属电火花表面强化的原理

(1) 电火花表面强化过程

电火花表面强化过程如图 9-7 所示。

1) 当电极与模具之间的距离较大时, 电源经电阻 R 对电容充电, 电极在振动器的带动下向模具靠近 (图 9-7a)。

2) 当电极与模具之间的间隙接近某个距离时, 间隙中的空气在强电场的作用下电离, 产生火花放电 (图 9-7b), 使电极和模具发生放电部分的金属局部熔化, 甚至汽化。

3) 电极继续接近模具并接触模具时, 火花放电停止, 在接触点流过短路电流, 使该处继续加热, 电极以适当的压力压向模具, 使熔化的材料互相粘接、扩散而形成合金或新的化合物 (图 9-7c)。

4) 电极在振动器的作用下离开模具, 模具放电部分急剧冷却 (图 9-7d)。经多次放电, 并相应地移动电极的位置, 则会在模具表面形成强化层。

钢制模具工作表面的电火花强化通常采用硬质合金电极。为了使被强化的表面光洁, 事先必须将模具和电极表面清洗干净, 然后手持振动器, 将电极沿模具工作表面移动, 并保持适当压力, 使火花放电均匀连续。

电火花熔渗合金化层的形成是一个渐进过程, 在每一电规范下, 为使合金化层厚度出现最大值, 在通常使用的电容范围内, 最佳单位面积涂覆时间为 $6 \sim 12 \text{ min/cm}^2$, 过分延长涂覆时间将出现层厚减薄的趋势, 并使性能恶化, 可用直线方程式表示为

$$\tau = 0.02C + 5.55$$

式中 τ ——最佳单位面积涂覆时间;

C ——电容 (μF)。

如电极为 YG8、电压为 60V、频率为 250Hz、电容为 $60\mu\text{F}$ 时, 最佳单位面积涂覆时间为 6.75 min/cm^2 , 合金化层厚度为 $13\mu\text{m}$; 电容为 $322\mu\text{F}$ 时, 最佳单位面积涂覆时间为 11.9 min/cm^2 , 合金化层厚度为 $27\mu\text{m}$ 。

为了降低合金化层的热疲劳应力和电火花合金化处理的应力, 可穿插 $1 \sim 2$ 次 $500^\circ\text{C} \times 4\text{h}$ 去应力退火, 这样可获得性能优良、层深较厚的表面合金化层。

改换电极材料, 可使合金化层继续增厚。电极断面尺寸不影响合金化层的厚度。钢中碳的质量分数小于 0.8% 时, 随钢中碳含量的增加合金层增厚; 碳的质量分数大于 0.8% 时, 随钢中碳含量的增加合金层变薄。

用 YG8、Nb、Ti、Ta 合金化, 工件表面将获得极高的显微硬度值。

(2) 强化过程中的物理化学变化

电火花表面强化过程中发生了物理化学变化, 主要包括超高速淬火、渗氮、渗碳、电极材料的转移等。

1) 超高速淬火。电火花放电在模具表面的极小面积上产生高温, 使该处的金属熔化和部分汽化, 当电火花放电在极短的时间内停止后, 被加热了的金属会以很快的速度

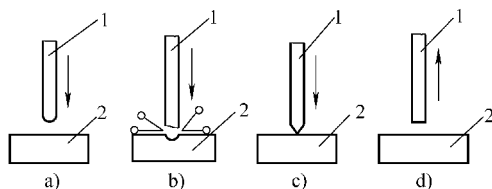


图 9-7 电火花表面强化过程示意图

a) 开始 b) 工作 c) 完成 d) 结束

1—工具电极 2—模具

冷却下来。这相当于对模具表面进行了超高速淬火。

2) 渗氮。在电火花放电通道区域内, 温度很高, 空气中的氮气分子呈原子状态, 它和受高温而熔化的金属元素合成高硬度的金属氮化物, 如氮化铁、氮化铬等。

3) 渗碳。来自石墨电极或周围的碳元素, 溶解在受热熔化的铁中, 形成金属的碳化物, 如碳化铁、碳化铬等。

4) 电极材料的转移。在操作压力和电火花放电的条件下, 电极材料转移到模具金属熔融表面, 金属合金元素 (W、Ti、Cr 等) 迅速扩散到金属的表面层中。

(3) 强化层特性与材料的关系

1) 当采用硬质合金作电极材料时, 硬度可达 1100 ~ 1400HV (约 70HRC 以上) 或更高, 耐热性、耐腐蚀性和疲劳强度都大大提高。

2) 当使用铬锰合金、钨铬钴合金、硬质合金作工具电极强化 45 钢时, 其耐磨性比原表层提高 2 ~ 2.5 倍。

3) 用石墨作电极材料强化 45 钢, 用食盐水做腐蚀性试验, 其耐腐蚀性提高 90%, 用 WC、CrMn 作电极强化不锈钢时, 耐腐蚀性提高 3 ~ 5 倍。

4) 硬化层厚度为 0.01 ~ 0.08mm。

3. 电火花表面强化处理在模具制造上的应用

电火花表面强化在模具上应用效果显著。例如用 YG8 作电极, 对 3Cr2W8V 钢模具进行电火花表面强化处理以后, 模具在各类酸碱中的耐蚀性提高 4 ~ 15 倍; Cr12 钢模具刃口部位经电火花表面强化处理后, 模具的平均使用寿命由 5 万次提高到 20 万次。

经电火花合金化处理的模具比未经处理的模具热疲劳性能提高 3 倍, 抗氧化性能提高 1 倍, 在各种试验介质中的耐蚀性提高 5 ~ 15 倍。3Cr2W8V 钢电火花合金化处理的效果见表 9-19。

表 9-19 3Cr2W8V 钢电火花合金化处理的效果

处理条件	抗疲劳性能 (出现裂纹的试验周次)	抗氧化性 平均增重/(g/cm ²)	耐蚀性 失重/(g/cm ²)	
			20% (质量分数) H ₂ SO ₄ × 16h	20% (质量分数) NaOH × 16h
未经处理	27 ~ 34	2.54×10^{-3}	6.72×10^{-2}	4.66×10^{-5}
经电火花合金化处理 (60V、140μF、YG8)	128 ~ 132	1.27×10^{-3}	0.422×10^{-2}	0.804×10^{-5}

9.2 模具的表面热处理

表面淬火是将钢件的表面层淬透到一定的深度, 而心部分仍保持未淬火状态的一种局部淬火的方法。表面淬火时通过快速加热, 使工件表面很快达到淬火的温度, 在热量来不及传到工件心部时就立即冷却, 实现表面或局部淬火。

9.2.1 高频感应淬火

高频感应淬火是利用感应电流通过工件产生的热量使工件表层、局部或整体加热并快速冷却的淬火。在热处理和表面强化技术领域占有重要地位，应用广泛。

1. 高频感应淬火的原理

(1) 工艺过程

高频感应淬火是将工件放入由空心铜管绕制的感应器中，然后向感应器通入一定频率的交流电，以产生交变磁场，使工件内产生频率相同的感应电流，其表面加热到淬火温度，而心部温度仍接近于室温，随后喷冷却介质或把加热后的工件放入冷却介质中快速冷却，从而达到模具表面淬火强化的目的，如图9-8所示。

(2) 工作原理

高频感应淬火是利用电磁感应的原理，线圈通以高频电流，产生高频磁场，使零件在交变磁场中切割磁力线，以涡流形式将零件快速加热，由于趋肤效应，感应电流聚积于材料的表面产生热，而在内部很弱，到心部接近于零，利用这个趋肤效应，可使工件表面迅速加热，在几秒钟内表面温度上升到 $800 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，激冷后可得到极细的隐晶马氏体组织。

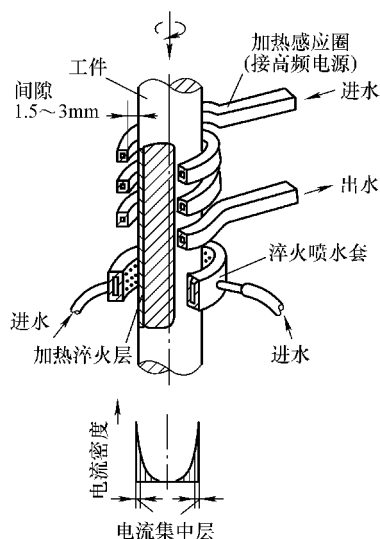


图9-8 高频感应淬火示意图

2. 高频感应淬火的类型

感应淬火使用的频率不同，可以分为超高频（27MHz）、高频（200~250kHz）、中频（2500~8000Hz）和工频（50Hz）。加热时感应电流透入工件表层的深度主要取决于交流电频率的高低。

1) 使用超高频时，感应电流透入深度极小，主要用于表面硬化层较薄的模具零件及锯齿、刀刃、薄件的表面淬火。

2) 使用高频时，感应电流透入深度很小（0.2~2mm），主要用于模具零件和小模数齿轮及小轴类零件的表面淬火。

3) 使用中频时，感应电流透入深度较小（2~5mm），主要用于有一定硬化层要求的模具及中、小模数的齿轮、凸轮轴、曲轴的表面淬火。

4) 使用工频时，电流透入深度较大（超过10mm），主要用于大型零件（ $\phi \geq 300\text{mm}$ ），如冷轧辊、火车轮表面淬火及棒料的穿透加热等，一般模具应用较少。

3. 高频感应淬火的特点

1) 高频感应加热属于内热源直接加热，加热速度快、热损失小，热效率高。加热过程中，由于加热时间短，零件表面氧化脱碳极微、变形小，并能进行选择性的加热，淬

火组织细，硬度比普通淬火高2~3HRC，耐磨性提高，且与其他热处理相比，零件废品率极低。

2) 感应淬火的机械零件脆性小，淬火后零件表面的硬度高，心部保持较好的塑性和韧性，表面呈现低的缺口敏感性，从而使零件的力学性能（如屈服强度、抗拉强度、疲劳强度）有很大的提高。

3) 感应加热是将极大密度的能量（ $>10^3 \text{W/cm}^2$ ）瞬时供给被处理工件的表面，使其发生相变、熔化、快速凝固和表面合金化的高密度能加热处理。电流频率越高，脉冲加热时间越短，淬硬层越浅。三种感应淬火技术特点的比较见表9-20。

表9-20 三种感应淬火技术特点的比较

项目	普通高频感应淬火	超高频冲击淬火	大功率脉冲感应淬火
频率	200 ~ 300kHz	27.12MHz	300 ~ 1000kHz
功率密度	200W/cm ²	10 ~ 30kW/cm ²	1 ~ 10kW/cm ²
最短淬火时间	0.1 ~ 5s	1 ~ 500ms	1 ~ 1000ms
淬硬层深度	0.2 ~ 2.5mm	0.05 ~ 0.5mm	0.1 ~ 1mm
淬火面积	由连续移动决定	10 ~ 100mm ² (最大宽度3mm)	100 ~ 1000mm ² (最大宽度10mm)
感应器电感	2 ~ 3μH	10 ~ 100μH	
感应器冷却方式	通水	单脉冲加热时无须冷却	通水或埋水冷却
淬火方式	喷水	自冷	埋水或自冷
组织	马氏体	极细马氏体	细马氏体
畸变	不可避免	极小	极小
淬火硬度	较电炉加热淬火高	超常硬度	超常硬度
适应范围	大、中型工件	小型、薄工件	中、小型工件

4) 感应加热设备可放置在加工生产线上，通过电气参数对过程进行精确的控制。利用感应淬火，可用普通碳素结构钢代替合金结构钢及渗碳钢制作零件而不降低零件质量，所以，在某些条件下可以代替工艺复杂的化学热处理。感应加热不仅应用于零件的表面淬火，还可以用于零件的内孔淬火，这是传统热处理所不能达到的。

5) 高频感应淬火对模具工件的原始组织有一定要求，应预先进行正火或调质处理，以使模具基体有较好的综合力学性能。高频感应淬火后的模具需进行低温回火，以降低淬火产生的内应力。

9.2.2 火焰淬火

火焰淬火是利用氧乙炔或其他可燃气体（如天然气、焦炉煤气、石油气等）以一定比例进行燃烧，形成强烈的高温火焰，将工件迅速加热至淬火温度，然后迅速冷却（冷却介质最常用的是水，也可以用乳化液），使工件表面获得要求的硬度和一定的硬

化层深度（淬硬层深度一般为2~6mm），而心部仍保持原有组织的一种表面热处理工艺，如图9-9所示。

1. 火焰淬火的工艺特点

1) 火焰淬火无须特殊设备，操作简便，成本低，但生产率低，零件表面存在不同程度的过热，加热温度不易控制，质量控制也比较困难。一般只适用于单件小批量生产及需要局部淬硬的工具、模具等。这种方法既可用于中碳钢和中碳低合金钢，也可用于灰铸铁和合金铸铁件。

2) 通常采用的氧乙炔火焰温度高达2000℃以上，所以淬火加热时间很短，仅将工件表面加热到临界温度以上，而零件心部却没有发生变化。零件的表面加热温度一般以目测来判断，表面加热温度过高，奥氏体晶粒容易长大，冷却后表层就会得到粗针状马氏体，使性质变脆。因此加热时必须注意控制加热温度和加热速度。

3) 火焰淬火的工件不受形状大小的限制，特别适合大型模具零件和小批量多品种模具零件的热处理，如汽车车身覆盖件大型拉深模、大型塑料模、大型冲模等模具零件的刃口，此类零件的火焰淬火有其独特的特点，且能降低生产成本。

2. 火焰淬火的工艺控制

(1) 加热方法

火焰淬火属于外热源由表及里的传导加热，加热温度高，加热快，所需时间极短，因而热由表向内部传播的深度浅，要注意加热方法的选择，否则会影响淬火质量。加热时，根据模具零件的不同形状和不同技术要求，可以选择同时加热法或连续加热法。小型零件或大件局部加热淬火常采用同时加热法，圆形零件周围淬火则采用连续加热法。

(2) 加热温度的确定

由于火焰淬火的加热速度很快，且淬火加热温度较普通整体加热温度高得多，一般取 $A_{c_3} + 80 \sim 100^\circ\text{C}$ ，奥氏体晶粒在短时间内易长大。各种钢及铸铁的加热温度见表9-21。

表 9-21 各种钢及铸铁的加热温度

钢 及 铸 铁	加热温度/℃
灰铸铁、球墨铸铁	900 ~ 1000
T8A、T10A、50Mn、65Mn	860 ~ 980
45、ZG310 - 570、50、ZG340 - 640	880 ~ 1000
40Cr、35CrMo、42CrMo、40CrMnMo、35CrMnSi	900 ~ 1020
9SiCr、GCr15、9Cr2、7CrSiMnMoV (CH1)	900 ~ 1020
20Cr13、30Cr13、40Cr13	1100 ~ 1200

(3) 淬火速度与淬硬层的关系

在其他工艺参数相同的情况下，调节淬火速度的快慢可得到不同的淬硬层深度。喷

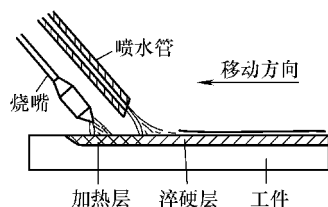


图 9-9 火焰淬火示意图

嘴和工件的相对移动速度一般为 50 ~ 200mm/min，移动速度由加热距离、淬火深度、钢材成分来决定。对于淬透性较好的合金钢，淬硬层深度一般可以在 2 ~ 8mm 进行调整。喷嘴移动速度与淬硬层深度的关系见表 9-22。

表 9-22 喷嘴移动速度与淬硬层深度的关系

移动速度/ (mm/min)	50	70	100	125	140	150	175
淬硬层深度/mm	8	6.5	4.8	3	2.6	1.6	0.8

(4) 喷嘴与加热面的距离

在淬火加热过程中，工件表面与喷嘴的距离一般应保持固定，使焰心距工件表面 1.5 ~ 3mm，这样可获得较均匀的加热层，较高的热效率。当工件的截面大、碳含量低时，这个距离可适当减小；若工件的截面小、碳含量高，则这个距离就应适当增大。

(5) 火孔与水孔的距离

采用连续加热淬火法，喷嘴火孔与水孔间的距离是否合适，将直接影响淬火质量。距离太大，可能使淬硬层过深或淬不上火；距离太小，淬火温度高，变形大，容易使火焰熄灭或产生回击现象。根据各种钢号淬透性的差别，火孔与水孔的距离可在 10 ~ 25mm 变动。为了使水花不溅在焰心处，应使喷出的水柱后倾 10° ~ 30°，火孔与水孔间应有挡水板。

(6) 淬火冷却介质的确定

根据零件材料、技术要求和淬火方式，可选用水、聚乙烯醇水溶液等作为淬火冷却介质。

(7) 回火温度的选择

表面淬火后必须进行回火，以消除淬火应力，防止变形与开裂。通常回火温度为 180 ~ 220℃，大型模具可采用自回火的方式。

3. 火焰淬火工艺的应用

1) 火焰淬火在模具制造中获得广泛应用。例如：汽车车身覆盖件大型拉深模、生产大型塑料制品的塑料模和大型冲模等零件的刃口，利用火焰淬火具有其独特的优点，且可降低成本。但目前多采用手工火焰淬火，缺点较多，质量难以控制。目前，正在研究火焰淬火的机械化、自动化控制方法，热处理质量能够得到进一步提高。

2) 火焰淬火后能得到的最高硬度，取决于钢的碳含量、淬火温度和冷却速度等因素。例如，7CrSiMnMoV (CH1) 火焰淬火冷作模具钢，其热处理工艺性特点是：淬火加热温度范围很宽 (850 ~ 1000℃)，在相差约 150℃ 的范围内淬火都能获得满意的效果，因此适宜手工操作火焰淬火，而且该钢的淬透性很高，空冷后表面硬度很高，心部性能也好，淬火变形小。该钢的研制成功简化了我国大型和特大型冷作模具的生产过程，降低成本 10% ~ 20%，热处理后节约能源 80% 左右。

9.2.3 电解液淬火

电解液淬火就是在一定条件下（一定的电解液以及一定的电流与电压）进行电解，

利用阴极效应来使工件（阴极）剧烈地加热，随即予以快速冷却，从而使工件的表面淬硬。

1. 电解液淬火的特点

1) 设备简单，淬火变形小，适合于单件、小批量生产或大批量形状简单工件的局部淬火。

2) 生产率高，易于实现自动化，成本较低，能保证产品质量，应用范围日益广泛。

3) 需要一套高压直流电发生装置，所需功率较大，操作不当会使加热不均匀，极易引起工件过热乃至熔化，但随着可控硅整流调压技术的应用，这一缺点将被克服。

2. 电解液淬火的原理与工艺

1) 工件（局部或全部）置于电解液中作为阴极，金属电解槽作为阳极。电路接通后，电解液发生电离，在阳极上放出氧，在阴极上放出氢。氢围绕工件形成气膜，产生很大的电阻，通过的电流转化为热能将工件表面迅速加热到临界点以上的温度。电路断开，气膜消失，加热的工件在电解液中即实现淬火冷却。电解液淬火原理如图 9-10 所示。

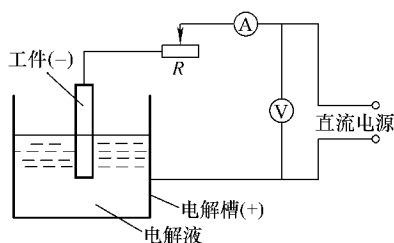


图 9-10 电解液淬火原理

2) 电解液淬火的加热是以直流电为电源在电解液中进行的，适用于表面淬火的电解液很多，可用酸、碱或盐的水溶液，质量分数为 5% ~ 18% 的 Na_2CO_3 溶液效果较好。电解液温度不能超过 60°C ，温度过高，氢气膜不稳定，影响加热过程，还会加速溶液的蒸发。常用电压为 160 ~ 180V，最高不超过 260V，电流密度为 $4 \sim 10\text{A}/\text{cm}^2$ ，通常可选用 $6\text{A}/\text{cm}^2$ 。电流密度过大时，加热速度快，淬硬层薄。45 钢齿轮电解液淬火工艺规范见表 9-23。

表 9-23 45 钢齿轮电解液淬火工艺规范

齿轮外径 /mm	浸液深度 /mm	齿轮转速 / (r/min)	电压 /V	电流 /A	加热时间 /min	淬火冷却 介质	内孔变形 /mm	表面硬度 HRC
210	11.3	46	260	120	3.0	水	-0.045	50 ~ 54
15	10.8	68	240	100	3.0	水	-0.040	51 ~ 55
84	4.2	68	240	100	2.5	水	+0.040	51 ~ 55
72	4.4	68	240	100	2.0	水	+0.030	51 ~ 55
42	4.2	104	220	95	1.3	水	+0.035	50 ~ 55

3) 在加热过程中，工件的位置应固定，否则会造成电流密度的变化，使淬硬层质量恶化。加热时间可通过试验确定。工件在电解液中可采用端部自由加热、端部绝缘加热、回转加热和连续加热等加热方式。

3. 电解液淬火的应用

可实现内孔淬火、刀片淬火、薄锯片淬火、轴承淬火等。在模具应用中，适用于小

型、简单工件的淬火。

9.3 模具的表面涂覆强化

9.3.1 模具表面的热喷涂

热喷涂技术是使基体（零件）表面强化和对表面进行防护的技术，是表面工程中的一门重要学科。热喷涂就是利用一种热源，如电弧、离子弧或燃烧的火焰等将粉末状或丝状的金属或非金属喷涂材料加热到熔化或半熔化状态，并利用热源自身的动力或外加高速气流雾化，使喷涂材料的熔滴以一定的速度喷向经过预处理的干净基体表面，依靠喷涂材料的物理变化和化学反应，与基体形成结合层的工艺方法。

1. 热喷涂技术的分类

一般按喷涂热源的种类、喷涂材料、涂层结合方式和涂层功能进行分类。

1) 按热源的种类热喷涂技术分为火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂和激光喷涂等方法。喷涂材料主要为丝状材料和粉末材料。

2) 按基体和涂层的结合，热喷涂可分为喷涂和喷熔两种方式。喷涂是基体材料不熔化，涂层与基体形成机械结合。喷熔是涂层与基体材料互熔并扩散形成冶金结合。

3) 按热喷涂涂层的功能可分为耐腐蚀涂层、隔热（热障）涂层、耐磨涂层、密封（间隙控制）涂层、抗高温氧化涂层、多功能涂层及装饰涂层等。

2. 热喷涂技术的特点

1) 喷涂材料广泛。除了金属和合金外，陶瓷、金属陶瓷、有机树脂、多种化合物和物理混合物都可使用热喷涂工艺进行喷涂，所获得的涂层性能也非常广泛。

2) 适应于各种基体材料的零件。包括各种金属材料和非金属材料（如玻璃、陶瓷、塑料、木材等）零件的表面均可以热喷涂。

3) 操作程序少，速度快，生产率高。例如，在铝合金底材上镀铬时，先要进行脱脂、腐蚀、锌酸盐等处理；冲击镀铜，一般要进行镀镍打底等预处理工艺。而热喷涂时，只需脱脂和喷砂。镀硬铬时施加的速度为 $0.0023\text{mm}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ，而几种可以代替镀硬铬的材料用等离子喷涂方法的施加速度为 $0.14 \sim 0.58\text{mm}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ 。大多数喷涂工艺方法的生产率可以达到每小时喷涂数千克喷涂材料，甚至高达 50kg/h 以上，显示出极高的生产率。综合成本低，经济效益显著。

4) 被喷涂零件尺寸范围较宽。既可以进行大面积的喷涂，也可以对大型构件进行局部喷涂。喷涂层可从几十微米到几毫米，表面光滑，加工量小，用特细粉末喷涂时，不加研磨即可使用。

5) 基体材料变形小。除喷熔外，热喷涂工艺均为冷工艺。例如，氧乙炔焰喷涂、等离子喷涂或爆炸喷涂，工件受热均不超过 250°C ，工件不会发生畸变，不会改变工件的金相组织。并可赋予普通材料以特殊的表面性能，例如，可以把韧性好的金属材料与塑料或硬脆的陶瓷材料相复合，形成表面复合材料。

6) 热喷涂涂层结合力低, 孔隙率高, 均匀性较差。但由于热喷涂涂层具有耐磨、耐蚀、减摩、抗咬合等性能, 可为工件提供耐磨而坚韧的热喷涂厚涂层, 因此特别适用于大型模具以及严重磨损条件下的模具修复。

3. 热喷涂常用的材料

金属及合金是热喷涂中应用最广、种类最多的材料。由于金属大多具有延展性, 所以它们既可制成粉末又可制成线材。改变合金的化学成分可以得到各种所需的物理性能和化学性能。

1) 铝和锌及其合金。铝和锌以及它们的合金是应用最早的热喷涂材料, 最初用于熔线式喷涂, 粉末式喷涂方法出现后也有制成粉末材料出现的。铝和锌都是比铁活泼的元素, 所以它们被广泛用于钢铁构件的防腐涂层, 既可耐大气腐蚀, 也可以作为牺牲阳极, 对钢铁基体起到电化学保护作用。铝和锌涂层, 如再进行封孔处理, 则其耐蚀性会有所提高。

2) 铜及铜合金。高纯度的铜可以制成导电涂层和美术装饰涂层(比如用于雕塑制品的喷涂)。在铝青铜中加入少量铁、镍、锰元素就会具有很好的耐蚀性, 特别是耐海水腐蚀的能力很强, 难溶于硫酸和盐酸, 但易溶于硝酸, 此外耐疲劳性和耐磨性也很好。磷青铜具有很好的耐磨性, 可用于轴承的耐磨涂层, 磷青铜涂层呈美丽的淡黄色, 所以也可用作装饰性涂层。

3) 钼。喷涂用的钼其纯度在 99.95% 以上, 既可是线材也可是粉末。由于钼与钢铁材料之间有良好的结合性能, 所以常用作打底层材料, 钼涂层还具有较好的耐磨性, 而且钼还是唯一能耐浓盐酸的金属。

4) 镍和镍合金。纯镍具有较好的耐蚀性, 是耐热浓碱液腐蚀最好的金属材料, 但不耐氧化性酸。镍铬合金是目前使用极广的耐磨、耐腐蚀材料, 既具有良好的耐酸、耐碱性, 又具有良好的耐热性, 其耐磨性随铬和碳含量的增加而提高。

镍和铜以及少量其他元素的合金称为蒙乃尔合金, 具有良好的耐蚀性、抗氧化性, 对盐水的耐蚀性和在中性或碱性盐类溶液中的耐蚀性都很强, 对非强氧化性酸的耐蚀性也较好, 但与铁接触时容易产生腐蚀。

4. 热喷涂技术的应用

1) 热喷涂技术可以对材料表面性能, 如耐磨性、耐蚀性、耐高温性等进行强化或再生, 起到保护作用, 并能对磨损、腐蚀或加工超差引起的零件尺寸减小进行修补恢复。

2) 热喷涂技术可以喷涂各种金属及合金、陶瓷、塑料及非金属(矿物)等大多数固态工程材料, 所以能制成耐磨、减摩、耐蚀、耐高温、抗氧化、绝热、绝缘、导电、防辐射、抗干扰、能量转换等各种功能涂层。

3) 随着热喷涂技术在现代航天技术和航天工业中的杰出贡献, 已引起了国内外的高度重视, 正在发展成为各种机械产品制造和设备维修的基础工艺之一。在模具制造或维修中, 对提高产品质量、延长使用寿命、改进产品结构、节约能源、节约贵重金属材料、提高工效、降低成本等都有重要作用。

9.3.2 模具表面的火焰喷涂

火焰喷涂是利用燃气乙炔、丙烷、甲基乙炔-丙二烯（MPS）、氢气或天然气与助燃气体氧混合燃烧作为热源，喷涂材料则以一定的传输方式进入火焰，加热到熔融或软化状态，然后，依靠气体或火焰加速喷射到基体上。

1. 火焰喷涂的方法

根据喷涂材料的不同，可分为丝材火焰喷涂和粉末火焰喷涂。

(1) 丝材火焰喷涂

1) 丝材火焰喷涂是利用氧乙炔燃烧的热源，将连续、均匀送入火焰中的喷涂丝材加热、熔融，再通过高压气体雾化成微粒状，直接喷射到预先处理过的工件表面，连续沉积形成金属、合金涂层。这种工艺方法是目前国内最常用的热喷涂技术之一，主要喷涂锌、铝、锌铝合金材料，用于大型钢结构件的长效防腐蚀。

2) 丝材火焰喷涂由丝材火焰喷涂枪进行喷涂。喷涂源为喷嘴，金属丝经过喷嘴中心，通过围绕喷嘴和气罩形成的环形火焰，金属丝的尖端连续地被加热到其熔点，然后，由通过气罩的压缩空气将其雾化成喷射粒子，依靠空气流加速喷射到模具基体材料上，从而熔融的粒子冷却到塑性或半熔化状态，也发生一定程度的氧化。粒子与基体撞击时变平并粘接到基体上，随后与基体撞击的粒子也变平并粘接到基体的粒子上，从而堆积成涂层，如图9-11所示。

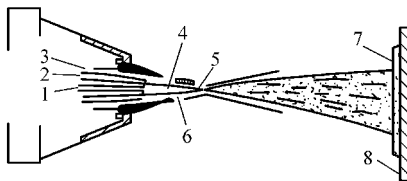


图9-11 丝材火焰喷涂枪进行喷涂

1—丝材 2—燃气和助燃气体 3—空气
4—火焰 5—熔丝 6—压缩空气
7—涂层 8—工件

3) 丝材的传送靠喷枪中的空气涡轮或电动机旋转，其转速可以调节，以控制送丝速度。采用空气涡轮的喷枪，送丝速度的微调比较困难，而且其速度受压缩空气的影响而难以恒定，但喷枪的质量轻，适用于手工操作；采用电动机传送丝材的设备，虽然送丝速度容易调节，也能保持恒定，喷涂自动化程度高，但喷枪笨重只适用于机械喷涂。

4) 丝材火焰喷涂效率高，但喷出的熔滴大小不均，使得涂层结构不均匀，孔隙率也较大，且拉丝喷涂材料的成形工艺受到限制。

(2) 粉末火焰喷涂

1) 粉末火焰喷涂是以氧乙炔火焰为热源，把自熔剂合金粉末喷涂在经过预处理的工件表面上，在保证工件不熔化的前提下，加热涂层，使其熔融并润湿工件，通过液态合金与固态工件表面的相互溶解、扩散，形成呈冶金结构并具有特殊性能的表面熔覆层，其装置如图9-12所示。

2) 粉末火焰喷涂与丝材火焰喷涂的原理基本相同，而且设备装置也基本与丝材火焰喷涂相类似。不同之处是喷涂材料不是丝材而是粉末。粉末火焰喷涂只是将送丝机构改为与喷枪固定规格的送粉装置，粉末材料可以是金属粉、合金粉、复合粉、碳化物粉、陶瓷粉。

3) 粉末火焰喷涂装置中一般没有压缩空气输入。喷涂粉末由送料罐内自由落下或由送粉装置送入, 通常是利用送粉气流产生的负压, 将粉末吸到喷嘴中流经喷枪内孔到达喷嘴端部的燃烧火焰中, 被加热和加速, 成为熔融粒子, 高速度地被喷射到基材表面, 沉积形成喷涂层。为了进一步提高粉末的飞行速度, 也可以像线材喷涂那样, 在火焰外围附加压缩空气。粉末火焰喷涂一般采用氧乙炔焰, 在喷涂塑料时, 也可用氧丙烷焰。粉末火焰喷涂的原理示意图如图 9-13 所示。

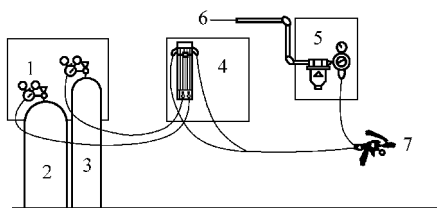


图 9-12 粉末火焰喷涂的典型装置图

1—气瓶 2—燃气 3—氧气 4—气体流量表
5—空气控制器 6—压缩空气 7—喷枪

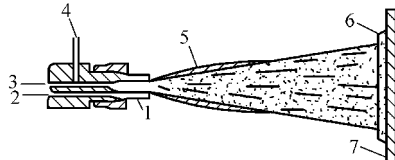


图 9-13 粉末火焰喷涂的原理示意图

1—喷嘴 2—氧气和燃气 3—气体 4—粉末
5—火焰 6—涂层 7—基体

4) 粉末火焰喷涂中一般没有压缩空气参与雾化、加速, 喷涂粒子的推动力直接来自燃料气的作用, 故喷涂粒子飞行速度较小, 涂层结合强度较低, 孔隙率较高。

5) 中性焰是最常用的热喷涂火焰, 中性焰喷涂时, 喷涂材料既不易被氧化, 也不会由于过剩乙炔的分解而带来增碳, 能较好地保证喷涂层的质量, 适用于任何金属及其合金的喷涂。

6) 粉末火焰喷涂喷枪喷出的颗粒速度较高, 火焰温度低, 因此涂层的结合强度及涂层本身的综合强度都较低, 且比其他喷涂方法得到的孔隙率高。

2. 火焰喷涂的特点

1) 可以喷涂各种金属、非金属如陶瓷、塑料及尼龙等材料, 应用非常广泛灵活。
2) 喷涂使用的设备轻便可移动, 可手提操作, 灵活方便, 价格低于其他喷涂设备, 经济性好, 是目前喷涂技术中使用较广泛的一种工艺。

3) 火焰中心最高温度约为 3000°C , 多为氧化性气氛, 喷涂材料在飞行沉积过程中冷却, 喷涂施工对基体的热影响很小, 基体受热温度不超过 200°C , 基体不会发生热变形和性能变化, 喷涂质量稳定。

4) 喷涂材料广泛, 喷涂层基本上都能满足耐磨性、抗氧化及修复处理等功能的要求。

3. 火焰喷涂的应用

1) 火焰喷涂应用范围广。在曲轴、机床主轴、柱塞、机床导轨、各种轴承处喷钢强化或修复; 对桥梁、高压铁塔、钢闸门及化工厂、化肥厂区的钢铁设施进行喷铝、镀锌防腐; 在滑动轴承轴瓦上喷铜合金、喷巴氏合金等材料, 形成磨合层。

2) 在模具表面强化应用方面, 由于火焰喷涂技术成本低廉, 操作方便, 尤其是近年来通过对此项技术的发展和完善, 已开发出性能优良的超声速火焰喷涂技术, 为模具

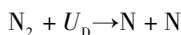
选用表面强化工艺带来实质好处。例如,采用超声速喷涂硬质合金工艺,可使 Cr12 钢制造的不锈钢拉深模的修模率从原来的 500 件/次提高到 7000 件/次,寿命提高了 3~10 倍,获得十分可观的经济效益。

9.3.3 模具表面的等离子喷涂

等离子喷涂是以氮气、惰性气体如氩气等作为工作介质,在专用的喷枪内发生电离形成热等离子体,再将进入该等离子弧区的粉末状涂层材料熔融、雾化,并高速喷射到被涂工件表面,形成涂层。由于整个工艺集熔化、雾化、快淬、固结等过程于一体,且所获得组织致密,结合牢固,因此,在涂层技术中占主要地位,但等离子喷涂也存在如需要高纯气体且成本较高等缺点。

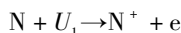
1. 等离子体的形成过程

等离子属于物质的第四种状态,与普通气体相比发生了状态变化。以 N_2 为例,分子的两个原子为哑铃形态,当温度上升到 10 000K 以上时,原子间产生振动,分子间产生相互撞击,发生离解,变为单原子。其反应式为



式中 U_D ——离解所需的能量。

温度进一步升高电子从原子中飞出而发生电离,即



式中 U_I ——原子的电离能。

1) 气体电离后,在空间不仅有原子,还有自由电子和正离子,这种状态称为等离子体。由于等离子体存在大量的状态变化“潜能”,因此当温度很高的等离子体把热能传递给被加热的物体时,本身的温度并不降低。

2) 如利用普通热气体加热,则当热气体把热能传递给被加热的物体时,作为热源的气体温度必然下降。若要进一步加热这种物体,必须排走被加热物体周围温度已降低的气体而补充高温气体。因此,必须使被加热物体周围具有高速热气流才能使物体有效地被加热。

3) 在等离子喷涂中,由于粉末粒子随等离子火焰运动,所以其与热源之间不可能获得很高的相对温度,从而证明了利用状态变化加热要比通过降温加热优越。

2. 等离子喷涂的工作原理

等离子喷涂采用的是非转移弧。在阴极和阳极(喷嘴)之间产生直流电弧,该电弧把导入的工作气体加热电离成高温等离子,并从喷嘴喷出,形成等离子焰。粉末由送粉气体送入火焰中被熔化、加速、喷射到基体材料上形成膜。工作气体可用氩气、氮气,或者在这些气体中再掺入氢气,也可以用氩气和氮气的混合气体。等离子喷涂原理如图 9-14 所示。

1) 等离子弧的参数可以在较大范围内改变,其温度不会随之在很大范围内变化,属于非转移弧等离子焰流。其中焰心温度可达 30 000K,喷嘴出口处的温度可达 15 000~20 000K。轴向温度梯度较大,焰流速度在喷嘴出口处高达 1000~2000m/s,但会迅

速衰减,喷涂粉靠焰流加速,可得到高于 150m/s 的速度。等离子焰的温度分布如图 9-15 所示。

2) 等离子弧的加热能力取决于电功率、电效率、弧的焓值、热导率及热效率。电效率是放电气体的热功率和输入电功率之比;焓值是放电气体的热功率和其热量之比;热效率是粉末材料和工件所得到的那部分热功率与等离子焰流的总功率之比,热效率仅为 25% ~ 40%。影响等离子弧的加热参数很多,如电流、放电气体成分及流量、喷嘴尺寸与形状、阴阳极之间的距离等。

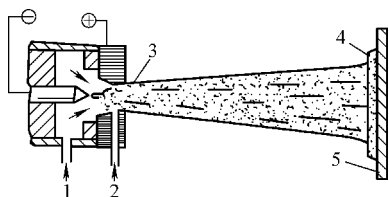


图 9-14 等离子喷涂原理

1—气体 2—粉末 3—弧 4—涂层 5—基体

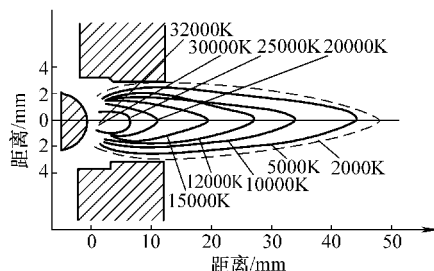


图 9-15 等离子焰的温度分布

3. 等离子弧的基本形式

工业上常用的等离子弧有两种形式,即转移弧和非转移弧。

(1) 转移弧

电弧在喷枪的阴极与阳极(被加工零件)之间飞越,工作气体围绕着电弧送入,然后从喷嘴喷出。等离子弧切割、等离子弧焊接和等离子弧冶炼等多使用转移弧设备。

(2) 非转移弧

非转移弧是指在阴极和喷嘴(阳极)之间所产生的等离子弧。在阴极和喷嘴的内壁之间产生电弧,工作气体通过阴极和喷嘴之间的电弧加热,造成全部或部分分离,而后由喷嘴喷出形成等离子火焰(或称为等离子射流)。等离子喷涂、等离子烧蚀等多采用非转移弧等离子设备。

由于非转移弧等离子喷枪用于加热工作气体的电弧在喷嘴内壁的阳极点终止,在不向气体供给能量的情况下将等离子气体喷射出去,所以这种喷枪对基体材料的加热效果很低。因此,等离子喷涂虽然温度高,对喷涂粉末的热传导性能好,但是传递到基体(工件)的热量却很少,这就避免了基体材料的热变形。

(3) 联合弧

在某些情况下,需要联合使用转移弧和非转移弧。等离子喷焊就是采用这种联合形式的等离子弧。非转移弧引燃转移弧并加热金属粉末,转移弧加热工件使其表面产生熔池。这种情况喷嘴、工件均接在正极。

等离子弧的弧柱细,电离密度大,气体电离度高,因此,具有温度高、能量集中、弧稳定性好等特点。

4. 等离子喷涂的设备

工业上使用的等离子喷涂设备由喷枪、电源、送粉器、控制装置和热交换器等组成,如图9-16所示。

(1) 喷枪

喷枪实际是一个非转移型等离子弧发生器,是最关键的部件,整个系统的电、气、粉、水都集中于此。喷枪的结构形式多样,但其基本结构是一样的,由阴极、喷嘴(阳极)、进气道与气室、送粉道、水冷密封与绝缘装置及枪体组成。阴极是电子发射源,因此,必须选用高熔点和电子发射能力强的材料制成,一般为含有二氧化钍或铈钨电极。阴极的直径由最大工作电流、喷嘴孔径和冷却条件等因素决定。喷嘴为阳极,通过孔道对电弧进行压缩而形成等离子弧。

(2) 电源

等离子喷涂电源用以供给喷枪直流电,通常为全波硅整流装置。主要由磁放大器、主接触器、主变压器、电抗器、控制电源变压器(或可控硅)、继电器和冷却电扇等元件组成。电源具有陡降的外特性,使之能产生稳定的等离子弧。

(3) 送粉器

用来储存喷涂粉末并按工艺要求向喷枪输送粉末的装置。粉末输送量根据设备功率的大小、喷嘴结构和粉末种类来决定。

(4) 热交换器

主要用以使喷枪获得有效的冷却,达到使喷嘴延长寿命的目的。热交换器由散热器、储水瓶、水泵、压力调节器、压力表、遥测温度计、电磁水阀、水位计和管路系统组成。

(5) 控制柜

用于对水、电、气、粉进行调节和控制。主要由气路系统、电路系统、送粉输出调节装置、程序控制系统、指示系统等组成。作用是对整个喷涂过程进行控制和监视,以及对有关喷涂系统进行调节等,以实现预定的喷涂工艺。

5. 等离子喷涂工艺

在等离子喷涂过程中,影响涂层质量的工艺参数很多,因此,对于不同工件、不同基体和不同涂层,其工艺优化不尽相同,一般要经过反复试验,才能得到最佳工艺水平,下面介绍主要工艺参数的选择和控制在。

(1) 等离子气体的选择

气体的选择依据主要是可用性和经济性,氮气便宜,且离子焰焓值高,传热快,利于粉末的加热和熔化,但易发生氮化反应的粉末或基体不可采用。氩气电离电位较低,等离子弧稳定且易于引燃,弧焰较短,适于小件或薄件的喷涂,此外氩气还有很好的保护作用,选用氩气喷涂 Cr_2C_3 、 WC 、 TiC 和 ZrC 等可防止脱碳,但氩气的

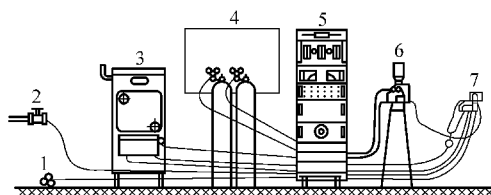


图 9-16 等离子喷涂设备示意图

1—排水 2—供水 3—电源 4—气瓶
5—控制柜 6—送粉器 7—喷枪

焓值低，价格昂贵。

气体流量大小直接影响等离子焰流的焓值和流速，从而影响喷涂效率、涂层孔隙率和结合力等。流量过高，则气体会从等离子射流中带走有用的热，并使喷涂粒子的速度升高，减少了喷涂粒子在等离子火焰中的“滞留”时间，导致粒子达不到变形所必要的半熔化或塑性状态，结果是涂层结合强度、密度和硬度都较差，沉积速率也会显著降低；相反，则会使电弧电压值不适当，并大大降低喷射粒子的速度，极端情况下，会引起喷涂材料过热，造成喷涂材料过度熔化或汽化，引起熔融的粉末粒子在喷嘴或粉末喷口聚集，然后以较大的球状沉积到涂层中，形成大的空穴。

(2) 电弧功率的确定

电弧功率太高，随着电弧温度升高，更多的气体将转变成为等离子体，在大功率、低工作气体流量的情况下，几乎全部工作气体都转变为活性等离子流，等离子火焰温度也很高，这可能使一些喷涂材料汽化并引起涂层成分改变，喷涂材料的蒸气在基体与涂层之间或涂层的叠层之间凝聚引起粘接不良，此外还可能使喷嘴和电极烧蚀。而电弧功率太低，则得到部分离子气体和温度较低的等离子火焰，又会引起粒子加热不足，涂层的结合强度、硬度和沉积效率较低。

近年来，出现了一些高能等离子喷涂设备，具有较高的能量水平（80kW）、较高的热效率（70%~75%）、较高的焓值（ $1.98 \times 10^6 \text{ J/kg}$ ）和较高的粒子速度（610m/s），因此涂层性能显著提高。例如，WC/Co 涂层使用25kW的电弧功率喷涂时，涂层的孔隙率为3%~4%，涂层的结合强度为5880MPa（600kg/mm²）。当喷涂功率提高到55kW时，涂层的孔隙率为3%以下，涂层的结合强度提高到7840MPa（800kg/mm²）。但是，并不是所有的材料都适合使用大功率喷涂，往往涂层性能提高并不显著，而成本却大大增加。目前，对大部分喷涂材料所使用的电弧功率为20~40kW。

(3) 供粉速度的选择

供粉速度必须与输入功率相适应，过高，会出现生粉（未熔化），导致喷涂效率降低；过低，粉末氧化严重，并造成基体过热。送料位置也会影响涂层结构和喷涂效率，一般来说，粉末必须送至焰心才能使粉末获得最好的加热和最高的速度。等离子喷涂常用粉末粒度为120~300目，粒度范围以窄为好。目前世界上已能以1μm左右的超细粉末进行喷涂。

(4) 喷涂距离和喷涂角的确定

喷枪到工件的距离影响喷涂粒子和基体撞击时的速度和温度，涂层的特征和喷涂材料对喷涂距离很敏感。喷涂距离过大，粉粒的温度和速度均将下降，结合力、喷涂效率都会明显下降，气孔增多；过小，会使基体温升过高，基体和涂层氧化，影响涂层的结合。在基体温升允许的情况下，喷涂距离适当小些为好。焰流轴线与被喷涂工件表面之间的角度为喷涂角。该角小于45°时，涂层结构会恶化形成空穴，导致涂层疏松。

(5) 喷枪与工件相对运动速度的控制

喷枪的移动速度应保证涂层平坦，不出现喷涂脊背的痕迹。也就是说，每个行程的宽度之间应充分搭叠，在满足上述要求的前提下，喷涂操作时，一般采用较高的喷枪移

动速度, 这样可防止产生局部热点和表面氧化。

(6) 基体温度的控制

较理想的喷涂工艺是在喷涂前把工件预热到喷涂过程要达到的温度, 然后在喷涂过程中对工件采用喷气冷却的措施, 使其保持原来的温度。

6. 等离子喷涂的特点及应用

1) 由于以电弧等离子体为热源, 故热量集中, 喷涂温度可达 16600°C (通常使用温度为 $6000 \sim 11000^{\circ}\text{C}$), 因此可以熔化各种高熔点、高硬度的粉末材料。但传递给基体材料的热量却不多, 一些热稳定性差的材料也能免于氧化和烧损。

2) 等离子焰流速度高达 1000m/s , 喷出的粉粒速度可达 $180 \sim 600\text{m/s}$, 可以获得组织致密、孔隙率低、与基材结合强度高 ($65 \sim 70\text{MPa}$)、涂层厚度易于控制的喷涂层。因此, 可以喷制各种高熔点、耐磨、耐热的涂层, 尤其是适合陶瓷材料的喷涂。

3) 等离子喷涂过程中零件不带电, 且受热温度低 (表面温度一般不超过 250°C), 因此喷涂过程中零件基本无变形, 基材的组织性能也无变化, 且不改变其热处理性质。特别适合于高强度钢材、薄壁零件、细长零件等的喷涂。

4) 等离子喷涂生产率高。采用高能等离子喷涂设备时, 粉末的沉积率可达 8kg/h 。

5) 等离子喷涂应用广泛, 目前已有数百种材料, 如金属、陶瓷、塑料等可用等离子进行喷涂, 所得的涂层具有耐蚀、抗氧化、耐磨损擦伤、助滑、助粘接、防辐射和绝热等功能。

7. 等离子喷涂新技术

近几年来, 在传统等离子喷涂的基础上又发展了几种新的等离子喷涂技术, 如真空等离子喷涂、水稳等离子喷涂等。

(1) 真空等离子喷涂

真空等离子喷涂 (又称为低压等离子喷涂), 是在气氛可控的 $4 \sim 40\text{kPa}$ 的密封室内进行喷涂的技术。引入工作气体并等离子化后, 因为等离子体是在低压气氛中边膨胀体积边喷出的, 所以喷流速度达到超声速。低压等离子喷涂技术适用于对氧化高度敏感的材料, 如 Al 、 Mg 、 Ti 、 Ta 、 Zr 等高度敏感材料或难熔硬质材料, 所得涂层较大气等离子喷涂法孔隙率低, 结合强度提高。

(2) 水稳等离子喷涂

水稳等离子喷涂法是一种高功率或高速等离子喷涂方法。其工作介质都是水, 其工作原理是: 喷枪内通入高压水流, 并在枪筒内壁形成涡流, 这时, 在枪体后部的阴极和枪体前部的旋转阳极间产生直流电弧, 使枪筒内壁表面的一部分水蒸发、分解, 变成等离子态, 产生连续的等离子弧。由于旋转涡流水的聚束作用, 其能量密度提高, 燃烧稳定, 因此, 可喷涂高熔点材料, 特别是氧化物陶瓷。喷涂效率非常高, 喷涂能力最大为 50kg/h , 厚度可达到 20mm 。输出功率大, $30\,000^{\circ}\text{C}$ 的超高温会使高熔点的陶瓷粒子完全熔融, 因而涂层结合强度是气体等离子涂层的 $2 \sim 3$ 倍, 并且涂层的致密度、硬度、耐磨性和冲击韧度等也有很大提高。由于工作介质是水和压缩空气, 因此比其他喷涂法经济。

9.3.4 模具的金属堆焊技术

堆焊是利用焊接热源将具有一定性能的材料熔敷到基体（焊件）表面上，形成冶金结合的一种工艺过程，即利用火焰、电弧、等离子弧等热源将具有一定性能的材料熔敷一层或几层在基体表面上，使工件表面形成耐磨、耐蚀、耐热涂层的工艺方法。堆焊的目的并不是为了连接构件，而是借助于焊接的方法，对金属表面进行改性，是焊接工艺方法的一种特殊应用。

堆焊可分为焊条电弧堆焊、埋弧堆焊、振动电弧堆焊、等离子弧堆焊、气体保护堆焊和电渣堆焊等。

1. 金属堆焊的特点

焊条电弧堆焊是手工操纵焊条，用焊条和基体表面之间产生的电弧热作热源，使填充金属熔敷在基体表面的一种堆焊方法，其具有以下特点。

1) 设备简单且通用性强，所使用的电源有弧焊变压器、弧焊整流器和逆变式焊接电源等。堆焊在焊工直接观察和操纵下进行，工艺灵活，不受焊接位置及工件表面形状的限制，是一种最常见的堆焊方法。

2) 用堆焊对工件进行修复不仅可修复尺寸，还可通过合理选择焊层材料等，改善和提高其表面性能，将修复和强化两种功能结合起来，使工件的使用寿命超过原设计水平。

3) 堆焊具有工件修复与表面强化两大功能，堆焊已经成为改进产品设计和提高产品性能常采用的表面强化技术。例如在制造一些耐磨零件时，不能全部用高硬度的材料制造。因为高硬度材料往往含有较多的贵重金属，整体使用势必大幅度提高零件的成本；材料硬度提高的同时往往使脆性大幅度提高，会使工件的使用性能大大降低；高硬度的材料难于加工，在制造工艺上有难度。所以在普通材料制造工件的表面利用堆焊的方法加上一层高硬度合金，可以达到使用、加工、成本等多方面的要求。

4) 由于电弧温度高，热量集中，熔深大，稀释率高，堆焊层硬度和耐磨性下降，所以通常需要堆焊2~3层，但多层堆焊易导致开裂。焊条电弧堆焊劳动条件差，生产率低，不易获得薄而均匀的堆焊层。目前主要用于生产小批量难焊件和修复已磨损的零部件。修复的零件结构尺寸大或批量大时，宜选择机械化的堆焊方法。

2. 金属堆焊材料

1) 堆焊具有焊接的一般规律，手工电弧堆焊是应用最广泛的堆焊方法，原则上所有的熔焊方法都可以用于堆焊，但它有自身的特点，如它为异种金属焊接，要求尽可能低的稀释率，应特别注意熔合区污染、热循环和热应力问题，要求堆焊材料与基体有尽可能好的润湿性和流平性等。堆焊材料可从普通的碳素钢、低合金钢到高合金钢、镍基合金、钴基合金、铜基合金以及碳化物、氧化物陶瓷材料。

2) 氧乙炔火焰堆焊的火焰温度低，能保持堆焊材料中碳化物等硬化相的原有形状与性能，较为广泛地用于耐磨件堆焊。等离子弧堆焊有冷丝等离子弧堆焊、热丝等离子弧堆焊、预制型等离子弧堆焊和粉末等离子弧堆焊，其中粉末等离子弧堆焊具有粉末制

作简单、熔敷率高、粉末利用率高等优点,应用很广泛。电渣堆焊的熔敷率高,气体含量少,质量好,但易过热。

3. 金属堆焊在模具中的应用

1) 模具在长期使用后,出现型腔塌陷、裂纹、尺寸磨损变大等现象,造成模具失效报废,一般需重新制造。金属堆焊技术是选用具有很高热硬性(热作模具)、高硬度、高耐磨性(冷作模具)的堆焊金属,在模具易疲劳变形部分,堆焊一定厚度的合金钢。因此堆焊时应根据模具的不同要求选用合适的焊条,如锰钼钢、锰铬硅等焊条(对于热锻模材料为3Cr2W8V钢的可选用3CrWSi焊条)。

2) 模具堆焊前应修复疲劳裂纹,一般用气动砂轮铲除,死角深部用碳弧气刨消除后,可用气割在修复部分均加工深10mm的凹台,然后进行表面清洁。为了防止堆焊修复后开裂,被堆焊的模具要进行预热(450~500℃),堆焊完成后要缓冷,防止开裂,再立即进行回火。此时堆焊部位的硬度远高于模体硬度。

3) 模具堆焊技术可以使模具获得理想的综合性能,可以降低模具的再制造成本,延长模具的使用寿命。一般锻造用切边模5000~6000件即可报废,堆焊后一次使用寿命可提高1~2倍。热锻模寿命可提高1倍以上,而且可重复修复多次。

9.4 模具的表面电镀强化

模具电镀是应用电化学的基本原理,在基体(金属或非金属)表面沉积金属或金属化处理的技术,能使均匀溶解在溶液中的金属离子,有序地在溶液(即镀液)中和基体表面接触获得电子、还原成金属原子并沉积在基体表面,形成宏观金属镀层。镀层与基材金属结合牢固,层面分布均匀,结晶细致而紧密,孔隙率低,具有良好的物理、化学及力学性能。电镀能增强金属的耐蚀性(镀层金属多采用耐腐蚀的金属),提高硬度,防止磨耗,提高导电性、润滑性、耐热性和表面装饰性。

9.4.1 电镀强化技术

1. 电镀镀层的分类

镀层可按使用性能、镀层与基体金属之间的电化学性质和镀层的组合形式分类。

(1) 按使用性能分类

按使用性能可分为功能性镀层和装饰保护性镀层两类。

1) 功能性镀层。这种镀层种类很多,如:防护性镀层、电性能镀层、耐磨和减摩镀层、磁性能镀层、焊接性镀层、耐热镀层等。

① 防护性镀层。例如锌、镍、镉、锌-镍、铅-锡、铅-铜-锡、铅-钢等镀层或复合镀层。

② 耐磨和减摩镀层。例如硬铬、Cu-SiC、Ni-石墨、Ni-PTFE复合镀层等。

③ 电性能镀层。例如Au、Ag镀层等,既有高的电导率,又可防氧化,避免增大接触电阻。

④ 磁性能镀层。软磁性能镀层有 Ni - Fe、Fe - Co 镀层，硬磁性能镀层有 Co - P、Co - Ni、Co - Ni - P 等。

⑤ 焊接性镀层。例如 Sn - Pb、Cu、Sn、Ag 等镀层，可改善元件焊接性。

⑥ 耐热镀层。例如 Ni - W、Ni、Cr 镀层，熔点高，耐高温。

2) 装饰保护性镀层。包括装饰性镀层和修复性镀层等。

① 装饰性镀层。例如 Au 及 Cu - Zn 仿金镀层，黑铬、黑镍镀层等。

② 修复性镀层。一些造价较高的模具易磨损件或加工超差件，采用电镀修复尺寸，可节约成本，延长使用寿命，例如，镀 Ni、Cr、Fe 层等进行修复。

(2) 按镀层与基体金属之间的电化学性质分类

按镀层与基体金属之间的电化学性质可分为阳极性镀层和阴极性镀层。

1) 阳极性镀层。镀层相对于基体金属的电位为负时，镀层是阳极，如，模具钢镀锌层。

2) 阴极性镀层。镀层相对于基体金属的电位为正时，镀层是阴极，如模具钢镀镍层、镀锡层等。

(3) 按镀层的组合形式分类

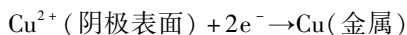
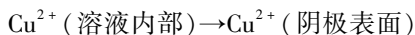
按镀层的组合形式可分为单层镀层，如 Zn 或 Cu 镀层；多层金属镀层，如 Cu - Sn/Cr 镀层、Cu/Ni/Cr 镀层等；复合镀层，如 Ni - Al₂O₃ 镀层、Co - SiC 镀层等。

2. 电镀技术的基本原理

电镀是在直流电的作用下，电解液中的金属离子还原，并沉积到工件表面形成有一定性能的牢固金属镀层的工艺过程。电解液主要是水溶液或者有机溶液和熔融盐。镀层可以是单金属或合金。

当直流电通过两电极及两极间含金属离子的电解液时，金属离子在阴极上还原沉积成镀层，而阳极氧化将金属转变为离子，如图 9-17 所示。

图 9-17 中，在盛有硫酸铜电镀液的镀槽中，插入两个铜板，并与直流电源相接，当施加一定电压时，两极就发生电化学反应：



金属离子按如下步骤沉积：

1) 传递步骤。液相中的反应粒子（金属水化离子或配合离子）向阴极表面传递的步骤有电迁移、扩散及对流三种不同方式。

2) 前置化学步骤。直接参加阴极电化学还原反应的金属离子往往不是金属离子在电解液中的主要存在形式。在还原之前，离子在阴极附近或表面发生化学反应，然后才能放电还原为金属。

3) 电荷转移步骤。反应粒子在阴极表面得到电子形成吸附原子或吸附离子的过程

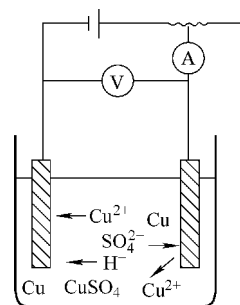


图 9-17 电镀槽中电化学反应示意图

称为电荷转移步骤,又称为电化学步骤,是电荷从阴极表面转移到反应粒子的过程,这是电沉积过程的重要步骤。

4) 结晶步骤。吸附原子通过表面扩散到达生长点而进入晶格,或吸附原子相互碰撞形成新的晶核并长大成晶体。

金属离子以一定的电流密度进行阴极还原时,原则上只要电极电位足够负,任何金属离子都可能在阴极上还原,实现电沉积。但由于水溶液中有氢离子、水分子及多种其他离子,使得一些还原电位很负的金属离子实际上不可能实现沉积过程。所以,金属离子能否在水中还原,不仅取决于其本身的电化学性质,还取决于金属的还原电位与氢还原电位的相对大小。若金属离子还原电位比氢离子还原电位更负,则电极上大量析出氢,金属沉积极少。金属离子还原析出的可能性是获得镀层的首要条件。而获得质量优良的镀层还要有合理的镀液组成和合理的工艺控制。

3. 模具电镀工艺

电镀工艺过程包括镀前表面处理、电镀和镀后处理三部分。

(1) 工件镀前表面处理

工件进入电镀液之前的一切加工处理和清理工序总称镀前处理(或预处理)。金属零件镀前处理质量的好坏是能否获得优质电镀层的重要环节。生产实践表明,电镀层出现脱壳、起泡,甚至镀不上等质量事故,大多数并不是由电镀工艺本身所造成,而是由镀前处理不当和欠佳所致。

1) 金属表面状态。零件表面的氧化膜和锈蚀物、油污或其他有机物电镀之前必须除去,消除表面的粗糙状态,达到清洁和一定的表面粗糙度,并进行电镀前的活化处理。

2) 电化学性质。电镀是金属和电解液接触界面上的电化学反应过程,它要求保证电解液和金属零件表面间良好的接触,如果金属表面附着各种污物,将成为阻碍电解液和金属表面直接接触的中间夹层,使零件表面产生介电、钝态、电阻大等不良状况,会阻碍电流的通过,给金属离子放电带来阻力,降低电镀层结合力,甚至产生疏松、起泡、脱皮等质量事故。

3) 维护电镀液。零件的油污、氧化物等杂质会污染电解液,增加电解液中的有害杂质,导致电解液不能正常工作,造成不应有的损失。

(2) 电镀方式

电镀方式分为挂镀、滚镀、刷镀和连续镀等,电镀方式的选择主要与待镀件的尺寸和批量有关。电镀液有酸性溶液、碱性溶液和中性溶液。无论采用何种镀覆方式,与待镀制品和镀液接触的镀槽、吊挂具等均应具有一定程度的通用性。

1) 挂镀。挂镀适用于一般尺寸的制品,为电镀生产中最常用的一种方式。电镀时,将工件悬挂于用导电性能良好的材料制成的挂具上,然后浸没于欲镀金属的电镀溶液中作为阴极,在两边适当的距离放置阳极,通电后使金属离子在零件表面沉积。

挂镀的特点是:适合于各类零件的电镀;电镀时单件电流密度较高且不会随时间而变化,槽电压低,镀液温升慢,带出量小,镀件的均匀性好;但生产率低,设备和辅助

用具维修量大。

2) 滚镀。滚镀是电镀生产中的另一种常用方法。它是将欲镀零件置于多角形的滚筒中,依靠工件自身的重量来接通阴极,在滚筒转动的过程中实现金属电沉积的方法。

与挂镀相比,滚镀最大的优点是节省劳动力,提高生产率,设备维修费用少且占地面积小,镀件镀层的均匀性好。但是,滚镀的使用范围受到限制,镀件不宜太大和太轻。单件电流密度小,电流效率低,槽电压高,槽液温升快,镀液带出量大。

3) 刷镀(电刷镀)。刷镀也被称为涂镀、局部镀、选择性电镀,其基本原理与普通电镀原理完全相同。有饱吸电解液包套的阳极与作为阴极的工件表面接触,并作相对运动,电解液中的离子在阴、阳极间进行电化学反应,使金属离子沉积,在零件表面形成金属镀层。

4) 连续电镀。连续电镀主要用于薄板、金属丝和带的电镀,在工业上有着极其重要的地位。镀锡钢板、镀锌薄板和钢带、电子元器件引线、镀锌钢丝等的生产都采用了连续电镀技术。

连续电镀有三种进行方式:垂直浸入式、水平运动式和盘绕式。垂直浸入式节省空间,但操作难度较大;水平运动式操作方便,但设备占地面积大,维修量大;盘绕式占地面积小,但一次只能加工一根金属丝。

(3) 电镀工艺过程

1) 经过清理和特殊预处理的待镀件作为阴极,用镀覆金属制成阳极,两极分别与直流电源的正极和负极连接。电镀液由含有镀覆金属的化合物、导电的盐类、缓冲剂、pH 调节剂和添加剂等的水溶液组成。通电后,电镀液中的金属离子,在电位差的作用下移动到阴极上形成镀层。阳极的金属形成金属离子进入电镀液,以保持被镀覆的金属离子的浓度。

2) 在有些情况下,如镀铬,采用铅、铅锑合金制成不溶性阳极,它只起在有些情况下传递电子、导通电流的作用。电解液中的铬离子浓度,需要依靠定期地向镀液中加入铬化合物来维持。电镀时,阳极材料的质量、电镀液的成分、温度、电流密度、通电时间、搅拌强度、析出的杂质、电源波形等都会影响镀层的质量,需要适时进行控制。

3) 在模具上应用较多的是镀硬铬,镀铬层硬度为 900 ~ 1200HV,可有效提高耐磨性,且不引起工件变形,对形状复杂的模具十分有利。

① 镀层厚度。镀层厚度一般为 0.03 ~ 0.30mm,如果镀铬层厚度选择不合理,就会造成模具的过早损坏,当承受高压或冲击时,镀层易剥落。冷镦模和冲裁模不宜使用,只适合加工应力较小的拉深模、塑料模等。

② 镀硬铬的配方。铬酐(CrO_3) 140 ~ 160g/L,硫酸(H_2SO_4) 1.4 ~ 1.6g/L,其余为蒸馏水。

③ 工艺条件。温度为 57 ~ 63℃,电压为 12V,电流密度为 45 ~ 50A/dm²。

4) 电镀产生的污水(如失效的电解质)是水污染的重要来源之一。废弃时,需要进行无公害处理。

(4) 镀后钝化处理

1) 无铬钝化液是以多种缓蚀剂、封闭剂、防锈添加剂配制而成的中性无色透明液体,可用于发蓝、磷化的后处理钝化封闭,也可用于机械加工工序之间的防锈。

2) 锌合金、镀锌件无铬钝化液是以多种缓蚀剂、封闭剂、防锈添加剂配制而成的中性无色或浅棕色透明液体,是一种新型环保无铬钝化剂。

3) HH912-2 铜、铜合金防变色剂是以多种优质化工原材料复配而成的高浓缩透明液体,铜合金防变色剂不含重铬酸盐和亚硝酸钠, pH 值为 5~6.5, 无毒、无害、无刺激性气味,不燃不爆,使用安全。

4) 锡防变色剂是以多种优质化工原料复配而成的水溶性无色至浅棕色透明浓缩水溶液。锡防变色剂的最佳使用方法为:在电镀锡后,经热水洗后的零件立即在该液中作浸渍处理。

5) HH972 封闭剂是一种水溶性封闭剂,无毒、无腐蚀、不燃、不爆,主要用于钢铁常温发蓝的后处理,能显著提高常温发蓝膜的耐磨性、耐蚀性和耐油性,也适合于镀锌、铜件的直接封闭或钝化后封闭,使镀层的耐蚀性大为提高。

4. 电镀工艺的应用

1) 模具经过电镀后,其外观漂亮,镀层一般都较薄,从几个微米到几十微米不等。通过电镀,可以在模具及机械制品上获得各种功能性和装饰保护性的表面层,还可以修复磨损和加工失误的工件。镀层大多是单一金属或合金,如锌、镉或黄铜、青铜等;也有弥散层,如镍-碳化硅、镍-氟化石墨等;还有复合层,如钢上的铜-镍-铬层、钢上的银-钯层等。电镀的基体材料除铁基的铸铁和钢外,还有非金属,如 ABS 塑料、聚丙烯、聚砜和酚醛塑料,但塑料电镀前,必须经过特殊的活化和敏化处理。

2) 应用广泛,适用于各种模具。如塑胶模、发泡模、铜模、鞋模、商标模、家电模、玻璃模、玩具模、电木模、百叶窗模、挤出模、吹塑模、灯饰模具、首饰模具、五金拉深模、PP/PO/PE 胶袋模头、硅胶橡胶模、汽车配件模具、日用品模具、螺杆和深孔模具等,以及透明模、镜面模、高精密模具的镜面抛光、电镀等复合工艺。

3) 电镀硬铬是改善模具的表面光亮程度、提高硬度的重要手段之一。镀层厚度均匀、结合力高,表面光滑亮丽,可形成镜面、光面、亚光面,具有耐腐蚀、耐高温、耐磨损、防生锈、易脱模、不粘模等功效。经硬铬电镀处理的模具,可耐高温 600~800℃,硬度为 900~1200HV,表面粗糙度 Ra 值可达到 0.012 μm 。例如,对胶木模进行镀铬处理以后,由原来的生产 2000 件提高到 8000 件,延长了模具的使用寿命。

9.4.2 模具电刷镀表面强化技术

电刷镀技术(简称刷镀技术)是电镀技术中的一个重要分支,是用电解方法在工件表面获取镀层的过程。主要目的在于强化、提高工件表面性能,获得工件的装饰性外观和耐腐蚀、耐磨损及光、电、磁、热方面的特殊性能,也可以改变工件尺寸,改善机械配合性能,修复因超差或磨损而报废的工件等,因而在工业上有广泛的应用。

1. 电刷镀的工作原理

电刷镀是通过专用电源、镀液、工辅具,利用电化学反应在工件表面上沉积所需镀

层的技术。电刷镀技术需采用专用的直流电源设备，电源的正极接镀笔，作为刷镀时的阳极；电源的负极接工件，作为刷镀时的阴极。镀笔通常采用高纯度细石墨块作阳极材料，石墨块外面包裹一层棉花和耐磨的涤棉套。浸渍特种镀液的包套镀笔（阳极）贴合在工件（阴极）的被镀部位并作相对运动形成镀层，刷镀电源串接于两级之间。为了稳定地向工件表面液层提供足够的被镀金属离子，高浓度的刷镀液直接泵送或自然回流至阴阳极之间。电刷镀的工作原理示意图如图 9-18 所示。

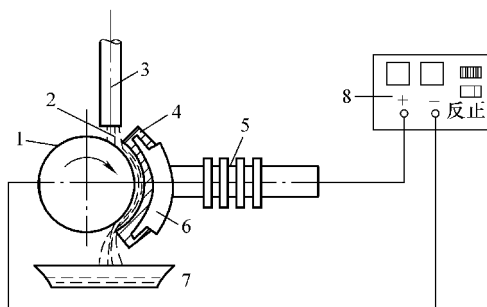


图 9-18 电刷镀的工作原理示意图

1—工件 2—刷镀液 3—注液管 4—包套 5—刷镀笔
6—阳极 7—拾液盘 8—电源

2. 电刷镀的主要设备

电刷镀的设备主要包括电源装置、镀笔与阳极以及各种辅助材料。

(1) 专用电源

电刷镀主要设备为专用电源，采用无级调节电压的直流电源，常用电压为 0 ~ 50V。

(2) 镀笔

镀笔由手柄和阳极组成。阳极是镀笔的工作部分，石墨和铂铱合金是理想的不溶性阳极材料，石墨应用最多，只在阳极尺寸极小无法用石墨时才用铂铱合金。在石墨阳极上包扎脱脂棉包套，其作用是储存电镀液，防止两极接触产生电弧烧伤零件表面和防止阳极石墨粒子脱落污染电镀液。石墨阳极的形状依被镀零件表面形状而定。

(3) 电镀溶液

根据用途不同分表面预处理溶液、沉积金属溶液、退镀溶液等。

1) 表面预处理溶液。为了提高镀层与基体的结合强度，被镀表面必须预先进行严格的预处理，包括电净处理和活化处理。

① 电净液。用电解的方法清除零件金属表面上的油污和杂质称为电净处理。电净液为无色透明的碱性溶液，-10℃ 不结冰，可长期存放，腐蚀性小。零件电净处理用清水冲洗。

② 活化液。用电解的方法除去零件金属表面的氧化膜称为活化处理，目的是使零件表面露出金属光泽，为镀层与基体金属结合创造条件。活化液有两种：无色的 2 号活化液和草绿色的 3 号活化液，均有腐蚀性。

2) 沉积金属溶液。电刷镀溶液一般分为酸性、碱性和中性三大类。酸性溶液比碱性溶液沉积速度快1.5~3倍,但绝大部分酸性溶液不适用于材质疏松的金属材料,如铸铁,也不适用于不耐酸腐蚀的金属材料,如锡、锌等。碱性和中性电镀溶液有很好的使用性能,可获得晶粒细小的镀层,在边角、狭缝和不通孔等处有很好的均镀能力,无腐蚀性,适于在各种材质的零件上镀覆。

3) 退镀溶液。用于除去不需镀覆表面上的镀层,主要用于退除铬、铜、铁、钴、镍、锌等镀层。

3. 模具电刷镀的工艺流程

(1) 零件表面的准备

零件表面的预处理是保证镀层与零件表面结合强度的关键工序。零件表面应光滑平整,无油污、无锈斑和氧化膜等。为此先用钢丝刷(或砂纸)、丙酮(或酒精)清洁,然后进行电净处理和活化处理。

(2) 打底层(过渡层)

为了进一步提高工作镀层与零件金属基体的结合力,选用特殊镍、碱铜等作为底层,厚度一般为2~5 μm 。然后再于其上镀覆要求的金属镀层,即工作镀层。

(3) 镀工作镀层

电刷镀工作镀层的厚度(半径方向上)为0.3~0.5mm,镀层厚度增加内应力加大,容易引发裂纹和使结合强度下降,乃至镀层脱落。

但用于补偿零件磨损尺寸时,需要较大厚度,则应采用组合镀层。在零件表面上先镀打底层,再镀补偿尺寸的尺寸镀层。为避免因厚度过大使应力增大、晶粒粗大和沉积速度下降,在尺寸镀层间镀夹心镀层(不超过0.05mm),最后再镀上工作镀层。

(4) 镀后处理

用退镀溶液除去不需镀覆表面上的镀层并进行钝化封闭处理。

4. 电刷镀的技术特点

1) 设备简单轻便,安全可靠,不用镀槽,不受零件尺寸的限制,在供应电解液的情况下,就可以在所需镀覆表面进行镀层沉积,镀层厚度可以控制在0.001~1mm。

2) 工艺简单灵活,可以现场局部不解体修复,对于塑料模具的修复,尤其是型腔模具和大型模具的局部磨损修复效益显著。

3) 镀层厚度可以控制,镀层种类多,并可实现均匀和不均匀镀层,镀层表面质量高,镀后不需要机械加工,沉积速度快,电刷镀速度是有槽电镀的10~15倍,生产率高。

4) 镀层结合强度高,结合强度为196~294MPa(20~30kg/mm²),是电镀的3~4倍,是热喷涂的5~6倍,且在钛、铝、铬、铜、高合金钢和石墨上也有很好的结合强度。

5) 应用范围广,可在各种金属及合金上沉积出金、银、铜、铁、锡、镍、铬、铅、锌、镉、钢等单一金属或合金。硬度最高可达67HRC,耐蚀性最好的可优于不锈钢。

5. 电刷镀技术的应用

电刷镀的设备比较简单,携带方便,工艺灵活,可以去现场进行表面刷镀。在模具制造及修复中,应用广泛,电刷镀技术可以完成以下任务:

- 1) 修复磨损表面,恢复机械加工超差尺寸和几何形状,填补沟、坑、洞。
- 2) 制备和修复零件表面防护层,如镀锌、镀镉、镀锡。
- 3) 材料表面改性,如钢铁上镀铜、铝件上镀银等。
- 4) 材料防腐处理。

9.4.3 模具电镀合金技术

两种以上的元素共沉积于工件基体表面所形成的镀层称为合金镀层,其工艺为电镀合金技术。通常其最少组分的质量分数应大于1%,而某些镀层,合金的质量分数虽然少于1%,但对镀层性能影响大,也称为合金镀层。由于合金镀层比单金属镀层具有许多独特而优异的性能,所以长期以来,电镀合金一直是电镀技术与开发的重点之一。

1. 电镀合金的特点

电镀合金与热冶金合金相比有如下主要特点:

- 1) 容易获得高熔点与低熔点金属组成的合金,如 Sn - Ni 合金。
- 2) 可获得相图中没有的合金,如 δ - 铜锡合金。
- 3) 镀层结晶细致,镀层平整、光亮,容易获得组织致密、性能优异的非晶态合金,如 Ni - P 合金。
- 4) 在相同合金成分下,电镀合金比热冶金合金的硬度高、延展性差。
- 5) 合金镀层具有特殊的物理性能,如导磁性、减摩性(自润滑性)、钎焊性和良好的耐磨、耐蚀、耐高温性能。
- 6) 通过成分设计和工艺控制,可得到不同色彩的合金镀层,如彩色镀镍、仿金合金等。

2. 合金共沉积的条件

两种金属离子共沉积除需具备金属沉积的基本条件外,还应具备如下两个条件:

- 1) 两种金属中至少有一种金属能从盐的水溶液中沉积出来。有些金属如 W、Mo 等不能从盐的水溶液中沉积出来,但可借助诱导沉积与铁族金属共沉积。
- 2) 共沉积的两种金属的沉积电位必须十分接近。如果相差太大,电位较正的金属会优先沉积,甚至完全排斥电位较负的金属析出。

3. 实现合金共沉积的方法

- 1) 改变镀液中金属离子的浓度比,增大较活泼金属离子的浓度,使其电位正移,使两者的电位接近。
- 2) 采用适当的配合剂,这是使平衡电位相差大的金属离子实现共沉积的最有效方法。
- 3) 采用特定的添加剂,某种添加剂可能对某些金属沉积起作用,使之实现共

沉积。

4. 电镀合金在模具中的应用

合金镀层质量良好，结晶细致，化学稳定性好，具有硬度高、耐磨性高、耐腐蚀、耐高温等特点，其工艺稳定，操作简便，广泛应用。电镀合金在模具中的应用见表 9-24。

表 9-24 电镀合金在模具中的应用

镀层材料	镀层颜色	镀层厚度 / μm	镀层硬度 HV	适用温度 / $^{\circ}\text{C}$	特 性	应 用
TiAlCrN (氮铬铝钛)	紫灰色 /深紫色	1 ~ 6	4000	950	耐 磨、耐 冲 击、耐腐蚀、耐 高温	精密模具，如金属 冲压和成形模具
TiAlN (氮化铝钛)	紫灰色	1 ~ 6	3500	800	耐 磨、耐 冲 击、耐腐蚀、耐 高温	精密模具，如冲压 和成形模具、粉末冶 金模具，适用材料包 括镍合金、稀有金属
AlTiN (氮化钛铝)	深紫色	1 ~ 6	4000	900	耐 磨、耐 冲 击、耐腐蚀、耐 高温	精密模具，如冲压 和成形模具、粉末冶 金模具，适用材料包 括镍合金、稀有金属
CrN (氮化铬)	银灰色	1 ~ 6	2500	700	耐磨、耐冲击	精密模具，如冲压 和成形模具（铝及铝 合金、铜及铜合金、 镍及镍合金、钛及钛 合金的冷加工成形模 具）、铝硅合金铸造 模、集成电路模具、 冷拔模具
TiN (氮化钛)	金黄色	1 ~ 6	3000	600	耐 磨、耐 冲 击、耐腐蚀、耐 高温	精密模具，如注射 模具、冲压和成形模 具、粉末冶金模具、 剪切冲头、拉拔模具
Co - W - Ti 三元合金镀	银灰色	1 ~ 4	1000 (电镀合 金后，氮 碳共渗)	1000	高硬度、高耐 磨性、密度小、 强度高、塑 性 好、耐蚀性好	精密模具，如金属 冲压和成形模具、气 门锻造模

9.4.4 化学镀表面强化技术

化学镀又称为自催化镀,是指在没有外电流通过的情况下,利用化学方法使溶液中的金属离子还原成金属,并沉积在基体表面,形成镀层的一种表面加工方法。其基本原理是通过溶液中适当的还原剂使金属离子在金属表面的自催化作用下还原沉积在金属表面。是一种对材料进行表面防护、表面改性、表面功能化的表面处理技术,为材料科学中新兴的重要领域。可以广泛用于金属和非金属材料的复杂形状工件和大面积镀覆,对不通孔、深孔、管件及缝隙等内表面均可以施镀,是国外发展最快的表面处理工艺之一。

1. 化学镀的条件

1) 镀液中还原剂的还原电位要显著低于沉积金属的电位,使金属有可能在基材上被还原而沉积出来。

2) 配好的镀液不产生自发分解,当与催化表面接触时,才发生金属沉积过程。

3) 调节溶液的 pH 值、温度时,可以控制金属的还原速率,从而调节镀覆速率。

4) 被还原析出的金属也具有催化活性,氧化还原沉积过程才能持续进行,镀层连续增厚。反应生成物不妨碍镀覆过程的正常进行,即溶液有足够的使用寿命。

2. 化学镀的特点

1) 工艺及设备简单,不需要特殊和昂贵的设备,无外电源驱动设备和清水处理装置,设备投资少,生产占地面积小,机动灵活性好,很适合中、小工厂单件或小批量生产。

2) 镀层与基体结合力强,镀层为非晶态,晶粒细、致密、孔隙率低、耐蚀性强,镀层厚度均匀,无边缘效应,表面光洁,无须二次加工。

3) 均镀能力和深镀能力好,具有良好的仿形性,金属、半导体、塑料、玻璃、陶瓷、纤维等及任意形状的零件结构,如深小孔、不通孔、窄缝等均能施镀,也是非导体电镀前作导电底层的常用方法。

4) 具有良好的工艺性能,易于掌握和控制,被镀工件无导电触点,废液中的金属易于回收,废液无氰化物,处理工艺简单,不污染环境。

5) 化学镀可以根据材料表面防护、表面改性、表面强化、表面功能化的需要镀制各种单金属、二元合金、三元合金、金属基复合材料等镀层,如 Ni-P、Ni-B、Cu、Ag、Pd、Sn、In、Pt、Cr 及多种 Co 基合金等,但应用最广的是化学镀镍和化学镀铜。

3. 化学镀在模具制造中的应用

1) 因镀层耐蚀性好,常用作要求耐腐蚀的模具零部件的表面强化工艺。例如,化学镀 Ni-P,镀层对非氧化性的高温及常温盐酸、氢氟酸、有机酸等有良好的耐蚀性,且处理温度极低,常用于处理有精度要求和耐蚀性要求的塑料模具。

2) 由于工艺易于控制,镀层具有高硬度和高耐磨性,因此,在模具表面强化中常被采用。例如,采用化学镀 Ni-P 技术,镀层经 400℃ 热处理,硬度可达 1100HV,因此在塑料模具制造的强化处理中,往往以化学镀取代渗碳、高频感应淬火、氮碳共渗等

表面处理工艺。

3) 因无渗透性的限制,有“无孔不入”的特点,具有深镀能力,因此特别适合具有深沟、窄槽、不通孔及棱边夹角的复杂塑料模具的表面处理。

4) 由于热处理温度低,不存在工件热处理变形问题,特别适用于一些精度要求高、大型、形状复杂的模具零部件的表面强化。例如,机械制造和汽车制造工业中的大型拉深模,由于工件要求变形小,无法用常规热处理方法强化,在这种情况下常采用该技术使其表面强化。

5) 在模具制造中常用经过 Ni-P 镀表面强化的 45 钢替代不锈钢制造塑料型材挤出模;用于处理 Cr12MoV 拉深模可提高模具使用寿命 4 倍以上;机械加工超差不大或报废模具热磨损超差不太大、热裂纹不太深时,可起修复作用,提高了工艺性和模具的使用寿命,从而获得良好的经济效益。

9.4.5 复合镀表面强化技术

复合镀是将固体微粒加入镀液中与金属或合金共沉积,形成一种金属基的表面复合材料的工艺过程。镀层中固体微粒均匀弥散地分布于基体中,故又称为分散镀或弥散镀。

任何金属镀层都可以成为复合镀的基体材料,但应用较多的有 Ni、Cu、Fe、Co、Cr、Zn、Ag、Ar、Pb、Ni-P、Ni-B、Ni-Fe、Al-Sn、Cu-Sn 等。固体微粒主要有金属氧化物、碳化物、硼化物、氮化物等无机化合物分散剂,尼龙、聚四氟乙烯、聚氯乙烯等有机分散剂和石墨,以及不溶于镀液的金属粉末。

固体粒子的共沉积赋予镀层一些特殊的功能,大大扩大了镀层的应用范围。复合镀可以用电镀法和化学镀法获得。

1. 复合镀层的沉积机理

固体微粒经过消除杂质、润湿处理和表面活性剂处理后,加入镀液中,形成均匀的悬浮液,分散粒子会吸附表面活性剂和镀液中的各种离子,包括将被沉积的金属离子。当微粒子表面净吸附结果是正离子占优势时,即微粒子表面带正电荷后,才有可能与金属离子共沉积形成复合镀层。在电镀法实施的复合镀过程中,共沉积大致经历如下步骤:

1) 在电场作用下,带正电荷的微粒有向阴极靠近的倾向,但固体微粒的电泳速度与搅拌形成的运动相比是微弱的。

2) 在搅拌的作用下,微粒被带到阴极表面,与阴极表面碰撞并被阴极表面俘获。

3) 在电场作用下,微粒吸附在阴极表面上,这是一种弱吸附。在静电场力作用下,粒子脱去水化膜,与阴极表面直接紧密接触,形成化学吸附的强吸附。未形成强吸附的粒子在液流的冲击下,又会脱附离开阴极,吸附与脱附处于动平衡。

4) 微粒吸附的金属离子及未被吸附的金属离子在阴极上放电沉积进入晶格,固体微粒被沉积金属掩埋而镶嵌在镀层中,形成金属/固体微粒复合镀层。微粒被沉积金属掩埋固定所需的时间越短,微粒的共沉积量越大。

2. 复合镀的条件

1) 粒子在镀液中是充分稳定的, 既不会发生任何化学反应, 也不会促使镀液分解。粒子在镀液中要完全润湿, 形成分散均匀的悬浮液。因此, 粒子需经过亲水处理, 特别是那些疏水粒子, 更应进行充分的亲水处理, 并要降低镀液的表面张力, 形成悬浮性好的镀液。

2) 镀液的性质要有利于固体粒子带正电荷, 即利于粒子吸附阳离子表面活性剂及金属离子。

3) 粒子的粒度要适当, 粒子过粗, 易于沉淀, 且不易被沉积金属包覆, 镀层粗糙; 粒子过细, 易于结成团块, 不能均匀悬浮。通常使用 $0.1 \sim 10\mu\text{m}$ 的粒子, 但以 $0.5 \sim 3\mu\text{m}$ 最好。

4) 镀液适当的搅拌, 是保持微粒均匀悬浮的必要措施, 也是使粒子高效率输送到阴极表面并与阴极碰撞的必要条件。

3. 复合镀层的性能特点

复合镀层的性能由镀层金属的特性和粒子特性共同决定。粒子性质不同, 会引起镀层性能明显变化。

(1) 耐磨复合镀层

将高硬度粒子加入到 Ni、Co、Cr、Co-Ni、Ni-P、Ni-B 等镀层中, 可大幅度提高金属或合金镀层的耐磨性, 例如 Ni-P/SiC 的耐磨性随 SiC 含量的增加而迅速升高 (即磨损量减少)。镀层的硬度随粒子硬度的升高而升高, 所以在耐磨复合镀层中加入粒子大多选用金刚石、WC、 Al_2O_3 、 ZrO_2 、TiC、SiC、 Cr_3C_2 等粒子。这种高耐磨性复合镀层在中、高温条件下更显示出其独特的耐磨性。在模具制造及航空、汽车工业中已被广泛应用。

(2) 减摩复合镀层

将抗剪强度低、摩擦因数小的固体粒子加入到某些金属和合金中, 可形成具有自润滑功能的减摩复合镀层。常用 Ni、Cu、Pb 等作基体金属, 用石墨、氟化石墨、聚四氟乙烯 (PTFE)、 MoS_2 和六方氮化硼等作分散剂。例如, PTFE 本身的摩擦因数仅为 0.05, 加入到 Ni-P 镀层中形成 Ni-P/PTFE 复合镀层, 与退火钢配副对磨时, 干摩擦因数为 0.36~0.40, 明显低于 Ni-P 镀层的摩擦因数 (0.60~0.63); 当这种复合镀层相互对磨时, 干摩擦因数仅为 0.2。Ni/B/N 在 800℃ 高温下仍有很低的摩擦因数, 在模具制造中具有重要意义。

(3) 耐蚀复合镀层

固体粒子加入镀层中形成复合镀层, 镀层孔隙率会明显增大。粒子量越高, 孔隙率越高, 这就降低了阴极性镀层的防护功能, 耐蚀性降低。但有些情况下, 固体粒子却可提高镀层的耐蚀性, 例如, 在钢件上, 用铝粉和锌共沉积形成 Zn/Al 复合镀层, Zn 是阳极性镀层, Zn 镀层中的 Al 粉表面包裹着氧化膜, 在腐蚀电池中仍为阴极, 导电性差, 故抑制了 Zn 的腐蚀。

4. 复合镀在模具中的应用

由于化学和电化学方法可以改变材料及调节材料的力学、物理、化学性能提供极大

的可变性和多样性。目前复合镀技术的实施主要借助于电（刷）镀和化学镀，因此，又可分为复合电镀、复合电刷镀及化学复合镀。

1) 采用 Ni - Co/ZrO₂ 复合电刷镀，可使塑料模型腔耐磨性提高并有较高硬度，同时，镀层表面质量理想，抛光后，可达到镜面水平 ($Ra = 0.01 \mu m$)。

2) 塑料注射模常规热处理寿命为 1 万件，经化学镀 Ni - P 后，使用寿命可提高 3 倍；采用 50 μm 厚的化学镀 Ni - Co/SiO₂ 复合镀层，并经热处理，寿命可提高到原来的 15 倍，其效果显著。

3) 化学复合镀 Ni - P/PTFE 镀层为非晶态，与基体结合紧密，具有优良的耐蚀性，特别是在含 Cl 的介质中，耐蚀性优于不锈钢。PTFE 微粒有极好的自润滑性，型腔光滑致密，镀层呈高耐磨性和憎油、憎水性，适用于脱模困难的长管件塑料模具，如供、排水管模具。

4) 以 Ni - P 为基体，将 PTFE 与陶瓷材料 SiC 微粒复合，制成高硬度、耐磨、耐蚀及具有良好的润滑减摩与非粘着等综合特性的表面功能镀层，制造的玻璃纤维增强塑料成型模，较传统热处理模具的使用寿命提高 10 倍以上。

9.5 模具的表面镀膜

镀膜技术即气相沉积技术，是一种利用气态物质中发生的某些物理、化学过程，在基体表面覆盖一层厚度为 0.5 ~ 10 μm 的过渡族元素 (Ti、V、Cr、W、Nb 等) 与 C、N、O、B 等形成的化合物，或单一的金属及非金属涂层，使模具表层改变化学成分，在模具表面形成功能性（例如超硬耐磨层）或装饰性的化合物涂层的新技术，已广泛应用于各类模具的硬化处理。沉积层的主要类别及特性见表 9-25。

表 9-25 沉积层的主要类别及特性

类 别	品 种	主 要 特 性
碳化物	TiC、VC、W ₂ C、WC、MoC、Cr ₇ C ₃ 、B ₄ C、TaC、NbC、ZrC、HfC、SiC	高硬度、耐磨，部分碳化物（如碳化铬）耐蚀
氮化物	TiN、VN、BN、ZrN、HfN、Cr ₂ N、CrN、NbN、MoV、(Ti, Al)N	立方氮化硼、TiN、VN 等耐磨性好；TiN 色泽如金，且比镀金属耐磨，装饰性好
氧化物	Al ₂ O ₃ 、TiO ₂ 、ZrO ₂ 、CuO、ZnO、Si ₂ O	耐磨、特殊光学性能、装饰性
碳氮化合物	Ti (C, N)、Zr (C, N)	耐磨、装饰性
硼化物	TiB ₂ 、VB ₂ 、Cr ₂ B、TaB、ZrB、HfB	耐磨
金属及非金属元素	Al、Cr、Ni、Mo、C（包括金刚石及类金刚石）	特殊光学、电学性能和高耐磨性
硅化物	Si ₃ N ₄ 、MoSi ₂ 、WSi ₂	抗高温氧化、耐蚀

其共同特点是具有特殊性能的稳定化合物如 TiC、TiN、Ti (C, N)、SiN、(Ti, Al) N、(Ti, Si) N 等直接沉积于金属工件表面, 形成一层超硬覆盖膜, 从而使工件具有高硬度、高耐磨性、高耐蚀性等一系列优异性能。

主要应用的沉积层 TiC、TiN 涂层有以下特点:

1) 涂层有很高的硬度 (TiC 为 2980 ~ 3800HV, TiN 为 2400HV)、低的摩擦因数和自润滑性能, 所以抗磨粒磨损性能良好。

2) 涂层具有很高的熔点 (TiC 为 3800℃, TiN 为 2950℃), 化学稳定性好, 基体金属在涂层中的溶解度小, 摩擦因数较低, 因而具有很高的抗粘着磨损能力, 使用中发生冷焊和咬合的倾向也很小, 而且 TiN 比 TiC 更好。

3) 涂层有较强的耐蚀性, TiC 涂层在硫酸、盐酸、氯化钠水溶液中的耐蚀性良好, 而且 TiN 的耐蚀性一般都比 TiC 更好一些。

4) 涂层在高温下也具有良好的抗大气氧化能力 (TiC 约可达 400℃, TiN 约可达 500℃), 高于以上温度, 在空气中的 TiC、TiN 将被氧化成 TiO_2 而失去其原来的性能。

根据涂层形成的机理不同, 气相沉积可分为物理气相沉积、化学气相沉积和等离子体化学气相沉积三大类。

9.5.1 物理气相沉积 (PVD)

物理气相沉积是利用热蒸发、溅射或辉光放电、弧光放电的物理过程, 在基材表面沉积所需涂层的技术。蒸镀、溅射是物理气相沉积的两类基本镀膜技术。以此为基础, 衍生出反应镀和离子镀。镀料原子在沉积时, 可与其他活性气体分子发生化学反应而形成化合物膜, 称为反应镀; 在镀料原子凝聚成膜的过程中, 还可以同时用具有一定能量的离子轰击膜层, 目的是改变膜层的结构与性能, 称为离子镀。其中, 反应镀在工艺和设备上变化不大, 可以认为是蒸镀和溅射的一种应用; 而离子镀在技术上变化较大, 所以通常将其与蒸镀、溅射并列为另一类镀膜技术。目前, 在模具的强化方面, 阴极溅射法和离子镀法应用较多。

1. 物理气相沉积的基本过程

(1) 气相物质的产生

主要是使镀料加热蒸发, 称为蒸发镀膜; 另一类是用具有一定能量的离子轰击靶材 (镀料), 从靶材上击出镀料原子, 称为溅射镀膜。

(2) 气相物质的输送

气相物质的输送要求在真空中进行, 这主要是为了避免气体碰撞妨碍气相镀料到达基片。在高真空的情况下 (真空度为 10^{-2} Pa), 镀料原子很少与残余气体分子碰撞, 基本上镀料原子是从镀料源直线到达基片; 在低真空度时 (真空度为 10 Pa), 镀料原子会与残余气体分子发生碰撞而绕射, 但只要不过于降低镀膜速率, 还是允许的。如真空度过低, 镀料原子频繁碰撞会相互凝聚成微粒, 则镀膜过程会无法进行。

(3) 气相物质的沉积

气相物质在基片上沉积是一个凝聚过程, 根据凝聚条件的不同, 可以形成非晶态

膜、单晶膜或多晶膜。

2. 真空蒸发镀膜

在高真空中加热使金属、合金或化合物镀料，使其蒸发为气相，然后凝聚在基体表面上的方法称为真空蒸发镀膜，简称真空蒸镀。与液体一样，固体在任何温度下都有汽化（升华），形成该物质的蒸气。在真空中，将镀料加热到高温，相应温度下的饱和蒸气向上散发，蒸发原子在各个方向的通量并不相等。基片设在蒸气源的上方阻挡蒸气流并形成凝固膜。为了弥补凝固的蒸气，蒸发源要以一定的速度供给蒸气。

(1) 真空蒸镀设备

真空蒸镀装置如图9-19所示。

1) 被沉积的材料（如TiC）置于装有加热系统的坩埚中，被镀基体置于蒸发源前面。当真空度达到0.13Pa时，加热坩埚使材料蒸发，所产生的蒸气凝集沉积在物体上形成涂层。

2) 基板入槽前要进行充分的清洗，在蒸镀时，一般在基板背面设置一个加热器，使基板保持适当温度，使镀层和基板之间形成薄的扩散层，以增大结合力。

(2) 蒸镀的加热方式

蒸发用热源主要分为三类：电阻加热源、电子束加热源、高频感应加热源。最近还采用了激光蒸镀法、离子蒸镀法。利用电子束加热源可以使钨（熔点为3380℃）、钼（熔点为2610℃）和钽（熔点为3100℃）等高熔点金属熔化。

蒸镀可以镀制纯金属，也可以镀制合金和化合物。在进行合金膜镀制时要求在整个基片表面和膜层厚度范围内得到均匀的合金组分。为达到此要求一般采用两种基本方式：多电子束蒸发源蒸镀和单电子束蒸发源蒸镀，如图9-20所示。

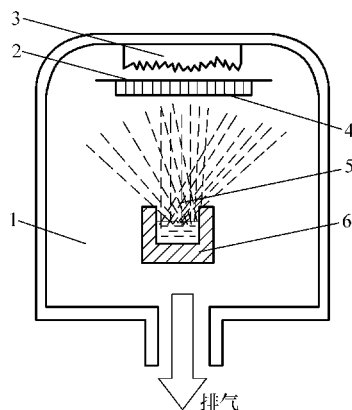


图9-19 真空蒸镀装置

1—高真空器 2—基板 3—加热器
4—膜面 5—蒸气流 6—蒸发器

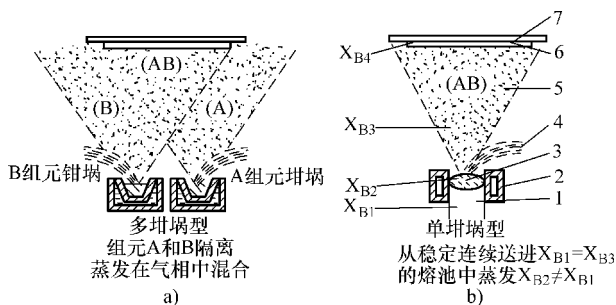


图9-20 合金膜蒸镀示意图

a) 多电子束蒸发源蒸镀 b) 单电子束蒸发源蒸镀

1—合金棒 2—棒料坩埚 3—熔池 4—电子束 5—蒸气流 6—膜层 7—基片

多电子束蒸发源由隔开的几个坩埚组成,坩埚数量按合金元素的多少来确定,蒸发后几种组元同时凝聚成膜。单电子束蒸发源沉积合金时会遇到分馏问题。例如, Ni - Cr 二元合金常用于制造电阻薄膜和耐蚀层,蒸镀的合金膜中镍和铬的质量分数分别为 80% 和 20%,蒸发温度约为 2000K,而铬在 2000K 的蒸气压强比镍高 100 倍,如果镀料一次加热,则因铬原子消耗较快,而使镀层逐渐贫铬。解决的方法是连续加料,熔池的温度和体积保持恒定是镀膜工艺成功的关键。如果合金组元蒸气压差别过大,则沉积合金的工艺会受到限制。

(3) 蒸镀工艺过程

- 1) 首先对真空装置及被镀模具进行处理,去掉污物、灰尘、油渍等。
- 2) 把清洗过的模具装在镀槽的支架上,并补足蒸发物质。
- 3) 抽真空,先用回转泵抽至 13.3Pa,再用扩散泵抽至 133×10^{-6} Pa。
- 4) 在高真空下对模具加热,加热的目的是去除水分 (150 ~ 200℃) 和提高结合力 (300 ~ 400℃)。
- 5) 对蒸镀材料通电加热,达到厚度后停电。
- 6) 停镀后,需在真空条件下放置 15 ~ 30min,使之冷却至 100℃ 左右。
- 7) 关闭真空阀,导入空气,取出模具。

大多数化合物在热蒸发时会全部或部分分解,所以,用简单的蒸镀技术无法由化合物镀料镀制出相同化学成分的镀层。但有一些化合物,如氯化物、硫化物、硒化物和少数氧化物如 B_2O_3 、 SnO ,可以采用蒸镀。因为它们很少分解或者当其凝固时,各种组元又重新化合。然而不仅有材料本身的原因,也有与坩埚材料发生反应从而改变膜层成分的问题,这些都是化合物蒸镀的限制因素。

镀制化合物的另一途径是采用反应镀,例如,镀制 TiC 是在蒸镀 Ti 的同时,向真空室通乙炔气,于是基片上发生如下反应而得到镀层:



真空蒸镀只用于镀制对结合强度要求不高的某些功能膜,例如,用作电极的导电膜、光学镜头用的增透膜等。蒸镀用于镀制合金膜时,在保证合金成分方面,要比溅射困难得多,但在镀制纯金属时,蒸镀可以表现出镀膜速率快的优势。蒸镀的纯金属膜中,90% 以上为铝膜。

3. 阴极溅射镀膜

阴极溅射镀膜是指在真空室中,利用荷能粒子轰击某一靶材(阴极),使靶材表面原子以一定能量逸出,然后在基片表面沉积的过程。

(1) 溅射过程

用沉积的材料(如 TiC)作阴极靶,并接入 1 ~ 3kV 的直流负高压,在真空室内通入压力为 0.133 ~ 13.3Pa 的氩气(作为工作气体)。在电场的作用下,氩气电离后产生的氩离子轰击阴极靶面,溅射出的靶材原子或分子以一定的速度落在工件表面产生沉积,并使工件受热。溅射时工件的温度可达 500℃ 左右。图 9-21 所示为阴极溅射系统简图。

当接通高压电源时,阴极发出的电子在电场的作用下会向阳极运动,速度在电场中

不断增大。刚离开阴极的电子能量很低,不足以引起气体原子的变化,所以附近为暗区。在稍远的位置,当电子的能量足以使气体原子激发时就产生辉光,形成阴极辉光区。越过这一区域,电子能量进一步增加,就会引起气体原子电离,从而产生大量的离子与低速电子,此过程不发光,这一区域为阴极暗区。低速电子在此后向阳极的运动过程中,也会被加速,进而激发气体原子而发光,形成负辉光区。在负辉光区和阳极之间,还有几个阴暗的区域,但它们与溅射离子产生的关系不大,只起导电作用。

溅射下来的材料原子具有 $10 \sim 35\text{eV}$ 的动能,比蒸镀时的原子动能大得多,因而溅射膜的结合力也比蒸镀膜大。

溅射性能取决于所用的气体、离子的能量及被轰击的材料等。离子轰击所产生的投射作用可用于任何类型的材料,难熔材料 W、Ta、C、Mo、WC、TiC、TiN 也能像低熔点材料一样容易沉积。溅射出的合金组成常常与靶的成分相当。

(2) 溅射工艺

溅射的工艺很多,如果按电极的构造及配置方法进行分类,具有代表性的有:二极溅射、三极溅射、射频溅射、磁控溅射、对置溅射、离子束溅射、吸收溅射等。常用的是磁控溅射,目前已开发了多种磁控溅射装置。

1) 直流二极溅射。直流二极溅射是在阴极上接 $1 \sim 3\text{kV}$ 的直流负高压,阳极通常接地,如图 9-22 所示。

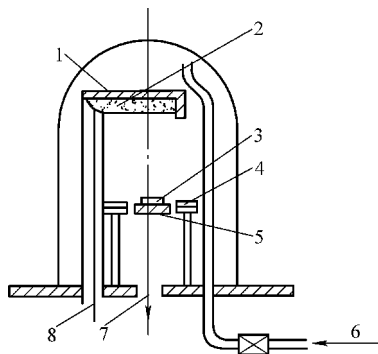


图 9-21 阴极溅射系统简图

1—阴极屏蔽 2—阴极（靶） 3—工件 4—阳极
5—固定装置 6—气体入口 7—抽真空 8—高压线

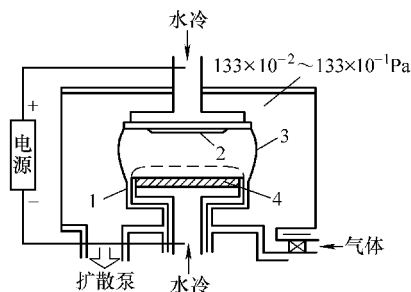


图 9-22 二极溅射装置

1—屏蔽 2—基板 3—等离子体 4—靶

这种装置的最大优点是结构简单、控制方便,但因工作压力较高,膜层有受到污染,积累速率低,不能镀 $10\mu\text{m}$ 以上的膜层,而且大量二次电子直接轰击基片使基片温度升高。

2) 三级和四级溅射。三级溅射是在二级溅射的装置上附加一个电极,使其放出热电子强化放电。它既能使溅射速率有所提高,又能使溅射工况的控制更为方便。四级溅射方法不能抑制由靶产生的高速电子对基片的轰击,还存在因灯丝具有不纯物而使膜层受到污染等问题。

3) 射频溅射。射频是指无线电波发射范围的频率。为了避免干扰电台工作, 射频专用频率规定为 13.56MHz。在射频电源交变电场作用下, 气体中的电子随之发生振荡, 并使气体电离为等离子体。

大功率的射频溅射电源价格高, 人身防护也有问题, 因此不适宜工业生产应用。

4) 磁控高速溅射。常用磁控高速溅射方法的工作原理为: 用氩气作为工作气体, 充氩气后反应室内的压力为 1.3 ~ 2.6Pa, 以欲沉积的金属和化合物为靶 (如 Ti、TiC、TiN), 在靶附近设置与靶平面平行的磁场, 另外在靶和工件之间设置阳极以防工件过热。磁场使靶附近的等离子密度 (即金属离化率) 提高, 从而提高溅射与沉积速率。平面磁控溅射靶如图 9-23 所示。

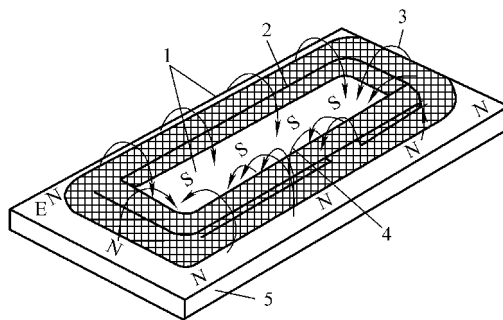


图 9-23 平面磁控溅射靶

1—磁极 2—刻蚀区 3—磁力线 4—跳跃电子 5—阴极

磁控溅射效率高, 成膜速度快 (可达 $2\mu\text{m}/\text{min}$), 而且基板温度低。因此, 此法适用性强, 可沉积纯金属、合金及化合物。例如以钛为靶, 引入氮或碳氢化合物气体可分别沉积 TiN、TiC 等。

(3) 合金膜的镀制

在物理气相沉积的各类技术中, 溅射最容易控制合金膜的成分。镀制合金膜可以采用多靶共溅射, 控制各个磁控靶的溅射参数, 可以得到一定成分的合金膜。如果直接采用合金靶 (单靶) 进行溅射, 则不必采用任何控制措施, 就可以得到与靶材成分相对一致的合金膜。

(4) 化合物膜的镀制

化合物膜是指金属元素与 O、N、Si、C、B、S 等非金属的化合物构成的膜层。化合物膜的镀制可选用化合物靶溅射和反应溅射。

1) 许多化合物是导电材料, 其电导率有的甚至与金属材料相当, 这时可以采用化合物靶进行直流溅射。大规模镀制化合物膜, 宜采用反应溅射。这种方法的优点在于不必用化合物靶材, 而是直接用金属靶, 也不必用复杂的射频电源, 而是用直流溅射。

2) 在诸多溅射方式中, 如果在 Ar 中混入反应气体, 如 O_2 、 N_2 、 CH_4 、 C_2H_2 等, 则可制得靶材料的氧化物、碳化物、氮化物等化合物薄膜, 称为反应溅射。在金属靶材进行溅射镀膜的同时, 向真空室内通入反应气体, 金属原子与反应气体在基片上发生化学

反应即可得到化合物膜。对于绝缘材料化合物则只能采用射频溅射。

4. 离子镀膜

离子镀就是在镀膜的同时,采用荷能离子轰击基片表面和膜层的镀膜技术。离子轰击就是既有离子又有原子的粒子轰击。粒子中不但有氩粒子,还有镀料粒子,在镀膜初期还会有由基片表面溅射出来的基材粒子。离子轰击的目的在于改善膜层的性能。

无论是蒸镀还是溅射都可以发展成离子镀。例如,在真空室内通入 1Pa 量级的氩气后,在基片上加上 1000V 以上的负偏压,即可产生辉光放电,并有能量为数百电子伏的离子轰击基片,也称为二级离子镀;在磁控溅射时,将基片与真空室绝缘,再加上数百伏的偏压,即有能量为 100eV 量级的离子向基片轰击,从而实现离子镀。

离子镀离子绕射性强,沉积没有明显的方向性,工件的各个表面都能镀上;镀层均匀性好,并且具有较高的致密度和细的晶粒度,即使是经镜面研磨的工件,进行离子镀后,表面依然光洁致密,无须再进行研磨。

(1) 离子镀设备

离子镀设备要在真空、气体放电的条件下完成镀膜和离子轰击过程。设备由真空室、蒸发源、高压电源、离化装置、放置工件的阴极等部分组成。图 9-24 所示为离子镀系统示意图。

(2) 离子镀的基本原理

离子镀的基本原理是借助于一种惰性气体的辉光放电使金属或合金蒸气离子化。离子经电场加速而沉积在带负电荷的基体上。惰性气体一般采用氩气,压力为 $133 \times 10^{-3} \sim 133 \times 10^{-2} \text{ Pa}$,两极电压为 500 ~ 2000V。离子镀包括镀膜材料(如 TiC、TiN)的受热、蒸发、沉积过程。蒸发的镀膜材料原子在经过辉光区时,一小部分发生电离,并在电场的作用下飞向工件,以几千电子伏的能量射到工件(模具)表面上,可以打入基体几纳米的深度,从而大大提高镀层的结合力。而未经电离的蒸发材料原子直接在工件上沉积成膜。惰性气体离子与镀膜材料离子在基板表面上发生的溅射还可以清除工件表面的污染物,从而提高结合力。

惰性气体离子与镀膜材料离子在基板表面上发生的溅射还可以清除工件表面的污染物,从而提高结合力。

(3) 离子镀工艺

提高金属蒸气原子的离子化程度,可以增大镀层的结合力,为此发展了一系列的离子镀设备和方法,如高频离子镀、空心阴极放电离子镀、热阴极离子镀、感应加热离子镀、活性化蒸发离子镀、低压等离子离子镀等。国内外常用的离子镀工艺为多弧离子镀、空心阴极离子镀和离子束辅助沉积。

1) 多弧离子镀。近年来多弧离子镀由于设备结构简单、操作方便、镀层均匀、生产率高,而受到人们的重视。其工作特点是:

① 多弧离子镀是从阴极直接产生等离子体,不用熔池,阴极靶可根据工件形状在

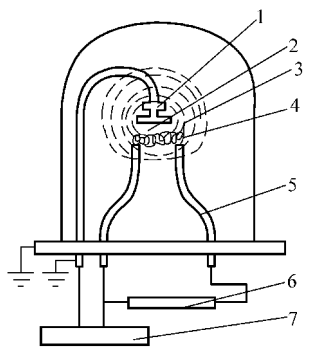


图 9-24 离子镀系统示意图

1—基板（阴极） 2—阴极暗部
3—辉光放电区 4—蒸发灯丝（阳极）
5—绝缘管 6—灯丝电源 7—高压电源

任意方向布置,也可多源联合工作,使夹具大为简化,有利于大件镀膜。多弧蒸发源既是蒸发器又是离化源,无须增加辅助离化源,也无须通入惰性气体轰击清洗工件,并且不需要烘烤装置,设备简单,工艺稳定。

② 入射粒子能量高,膜的致密度高,强度好,膜基界面产生原子扩散,结合强度高,离化率高,一般可达 60% ~ 80%,有利于改善膜层的质量,特别适用于活性反应沉积化合物膜层。

③ 多弧蒸发源接电源负极,真空室外壳接正极,调整工作电流,靶材表面进行弧光放电,同时蒸发出阴极金属蒸气,其中部分发生电离并在基板负偏压的吸引下轰击工件表面,从而起到洁净工件表面的作用和使工件的温度升高达到沉积所需温度。此后,逐渐降低基板负压,靶粒子飞向基板形成镀膜。如果同时通入适当流量的反应气体,则可在工件表面沉积得到化合物膜层。

④ 多弧蒸发源在蒸发阴极材料时,往往有液滴沉积在工件表面,造成工件表面具有较高的表面粗糙度值。所以减少和细化蒸发材料液滴是当前多弧离子镀工艺的关键问题。

2) 空心阴极离子镀(HCD)。空心阴极离子镀利用空心热阴极放电产生等离子体,如图 9-25 所示。

① 以空心钨管作为阴极,辅助阳极距阴极较近,二者作为引燃弧光放电的两极,阳极是镀料。弧光放电主要在管口部位产生,该部位在离子轰击下温度高达 2500K 左右,于是放射电子使弧光放电得以维持。HCD 枪引出的电子束初步聚焦后,在偏转磁场作用下,直径收缩而聚焦在坩埚上。HCD 枪既是镀料的汽化源,也是蒸发粒子的离化源。由于带电粒子密度大,而且具有大量的高速中性粒子,所以离化率较高,实际测量的金属离化率是 20% ~ 40%。

② 空心阴极离子镀可广泛应用于镀制高速工具钢工件形成 TiN 超硬膜,镀膜时基片所加偏压不高(20 ~ 50V),可避免刃口受到离子严重轰击而变钝,或过热而回火软化。轰击基片的离子能量为数十电子伏,这已远超过表面吸附气体的物理吸附能 0.1 ~ 0.5eV,也超过了化学吸附能 1 ~ 10eV,因而能起清洗作用。这样的离子能量还可避免膜层严重溅射而变得粗糙和降低镀膜速率。

3) 离子束辅助沉积。离子束辅助沉积是在蒸镀的同时,用离子束轰击基片,离子束由宽束离子源产生。与一般的离子镀相比采用单独的离子源产生离子束,可以精确控制离子的束流密度、能量和入射方向,而且在离子束辅助沉积中,沉积室的真空度很高,可获得高质量的膜层。

双离子束镀是一种将离子注入和常规气相沉积镀膜结合起来、兼有两者优点的高新技术。其基本特征是在气相沉积镀膜的同时,用具有一定能量的离子束轰击不断沉积着的物质。离子轰击引起沉积膜与基体材料间原子互相混合,界面原子互相渗透融为一体。

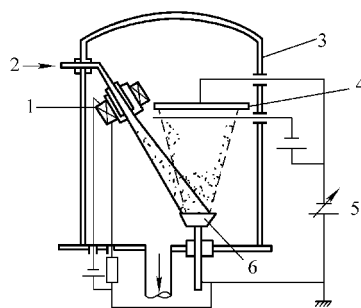


图 9-25 空心阴极离子镀装置

1—HCD 枪 2—Ar 气 3—钟罩
4—工件 5—高压电源 6—水冷铜坩埚

体, 形成一个过渡层, 从而大大改善了膜基的结合强度。双离子束镀膜原理示意图如图 9-26 所示。

① 图中离子束 1 用于轰击靶材, 使靶材原子溅射并沉积在基片上; 另一个高能离子束 2 起轰击 (注入) 作用。

② 在室温或近室温下能合成具有良好性能的合金、化合物或特种膜层, 以满足材料表面改性的需要。

③ 轰击离子既可以是惰性气体原子如 Xe、Ar、Ne、He 等, 也可以是反应气体原子如 N、O、H 以及各种有机化合物气体。

④ 这种离子束辅助沉积可以看成是物理气相沉积和离子注入两种技术改造后有机结合在一起形成的。虽然使用的离子能量比一般离子注入低, 但不需要加热器这类昂贵的设备 (比一般气相沉积设备还是要贵得多)。

主要应用于要求精度高、耐磨性特别好的工具、模具, 例如处理压印纪念币的模具, 印出的金、银币要求花纹一致, 且重量也必须严格控制。

5. 物理气相沉积的特点及应用

1) 采用物理气相沉积技术可以在各种材料上沉积致密、光滑、高精度的化合物 (如 TiC、TiN) 镀层, 所以十分适合模具的表面热处理。目前, 应用物理气相沉积制备 TiC、TiN 等镀层已在模具生产中获得应用。

① Cr12MoV 钢制油断路器精冲模, 经物理气相沉积后, 表面硬度为 2500 ~ 3000HV, 摩擦因数减小, 抗粘着和抗咬合性改善, 模具原使用 1 万 ~ 3 万次即要刃磨, 经物理气相沉积处理后, 使用 10 万次不需要刃磨, 尺寸无变化, 仍可使用; 用于冲压和挤压粘性材料的冷作模具, 采用物理气相沉积处理后, 其使用寿命大为提高。

② 65Nb 和 LM2 钢制造的电池冲模采用物理气相沉积 TiN, 提高了硬度, 减小了摩擦力, 其使用寿命由常规处理的 6 万 ~ 10 万件提高到 20 万件以上。

2) 物理气相沉积具有沉积温度低 (通常 < 550℃)、沉积速度较快、沉积层成分可以控制、工件几乎无变形及无公害等优点, 因而有很高的实用价值。特别适用于冷作模具, 尤其是精度要求高的冷作模具。

3) 物理气相沉积绕镀性比较差, 不适合对有小孔、凹槽等的复杂模具进行处理, 镀层的均匀性稍差, 加之设备造价高, 操作、维护的技术要求也较高。

9.5.2 化学气相沉积 (CVD)

化学气相沉积与物理气相沉积根本不同的是沉积粒子来源于化合物的气相分解反应。化学气相沉积是在相当高的温度下, 混合气体与基体表面相互作用, 使混合气体中的某些成分分解, 并在基体上形成一种金属或化合物的固态薄膜或镀层, 是用化学方法使反应气体在模具基材表面发生化学反应形成覆盖层的方法。

化学气相沉积的反应温度为 900 ~ 2000℃, 取决于沉积物的特性。中温化学气相沉积 (MTCVD) 的典型反应温度为 500 ~ 800℃, 通过金属有机化合物在较低的温度分解

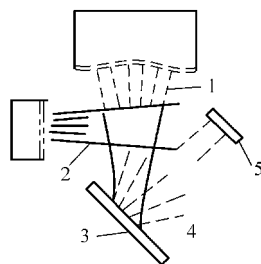


图 9-26 双离子束镀膜原理示意图

1—离子束 1 2—离子束 2
3—靶 4—原子溅射
5—基片薄膜

来实现, 所以又称为金属有机化合物化学气相沉积 (MOCVD)。

1. 化学气相沉积的特点

(1) 沉积温度

在中温或高温下, 通过气态的初始化合物之间的气相化学反应而沉积固体。可以在大气压 (常压) 或者低于大气压 (低压) 的条件下进行沉积, 一般低压效果要好些。采用等离子和激光辅助技术可以显著地促进化学反应, 使沉积可在较低温度下进行。

(2) 镀层性质

镀层的化学成分可以改变, 从而获得梯度沉积物或者得到混合镀层。可以对镀层进行控制, 确定镀层的密度和纯度。绕镀性好, 可在复杂形状基体上以及颗粒材料上镀制。

(3) 镀层结构

气流条件通常是层流, 在基体表面形成边界层。沉积层通常为柱状晶结构, 不抗弯曲, 但通过各种技术对化学反应进行气相扰动, 可以得到细晶粒的等轴沉积层。可形成多种金属、合金、陶瓷和化合物镀层。

2. 化学气相沉积的原理

(1) 沉积设备

化学气相沉积装置中, 反应器是最基本的部分。处理的工件 (模具) 置于反应器内, 反应器装夹在加热炉体内, 然后加热至沉积反应所要求的工作温度, 并保温一定时间。送入反应器的气体根据工艺要求而不同, 以一定的流量比分别供给 N_2 、 H_2 、 $TiCl_4$ 、 CH_4 、Ar 气, $TiCl_4$ 是通过加热液态的氯化钛得到的。反应后的废气经机械泵排出。为了防止发生爆炸事故, 反应器在沉积过程结束后开启前要充入氩气。为了去除气体中的有害成分, 如氧、水分等, 管路应配备必要的干燥净化装置。通常反应在 $800 \sim 1000^\circ C$ 和常压或低压下进行, 沉积装置如图 9-27 所示。

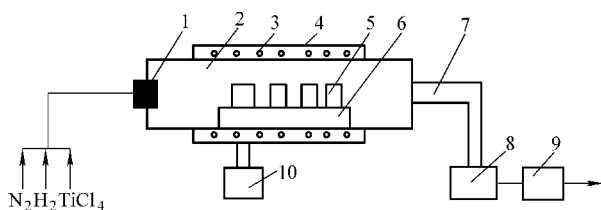


图 9-27 化学气相沉积装置示意图

- 1—进气系统 2—反应器 3—加热炉丝 4—加热炉 5—工件 6—卡具
7—排气管 8—机械泵 9—废气处理系统 10—加热炉电源及测温仪表

(2) 工艺要求

1) 沉积温度一般为 $950 \sim 1050^\circ C$, 温度升高, 可使 TiC 层厚度增加, 但晶粒变粗, 性能较差; 温度过低, $TiCl_4$ 还原出来钛的沉积速度大于碳化物的形成速度, 沉积物是多孔性的, 而且与基体结合不牢。

2) 气体流量必须进行很好的控制, Ti 和 C 的摩尔比最好为 $1: (0.85 \sim 0.97)$, 以防

游离碳沉积,使TiC覆盖层无法形成。

3) 沉积速率通常为每小时几微米,总的沉积时间为8~13h(包括加热时间和冷却时间)。沉积时间由所需镀层厚度决定,沉积时间越长,所得TiC层越厚;反之镀层越薄。沉积TiC的最佳厚度为3~10 μm ,沉积TiN的最佳厚度为5~15 μm ,太薄不耐磨,太厚结合力差。

4) 化学气相沉积的反应温度高,在基体与涂层之间易形成扩散层,因此结合力好,而且容易实现设备的大型化,可以大量处理。但是在高温下进行处理,模具变形较大,高温时的组织变化必然导致基体力学性能降低,所以化学气相沉积处理后必须重新进行热处理。

5) 为了扩大化学气相沉积的应用范围,减小模具变形,简化后续热处理工艺,通常采取降低沉积温度的方法,如等离子化学气相沉积(PECVD)、中温化学气相沉积等,这些方法可使反应温度降到500℃以下。

(3) 工艺过程

化学气相沉积TiC的工艺过程示意图如图9-28所示。

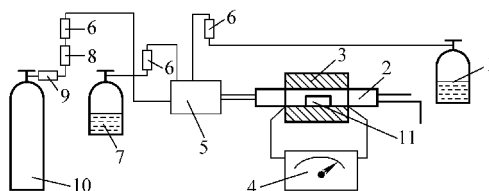
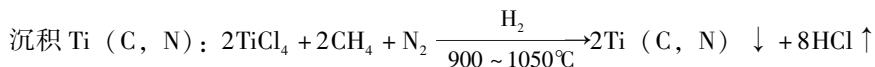
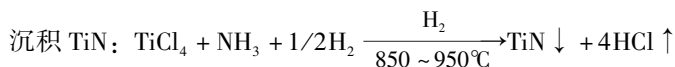
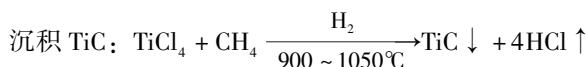


图9-28 化学气相沉积TiC的工艺过程示意图

1—甲烷(或其他反应气体) 2—反应室 3—感应炉 4—高频(或中频)转换器 5—混合室
6—流量计 7—卤化物(TiCl_4) 8—干燥器 9—催化剂 10—氢气 11—工件

1) 工件11置于氢气保护下,加热到1000~1050℃,然后以氢气10作载气把卤化物7(TiCl_4)和 CH_4 气1带入炉内反应室2中,使 TiCl_4 中的钛与 CH_4 中的碳(以及钢表面的碳)化合,形成碳化钛。反应的副产品被气流带出室外。

2) 沉积不同的涂层,将选择不同的化学反应。三种超硬涂层沉积时的化学反应如下。



其中 TiCl_4 为供Ti气体, CH_4 、 NH_3 (N_2)分别为供C、N气体, H_2 为载气和稀释剂。

3) 注意事项:

① 选用气体纯度要高,如氯气纯度要求在99.9%以上,而且在通入反应室前必须经过净化,以去除其中的氧化性成分。

② 沉积过程的温度控制要适当。若沉积温度过高,则会使 TiC 层厚度增加,晶粒变粗,性能较差;若温度过低,由 TiCl_4 还原出来的钛沉积速率大于碳化物的形成速率,沉积物是多孔性的,而且与基体结合不牢。

③ 在沉积过程中还必须严格控制气体的流量以及含碳气体与金属卤化物的比例,以防游离碳沉积,使 TiC 覆盖层无法生成。

④ 沉积时间应由所需镀层厚度决定。沉积时间越长,所得 TiC 层越厚,反之镀层越薄。

⑤ 工件在镀前应进行清洗和脱脂,为了尽可能减少变形,还应对工件进行预先淬火、回火处理。

⑥ 为了提高镀层的结合力,在钢或硬质合金上镀层的成分应从 TiC 到 TiN 逐渐过渡。开始时镀 TiC 与基体材料中碳化物有较好的结合力,随后增加 N 含量,减少了碳含量,使表面形成 TiN 镀层。

⑦ 钢铁材料经化学气相沉积后,虽然镀层的硬度很高,但基体材料被退火软化,在外载下易于塌陷,因此,必须进行最终淬火、回火。防止热处理变形非常重要,其在一定程度上限制了化学气相沉积在模具中的应用。

3. 化学气相沉积的应用

1) 化学气相沉积镀层可应用于要求耐磨、抗氧化、耐腐蚀以及有某些电学、光学和摩擦学性能的部件。耐磨镀层一般采用难熔的硼化物、碳化物、氮化物和氧化物。耐磨镀层主要用于金属切削刀具。满足这些要求的镀层包括 TiC、TiN、 Al_2O_3 、TaC、HfN 和 TiB_2 以及它们的组合。除刀具外,化学气相沉积镀层还可用于其他承受摩擦磨损的设备,如泥浆传输设备、煤的气化设备和矿井设备等。

2) 在模具制造业,由于化学气相沉积温度高、涂层结合牢固,而且可对形状复杂或带有沟、槽及孔的工件进行均匀涂覆,因此应用广泛。TiC 等涂层硬度相当高,可达 3000HV,耐磨性好,摩擦因数小,具有很好的减摩性和抗咬合性,可提高模具的使用寿命。化学气相沉积 TiC、TiN、Ti(C, N) 的应用效果见表 9-26。

表 9-26 化学气相沉积 TiC、TiN、Ti(C, N) 的应用效果

镀层	模具名称	钢号	无镀层寿命	沉积后寿命	提高倍数
TiN	模圈	Cr12	150 ~ 200 次	1100 ~ 1900 次	6 ~ 8 倍
TiN	修整模	M2	10 000 次	40 000 次	3 倍
TiN	冲模	Cr12MoV	25 000 次	10 万次	3 倍
TiN	环形模具	D2	5000 次	40 000 次	7 倍
TiN	液铣刀	M2	1500 次	4500 次	2 倍
TiC	搓丝模	D2	50 万次	200 万次	3 倍
TiC	成形工具	T10	4950 次	23 000 次	3 倍
Ti(C, N)	自行车轴承轴碗下模	Cr12	5 万次	30 万次	5 倍
Ti(C, N)	锯片轧辊	Cr12MoV	3 个月	21 个月	6 倍
Ti(C, N)	冲孔模	Cr12	3 天	15 天	4 倍

4. 物理气相沉积与化学气相沉积比较

物理气相沉积以各种物理方法产生的原子或分子沉积在基材上形成外加覆盖层，工件沉积温度一般不超过 600℃。模具钢沉积后通常都无须进行热处理，因而其应用比化学气相沉积广。近年来研究开发的离子镀在模具表面强化方面获得应用，它既保留了化学气相沉积的本质，又具有物理气相沉积的优点，效果较显著。化学气相沉积镀膜耐磨、抗氧化、耐腐蚀，减摩性和抗咬合性好，主要应用于高温耐磨场合。

三种 PVD 法与 CVD 法的特性比较见表 9-27。

表 9-27 三种 PVD 法与 CVD 法的特性比较

项 目	PVD 法			CVD 法
	真空蒸镀	阴极溅射	离子镀	
镀金属	可以	可以	可以	可以
镀合金	可以，但工艺复杂	可以	可以，但工艺复杂	可以
镀高熔点化合物	可以，但工艺复杂	可以	可以，但工艺复杂	可以
沉积粒子的能量/eV	0.1~1	1~10	30~1000	—
沉积速度/($\mu\text{m}/\text{min}$)	0.1~75	0.01~2	0.1~50	较快
沉积膜的密度	较低	高	高	高
孔隙度	中	小	小	极小
基体与镀层的连接	没有合金相	没有合金相	有合金相	有合金相
结合力	差	好	最好	最好
均镀能力	不好	好	好	好
镀覆机理	真空蒸发	辉光放电、溅射	辉光放电	气相化学反应

9.5.3 等离子化学气相沉积 (PCVD)

等离子化学气相沉积是介于化学气相沉积和物理气相沉积之间的一种处理方法，借助气体辉光放电产生的低温等离子体来增强反应物质的化学活性，促进气体间的化学反应，从而能在较低的温度下沉积出所需的镀层。

1. 等离子化学气相沉积的工作原理

等离子化学气相沉积的工作原理与直流辉光离子渗氮相似，其装置示意图如图 9-29 所示。

1) 工件置于阴极上利用辉光放电或外热源使工件升到一定的温度后，通入适量的反应气，经过化学和等离子体反应生成沉积薄膜。

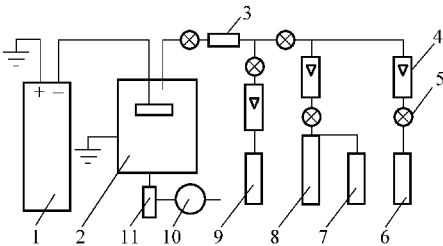


图 9-29 等离子化学气相沉积装置示意图

1—直流电源 2—炉体 3—气体混合器 4—流量计
5—微调阀 6—氮气瓶 7—氢气瓶 8—氢气纯化器
9—TiCl₄ 瓶 10—真空泵 11—冷阱

2) 在反应过程中, 由于存在辉光放电过程, 气体剧烈电离而受到活化, 因此反应温度较化学气相沉积可以大大下降。

2. 等离子化学气相沉积的特点

1) 兼有化学气相沉积的良好绕镀性和物理气相沉积的低温成膜优点, 而且, 采用直流脉冲电源时, 工件上的小孔、凹槽也可均匀沉积优质镀层, 因此十分适用于形状复杂的精密模具, 如激光盘、密纹盘等镜面模具。

2) 用等离子化学气相沉积法涂覆 NiCN、TiCN、TiC、TiN 等涂层结合力高, 模具使用性能好, 使用寿命高, 且模具材料不会劣化, 经济效益十分显著。

3. 等离子化学气相沉积的应用

等离子化学气相沉积主要应用于精密模具及有精度要求的模具零件。例如, 采用 SKH51 模具钢制造的凸模经等离子化学气相沉积处理后, 其使用寿命可提高 6 倍以上; 同样材料的冷镦模等离子化学气相沉积处理比化学气相沉积处理, 其使用寿命提高 2 ~ 4 倍; H13 钢制造的铝挤压模采用等离子化学气相沉积 TiN 涂层后, 模具寿命可提高 3 ~ 5 倍。等离子化学气相沉积在模具制造中有着巨大的应用前景。

9.6 模具的表面高能强化

随着具有能量高、加热迅速、加热层薄、自激冷却、变形很小、便于实现自动化等优点的激光束、电子束、离子束等高能束流的出现, 利用高能束流技术进行材料表面改性及表面强化已成为表面工程技术中的新型高效表面强化技术。高能束流技术对材料表面的改性是通过改变材料表面的化学成分或结构实现的。成分改变包括表面合金化或熔覆, 结构改变是对组织和相的改变。

表面高能强化技术的热源通常是激光束、电子束及离子束。其共同特点是: 加热速度快, 加热面积可根据需要选择, 工件变形小, 不需要冷却介质, 可控性能好, 便于实现自动化处理。它们供给材料表面的功率密度至少为 10^3 W/cm^2 。国内外对高能束加热的原理、工艺均有较多的研究, 比较成熟的是激光表面相变硬化、小尺寸电子束处理和中等功率的离子注入, 并在提高模具寿命方面获得应用。

9.6.1 激光表面强化技术

激光表面强化处理工艺包括激光淬火、激光涂覆、激光合金化、激光非晶化和激光冲击硬化等。激光表面强化处理的目的是改变表面层的成分和显微结构, 处理后的许多效果是与快速加热和随后的急速冷却分不开的。

1. 激光的特点

(1) 高方向性

激光束的发射角可以小于 1 到几个毫弧度, 可以认为光束基本上是平行的。一般平行平面型谐振腔的激光发射角 θ 由下式表示:

$$\theta = 2.44\lambda/d$$

式中 d ——工作物质直径。

λ ——激光波长。

(2) 高亮度性

激光发射出来的光束非常强,通过聚焦集中到一个极小的范围内,可以获得极高的流量密度或功率密度,聚集后的功率密度可达 10^{14} W/cm^2 , 焦斑中心温度可达几千到几万摄氏度,只有电子束的功率密度才能与激光相比拟。

(3) 高单色性

激光具有相同的位相和波长,所以激光的单色性好。

2. 激光与材料的关系

1) 激光与材料的相互作用主要是通过电子激发实现的。激光束照射在材料表面上,只有一部分激光被材料所吸收而转化为热能,另一部分激光则从材料表面反射。金属对激光波长的吸收因不同金属而异,一般为 $10\mu\text{m}$ 左右。在临界波长以上,金属的反射率非常高,达 90% 以上;在临界波长以下,反射率急剧减小。

2) 不同材料对不同波长激光的反射率是不同的。金属的表面状态对反射率极为敏感,表面越光滑反射率越高。电导率高的金属材料对激光的反射率也高。

3) 激光透入金属的深度仅为表面以下 10^{-5} cm 以内。所以,激光对金属的加热,可以看做是一种表面热源,在表面层光能变为热能,此后热能按一般的传导规律向金属深处传导。当激光束强度远低于熔化阈值时,由于辐照金属表面高的温度梯度的作用,在亚表层区会产生严重的不均匀应变。

3. 激光热处理的特点

利用高功率密度(一般为 $10^4 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$) 激光束对金属进行表面处理的方法称为激光热处理。激光热处理分为激光相变硬化(表面淬火、表面非晶化及表面重熔淬火)、激光表面合金化(表面敷层合金化、硬质粒子喷射合金化、气体合金化)等表面改性工艺,获得其他表面淬火强化达不到的表面成分、组织及性能的改变。

1) 激光热处理是在高速加热、高速冷却过程中进行的,加热速度可达 $10^5 \sim 10^9 \text{ }^\circ\text{C/s}$, 对应的加热时间为 $10^{-3} \sim 10^{-7} \text{ s}$; 冷却速率可达 $10^4 \sim 10^7 \text{ }^\circ\text{C/s}$, 而且扫描速率越快,冷却速率也越快,所以温度梯度很高,从而在表面形成一层硬度极高的特殊淬火组织。其硬度通常比常规淬火的硬度高 15% ~ 20%, 耐磨性可提高 5 ~ 10 倍,淬硬层深度可达 $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$ 。

2) 激光淬火后获得的表面显微组织分为两层。例如,低碳钢激光淬火,外层是完全淬火区,组织是隐针马氏体;内层为不完全淬火区,保留有铁素体。高碳钢的表面显微组织,外层为隐针马氏体,内层为隐针马氏体 + 未溶碳化物。中碳钢的表面显微组织分为四层,外层为白亮的隐针马氏体,硬度达 800HV,比一般淬火硬度高;第二层是隐针马氏体 + 少量托氏体,硬度稍低;第三层是隐针马氏体 + 网状托氏体 + 少量铁素体;第四层是隐针马氏体 + 完整的铁素体网。

3) 激光热处理获得的组织细密、硬度高、耐磨性好,淬火部位产生很大的残余应力,有助于提高疲劳性能。激光热处理可以进行局部选择性淬火,通过对光斑尺寸的控制,

制,尤其适合其他热处理方法无法处理的不通孔、沉沟、微区、夹角、圆角和刀具刃部等局部区域的硬化。

4) 激光可以远距离传送,容易实现一台激光机器供若干工作台同时或单独使用,易于采用计算机对激光热处理工艺过程进行控制和管理,实现生产过程的自动化。此外激光热处理具有耗电少、变形极小、不需要冷却介质、速度快、效率高及无工业污染等优点。

4. 激光热处理工艺

(1) 激光热处理设备

激光热处理一般采用功率为千瓦级的连续工作 CO_2 激光,激光热处理的关键设备是激光器,目前工业中应用最多的是 500W 级纵向直流放电 CO_2 激光器,其性能如下:额定输出功率为 200 ~ 800W,光束直径为 4mm,发散角小于 2mrad。

常用激光热处理装置如图 9-30 所示。

(2) 工作过程

利用激光照射事先经过黑化处理的工件表面,使表面薄层快速加热到相变温度以上(低于熔点),光束移开后通过受激冷却即可实现表面淬火硬化。激光淬火的功率密度为 $10^3 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ 。由于加热工件表面温度及穿透深度均与激光照射持续时间的二次方根成正比,因此当激光束功率及光斑尺寸确定后,通过改变激光束的扫描速率,就可以控制工件表面温度与加热层深度。

(3) 工艺参数

激光淬火的基本工艺参数是:激光器的输出功率、光斑尺寸、扫描速度(或工件移动速度)以及材料对光的吸收率等。

5. 激光表面合金化和表面涂覆

激光表面合金化和表面涂覆是以激光为热源,在模具表面涂上特定的合金粉材料,以足够的功率及扫描速度,使表面金属快速熔凝,形成一层所需的合金熔化层来获取特殊的表面性能。

采用激光表面合金化和表面涂覆技术可获得深度为 10 ~ 1000 μm 的高性能硬化层,且与基体的结合强度远高于化学气相沉积和物理气相沉积层,并可通过表面合金化替代合金而节省大量贵重稀有元素。

6. 激光表面强化的特点与应用

激光淬火钢件表层可获得极细的马氏体,合金钢硬化区组织为极细板条或针状马氏体、未溶碳化物及少量残留奥氏体,激光硬化区与基体交界区呈现复杂的多相组织。激光淬火工件畸变极小、残余应力小,且由于无氧化脱碳作用,淬火表面更加光亮洁净,从而可以在最终精加工工序以后进行。利用激光淬火可改善模具表面硬度、耐磨性、热稳定性、抗疲劳性和临界断裂韧度等力学性能,是提高模具寿命的有效途径之一。例如

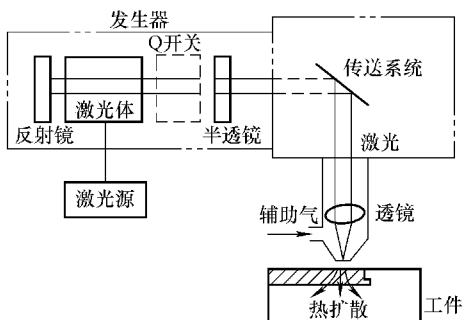


图 9-30 常用激光热处理装置示意图

GCr15 钢制轴承保持架冲孔用的冲孔凹模, 经常规处理后的使用寿命为 1.12 万次, 经激光处理后的寿命达 2.8 万次。GCr15 钢制挤压孔边用的压坡模, 经激光处理后, 可连续冲压 6000 件, 而按常规热处理工艺处理, 最高使用寿命只为 3000 件。如果在模具表面涂覆硬质合金粉末, 则可实现表面合金化。45 钢和 42CrMo 钢激光淬火的效果见表 9-28。

表 9-28 45 钢和 42CrMo 钢激光淬火的效果

钢号	黑化处理	淬硬层深度/mm	淬硬带宽度/mm	硬度 HV	淬硬层组织
45	发蓝处理	0.19 ~ 0.20	1.08 ~ 1.10	542	细针状马氏体
	磷化	0.22 ~ 0.27	1.10 ~ 1.23	542	细针状马氏体
	涂磷酸盐	0.25 ~ 0.31	1.18 ~ 1.35	585	细针状马氏体
42CrMo	发蓝处理	0.35	1.30	642	隐针马氏体
	磷化	0.35	1.53	642	隐针马氏体
	涂磷酸盐	0.35	1.64	642	隐针马氏体

注: 为了提高光能的吸收率, 被加工金属表面必须进行黑化处理, 最好的黑化方法是磷酸盐法。

9.6.2 电子束表面强化技术

高速运动的电子具有波的性质, 当高速电子束照射到金属表面时, 电子能深入金属表面一定深度, 与基体金属的原子核及电子发生相互作用。电子与原子核的碰撞可看成弹性碰撞, 因此, 能量传递主要是通过电子束的电子与金属表层电子碰撞而完成的。所传递的能量立即以热能的形式传给金属表层原子, 从而使被处理金属的表层温度迅速升高。目前电子束加速电压达 125kV, 输出功率达 150kW, 能量密度达 10^3 MW/m^2 , 因此, 电子束加热的深度和尺寸比激光大。

1. 电子束表面强化的特点

1) 加热和冷却速度快。电子束表面强化利用高能量密度的电子束加热, 由室温加热至奥氏体化温度或熔化温度仅几分之一到千分之一秒, 其冷却速度可达到 $10^6 \sim 10^8 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 。快速加热使零件变形极小, 无须后续的校正工作, 淬火后的金相组织可获得细晶结构。

2) 与激光相比使用成本低。电子束靠磁偏转动、扫描, 不需要工件转动、移动和光传输机构, 处理设备结构简单, 一次性投资仅为激光的 1/3。

3) 与金属表面耦合性好。电子束所射表面的角度除 $3^\circ \sim 4^\circ$ 特小角度外, 电子束与表面的耦合不受反射的影响, 能量利用率远高于激光。因此, 电子束处理工件前, 工件表面不需要加吸收涂料, 不需要表面黑化过程,

4) 能量控制方便。电子束是在真空中工作, 可以保证工件表面不被氧化, 能量是通过灯丝电流和加速电压很容易实施准确控制。

5) 加热层熔化深度大。电子束加热时熔化层只少几个微米, 这会影响冷却阶段固-液相界面的推进速度; 加热时能量沉积范围宽, 而且约有一半电子作用区几乎同时熔化; 电子束加热的液相温度低于激光, 因而温度梯度较小。

6) 与激光热处理相比, 电子束热处理模具必须放在真空室内, 装卸不方便。电子束易激发 X 射线, 使用过程中应注意防护。

2. 电子束表面相变强化处理

(1) 电子束淬火装置

电子束淬火装置如图 9-31 所示。

(2) 电子束表面强化过程

电子束加热可以达到 $10^6 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ 的能量密度。由阴极 (灯丝) 发出的电子通过高电压环形阳极加速, 并聚焦成束使电子束流打击金属表面, 达到加热的效果。

用散焦方式的电子束轰击金属工件表面, 控制加热速度为 $10^3 \sim 10^5 \text{ }^\circ\text{C/s}$, 使金属表面加热到相变点以上, 随后快速冷却 (冷却速度达 $10^8 \sim 10^{10} \text{ }^\circ\text{C/s}$) 产生马氏体等相变强化, 适用于碳素钢、中碳低合金钢、铸铁等材料的强化处理。

由于高能量密度的电子束在极短的时间内打击金属表面, 所以通过热量在表面的逸散表面温度就可以达到相变温度范围。当被加热表面吸收的热量很快地被底层材料吸收而冷却时, 就可以完成淬火冷却过程, 从而产生有效的自行淬火。

(3) 电子束表面重熔及表面合金化处理

利用电子束轰击工件表面使工件表面产生局部熔化并快速凝固, 从而细化组织, 达到硬度和韧性的最佳配合。电子束表面合金化所需电子束功率密度约为相变强化的 3 倍以上, 或延长电子束辐照时间, 使基体表层的一定深度内发生熔化。

3. 电子束表面强化的应用

(1) 用于表面精整加工

利用电子束进行金属材料表面精整加工和改性得到了迅速发展。当高能量密度的电子束作用到材料表面时, 大量的能量会在短时间内聚集在材料表面的薄层中, 被加热层的温度迅速升高, 发生局部熔化、汽化等现象。当输入能量结束时, 工件表面会急速冷却, 其结果, 表面将被非晶化。若使这一过程沿着整个表面反复进行就能获得非常光滑的镜面。经过这几个阶段的综合作用, 材料表面层的性质会发生明显的变化, 可以使材料表面具有用常规方法难以达到的物理、化学或力学性质。

(2) 实现表面相变硬化

利用电子束也可实现相变硬化、熔化、凝固和表面合金化。热处理的加热效率高, 快速加热使零件变形极小, 淬火后的金相组织可获得细晶结构, 42CrMo 钢电子束淬火的效果见表 9-29。

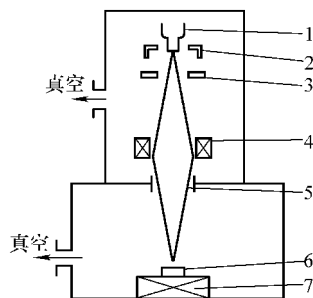


图 9-31 电子束淬火装置示意图

- 1—阴极 2—聚束极 3—阳极
4—聚焦线圈 5—电子束
6—工件 7—工件驱动机构

表 9-29 42CrMo 钢电子束淬火的效果

编号	加速电压 /kV	束流 /mA	聚焦电流 /mA	电子束功率 /kW	淬火带宽度 /mm	淬硬层深度 /mm	淬硬层硬度 HV	淬硬层组织
1	60	15	500	0.90	2.4	0.35	627	5~6 级细针马氏体
2	60	16	500	0.96	2.5	0.35	690	隐针马氏体
3	60	18	500	1.08	2.9	0.45	657	隐针马氏体
4	60	20	500	1.20	3.0	0.48	690	5~6 级针状马氏体
5	60	25	500	1.50	3.6	0.80	642	4 级针状马氏体
6	60	30	500	1.80	5.0	1.55	606	2 级针状马氏体

9.6.3 离子注入技术

离子注入技术是将注入元素的原子电离成离子，在电场中加速获得较高速度后射入放在真空靶室中的工件表面的一种表面处理技术。由于被注入离子是以很高的速度强行注入的，所以，不受基体金属中的扩散速率以及固溶度的限制，可获得高度过饱和固溶体、亚稳定相、非晶态和平衡合金等不同的组织结构形式，从而改善了工件的使用性能。

1. 离子注入的特点

1) 离子注入法不同于任何热扩散方法，可注入任何元素，且不受固溶度和扩散系数的影响，因此，用这种方法可能获得不同于平衡结构的特殊物质，是开发新型材料的非常独特的方法。

2) 离子注入温度和注入后的温度可任意控制，且在真空中进行，不氧化、不变形、不发生退火软化，注入层薄、工件尺寸基本不变、表面粗糙度也一般无变化，可作为最终工艺。

3) 可控性和重复性好，通过改变离子源和加速器能量，可以调整离子注入深度和分布，通过可控扫描机构，不仅可实现在较大面积上的均匀化，而且可以在很小的范围内进行局部改性。

4) 可获得两层或两层以上性能不同的复合材料，复合层不易脱落。

5) 离子注入层薄（ $<1\mu\text{m}$ ），离子只能直线行进，不能绕行，形状复杂和有内孔的工件不能进行离子注入，设备造价高，应用不广泛。

2. 离子注入的工作原理

(1) 离子注入的过程

离子注入系统示意图如图 9-32 所示。

1) 将选定元素的原子（He、N、B、Al、Ti、Cr、Ni、Co、Mo 等）在离子源处电离成离子，然后将离子在高压电场（10~500kV）中加速，依 $E=qV$ 的规律获得高的动能（ q 为离子电荷），并用横向磁场把不同的质量的离

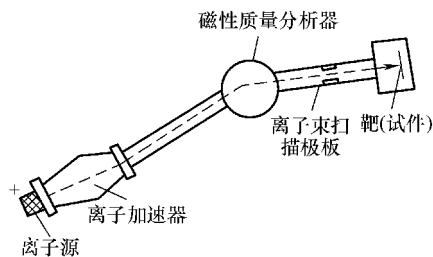


图 9-32 离子注入系统示意图

子偏转不同的角度,选出特定能量和特定质量的离子,通过扫描系统注入金属靶材料表面。整个过程在 $1.3 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 的真空下进行。

2) 离子注入深度一般在 $4\mu\text{m}$ 以下,在近表面层中注入的金属以高过饱和固溶体、亚稳相、非晶态组织和平衡合金等不同结构形式存在。离子注入金属后可改善其耐磨性、耐腐蚀性和抗疲劳能力。

3) 离子注入原则上可以任意选择注入元素,不受冶金学限制,它在高真空及低温下进行,不会引起模具畸变,不影响表面粗糙度,可精确控制注入离子的浓度、浓度分布和注入深度。目前离子注入技术不断发展并日趋成熟,设备不断完善。离子注入工具、模具进行表面改性已获得越来越多的应用。

(2) 离子注入提高硬度、耐磨性和疲劳强度的机理

1) 离子注入提高硬度是由于注入的原子进入位错附近或形成固溶体产生固溶强化。当注入的是非金属元素时,常常与金属元素形成化合物,如氮化物、碳化物和硼化物的弥散相,产生弥散强化。离子轰击造成的表面压缩应力也有冷作硬化作用,使离子注入表面硬度显著提高。

2) 离子注入提高耐磨性的原因是多方面的。离子注入能引起表面层组分与结构的改变。大量的注入离子以杂质形态聚集在离子轰击产生的位错线周围,形成柯氏气团,起钉扎位错的作用,使表层强化,加上高硬度弥散析出物引起的强化,提高了表面硬度,从而提高了耐磨性。

3) 离子注入提高疲劳强度是因为产生的高损伤缺陷阻止了位错移动及期间的凝聚,形成可塑性表面层,使表面强度大大提高。分析表明,离子注入后在近表面层形成大量细小弥散均匀分布的第二相硬质点而产生强化,而且离子注入产生的表面压缩应力可以抑制表面裂缝的产生,从而延长了疲劳寿命。

3. 离子注入在模具工业中的应用

由于离子注入后既不改变模具基体表面的几何尺寸,又能形成与基体材料完全结合的表面合金,不存在由明显的分界面而产生的剥落问题,同时也由于大量离子(如氮、碳、硼、钼等)的注入,可使模具基体表面产生明显的硬化效果,降低了摩擦因数,显著地提高了模具表面的耐磨性、耐蚀性以及抗疲劳等性能,因此,离子注入技术在模具工业中,如冲裁模、拉丝模、挤压模、拉深模、塑料模等最终热处理表面强化方面得到了广泛应用,其应用效果见表 9-30。

表 9-30 模具离子注入技术应用效果

模具名称	被加工材料	注入离子	使用寿命
钢拉丝模	WC-6% Co	N、C	提高 4~6 倍
环形冲模	工具钢	N	提高 10 倍
塑料挤压模	P20	N	提高 2~3 倍
钢丝拉模	WC-6% Co	N	提高 6 倍
注射模	WC-6% Co	N	提高 5~8 倍
凹槽模	WC-6% Co	N	提高 18 倍

目前,离子注入技术在应用中还存在一些不足,如离子注入层较薄、小孔处理困难、设备复杂昂贵等,所以应用受到一定限制。

9.7 模具的表面形变强化

通过使金属表面层产生变形,使表层产生加工强化层和残余压缩应力,从而提高表层的疲劳强度,实现表面形变强化。表面形变强化方法有喷丸、滚压、内孔挤压等。

喷丸强化是利用大量钢丸(弹丸的直径一般为 $0.3 \sim 1.7\text{mm}$)高速打击已加工成形并热处理后的模具表面,使表面产生冷硬层和残余压缩应力,可以显著提高模具的疲劳强度,同时可减少模具表面缺陷(如污物及脱碳),从而提高模具的使用寿命。

1. 喷丸强化的特点

喷丸处理后的模具具有如下性能特点:

(1) 抑制疲劳裂纹的生长

由于喷丸在金属表面产生残余压缩应力和晶格畸变,因此喷丸强化能明显地减缓疲劳裂纹的萌生或抑制其扩展。

(2) 促进残留奥氏体转变

喷丸过程中,金属表面的塑性变形和残余应力状态变化及重新分布,给残留奥氏体的转变提供了有利条件,残留奥氏体转变为马氏体,提高了模具表面硬度和抗冲击磨损能力,进而提高了模具表层的屈服强度,可以延缓疲劳裂纹的萌生,提高模具的疲劳强度。

(3) 改善工件表面的性质

模具喷丸后,由于圆形弹丸的高速反复锤击,削平了刀痕,改善了磨削加工和电加工的表面粗糙度,在一定程度上提高了疲劳强度。

2. 喷丸强化工艺

(1) 喷丸强化的工艺装备

喷丸所用设备是压缩空气喷丸装置和机械离心式喷丸装置。这些装置可以使弹丸以 $35 \sim 50\text{m/s}$ 的线速度工作。弹丸可以是铸铁或砂石,另有铸钢丸、棕刚玉、黑刚玉、核桃砂、玻璃珠、不锈钢丸等,根据不同要求选用弹丸。

(2) 喷丸强化的工艺过程

喷丸就是将大量弹丸喷射到工件表面上的过程,有如无数小锤对工件表面进行锤击,因此,金属工件表面产生极为强烈的塑性变形,使工件表面产生一定厚度的冷作硬化层,称为表面强化层,此强化层显著提高模具表面的强度。喷丸强化工艺示意图如图9-33所示。

由于金属材料是不可压缩的,当弹丸向工件表面挤压时,材料被迫向周围挤堆,因此,弹丸下面的材料在与工件表面平行的方向上扩展,同时产生弹性与塑性变形,而距表面稍深处的内部因弹性作用在弹丸离开工作表面时产生弹性恢复。已产生塑性变形的表面部分因弹性恢复不充分而受到内部材料的压缩作用,在与表面平行的方向上产生残余压缩应力。

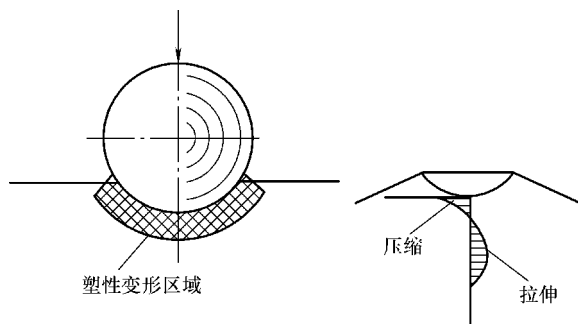


图 9-33 喷丸强化工艺示意图

评定强化质量的参数为强度、覆盖率和表面粗糙度。

3. 喷丸强化的应用效果

实例 3Cr2W8V (H21) 钢制活动扳手热锻模具。

1) 工艺流程

① 3Cr2W8V 钢制活动扳手热锻模的加工工序：下料→锻造→退火→机械加工→电火花加工→酸洗→手工抛光→热处理→喷丸→入库。

② 热处理工艺：锻后退火 $830 \sim 850^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ ，炉冷至 400°C 出炉，退火硬度 $\leq 255\text{HBW}$ ； $850^{\circ}\text{C} \times 0.6\text{min/mm}$ 预热， $1150^{\circ}\text{C} \times 0.3\text{min/mm}$ 加热， $560^{\circ}\text{C} \times 0.25\text{min/mm}$ 淬火分级冷却，硬度为 $52 \sim 53\text{HRC}$ ； $620 \sim 640^{\circ}\text{C} \times 2.5\text{h} + 560^{\circ}\text{C} \times 2.5\text{h} \times 2$ 次回火，硬度为 $47 \sim 49\text{HRC}$ 。

2) 喷丸强化效果。喷丸后表面应力由 68.6MPa 拉伸应力转化为 811.4MPa 压缩应力；表面粗糙度 Ra ，头部由 $19.1\mu\text{m}$ 降低到 $14.7\mu\text{m}$ ，飞边由 $44.6\mu\text{m}$ 降低到 $15.5\mu\text{m}$ ；表面硬度由 470HV 提高到 485HV ；强化层深度为 $0.2 \sim 0.4\text{mm}$ 。

喷丸强化不仅使应力状态和表面粗糙度明显改善，而且金属表面会产生强烈的畸变，晶粒进一步细化。裂纹萌生期的延长会直接提高模具的疲劳寿命。

有关试验表明，喷丸能提高模具寿命。上述 3Cr2W8V 钢经常规处理，一次刃磨的使用寿命为 1750 件左右，喷丸处理后，使用寿命为 2634 件，寿命提高 50%。Cr12 钢制洗衣机定、转子落料冲裁模，经淬火、回火后，一次刃磨的使用寿命为 1.2 万 ~ 3.2 万次，喷丸强化后，一次刃磨的使用寿命为 11.49 万次，寿命提高 2.5 ~ 8.5 倍。

喷丸强化工艺可应用于落料模、冷镦模和热镦模等以疲劳失效为主的模具上，可有效地延长服役期。

9.8 稀土元素表面强化与复合表面技术

9.8.1 稀土元素表面强化

化学元素周期表中的 15 个镧系元素镧 (La)、铈 (Ce)、镨 (Pr)、钕 (Nd)、钷

(Pm)、钐(Sm)、铕(Eu)、钆(Gd)、铽(Tb)、镝(Dy)、钬(Ho)、铒(Er)、铥(Tm)、镱(Yb)、镱(Lu), 以及与镧系元素密切相关的2个元素钪(Sc)和钇(Y), 共17种元素, 称为稀土元素(Rare Earth Element, RE)。稀土元素是从18世纪末叶开始陆续发现的, 当时人们常把不溶于水的固体氧化物称为土, 稀土元素一般是以氧化物状态分离出来的, 又很稀少, 因而得名为稀土。

1. 稀土元素的性质与应用

(1) 稀土元素的共性

稀土元素的共性表现为原子结构相似, 离子半径相近, 在自然界密切共生。

(2) 稀土元素的分组方法

稀土元素有多种分组方法, 目前最常用的有两种。

1) 两分法。铈族稀土, La ~ Eu, 也称为轻稀土(LREE); 钇族稀土, Gd ~ Lu + Y + Sc, 也称为重稀土(HREE)。

2) 三分法。根据稀土元素物理化学性质的相似性和差异性分组, 除钪之外(有的将钪归为稀散元素), 划分成三组: 轻稀土组为镧、铈、镨、钕、钐; 中稀土组为钐、铕、钆、铽、镝; 重稀土组为钬、铒、铥、镱、镱、钇。

自然界中的主要稀土矿物有独居石、铈硅石、铈铝石、黑稀金矿和磷酸钇矿。稀土元素并不稀少, 已经发现的稀土矿物有250种以上, 特别是我国的稀土资源十分丰富, 储量居世界第一位。

(3) 稀土元素的应用

稀土元素的化学性质相近而又不完全相同, 共同的特征表现为具有很强的电负性, 离子较为稳定, 电子结构特殊, 化学活性较强, 因此对一般金属及合金有着优异的改良性能, 表现为变质作用、强化作用、净化作用以及改善高温力学性能、高温抗氧化性能和耐蚀性的作用。已广泛应用于电子、石油化工、冶金、机械、能源、轻工、环境保护、农业等领域。

1) 应用稀土元素可生产荧光材料、稀土金属氢化物电池材料、电光源材料、永磁材料、储氢材料、催化材料、精密陶瓷材料、激光材料、超导材料、磁致伸缩材料、磁致冷材料、磁光存储材料、光导纤维材料等。

2) 常用的氯化物体系为KCl-RECl₃, 其在工农业生产和科研中有广泛的用途, 在钢、铸铁和合金中加入少量稀土元素能显著改善性能。用稀土元素制得的磁性材料其磁性极强, 用途广泛。在化学工业中广泛用作催化剂。稀土氧化物是重要的发光材料、激光材料。

2. 稀土元素在模具表面强化中的应用

在模具表面强化中, 稀土元素的加入对模具钢的表层组织结构和物理、化学及力学性能有着极为重要的影响, 它具有催渗、强化表面及净化表面等多种功能。

1) 稀土元素的催渗作用。稀土元素可以使渗碳、渗氮、碳氮共渗、渗硼及渗金属等的速度提高25%~30%, 缩短处理时间1/3以上, 而且还能显著降低其处理温度, 这对降低模具的变形与开裂倾向是极为有利的。

2) 稀土元素能加速渗剂的分解。由于稀土元素的化学活性极强, 在共渗过程中不仅是一种很好的催渗剂, 而且还是一种很好的还原剂。它可将渗剂中的硼原子及金属原子等还原出来, 因而能加速活性原子的产生, 即加速渗剂的分解。

3) 稀土元素能加速模具(基体)表面对活性原子的吸收。由于金属表面具有宏观和微观不均匀性, 如磨痕、晶界、亚晶界、位错及空位等, 因而在表面强化过程中, 稀土元素的原子首先被吸附于金属(基体)的表面, 从而使体系能量降低。当稀土原子被吸附于金属表面后, 一部分便以活性稀土原子的形式提供稀土源, 并不断向内部扩散, 而另一部分则由于稀土元素的电负性低而产生钝化。

4) 稀土元素还可与钢中的 P、S、As、Sb、Pb 等低熔点有害杂质发生作用形成高熔点化合物, 抑制这些杂质元素在晶界上的偏聚, 从而降低渗层的脆性, 同时具有细化晶粒使渗层组织致密、提高渗层与基体的结合力等多种复合功能。

目前应用于模具表面强化技术的稀土元素主要采用稀土化合物形式, 如 La_2O_3 、 LaF_3 、 CeF_3 、 CeS_2 、 Y_2O_3 及稀土硅铁等。较为成熟的稀土元素表面强化技术主要有稀土碳共渗、稀土碳氮共渗、稀土硼共渗、稀土硼铝共渗等。

例如, 采用 RE-C 共渗可明显使渗碳温度由 $920 \sim 930^\circ\text{C}$ 降至 $860 \sim 880^\circ\text{C}$, 渗速也提高了 $25\% \sim 30\%$, 大大减少了模具变形及降低了渗层脆性。采用 RE-B 共渗后模具的耐磨性较单一渗硼可提高 $1.5 \sim 2$ 倍。

Cr12 钢制拉深模经 RE-B 共渗后其寿命可提高 $5 \sim 10$ 倍。采用 RE-B-Al 共渗所得共渗层具有较高的热硬性和抗高温氧化能力, 因此, 非常适合用于热作模具的表面强化处理。

H13 钢制铝挤压模经稀土硼铝共渗后其使用寿命可延长 $2 \sim 3$ 倍, 铝材表面粗糙度也提高 $1 \sim 2$ 个数量级, 显现出优良的使用效果。在采用电刷镀制备的 Ni-P-MoS₂ 镀层时加入稀土元素, 可抑制 MoS₂ 的氧化, 明显改善镀层的减摩性, 提高耐蚀性, 并使模具型腔面的耐磨寿命延长近 5 倍。

除此之外, 稀土元素在其他表面强化技术, 如喷涂、电沉积、化学沉积以及激光涂覆等方面都有明显的改善作用, 因此将稀土元素应用于模具表面强化技术, 是模具设计部门在进行结构设计时, 对材料的同步设计所考虑的问题, 也是材料研究和生产企业重点研究的课题。

9.8.2 复合表面技术的创新及运用

随着模具使用要求的不断提高, 单一的表面处理技术因仍然具有一定的局限性往往不能满足要求, 通过各类表面技术的复合和综合运用, 可获得意想不到的效果。

1. 表面技术的创新

随着科学技术的进步, 传统的表面技术不断创新, 获得长足进步。在电弧喷涂方面, 发展了高速电弧喷涂, 使喷涂质量大大提高; 在等离子喷涂方面已研究成功射频感应耦合式等离子喷涂、反应等离子喷涂、三阴极枪等离子喷涂及微等离子喷涂; 在电刷镀方面已有摩擦电电镀及复合电刷镀技术; 在高能束应用方面发展了激光和电子束表面

熔覆、表面淬火、表面合金化、表面熔凝等技术；在离子注入方面，有强流氮离子注入技术、强流金属离子注入技术和金属等离子体浸没注入技术。在解决表面工程问题时，新技术与传统的表面技术相互补充，为表面处理技术提供了广阔的选择余地。

2. 复合表面技术的运用

目前已开发的复合表面技术有热喷涂与喷丸强化复合、化学热处理与电镀复合、激光处理与电刷镀复合、化学热处理与气相沉积复合、粘涂与电刷镀复合及各种覆层技术复合。

复合绝不是两种或几种技术的叠加，而是以最佳协同效应为目标，发挥其各自优势，有机配合，取长补短，从而获得最佳的表面性能。

第 10 章 进口模具钢的性能与应用

随着我国模具工业快速崛起，模具材料工业也得到同步发展，但是距离多品种、制品化和精料化还有一定差距，所以世界各国模具材料迅速进入我国市场并占有一定份额。现在市场上供应的国外各钢铁公司的模具钢品种越来越多，并已向标准化、系列化、通用化、高效率发展，因此，应对国内市场上供应的国外模具钢的钢号、性能及应用进行了解，以利于在模具设计中确定制造材料时进行比较选择。

10.1 我国模具钢与国外各种工具钢钢号对照

10.1.1 碳素工具钢钢号近似对照

1. 我国与亚太各国以及国际标准的碳素工具钢钢号近似对照（表 10-1）

表 10-1 我国与亚太各国以及国际标准的碳素工具钢钢号近似对照

序号	中 国		国际标准化组织 ISO	日本 JIS	韩国 KS	美 国	
	GB	ISC ^①				ASTM	UNS
1	T7	T00070	TC70	SK7	STC7	—	—
2	T8	T00080	TC80	SK5 SK6	STC5 STC6	W1A - 8	T72301
3	T8Mn	T01080	—	SK5	STC5	W1 - C8	—
4	T9	T00090	TC90	—	—	W1A - 8 $\frac{1}{2}$	T72301
5	T10	T00100	TC105	SK3 SK4	STC3 STC4	W1A - 9 $\frac{1}{2}$	T72301
6	T11	T00110	TC105	SK3	STC3	W1A - 10 $\frac{1}{2}$	T72301
7	T12	T00120	TC120	SK2	STC3	W1A - 11 $\frac{1}{2}$	T72301
8	T13	T00130	TC140	SK1	STC1	—	—
9	T7A	T00073	—	—	—	—	—
10	T8A	T00083	—	—	—	—	T72301
11	T10A	T00103	—	—	—	—	T72301
12	T12A	T00123	—	—	—	—	T72301
13	T13A	T00133	—	—	—	—	—

① ISC 即统一数字代号。

2. 我国与西欧、北欧各国以及欧洲标准化委员会标准的碳素工具钢钢号近似对照（表 10-2）

表 10-2 我国与西欧、北欧各国以及欧洲标准化委员会标准的碳素工具钢钢号近似对照

序号	中 国		欧洲标准化 委员会 EN	德 国		英国 BS	法国 NF	瑞典 SS14	意大利 UNI	西班牙 UNE
	GB	ISC ^①		DIN	W – Nr.					
1	T7	T00070	CT70	C70W2	1. 1620	—	C70E2U	1770	C70KU	C70U
2	T8	T00080	CT80	C80W2	1. 1625	—	C80E2U	1778	C85KU	C80U
3	T8Mn	T01080	—	C85WS	1. 1830	—	—	—	—	C81U
4	T9	T00090	CT90	C90W3	1. 1760	—	C90E2U	—	C90KU	—
5	T10	T00100	CT105	C105W2	1. 1645	BWIB	C105E2U	1880	C100KU	C102U
6	T11	T00110	—	C110W2	—	—	C105E2U	1880	—	—
7	T12	T00120	CT120	C110W2	1. 1654	BW1C	C120E3U	1885	C120KU	C120U
8	T13	T00130	—	C125W	1. 1563	—	C140E3U	—	C140KU	—
9	T7A	T00073	CT70	C70W1	1. 1520	—	C70E2U	—	—	C70U
10	T8A	T00083	CT80	C80W1	1. 1525	—	C80E2U	—	C80KU	C80U
11	T10A	T00103	CT105	C105W1	1. 1545	—	C105E2U	1880	C100KU	C102U
12	T12A	T00123	—	C110W	1. 1550	—	C120E3U	1885	C120KU	C120U
13	T13A	T00133	—	C125W	1. 1563	—	C140E3U	—	—	—

① ISC 即统一数字代号。

3. 我国与东欧、中欧、南欧各国的碳素工具钢钢号近似对照（表 10-3）

表 10-3 我国与东欧、中欧、南欧各国的碳素工具钢钢号近似对照

序号	中 国		俄罗斯 ГОСТ	波兰 PN	捷克 CSN	匈牙利 MSZ	罗马尼亚 STAS	保加利亚 Б II C
	GB	ISC ^①						
1	T7	T00070	y7	N7	19132/19133	S71	—	Y7
2	T8	T00080	y8	N8	19152	S81/S82	OSC8	Y8
3	T8Mn	T01080	y8Г	—	—	—	OSC8M	—
4	T9	T00090	y9	N9	—	S91	OSC9	Y9
5	T10	T00100	y10	N10	19191	S101	OSC10	Y10
6	T11	T00110	y11	N11	—	S112	OSC11	Y11
7	T12	T00120	y12	N12	19221	S121/S122	OSC12	Y12
8	T13	T00130	y13	N13	19255	S131/S132	—	Y13
9	T7A	T00073	y7A	N7E	—	S72	OSC7	Y7A
10	T8A	T00083	y8A	N8E	—	S82	OSC8	Y8A
11	T10A	T00103	y10A	N10E	19191	S102	OSC10	Y10A
12	T12A	T00123	y12A	N12E	19221	S122	OSC12	Y12A
13	T13A	T00133	y13A	N13E	—	S132	OSC13	Y13A

① ISC 即统一数字代号。

10.1.2 合金工具钢钢号近似对照

1. 我国与亚太各国以及国际标准的合金工具钢钢号近似对照（表 10-4）

表 10-4 我国与亚太各国以及国际标准的合金工具钢钢号近似对照

序号	中 国		国际标准化组织 ISO	日本 JIS	韩国 KS	美 国	
	GB	ISC ^①				ASTM	UNS
1	9SiCr	T30100	—	—	—	—	—
2	8MnSi	T30000	—	SKS95	—	—	—
3	Cr06	T30060	—	SKS8	STS8	—	—
4	Cr2	T30201	100Cr6	SUJ2 ^②	—	L3	T61203
5	9Cr2	T30200	—	—	—	—	—
6	W	T30001	—	SKS21	STS21	F1	T60601
7	4CrW2Si	T40124	50WCrV8	SKS41	STS41	—	—
8	5CrW2Si	T40125	50WCrV8	SKS4	—	S1	T41901
9	6CrW2Si	T40126	60WCrV8	SKS4	—	—	—
10	Cr12	T21200	X210Cr12	SKD1	STD1	D3	T30403
11	Cr12MoV	T21201	X153CrMoV12	SKD11	STD11	—	—
12	Cr12Mo1V1	T20202	X153CrMoV12	SKD10	—	D2	T30402
13	Cr5Mo1V	T20503	X100CrMoV51	SKD12	STD12	A2	T30102
14	9Mn2V	T20000	90MnVCr8	—	—	O2	T31502
15	CrWMn	T20111	95MnWCr5	SKS31	STS31	O7	T31507
16	9CrWMn	T20110	95MnWCr5	SKS3	STS3	O1	T31501
17	5CrMnMo	T20102	—	SKT3	~ STF3	—	—
18	5CrNiMo	T20103	55NiCrMoV7	SKT4	STD4	L6	T61206
19	3Cr2W8V	T20280	X30WCrV9 - 3	SKD5	STD5	H21	T20821
20	8Cr3	T20300	—	—	—	—	—
21	4Cr3Mo3SiV	T20303	—	SKD7	—	H10	T20810
22	4Cr5MoSiV	T20501	X37CrMoV5 - 1	SKD6	STD6	H11	T20811
23	4Cr5MoSiV1	T20502	X40CrMoV5 - 1	SKD61	STD61	H13	T20813
24	4Cr5W2VSi	T20520	—	—	—	—	—
25	3Cr2Mo	T22020	35CrMo7	—	—	P20	T51620
26	—	—	210CrW12	—	—	—	—
27	—	—	30WCrV5	SKD4	STD4	—	—
28	—	—	—	SKD62	STD62	H12	T20812

① ISC 即统一数字代号。

② 日本轴承钢。

2. 我国与西欧、北欧各国以及欧洲标准化委员会标准的合金工具钢钢号近似对照（表 10-5）

表 10-5 我国与西欧、北欧各国以及欧洲标准化委员会标准的合金工具钢钢号近似对照

序号	中 国		欧洲标准化 委员会 EN	德 国		英国 BS	法国 NF	瑞典 SS14	意大利 UNI	西班牙 UNE
	GB	ISC ^①		DIN	W - Nr.					
1	9SiCr	T30100	—	90CrSi5	1. 2108	—	—	2092	—	—
2	8MnSi	T30000	—	C75W	1. 1750	BWIA	—	—	—	—
3	Cr06	T30060	—	140Cr3	1. 2008	—	130Cr3	—	—	140Cr2
4	Cr2	T30201	102Cr6	100Cr6	1. 2067	BL1/BL3	Y100C6	—	102Cr6KU	—
5	9Cr2	T30200	—	90Cr3	1. 2056	BL3	—	—	—	—
6	W	T30001	—	120W4	1. 2414	BF1	—	2705	—	—
7	4CrW2Si	T40124	50WCrV8	—	—	—	—	—	—	—
8	5CrW2Si	T40125	50WCrV8	45WCrV7	1. 2542	BS1	45WCrV8	2710	45WCrV8KU	45WCrSiV8
9	6CrW2Si	T40126	60WCrV8	60WCrV7	1. 2550	—	55WC20	—	55WCrV8KU	60WCrSiV8
10	Cr12	T21200	X210Cr12	X210Cr12	1. 2080	BD3	X200Cr12	—	X205Cr12KU	X210Cr12
11	Cr12MoV	T21201	X153CrMo-V12	X165CrMo-V12	1. 2601	—	—	2310	X165CrMo-W12KU	X160Cr-MoV12
12	Cr12Mo1V1	T21202	—	X155CrV-Mo12 - 1	1. 2379	BD2	X160Cr-MoV12	—	X155CrV-Mo121KU	—
13	Cr5Mo1V	T20503	X100CrMo-V51	X100CrVMo-V5 - 1	1. 2363	BA2	X100Cr-MoV5	2260	X100CrMo-V51KU	X100Cr-MoV5
14	9Mn2V	T20000	90MnVCr8	90MnCrV8	1. 2842	BO2	90MnV8	—	90MnV-Cr8KU	90Mn-CrV8
15	CrWMn	T20111	107WCr5	105WCr6	1. 2419	—	105WCr5	—	107WCr5KU	105WCrV5
16	9CrWMn	T20110	95MnWCr5	100MnCrW4	1. 2510	BO1	90MnW-CrV5	2140	95MnW-Cr5KU	95MnCrW5
17	5CMnMo	T20102	35CrMo8	40CrMnMo7	1. 2311	—	—	—	35CrMo8KU	—
18	5CrNiMo	T20103	55NiCrMoV7	55NiCrMoV6	1. 2713	BH224 - 5	55NiCr-MoV7	2550	55NiCr-MoV7KU	55NiCr-MoV7
19	3Cr2W8V	T20280	X30WCr-V9 - 3	X30WCr-V9 - 3	1. 2581	BH21	X30W-CrV9	2730	X30WCr-V93KU	—
20	8Cr3	T20300	—	—	—	—	—	—	—	—
21	4Cr3Mo-3SiV	T20303	32CrMoV - 12 - 28	32CrMoV-12 - 28/ X32Cr-MoV3 - 3	1. 2365	BH10	32CrMo-V12 - 28	—	30CrMoV-1227KU	30CrMo-V12
22	4Cr5Mo-SiV	T20501	X37CrMo-V5 - 1	X38CrMo-V5 - 1	1. 2343	BH11	X38Cr-MoV5	—	X37CrMo-V51KU	X37CrMo-SiV5

(续)

序号	中 国		欧洲标准化 委员会 EN	德 国		英国 BS	法国 NF	瑞典 SS14	意大利 UNI	西班牙 UNE
	GB	ISC ^①		DIN	W - Nr.					
23	4Cr5Mo-SiV1	T20502	X40CrMo-V5 - 1	X40CrMo-V5 - 1	1. 2344	BH13	X40CrMo-V5 - 1	—	X40CrMo-V511KU	X40Cr-MoSiV5
24	4Cr5W-2VSi	T20520	—	—	—	—	—	—	—	—
25	3Cr2Mo	T22020	35CrMo7	35CrMo4	1. 2330	BP20	35CrMo8	2234	—	—
26	—	—	X210CrW-12 - 1	X210CrW-12	1. 2436	—	210Cr-W12 - 1	2312	X210CrW-12 - 1KU	—
27	—	—	X30WCrV5 - 3	X30WCrV5 - 3	1. 2567	—	X32W-CrV5	—	X30WCr-V5 - 3KU	—
28	—	—	—	X37CrVMo-W5 - 1	1. 2606	BH12	X35CrW-MoV5	—	—	—

① ISC 即统一数字代号。

3. 我国与东欧、中欧、南欧各国的合金工具钢钢号近似对照（表 10-6）

表 10-6 我国与东欧、中欧、南欧各国的合金工具钢钢号近似对照

序号	中 国		俄罗斯 ГОСТ	波兰 PN	捷克 CSN	匈牙利 MSZ	罗马尼亚 STAS	保加利亚 Б II C
	GB	ISC ^①						
1	9SiCr	T30100	9XC	—	—	—	—	У7А
2	8MnSi	T30000	—	—	—	—	—	У8А
3	Cr06	T30060	13X	—	19420	K6	—	13X
4	Cr2	T30201	X	NC4	—	K4	—	X
5	9Cr2	T30200	9X1	—	19423	—	—	—
6	W	T30001	B1	NW1	19710	—	—	B2φ
7	4CrW2Si	T40124	4XB2C	—	—	—	—	У12А
8	5CrW2Si	T40125	5XB2C	NZ2	19732	W5	45VSiCrW20	5XB2C
9	6CrW2Si	T40126	6XB2C	NZ3	19735	W6	—	—
10	Cr12	T21200	X12	NC11	19436	—	205Cr115	X12
11	Cr12MoV	T21201	X12Mφ	—	19191	—	165VWMoCr115	X12Mφ
12	Cr12Mo1V1	T21202	—	—	19221	K8	155MoVCr115	—
13	Cr5Mo1V	T20503	—	—	—	—	100VMoCr52	—
14	9Mn2V	T20000	9Г2φ	NMV	—	M1	90VMn20	9Г2φ
15	CrWMn	T20111	XBΓ	NWC	—	W9	—	XBΓ
16	9CrWMn	T20110	9XBΓ	—	19314	—	—	—
17	5CrMnMo	T20102	5XΓM	—	19520	—	—	—
18	5CrNiMo	T20103	5XHM	WNL	—	NK	55VMoCrNi16	5XHM

(续)

序号	中 国		俄罗斯 ГОСТ	波兰 PN	捷克 CSN	匈牙利 MSZ	罗马尼亚 STAS	保加利亚 Б И С
	GB	ISC ^①						
19	3Cr2W8V	T20280	3X2B8φ	WWV	19721	—	30VMoCrNi16	—
20	8Cr3	T20300	8X3	—	—	—	—	—
21	4Cr3Mo3SiV	T20303	3X3M3φ	WLV	19541	K14	31VMoCr29	3X3M3φ
22	4Cr5MoSiV	T20501	4X5MφC	WCL	19552	—	39VSiMoCr52	4X5MφC
23	4Cr5MoSiV1	T20502	4X5Mφ1C	WCLV	19554	K13	40VSiMoCr52	4X5Mφ1C
24	4Cr5W2VSi	T20520	4X5B2φC	—	—	—	—	—
25	3Cr2Mo	T22020	—	—	—	—	—	—
26	—	—	—	—	19720	—	—	—
27	—	—	—	—	—	W3	—	—

① ISC 即统一数字代号。

10.1.3 高速工具钢钢号近似对照

1. 我国与亚太各国以及国际标准的高速工具钢钢号近似对照（表 10-7）

表 10-7 我国与亚太各国以及国际标准的高速工具钢钢号近似对照

序号	中 国		国际标准化 组织 ISO	日本 JIS	韩国 KS	美 国	
	GB	ISC ^①				ASTM	UNS
1	W18Cr4V	T51841	HS18 - 0 - 1	SKH2	SKH2	T1	T12001
2	W18Cr4VCo5	T71845	HS18 - 1 - 1 - 5	SKH3	SKH3	T4	T12004
3	W18Cr4V2Co8	T71848	—	SKH4	SKH4	T5	T12005
4	W12Cr4V5Co5	T71245	HS12 - 1 - 5 - 5	SKH10	SKH10	T15	T12015
5	W6Mo5Cr4V2	T66541	HS6 - 5 - 2	SKH51	SKH51	M2（正常 C）	T11302
6	CW6Mo5Cr4V2	T66542	HS6 - 5 - 2C	—	—	M2（高 C）	T11302
7	W6Mo5Cr4V3	T66543	HS6 - 5 - 3	SKH53	SKH52	M3Class1	T11313
8	CW6Mo5Cr4V3	T66545	HS6 - 5 - 3C	SKH53	SKH53	M3Class2	T11323
9	W2Mo9Cr4V2	T62942	HS2 - 9 - 2	SKH58	SKH58	M7	T11307
10	W6Mo5Cr4V2Co5	T76545	HS6 - 5 - 2 - 5	SKH55	SKH55	—	—
11	W7Mo4Cr4V2Co5	T77445	HS7 - 4 - 2 - 5	—	—	M41	T11341
12	W2Mo9Cr4VCo8	T72948	HS2 - 9 - 1 - 8	SKH59	SKH59	M42	T11342
13	—	—	HS10 - 4 - 3 - 10	SKH57	SKH57	—	—
14	—	—	—	—	—	M43 M44	T11343 T11344
15	—	—	HS3 - 3 - 2	—	—	—	—

① ISC 即统一数字代号。

2. 我国与西欧、北欧各国以及欧洲标准化委员会标准的高速工具钢钢号近似对照 (表 10-8)

表 10-8 我国与西欧、北欧各国以及欧洲标准化委员会标准的高速工具钢钢号近似对照

序号	中 国		欧洲标准化 委员会 EN	德 国		英国 BS	法国 NF	瑞典 SS14	意大利 UNI	西班牙 UNE
	GB	ISC ^①		DIN	W - Nr.					
1	W18Cr4V	T51841	HS18 - 0 - 1	S18 - 0 - 1	1. 3355	BT1	HS18 - 0 - 1	2750	HS18 - 0 - 1	HS18 - 0 - 1
2	W18Cr4V Co5	T71845	HS18 - 1 - 2 - 5	S18 - 1 - 2 - 5	1. 3255	BT4	HS18 - 1 - 2 - 5	2754	HS18 - 1 - 1 - 5	HS18 - 1 - 1 - 5
3	W18Cr4 V2Co8	T71848	HS18 - 0 - 1 - 10	S18 - 1 - 2	1. 3265	BT5	HS18 - 0 - 2 - 9	2756	HS18 - 0 - 1 - 10	HS18 - 0 - 1 - 10
4	W12Cr4 V5Co5	T71245	HS12 - 1 - 4 - 5	S12 - 1 - 4 - 5	1. 3202	BT15	HS12 - 1 - 5 - 5	—	HS12 - 1 - 5 - 5	HS12 - 1 - 5 - 5
5	W6Mo5 Cr4V2	T66541	HS6 - 5 - 2	S6 - 5 - 2	1. 3343	BM2	HS6 - 5 - 2	2722	HS6 - 5 - 2	HS6 - 5 - 2
6	CW6Mo5 Cr4V2	T66542	HS6 - 5 - 2C	SC6 - 5 - 2	1. 3342	—	HS6 - 5 - 2HC	—	HSC6 - 5 - 3	HSC6 - 5 - 3
7	W6Mo5 Cr4V3	T66543	HS6 - 5 - 3	—	—	—	—	—	—	—
8	CW6Mo 5Cr4V3	T66545	HS6 - 5 - 3C	S6 - 5 - 3	1. 3344	—	HS6 - 5 - 3	2725	HS6 - 5 - 3	HS6 - 5 - 3
9	W2Mo9Cr 4V2	T62942	HS2 - 9 - 2	S2 - 9 - 2	1. 3348	—	HS2 - 9 - 2	2782	HS2 - 9 - 2	—
10	W6Mo5 Cr4V2Co5	T76545	HS6 - 5 - 2 - 5	S6 - 5 - 2 - 5	1. 3243	—	HS6 - 5 - 2 - 5	2723	HS6 - 5 - 2 - 5	HS6 - 5 - 2 - 5
11	W7Mo4 Cr4V2Co5	T77445	HS7 - 4 - 2 - 5	S7 - 4 - 2 - 5	1. 3246	BM41	HS7 - 4 - 2 - 5	—	HS7 - 4 - 2 - 5	—
12	W2Mo9Cr 4VCo8	T72948	HS2 - 9 - 1 - 8	S2 - 10 - 1 - 8	1. 3247	BM42	HS2 - 9 - 1 - 8	2716	HS2 - 9 - 1 - 8	HS2 - 9 - 1 - 8
13	—	—	HS10 - 4 - 3 - 10	S10 - 4 - 3 - 10	1. 3207	BT42	HS10 - 4 - 3 - 10	—	HS10 - 4 - 3 - 10	HS10 - 4 - 3 - 10
14	—	—	—	S2 - 9 - 2 - 8	1. 3249	BM34	—	—	—	—
15	—	—	HS3 - 3 - 2	S3 - 3 - 2	1. 3333	—	—	—	HS3 - 3 - 2	—

① ISC 即统一数字代号。

3. 我国与东欧、中欧、南欧各国的高速工具钢钢号近似对照（表 10-9）

表 10-9 我国与东欧、中欧、南欧各国的高速工具钢钢号近似对照

序号	中 国		俄罗斯	波兰	捷克	匈牙利	罗马尼亚	保加利亚
	GB	ISC ^①	ГОСТ	PN	CSN	MSZ	STAS	Б II C
1	W18Cr4V	T51841	P18	SW18	19824	R3	Rp3	P18
2	W18Cr4VCo5	T71845	P18k5φ2	—	19855	—	Rp2	P18K5φ2
3	W18Cr4V2Co8	T71848	—	—	—	—	—	—
4	W12Cr4V2Co5	T71245	P10K5φ5	SK5V	19858	—	—	—
5	W6Mo5Cr4V2	T66541	P6M5	SW7M	19830	R6	Rp5	P6M5
6	CW6Mo5Cr4V2	T66542	—	—	—	R12	—	—
7	W6Mo5Cr4V3	T66543	P6M5φ3	—	—	—	—	P6M5φ3
8	CW6Mo5Cr4V3	T66545	—	—	—	R13	Rp4	—
9	W2Mo9Cr4V2	T62942	—	—	—	—	Rp11	—
10	W6Mo5Cr4V2Co5	T76545	P6M5K5	SK5M	19852	R8	—	P6M5K5
11	W7Mo4Cr4V2Co5	T77445	—	—	19851	R9	—	—
12	W2Mo9Cr4VCo8	T72948	P2AM9K5	SK8M	—	R11	—	—
13	—	—	—	SK10V	19861	R14	—	—
14	—	—	—	—	—	—	—	—
15	—	—	11P3AM3φ2	—	19820	—	Rp9	11P3AM3φ2

① ISC 即统一数字代号。

10.1.4 硬质合金牌号近似对照（表 10-10）

表 10-10 K 类和 G 类硬质合金牌号近似对照^①

国际标准化组织	中国	日本	美国	德国	英国	俄罗斯
ISO	GB	JIS	JIC	DIN	BHMA	ГОСТ
K 类硬质合金						
K01	YG3X	K01	C4	H3	930	BK3M
K10	YG6A、YD10	K10	C3	H1	741	BK6M
K20	YG6	K20	C2	G1	560	BK6
K30	YG8	K30	C1	—	280	BK8、BK10
K40	YG15	K40	C1	G2	290	BK15
G 类硬质合金						
G05	YG6X、YD10	—	—	—	—	BK6
G10	YG6、YD10	E1	—	G1	—	BK6B
G15	YG8C	—	—	—	—	BK8B
G20	YG11C	E2	—	G2	—	BK10
G30	YG15	E3	—	G3	—	BK15
G40	YG20、YG20C	E4	—	G4	—	BK20
G50	YG25	E5	—	G5	—	BK25
G60	YG30	—	—	G6	—	BK30

① 为方便起见，各国硬质合金牌号近似对照，采用国际标准化组织标准的硬质合金牌号为序。各国硬质合金牌号的对照关系，是按用途范围确定的。仅选择模具材料采用的 K 类和 G 类硬质合金进行对照。由于一种牌号往往有几种用途，因此对照表中一种牌号有可能在几处出现。对照表中各国标准代号均用大写字母表示，其中 BHMA 和 JIC 分别为英国和美国的有关协会标准。

10.2 国内进口模具钢的钢号、特性及应用

10.2.1 进口冷作模具钢的钢号、特性及应用（表 10-11）

表 10-11 进口冷作模具钢的钢号、特性及应用

相当于 AISI 牌号	钢厂名称	材料牌号	出厂硬度 HBW	钢材特性	用 途
O1 (JIS: SKS3) (GB/YB: 9CrWMn)	ASSAB 一胜百	DF - 2	190	不变形铬钨锰钢, 耐磨, 热处理容易	五金冲模, 手饰压花模
	ASSAB 一胜百	DF - 3	190	不变形铬钨锰钢, DF - 2 经济型	五金冲模, 手饰压花模
	BOHLER 百禄	K460	≤225	不变形铬钨锰钢	各类五金冲模及木工切割工具
	DORRENBURG 利昌	RS2510	230	淬透性和耐磨性良好	冲压加工, 冲裁加工, 凸模及剪切片模
	DAIDO 大同	GOA	217	淬透性和耐磨性均良好的合金工具钢	冲压加工, 冲裁模, 成形模, 凸模及剪切片模
	HITACHI 日立	SGT	190	不变形耐磨铬钨锰钢	切削、冲压和成形工具
	SAARSTAHL 萨斯特	GS2510	230	淬透性和耐磨性良好	冲压加工, 冲裁加工, 凸模及剪切片模
O2 (GB: 9Mn2V)	THYSSEN 德胜	GS - 510	≤230	不变形铬钨锰钢	各类冲模及木工切割工具
	THYSSEN 德胜	GS842	≤230	韧性好, 易加工 不变形铬钨锰钢	各类冲模及木工切割工具
A2 (JIS: SKD12) (GB: Cr5Mn1V)	ASSAB 一胜百	XW - 10	215	空冷淬透铬钢, 韧性极佳, 高耐磨性, 热处理变形小	形状复杂工件及长期工作的冲模
	THYSSEN 德胜	GS - 363	≤230	高韧性、高硬度 中铬钢	冲孔、剪口、穿刺、抽制及成形模具, 也适合高韧性塑胶模具
D2 (JIS: SKD10) (GB/YB: Cr12Mo1V1)	ASSAB 一胜百	XW - 41	210	韧性高铬钢, 耐磨性佳, 高抗压强度, 热处理变形小	螺钉滚丝板、冷挤压模
	ASSAB 一胜百	XW - 42	210	韧性高铬钢, 耐磨性佳, 高抗压强度, 热处理变形小	螺钉滚丝板、冷挤压模

(续)

相当于 AISI 牌号	钢厂名称	材料牌号	出厂硬度 HBW	钢材特性	用 途
D2 (JIS: SKD10) (GB/YB: Cr12Mo1V1)	BOHLER 百禄	K100	≤250	特高韧性铬钢	重负荷冲模, 冲不锈钢、铜、硅钢片及铝片等
	DAIDO 大同	DC11	255	高耐磨空冷淬硬高铬工具钢	冷挤压模、拉深模
	DAIDO 大同	DC53	255	高韧性、高硬度空冷淬硬高铬工具钢, 比 SKD 钢材的硬度及韧性好	宜线切割加工, 用于拉深模和搓丝模
	DORRENBURG 利昌	RS2379	≤250	韧性高铬钢	重型不锈钢、铜、硅钢片、铝片冲模
	DORRENBURG 利昌	RS2436	≤250	耐磨高铬钢	重型不锈钢、铜、硅钢片、铝片冲模
	HITACHI 日立	SLD	210	高耐磨冷作工具铬钢	拉深模等
	HITACHI 日立	SLD8	210	高耐磨、高淬透性及高韧性铬钢	冷锻模、高负荷冲模、辊筒、刀具
	SAARSTAHL 萨斯特	GS2379	255	高韧性铬钢	冷挤压模、拉深模、冲裁模
	THYSSEN 德胜	GS - 379	≤250	韧性高铬钢	重型不锈钢、铜、硅钢片、铝片冲模
	THYSSEN 德胜	GS - 821ESR	≤250	超级 D2 高铬钢, 变形小, 韧性好	3mm 厚以上钢片冲模及高耐磨可抛光塑胶模
	NKS 高周波	KD21	255	高耐磨冷作工具铬钢	冲模、刀具
	NKS 高周波	KD11S	255	SKD11 改良型, 超高加工性, 能缩短加工时间	拉深模
D3 (JIS: SKD1) (GB: Cr12)	BOHLER 百禄	K110	≤250	耐磨铬钢	耐磨五金冲模
	THYSSEN 德胜	GS - 080	≤250	耐磨铬钢	重型五金冲模
D6	ASSAB 一胜百	XW - 5	240	高碳高铬钢, 极耐磨损、耐回火性高	不锈钢、硅钢片冲模, 深冲模
	BOHLER 百禄	K107	≤250	特级耐磨高铬钢	中等负荷冲模, 冲不锈钢、铜、硅钢片、铝片等

(续)

相当于 AISI 牌号	钢厂名称	材料牌号	出厂硬度 HBW	钢材特性	用 途
D6	THYSSEN 德胜	GS - 436	≤250	耐磨高铬钢	巨型不锈钢、铜、硅钢片、铝片冲模
6F7	THYSSEN 德胜	GS - 767	≤250	高 韧 性 冷 作 模 具 钢	厚片冲模

10.2.2 进口热作模具钢的钢号、特性及应用（表 10-12）

表 10-12 进口热作模具钢的钢号、特性及应用

相当于 AISI 牌号	钢厂名称	材料牌号	出厂硬度 HBW	钢材特性	用 途
H10 (GB: 4Cr3-Mo3SiV)	THYSSEN 德胜	GS - 365	≤230	特细晶体铜合金热作钢	铜合金压铸模，重金属挤压模
H10A	BOHLER 百禄	W321	≤230	优质铜钨合金热作钢	铜、合金压铸模，挤压、热压模，尤其适合高要求表壳热冲模
—	THYSSEN 德胜	GS - 885	≤230	特细晶体钢，钨合金热作模具钢	铜合金压铸模，挤压、热压模，重金属挤压模
H11 (GB: 4Cr5-MoSiV)	ASSAB 一胜百	VD11	180	抗热冲击和抗热疲劳能力高	锌、镁、铝合金压铸模以及热压模
	BOHLER 百禄	W300VMR	≤220	在真空环境中进行电渣重熔冶炼，使钢材组织真正细小均匀，洁净	大型镁、铝合金压铸和挤压模具
	THYSSEN 德胜	GS - 343	≤230	高纯度、高韧性、耐磨塑胶模具钢	热塑性、热固性塑料模，复杂型腔模以及挤压模
H13 (JIS: SKD61) (GB/YB: 4Cr5MoSiV1)	ASSAB 一胜百	8402	185	耐热性良好，组织均匀	金属压铸、挤压模
	ASSAB 一胜百	8407 ESR	185	高韧性，耐热性良好	金属压铸、挤压模，PA、POM、PS、PE 等塑料模
	BOHLER 百禄	W302	≤225	优质铝锌合金热作模具钢	铝、锌合金挤压模

(续)

相当于 AISI 牌号	钢厂名称	材料牌号	出厂硬度 HBW	钢材特性	用 途
H13 (JIS: SKD61) (GB/YB: 4Cr5MoSiV1)	DAIDO 大同	DHA1 (HI)	退火 229	通用热作模具钢	冲裁模、冷作成形模、成形轧辊、凸模
	EDEL	2344	210	高韧性及耐热性, 高温作业时强度和热疲劳性能好	锌、铝等金属压铸模及挤压模
	HITACHI 日立	DAC	186	耐温度骤变及热应力疲劳	一般金属压铸模、挤压模
	SAARSTAHL 萨斯特	GS - 2344	180 ~ 220	耐热	铝、锌合金冷挤压模及热压铸模
	SAARSTAHL 萨斯特	GS - 2344 S. ESR	180 ~ 220	高韧性热作模具钢, 冲击吸收能量高于 300J	铝、锌合金冷挤压模及热压铸模
	DORRENBURG 利昌	RS2344	≤230	特细晶体、耐热压铸模具钢	铝、锌合金冲压模具, 可淬硬塑胶模
	DORRENBURG 利昌	RS2344 ESR	≤230	纯度比 GS - 344 更高、性能更均匀	锌、铝合金挤压模、锻模等
	THYSSEN 德胜	GS - 344	≤230	特细晶体、耐热压铸模具钢	铝、锌合金压铸模, 可淬硬塑胶模
	THYSSEN 德胜	GS - 344ESR	≤230	纯度比 GS - 344 更高、性能更均匀	锌、铝合金挤压模、锻模等
	THYSSEN 德胜	GS - 344HT	≤170	高韧性、高耐热性压铸模具钢	铝合金压铸模
	THYSSEN 德胜	GS344 RT Super	≤170	长寿命铝、镁合金压铸模具钢	铝、镁合金压铸模
	THYSSEN 德胜	GS - 344 M	≤230	比 H13 具有更好的高温耐磨性及抗热裂性	铜及铝合金的压铸模、挤压模及嵌件等
	THYSSEN 德胜	GS344 RT Super	≤230	新一代高耐磨、高耐热重金属热作模具钢	热冲压模具
	ASSAB 一胜百	HOTV AR	210	高温热作模具钢, 耐热磨损能力高, 具有极佳的耐回火性	锌合金压铸模、温锻模
	ASSAB 一胜百	QRO - 90	180	高温热作模具钢, 热硬性高、导热性能良好, 耐热冲击及热疲劳	铜合金高温热压模、挤压模、热锻模

(续)

相当于 AISI 牌号	钢厂名称	材料牌号	出厂硬度 HBW	钢材特性	用 途
H13 (JIS: SKD61) (GB/YB: 4Cr5MoSiV1)	ASSAB 一胜百	DIEV AR	160	高温热作模具钢, 淬透性和延展性好, 抗热龟裂和抗开裂性佳	铝、镁、锌、铜合金压铸模
	BOHLER 百禄	W303 ISO BLOC	≤229	高温热作模具钢, 铝合金热作模具钢	适合高要求合金压铸、挤压或热压模具
	BOHLER 百禄	W720 ISO BLOC	退火	超强马氏体钢	高精密热作配件、喷嘴, 尤其是长期工作的锌、铝合金压铸模
	DAIDO 大同	DH2F	预硬 37 ~ 41HRC	高硬度预硬钢 (H13 系), 切削加工性能、韧性好	压铸模、塑料模
	DAIDO 大同	DH31 - S	退火 ≤235 HBW	高寿命、高淬透性热作模具钢	铜合金热压铸模、铝合金压铸模等
	THYSSEN 德胜	GS 787 ESR	≤245	电渣重熔, 高温耐腐蚀、抗氧化玻璃制造模具钢	玻璃制造
	THYSSEN 德胜	GS 999	≤230	长寿命、高耐磨、高速热锻模钢,	锻压模
	NKS 高周波	KDA1	229	具有超过 KSD61 的高温强度及韧性	锻造模
	NKS 高周波	KDA1S	229	抗热龟裂, 蠕变强度高	锻造模, 镁、铝合金压铸模
6F3	THYSSEN 德胜	GS714	32 ~ 36HRC	预硬高韧性耐热锻压模具钢	锻压模

10.2.3 进口塑料模具钢的钢号、特性及应用 (表 10-13)

表 10-13 进口塑料模具钢的钢号、特性及应用

相当于 AISI 牌号	钢厂名称	材料牌号	出厂硬度 HBW	钢材特性	用 途
P2	THYSSEN 德胜	GS - 162	≤210	高精度表面渗碳复模钢	高精度长寿命塑料模
P20 (GB: SM3Cr2Mo)	ASSAB 一胜百	ASSAB618	290 ~ 330	预硬, 高硬度, 纯净均匀	高抛光度模具, 适合 PA、POM、PS、PE、PP、ABS 塑料模
	ASSAB 一胜百	718S	290 ~ 330	预硬, 纯净均匀, 抛光性能好	高抛光度模具, 适合 PA、POM、PS、PE、PP、ABS 塑料模

(续)

相当于 AISI 牌号	钢厂名称	材料牌号	出厂硬度 HBW	钢材特性	用 途
P20 (GB: SM3Cr2Mo)	ASSAB 一胜百	718H	330 ~ 370	预硬, 纯净均匀, 抛光性能好	高抛光度模具, 适合 PA、POM、PS、PE、PP、ABS 塑料模
	BOHLER 百禄	M201	预硬	预硬塑料模具钢	塑料模具, 尤其适合电蚀操作
	BOHLER 百禄	M202	预硬	预硬塑料模具钢	一般要求的塑料模, 可电蚀操作
	BOHLER 百禄	M238	预硬	超级预硬塑料模具钢	高要求的塑料模, 适合电蚀操作
	DORRENBURG 利昌	RS323	240 ~ 300	优质耐磨, 高钒	耐热塑料模件及五金冲模
	DAIDO 大同	PDS - 5	29 ~ 33HRC	预硬钢	长期工作的塑料模
	DAIDO 大同	PX88	预硬 30 ~ 33HRC	通用预硬钢, 熔接性、放电加工性、镜面性良好	长期工作的通用塑料模
	DAIDO 大同	PX4	预硬 30 ~ 33HRC	通用预硬钢, 熔接性、放电加工性、镜面性良好	大型镜面模具, 汽车尾灯、镜壳、前挡板、摄像机、家用电器模等
	DAIDO 大同	PX5	预硬 30 ~ 33HRC	通用预硬钢, 熔接性、切削加工性能良好	大型镜面模具, 汽车尾灯、镜壳、前挡板、摄像机、家用电器模等
	EDEL	318	29 ~ 34HRC	具有良好的抛光性能, 放电加工性良好, 表面与内部硬度均匀	大型塑料模
	EDEL	2311	30 ~ 35HRC	预硬塑料模具钢	大型、长期工作的塑胶模, 制造电视壳、冰箱、洗衣机等的模具
	HITACHI 日立	HPM7	310 ~ 340	预硬高纯净度塑料模具钢, 切削加工性能、焊接性特佳	高要求的模具, 如大型日用品、家用电器及汽车部件模
	DORRENBURG 利昌	RS2738	300 ~ 350	优质预硬钢, 硬度均匀, 易切削加工	长期工作的高质量塑料模
	DORRENBURG 利昌	RS2311	280 ~ 325	预硬塑料模具钢	一般塑料模及下模板

(续)

相当于 AISI 牌号	钢厂名称	材料牌号	出厂硬度 HBW	钢材特性	用 途
P20 (GB: SM3Cr2Mo)	DORRENBURG 利昌	RS2312	280 ~ 325	极易切削, 宜大批量快速加工	高要求大型模架及下模板
	DORRENBURG 利昌	RS638	250 ~ 280	加工性能良好	高要求大型模架及下模板
	SAARSTAHL 萨斯特	GS738	300 ~ 350	优质预硬钢, 硬度均匀, 易切削加工	高韧性及高抛光度模
	SAARSTAHL 萨斯特	GS2311	300 ~ 350	预硬塑料模具钢	长期工作的大型塑料模
	SAARSTAHL 萨斯特	GS2312	280 ~ 325	极易切削, 适宜大批量快速加工	一般塑料模及下模板
	SAARSTAHL 萨斯特	GS638	270 ~ 300	加工性能良好	高要求大型模架及下模板
	SAARSTAHL 萨斯特	GS688	250 ~ 320	预硬塑料模具钢, 738 经济型	高要求大型模架及下模板
	SOREL	CSM - 2	31 ~ 34HRC	真空熔炼铬铝锰精炼合金钢, 硬度与金相组织均匀, 使用后变形率低, 具备优良的抛光性能、耐磨性及加工性能	长期工作的大型塑料模, 可电蚀
	SOREL	P - 20M	29 ~ 35HRC	真空熔炼铬铝锰精炼合金钢, 硬度与金相组织均匀, 使用后变形率低, 具备优良的抛光性能、耐磨性及加工性能	长期工作的大型塑料模, 可电蚀
	THYSSEN 德胜	GS - P20M	28 ~ 32HRC	预硬塑料模具钢	普通用途塑料模
	THYSSEN 德胜	GS - 711	35 ~ 38HRC	高强度 P20 预硬塑料模具钢	加工精细的模具结构
	THYSSEN 德胜	GS - 738	32 ~ 35HRC	超级 P20 预硬塑料模具钢	高韧性和高抛光度塑料模
	THYSSEN 德胜	GS - 318	28 ~ 30HRC	预硬优质塑料模具钢	高质量塑料模, 宜电蚀操作
	THYSSEN 德胜	GS - 312	29 ~ 33HRC	预硬塑料模具钢, 极易切削	普通用途塑料模
	USINOR IND USTEEL	SP300	300	焊接性佳, 加工区和非加工区抛光或电蚀后区别不大	高要求大型塑料模

(续)

相当于 AISI 牌号	钢厂名称	材料牌号	出厂硬度 HBW	钢材特性	用 途
P21 (GB: 25CrNi3MoAl)	DAIDO 大同	NAK55 VESR	37 ~43HRC	高硬度, 易切削, 加厚焊接性良好	高性能塑料模具、冲模
	DAIDO 大同	NAK55 VESR	37 ~43HRC	高硬度, 镜面效果特佳, 放电加工性良好, 焊接性极佳	电蚀及镜面研磨高性能模具
	HITACHI 日立	CENAI (ESR)	38 ~42HRC	高纯净度预硬塑料模具钢, 改善防锈性, 组织均匀, 镜面抛光、放电加工及电蚀性能佳	精密蚀纹及镜面抛光模具
	HITACHI 日立	HPM50	36 ~41HRC	预硬钢, 最适于镜面抛光加工, 焊接性及放电加工特性佳	镜面、抛光模具
	THYSSEN 德胜	GS - 808 VAR	38 ~42HRC	高硬度, 易切削, 焊接性好, 镜面效果佳, 真空重熔新一代钢材	长寿命、镜面模具钢
	USINOR IND USTEEL	SP400	37 ~41HRC	高硬度, 机械加工、烧焊及镜面抛光性能优越	塑料模及冲模
	NKS 高周波	KAP88	38 ~41HRC	高硬度, 塑料模具钢, 镜面抛光特性佳	高级塑料模
	DORRENBURG 利昌	RS80	380 ~420	高硬度, 镜面效果特佳, 放电加工性良好, 焊接性极佳	电蚀及镜面研磨高性能模具
420 (JIS: SUS420J2) (GB/YB: 30Gr13)	ASSAB 一胜百	168RAM AX - S	340	易加工不锈钢, 极佳抗腐蚀性, 高硬度, 优良的耐蚀性、机械加工性及抗压强度, 硬度分布平均	耐酸性模坯, 不锈钢模坯, 橡胶模模座, 塑料挤压模
	ASSAB 一胜百	CORRAX S336	32HRC	优良的尺寸稳定性, 焊接时不需要预热	耐酸性塑料模, 挤压模

(续)

相当于 AISI 牌号	钢厂名称	材料牌号	出厂硬度 HBW	钢材特性	用 途
420 (JIS: SUS-420J2) (GB/YB: 30Gr13)	ASSAB 一胜百	S136 ESR	215	高精度镜面抛光, 抗锈蚀能力极佳, 热处理变形小	加工 PVC、PP、PC、PMMA 的模具, 塑料、食品工业机械构件
	ASSAB 一胜百	S136H ESR	290 ~ 330	高精度镜面抛光, 抗锈蚀能力极佳, 热处理变形小	加工 PVC、PP、PC、PMMA 的模具, 塑料、食品工业机械构件
	BOHLER 百禄	M300 ESR	预硬	预硬镜面模具钢	高耐蚀性及需要镜面抛光的模具, PVC 用模具
	BOHLER 百禄	M310 ESR	≤225	镜面塑料模具钢	耐腐蚀及需要镜面抛光的模具, 适合 PVC 用模具
	BOHLER 百禄	M310H ESR	预硬	预硬镜面塑料模具钢	适合镜面抛光模具, 尤其适合于加工盒带及镭射盒
	BOHLER 百禄	M330 VMR	≤240	真空电渣重熔 (VMR), 抛光性能、耐蚀性、加工性能好	适合加工光学工业产品 (如镜片、电蚀屏幕等) 的耐蚀性、耐磨性塑料模具
	DORRENBURG 利昌	RS2316	235 ~ 250	耐 腐 蚀 镜 面 模 具 钢	镜面模及耐酸性极强的塑料模
	DORRENBURG 利昌	RS2083	≤230	硬度约 52HRC, 耐酸及抛光性能良好	镜面模及耐酸性极强的塑料模
	DORRENBURG 利昌	RS2083H	≤230	预硬, 耐酸及抛光性能良好	镜面模及耐酸性塑料模
	DORRENBURG 利昌	RS2316 ESR	260 ~ 310	预 硬, 耐 蚀 性 特 佳	高耐酸性塑料模
	DAIDO 大同	440C	269	耐酸性佳, 高硬度不锈钢	半导体行业、包装行业工程塑料模
	DAIDO 大同	S - STAR ESR	30 ~ 34 HRC	极佳的耐酸性、耐磨性及高镜面特性	精密塑料模, 高镜面模具
	EDEL	2316	235 ~ 250	钢材经 ESR 处理, 品质更纯净均匀	镜面模及耐酸性极强的塑料模
	EDEL	2316H	290 ~ 330	钢材经 ESR 处理, 品质更纯净均匀	镜面模及耐酸性极强的塑料模
	HITACHI 日立	HPM38	285 ~ 320	镜面抛光特性极佳, 具有优良的耐蚀性, 热处理变形小	镜面抛光模具及耐腐蚀塑料模

(续)

相当于 AISI 牌号	钢厂名称	材料牌号	出厂硬度 HBW	钢材特性	用 途
420 (JIS: SUS-420J2) (GB/YB: 30Gr13)	SAARSTAHL 萨斯特	GS-2083	215~240	硬度可提高至约 52HRC, 耐酸及抛光性能良好	镜面模及耐酸性塑料模
	SAARSTAHL 萨斯特	GS-2083H	280~310	预硬, 耐酸及抛光性能良好	镜面模及耐酸性塑料模
	SAARSTAHL 萨斯特	GS-2316	260~310	预硬, 耐酸性特佳	高耐酸性塑料模
	THYSSEN 德胜	GS-083	≤230	耐腐蚀塑料模具钢	耐蚀性塑料模
	THYSSEN 德胜	GS-083 ESR	≤230	高级耐腐蚀镜面塑料模具钢	高镜面抛光需求及耐腐蚀塑料模
	THYSSEN 德胜	GS-083H	290~340	预硬, 耐腐蚀塑料模具钢	可以加工精细的模具结构
	THYSSEN 德胜	GS-083H	290~340	预硬, 耐腐蚀镜面塑料模具钢	可以加工精细的模具结构
	THYSSEN 德胜	GS-128H	38~42HRC	超级预硬, 耐腐蚀镜面塑料模具钢	适合镜面模及耐酸性塑料模
	THYSSEN 德胜	GS 083 VAR	≤230	耐腐蚀长寿命镜面钢	可达光学镜面效果的镜面模具
	THYSSEN 德胜	GS-316	28~32HRC	易切削含硫不锈钢	耐腐蚀模具及嵌入件
—	ASSAB 一胜百	635	200	强度、韧性高, 淬透性、焊接性好, 可火焰硬化至 56~60HRC	各类塑料模、压模
	ASSAB 一胜百	S336	32HRC	沉淀硬化不锈钢, 耐腐蚀性较 420 钢更佳	各类含腐蚀成分塑料的注射、挤压模
	ASSAB 一胜百	OPTIMAX	200	超高精度镜面抛光, 纯净度极高	光学镜头、镜片模
	BOHLER 百禄	M340	≤260	超级耐腐蚀镜面钢	超高的耐蚀性、抛光性能, 适合塑料模具及食品工业机械
	DORRENBURG 利昌	RS80	380~420	高硬度, 镜面效果特佳, 放电加工良好, 焊接性佳	电蚀及镜面研磨的高性能模具
	DAIDO 大同	PXZ	预硬 27~34HRC	通用预硬钢, 切削加工性能、焊补性良好	通用大型蚀花模具, 如加工汽车保险杠、仪表面板、家电外壳、浴槽等的模具

(续)

相当于 AISI 牌号	钢厂名称	材料牌号	出厂硬度 HBW	钢材特性	用 途
—	HITACHI 日立	HPM38	48 ~ 55HS	镜面抛光模具用高品质不锈钢	热固性、耐燃和透明树脂模具
	SINTO	PORCERA XII	≤450HV	透气钢材, 含有小于 10μm 的相连小孔网络	改善树脂流动, 排气及熔合
	THYSSEN 德胜	GS - 316	265 ~ 325	预硬, 耐腐蚀镜面塑料模具钢	要求耐蚀性更强的塑料模具
	THYSSEN 德胜	GS - 316 ESR	265 ~ 325	预硬, 高耐蚀性、高抛光度塑料模具钢	要求耐蚀性更强的塑料模具
6F7	THYSSEN 德胜	GS - 767	≤250	变形小、高强度精密塑料模具钢及高韧性冷作模具钢	硬塑料模及厚片冲模
440	THYSSEN 德胜	GS361ESR	≤265	高耐磨性、耐蚀性塑料模具钢	高耐蚀性塑料模具, 橡胶模

10.2.4 进口高速工具钢的钢号、特性及应用 (表 10-14)

表 10-14 进口高速工具钢的钢号、特性及应用

相当于 AISI 牌号	钢厂名称	材料编号	出厂硬度 HBW	钢材特性	用 途
M2 (JIS: SKH51) (GB/YB: W6Mo5Cr4V2)	ASSAB 一胜百	KM - 2	260	耐 磨 损 高 速 工 具 钢	长期工作的薄片冲模
	BOHLER 百禄	S600	240 ~ 300	韧性高速工具钢	一般韧性的精密耐磨五金冲模或切割工具及刀具
	DAIDO 大同	MH51	退火≤255	通用切割工具、各种模具用钢	钻头、铰刀、丝锥及凸模
	THYSSEN 德胜	GS - 388	≤250	高强度、耐磨高速工具钢	精密耐磨五金冲模或切割工具及刀具
M42 (JIS: SKH59) (GB: W2Mo9Cr4VCo8)	BOHLER 百禄	S500	240 ~ 300	高 韧 性 高 速 工 具 钢	高韧性、精密耐磨五金冲模或切割工具及刀具
	THYSSEN 德胜	GS - 247	≤300	高耐磨性、高热硬性高速工具钢	切割工具及刀具

10.2.5 进口硬质合金的牌号、特性及应用（表 10-15）

表 10-15 进口硬质合金的牌号、特性及应用

相当于 AISI 牌号	钢厂名称	材料牌号	出厂硬度 HBW	钢材特性	用 途
M3	ASSAB 一胜百	ASP-23	260	粉末冶金炼制，晶体特细，耐磨损、韧性高，品质均匀、无偏析等	精密、高速冲模、冷挤压模
M4	THYSEN 德胜	GS-323	20~24HRC	优质耐磨，高钒	耐热塑料模及耐用五金冲模
—	ASSAB 一胜百 ASSAB 一胜百 ASSAB 一胜百	ASP-30 ASP-60 V-4	300 340 235	粉末冶金炼制，晶体特细，耐磨损、韧性高，品质均匀、无偏析等	多刃口切削刀具、薄片冲模 高速切削刀具、冷挤压模 冲压高黏度材料，精密冲模
—	ASSAB 一胜百	V-10	280~310	粉末冶金炼制，晶体特细，耐磨损、韧性高，品质均匀、无偏析等	精密冲裁，硅钢片或电路板冲裁模、冷挤压模
	ASSAB 一胜百	ELMAX	240	粉末冶金炼制，纯净度极高，耐磨损及韧性高	成形工作表面及尺寸精度要求高的电子零件的工程塑料模
	BOHLER 百禄	S390PM	≤300	超级耐磨、高韧性	重负荷冲模，冲钛合金片等
	BOHLER 百禄	S590PM	≤300	特级耐磨、高韧性	重负荷冲模，冲钛合金片等
	BOHLER 百禄	S690PM	≤280	耐磨、高韧性	重负荷冲模，冲钛合金片等
	BOHLER 百禄	S790PM	≤280	超高韧性	重负荷冲模，冲钛合金片等
	DAIDO 大同	DEX20	退火≤285	组织微细、高韧性	冲模、模具部件（凸模、销杆等）、切齿工具
	DAIDO 大同	DEX40	退火≤285	组织微细、高温强度优异	各种刀具、冷锻模、温锻模、模具部件、冷轧辊
	THYSEN 德胜	GS-323	20~24HRC	优质耐磨，高钒	耐热塑料模件及耐用五金冲模、重负荷冲模
	THYSEN 德胜	GS-3V	≤250	超高韧性	精密冲模、冷挤压模
	THYSEN 德胜	GS-9V	≤250	抗热裂性、耐磨性优于 H13	精密冲模、冷挤压模
	THYSEN 德胜	GS-10V	≤250	耐磨性高于 D2，韧性相当于 M2	精密冲模、冷挤压模
	THYSEN 德胜	GS-15V	≤250	高耐磨性，韧性、寿命高	高速、精密、耐磨五金冲模
	THYSEN 德胜	GS-420V PM	≤300	耐腐蚀	高速、精密、耐磨五金冲模

附录

附录 1 模具材料常用汉英词汇

A 奥氏体 austenite 奥氏体本质晶粒度 austenite inherent grain size 奥氏体化 austenitization, Austenitizing B 白口铸铁 white cast iron 白铜 white brass, copper-nick-alloy 板条状马氏体 lath martensite 棒材 bar 包晶反应 peritectic reaction 薄板 sheet 薄膜技术 thin film technique 贝氏体 bainite 本质晶粒度 inherent grain size 比强度 strength-to-weight ratio 变质处理 inoculation, modification 变质剂 modifying agent, modifier 表面技术 surface technology 表面粗糙度 surface roughness 表面淬火 surface quenching 表面腐蚀 surface corrosion 表面硬化 surface hardening 玻璃 glass 玻璃态 vitreous state, glass state 玻璃钢 glass fiber reinforced plastics 玻璃纤维 glass fiber 不可热处理 non-heat-treatable 不锈钢 stainless steel 布氏硬度 Brinell hardness	C 材料强度 strength of materials 残留奥氏体 residual austenite 残余变形 residual deformation 残余应力 residual stress 层状珠光体 lamellar pearlite 超导金属 superconducting metal 成核 nucleate, nucleation 成长 growth, growing 磁材料 magnetic materials 冲击韧度 impact toughness 纯铁 pure iron 粗晶粒 coarse grain 脆性 brittleness 脆性断裂 brittle fracture 淬火 quenching, quench 淬透性 hardenability 淬硬性 hardenability, hardening capacity D 带材 strip 单晶 single crystal, unit crystal 单体 monomer, element 氮化物 nitride 氮碳共渗 (软氮化) nitrocarburizing 刀具 cutting tool 导磁性 magnetic conductivity 导电性 electric conductivity 导热性 heat conductivity, thermal conductivity 导体 conductor	等离子堆焊 plasma surfacing 等离子弧喷涂 plasma spraying 等离子增强化学气相沉积 plasma chemical vapour deposition (PCVD) 等温转变图 isothermal transformation curve, time temperature transformation (TTT) curve 低合金钢 low alloy steel 低碳钢 low carbon steel 低碳马氏体 low carbon martensite 低温回火 low tempering 点阵常数 grating constant, lattice constant 电镀 electroplating, galvanize 电刷镀 brush electro-plating 电弧喷涂 electric arc spraying 电子显微镜 electron microscope 定向结晶 directional solidification 端淬试验 end quenching test 断口分析 fracture analysis 断裂强度 breaking strength, fracture strength 断裂韧度 fracture toughness 断面收缩率 contraction of cross sectional area 锻造 forge, forging, smithing 多晶体 polycrystal E 二次硬化 secondary hardening 二元合金 binary alloy, two-component alloy

(续)

F 防锈的 rust - proof, rust resistant 非金属 non - metal, nonmetal 非晶态 amorphous state 分子键 molecular bond 分子结构 molecular structure 酚醛树脂 bakelite, phenolic resin 粉末冶金 powder metallurgy 粉末复合材料 particulate composite 腐蚀 corrosion, corrode, etch, etching 腐蚀剂 corrodent, corrosive, etchant 复合材料 composite material G 感应淬火 induction quenching 刚度 rigidity, stiffness 钢 steel 钢板 steel plate 钢棒 steel bar 钢锭 steel ingot 钢管 steel tube, steel pipe 钢丝 steel wire 钢球 steel ball 杠杆定律 lever rule 高分子聚合物 high polymer, superpolymer 高合金钢 high alloy steel 高锰钢 high manganese steel 高频感应淬火 high frequency induction quenching 高速工具钢 high speed steel, quick - cutting steel 高弹态 elastomer 高碳钢 high - carbon steel 高碳马氏体 high carbon martensite 高温回火 high tempering 各向同性 isotropy 各向异性 anisotropy, anisotropism 工程材料 engineering material 工具钢 tool steel	工业纯铁 industrial pure iron 工艺 technology 功能材料 functional material 共价键 covalent bond 共晶体 eutectic 共晶反应 eutectic reaction 共析体 eutectoid 共析钢 eutectoid steel 固溶处理 solid solution treatment 固溶强化 solution strengthening 固溶体 solid solution 固相 solid phase 光亮热处理 bright heat treatment 滚动轴承钢 ball bearing steel 过饱和固溶体 supersaturated solid solution 过共晶合金 hypereutectic alloy 过共析钢 hypereutectoid steel 过冷 over - cooling, supercooling 过冷奥氏体 supercooled austenite 过冷度 degree of supercooling 过热 overheat, superheat H 焊接 welding, weld 航空材料 aerial material 合成纤维 synthetic fiber 合金钢 alloy steel 合金化 alloying 合金结构钢 structural alloy steel 黑色金属 ferrous metal 滑移 slip, glide 滑移方向 glide direction, slip direction 滑移面 glide plane, slip plane 滑移系 slip system 化合物 compound 化学气相沉积 chemical vapour deposition (CVD) 化学热处理 chemical heat treatment	J 基体 matrix 机械混合物 mechanical mixture 激光 laser 激光热处理 heat treatment by laser beam 激光熔凝 laser melting and consolidation 激光表面硬化 surface hardening by laser beam 加工硬化 work hardening 加热 heating 结构材料 structural material 结晶 crystallize, crystallization 结晶度 crystallinity 金属材料 metal material 金属化合物 metallic compound 金属键 metallic bond 金属组织 metal structure 金属结构 metallic framework 金属塑料复合材料 plastimets 金属塑性加工 metal plastic working 金属陶瓷 metal ceramic 金相显微镜 metallographic microscope, metalloscope 金相照片 metallograph 晶胞 cell 晶格 crystal lattice 晶格常数 lattice constant 晶格空位 lattice vacancy 晶粒 crystal grain 晶粒度 grain size 晶粒细化 grain refining 晶体结构 crystal structure 聚四氟乙烯 polytetrafluoroethylene (PTFE) 聚合度 degree of polymerization 聚合反应 polymerization 绝热材料 heat - insulating material

(续)

K 抗拉强度 tensile strength 抗扭强度 torsional strength 抗压强度 compression strength 颗粒复合材料 particle composite 扩散 diffusion, diffuse L 老化 aging 莱氏体 ledeburite 冷变形 cold deformation 冷加工 cold work, cold working 冷却 cool, cooling 冷作硬化 cold hardening 离子 ion 力学性能 mechanical properties 粒状珠光体 granular pearlite 连续冷却转变图 continuous cooling transformation (CCT) curve 孪晶 twin crystal 孪生 twinning, twin 螺型位错 helical dislocation 洛氏硬度 Rockwell hardness M 马氏体 martensite (M) 密排六方晶格 hexagonal close-packed lattice (HCP) 面心立方晶格 face-centred cubic lattice (FCC) 摩擦 friction 磨损 wear, abrade, abrasion 模具钢 die steel Mf 点 martensite finishing point Ms 点 martensite starting point N 纳米材料 nanostructured material 耐磨性 wearability, wear resistance 耐磨钢 wear resistant steel 耐热钢 heat resistant steel, high temperature steel 内耗 internal friction	内应力 internal stress 尼龙 nylon 粘结剂 adhesive 粘弹性 viscoelasticity 凝固 solidify, solidification 扭转疲劳强度 torsional fatigue strength P 泡沫塑料 foamlastics, expanded plastics 配位数 coordination number 喷丸硬化 shot peeninghardening 疲劳强度 fatigue strength 疲劳寿命 fatigue life 片状马氏体 lamellar martensite, plate type martensite 普通碳素钢 ordinary steel, plain carbon steel Q 气体渗碳 gas carburizing 切变 shear 切削 cut, cutting 切应力 shearing stress 球化退火 spheroidizing annealing 球墨铸铁 nodular graphite cast iron, spheroidal graphite cast iron 球墨珠光体 globular pearlite 屈服强度 yielding strength, yield strength 屈强比 yield-to-tensile strength ratio (Y/T) 去应力退火 stress relief annealing R 热处理 heat treatment 热加工 hot work, hot working 热喷涂 thermal spraying 热固性 thermosetting 热塑性 thermo plasticity 热硬性 thermal hardness 人工时效 artificial aging	刀具 cutting tool 刃型错位 edge dislocation, blade dislocation 韧性 toughness 溶质 solute 溶剂 solvent 柔顺性 flexibility 蠕变 creep 蠕墨铸铁 quasiflake graphite cast iron S 扫描电镜 scanning electron microscope (SEM) 上贝氏体 upper bainite 渗氮 nitriding 渗氮层 nitration case 渗硫 sulfurizing 渗碳 carburizing, carburization 渗碳体 cementite (CM) 失效 failure 石墨 graphite (G) 时效硬化 age-hardening 实际晶粒度 actual grain size 使用寿命 service life 使用性能 usability 树枝状晶 dendrite 树脂 resin 双金属 bimetal, duplex metal 水淬 water quenching, water hardening, water quench 松弛 relax, relaxation 塑料 plastics 塑性 plasticity, ductility 塑性变形 plastic deformation 索氏体 sorbite (S) T α 钛合金 α titanium alloy 弹簧钢 spring steel 弹性 elasticity 弹性变形 elastic deformation

(续)

弹性极限 elastic limit	无定形的 amorphous	应变 strain
弹性模量 elastic modulus	物理气相沉积 physical vapour deposition (PVD)	应力 stress
碳含量 carbon content	X	应力场强度因子 stress intensity factor
碳化物 carbide	下贝氏体 lower bainite	应力松弛 relaxation of stress
碳素钢 carbon steel	纤维 fibre, fiber	硬质合金 carbide alloy, hard alloy
陶瓷 ceramic	纤维增强复合材料 filament reinforced composite	油淬 oil quenching, oil hardening
陶瓷材料 ceramic material	显微照片 metallograph, micro-photograph	有机玻璃 poly methyl methacrylate, plexiglass
体心立方晶格 body - centered cubic lattice (BCC)	显微组织 microscopic structure, microstructure	匀晶 uniform grain
体形聚合物 three - dimensional polymer	线形聚合物 linear polymer	孕育处理 inoculation, modification
调质处理 quenching and tempering	相对分子质量 molecular weight	Z
调质钢 quenched and tempered steel	橡胶 rubber	再结晶退火 recrystallization annealing
铁碳相图 iron - carbon equilibrium diagram	相 phase	载荷 load
同素异构转变 allotropic transformation	相变 phase transition	增强塑料 reinforced plastics
透明结晶陶瓷 transparent crystalline ceramics	相图 phase diagram	自然时效 natural aging
涂层 coat, coating	形状记忆合金 shape memory alloys	自由能 free energy
退火 anneal, annealing	形变 deformation	组元 component, constituent
托氏体 troostite (T)	性能 performance, property	组织 structure
W	X 射线结构分析 X - ray structural analysis	针状马氏体 acicular martensite
弯曲 bend, bending	Y	正火 normalize, normalization
完全退火 full annealing	压力加工 press work	致密度 tightness
微观组织 microstructure	亚共晶铸铁 hypoeutectic cast iron	支化聚合物 branched polymer
维氏硬度 Vickers hardness	亚共析钢 hypoeutectoid steel	智能材料 intelligent material
未经变质处理的 uninoculated	氧化物陶瓷 oxide ceramics	中合金钢 medium alloy steel
温度 temperature	伸长率 percentage elongation	轴承钢 bearing steel
	盐浴淬火 salt bath quenching	轴承合金 bearing alloy
	液相 liquid phase	珠光体 pearlite (P)
		柱状晶体 columnar crystal
		铸造 cast, foundry

附录2 黑色金属材料硬度及强度换算

硬 度							抗拉强度 R_m
洛氏	表面洛氏			维氏	布氏		
HRB	HR15T	HR30T	HR45T	HV	HBS ^①		/MPa
					$F/D^2 = 10$	$F/D^2 = 30$	
60.0	80.4	56.1	30.4	105	102		375
60.5	80.5	56.4	30.9	105	102		377
61.0	80.7	56.7	31.4	106	103		379
61.5	80.8	57.1	31.9	107	103		381
62.0	80.9	57.4	32.4	108	104		382
62.5	81.1	57.7	32.9	108	104		384
63.0	81.2	58.0	33.5	109	105		386
63.5	81.4	58.3	34.0	110	105		388
64.0	81.5	58.7	34.5	110	106		390
64.5	81.6	59.0	35.0	111	106		393
65.0	81.8	59.3	35.5	112	107		395
65.5	81.9	59.6	36.1	113	107		397
66.0	82.1	59.9	36.6	114	108		399
66.5	82.2	60.3	37.1	115	108		402
67.0	82.3	60.6	37.6	115	109		404
67.5	82.5	60.9	38.1	116	110		407
68.0	82.6	61.2	38.6	117	110		409
68.5	82.7	61.5	39.2	118	111		412
69.0	82.9	61.9	39.7	119	112		415
69.5	83.0	62.2	40.2	120	112		418
70.0	83.2	62.5	40.7	121	113		421
70.5	83.3	62.8	41.2	122	114		424
71.0	83.4	63.1	41.7	123	115		427
71.5	83.6	63.5	42.3	124	115		430
72.0	83.7	63.8	42.8	125	116		433
72.5	83.9	64.1	43.3	126	117		437
73.0	84.0	64.4	43.8	128	118		440
73.5	84.1	64.7	44.3	129	119		444
74.0	84.3	65.1	44.8	130	120		447
74.5	84.4	65.4	45.4	131	121		451

(续)

硬 度							抗拉强度 R_m /MPa
洛氏	表面洛氏			维氏	布氏		
HRB	HR15T	HR30T	HR45T	HV	HBS ^①		
					$F/D^2 = 10$	$F/D^2 = 30$	
75.0	84.5	65.7	45.9	132	122		455
75.5	84.7	66.0	46.4	134	123		459
76.0	84.8	66.3	46.9	135	124		463
76.5	85.0	66.6	47.4	136	125		467
77.0	85.1	67.0	47.9	138	126		471
77.5	85.2	67.3	48.5	139	127		475
78.0	85.4	67.6	49.0	140	128		480
78.5	85.5	67.9	49.5	142	129		484
79.0	85.7	68.2	50.0	143	130		489
79.5	85.8	68.6	50.5	145	132		493
80.0	85.9	68.9	51.0	146	133		498
80.5	86.1	69.2	51.6	148	134		503
81.0	86.2	69.5	52.1	149	136		508
81.5	86.3	69.8	52.6	151	137		513
82.0	86.5	70.2	53.1	152	138		518
82.5	86.6	70.5	53.6	154	140		523
83.0	86.8	70.8	54.1	156		152	529
83.5	86.9	71.1	54.7	157		154	534
84.0	87.0	71.4	55.2	159		155	540
84.5	87.2	71.8	55.7	161		156	546
85.0	87.3	72.1	56.2	163		158	551
85.5	87.5	72.4	56.7	165		159	557
86.0	87.6	72.7	57.2	166		161	563
86.5	87.7	73.0	57.8	168		163	570
87.0	87.9	73.4	58.3	170		164	576
87.5	88.0	73.7	58.8	172		166	582
88.0	88.1	74.0	59.3	174		168	589
88.5	88.3	74.3	59.8	176		170	596
89.0	88.4	74.6	60.3	178		172	603
89.5	88.6	75.0	60.9	180		174	609
90.0	88.7	75.3	61.4	183		176	617
90.5	88.8	75.6	61.9	185		178	624
91.0	89.0	75.9	62.4	187		180	631

(续)

硬 度							抗拉强度 R_m
洛氏	表面洛氏			维氏	布氏		
HRB	HR15T	HR30T	HR45T	HV	HBS ^①		/MPa
					$F/D^2 = 10$	$F/D^2 = 30$	
91.5	89.1	76.2	62.9	189		182	639
92.0	89.3	76.6	63.4	191		184	646
92.5	89.4	76.9	64.0	194		187	654
93.0	89.5	77.2	64.5	196		189	662
93.5	89.7	77.5	65.0	199		192	670
94.0	89.8	77.8	65.5	201		195	678
94.5	89.9	78.2	66.0	203		197	686
95.0	90.1	78.5	66.5	206		200	695
95.5	90.2	78.8	67.1	208		203	703
96.0	90.4	79.1	67.6	211		206	712
96.5	90.5	79.4	68.1	214		209	721
97.0	90.6	79.8	68.6	216		212	730
97.5	90.8	80.1	69.1	219		215	739
98.0	90.9	80.4	69.6	222		218	749
98.5	91.1	80.7	70.2	225		222	758
99.0	91.2	81.0	70.7	227		226	768
99.5	91.3	81.4	71.2	230		229	778
100.0	91.5	81.7	71.7	233		232	788

① GB/T 231.1—2009《金属材料 布氏硬度试验 第1部分：试验方法》只允许使用硬质合金球压头，符号为 HBW，取消了用钢球头时使用的符号 HBS。

参 考 文 献

- [1] 吴兆祥. 模具材料及表面处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] 康俊远, 李立明, 徐勇军. 模具材料与表面处理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
- [3] 徐进. 模具材料应用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [4] 林慧国, 火树鹏, 马绍弥. 模具材料应用手册 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [5] 王德文. 提高模具寿命应用技术实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [6] 赵昌盛. 实用模具材料应用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [7] 阎承沛. 真空与可控气氛热处理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [8] 李有才. 模具材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [9] 知水, 王平, 侯树庭. 特殊钢炉外精炼 [M]. 北京: 原子能出版社, 1996.
- [10] 林慧国, 瞿志豪, 茅益明. 袖珍世界钢号手册 [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [11] 崔昆. 中国热处理年鉴 [M]. 北京: 中国热处理行业协会, 2005.
- [12] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学及热处理 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2007.

■ 资料翔实，信息储藏量大，虽然内容涉及面广，但表述简明，且分类明晰，便于速查，实用性强，使用方便；

■ 集模具选材、制造工艺、热处理及表面强化于一体，具有知识的可操作性、实用性，内容的规范性、广泛性；

■ 对于材料名称、规格及性能、用途等，都按照现行国家标准提供；

■ 具有较全的技术参数，并有不同方案比较数据

地址：北京市百万庄大街22号

邮政编码：100037

电话服务

社服务中心：010-88361066

销售一部：010-68326294

销售二部：010-88379649

读者购书热线：010-88379203

网络服务

教材网：<http://www.cmpedu.com>

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

上架指导 工业技术/机械工程/模具

ISBN 978-7-111-44385-8

策划编辑◎李万宇

ISBN 978-7-111-44385-8



9 787111 443858 >

定价：98.00元