

模具热处理及其 常见缺陷与对策

MUJU RECHULI JIQI
CHANGJIAN QUEXIAN YU DUICE

金荣植 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

模具热处理及其常见 缺陷与对策

金荣植 编著



机械工业出版社

本书系统地介绍了模具热处理工艺技术和检验方法,对模具热处理生产中经常出现的缺陷及使用中常见的失效形式进行了分析,并提出了预防与改进措施。本书主要内容包括:模具材料概述、模具材料与热处理、模具热处理质量控制与检验、模具热处理常见缺陷分析与对策、模具的失效分析与对策、提高模具使用寿命的途径与方法。本书注重实用性、科学性、先进性和可操作性,用大量的典型实例介绍了提高模具性能与使用寿命的先进热处理工艺方法,具有很高的参考价值。

本书可供热处理工程技术人员和工人阅读使用,也可供从事模具设计和制造的技术人员及相关专业在校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

模具热处理及其常见缺陷与对策/金荣植编著. —北京:机械工业出版社, 2014. 7

ISBN 978 - 7 - 111 - 46915 - 5

I. ①模… II. ①金… III. ①模具 - 热处理 IV. ①TG162. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 116107 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:陈保华 责任编辑:陈保华 王 珑

版式设计:赵颖喆 责任校对:刘秀丽

责任印制:刘 岚

北京京丰印刷厂印刷

2014 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

169mm×239mm·21 印张·421 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 46915 - 5

定价:56.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

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

策 划 编 辑:(010) 88379734

封面无防伪标均为盗版

前 言

模具是现代化工业大规模生产的重要工艺装备，是批量生产工业产品的有效工具，它在很大程度上决定着产品的质量和效益。因此，模具设计与制造技术水平的高低已成为衡量一个国家装备制造业水平高低的重要标志。

20 世纪 80 年代以来，我国模具工业得到了迅速发展，尤其是在汽车工业、家电工业、建筑业（塑钢窗、门等）和机电工业等领域，近年来都是以每年 15% 左右的增长速度快速发展。2012 年，我国模具销售额已达 1240 亿元，模具产量已跃居世界前列。但从总体上看，我国还只是模具生产大国而不是强国，模具的生产水平与发达国家之间还有 10~15 年的差距，目前产品仍以中低档模具为主，中高档模具的自配率只占 60% 左右，而很多高精密及复杂的模具仍依赖进口。

在模具制造过程中，要使模具获得高的耐磨性、热硬性、强度、韧性和较长的使用寿命，热处理是关键因素之一。因此，在对模具进行热处理时，要根据模具材料及其结构和技术要求等制订合适的热处理工艺并严格遵照执行，以满足组织、力学性能及热处理变形等方面的要求。然而在模具热处理生产过程中，由于诸多因素的影响，常常会出现不同形式的热处理缺陷，其中包括被处理件达不到所要求的性能或状态等质量方面的缺陷，以及变形、裂纹和氧化脱碳等显现在外观上的缺陷。在模具使用过程中，还会出现各种不同形式的失效，主要有模具变形、表面损伤及断裂等。变形及开裂是模具热处理中最容易发生的缺陷，特别是尺寸精密、形状复杂的模具更是如此。由于许多模具（包括模具零件）的热处理是安排在整个模具加工过程的后期，甚至是最后工序，因此其一旦变形超差或开裂，就会导致前功尽弃。据有关方面的调查统计，在模具失效的诸多因素中，由于模具用材和热处理不当而引起的失效约占 70%。另外，由于模具的加工周期长，加工费用高（精密复杂模具或大型模具的制造加工费高达数十万元甚至数百万元），如果出现废品，则会造成巨大的经济损失。

为了减少热处理缺陷造成的损失，首先要在热处理生产过程中认真执行相关的热处理技术标准，结合当前热处理新技术、新工艺、新设备及新材料等，在工艺设计、选材、材料分析与加工、热处理规范的制订与实施、加热与冷却方式、淬火冷却介质的选用、组织与性能的控制、热处理设备的可靠性，以及热处理质量检验等方面予以重视，并对热处理生产过程实施全面质量管理，以提高模具热处理质量，延长其使用寿命，减少废品，降低成本；其次，要对缺陷产生的原因进行分析，并采取相应措施来防止缺陷的发生。

本书对使用中失效模具的服役条件和受力情况、缺陷形貌特征、检验分析、缺

陷原因、工艺改进及防止措施等进行了较为详细的论述，并通过大量典型的实例介绍了提高模具性能与使用寿命的先进热处理工艺方法。

在本书编写过程中，作者参阅并引用了一些热处理方面的专著及论文，在此谨向这些作者表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中难免会出现一些错误和不足之处，恳请广大专家和读者批评指正。

金荣植

目 录

前言

第 1 章 模具材料概述	1
1.1 模具及模具材料分类	1
1.1.1 冷作模具及其材料	1
1.1.2 热作模具及其材料	2
1.1.3 塑料模具及其材料	3
1.1.4 玻璃模具及其材料	3
1.1.5 其他模具材料	4
1.2 模具材料的性能要求	4
1.2.1 使用性能要求	5
1.2.2 工艺性能要求	6
1.2.3 典型模具的材料性能要求	6
1.3 模具材料的主要力学性能指标	7
1.3.1 模具材料的常规力学性能	7
1.3.2 模具材料的特殊力学性能	9
1.4 模具选材的基本原则及常用模具材料	12
1.4.1 选材的基本原则	12
1.4.2 常用模具材料	12
第 2 章 模具材料与热处理	14
2.1 模具的常规热处理条件	14
2.1.1 模具钢退火的种类	15
2.1.2 模具的完全退火	15
2.1.3 模具的等温退火	16
2.1.4 模具的球化退火	16
2.1.5 模具的去应力退火	17
2.1.6 模具正火的目的及方法	17
2.1.7 模具调质的目的及方法	19
2.1.8 模具淬火的目的及方法	20
2.1.9 模具回火的目的及方法	21
2.1.10 模具加热介质和淬火冷却介质	23
2.2 冷作模具钢与热处理	26
2.2.1 冷作模具的工作条件及要求	27
2.2.2 冷作模具材料的性能要求	27
2.2.3 冷作模具材料的选择与应用	28

2.2.4	冷作模具钢的热处理工艺	34
2.2.5	典型冷作模具热处理实例	47
2.3	热作模具钢与热处理	51
2.3.1	热作模具的工作条件及要求	52
2.3.2	热作模具材料的性能要求	53
2.3.3	热作模具材料的分类和选用	53
2.3.4	热作模具钢的热处理工艺	55
2.3.5	典型热作模具热处理实例	60
2.4	塑料模具钢与热处理	62
2.4.1	塑料模具的分类和工作条件	62
2.4.2	塑料模具材料的性能要求	63
2.4.3	塑料模具材料的选择与应用	64
2.4.4	塑料模具钢的热处理工艺	65
2.4.5	典型塑料模具热处理实例	73
2.5	玻璃模具材料与热处理	74
2.5.1	玻璃模具材料的性能要求	74
2.5.2	玻璃模具材料及其热处理特点	75
2.5.3	典型玻璃模具热处理实例	76
2.6	铸钢、铸铁及硬质合金等模具材料与热处理	77
2.6.1	铸钢模具材料与热处理	77
2.6.2	铸铁模具材料与热处理	80
2.6.3	硬质合金及钢结硬质合金模具材料与热处理	85
2.6.4	典型铸钢、铸铁及硬质合金等模具材料热处理实例	88
第3章	模具热处理质量控制与检验	91
3.1	模具热处理质量的控制方法与手段	91
3.2	对模具用钢的原材料要求	92
3.2.1	对碳素工具钢的原材料要求	93
3.2.2	对合金工具钢的原材料要求	95
3.2.3	对高速工具钢的原材料要求	100
3.3	冷作模具钢热处理质量控制	103
3.3.1	冷作模具钢预备热处理质量控制	103
3.3.2	冷作模具钢最终热处理质量控制	105
3.4	热作模具钢热处理质量控制	107
3.4.1	热作模具钢预备热处理质量控制	108
3.4.2	热作模具钢最终热处理质量控制	110
3.5	塑料模具钢热处理质量控制	113
3.6	高速工具钢热处理质量控制	116
3.6.1	高速工具钢退火质量控制	116
3.6.2	高速工具钢淬火、回火质量控制	117

3.7 模具热处理质量检验内容和方法	119
3.7.1 热作模具热处理质量检验内容和方法	122
3.7.2 冷作模具热处理质量检验内容和方法	125
3.7.3 塑料专用模具钢金相检验	127
3.7.4 高速工具钢模具热处理质量检验内容和方法	128
第4章 模具热处理常见缺陷分析与对策	130
4.1 模具热处理缺陷种类及特点	130
4.2 模具常见缺陷分析与对策	131
4.2.1 硬度不足或不均产生原因与对策	131
4.2.2 软点产生原因与对策	132
4.2.3 氧化和脱碳产生原因与对策	133
4.2.4 过热或过烧产生原因与对策	136
4.2.5 淬火组织粗大产生原因与对策	137
4.2.6 石墨碳产生原因与对策	138
4.2.7 球化组织不良产生原因与对策	139
4.2.8 网状碳化物产生原因与对策	140
4.2.9 其他热处理组织不合格产生原因与对策	140
4.2.10 表面腐蚀产生原因与对策	142
4.2.11 萘状断口产生原因与对策	143
4.2.12 脆性大产生原因与对策	143
4.2.13 模具热处理后力学性能不合格产生原因与对策	144
4.2.14 模具热处理常见缺陷分析与对策的典型实例	148
4.3 模具热处理变形原因分析及对策	151
4.3.1 模具热处理变形影响因素	152
4.3.2 模具热处理变形原因分析	158
4.3.3 模具热处理变形控制	159
4.3.4 模具热处理变形原因分析与对策的典型实例	174
4.3.5 模具热处理变形的校正	177
4.4 模具热处理开裂原因分析与对策	181
4.4.1 模具热处理开裂影响因素	183
4.4.2 模具热处理开裂原因分析	185
4.4.3 防止模具开裂的措施	186
4.4.4 模具热处理开裂原因分析与对策的典型实例	192
4.5 模具退火和正火缺陷分析与对策	197
4.6 模具普通淬火和回火缺陷分析与对策	199
4.7 模具感应淬火常见缺陷分析与对策	202
4.8 模具火焰淬火常见缺陷分析与对策	204
4.9 模具化学热处理缺陷分析与对策	208
4.9.1 模具渗碳热处理缺陷分析与对策	208

4.9.2 模具碳氮共渗缺陷分析与对策	215
4.9.3 模具渗氮缺陷分析与对策	217
4.9.4 模具氮碳共渗缺陷分析与对策	221
4.9.5 高速工具钢模具热处理缺陷分析与对策	223
第5章 模具的失效分析与对策	226
5.1 模具失效的形式	226
5.2 模具的失效分析	228
5.2.1 模具失效分析方法	228
5.2.2 影响模具失效的因素	229
5.3 失效模具的金相组织检验方法和碳化物提取方法	233
5.3.1 失效模具的金相组织检验法	233
5.3.2 失效模具碳化物的提取法	235
5.4 预防模具早期失效的措施与方法	235
5.4.1 模具的设计与制造	236
5.4.2 模具的热处理	240
5.5 冷作模具的失效分析与对策	241
5.5.1 冷作模具的主要失效形式	241
5.5.2 冷作模具失效分析与对策	242
5.5.3 冷作模具失效分析与对策的典型实例	251
5.6 热作模具的失效分析与对策	254
5.6.1 热作模具的主要失效形式	254
5.6.2 热作模具失效分析与对策	256
5.6.3 热作模具失效分析与对策的典型实例	264
5.7 塑料模具的失效分析与对策	268
5.7.1 塑料模具的主要失效形式	268
5.7.2 塑料模具失效分析与对策	269
5.7.3 塑料模具失效分析与对策的典型实例	270
第6章 提高模具使用寿命的途径与方法	272
6.1 提高模具寿命的途径	272
6.2 高强韧模具材料的应用及效果	277
6.2.1 高强韧模具材料的应用	277
6.2.2 高强韧模具材料的应用效果	281
6.3 模具的强韧化热处理技术要求与方法	282
6.3.1 模具的强韧化热处理技术要求	282
6.3.2 模具钢的强韧化热处理方法	283
6.4 模具的强韧化热处理工艺及实例	290
6.5 模具的表面强化技术及应用实例	291
6.5.1 模具的表面强化技术	292
6.5.2 模具表面强化技术的选择原则	301

6.5.3 模具表面强化技术应用实例	301
6.6 先进的模具表面强化技术及应用实例	308
6.6.1 模具的稀土元素表面强化技术及应用实例	308
6.6.2 模具的气相沉积技术及应用实例	312
6.6.3 模具的高能量密度能源表面强化技术及应用实例	315
6.6.4 模具的热喷涂技术及应用实例	320
参考文献	323

第 1 章 模具材料概述

模具是将金属、塑料、橡胶、玻璃及陶瓷等成形为制件的基础工艺装备。许多制件必须使用模具才能成形。不同的模具具有不同的成形及结构特点。模具的制造与一般的机械制造相比，具有形状比较复杂、精度要求比较高的特点。用于制造模具的材料必须适合各种模具工作条件的性能要求。模具的质量、使用寿命在很大程度上取决于制造模具的材料及热处理工艺。

1.1 模具及模具材料分类

通常根据用途的不同，可将模具分为冷作模具、热作模具、塑料模具及玻璃模具四大类。

模具材料按其类别的不同可分为：冷作模具材料、热作模具材料、塑料模具材料及其他模具材料（如铸铁、铸钢、硬质合金和钢结硬质合金等）。模具材料主要是模具钢。一般根据工作条件的不同，将模具钢分为冷作模具钢、热作模具钢、塑料模具钢和玻璃模具钢四类。图 1-1 所示为模具材料与模具钢的基本分类。

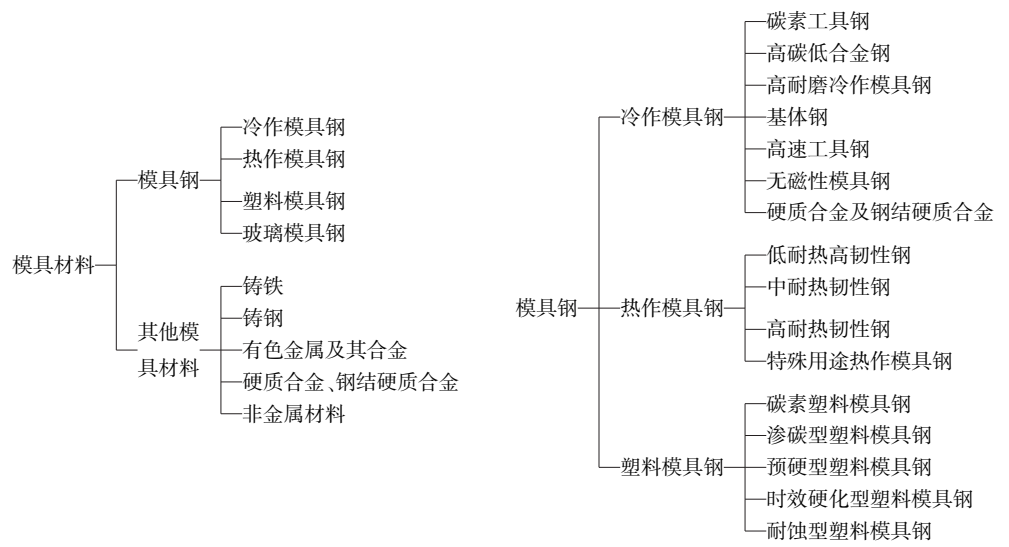


图 1-1 模具材料与模具钢的基本分类

1.1.1 冷作模具及其材料

冷作模具主要有：冲裁模、挤压模、拉深模、冷镦模、弯曲模、成形模、剪切

模、滚丝模和拉丝模等。按照工艺性能、承载能力及成分可将冷作模具钢分为：低淬透性钢、低变形钢、高耐磨微变形钢、高强度耐磨性钢、高韧性钢、抗冲击性钢、无磁性模具钢、冷作模具用硬质合金及钢结硬质合金等。表 1-1 列出了冷作模具材料的分类。

表 1-1 冷作模具材料的分类

类 型	牌 号
低淬透性钢	T7A、T8A、T9A、T10A、T11A、T12A、 MnSi、Cr2、9Cr2、GCr15、CrW5
低变形钢	9Mn2V、CrWMn、9CrWMn、9Mn2、MnCrWV、SiMnMo
高耐磨微变形性钢	Cr12、Cr12MoV、Cr5Mo1V、Cr4W2MoV、 Cr2Mn2SiWMoV、Cr6WV、Cr6W3Mo2.5V2.5
高强度高耐磨性钢	W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、W12Mo3Cr4V3N
高强韧性钢	6W6Mo5Cr4V、6Cr4W3Mo2VNb、7Cr7Mo2V2Si、 7CrSiMnMoV、6CrNiMnSiMoV、8Cr2MnWMoVS
抗冲击性钢	4CrW2Si、5CrW2Si、6CrW2Si、9SiCr、 60Si2Mn、5CrMnMo、5CrNiMo、5SiMnMoV
无磁性模具钢	7Mn15、5Mn15、12Cr18Ni9、7Mn10
冷作模具用 YG 类硬质合金	YG6、YG8A、YG8C、YG11C、YG15、YG20、YG25、YG30
国产模具用钢结硬质合金	WC 型：TLMW35、TLMW50、GW50、GJW50 TiC 型：GT35、R5、D1、T1

1.1.2 热作模具及其材料

热作模具主要有：锤锻模、机锻模、热挤压模、温挤压模、高速锻模、热切边模和压铸模等。根据合金元素的含量和热处理工艺性能可将热作模具钢分为：高强韧性热作模具钢、高热强性热作模具钢、高耐磨热作模具钢和特殊用途热作模具钢等。表 1-2 列出了常用热作模具钢的分类。

表 1-2 常用热作模具钢的分类

类 型	牌 号
高强韧性热作模具钢	5CrNiMo、5CrMnMo、4CrMnSiMoV、5SiMnMoV、5Cr4Mo、 5CrMnSiMoV、4SiMnMoV、5Cr2MoNiV、3Cr2MoWVN
高热强性热作模具钢	3Cr2W8V、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi、 5Cr4Mo3SiMnVA1、3Cr3Mo3W2V、5Cr4W5Mo2V、4Cr3Mo3SiV、 4Cr4MoWSiV、4Cr4Mo2WSiV、4Cr5WMoSiV、3Cr3Mo3VNb、 3Cr3Mo3V、5Cr4W2Mo2SiV、5Cr4W3Mo2VNb
高耐磨热作模具钢	8Cr3、7Cr3

(续)

类 型		牌 号
特殊用途 热作模具钢	1) 奥氏体热作模具钢	7Mn15Cr2Al3V2WMo、5Mn15Cr8Ni5Mo3V2、 7Mn10Cr8Ni10Mo3V2、Cr14Ni25Co2V、45Cr14Ni14W2Mo
	2) 高速工具钢	W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2
	3) 马氏体时效钢	18Ni(250)、18Ni(300)、18Ni(350)
	4) 析出硬化型热作模具钢	2Cr3Mo2NiVSi(PH)
	5) 冷热兼用基体钢	5Cr4Mo3SiMnVAl(012Al)、6Cr4Mo3Ni2WV(CG-2)、 5Cr4W5Mo2V(RM2)、6W8Cr4VTi(LM1)、 6Cr5Mo3W2VSiTi(LM2)、5Cr4Mo2W2SiV

1.1.3 塑料模具及其材料

按照塑料制品的不同，可将用于成型的塑料模具分为热固性塑料用压模和热塑性塑料注射模两大类。塑料模具又可以具体分为七类：热塑性塑料注射模、热固性塑料注射模、热固性塑料压缩模、挤塑模、吹塑模、真空吸塑模和其他塑料模具。

塑料模具钢系列包括碳素塑料模具钢、调质型塑料模具钢、渗碳型塑料模具钢、预硬型塑料模具钢、时效硬化型塑料模具钢、耐蚀型塑料模具钢及淬硬型塑料模具钢等。表 1-3 列出了常用塑料模具钢的分类。

表 1-3 常用塑料模具钢的分类

类 型	牌 号
碳素塑料模具钢	SM45、SM50、SM55
调质型塑料模具钢	45、55、40Cr、5CrNiMo、5CrMnMo
渗碳型塑料模具钢	20、20Cr、20CrMnTi、12CrNi3A、12CrNi2A、 12Cr2Ni4、20Cr2Ni4、2CrNi3MoAlS、0Cr4NiMoV(LJ)
预硬型塑料模具钢	3Cr2Mo、3Cr2MnNiMo(718)、40Cr、42CrMo、5CrNiMnMoVSCa、8Cr2MnWMoVS、 5CrMnMo、5CrNiMo、Y55CrNiMnMoV(SM1)、 30CrMnSiNi2A、4Cr3Mo3SiV、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1
时效硬化型塑料模具钢	06Ni6CrMoVTiAl、10Ni3MnCuAl、25CrNi3MoAl、18Ni(250)、 18Ni(300)、18Ni(350)、0Cr16Ni4Cu3Nb、05Cr17Ni4Cu4Nb、07Cr15Ni7Mo2Al
耐蚀型塑料模具钢	SM2Cr13、30Cr13、SM4Cr13、95Cr18、102Cr17Mo、14Cr17Ni2、 SM3Cr17Mo、0Cr16Ni4Cu3Nb(PCR)、1Cr14Co13Mo5V(AFC-77)、12Cr18Ni9
淬硬型塑料模具钢	T8A、T10A、T12A、CrWMn、Cr2、9SiCr、MnCrWV、9CrWMn、9Mn2V、7CrMn2WMo、 Cr12、Cr12MoV、Cr12Mo1V1、GCr15、Cr6WV、7CrSiMnMoV、Cr2Mn2SiWMoV

1.1.4 玻璃模具及其材料

玻璃模具材料大多为不锈钢和铸铁等，常见的不锈钢牌号有 12Cr13、20Cr13、

30Cr13、40Cr13、4Cr13Ni、12Cr18Ni9、16Cr25Ni20Si2、14Cr17Ni2 等；铸铁类材料有珠光体球墨铸铁（如 QT800-2 和 QT700-2）、蠕墨铸铁（如 RuT420、RuT380、RuT340、RuT300、RuT260 和稀土蠕墨铸铁）及合金铸铁（如中硅耐热球墨铸铁）等。

1.1.5 其他模具材料

模具材料主要选用钢材，但在实际的模具设计与制造过程中，根据被加工材料的性能、精度和坯料大小，也会考虑选用其他类型的模具材料，如有色金属及合金（如低熔点合金、锌基合金、高温合金、超塑性合金、铜基合金和铝合金等）、硬质合金、钢结硬质合金、陶瓷合金、铸钢、铸铁（如球墨铸铁、灰铸铁和蠕墨铸铁等）和非金属材料等。这些材料具有模具材料的性能，可满足模具力学性能和工作条件的需要。对于有特殊性能要求的批量加工件，从经济性、精密性和简化制造流程等方面综合考虑，选用这些材料来制造模具是可行与必要的。例如，这些材料可用于制造高耐磨，以及高抗压、高精度、高寿命模具（如冲裁、冷镦及挤压模具等），特别是级进模，其凸凹模部分常选用硬质合金或钢结硬质合金材料来制作。常用的硬质合金牌号为：YG6、YG6X、YG6A、YG8、YG15、YG20 和 YG20C 等；常用的钢结硬质合金牌号为：TLMW50、DT、GW50、GW40、GJW50、GT33、GT35、GTN 和 TM6 等。

1.2 模具材料的性能要求

模具材料的性能包括使用性能和工艺性能。对于模具材料的性能要求，一般是根据模具工作条件的复杂性、工作温度的不一致性，同时充分考虑到模具需要承受高压、冲击、振动、摩擦、弯扭及拉伸载荷等的作用提出来的。对模具材料的基本性能要求如下：

（1）良好的硬度和耐磨性 硬度是表征材料强度、韧性、弹性、塑性等一系列不同性能组合的一种综合性能指标。因此，模具材料经过热处理后应具有一定的硬度。

模具在工作时需承受相当大的压力和摩擦力，而模具必须在此情况下能保持其尺寸精度和表面粗糙度不发生变化，所以模具材料应具有良好的耐磨性。

（2）适宜的强度和韧性 模具材料的强度是模具在工作过程中抵抗失效的性能。模具在工作中承受很大载荷，因此模具材料应满足高强度和较好韧性的要求。一直处于高温下工作的模具需承受较大的摩擦、氧化及腐蚀等作用，因此要求模具材料还应具有较高的耐热性、耐蚀性、耐磨性和导热性等。

（3）良好的抗热性和稳定性 考虑到模具在工作时经常受到高温作用，其工作温度也是在不断地变化，因此要求模具材料应具有良好的抗热性，以确保其强度和硬度能够满足工作条件的需要。

(4) 冷热加工性好 对于需要锻轧、铸造及焊接等热加工的模具,要求其具有良好的热加工性;而要求生产高质量表面产品的模具,其还需经常进行切削、抛光和研磨等加工,因此模具材料在常温下应具有良好的加工性能。这也是塑料模具材料的发展趋势。

(5) 热处理性能好 模具要具有热处理变形小、淬火温度范围宽、过热敏感性小、脱碳倾向小等特点,因此要求模具材料应具有足够的淬硬性和淬透性以及良好的组织稳定性。

1.2.1 使用性能要求

模具材料的使用性能主要包括硬度和热硬性、耐磨性、强度和韧性、耐热性、耐蚀性等。此外,根据各种工作条件的不同,模具的使用性能还应包括高温强度、热疲劳及导热性等。对模具的使用性能具体要求如下:

(1) 硬度和热硬性 模具在压力的作用下应能保持其形状和尺寸不会迅速发生变化,故经过热处理后的模具材料应具有一定的硬度,如冷作模具的硬度为 55 ~ 65HRC,热作模具的硬度为 35 ~ 55HRC,塑料模具的硬度为 45 ~ 60HRC,胶木模的硬度为 45 ~ 55HRC,陶土模的硬度为 50 ~ 62HRC,橡胶模的硬度为 28 ~ 35HRC,粉末冶金模的硬度为 60 ~ 62HRC,玻璃模具的硬度为 45 ~ 55HRC。

热硬性是指模具在受热或高温工作条件下保持组织和性能稳定及抗软化的能力,它是热作模具钢的重要性能指标之一。

(2) 耐磨性 模具在工作中需承受相当大的压力和摩擦力,如果使其在使用中保持尺寸及形状不变,持久耐用,则模具材料应具有良好的耐磨性。模具的耐磨性不仅取决于钢的成分、组织和性能,而且与工作温度、载荷(压力)状态和润滑条件等有较大的关系。

(3) 强度和韧性 模具在工作中需承受冲击、振动、扭转和弯曲等复杂应力。承受重载荷的模具如果强度不够、韧性不足,就会造成模具边缘或局部断裂,以致模具不能再继续使用。钢的晶粒度和钢中碳化物的数量、大小及分布情况以及残留奥氏体量等对钢的强度和韧性有很大的影响。高硬度材料韧性差、表面缺口敏感性大及承载能力差等是模具早期失效的重要原因。实践表明,根据模具的使用条件和性能要求,合理地选择模具钢的化学成分、组织状态及热处理工艺,能够得到强度和韧性的最佳组合。

(4) 耐热性 模具随使用时间的增加,其温度会逐渐升高,因此要求模具材料具有一定的耐热性,尤其是热作模具(耐热性是其主要性能之一)。模具随温度升高而硬度降低的程度受钢中合金元素及其含量的影响。因为 Mo、Cr、Co 等合金元素能够防止模具钢回火软化,所以热作模具常选用含有 Mo、Cr、Co 等元素的钢种来制作。

(5) 耐蚀性 部分塑料模和压铸模在工作时受到被加工材料的腐蚀,会导致

型腔表面磨损，所以这类模具材料应具有耐蚀性。合金化或进行表面处理是提高模具钢耐蚀性的主要方法。

1.2.2 工艺性能要求

在模具（特别是小型精密复杂模具）的总成本中，模具材料费用通常只占总成本的 10% ~20%，而机械加工、热加工、表面处理、装配和管理等费用则占总成本的 80% 以上。因此，模具材料的加工工艺性能是影响模具成本、保证模具具有良好的使用性能及提高模具质量和使用寿命的一个重要因素。对模具加工工艺性能的要求如下：

（1）加工性 材料的加工性是指锻造、轧制、铸造等热加工性能以及切削、磨削、抛光等冷加工性能。对需要很高的表面质量和高的抛光性能的模具，要求模具钢应具有杂质少、组织均匀、无纤维方向等特性。模具钢的加工性能主要与其化学成分、冶金质量和组织状态等有关。

（2）热处理变形和开裂 对模具最终热处理的要求是，模具的尺寸与形状变化越小越好，同时没有开裂倾向。模具的热处理变形和开裂主要与模具材料成分、原始组织状态、模具结构及热处理工艺等有关。

（3）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和淬火前的组织状态。模具钢对淬硬性和淬透性的要求，因模具的使用条件不同而各有侧重。对于大部分要求高硬度的冷作模具，淬硬性要求较高；对于大部分热作模具和塑料模具，对硬度的要求不太高，往往更多地考虑其淬透性，尤其是一些大截面、深型腔模具。

（4）脱碳敏感性 模具表面脱碳，将会使模具表面层的性能降低，故要求模具钢的脱碳敏感性越低越好。在相同的加热条件下，钢的脱碳敏感性主要取决于钢的化学成分，特别是碳含量。

（5）表面抛光性能 对表面质量要求高的模具（如塑料模具型腔），要求模具钢应具有良好的抛光性能。通常采用机械、化学和电化学抛光等方式提高模具的表面质量。

1.2.3 典型模具的材料性能要求

典型模具主要包括冲模、塑料模、锻模、压铸模和粉末冶金模等。各种模具的工作条件不同，对制造模具材料的性能要求也不同。典型模具的工作条件及材料性能要求见表 1-4。

表 1-4 典型模具的工作条件及材料性能要求

模 具 种 类		工 作 条 件	对模具材料的性能要求
冲模	冲裁模	主要用于各种板料的冲切成形。其刃口在工作过程中受到强烈的摩擦和冲击	具有高的耐磨性、冲击韧性以及耐疲劳断裂性能

(续)

模 具 种 类		工 作 条 件	对模具材料的性能要求
冲模	挤压模	主要用于变形成形。工作时凸模(冲头)承受巨大的压力,凹模则承受巨大的张力;由于金属在型腔中剧烈流动,使凸模(冲头)和凹模工作面受到强烈的摩擦,并使模具表面温度升至200~300℃	具有高的变形抗力、耐磨性及断裂抗力。此外还应具有高的耐回火性
	拉深模	主要用于塑性板料的拉深成形。工作时应力不大,但凹模承受强烈的摩擦	具有高的硬度及耐磨性,以及较低的表面粗糙度值
	弯曲模	主要用于塑性金属材料的弯曲成形。作用于模具的负荷不很大,但工作面承受一定的摩擦	具有高的耐磨性和断裂抗力
塑料模	热固性塑料压模	受力大,工作温度较高(200~250℃),易侵蚀,易磨损,手工操作时还会受到脱模的冲击和碰撞	具有较高的强韧性、耐磨性以及冷热疲劳抗力,有一定的耐蚀性
	热塑性塑料注射模	受热、受压及摩擦不太严重,但部分塑料制品含有氯及氟,在压制时会释放出腐蚀性的气体,侵蚀型腔表面	具有较高的耐蚀性及一定的耐磨性和强韧性
压铸模		型腔的工作温度高,经受反复剧烈的温度变化	具有高的热强性及冷热疲劳抗力
锻模		模具工作温度较高(约300℃)并受到强烈的冲击载荷,坯料在变形过程中与型腔表面摩擦	具有高的强韧性、冷热疲劳抗力,以及高的淬透性,良好的耐回火性
粉末冶金模		金属粉末的硬度一般很高,模具在工作过程中受到强烈的摩擦。此外,金属粉末粒度很小,容易堵塞缝隙,加大摩擦力,造成脱模困难	具有高的硬度和耐磨性以及较低的表面粗糙度值

1.3 模具材料的主要力学性能指标

模具的使用寿命与所采用的模具材料及其力学性能密切相关，因此应根据模具的工作条件和性能要求，合理地选择模具材料并对其进行冷、热加工。

1.3.1 模具材料的常规力学性能

模具材料的性能是由其化学成分和热处理后的组织所决定的。模具材料的性能应该满足模具完成额定工作量的要求。根据模具的工作条件及工作定额来选择模具材料及其热处理工艺，并力求主要性能达到指标，是模具设计者必须考虑的问题。通常对各类模具材料提出的性能要求主要包括硬度、强度、塑性和韧性等。它们是衡量模具材料的基本参数，对模具材料的正确使用有着重要的参考价值。

(1) 硬度 硬度是衡量材料软硬程度的一种性能指标,是材料抵抗硬物压入其表面的能力,其实质是材料表面在接触应力作用下对局部塑性变形的抗力。硬度可以综合反映材料的力学性能(如强度、塑性、弹性、耐磨性等),它是材料的主要性能指标之一。硬度是影响耐磨性的主要因素,一般模具的硬度越高,磨损量越小,耐磨性就越好。硬度的试验方法很多,基本上可以分为压入法(布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度)和回跳法(如肖氏硬度)等几种。常用的金属硬度试验方法有如下几种:

1) 布氏硬度。常用于金属原材料和毛坯的硬度检验,也可以应用于热处理后半成品的硬度检查。

2) 洛氏硬度。主要用于热处理后各类金属产品的硬度检验。

3) 维氏硬度。大多用于薄工件或零件表面的硬度测定和较精确的硬度测量,其硬度测量范围较宽。

模具钢硬度主要取决于化学成分和显微组织。钢淬火后的硬度取决于马氏体的碳含量,而合金元素对其影响不大。常用的硬度测量方法如表 1-5 所示。

表 1-5 常用的硬度测量方法

硬度种类	硬度符号	适用范围
洛氏硬度	HRC	淬火、淬火+回火
布氏硬度	HBW	退火、正火、调质
维氏硬度	HV	各种金属材料的显微硬度

(2) 强度 强度是表征材料变形抗力和断裂抗力的性能指标,对于模具来说则是整个截面或某个部位在工作过程中抵抗拉伸力、压缩力、弯曲力、扭转力或综合力的能力。

衡量钢材强度常用的方法是进行拉伸试验。对于模具钢,特别是碳含量高的冷作模具钢,因塑性很差,一般不用抗拉强度(R_m)而是以抗弯强度(σ_{bb})来作为实用指标。弯曲试验甚至对极脆的材料也能反映出一定的塑性,而且弯曲试验产生的应力状态与许多模具工作表面产生的应力状态很相似,能够比较准确地反映出材料的成分及组织因素对性能的影响。

屈服强度(R_{eH} 和 R_{eL})是衡量模具钢塑性变形抗力的指标,也是最常用的强度指标。对模具材料要求具有高的屈服强度,如果模具产生塑性变形,则模具加工出来的零件尺寸和形状将会发生变化,容易产生废品。冷作模具材料塑性变形抗力的指标主要是指常温下的屈服强度(R_{eH} 和 R_{eL})。压缩条件下变形的冷作模具,则以抗压强度(R_{mc})和屈服强度(R_{eH} 和 R_{eL})作为衡量指标;热作模具材料塑性变形抗力的指标则为高温屈服强度。为了确保模具在使用过程中不会发生过量塑性变形失效,模具材料的屈服强度必须大于模具的工作应力。热作模具的工作对象是高温软化状况的坯料,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有足够的高温强度。

冷作模具材料的断裂抗力指标是室温下的抗拉强度 (R_m)、抗压强度 (R_{mc}) 和抗弯强度 (σ_{bb}) 等, 它反映了模具表面或内部不存在任何裂纹时的静载断裂能力。在考虑热作模具的断裂抗力时, 还应包括断裂韧度 (K_{IC}) 的因素。

影响强度的因素很多, 如钢的碳含量、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, 内应力状况等都对强度有显著影响。

(3) 塑性 塑性是一种在某种给定载荷下, 材料产生永久变形的特性。衡量模具材料塑性好坏, 通常采用断后伸长率 (A) 和断面收缩率 (Z) 两个指标。通常模具钢的塑性较差, 尤其是冷变形模具钢, 在很小的塑性变形时就会发生脆断。

断后伸长率 (A) 是指拉伸试样拉断后, 断后标距的残余伸长与原始标距之比的百分率。断后伸长率数值越大, 表明钢材塑性越好。热作模具钢的塑性明显高于冷作模具钢。

断面收缩率 (Z) 是指拉伸试样经拉伸变形和拉断后, 断面部分截面的缩小量与原始截面之比。塑性材料拉断后有明显的缩颈, 所以 Z 值较大。脆性材料拉断后几乎没有缩小, 即没有缩颈产生, Z 值很小, 说明塑性较差。

(4) 韧性 韧性是材料在冲击载荷作用下抵抗产生裂纹的一个特性, 它反映了模具的脆断抗力。

对于受到强烈冲击载荷的模具, 如冷作模具的冲头、热锻模具、冷镦模具、热镦模具等, 模具材料的韧性是十分重要的考虑因素, 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, 热疲劳强度越高。

模具材料的化学成分, 晶粒度, 碳化物, 夹杂物的组成、数量、形貌、尺寸和分布情况, 金相组织以及微观偏析等会对材料的韧性带来影响。通常晶粒粗大、碳化物偏析严重 (带状、网状等)、马氏体组织粗大等都会促使钢材变脆。温度不同, 冲击韧度也不相同, 一般是温度越高, 冲击韧度值越高。有的钢材常温下韧性很好, 当温度下降到 $-20 \sim -40^\circ\text{C}$ 时会变脆。

1.3.2 模具材料的特殊力学性能

由于模具种类繁多, 不同的模具工作条件差别很大, 因此除了测定材料的常规性能外, 还必须根据所模拟的实际工况条件, 对模具使用特性进行测量, 并对模具的特殊性能提出要求。

1. 冷作模具的特殊力学性能

冷作模具是在常温下工作的, 因此模具材料必须要满足其在室温下的硬度、强度和冲击韧性等性能要求, 其中硬度是非常重要的指标。除此之外, 此类模具材料还应具有以下性能:

(1) 耐磨性 耐磨性是指材料的抗磨损能力。模具在工作过程中, 成形坯料或零件会沿着模具表面滑动及流动, 使模具受到切应力的作用。同时, 坯料或零件与模具表面之间会产生很大的摩擦力, 导致模具表面出现凹凸痕迹, 最终造成机械

损伤（即磨损），故冷作模具多以磨损的形式失效。因此，制作冷作模具的材料应具有良好的耐磨性。一般而言，模具的硬度越高，其耐磨性就越好。需要注意的是，耐磨性与模具材料在软基体上存在的硬质点的形状、分布也有关系。

冷作模具的磨损通常分为磨粒磨损、粘着磨损、腐蚀磨损及疲劳磨损等。耐磨性不仅与材料的强度、韧性及硬度有关，还与钢中的碳化物数量、大小及分布有关。一般来说，强度或硬度及韧性越高，材料内部的碳化物越细小、分布越均匀，则材料的耐磨性越好。

改善模具材料的耐磨性，可以通过采取合理的热处理工艺等措施，使模具材料既具有高硬度又使材料中的碳化物等硬化相的组成、形貌及分布合理。当然在模具工作过程中良好的润滑和模具材料的表面强化处理也对改善模具的耐磨性有良好的作用。

（2）断裂抗力 小能量多次冲击更符合冷作模具的实际使用状态，因此除了常规力学性能（如冲击韧度、抗压强度、抗弯强度等一次性断裂抗力指标）外，模具材料的抗压疲劳强度和接触疲劳强度等性能也很重要。这种疲劳断裂抗力指标是由在一定循环应力作用下测定的断裂循环次数或者在一定的循环次数下导致材料断裂的载荷来表征的。

（3）抗咬合能力和抗软化能力 此二者分别表征了模具对发生的“冷焊”及承载时因温度升高对硬度、耐磨性降低的抵抗能力。

2. 热作模具的特殊力学性能

对热作模具必须测试在高温条件下的硬度、强度和冲击韧度。由于热作模具是在某一特定的温度下工作，而在室温下测定的性能数据当温度升高时要发生变化，因此对热作模具除了要求其在室温及高温条件下的硬度、强度和韧性外，还要求具有某些特殊性能。热作模具对加热到高温的固体或液体材料进行加工时升温更高，如锤锻模可达 $500 \sim 600^{\circ}\text{C}$ ，热挤压模可达 $800 \sim 850^{\circ}\text{C}$ ，压铸模可达 $300 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 。由于经常受到高温作用，故要求模具材料应有一定的抗热性能。

（1）热稳定性和耐热性 热稳定性是指（模具）钢在高温下保持其组织、性能稳定的能力，一般采用回火保温 4h，硬度降低到 45HRC 时最高的加热温度来表示。热作模具因耐热性不足而造成型腔堆积塌陷是其失效形式之一。根据热作模具的热稳定性，可以预测其使用寿命水平。

对于在高温下工作的热作模具，其热稳定性是很重要的指标。因此，选择高温下工作的模具材料，要考虑其在高温下的稳定性，既要求材料具有较高的强度、韧性和足够的硬度，还要求其回火马氏体组织具有较高的低温回火温度。

热作模具、部分成形模具或冷作模具等，因为工作温度较高，常温下各种强化作用的介稳组织要转变为稳定的组织，这将导致模具材料的强度、硬度等力学性能指标的下降。因此，保证耐热性的关键是模具材料的组织具有较好的热稳定性。材料的热稳定性通常以 $600 \sim 700^{\circ}\text{C}$ 时的屈服强度来表示，它与钢的耐回火性有关。

加入某些合金元素提高钢的再结晶温度、增加钢中基体组织和碳化物的稳定性，均可以提高钢的耐热性。

(2) 热疲劳抗力与断裂韧度 热疲劳抗力表征了材料热疲劳裂纹萌生前的工作寿命和裂纹萌生后的扩展速度，它是根据在 20 ~ 750℃ 条件下反复加热冷却时所产生裂纹的循环次数或循环一定次数后测量裂纹的长度来确定的。热作模具工作时承受机械冲击和热冲击的交变应力作用，受应力和温度梯度的影响，往往在模具型腔表面会形成浅而细的裂纹。材料热疲劳抗力高则不易产生热疲劳裂纹，或裂纹萌生后扩展量小、扩展缓慢。断裂韧度 (K_{IC}) 表征了裂纹失稳扩展抗力。断裂韧度高则表明不易发生裂纹失稳扩展。

影响热疲劳抗力的因素是钢的化学成分及组织的不均匀性，如钢中化学成分不均匀或存在非金属夹杂物、气孔、显微裂纹等均可导致钢的热疲劳抗力的降低，其原因就是在交变应力的作用下，存在缺陷的位置容易产生疲劳裂纹并发展为疲劳破坏。

(3) 耐回火性 淬火钢在回火时抵抗软化（强度、硬度下降）的能力称为耐回火性。它通常以钢的回火温度与硬度的关系曲线来表示。硬度下降慢则表示钢的耐回火性高或回火抗力大。需要注意的是，耐回火性与钢在回火后的组织变化有关。钢在高温下组织稳定的程度体现了模具在高温下的变形抗力。

(4) 抗高温磨损性与抗氧化性 高温磨损是热作模具的主要失效形式之一，如锤锻模和压力机用锻模一般都是因高温磨损而失效的。因此，热作模具钢应具有良好的抗高温磨损性。该性能是材料多种高温力学性能的综合体现。

抗氧化性对模具材料的使用寿命有很大的影响。如果材料的抗氧化性不好，不仅会加剧模具型腔的磨损，导致型腔尺寸超差而报废，而且还会在型腔表面产生腐蚀沟槽，进而转变成热疲劳裂纹源，加剧模具热疲劳裂纹的萌生与扩展。因此，要求热作模具应具备一定的抗氧化性。

3. 塑料模具的特殊性能

(1) 耐蚀性 耐蚀性是指模具材料抵抗周围介质腐蚀的能力。部分塑料模具和压铸模在工作时受到被加工材料的腐蚀，会加剧型腔表面的磨损。腐蚀形式根据其腐蚀程度大体分为两类，即均匀腐蚀与局部腐蚀。塑料多为热固性或含有固体的填料，在用模具成型时，由于交联反应会释放出腐蚀性的化学气体。因此，塑料模具材料应具有高的耐蚀性。模具表面进行合金化或表面处理（如渗氮）是提高模具钢耐蚀性的主要方法。

(2) 导热性 塑料模具应具有良好的导热性，以使塑料制品能够尽快在模具中冷却成型。通常导热性与模具材料的成分有关。

(3) 尺寸稳定性 模具的尺寸稳定性对确保塑料制品的尺寸与精度非常关键，因此除了要求模具有足够的刚性外，还要求其具有较低的线胀系数和低的组织应力。

1.4 模具选材的基本原则及常用模具材料

模具的选材必须考虑其形状、尺寸等结构因素，并根据模具生产条件和模具工作条件的需要，结合模具材料的性能（使用性能和工艺性能）要求、主要力学性能（常规及特殊力学性能）指标及热处理特性等，选择适合模具需要、经济上合理、来源方便、技术上先进的模具材料。生产实践表明，合理地选用材料不仅可以显著提高模具的使用寿命，而且可以降低模具的制造成本。

1.4.1 选材的基本原则

选用钢材的原则是满足模具使用性能，发挥材料潜力，经济合理，主要应考虑以下几点：

- （1）满足使用性能要求 根据模具使用要求，提出模具材料的性能指标（硬度、强度、韧性、耐磨性等），以满足生产需要。
- （2）满足工艺性能要求 模具的制造一般都要经过锻造、机械加工、热处理等几道工序。为保证模具的制造质量，降低生产成本，其材料应具有良好的可锻性、切削加工性、淬硬性和淬透性等，还应具有小的氧化、脱碳敏感性和淬火变形开裂倾向。
- （3）满足经济性原则 应根据模具要求，综合考虑并优选经济、合理的模具材料和加工工艺，即在满足性能、使用寿命要求等前提下，尽可能采用价格低的材料，以降低模具成本。
- （4）材料来源方便 模具材料应尽可能选择在当地能得到的优质钢材，品种及规格应少而集中，以便采购管理。

1.4.2 常用模具材料

- （1）常用冷作模具钢 常用冷作模具钢见表 1-6。

表 1-6 常用冷作模具钢

模 具 类 型	推 荐 钢 种	主 要 用 途
碳素工具钢	T7A、T8A、T10A、T12A、T13A	尺寸小、形状简单、轻负荷的模具
低合金工具钢	9Mn2V、9SiCr、Cr2、CrWMn、9CrWMn、7CrSiMnMoV	形状复杂、轻负荷的模具
中合金或高合金工具钢	Cr4W2MoV、Cr15Mo1V、Cr12、Cr12MoV、Cr12Mo1V1	尺寸大、形状复杂、重负荷的模具
高速工具钢、硬质合金等	W6Mo5Cr4V2、YG8、YG10H、YG25 等	尺寸精度要求高、寿命长的模具

(2) 常用热作模具钢 常用热作模具钢见表 1-7。

表 1-7 常用热作模具钢

模 具 类 型		推 荐 使 用 钢 种
大截面热锻模	锤锻模、压力机锻模	4Cr2NiMoVSi、3Cr2MoWVN _i 、5Cr2NiMoVSi、3Cr2MoVN _i 、 5CrMnSiMoV、5CrNiMo
中、小机锻模	工作温度 600℃ 左右	4Cr5MoSiV1、3Cr3Mo3VNb、4Cr5W2VSi、4Cr5MoSiV、 4Cr3Mo2MnVB、4Cr5Mo2MnVSi
	工作温度 650℃ 左右	3Cr3Mo3W2V、5Cr4W5Mo2V、4Cr3Mo2MnVB、4Cr3Mo2NiVNB _b 、 3Cr3Mo3VNb、4Cr3Mo2MnVB、3Cr3Mo3W2V、4Cr3Mo3W4VNb
热挤压模	铝型材挤压模	4Cr5MoSiV1、3Cr3Mo3VNb、4Cr3Mo2MnVB、4Cr5MoSiV
	铜型材挤压模	4Cr3Mo2NiVNB _b 、4Cr3Mo2MnVNB _b 、4Cr3Mo2MnVB、3Cr2W8V
压铸模	铝合金压铸模	4Cr3Mo2MnVB、4Cr5Mo2MnVSi、3Cr3Mo3VNb
	铜合金压铸模	4Cr3Mo2MnVNB _b 、4Cr3Mo2NiVNB _b 、4Cr3Mo2MnVB

(3) 常用塑料模具钢 常用塑料模具材料见表 1-8。

表 1-8 常用塑料模具材料

工 作 条 件	推 荐 材 料
小批量、低精度、小尺寸模具	SM45、SM55 或 10、20 钢渗碳、40Cr、低熔点合金、锌基合金等
较大载荷、较大批量的模具	20Cr、12CrNi3A(渗碳)
大型、复杂大批量的注射模和挤压成型模	SM3Cr2NiMnMo、SM3Cr2Mo、5CrNiMo、5CrMnMo
热固性塑料模和高耐磨的注射模等	T10A、T12A、9Mn2V、CrWMn、9SiCr、MnCrWV、 Cr2、GCr15、8Cr2MnWMoVS、Cr12、Cr12MoV 等
耐腐蚀高精度模具	SM2Cr13、SM4Cr13、90Cr18MoV、12Cr18Ni9
复杂、精密、高耐磨模具	5CrNiMnMoVSCa、8Cr2MnWMoVS、4Cr5MoSiVS、 06Ni6CrMoVTiAl、25CrNi3MoAl、18Ni(250)、18Ni(300)、18Ni(350)

第 2 章 模具材料与热处理

热处理是利用加热、保温、冷却等工艺措施，促使金属表面或内部组织发生变化，从而使钢材具有所需的强度、硬度等各种力学性能的工艺过程。通常所说的模具热处理实际上是指模具零件（模具的工作部分或成形部分，如冲头、凸模、凹模、型腔及刀片等）的热处理。模具零件热处理通常是在模具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，设备要求精良。模具零件热处理工艺涉及其材料、形状结构、尺寸大小、重量、精度，以及热处理技术要求等许多因素，工艺千变万化。

模具热处理主要分为预备热处理、最终热处理，以及表面强化处理。模具热处理的种类如图 2-1 所示。

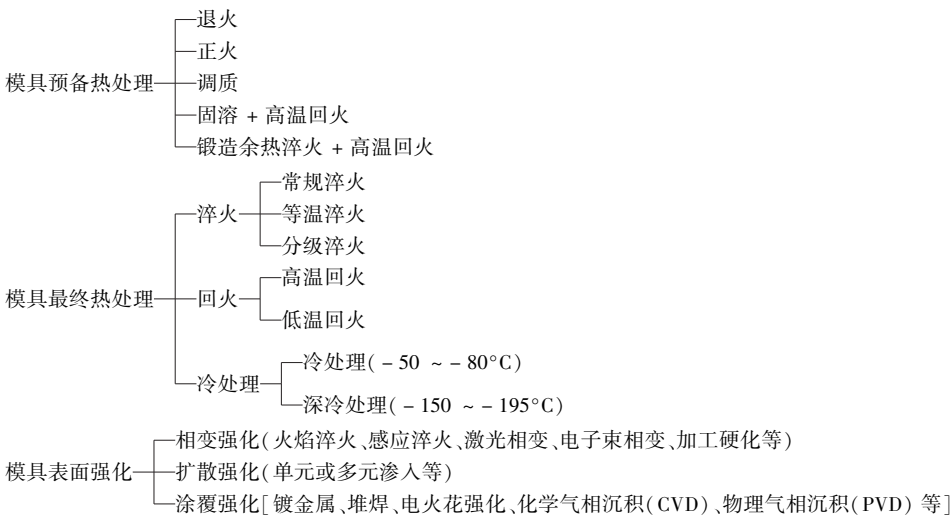


图 2-1 模具热处理的种类

2.1 模具的常规热处理条件

众所周知，即使模具材料采用高级钢材，如果热处理不当，其特性也不能完全发挥。为了减少淬火变形和预防淬火裂纹，增加韧性，对于模具用钢一定要进行球化退火预备热处理。为了提高模具的使用寿命，应根据模具的使用要求来确定各种模具用钢的淬火和回火的条件。模具钢的常规热处理主要包括退火、正火、调质、淬火及回火等。

2.1.1 模具钢退火的种类

模具钢经锻造后，内部组织分布不均匀，晶粒较粗大，并且存在着内应力及较高的硬度，以致机械加工困难。为了消除锻造毛坯中的应力和不良组织，改善切削加工性能，细化晶粒，以及为了给后续热处理作好组织准备，锻造后的模具钢应进行退火处理。退火按加热温度可分为两大类：一是临界温度（ Ac_1 或 Ac_3 ）以上的退火，包括完全退火、不完全退火、等温退火及球化退火等；二是临界温度以下的退火，包括软化退火、再结晶退火及去应力退火等。

表 2-1 列出了模具用钢退火的目的和种类。表 2-1 中与模具密切相关的退火是完全退火、球化退火和去应力退火。通常模具用钢必须进行球化退火。此外，为了减小模具的淬火变形，还必须进行去应力退火。表 2-1 中圆括号中的正火与退火不同，正火适用于碳含量在 0.6%（质量分数）以下的机械结构用钢。

表 2-1 模具用钢退火的目的和种类

退 火 目 的	钢种或零件	退 火 种 类
软化	全部模具用钢	完全退火、去应力退火
	铸铁	石墨化退火
改善切削性	低、中碳素结构钢	（正火），完全退火
	模具钢	球化退火
改善力学性能	全部结构钢	（正火）
改善塑性加工性能	全部结构钢	去应力退火、球化退火
改善韧性	低碳结构钢	去应力退火
	中碳低合金结构钢、工具钢	球化退火
组织均匀化	钢锭、铸件	扩散退火
淬火前处理	碳素钢、低合金钢	（正火），去应力退火
消除内应力	铸钢、锻件	完全退火
	冷作件、焊接件、铸件	去应力退火
改善磁性	纯铁、硅钢	去应力退火、完全退火
改善弹性	全部弹簧	去应力退火

2.1.2 模具的完全退火

模具用钢经锻造加工后，如果不进行任何热处理，则其组织分布不均匀，内部残余应力很大。为了改善材料的力学性能，应对其进行完全退火。完全退火的加热温度是保证能够得到均匀奥氏体的温度，通常比亚共析钢的 Ac_3 或过共析钢的 Ac_{cm} 要高 30 ~ 50℃。对于模具钢或高速工具钢，完全退火温度为 850℃ 左右。加热保温时间根据模具毛坯的壁厚来定，当壁厚为 25mm 时，加热保温时间为 40min 左右。

但对于高合金钢，其加热保温时间则为上述保温时间的 1.5 倍。完全退火多用于中碳钢和中低碳合金结构钢锻件、铸件等。模具钢完全退火的目的是细化晶粒、消除内应力和过热组织、降低硬度、便于切削加工及为后续的热处理作好组织准备。

表 2-2 列出了主要模具用钢的完全退火温度和退火后的硬度。完全退火后钢的硬度最低。但是，钢中的合金元素 C、Cr、Mo 等含量越多，相应的硬度也越高。

表 2-2 主要模具用钢的完全退火温度和退火后的硬度

分 类	钢 种	退火温度/℃	硬度 HBW
碳素工具钢	T8、T10	730 ~ 760	—
高速工具钢	W18Cr4V	820 ~ 880	≤248
	W6Mo5Cr4V2	800 ~ 880	≤255
合金工具钢	CrW5、MnCrWV	750 ~ 800	≤217
	Cr12MoV	830 ~ 880	≤255
马氏体系列不锈钢	30Cr13	800 ~ 900	≤235

完全退火的冷却方式通常是将工件随炉冷至 500 ~ 600℃ 的温度范围等到相变结束之后出炉，然后在空气中冷却，尤其是模具钢（包括高速工具钢）等自硬性强的钢种必须缓慢冷却才行。所以，模具用钢的完全退火时间很长。

2.1.3 模具的等温退火

等温退火是将钢加热到 A_{c3} 以上 30 ~ 50℃（亚共析钢）或 $A_{c1} \sim A_{cm}$ 之间（过共析钢）的温度，待奥氏体转变完成并且组织基本均匀后，较快地冷却到 A_{r1} 以下 10 ~ 30℃，等温保持足够时间以使珠光体转变完毕，然后出炉空冷（或油冷、水冷）的工艺过程。

中碳钢及合金结构钢进行等温退火可以得到比完全退火更为均匀的组织与性能，同时还能够有效地消除锻造应力，而工艺周期则比完全退火缩短大约一半。等温退火时的加热温度、等温温度及保温时间应根据奥氏体等温转变图、模具性能要求及其截面尺寸等条件经试验确定。

2.1.4 模具的球化退火

碳素工具钢或低合金工具钢在进行完全退火时将产生许多片状 Fe_3C ，这不但容易引起淬火裂纹和变形，而且淬火回火后的力学性能（如韧性）也将变坏。为了克服上述缺点，对这些钢种必须进行球化退火，以得到在铁素体基体上均匀分布的球状或颗粒状碳化物的组织。球化退火组织对最终热处理后的强韧性、变形及开裂倾向、耐磨性、断裂韧度有显著的影响。如果球化不良，因混有片状的 Fe_3C ，会导致力学性能变差。球化退火的目的是获得满意的机械加工性能，并作好淬火前的组织准备。

球化退火的方法有以下几种：①将工件加热到比 A_{c1} 相变温度（碳素工具钢为 727°C ）稍微高一点的温度后再缓慢冷却；②在比 A_{c1} 相变温度低 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 的温度长时间加热；③在 A_{c1} 相变温度的上下 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 之间反复加热和冷却；④经过淬火或正火后，在 700°C 高温下进行回火；⑤迅速加热到 A_{c1} 相变温度后，冷却到 $680 \sim 700^{\circ}\text{C}$ 后进行保温。

第⑤种处理方法又称等温退火，是前述的等温转变图的应用。这种方法用于工具钢中，不仅处理时间短，而且球化率特别高。

2.1.5 模具的去应力退火

去应力退火是将钢加热到略低于 A_{c1} 的温度，保温一定时间，然后缓慢冷却的热处理工艺。去应力退火的目的是消除或降低钢中的内应力，降低硬度，从而改善切削加工性能。对于模具来说，主要是消除由于机械加工所产生的残余应力。例如，经过精密磨削的模具钢的表面残余应力为 $500 \sim 1\,000\text{MPa}$ ，如果对此应力不进行消除处理，则淬火时将产生淬火变形或淬火裂纹。因此，高精度的模具在淬火之前必须进行去应力退火处理。对于高合金钢，其加热温度应高于 600°C ；对于不锈钢，加热温度为 $700 \sim 800^{\circ}\text{C}$ 。如果是奥氏体系列的不锈钢，则需加热到 850°C 以上。

在去应力退火时，如果把加热温度选择在钢的再结晶温度以上，则消除残余应力的效果会更好。碳素钢的再结晶温度一般在 550°C 左右。一般来说，钢中的残余应力越大，再结晶温度越低；合金元素含量越多，再结晶温度越高。另外，高合金钢的低温退火温度比碳素钢高一些。

去应力退火可消除模具淬火或精加工前的残余应力，还可避免高速工具钢返修淬火时出现蔡状断口。其工艺规范见表 2-3。

表 2-3 去应力退火工艺规范

钢 种	工 艺 规 范
碳素工具钢及低合金工具钢	加热至 $630 \sim 650^{\circ}\text{C}$ ，保温 $1 \sim 2\text{h}$
高合金工具钢	加热至 $680 \sim 700^{\circ}\text{C}$ ，保温 $1 \sim 3\text{h}$

去应力退火多用于复杂模具在锻造、铸造、焊接及电火花线切割等加工工序后，消除加工过程中产生的内应力，以减小模具的变形和稳定组织，以及减少模具淬火开裂倾向。

2.1.6 模具正火的目的及方法

模具材料的正火是将亚共析钢加热到 $A_{c3} + (30 \sim 50^{\circ}\text{C})$ 、共析钢和过共析钢加热到 $A_{c_{cm}} + (30 \sim 50^{\circ}\text{C})$ ，保温一定时间后在空气中冷却，得到珠光体型组织的热处理工艺。

模具钢正火的目的如下：

1) 作为低碳钢或渗碳模具钢的预备热处理。通过正火可细化晶粒，得到较细的片状珠光体，改善模具钢的切削加工性。对于高合金渗碳钢，正火后再进行高温回火，可以降低钢材的基体硬度，利于机械加工。

2) 改善中碳钢、碳素工具钢和合金工具钢的不良组织。主要是消除残余网状碳化物，细化粗大不均匀的片状及球状珠光体。正火作为球化退火前的工序，可加速及改善球化过程。正火用于大中型热锻模块（厚度 300 ~ 500mm），可细化锻造组织，提高强韧性，比退火效果更佳。

对于过共析钢的冷作模具钢，在热轧或锻造后的组织为片状珠光体 + 网状碳化物，若直接进行加热淬火，则组织中的网状碳化物不可能消除，仍将沿晶界呈断续或连续分布，且模具存在极大的脆性，在使用过程中容易崩刃、脆断或断裂等。同时在晶界碳化物的附近，因碳及合金元素富集，浓度高于晶界内部，直接淬火后会因组织应力而引起变形，甚至可能引起开裂，故淬火前的原始组织存在网状碳化物时必须进行正火处理。

对于存在带状组织的模具钢，考虑到容易产生切削裂纹的问题，采用正火好于退火处理。而对于高碳高合金模具钢，因一次碳化物不容易在奥氏体中固溶，因此正火效果很差，不宜采用此工艺。对于存在带状组织的模具钢则在 $Ar_3 \sim Ar_1$ 之间应加快冷却速度。

表 2-4 为模具钢改善组织缺陷的正火规范与作用。

表 2-4 模具钢改善组织缺陷的正火规范与作用

牌 号	$A_{c_{cm}}, A_{c_3}/^{\circ}C$	正火温度/ $^{\circ}C$	硬度 HBW	作 用
T7A	770	800 ~ 820	229 ~ 285	促进球化,改善硬度小于 165HBW 毛坯的切削性能
T8A	740		241 ~ 302	
T10A	800	830 ~ 850	255 ~ 321	加速球化或提高淬硬性,消除网状碳化物
T12A	820	850 ~ 870	269 ~ 341	
Cr2	900	900 ~ 920	302 ~ 388	消除网状及粗片状碳化物,提高淬硬性
9CrWMn		880 ~ 900		
9SiCr	870	900 ~ 920	321 ~ 415	消除网状及粗片状碳化物
CrWMn	940	950 ~ 970	388 ~ 514	消除网状碳化物
9Mn2	860	860 ~ 880	—	消除网状及带状碳化物
9Mn2V				
CrW5	1 160	880 ~ 900	363 ~ 477	细化组织,提高淬硬性
5CrMnMo	760	870 ~ 890 + 680 高温回火	≤ 227	细化组织,改善力学性能
5CrNiMo	770			
45	770	850 ~ 870	170 ~ 217	改善硬度小于 160HBW 的毛坯的切削加工性能
40Cr	780		179 ~ 229	

2.1.7 模具调质的目的及方法

调质处理的目的是获得硬度为 180 ~ 320HBW 的细珠光体和超细碳化物, 消除网状碳化物、带状碳化物及加工后的残余应力, 改善组织, 便于机械加工, 防止淬火开裂和减小淬火变形, 并最终提高模具的力学性能。

调质处理可以作为预备热处理, 对于细化晶粒、提高基体强度、减小模具的淬火变形及化学热处理变形都有很大益处。其优点如下:

1) 改善模具的表面加工质量。碳素工具钢或低合金工具钢采用球化退火或等温退火后硬度过低, 硬度大多在 180HBW 以下, 加工后工件的表面粗糙度值高。调质处理后可使其硬度控制在 190 ~ 241HBW, 获得的组织为细的珠光体, 从而明显改善模具表面的加工质量。对 45 钢、40Cr 等中碳钢, 调质后的硬度为 260 ~ 300HBW, 经精加工可获得低的表面粗糙度值。

2) 提高预硬化模块的强化处理效果。压铸模、热挤压模和热锻模等在进行表面渗氮或氮碳共渗前, 其基体应经过调质处理 (即进行预硬化处理), 调质处理后再进行精密加工。

3) 减少模具变形, 防止淬火开裂。调质处理可以显著减少最终热处理后的体积膨胀量和线尺寸膨胀量 30% ~ 50%; 可降低最终热处理后的各向异性程度, 将纵向与横向变形量的差异降低 50% 左右; 可减小最终热处理后的模具翘曲; 可防止淬火开裂, 如冷轧辊、校直用成形轧辊等大多采用 9Cr2、Cr2 等低合金工具钢制造, 一般在加热后采用喷水冷却或用碱水溶液冷却, 因其形状复杂、体积较大, 加上其特殊的结构等因素, 淬火过程中容易产生开裂, 但如果在精加工前进行整体调质处理, 将其硬度控制在 197 ~ 229HBW 范围内, 则可获得细的球化组织, 既具有良好的淬透性, 同时也可有效消除淬火裂纹的发生。

模具变形量之所以能够减小, 是因为钢经调质后的体积小于退火态的体积, 起到了预压缩体积的作用。调质的淬火加热温度为 $A_{c1} \sim A_{c1} + 20 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 。

对于形状复杂而精度要求高的模具, 为了减少淬火变形, 防止开裂, 在工件粗加工后应进行调质处理。部分常见模具钢的调质处理工艺见表 2-5。

表 2-5 部分常见模具钢的调质处理工艺

牌 号	淬火温度/ $^{\circ}\text{C}$	高温回火温度/ $^{\circ}\text{C}$	硬度 HBW
T7 ~ T13A	780 ~ 880	640 ~ 680	190 ~ 217
Cr2	840 ~ 860	660 ~ 680	197 ~ 217
9SiCr	880 ~ 900	680 ~ 700	197 ~ 229
CrWMn	840 ~ 860	660 ~ 680	207 ~ 229
MnCrWV	840 ~ 860	660 ~ 680	207 ~ 229
5CrW2Si	780 ~ 790	520 ~ 580	197 ~ 241
6CrW2Si	780 ~ 790	520 ~ 580	197 ~ 241

(续)

牌 号	淬火温度/℃	高温回火温度/℃	硬度 HBW
9Mn2V	880 ~ 900	680 ~ 700	197 ~ 229
Cr12MoV	850 ~ 865	550 ~ 600	207 ~ 255
W18Cr4V	890 ~ 920	700 ~ 720	250 ~ 300
W6Mo5Cr4V2	880 ~ 890	680 ~ 700	250 ~ 285
3Cr2W8V	1 080 + 20	680 ~ 700	—
5CrNiMo、5CrMnMo	830 + 20	560 ~ 580	34 ~ 37HRC

2.1.8 模具淬火的目及方法

淬火是将钢加热到一定温度，通过保温适当的时间获得相应的高温相，然后快速冷却，以获得远离平衡状态的不稳定组织的热处理工艺的总称。对机械零件进行淬火的目的是提高其抗拉强度和疲劳强度。对于模具来说，淬火的目的在于提高钢的力学性能（如耐磨性、强韧性和弹性等），改变钢的物理、化学性能，提高不锈钢的耐蚀性等。通常，钢在加热时随着温度升高、碳元素被固溶后成为奥氏体。如果对这种奥氏体进行急冷，将转变成马氏体。这种马氏体的硬度取决于固溶体中碳含量的多少（即钢中的碳含量）、奥氏体化条件和冷却条件。因此，为了得到要求的硬度，必须充分考虑上述条件。

(1) 碳含量 钢的淬火硬度主要取决于原材料的碳含量，碳含量越高，则淬火硬度越高。然而，当钢中碳的质量分数超过 0.6% 时，其淬火硬度几乎不再不变，稳定在 66 ~ 67HRC 之间。

(2) 奥氏体化条件 淬火时必须按要求的温度进行加热，如果不能形成奥氏体组织便得不到要求的硬度。淬火的加热温度要依据钢的化学成分来确定，一般亚共析钢的加热温度为 $A_{c3} + 30 \sim 70^{\circ}\text{C}$ ，共析钢和过共析钢的加热温度为 $A_{c1} + 30 \sim 70^{\circ}\text{C}$ 。

奥氏体化加热时间随热处理设备和模具零件的装炉量不同而有所不同。如果零件壁厚为 25mm，则大约需要 30min。冲模用钢中由于含有难以固溶的碳化物，因此其加热时间比其他钢种要长。高速工具钢的奥氏体化温度在 1 200℃ 以上，加热时间要短。

(3) 冷却条件 模具钢在淬火时的冷却速度越快，其硬度就越高，但如果超过规定的冷却速度，则可能会产生淬火裂纹和淬火变形。因此，必须正确控制淬火时的冷却速度，即温度在 M_s 点（奥氏体开始转变为马氏体的温度）以上时冷却速度要快，在 M_s 点以下时冷却速度要慢。要说明的是， M_s 点与奥氏体化温度、合金元素含量、晶粒度大小等有关。例如，奥氏体化温度越高，合金元素（C、Cr、V、Mo、Mn 等）含量越多，晶粒度越大， M_s 点就越低。

模具的淬火冷却方法应根据其批量大小以及材料、形状、尺寸、技术条件等因

素来确定。常用的淬火冷却方法有以下几种：单液淬火、双液淬火、分级淬火、等温淬火、预冷淬火、循环淬火、真空淬火、高速工具钢等低温淬火、短时加热淬火、喷液淬火、微变形淬火、自回火淬火及碳化物微细化淬火等。

1) 马氏体等温淬火。马氏体等温淬火是将工件奥氏体化后淬入低于 M_s 点以下 $50 \sim 100^\circ\text{C}$ 的热浴（如硝酸盐浴）中，等温保持一定时间，待其内外均温后取出空冷，以获得马氏体的淬火方法。该方法又称为 M_s 点以下的分级淬火。但是，由于工件在 M_s 点温度以下的冷却速度缓慢，与普通淬火比较，容易生成残留奥氏体。等温淬火工艺用于形状复杂及要求变形小、具有较高硬度和冲击韧度的模具钢等。

2) 马氏体分级淬火。与马氏体等温淬火相似的淬火方法是马氏体分级淬火。将工件加热至奥氏体化后淬入高于 M_s 点温度的热浴（如硝酸盐浴）中，等温保持一定时间，待工件内外均温后取出慢冷至室温，以获得马氏体组织的淬火方法称为马氏体分级淬火，又称为 M_s 点以上的分级淬火，简称分级淬火。该方法可使模具淬火变形倾向低于马氏体等温淬火。

3) 双介质淬火。该方法是指将工件加热至奥氏体状态后，首先淬入冷却能力较强的介质中，快速冷却到 M_s 点以上温度（ 300°C 左右），使其不发生组织转变，然后转入冷却能力较弱的淬火冷却介质中继续冷却，使过冷奥氏体在较慢冷却速度下转变为马氏体。通常使用的双介质有水-油、水-空气、油-空气、油-盐浴、盐浴-空气等。该类淬火工艺可明显减少模具零件的变形和开裂倾向。

4) 真空淬火。该方法是将工件在真空炉中加热到奥氏体化，并在真空炉的冷却室中淬火的方法。模具零件采用真空加热淬火后变形极小，如在标准件模具中，螺纹工具采用盐浴炉加热淬火后达不到 2A 级、6g 级螺纹精度要求，而采用真空淬火就可以达到其精度要求。

2.1.9 模具回火的目的及方法

回火是指将淬火（或正火）后的工件加热到 A_{c1} 点以下的某一温度，保温一定时间，然后以适当速度冷至室温的热处理工艺的总称。回火主要有两种目的：一是改变淬火组织，得到一定的强度和韧性的配合，获得良好的综合性能；二是消除淬火应力和回火中组织转变应力。根据模具要求，回火可以在 $150 \sim 250^\circ\text{C}$ 的低温下进行，或在 $300 \sim 500^\circ\text{C}$ 的中温下进行，也可以在 $500 \sim 650^\circ\text{C}$ 的高温下进行。

(1) 低温回火 通过淬火可以得到正方晶格马氏体（淬火马氏体）。这种马氏体经过低温回火后析出 ϵ 碳化物，转变成了立方晶格马氏体（回火马氏体）。这种回火马氏体虽然硬度比淬火马氏体略低一些，但却显著增加了韧性，这对提高模具的耐用性有重要意义。对于碳素工具钢和合金工具钢等冷作成形模具一定要进行低温回火，特别是对于承受冲击较大的模具，必须在 250°C 以上进行回火。由于 ϵ 碳化物的析出速度十分缓慢，因此要求加热保温时间要长，最少也要 1h 以上。此外，如果在空气中对工件进行加热，则由于热传导效果差，会导致组织均匀性不好。故

回火加热一般在油浴或硝盐浴中进行，冷却时采用空冷的方法。

(2) 高温回火 为了使淬火后的工件得到较好的韧性，通常采用高温回火的方法。高温回火的温度根据机械零件抗拉强度的要求来决定。高速工具钢的回火温度是 550℃ 左右，因为高速工具钢在 550℃ 回火时产生二次硬化现象，使得其切削性和耐磨性都得到很大提高。高速钢之所以会形成二次硬化，是由于高温回火时钢中的碳化物析出和残留奥氏体转变为马氏体。因此，为使钢的二次硬化更充分，应进行 2 或 3 次的回火处理。

高温回火可用于含钨模具钢（如 3Cr2W8V、CrW5、5CrW2Si 钢等）毛坯的软化处理。这类钢在 A_{c1} 温度以上持续退火后，有可能形成稳定的 WC 及 W_2C 型碳化物，使钢的淬硬性及淬透性下降。而如果对其进行高温回火，则可获得细小的球化组织。其高温回火软化规范见表 2-6。

表 2-6 含钨模具钢和小型模具钢的高温回火软化规范

牌 号	$A_{c1}/^{\circ}C$	高温回火规范	硬度 HBW
5SiMnMoV	764	690 ~ 710℃ ,8 ~ 10h	≤241
5CrMnSiMoV	735		
5CrNiMo	710	670 ~ 690℃ ,8 ~ 10h	≤241
5CrMnMo			
4CrW2Si	780	730 ~ 750℃ ,8 ~ 10h	≤217
5CrW2Si	770		≤241
6CrW2Si	765		≤255
4CrSiV	765		≤229
8Cr3	770		≤241
3Cr2W8V	850	750 ~ 780℃ ,10 ~ 12h	≤241
CrW5	760	720 ~ 740℃ ,2 ~ 3h	≤269
		680 ~ 700℃ ,2 ~ 3h	≤285

高温回火也可用于小型热作模块锻坯（厚度 < 300mm）的软化处理。由于小模块容易锻造充分，高温回火已能够保证其得到良好的金相组织。

高温回火还可用于模具返修前淬火或渗氮模具精加工前消除残余应力，以防止模具变形。低合金工具钢及碳素工具钢消除应力高温回火规范为：630 ~ 650℃，1 ~ 2h；高合金工具钢消除应力高温回火规范为：680 ~ 700℃，2 ~ 3h。

(3) 中温回火 中温回火温度为 300 ~ 500℃，其目的是为了获得高的强度和韧性的综合力学性能，回火后金相组织为回火托氏体，硬度一般为 40 ~ 50HRC。中温回火主要用于热锻模、模套、顶杆、弹簧等模具零件。

模具回火应认真执行回火工艺，如果回火时间过短或回火温度过低，将会导致

回火不充分，从而造成模具崩刃、开裂以及精密模具使用一段时间后尺寸发生变化。回火时间与模具有效厚度、回火温度及加热介质的关系见表 2-7。

表 2-7 回火时间与模具有效厚度的关系

低温回火(150 ~ 250℃)						
有效厚度/mm	<25	25 ~ 50	50 ~ 75	75 ~ 100	100 ~ 125	125 ~ 150
保温时间/min	30 ~ 60	60 ~ 120	120 ~ 180	180 ~ 240	240 ~ 270	270 ~ 300
中、高温回火(250 ~ 650℃)						
有效厚度/mm	<25	25 ~ 50	50 ~ 75	75 ~ 100	100 ~ 125	125 ~ 150
保温时间 /min	盐浴炉	20 ~ 30	30 ~ 45	45 ~ 60	75 ~ 90	90 ~ 120
	空气炉	40 ~ 60	70 ~ 90	100 ~ 120	150 ~ 180	180 ~ 210
					210 ~ 240	

当装炉量较大时，应适当延长回火时间。合金钢也应适当延长回火时间，特别是高合金钢由于其导热性差，合金元素阻碍碳元素的扩散，故回火时间还应再适当延长一些。

(4) 阶梯回火 工件淬火后以两个不同的温度进行回火的工艺操作称为阶梯回火。阶梯回火的优点是可以获得更加细小而分散的碳化物。9SiCr 钢淬火后一次回火的工艺是分别在 200℃、240℃、280℃、320℃或 360℃回火 1h；若采用阶梯回火（180℃回火 1h + 在上述回火温度下回火 2 次，每次 0.5h），则可使模具具有较高的强韧性，在硬度值相同时，模具的冲击韧度及使用寿命可分别提高 38.5% ~ 55.5% 和 50%。

实践证明，对于一些加工完成后检验合格的模具采用多次回火的办法，会使模具使用寿命有不同程度的提高。

2.1.10 模具加热介质和淬火冷却介质

1. 钢的加热介质

工件在空气中进行加热淬火时，由于空气中含有大量的氧气，会使工件表面产生氧化和脱碳现象。因此，为了防止工件在加热时氧化和脱碳，需采用加热介质对其进行保护。表 2-8 列出了模具淬火用的加热介质。加热介质大致可以分为固体、液体和气体三大类，可根据模具的种类、钢种、表面要求和有无最后加工工序等来进行选择。

表 2-8 模具淬火用的加热介质

加 热 介 质		适 用 钢 种	热处理方式
固体	木炭、铸铁屑	冲模用钢	—
液体	熔融盐浴	各种钢	盐浴热处理
气体	各种气体	各种钢	气体热处理
	真空	各种钢	真空热处理

(1) 固体加热介质 由表 2-8 可以看出, 固体加热介质一般是木炭或铸铁屑。把木炭或铸铁屑和被热处理的模具零件同时装入普通低碳结构钢或耐热钢制的容器内并作密封处理, 然后进行加热淬火。这种方法的优点是无需专用设备, 但因为这种方法不能进行急冷, 所以不适于淬透性差的钢种。固体加热介质多用于冲模钢的加热淬火, 此外, 它还广泛用于对冷却速度要求不高的退火和固体渗碳。

(2) 液体加热介质 液体加热介质一般是指熔融盐, 由于使用熔融盐作为加热介质, 因此称为盐浴。用盐浴作加热介质, 不仅能够在无氧化状态中加热, 而且比其他加热介质导热性好, 处理时间短, 温度分布也均匀。

对于高速工具钢和冲模用钢来说, 淬火加热主要使用的盐浴成分是 BaCl_2 , 加热温度为 $1\ 000^\circ\text{C}$ 以上。对于碳素钢和低合金钢来说, 主要使用的盐浴成分是在 BaCl_2 中加入一定量的 NaCl 和 KCl , 加热温度为 $800\sim 900^\circ\text{C}$ 。马氏体等温淬火用的热盐浴是 NaNO_3 和 KNO_3 等硝酸盐。使用盐类作加热介质的缺点是, 被热处理的模具零件容易生锈, 因此热处理后必须对其进行充分清洗, 以除去表面残盐。

(3) 气体加热介质 表 2-9 中的气体主要用于模具零件的无氧化或光亮淬火。真空也被视为气体的一种, 真空负压条件可用于模具的光亮淬火。

表 2-9 模具淬火用气体加热介质的种类

种 类		制 取 方 法
改良燃料气	吸热式气氛	将燃料气(液化石油气、天然气、丙烷等)按一定比例与空气混合通入发生器,在催化剂和外部供热作用下,通过吸热反应制成的气氛
	放热式气氛	将燃料气(液化石油气、天然气、丙烷等)按一定比例与空气混合,经放热燃烧而制成的气氛
裂解气	氨制备气氛	氨制备气氛包括氨分解气氛和氨燃烧气氛,其中氨分解气氛是通过氨气分解制备的气氛
	有机液体裂解气氛	将有机液体(甲醇、乙醇等)直接滴入已加热的工作炉内裂解后形成的气氛
惰性或中性气体		利用瓶装的氩、氦、氮等液态气体进行汽化,或采用制氮机制取氮气

2. 淬火冷却介质

模具淬火冷却可以在水、盐水、碱液、油、盐浴（包括硝酸盐浴）、碱浴（主要由 KOH 和 NaOH 组成）及气体中进行。应根据模具材料的化学成分、模具尺寸大小和形状、淬火加热炉种类、模具尺寸精度要求等来选择相应的淬火冷却介质。在保证淬透的前提下, 为了减小热应力, 应尽量选择较缓和的淬火冷却介质; 为了获得较大的奥氏体过冷度, 使转变后的马氏体细小, 在保证变形要求及不发生开裂的前提下, 应尽量选择较激烈的淬火冷却介质。由于碳素工具钢淬透性较低, 油淬难以淬透, 而水淬又易开裂, 故通常采用双介质淬火, 即水淬油冷方式。对于合金钢, 则采用油冷淬火。

(1) 水及水溶性淬火冷却介质 水冷通常用于碳素钢淬火, 而高碳钢、直径较大的弹簧钢和轴承钢等一般是水淬油冷。利用水进行淬火时, 因为冷却速度太

快，容易产生淬火变形和开裂现象，所以水冷一般较少用于模具零件的淬火。要想得到水与油之间的冷却速度，可以采用水溶性淬火冷却介质，如 PAG（聚烷撑乙二醇）淬火冷却介质等。

(2) 盐水和碱水溶液

1) 盐水是将一定量的氯化钠溶解于水中，即配制成盐水溶液，其浓度可依据零件的大小、硬度要求等而定。一般氯化钠的质量分数为 5% ~ 15% 的盐水即可明显提高冷却能力，在 650 ~ 550℃ 具有最大的冷却速度（冷却能力约为水的 10 倍），而在低温区（马氏体相变温度区）冷速较小（相当于自来水的冷速）。用于淬火的盐水温度通常控制在 20 ~ 40℃ 范围内。盐水淬火后的模具零件变形一般比水小。盐水多用于碳素钢的淬火。

2) 碱水溶液是在水中加入一定比例的苛性钠（NaOH）配制而成的，常用质量分数为 5% ~ 15% 的苛性钠溶液在 650 ~ 500℃ 区间冷速比盐水高，而在马氏体相变区冷速比盐水低，可用于低淬透性的碳素钢等淬火，可减少其变形、开裂倾向。使用碱水溶液淬火后模具零件表面清洁，呈现银灰色。碱溶液使用温度为 20 ~ 60℃。

(3) 油 由于油在低温区的冷却速度缓慢，故有利于减少模具零件的变形与开裂倾向。油冷适用于合金钢淬火。但是普通油在高温区冷却能力较小，一般不适用于淬透性小的碳素钢淬火。除了一般要求的模具，淬火时可以采用 L-AN 全损耗系统用油（如 L-AN15、L-AN22、L-AN32、L-AN46、L-AN68）。为了进一步提高模具零件的综合性能，目前较多采用专用淬火油。例如：为了使模具得到较高的淬火硬度，可选用快速光亮淬火油；为了解决模具变形问题，可选用热油（等温分级淬火油，工作温度 100 ~ 200℃）分级淬火及等温淬火；为了保证模具回火质量，可选用回火油（如 HH-1、HH-2）；为了便于模具在真空炉内淬火，可选用真空淬火油（如 ZZ-1、ZZ-2）等。

(4) 碱浴和盐浴（包括硝酸盐浴） 碱浴的冷却能力比油略大，硝酸盐浴的冷却能力与油近似。碱浴和硝酸盐浴多用于碳素钢及低合金钢的分级淬火及等温淬火，氯化盐则适用于高速工具钢以及 Cr12MoV、7Cr7Mo3V2Si 等材料的分级淬火。实践证明，采用碱浴、盐浴和硝酸盐浴作淬火冷却介质在冷却过程中不生物态的变化，冷却时传热只靠对流作用，在高温区有很快的冷却速度，而在低温区冷却速度较慢，故用于大尺寸模具零件的淬火，能够减少其变形，防止开裂。因此，用碱浴、盐浴和硝酸盐浴作淬火冷却介质是控制模具变形的重要手段之一。表 2-10 为常用盐浴的成分及使用温度。表 2-11 为常用碱浴的成分及使用温度。

表 2-10 常用盐浴的成分及使用温度

序号	组成成分(质量分数)	熔点/℃	使用温度/℃
1	75% CaCl ₂ + 25% NaCl	500	540 ~ 580
2	30% KCl + 20% NaCl + 50% BaCl ₂	540	560 ~ 650

(续)

序号	组成成分(质量分数)	熔点/℃	使用温度/℃
3	37% NaCl + 41% KCl + 22% BaCl ₂	552	580 ~ 800
4	53% KNO ₃ + 40% NaNO ₂ + 7% NaNO ₃ , 另加 3% H ₂ O	100	120 ~ 200
5	55% KNO ₃ + 45% NaNO ₂ , 另加 3% ~ 5% H ₂ O	130	150 ~ 200
6	55% KNO ₃ + 45% NaNO ₂	137	155 ~ 550
7	50% KNO ₃ + 50% NaNO ₂	145	160 ~ 550

表 2-11 常用碱浴的成分及使用温度

序号	组成成分(质量分数)	熔点/℃	使用温度/℃
1	65% KOH + 35% NaOH	155	170 ~ 300
2	80% KOH + 20% NaOH + 3% H ₂ O	130	150 ~ 250
3	84% KOH + 14% NaOH + 2% ~ 3% H ₂ O	140	150 ~ 300

(5) 气体 空气是冷却速度最慢的介质。将惰性气体（Ar、He）和中性气体（N₂）用于真空炉中加热淬火，以取代盐浴炉，可避免排放污染。通过计算机可控制风机强制冷却来对冷作模具钢、不锈钢及高速工具钢等进行淬火。例如，采用 0.6MPa 以上的真空加热高压气淬炉进行热处理，同其他热处理工艺相比，不仅模具零件变形小，没有氧化脱碳，而且可以提高使用寿命 1 ~ 3 倍。

2.2 冷作模具钢与热处理

冷作模具钢包括各种碳素工具钢、合金工具钢、高速工具钢、基体钢、粉末高速工具钢及粉末高合金模具钢等。

冷作模具用于金属或非金属材料的冲裁、拉深、弯曲、冷挤、冷镦、滚丝及压弯等工序。对冷作模具要求是具有高的强度、耐磨性和足够的韧性，以保证其具有高的耐用度。冷作模具的失效形式主要为磨损、脆断、弯曲、咬合、塌陷、啃伤及软化等。因此，冷作模具钢应根据其工作条件、失效形式、模具形状、尺寸大小及材料等制订合适的热处理工艺，以获得高的变形抗力、断裂抗力，以及耐磨损、抗疲劳、抗咬合等性能，最终得到高的使用寿命。

为了获得优异的强韧性和耐磨性，冷作模具钢可采用以下热处理工艺：①预备热处理除采用等温球化退火工艺外，对于莱氏体钢等，还可以采用调质细化、锻造余热淬火-双细化（锻造余热淬火 + 高温回火 + 低温淬火）、固溶双细化 [高温固溶 + 循环细化（淬火 + 回火）] 等工艺来细化碳化物和晶粒，以提高基体强度；②最终热处理除了采用常规淬火、回火工艺外，也可以采用低温淬火、真空淬火、高

温淬火、等温淬火和分级淬火，以及表面强化热处理等工艺。

2.2.1 冷作模具的工作条件及要求

冷作模具主要用于金属或非金属材料的冷态成形。冷作模具在工作过程中需承受拉伸、弯曲、压缩、冲击和疲劳等不同应力的作用，而用于金属挤压、冷镦和冷拉深的模具还要承受 300℃ 左右交变温度的作用。冷作模具的工作条件和要求主要有以下几个方面：

1) 冲裁模主要用于各种板料的冲切成形，其在冲裁软质薄板时，冲头承受的压力并不大，但在冲裁中、厚钢板，特别是在厚钢板上冲小孔时，冲头承受的单位压力极大。由于模具的工作部位是刃口，因此对刃口的要求是工作中不易崩刃、不易变形、不易磨损和不易折断。

2) 弯曲模和拉深模用于板材的成形，工作应力一般不大。对拉深模的要求工作面要保持光洁，不易发生粘着磨损和擦伤；弯曲模除以上要求外，还要求有一定的抗断裂能力。

3) 挤压模和镦锻模主要用于材料体成形，工作应力大，其中挤压模承受的应力最大。由于材料在型腔中剧烈变形时产生热量，且模具承受反复的挤压应力和在温度约 300℃ 的环境中工作，因此对这类模具的要求是工作时不易变形、不易开裂及不易磨损。

模具的工作条件主要是其型面承受工作压力和一定的工作温度等。模具的技术要求主要是指其尺寸精度、表面粗糙度、模具的硬度和使用寿命等。几种冷作模具的工作条件和技术要求见表 2-12。

表 2-12 几种冷作模具的工作条件和技术要求

模具类型	型面受力 /MPa	工作温度 /℃	表面粗糙度 <i>Ra</i> /μm	尺寸精度 /mm	硬度 HRC	使用寿命 /10 ³ 次
冲模	200 ~ 600	室温	<0.8	0.005 (精密)	58 ~ 62	>30 (一次刃磨)
冷锻模	1 000 ~ 2 500	室温	<0.8	0.01	58 ~ 64	>20
粉末冶金模	400 ~ 800	室温	<0.4	0.01	58 ~ 62	>40

2.2.2 冷作模具材料的性能要求

冷作模具在工作中承受拉伸、压缩、弯曲、冲击、疲劳和摩擦等机械力的作用，主要以脆断、塌陷、磨损、啃伤及软化等形式失效。因此，冷作模具材料应具有高的抗变形、抗磨损、抗断裂、抗疲劳和抗咬合等性能。具体要求如下：

(1) 耐磨性 冷作模具工作时，其表面会与加工坯料之间产生许多次摩擦，因此对模具的要求是必须在此情况下仍能够保持较低的表面粗糙度值和较高的尺寸精度，以防止产生早期失效。

模具材料的耐磨性与其硬度和组织密切相关，因此为了提高冷作模具的耐磨

性，一般要求模具的硬度要高于被加工件硬度的 30% ~ 50% ，材料的金相组织为硬度较高的回火马氏体或下贝氏体，并且其上均匀分布有大量细小而坚硬的粒状碳化物。所以，钢中碳的质量分数一般都在 0. 60% 以上。

(2) 强度 模具材料的强度是指其在工作过程中抵抗变形和断裂的能力。强度指标是冷作模具设计和材料选择的重要依据，主要有上屈服强度 R_{sh} 和下屈服强度 R_{sl} 等。屈服强度是衡量模具材料塑性变形抗力的指标，也是最常用的强度指标。为了获得高的强度，在设计、制造模具时应选用合适的模具材料，并通过适当的热处理来达到性能要求。

(3) 韧性 对韧性的要求，应根据工作条件来考虑。受冲击载荷较大（如冷锻模和剪切模）、易受偏心弯曲载荷（如细长的冲头模具）或有应力集中的模具等都需要具有较高的韧性。一般工作条件下的冷作模具通常受到的是小能量多次冲击载荷的作用，其失效形式是疲劳断裂，故模具不必具有过高的冲击韧度值。

(4) 抗疲劳性能 由于冷作模具通常是在交变载荷的作用下发生疲劳损坏的，故为了提高模具使用寿命，模具材料应具有较高的疲劳强度。导致模具疲劳失效的因素有钢中带状和网状碳化物、粗大晶粒，以及模具表面有微小加工刀痕、凹槽及截面尺寸变化过大、表面脱碳等。

(5) 抗咬合性 抗咬合性是指当被冲压材料与模具表面接触，在压应力和摩擦力的作用下润滑油膜被破坏时被冲压材料对“冷焊”的抵抗力。影响抗咬合力的主要因素是成形材料的性质，如奥氏体不锈钢、镍基合金及精密合金等有较强的咬合倾向。模具材料及润滑条件对抗咬合性有较大的影响。

(6) 良好的工艺性能 冷作模具的工艺性能要求包括：可锻性、可加工性、可磨削性、热处理工艺性能（如淬透性、淬硬性、耐回火性、过热敏感性、氧化脱碳倾向、淬火变形及开裂倾向等）等。

2.2.3 冷作模具材料的选择与应用

为了满足冷作模具高耐磨和长寿命的需要，通常选用高碳钢或高碳合金钢作为模具材料。选材时应依据模具结构、工作条件、被加工材料、设备及润滑条件、加工产品批量等综合考虑。冷作模具材料的选用见表 2-13。

表 2-13 冷作模具材料的选用

类型	工 作 条 件		推 荐 牌 号
冲模	普通钢板 (厚度≤40mm)		Cr12、Cr12MoV、Cr2、CrWMn、Cr2Mn2SiWMoV、 W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、W12Mo3Cr4V3N
	奥氏体钢	厚度 < 4mm	Cr12、Cr12MoV、Cr6WV、Cr4W2MoV、W6Mo5Cr4V2
		厚度 = 4 ~ 6mm	Cr6WV、Cr2、Cr2Mn2SiWMoV、MnCrWV、6W6Mo5Cr4V、9Mn2V
		厚度 > 6 ~ 12mm	6CrW2Si、7CrSiMnMoV
		厚度 > 12mm	4Cr5MoSiV、5CrNiMo、4CrMnSiMoV

(续)			
类型	工作条件		推荐牌号
冲模	硅钢片	厚度 < 2mm	Cr12、Cr12MoV、W6Mo5Cr4V2、W18Cr4V
		厚度 = 2 ~ 6mm	Cr6WV、Cr4W2MoV、Cr2、Cr2Mn2SiWMoV、CrWMn、MnCrWV、6W6Mo5Cr4V、6Cr4W3Mo2VNb
	铜及铜合金 (厚度 ≤ 6mm)		Cr12、Cr12MoV、Cr6WV、CrWMn、9Mn2V、Cr2、Cr2Mn2SiWMoV
	铝及铝合金		Cr12、Cr12MoV、Cr6WV、W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、Cr2Mn2SiWMoV、Cr2、9Mn2V
落料模、切边模	钢材厚度 ≤ 2mm		Cr12、Cr12MoV、W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、W12Mo3Cr4V3N
	钢材厚度 > 2mm		6CrW2Si、9Mn2V、Cr2、CrWMn、6W6Mo5Cr4V、6Cr4W3Mo2VNb
拉丝模	有色金属丝		Cr12、Cr12MoV、9Mn2V、Cr2、CrWMn、T12
	钢丝		Cr12、Cr12MoV、W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、W12Mo3Cr4V3N
冷镦模	低压力	冷镦模具直径 < 30mm	T10、T11、T12
		冷镦模具直径 = 30 ~ 40mm	9Mn2V、9SiCr、Cr2、CrWMn、MnCrWV
		冷镦模具直径 > 40mm	7CrSiMnMoV、Cr2Mn2SiWMoV
	较高压力		Cr6WV、Cr5Mo1V、Cr2Mn2SiWMoV
	高压力		Cr12、Cr12MoV、W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、Cr4W2MoV、6W6Mo5Cr4V、6Cr4W3Mo2VNb
冷挤压模	冲头		W6Mo5Cr4V2、W18Cr4V、6W6Mo5Cr4V、Cr12MoV、Cr12、Cr12MoV、6Cr4W3Mo2VNb
	凹模	有衬套	Cr12、Cr12MoV、6W6Mo5Cr4V、6Cr4W3Mo2VNb、Cr4W2MoV、W6Mo5Cr4V2
		无衬套	9Mn2V、CrWMn、MnCrWV、Cr2、6W6Mo5Cr4V
粉末冷压模	冲头、凹模	有色金属粉末	W6Mo5Cr4V2、W18Cr4V、YG20、Cr12、Cr12MoV
		钢铁粉末	Cr4W2MoV、6W6Mo5Cr4V

表 2-14 为碳素工具钢的性能特点及用途，供选材时参考。

表 2-14 碳素工具钢的性能特点及用途

牌 号	性能特点及使用范围	用 途 举 例
T7、T7A	具有较好的韧性和硬度,但切削性能较差,强度较低。适宜制造要求适当硬度,能够承受冲击载荷,并具有较好韧性的各种工模具	形状简单、承受轻载荷的小型冷作模具、压模、铆钉模和热固性塑料压缩模等
T8、T8A	淬火加热时容易过热,变形也大,塑性与强度较低。热处理后有较高硬度和耐磨性,适于制造要求较高硬度和耐磨性、承受冲击载荷不大的各种工模具	冷镦模、拉深模、压印模、纸品下料模和热固性塑料压缩模等

(续)

牌 号	性能特点及使用范围	用 途 举 例
T8Mn、 T8MnA	其性能与 T8、T8A 相近,但提高了淬透性,模具可获得较深的淬硬层。适于制造截面较大的模具	冷镦模、拉深模、压印模、纸品下料模和热固性塑料压缩模等
T9、 T9A	具有较高的硬度和耐磨性,性能与 T8、T8A 相近。适于制造要求较高耐磨性,且有一定韧性的各种模具	冲模、冲头等
T10、 T10A	在淬火加热(700 ~ 800℃)时仍能够保持细晶粒组织,不至于过热,淬火后钢中有未溶的、能增加钢的耐磨性的过剩碳化物。适于制造要求有较高耐磨性、刃口锋利及稍有韧性的工模具	冷镦模、冲模、拉丝模、铝合金用冷挤压模、纸品下料模和塑料成型模等
T11、 T11A	与 T10、T12 相比,具有较好的综合力学性能(如硬度、耐磨性及韧性等);对晶粒长大及形成碳化物的敏感性较小。适于制造要求切削时刃口不易变热的工模具	冷镦模、尺寸不大的冲模和软材料用切边模等
T12、 T12A	钢的含碳量高,淬火后有较多的过剩碳化物,硬度和耐磨性均较高,而韧性较低。适于制造不受冲击载荷、切削速度不高、切削刃口不变热的工模具	冷镦模、拉丝模、小截面的冲模与切边模和塑料成型模等
T13、 T13A	碳素工具钢中碳含量最高的钢种,硬度很高,碳化物数量多且分布不均匀,力学性能差。适于制造不受冲击载荷的硬金属切削工模具	冷镦模和拉丝模等

表 2-15 为合金工具钢的性能特点及用途，供选材时参考。

表 2-15 合金工具钢的性能特点及用途

牌 号	性 能 特 点	用 途 举 例
9SiCr	用途广泛的低合金工具钢,其淬透性和淬硬性较高,耐回火性较好,优于碳素工具钢。适于分级淬火和等温淬火,热处理时变形小;因含 Si,脱碳倾向性较大	可用于制造冷作模具,如冲模、压印模和低压力工作条件下的冷镦模等
8MnSi	淬透性、韧性和耐磨性均优于碳素工具钢	小尺寸热锻模、冲头、拔丝模和冲模等
Cr06	与 Cr2 和 9Cr2 相比,其碳含量最高,Cr 含量最低,淬火后硬度和耐磨性都很高,刃口锋利,但较脆	可制造简单的冷作模具等
Cr2	淬火后的硬度和耐磨性都很高,淬火变形不大,但高温塑性差	可制造冷作模具和拉丝模等
9Cr2	性能与 Cr2 基本相似,因碳含量稍低,其韧性较 Cr2 好	主要用于冲模、冲头和压印模等
W	淬火后的硬度和耐磨性较碳素工具钢好,热处理变形小,水淬不易开裂,耐回火性较好	可制造冷作模具和工作温度不高、切削速度不大的刀具

(续)		
牌 号	性 能 特 点	用 途 举 例
4CrW2Si	高温时具有较好的强度和硬度,回火后具有较高的韧性	可制造冲裁切边复合模、冲模及部分小型热作模具,如中应力热锻模、受热低的压铸模等
5CrW2Si	性能与 4CrW2Si 钢相似,回火后有较高的韧性,有一定的淬透性和高温力学性能,热处理时对脱碳、变形和开裂的敏感性不大	可制造冲裁模和切边用凹模,以及热剪切模、热锻模、易熔合金的压铸模等
6CrW2Si	与 4CrW2Si 和 5CrW2Si 相比,具有较高的淬硬度和一定的高温强度	常用于制造冲击载荷模具和热作模具,如热铆钉冲头、高温压铸轻合金的顶头、热锻模等
Cr12	具有较高的强度、淬透性及耐磨性,淬火变形小,但冲击韧度差,易脆裂,易形成不均匀的共晶碳化物,导热性与高温塑性也较差	广泛用于制造冷作模具,常用于制造冲击载荷小和耐磨性高的冲模、冲头、拉丝模等
Cr12Mo1V1	属于莱氏体钢,具有高的淬透性、淬硬性和耐磨性,热处理变形小,高温抗氧化性、淬火与抛光后耐腐蚀性良好	广泛应用的冷作模具钢,用于制造各种高精度、长寿命的冷作模具,如形状复杂的冲孔凹模、冷挤压模等
Cr12MoV	淬透性高,截面尺寸为 400mm 以下的工件可完全淬透,其淬火、回火后的硬度、强度、韧性均比 Cr12 高,耐磨性和塑性较好,变形小,但高温塑性差	用于制造截面尺寸较大、形状复杂、长寿命的冷作模具,如各种冲孔凹模、切边模、拉深模、滚边模、拉丝模等
Cr5Mo1V	相当于美国 A2 钢,具有良好的空淬性能,空气中淬火后尺寸变形小,韧性比 9Mn2V、Cr12 均好,碳化物均匀细小,耐磨性好	用于制造韧性好、耐磨性高的冷作模具,如成形模、下料模、冲头、冲裁模等
Cr4W2MoV	共晶化合物颗粒细小且分布均匀,具有较高的淬透性和淬硬性,且有较好的综合力学性能、耐磨性和尺寸稳定性	用于制造冲模、冷挤压模、落料模、滚丝模和搓丝板等
9Mn2V	经济型冷作模具钢,综合力学性能优于碳素工具钢,具有较高硬度和耐磨性,淬透性好,淬火变形小,过热敏感性低	用于制造尺寸较小的冲模、冷压模、雕刻模和落料模等
CrWMn	用途广泛的微变形钢,淬透性好,变形小,经淬火和低温回火后有高的硬度、耐磨性和尺寸稳定性,且韧性较好,但易形成网状碳化物	用于制造形状复杂及高精度的冲模等
9CrWMn	性能与 CrWMn 钢相似,但由于碳含量稍低,碳化物偏析程度低于 CrWMn 钢,故力学性能更好,但热处理后硬度稍低	用于制造形状复杂及高精度的冲模等

(续)		
牌 号	性 能 特 点	用 途 举 例
6Cr4W3Mo2VNb	基体钢类型高强度韧性冷作模具钢,具有高强度、高硬度,韧性好,且具有较高的疲劳强度	用于制造受冲击载荷及形状复杂的冷作模具、冷挤压模、冷镦模、冲模及冷剪刀等
7CrSiMnMoV	火焰淬火冷作模具钢,具有较好的淬透性,淬火温度范围宽,过热敏感性小,淬火后能获得较高的表面硬度、耐磨性和良好的韧性,热处理变形小	用于制造大型镶块模具、下料模、冲头、成形模、拉深模、冲模、压缩模和陶土模等
6W6Mo5Cr4V	低碳高速工具钢类型冷作模具钢,有较高的淬透性,并具有高硬度、高耐磨性、高强度及良好的热硬性,韧性好	用于制造高冲击载荷下抗磨损的模具、冷挤压模、拉深模、冷镦模、成形模、冲模和冲头等
5CrNiMo	具有良好的韧性、强度和高耐磨性,并有良好的淬透性,在高温下韧性及耐磨性均高于5CrMnMo 钢	用于制造各种中大型锤锻模,但不宜制造大型复杂的和工作温度较高的重载荷模具
5CrMnMo	性能与5CrNiMo 钢相近,淬透性稍差,具有良好的韧性、强度和耐磨性,对回火脆性不敏感	用于制造形状简单的小型锻压模具,如模锻锤用模块等(通常边长≤400mm)
3Cr2W8V	属于莱氏体钢,在高温下具有较高的硬度,但其韧性和塑性较差,淬透性中等(截面厚度≤80mm),该钢的相变温度较高,耐热疲劳性良好	用于制造承受高温、高应力但不受冲击载荷的凸模和凹模,如平锻机上的凸凹模、铜合金挤压模、压铸模等
3Cr3Mo3W2V	具有良好的冷、热加工性能,较高的热强性、热疲劳性能,良好的耐磨性和耐回火性,并具有一定的耐冲击性,淬硬性较好	用于镦锻模、精锻模、辊锻模和压力机用模具等
5Cr4Mo3SiMnVAI	基体钢类型冷热兼用的模具钢,淬透性和淬硬性均较好。作为热作模具钢,具有较高的高温强度和较优良的耐磨性、冷热疲劳性;作为冷作模具钢,具有较高的韧性	用于标准件行业和轴承行业的热挤压模,以及冷镦模、冷冲凹模,可代替3Cr2W8V 及 Cr12MoV 钢
5Cr4W5Mo2V	作为热作模具钢,具有较高的热硬性、高温强度和较高的耐磨性、耐回火性及一定的冲击韧度,可进行一般热处理或等温热处理及化学热处理	常用于制造热挤压模具,以及精锻模、热冲模等
8Cr3	具有较好的淬透性、一定的室温及高温强度,形成的碳化物细小且均匀分布,耐磨性较好	常用于制造冲击振动较小、工作温度低于500℃的耐磨损的模具,如热冲裁模、热切边模、热顶锻模、成形冲模和热弯曲模等
4CrMnSiMoV	具有较高的高温力学性能,耐热疲劳性能好,可代替5CrNiMo 钢	用于制造锤锻模、压力机锻模、校正模和热弯曲模等

(续)

牌 号	性 能 特 点	用 途 举 例
4Cr3Mo3SiV	具有较高的淬透性和高温硬度,以及优良的韧性,可代替 3Cr2W8V 钢	用于制造热挤压模、热锻模和热冲模等
4Cr5MoSiV1	广泛应用的空冷硬化型热作模具钢,与 4Cr5MoSiV 钢相比,此钢具有较高的热强度及硬度,在中温条件下具有良好的韧性、热疲劳性能和一定的耐磨性,并且淬透性高,热处理变形小	用于制造热挤压模与芯轴、模锻锤的锻模、高速精密锻造用模具镶块、锻造压力机模具,以及铝合金压铸模等
4Cr5MoSiV	空冷硬化型热作模具钢,淬透性好,在中温(600℃左右)条件下具有较好的热强度、热疲劳性能和一定的耐磨性,可选用较低的淬火温度进行空冷淬火,热处理变形小	常用于制造铝合金压铸模、热挤压模、热切边模、锤锻模、压力机锻模、塑料模具,以及穿孔用工具和芯轴等
4Cr5W2VSi	空冷硬化型热作模具钢,在中温下具有较高的硬度和热强度,以及良好的韧性、耐磨性和热疲劳性能	用于制造锻压模具、热挤压模、芯轴、冲头、零部件成形用高速锤锻模,以及铝、锌等轻金属的压铸模等
3Cr2Mo(P20)	广泛应用的预硬化型塑料模具钢,综合力学性能良好,淬透性高,较大截面的钢材能够获得较均匀的硬度,且具有良好的抛光性能,经预硬化后再经冷加工制造成的模具可以直接使用	用于制造大、中型精密塑料模具,也用于制造低熔点合金(如锡、锌、铝合金)的压铸模等
3Cr2MnNiMo	广泛应用的预硬化型塑料模具钢,此钢具有高的淬透性、良好的抛光性能、电火花加工性能和皮纹加工性能,经预硬化后再经冷加工制造成的模具可直接使用	用于制造大型、特大型塑料模具及精密的塑料模具,以及低熔点合金的压铸模
7Mn15Cr2Al3V2WMo	无磁钢,此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、高的硬度和强度、较好的耐磨性,但切削加工性差	用于制造无磁性模具,也用于制造在 700 ~ 800℃ 使用的热作模具等

表 2-16 为 YG 类硬质合金的使用性能及用途, 供选材时参考。

表 2-16 YG 类硬质合金的使用性能及用途

合金牌号	使 用 性 能	用 途 举 例
YG15	使用强度和冲击韧度较好	载荷大、应力显著的顶锻模或冲压模等
YG20	使用强度高,耐磨性略低	顶锻模、冲压模和冲裁模等
YG20C	使用强度优于 YG20,耐磨性好	顶锻模、冲压模和冲裁模等
YG25、YG30	使用强度高,耐磨性低	顶锻模、冲压模和冲裁模

(续)

合金牌号	使用性能	用途举例
YG6	使用强度及冲击韧度较好,耐磨性好	应力较大条件下的拉深模
YG8	耐磨性良好,使用强度和冲击韧度优于 YG6	应力很大条件下的拉深模
YG8C	使用性能与耐磨性均与 YG11C 相近	拉制钢棒及钢管等压缩率较大的拉深模
YG11C	属粗晶粒碳化钨合金,耐磨性优于 YG15,使用强度也略高于 YG15	载荷较大、应力显著条件下的顶锻模及冲压模,如用于螺钉、铆钉的顶锻模

表 2-17 为常用钢结硬质合金的使用性能及用途，供选材时参考。

表 2-17 常用钢结硬质合金的使用性能及用途

牌 号	使用性能	用途举例
R5	具有较高的硬度及耐磨性,以及明显的回火二次硬化现象,耐回火性、抗氧化性好,并有一定的耐蚀性	中温热作模具,以及抗氧化、耐腐蚀及耐磨的模具零件
T1、D1	具有较高的硬度及耐磨性,有一定的耐热性及回火二次硬化现象	用于制造热作模具,如热挤压模等
GT35	具有较高硬度及耐磨性,但不耐高温及腐蚀	冷镦模、冷挤压模、冲压模及拉深模等
GW50、GJW50	既有高硬度及高耐磨性,又有好的可加工性、可锻性及可热处理性	用于冷作模具,如冲模、冷镦模、拉深模及冷挤压模等

2.2.4 冷作模具钢的热处理工艺

冷作模具钢热处理主要包括模具预备热处理（如正火、退火和调质）和模具最终热处理（淬火、回火、固溶、时效及冷处理等），以及表面强化处理和模具加工中的热处理等。

1. 冷作模具用碳素工具钢的热处理工艺

冷作模具用碳素工具钢主要有 T7、T7A、T8、T8A、T9、T9A、T10、T10A、T11、T11A、T12、T12A、T13、T13A 等，主要用于制造尺寸不大、形状简单及受轻负载的模具零件。

(1) 预备热处理

1) 正火规范。冷作模具用碳素工具钢正火的目的主要是细化晶粒，消除网状碳化物，降低硬度，利于切削加工，为最终热处理作好组织准备。表 2-18 为几种冷作模具用碳素工具钢的正火规范，供选择预备热处理时参考。

表 2-18 几种冷作模具用碳素工具钢的正火规范

牌 号	$A_{c_{cm}}/^{\circ}\text{C}$	正火温度/ $^{\circ}\text{C}$	硬度 HBW
T7、T7A	770	800 ~ 820	229 ~ 285
T8、T8A	740	800 ~ 820	241 ~ 302

(续)

牌 号	$A_{c_{cm}}/^{\circ}\text{C}$	正火温度/ $^{\circ}\text{C}$	硬度 HBW
T9、T9A	—	760 ~ 780	241 ~ 302
T10、T10A	800	820 ~ 850	255 ~ 321
T11、T11A	810	840 ~ 860	269 ~ 345
T12、T12A	820	850 ~ 870	269 ~ 341
T13、T13A	830	860 ~ 880	269 ~ 341

2) 球化退火。冷作模具用碳素工具钢毛坯成批等温球化退火工艺规范见表 2-19。

表 2-19 冷作模具用碳素工具钢毛坯成批等温球化退火工艺规范

牌 号	加热温度 × 保温时间	等温温度 × 保温时间	硬度 HBW	显微组织
T7 ~ T9A	750 ~ 800 $^{\circ}\text{C}$ × 1 ~ 2h	650 ~ 690 $^{\circ}\text{C}$ × 2 ~ 3h	163 ~ 187	珠光体 1 ~ 5 级
T10 ~ T13A	750 ~ 770 $^{\circ}\text{C}$ × 1 ~ 2h	680 ~ 700 $^{\circ}\text{C}$ × 2 ~ 3h	170 ~ 207	珠光体 2 ~ 4 级,碳化物网 ≤ 2 级

(2) 最终热处理

1) 淬火。冷作模具用碳素工具钢常用的淬火工艺规范见表 2-20。

表 2-20 冷作模具用碳素工具钢常用的淬火工艺规范

牌 号	淬火温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却方法	硬度 HRC	备 注
T7 ~ T13A	760 ~ 830	5% (质量分数) 盐水 → 热油	61 ~ 65	下限温度多用于小型模具
		5% ~ 10% (质量分数) 碱水 → 热油	61 ~ 64	防止软点, 上限温度 (800 ~ 840 $^{\circ}\text{C}$) 多用于大中型模具
	790 ~ 840	熔融硝酸盐 170 ~ 200 $^{\circ}\text{C}$ × 3 ~ 5min → 空气	60 ~ 64	多用于有效尺寸 < 8mm 的形状复杂小型模具
		熔融碱中加 4% ~ 6% 水, 150 ~ 200 $^{\circ}\text{C}$ × 3 ~ 5min → 空气	60 ~ 64	多用于有效尺寸 10 ~ 12mm

表 2-21 为碳素工具钢的淬火冷却方法及适用范围, 仅供参考。

表 2-21 碳素工具钢的淬火冷却方法及适用范围

冷却方法	常用淬火冷却介质 (质量分数)	介质温度/ $^{\circ}\text{C}$	停留时间	适用范围
单介质淬火	4% ~ 5% NaOH 水溶液, 5% ~ 10% NaCl 水溶液	≤ 40	1s/3 ~ 5mm	有效尺寸 > 12mm、形状简单的模具
	L-AN15 或 L-AN32 全损耗系统用油	20 ~ 120	冷至 150 $^{\circ}\text{C}$ 以下	有效尺寸 < 5mm 的模具

(续)

冷却方法	常用淬火冷却介质(质量分数)	介质温度/℃	停留时间	适用范围
双介质淬火	水溶液—油	—	1s/4 ~ 7mm	有效尺寸 > 12mm、形状复杂的模具
	水溶液—硝酸盐浴(或碱浴)	—	1s/3 ~ 6mm	有效尺寸 > 12mm、形状复杂的模具
马氏体分级淬火	50% KNO ₃ + 50% NaNO ₂	150 ~ 200	2 ~ 10min	有效尺寸 < 12mm、形状复杂的模具
	85% KOH + 15% NaNO ₂ + 3% H ₂ O(占总量)	150 ~ 180	2 ~ 10min	有效尺寸 < 12mm、形状复杂的模具
贝氏体等温淬火	硝酸盐浴	150 ~ 200	20 ~ 40min	有效尺寸 < 12mm、形状复杂的模具
	碱浴	150 ~ 180	20 ~ 60min	有效尺寸 < 12mm、形状复杂的模具

2) 回火。冷作模具钢淬火后应立即回火。回火温度通常为 160 ~ 180℃，硬度为 58 ~ 63HRC。回火时间根据模具钢种类和零件尺寸大小而定，一般碳素工具钢与低合金工具钢的回火时间为 90 ~ 180min，高合金模具钢的回火时间为 120 ~ 180min。常用冷作模具用碳素工具钢的回火温度及硬度见表 2-22。

表 2-22 常用冷作模具用碳素工具钢的回火温度及硬度

牌 号	淬火硬度 HRC	回火温度/℃					
		100	200	300	400	500	600
		回火硬度 HRC					
T7A	62 ~ 64	62	60	51.5	43	33	22
T8A	62 ~ 64	62	60	53	44	38	27
T9A	62 ~ 64	62	60	55	46	36	27
T10A、T11A	63 ~ 64	63	61	54	47	38.5	28
T12A、T13A	64	64	60	54	48	38	—

注：780℃水淬，回火 2h。

2. 冷作模具用高碳低合金钢的热处理工艺

冷作模具用高碳低合金钢主要有：8Cr2MnWMoVS、6CrNiMnSiMoV（GD）、Cr2Mn2SiWMoV、W、4CrW2Si、5CrW2Si、6CrW2Si、8MnSi、6SiMnV、7CrSiMnMoV（CH-1）、6CrMnSi2Mo1V、5Cr3Mn1SiMo1V 和 Cr06 等。这类钢主要用于制作形状复杂、截面较大、承受负荷较大及变形较小的中、小型冷作模具。

(1) 预备热处理

1) 正火规范。冷作模具用高碳低合金钢正火的目的主要是细化过热钢的晶粒和消除网状碳化物,降低硬度,利于切削加工,为最终热处理作好组织准备。几种冷作模具用高碳低合金钢的正火规范见表 2-23。

表 2-23 几种冷作模具用高碳低合金钢的正火规范

牌 号	$A_{c_{cm}}/^{\circ}\text{C}$	正火温度/ $^{\circ}\text{C}$	硬度 HBW
9SiCr	870	900 ~ 920	321 ~ 415
9Mn2V	765	860 ~ 880	—
9CrWMn	900	880 ~ 900	302 ~ 388
CrWMn	940	970 ~ 990	388 ~ 514
GCr15	900	930 ~ 950	302 ~ 388
Cr2	900	930 ~ 950	302 ~ 388
60Si2Mn	810	830 ~ 860	≤ 254
Cr06	950	860 ~ 880	269 ~ 341

2) 球化退火。冷作模具用高碳低合金钢毛坯成批等温球化退火工艺规范见表 2-24。

表 2-24 冷作模具用高碳低合金钢毛坯成批等温球化退火工艺规范

牌 号	加热温度 $\times$ 保温时间	等温温度 $\times$ 保持时间	硬度 HBW	显 微 组 织
9SiCr	790 ~ 810 $^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 3\text{h}$	700 ~ 720 $^{\circ}\text{C} \times 3 \sim 4\text{h}$	≤ 229	珠光体 2 ~ 5 级,碳化物网 ≤ 2 级
9Mn2V	760 ~ 780 $^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$	680 ~ 700 $^{\circ}\text{C} \times 4 \sim 5\text{h}$	≤ 229	
9CrWMn	780 ~ 800 $^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 3\text{h}$	670 ~ 720 $^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 3\text{h}$	≤ 229	
CrWMn	780 ~ 800 $^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 3\text{h}$	690 ~ 710 $^{\circ}\text{C} \times 3 \sim 4\text{h}$	≤ 241	
6CrWMoV	820 ~ 840 $^{\circ}\text{C} \times 1 \sim 3\text{h}$	680 ~ 700 $^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 4\text{h}$	—	—
GCr15	770 ~ 790 $^{\circ}\text{C} \times 1 \sim 2\text{h}$	680 ~ 700 $^{\circ}\text{C} \times 4 \sim 5\text{h}$	187 ~ 229	—
Cr2	780 ~ 800 $^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 3\text{h}$	690 ~ 710 $^{\circ}\text{C} \times 3 \sim 4\text{h}$	≤ 229	珠光体 2 ~ 5 级,碳化物网 ≤ 2 级
60Si2Mn	快速球化退火:850 $^{\circ}\text{C}$ 加热油淬;等温球化退火:790 $^{\circ}\text{C} \times 25\text{min}$;急冷到 680 $^{\circ}\text{C}$,保温 1h,炉冷至 500 $^{\circ}\text{C}$ 出炉			球状珠光体
8Cr2MnWMoVS	790 ~ 810 $^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$	700 ~ 720 $^{\circ}\text{C} \times 5 \sim 9\text{h}$	207 ~ 229	共晶碳化物 ≤ 3 级
6CrNiMnSiMoV	760 ~ 780 $^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 4\text{h}$	680 ~ 700 $^{\circ}\text{C} \times 3 \sim 5\text{h}$	≤ 229	
Cr2Mn2SiWMoV	780 ~ 800 $^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 3\text{h}$	700 ~ 720 $^{\circ}\text{C} \times 9\text{h}$	≤ 269	—
W	770 ~ 790 $^{\circ}\text{C} \times 1 \sim 2\text{h}$	680 ~ 700 $^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 3\text{h}$	≤ 229	—
4CrW2Si	一般退火:800 ~ 820 $^{\circ}\text{C} \times 3 \sim 5\text{h}$,炉冷至 550 $^{\circ}\text{C}$ 以下空冷		179 ~ 217	粒状珠光体 + 少量碳化物
5CrW2Si	一般退火:800 ~ 820 $^{\circ}\text{C} \times 3 \sim 5\text{h}$,炉冷至 550 $^{\circ}\text{C}$ 以下空冷		207 ~ 255	粒状珠光体 + 少量碳化物

(续)

牌 号	加热温度 × 保温时间	等温温度 × 保持时间	硬度 HBW	显 微 组 织
6CrW2Si	一般退火: 800 ~ 820℃ × 3 ~ 5h, 炉冷至 550℃ 以下空冷		229 ~ 285	粒状珠光体 + 少量碳化物
Cr06	780 ~ 800℃ × 2 ~ 4h	680 ~ 700℃ × 3 ~ 5h	≤207	—
8MnSi	740 ~ 760℃ × 2 ~ 3h	680 ~ 700℃ × 4 ~ 5h	≤229	—
7CrSiMnMoV	820 ~ 840℃ × 2 ~ 4h	680 ~ 700℃ × 3 ~ 5h	217 ~ 241	共晶碳化物 ≤3 级
6CrMnSi2Mo1V	760 ~ 780℃ × 2 ~ 4h	680 ~ 700℃ × 3 ~ 5h	≤229	—
5Cr3Mn1SiMo1V	800 ~ 820℃ × 2 ~ 3h	700 ~ 720℃ × 4 ~ 6h	≤229	—

(2) 最终热处理 冷作模具用高碳低合金钢常用的淬火、回火工艺规范见表 2-25。

表 2-25 冷作模具用高碳低合金钢常用的淬火、回火工艺规范

牌 号	淬火温度/℃	冷 却 方 法	淬火硬度 HRC	回火温度/℃	回火硬度 HRC	用 途
9SiCr	860 ~ 880	油	62 ~ 65	160 ~ 180	61 ~ 63	用于制造简单模具
		热油(80 ~ 140℃)→空气	62 ~ 65			用于制造较复杂的小型模具
		熔融的硝盐或碱(150 ~ 200℃)中 3 ~ 5min→空气	61 ~ 63			用于制造复杂模具
		熔融的硝盐或碱(150 ~ 200℃)中 30 ~ 60min→空气	59 ~ 62	160 ~ 180	≥58	用于制造复杂模具
9Mn2V	760 ~ 780	冷油或热油	≥62	150 ~ 200	≥58	用于制造小型模具
	790 ~ 820	碱浴	≥62	150 ~ 200	≥58	用于制造中型模具
9CrWMn	820 ~ 840	油、碱浴	64 ~ 66	160 ~ 180	≥61	用于制造中型模具
CrWMn	820 ~ 840	油	63 ~ 65	170 ~ 200	60 ~ 62	用于制造中型模具
		热油(90 ~ 140℃)→空气	63 ~ 65	170 ~ 200	60 ~ 62	用于制造较复杂模具
	830 ~ 850	熔融的硝盐或碱(150 ~ 160℃)中 3 ~ 5min→空气	62 ~ 64	170 ~ 200	60 ~ 62	用于制造复杂模具
6CrWMoV	860 ~ 920	油冷	≥62	160 ~ 200	58 ~ 62	用于制造耐冲击及耐磨性高的模具
GCr15、Cr2	830 ~ 850	油冷	62 ~ 65	150 ~ 190	58 ~ 62	用于制造厚度 < 20mm 的模具
		碱浴	62 ~ 65	150 ~ 190	58 ~ 62	用于制造厚度为 20 ~ 60mm 的模具
	810 ~ 840	碱水或喷水	62 ~ 65	150 ~ 190	58 ~ 62	用于制造大中型重载模具

(续)

牌 号	淬火温度/℃	冷 却 方 法	淬火硬度 HRC	回火温度/℃	回火硬度 HRC	用 途
60Si2MnA	860 ~ 880	热油	60 ~ 62	200 ~ 350	≥58	用于制造厚度为 15 ~ 20mm 的模具
		碱浴或碱水	60 ~ 62	200 ~ 350	≥58	用于制造大中型模具
8Cr2MnWMoVS	860 ~ 900	正常淬火工艺: 油冷或空冷	62 ~ 64	160 ~ 200	60 ~ 64	用于制造精密冲模具
				550 ~ 650	40 ~ 48	用于制造塑料模具
	860 ~ 880	预硬型钢淬火: 油淬或空冷	62 ~ 63	620	44 ~ 46	用于制造形状复杂或精度要求高的模具
6CrNiMnSiMoV	870 ~ 930	油冷	62 ~ 64	175 ~ 230	60 ~ 62	用于制造高强度韧性冷作模具
	870	等温淬火: 淬火温度 870℃; 等温: 260℃ × 1.5h		180 ~ 200	—	防止模具开裂, 提高韧性
Cr2Mn2SiWMoV	850 ~ 870	空气	60 ~ 63	180 ~ 200	60 ~ 62	用于制造精密模具
	830 ~ 850	油	60 ~ 63	180 ~ 200	60 ~ 62	用于制造微变形模具
W	800 ~ 820	水冷	62 ~ 64	160 ~ 180	59 ~ 61	用于制造冲头和冷剪切模具
4CrW2Si	860 ~ 900	油冷	≥53	200 ~ 250	53 ~ 58	消除内应力及稳定组织
				430 ~ 470	45 ~ 50	降低硬度及消除内应力
5CrW2Si	860 ~ 900	油冷	≥55	200 ~ 250	53 ~ 58	消除内应力及稳定组织
				430 ~ 470	45 ~ 50	降低硬度及消除内应力
6CrW2Si	860 ~ 900	油冷	≥57	200 ~ 250	53 ~ 58	消除内应力及稳定组织
				430 ~ 470	45 ~ 50	降低硬度及消除内应力
Cr06	780 ~ 800	水→油	62 ~ 64	160 ~ 180	60 ~ 62	用于制造厚度 ≥15mm 的模具
		3% Na ₂ CO ₃ 碱水或 5% NaCl 水溶液→油	62 ~ 64			
	800 ~ 820	油→空气	62 ~ 64			用于制造厚度 < 15mm 的模具
8MnSi	780 ~ 800	水→油	62 ~ 65	160 ~ 180	60 ~ 62	用于制造简单冷锻模
	800 ~ 820	油冷	62 ~ 64	160 ~ 180	60 ~ 62	用于制造冲孔模
		熔融硝盐 (160 ~ 180℃) → 空气	62 ~ 64	160 ~ 180	60 ~ 62	用于制造复杂模具
7CrSiMnMoV (CH-1)	860 ~ 920	整体淬火: 860 ~ 920℃ 加热, 油冷	62 ~ 63	180 ~ 200	58 ~ 62	用于制造整体淬火的大型模具

(续)

牌 号	淬火温度/℃	冷 却 方 法	淬火硬度 HRC	回火温度/℃	回火硬度 HRC	用 途
7CrSiMnMoV (CH-1)	900 ~ 1 000	火焰淬火; 预热 180 ~ 200℃ × 2h, 火焰淬火加热: 900 ~ 1 000℃, 空冷	61 ~ 63	180 ~ 200	58 ~ 62	用于制造多孔位冲模及复杂型腔模具的零件、刃口
6CrMnSi2Mo1V	885 ~ 900	油冷	≥58	160 ~ 180	58 ~ 60	用于制造冲模和冲裁模
5Cr3Mn1SiMo1V	940 ~ 955	空冷或油冷	≥56	160 ~ 180	56 ~ 58	用于制造锤锻模和冲模

3. 高耐磨冷作模具钢的热处理工艺

高耐磨冷作模具钢主要有: Cr12、Cr12MoV、Cr12Mo1V1、Cr12W、Cr12V、Cr4W2MoV、Cr5Mo1V、Cr6WV、7Cr7Mo2V2Si (LD)、Cr8MoWV3Si (ER5)、9Cr6W3Mo2V2 (GM) 等。这类钢主要用于制造高耐磨、微变形、高负荷条件下工作的冷加工模具。

(1) 预备热处理 高耐磨冷作模具钢预备热处理通常采用球化退火工艺。表 2-26 为高耐磨冷作模具钢毛坯成批等温球化退火工艺规范。

表 2-26 高耐磨冷作模具钢毛坯成批等温球化退火工艺规范

牌 号	加热温度 × 保温时间	等温温度 × 保持时间	硬度 HBW	显微组织
7Cr7Mo2V2Si	840 ~ 860℃ × 2 ~ 3h	700 ~ 720℃ × 4 ~ 6h	≤220	铁素体 + 球化碳化物
Cr12	830 ~ 850℃ × 2 ~ 3h	720 ~ 740℃ × 4 ~ 5h	≤269	粒状珠光体 + 碳化物
Cr12MoV	850 ~ 870℃ × 2 ~ 3h	720 ~ 750℃ × 4 ~ 5h	≤241	细珠光体 + 碳化物
Cr4W2MoV	850 ~ 870℃ × 3 ~ 6h	750 ~ 770℃ × 7 ~ 8h	≤269	—
Cr6WV	830 ~ 850℃ × 2 ~ 4h	700 ~ 720℃ × 3 ~ 5h	≤229	细粒状珠光体 + 碳化物
Cr12V	850 ~ 870℃ × 1 ~ 2h	720 ~ 750℃ × 4 ~ 5h	207 ~ 255	—
Cr12Mo	870 ~ 890℃ × 2 ~ 4h	720 ~ 740℃ × 4 ~ 5h	217 ~ 255	—
Cr5Mo1V	830 ~ 850℃ × 2h	710 ~ 730℃ × 3 ~ 5h	≤248	—
Cr8MoWV3Si	850 ~ 870℃ × 2h	750 ~ 770℃ × 5h	200 ~ 240	—
9Cr6W3Mo2V2	850 ~ 870℃ × 3h	730 ~ 750℃ × 5 ~ 6h	205 ~ 228	—
Cr12Mo1V1	840 ~ 860℃ × 2h	720 ~ 740℃ × 5h	207 ~ 255	—

(2) 最终热处理 高耐磨冷作模具钢常用的淬火、回火工艺规范见表 2-27。

表 2-27 高耐磨冷作模具钢常用的淬火、回火工艺规范

牌 号	淬火温度/℃	冷却方法	淬火硬度 HRC	回火工艺	回火后硬度 HRC	用 途
7Cr7Mo2V2Si	1 100 ~ 1 150	油冷或空冷	60 ~ 61	530 ~ 540℃ 回火 2 ~ 3 次	58 ~ 62	用于制造承受高负荷的冷挤压模、冷锻模和冲模

(续)

牌 号	淬火温度/℃	冷却方法	淬火硬度 HRC	回火工艺	回火后硬度 HRC	用 途
7Cr7Mo2V2Si	1 050 ~ 1 080	低温淬火低温回火工艺;油冷	≥60	180 ~ 220℃ 回火 2 次	58 ~ 60	用于制造承受冲击载荷且形状复杂的冷镦冲头
Cr12	950 ~ 980	油冷	≥60	180 ~ 200℃ 回火	≥60	用于制造冷作模具
				400℃ 回火	54 ~ 58	预防电火花、线切割裂纹及磨削裂纹
Cr12MoV	1 020 ~ 1 040	油冷	62 ~ 63	150 ~ 170℃ 回火	61 ~ 63	消除残余应力;用于制造截面大、形状复杂及经受较大冲击的模具
		熔融硝酸盐 (400 ~ 550℃) × 5 ~ 10min → 空冷	62 ~ 63			
	1 115 ~ 1 130	油冷	42 ~ 50	510 ~ 520℃ 多次回火	60 ~ 61	去残余应力及形成二次硬化;用于制造要求热硬性及高耐磨性的模具
		熔融硝酸盐 (400 ~ 450℃) × 5 ~ 10min → 空冷	42 ~ 50			
Cr4W2MoV	960 ~ 980	油冷或空冷	≥62	280 ~ 300℃ × 1h, 回火 3 次	60 ~ 62	用于制造冲模、冷镦模、落料模和冷挤凹模
	1 020 ~ 1 040	油冷或空冷	≥62	500 ~ 540℃ × 1h, 回火 3 次	60 ~ 62	
Cr6WV	950 ~ 970	油冷	62 ~ 64	150 ~ 170℃ 回火	62 ~ 63	用于制造要求耐磨及耐冲击的模具
	990 ~ 1 010	熔融硝酸盐或碱 (400 ~ 450℃) × 3 ~ 10min → 空冷	62 ~ 64	190 ~ 210℃ 回火	58 ~ 60	用于制造形状复杂、耐冲击的模具
Cr12V	1 060 ~ 1 080	油冷	62 ~ 64	150 ~ 170℃ 回火	62 ~ 64	用于制造要求高耐磨、微变形及承受高负荷的模具
				190 ~ 210℃ 回火	58 ~ 60	
		熔融硝酸盐 (400 ~ 550℃) × 5 ~ 10min → 空冷	62 ~ 64	150 ~ 170℃ 回火	62 ~ 64	用于制造形状复杂的冷作模具
				190 ~ 210℃ 回火	58 ~ 60	

(续)

牌 号	淬火温度/℃	冷却方法	淬火硬度HRC	回火工艺	回火后硬度 HRC	用 途
Cr12Mo	980 ~ 1 050	油冷	62 ~ 64	160 ~ 180℃ 回火 2 次	60 ~ 62	用于制造要求高耐磨、微变形及承受高负荷的模具
				400 ~ 450℃ 回火 2 次	50 ~ 60	
	1 100 ~ 1 120	高温淬火;油冷	40 ~ 50	500 ~ 520℃ 回火 3 次	60	
Cr5Mo1V	940 ~ 960	空冷或油冷	62 ~ 63	180 ~ 220℃ 回火	60 ~ 64	用于制造下料模、压延模和滚丝模
	980 ~ 1 010	空冷或油冷	62 ~ 63	510 ~ 520℃ 回火 2 次	57 ~ 60	
Cr8MoWV3Si	1 150	油冷	63. 5	520 ~ 530℃ 回火 3 次	62 ~ 64	用于制造要求高耐磨性、韧性的模具
	1 120 ~ 1 130	油冷	63. 5	550℃ 回火 3 次	62 ~ 64	用于制造要求重载的模具
9Cr6W3Mo2V2	1 080 ~ 1 120	油冷	64 ~ 66	540 ~ 560℃ 回火 2 次	≥64	用于制造高速压力机用级进模等
Cr12Mo1V1	980 ~ 1 040	油冷或空冷	60 ~ 65	180 ~ 230℃ 回火	60 ~ 64	用于制造要求高精度、长寿命的冷作模具
				510 ~ 540℃ 回火 2 次		
	1 060 ~ 1 100	油冷或空冷	60 ~ 65	180 ~ 230℃ 回火	60 ~ 64	
				510 ~ 540℃ 回火 2 次		

4. 冷作模具用高速工具钢的热处理工艺

冷作模具用高速工具钢主要有：W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、W9Mo3Cr4V、W12Mo3Cr4V3N、6W6Mo5Cr4V 等。这类钢主要用于制造要求重载荷、高寿命的冷作模具等。

(1) 预备热处理 冷作模具用高速工具钢预备热处理通常采用等温球化退火工艺。表 2-28 为冷作模具用高速工具钢毛坯成批等温球化退火工艺规范，供参考。

表 2-28 冷作模具用高速工具钢毛坯成批等温球化退火工艺规范

牌 号	加热温度×保温时间	等温温度×保持时间	硬度 HBW
W18Cr4V	860 ~ 880℃ ×2 ~ 4h	740 ~ 760℃ ×4 ~ 6h	≤255
W6Mo5Cr4V2	840 ~ 860℃ ×2 ~ 4h	740 ~ 760℃ ×4 ~ 6h	≤255

(续)

牌 号	加热温度 × 保温时间	等温温度 × 保持时间	硬度 HBW
W9Mo3Cr4V	830 ~ 850℃ × 3 ~ 4h	740 ~ 760℃ × 4 ~ 6h	—
W12Mo3Cr4V3N	840 ~ 860℃ × 3 ~ 4h	740 ~ 750℃ × 4 ~ 6h	≤285
6W6Mo5Cr4V	850 ~ 860℃ × 2 ~ 4h	740 ~ 750℃ × 4 ~ 6h	197 ~ 229

(2) 最终热处理 冷作模具用高速工具钢淬火加热前均需要进行 1 ~ 2 次的预热。回火时间根据模具钢种类和零件尺寸大小而定。因高速工具钢淬火后残留奥氏体过多, 故需经 500 ~ 600℃ 的 3 次回火才能使残留奥氏体转变为马氏体, 并产生最佳的二次硬化效应。表 2-29 为冷作模具用高速工具钢常用的淬火、回火工艺规范。

表 2-29 冷作模具用高速工具钢常用的淬火、回火工艺规范

牌 号	淬火温度 /℃	冷 却 方 法	淬火硬度 HRC	回火工艺	回火后硬度 HRC	用 途
W18Cr4V	1 200 ~ 1 240	油冷或分级淬火	62 ~ 64	560 ~ 580℃ 回火 3 次	≥62	重载冲头和冷挤压模
W6Mo5Cr4V2	1 150 ~ 1 200	油冷	62 ~ 64	560℃ 回火 3 次	62 ~ 66	冷挤压模
W9Mo3Cr4V	1 160 ~ 1 200	油冷	58 ~ 64	560℃ × 1 ~ 1.5h, 回火 3 次	58 ~ 64	承受高负荷的冷挤压模
W12Mo3Cr4V3N	1 220 ~ 1 280	油冷	66 ~ 68	550 ~ 570℃ × 1h, 回火 4 次	≥65	冷作模具
6W6Mo5Cr4V	1 180 ~ 1 200	油、空气或熔融盐	约 58	560 ~ 580℃ × 1h, 回火 3 次	58 ~ 63	冷挤压模和拉深模具

5. 冷作模具用基体钢的热处理工艺

冷作模具用基体钢主要有: 6Cr4W3Mo2VNb (65Nb)、5Cr4Mo3SiMnVAl (012Al)、6Cr4Mo3Ni2WV (CG-2)、6W8Cr4VTi (LM1)、6Cr5Mo3W2VSiTi (LM2)、5Cr4Mo2W2SiV、5Cr4W5Mo2V (RM2) 等。这类钢主要用于制造要求高负荷、高速耐冲击的冷、热变形模具等。

(1) 预备热处理 冷作模具用基体钢预备热处理通常采用等温球化退火工艺。表 2-30 为冷作模具用基体钢毛坯成批等温球化退火工艺规范。

表 2-30 冷作模具用基体钢毛坯成批等温球化退火工艺规范

牌 号	加热温度 × 保温时间	等温温度 × 保持时间	硬度 HBW	显 微 组 织
6Cr4W3Mo2VNb(65Nb)	850 ~ 870℃ × 4 ~ 5h	730 ~ 750℃ × 6 ~ 7h	≤241	球状珠光体, 共晶碳化物 ≤3 级
5Cr4Mo3SiMnVAl(012Al)	850 ~ 870℃ × 5h	710 ~ 720℃ × 7h	≤229	—

(续)

牌 号	加热温度 × 保温时间	等温温度 × 保持时间	硬度 HBW	显 微 组 织
6Cr4Mo3Ni2WV(CG-2)	800 ~ 820℃ × 2 ~ 3h	650 ~ 670℃ × 5 ~ 7h	≤255	—
6W8Cr4VTi(LM1)	840 ~ 860℃ × 2 ~ 4h	740 ~ 750℃ × 5 ~ 7h	≤255	—
6Cr5Mo3W2VSiTi(LM2)	850 ~ 870℃ × 2 ~ 3h	730 ~ 750℃ × 5 ~ 7h	≤241	粒状珠光体
5Cr4Mo2W2SiV	880 ~ 900℃ × 2 ~ 4h	750 ~ 780℃ × 9 ~ 12h	≤207	—
5Cr4W5Mo2V(RM2)	850 ~ 870℃ × 2 ~ 3h	720 ~ 740℃ × 4 ~ 5h	≤255	—

(2) 最终热处理 冷作模具用基体钢高温淬火加热前，需根据钢材及具体情况进行预热处理。冷作模具用基体钢淬火、回火工艺规范见表2-31。回火时间根据模具钢种类和零件尺寸大小而定。

表 2-31 冷作模具用基体钢的淬火、回火工艺规范

牌 号	淬火温度 /℃	冷却方法	淬火硬度 HRC	回 火 工 艺	回火后硬度 HRC	用 途
6Cr4W3Mo2VNb (65Nb)	1 080 ~ 1 120	油冷	≥61	540 ~ 580℃ × 1 ~ 2h, 回火 2 次	≥56	受挤压力大、要求韧性好的模具
	1 180 ~ 1 190	油冷	≥61	540 ~ 580℃ × 1 ~ 2h, 回火 2 次	≥56	要求耐磨性高的模具
	1 120 ~ 1 160	油冷	≥61	540 ~ 580℃ × 1 ~ 2h, 回火 2 次	≥56	要求高负荷、高速耐冲击的模具
5Cr4Mo3SiMnVAI (012Al)	1 090 ~ 1 120	油冷	61 ~ 62	510℃ × 2h, 回火 1 次	60 ~ 62	要求综合性能、高强韧性的冷作模具
				580 ~ 600℃ × 2h, 回火 2 次	52 ~ 54	热作模具
	1 120 ~ 1 140	油冷	62	620 ~ 630℃ × 2h, 回火 2 次	42 ~ 44	压铸模具
6Cr4Mo3Ni2WV (CG-2)	1 100 ~ 1 140	油冷	62. 5	560℃回火 2 次	60 ~ 61	冷挤压模、冲模和冷墩模
	1 120 ~ 1 180	油冷	61. 5 ~ 63	630℃回火 2 次	51 ~ 53	热作模具
6W8Cr4VTi	1 190 ~ 1 210	油冷	62 ~ 64	560 ~ 580℃ × 1. 5h, 回火 3 次	58 ~ 64	大型复杂模具、冷挤压模和厚板冲模
6Cr5Mo3W2VSiTi (LM2)	1 100 ~ 1 150	油冷	≥61	520 ~ 540℃ × 1 ~ 2h, 回火 2 次	60 ~ 62	要求韧性的冷作模具
	1 170 ~ 1 190	油冷	≥61	530 ~ 560℃ × 1 ~ 2h, 回火 2 次	60 ~ 62	要求耐磨性高的冷作模具

(续)

牌 号	淬火温度 /℃	冷却 方法	淬火硬度 HRC	回 火 工 艺	回火后硬度 HRC	用 途
5Cr4Mo2W2SiV	1 080 ~ 1 120	油冷	61 ~ 63	600 ~ 620℃ 回火 2h	52 ~ 54	要求韧性好的冷锻模 具
5Cr4W5Mo2V	1 130 ~ 1 140	油冷	58 ~ 60	600 ~ 630℃ × 2h, 回火 2 次	50 ~ 56	精锻模、辊锻模和冲 头

6. 冷作模具用无磁性模具钢的热处理工艺

冷作模具用无磁性模具钢包括高锰系奥氏体钢和奥氏体不锈钢。高锰系奥氏体钢主要有：7Mn15Cr2Al3V2WMo（7Mn15）、5Mn15Cr8Ni5Mo3V2（5Mn15）和7Mn10Cr8Ni10Mo3V2（7Mn10），这类钢适于制造无磁性模具；奥氏体不锈钢主要为12Cr18Ni9，其适宜制造无磁性模具和要求耐蚀性的塑料模具等。

（1）预备热处理 冷作模具用无磁性模具钢预备热处理通常采用高温退火工艺。表 2-32 为冷作模具用无磁性模具钢毛坯高温退火工艺规范。

表 2-32 冷作模具用无磁性模具钢毛坯高温退火工艺规范

牌 号	加热温度×保温时间,冷却方式	硬度 HRC	显 微 组 织
7Mn15Cr2Al3V2WMo (7Mn15)	高温退火:870 ~ 890℃ × 3 ~ 6h, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷	28 ~ 30	细晶粒状奥氏体 + 均布颗 粒状碳化物
5Mn15Cr8Ni5Mo3V2 (5Mn15)	高温退火:870 ~ 890℃ × 3 ~ 6h, 炉冷至 500℃ 以下空冷	≤30	细晶粒状奥氏体 + 均布颗 粒状碳化物
7Mn10Cr8Ni10Mo3V2 (7Mn10)	高温退火:870 ~ 890℃ × 3 ~ 6h, 炉冷至 500℃ 以下空冷	28 ~ 30	细晶粒状奥氏体 + 均布颗 粒状碳化物

（2）最终热处理 冷作模具用无磁性模具钢的热处理工艺规范见表 2-33，供参考。

表 2-33 冷作模具用无磁性模具钢的热处理工艺规范

牌 号	热处理工艺规范	金相组织及用途
7Mn15Cr2Al3V2WMo (7Mn15)	固溶处理:1 150 ~ 1 180℃,保温时间:盐浴炉为 15 ~ 20min/mm,空气炉为 30min/mm;水冷,固溶硬度 20 ~ 22HRC	金相组织为奥氏体 + 未溶一次碳化物
	时效处理:650℃ × 20h,硬度为 48HRC,或 700℃ × 2h,硬度为 48.5HRC	用于制造无磁性模具零件
	气体氮碳共渗:560 ~ 570℃ × 4 ~ 6h,渗层深 0.03 ~ 0.04mm,渗层硬度 950 ~ 1 100HV	用于制造要求无磁性及耐 腐蚀的模具

(续)

牌 号	热处理工艺规范	金相组织及用途
12Cr18Ni9	固溶处理:1 050 ~ 1 150℃,水冷	金相组织为奥氏体
	淬火时效:800℃ × 10h 或 700℃ × 20h	金相组织为奥氏体 + 碳化物。用于制造要求无磁性及耐腐蚀的模具
5Mn15Cr8Ni5Mo3V2 (5Mn15)	固溶处理:1 150 ~ 1 180℃,水淬,硬度为 18 ~ 25HRC 时效处理:700℃ × 4h,硬度为 46 ~ 47HRC	适于制造工作应力较高,使用温度超过 700℃,且形状简单的模具,如挤压模
7Mn10Cr8Ni10Mo3V2 (7Mn10)	固溶处理:1 150 ~ 1 180℃,水淬,硬度为 18 ~ 25HRC 时效处理:700℃ × 2h,硬度为 46 ~ 47HRC	用于制造要求无磁性、综合性能较好的冷作模具
	气体氮碳共渗:560 ~ 570℃ × 4 ~ 6h,渗层深 0.03 ~ 0.04mm,渗层硬度 950 ~ 1 100HV	用于制造要求无磁性、表面硬度高和耐腐蚀的模具

7. 冷作模具用钢结硬质合金的热处理工艺

国产模具用钢结硬质合金的主要牌号有：WC（硬质相）型的 TMW50、TLMW50、W50、GW50；TiC（硬质相）型的 GT35、R5、D1、T1 等。钢结硬质合金的性能介于钢和硬质合金之间，既有钢的高强韧性，又有硬质合金的高硬度和高耐磨性。钢结硬质合金可以通过热处理方法来改变其性能，并可以进行各种机械加工和热加工，故更适合制造各种模具，如冷作模具（冷锻模、冷挤压模、冲压模、拉深模及冲裁模等）和热作模具（中温热作模具、热挤压模具等）等。

（1）预备热处理 冷作模具用钢结硬质合金预备热处理通常采用等温退火工艺。表 2-34 为冷作模具用钢结硬质合金毛坯等温退火工艺规范。在进行等温退火时，等温保持 6h 后炉冷至 500℃ 以下出炉空冷即可。

表 2-34 冷作模具用钢结硬质合金毛坯等温退火工艺规范

牌 号	加热温度 × 保温时间	等温温度 × 保持时间	硬度 HRC	显微组织
TMW35	860 ~ 880℃ × 4h	720 ~ 740℃ × 6h	32 ~ 38	弥散度高的 索氏体
TLMW50	860 ~ 880℃ × 4h	720 ~ 740℃ × 6h	35 ~ 40	
GW50	860℃ × 4h	700℃ × 6h	35 ~ 42	
GJW50	840 ~ 850℃ × 4h	720 ~ 730℃ × 6h	35 ~ 38	
GT35	860 ~ 880℃ × 4h	720℃ × 6h	39 ~ 46	
T1、R5	820 ~ 840℃ × 4h	720 ~ 740℃ × 6h	44 ~ 48	

（2）最终热处理 钢结硬质合金有较高的淬透性。对于截面较小且形状不复

杂的模具零件，用油冷即可获得较好的效果；对于截面较大且形状复杂的模具零件，采用分级淬火或等温淬火，可避免开裂和减少变形。回火温度一般取 180 ~ 200℃，保温 1.0 ~ 1.5h，要求较高韧性的模具可采用较高的回火温度。G 型合金（高速工具钢为基体，如 T₁、D₁）的回火温度取 500 ~ 560℃，回火 3 次。冷作模具用钢结硬质合金淬火、回火工艺规范见表 2-35。

表 2-35 冷作模具用钢结硬质合金的淬火、回火工艺规范

牌 号	淬火加热温度/℃	淬火硬度 HRC	回火温度/℃	回火硬度 HRC
TMW35	1 020 ~ 1 050	68	180 ~ 200	64 ~ 66
TLMW50	1 020 ~ 1 050	68 ~ 70	200	66 ~ 68
			500	63 ~ 64
GW50	1 050 ~ 1 100	68 ~ 72	180 ~ 200	68 ~ 70
GJW50	1 020	70	180 ~ 200	67
GT35	960 ~ 980	69 ~ 72	180 ~ 200	67 ~ 71
			400 ~ 500	61 ~ 64
R5	1 000 ~ 1 050	70 ~ 73	200	68 ~ 69
			450 ~ 500	67 ~ 70
T1	1 240	68 ~ 72	500℃ × 1h, 回火 3 次	70 ~ 72
D1	1 220 ~ 1 240	69 ~ 73	500℃ × 1h, 回火 3 次	66 ~ 69

8. 冷作模具用硬质合金

硬质合金是用难熔金属的高硬度碳化物粉末与粘结金属粉末混合后加压成形，再经烧结而成的合金材料。冷作模具用硬质合金主要用来制造拉丝模具和冷挤压模具等。模具用硬质合金的常用牌号有 YG 类的 YG15、YG20、YG20C、YG25、YG30、YG6、YG8A、YG8C 和 YG11C 等。YG 类硬质合金是以高熔点、高硬度的金属碳化钨为硬质相，以钴为粘结相，加压成形后再经烧结而成的一种合金材料。YG 类硬质合金模具（如顶锻模、冲压模、冲裁模、拉深模、冷镦模、冷镦组合凸模及凹模等）或模具镶块的使用寿命比一般工模具高几倍到几十倍。该类模具的优点是直接烧结成形，无需机械加工和热处理；缺点是价格较高，成形困难，韧性差且容易脆裂。

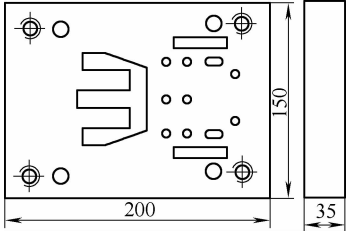
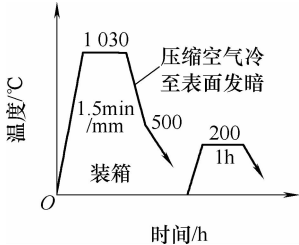
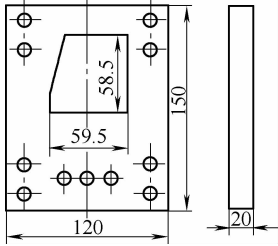
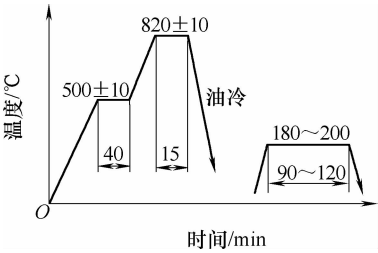
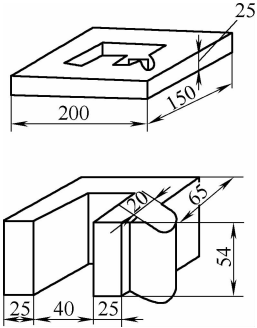
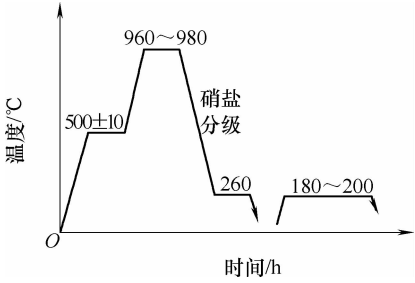
2.2.5 典型冷作模具热处理实例

实例 1 部分冷作模具热处理实例见表 2-36。精密及性能要求较高的模具，应在保护气氛或真空炉中热处理。

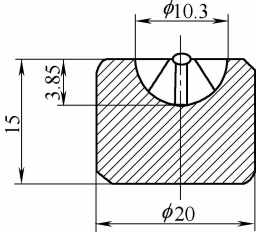
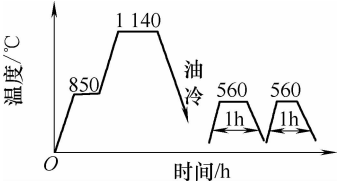
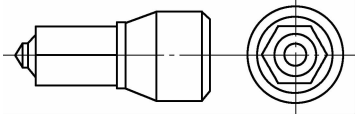
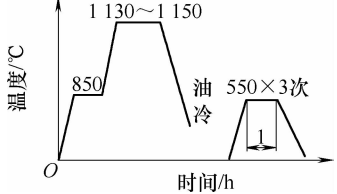
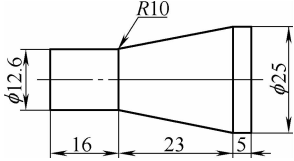
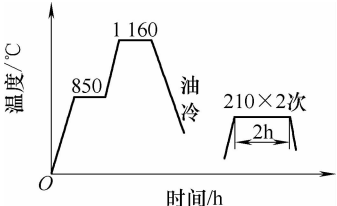
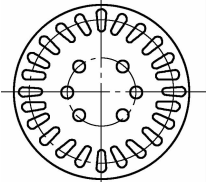
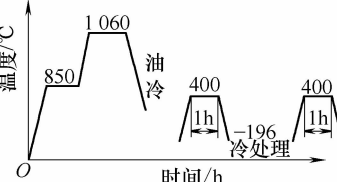
表 2-36 部分冷作模具热处理实例

模具名称	模具材料	模具简图	热处理工艺	备 注
凹 模	T8A			碱水-硝盐复合分级淬火。刃口硬度 59 ~ 62HRC, 其余硬度 50 ~ 55HRC
碳素 工具 钢薄 板冲 模 (小 型)	T10A			低温淬火、低温回火微变形处理
冲 裁 模	9Mn2V			热油淬, 型腔尺寸基本无变化, 硬度为 58 ~ 62HRC, 总寿命高 (42 万件)

(续)

模具名称	模具材料	模具简图	热处理工艺	备 注
凹模	Cr12MoV			风冷、空冷淬火,适于截面厚 20 ~ 30mm 的 Cr12 及 50 ~ 60mm 的 Cr12MoV 钢
落料凹模	CrWMn			落料凹模淬火及回火后硬度为 58 ~ 62HRC
落料凸模和凹模	Cr12			凸、凹模分级淬火及回火后 58 ~ 62HRC

(续)

模具名称	模具材料	模具简图	热处理工艺	备 注
十字 槽螺 钉光 冲模	6Cr4W3Mo2VNb (65Nb)			淬火及回火后硬度为 59 ~ 60HRC, 冲制 M6 螺钉寿命平均 8 万件
六角 螺母 冲头	7Cr7Mo2V2Si (LD)			淬火及回火后硬度为 60HRC, 冲制 M12 螺母寿命平均 7.8 万件
汽车 板簧 冲孔 凸模	W6Mo5Cr4V2			淬火及回火后硬度为 60 ~ 62HRC, 冲压 9mm 钢板寿命 1 200 ~ 2 000 次
硅钢 片冲 模	Cr12MoV			热处理后硬度为 60 ~ 62HRC, 冲模刃磨寿命 6 万次

实例2 电机硅钢片冲裁凸模（长度105mm，高度18mm，最大厚度6mm，刃口部位最小厚度4mm），材料为Cr12钢，要求淬火、回火处理。

（1）原工艺路线及其使用寿命 其加工工艺路线为：下料→锻造→退火→机加工→最终热处理→磨削。最终热处理工艺为：950℃淬火+180℃低温回火。使用过程中发生劈裂和折断失效。经分析，Cr12钢属于莱氏体钢，共晶碳化物虽经锻造破碎处理，但仍粗大且有棱角，致使凸模强韧性不足，寿命不高。

（2）改进措施与效果 改用9SiCr钢制造，因其属于低合金工具钢，无共晶碳化物，经球化退火后可以实现碳化物的均匀、圆整，提高了凸模的疲劳强度和韧性，而且凸模最大厚度只有6mm，完全可以淬透。其加工工艺路线为：下料→锻造→球化退火→机加工→最终热处理→磨削。最终热处理为：盐浴炉550℃×12min预热，830~850℃×3min加热后从盐浴中取出，将刃口部位（高度方向）10mm左右放入水中淬火，然后入油冷却，温度低于 M_s 点（160℃）立即取出，将整个凸模放入190℃硝盐浴中进行等温淬火90min，以形成下贝氏体组织（这时凸模刃口部位正好进行低温回火）。经检验，52个凸模无一个出现热处理裂纹。刃口平均硬度64~67HRC。经装机使用，其使用寿命提高了6倍。

实例3 冷冲孔模具（见图2-2），材料为9SiCr钢，要求淬火、回火处理。

（1）常规热处理工艺及其使用寿命 模具淬火加热870℃×45min，低温回火280℃×90min，金相组织为回火马氏体，硬度59~61HRC。模具使用寿命平均1万次。模具失效的主要形式为：崩刃、疲劳断裂（占75%）及磨损（占25%）。

（2）等温淬火工艺及效果 改进工艺为：淬火加热900℃×45min，等温270℃×40min，180℃去应力退火。经检验，金相组织为下贝氏体+马氏体，模具的强韧性和耐磨性均有较大提高，硬度为55~56HRC。其使用寿命可达2万次以上，比常规淬火处理的模具寿命提高了1倍以上。

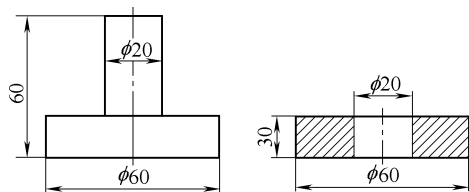


图2-2 冷冲孔模具示意图

2.3 热作模具钢与热处理

热作模具钢（按耐热性分类）主要包括：低耐热高韧性模具钢、中耐热高韧性模具钢、高耐热性模具钢和特殊用途热作模具钢等。

热作模具主要包括热锻模、热镦模、热挤压模、压铸模和高速成形模等。热作模具长时间在反复急冷急热的条件下工作，温度在300~700℃之间，要求能稳定地保持各种力学性能，特别是热强性、热疲劳性和韧性，因此一般选用热导率较高的、碳的质量分数为0.3%~0.6%的合金钢制造，淬火与回火后在500~700℃高温下工作。

热作模具钢需根据被加工金属的种类、负荷大小、使用温度和成形速度等来选用，并制订合理的热处理工艺，以满足热作模具的性能要求，同时最大限度地提高热作模具的使用寿命。

热作模具钢经高温淬火加热，钢中的合金碳化物大量溶入奥氏体中，提高了基体的热强性和热稳定性，同时，相应地提高回火温度，可使组织中板条马氏体的份额大幅度增加，断裂韧度和小能量多冲寿命有所提高。如果加热温度选择适当，则冲击韧度和塑性仍能保持在一定水平上，从而可使热作模具的使用寿命大幅度提高。

等温淬火可防止复杂热作模具的变形和开裂，也可使模具获得满意的综合性能，但要防止钢中出现上贝氏体，特别是大型热作模具，由于温度的波动容易促成上贝氏体的出现，从而产生“上贝氏体脆性”。一般来说，冲击韧度以回火马氏体最高，回火上贝氏体最低。高温冲击韧度和高低温拉伸性能以回火下贝氏体最高，回火马氏体最低。

采用表面化学热处理，如渗氮、氮碳共渗、离子渗氮、多元渗氮、渗硼、渗铬及渗铝等工艺，在一定条件下都可以提高热作模具的热疲劳寿命和抗热磨损性能。另外，也可以选用先进的表面强化技术来提高热作模具的使用寿命。

2.3.1 热作模具的工作条件及要求

热作模具主要用于加热金属或液态金属制品的成形。这类模具可分为机锻模、锤锻模、挤压模和压铸模等。由于其种类很多，工作条件又有很大差别，故对各类热作模具的性能要求也是不同的。

热作模具的工作条件是常与加热到 $950 \sim 1\,200^{\circ}\text{C}$ 的毛坯接触，模膛通常被加热到 $500 \sim 600^{\circ}\text{C}$ （有时可达 $600 \sim 700^{\circ}\text{C}$ ），同时模具的单位面积上要承受很大的压力，锤锻模还要承受 $2\,000\text{MPa}$ 左右的冲击力。由于金属毛坯的剧烈流动，模膛极易磨损，模具还要在反复受热受冷的条件下工作，故热作模具常发生工作部位塌陷、热磨损、热疲劳及断裂等形式的失效。常用热作模具的工作条件和要求如下：

1) 压力机锻模是用各种压力机进行毛坯成形的设备，工作时模具承受载荷近于静态。要求模具具有一定的热强性、冷热疲劳和机械疲劳抗力、断裂韧度等。

2) 锤锻模是用各种吨位锻锤产生巨大的冲击能量进行毛坯变形的设备，毛坯可在短时间内快速成形，模具则承受很大的冲击载荷和热磨损。要求模具具有良好的综合力学性、良好的抗冷热疲劳性和耐高温磨损性等。

3) 热挤压模是将加热到一定温度的金属毛坯挤压成形的设备，模具承受巨大压力、弯矩、拉力以及金属毛坯的摩擦力。要求模具具有好的高温强度、较高的耐热疲劳性和热稳定性、高的耐磨性等。

4) 压铸模是用于液体金属制品成形的设备。要求模具具有耐冷热疲劳性、高温下的强韧性、耐液态金属冲蚀性、较高的耐热性和高的导热性、良好的抗氧化性及耐磨性等。

2.3.2 热作模具材料的性能要求

热作模具的工作条件相当复杂，对于模具材料的特性要求也相当严格，为了满足热作模具的使用要求，热作模具材料应具备以下基本性能：

1) 较高的强度和韧性相配形成的变形抗力和耐冲击力（主要指标：硬度、抗拉强度、冲击韧度），以使模具能够承受较大的变形力和冲击力。

2) 较高的高温强度（主要指标：高温强度、高温抗拉强度、高温抗压强度、高温冲击韧度），以保证模具在高温条件下不发生塌陷、开裂。

3) 良好的耐回火性，以使模具在工作温度下不发生软化；较好的冷、热疲劳性能，以使模具在冷热交变的工作条件下仍能有一定的使用寿命。

4) 良好的抗氧化性和热熔性，以保证模具工作部分的尺寸精度和表面粗糙度。

5) 较高的淬透性。热作模具一般尺寸较大，热锻模尺寸更大，为了使模具整个截面的力学性能均匀，并获得较高的强度，要求模具材料有高的淬透性。

6) 具有良好的冷热加工工艺性。热作模具材料应具有良好的冷热加工性能，以提高产品质量，降低模具的制造成本，满足加工成形的需要。

7) 高的热硬性、高温耐磨性。热硬性是指模具材料在一定温度下保持硬度、组织稳定性及抗软化的能力。热作模具的热硬性是其重要指标，同时高的高温硬度也是高温耐磨性的重要保证。

8) 高的热疲劳强度。热作模具工作时反复受热受冷，在连续热应力的作用下，模具表面会形成网状裂纹，即热疲劳（这是热作模具失效的主要原因之一）。因此，要求热作模具材料必须具备良好的热疲劳性能。这是对热作模具材料的基本要求。

9) 良好的导热性。为了使热作模具在工作时不因积热过多而导致力学性能下降，就要尽可能降低模具表面的温度，减小模具内部的温差。因此，要求模具材料具有良好的导热性。

由于各种热作模具的工作条件不同，故对模具材料的性能要求也不同。几种热作模具的工作条件及其对模具材料的性能要求见表 2-37。

表 2-37 几种热作模具的工作条件及其对模具材料的性能要求

模具种类	工作条件	对模具材料的性能要求
压铸模	型腔的工作温度高,并经受反复剧烈的温度变化	具有高的热强性及冷热疲劳抗力
热锻模	模具工作温度较高(约 300℃),型腔表面与被加工坯料摩擦,并受到强烈的冲击载荷	具有高的强韧性、冷热疲劳抗力,以及高的淬透性,良好的耐回火性

2.3.3 热作模具材料的分类和选用

热作模具钢按其合金元素含量及热处理后的性能分为低耐热高韧性热作模具

钢、中耐热高韧性热作模具钢、高耐热高韧性热作模具钢和特殊用途热作模具钢（如奥氏体型热作模具钢、高速钢型耐热钢、马氏体时效钢、沉淀硬化型热作模具钢和冷热兼用基体钢）等。影响热作模具寿命的因素很多，如模具的受力情况、工作温度、冷却方式、被加工材料的性质、变形量、变形速度及润滑条件等。因此，热作模具材料应根据模具的类型、具体工作条件、失效形式及模具的性能要求和所使用的模具材料本身具有的使用特性来合理地选用。常用热作模具材料的选用可参考表 2-38。

表 2-38 常用热作模具材料的选用

模具类型	模具零件名称和工作条件		推荐材料	工作硬度 HRC
锤锻模	高度 <275mm(小型)		5CrMnMo、5CrNiMo、5SiMnMoV、4SiMnMoV	38 ~ 42(模具工作面)
	高度 = 275 ~ 325mm(中型)		5CrMnMo、5CrNiMo、5SiMnMoV、4SiMnMoV	33 ~ 38(模具燕尾)
	高度 >325 ~ 375mm(大型)		5CrNiMo、5CrMnSiMoV、4CrMnSiMoV、5CrNiTi	34 ~ 40(模具工作面)
	高度 >375mm(特大型)		5CrNiMo、5CrMnSiMoV、4CrMnSiMoV、5CrNiTi、5CrNiW	28 ~ 35(模具燕尾)
	堆焊模块		5Cr2MnMo	350 ~ 400HBW
	镶块式		4Cr5MoSiV1、3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V、4CrMnSiMoV	
机锻模	整体式		5CrMnMo、5CrNiMo、4CrMnSiMoV、5CrMnSiMoV、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi、3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V、5Cr4Mo2W2SiV	28 ~ 34
	镶拼式	镶块	4Cr5MoSiV1、4Cr5MoSiV、4Cr5W2VSi、3Cr2W8V、5Cr4W2Mo2SiV	28 ~ 34
		模体	5CrMnMo、5CrNiMo、4CrMnSiMoV	
热挤压模	冲头		3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V、4Cr5W2VSi、4Cr5MoSiV1、4Cr5MoSiV、4CrMnSiMoV	44 ~ 55
	凹模		3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、硬质合金、钢结硬质合金、高温合金	
温挤压模	冲头、凹模		W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、6W6Mo5Cr4V、6Cr4W3Mo2VNb	50 ~ 62
高速锻模	凸、凹模		4Cr5W2VSi、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr3Mo3W4TiNb	44 ~ 55
热切边模	凸、凹模		6CrW2Si、3Cr2W8V、5CrNiMo、4Cr5MoSiV1、4CrMnSiMoV、8Cr3、W6Mo5Cr4V2、W18Cr4V、硬质合金	35 ~ 55
压铸模	锌及其合金		40Cr、30CrMnSi、40CrMo、CrWMn、5CrMnMo、4Cr5MoSiV、3Cr2W8V、20 钢(碳氮共渗)	50 ~ 60
	铝、镁及其合金		3Cr2W8V、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi、3Cr3Mo3W2V、马氏体时效钢	42 ~ 50

(续)

模具类型	模具零件名称和工作条件	推 荐 材 料	工作硬度 HRC
压铸模	铜及其合金	3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V、3Cr3Mo3Co3V、 3Cr2W9Co5V、18Ni(250)、18Ni(350)	290 ~ 375HBW
	钢铁材料	3W23Cr4MoV、3Cr2W8V(表面渗金属 Cr-Al-Si)	400 ~ 690HV

2.3.4 热作模具钢的热处理工艺

热作模具的工作条件恶劣，特别是工作温度高，性能要求苛刻。为了适应不同状态，对热作模具材料和热处理工艺的要求均比较高。

1. 低耐热高韧性热作模具钢热处理工艺

低耐热高韧性热作模具钢主要有：5CrMnMo、5CrNiMo、4CrMnSiMoV、5SiMnMoV、4Cr2NiMoVSi、5Cr2NiMoVSi 及 3Cr2MoWVNi 等。这类钢主要用于承受很大冲击载荷的热锻模等。

(1) 预备热处理 低耐热高韧性热作模具钢预备热处理通常采用等温退火工艺。表 2-39 为低耐热高韧性热作模具钢毛坯等温退火工艺规范。

表 2-39 低耐热高韧性热作模具钢毛坯等温退火工艺规范

牌 号	加热温度×保温时间	等温温度×保持时间	硬度 HBW	冷 却 方 式
5CrMnMo	850 ~ 870℃ ×3 ~ 5h	660 ~ 680℃ ×3 ~ 5h	197 ~ 241	以 50℃/h 冷却速度炉冷至 500℃ 以下出炉空冷
	锻模翻新退火:720 ~ 740℃ ×2 ~ 6h,炉冷至 500℃ 以下出炉空冷			
	一般退火:760 ~ 780℃ ×2 ~ 4h,炉冷至 500℃ 以下空冷		197 ~ 241	
5CrNiMo	850 ~ 870℃ ×4 ~ 6h	660 ~ 680℃ ×3 ~ 5h	197 ~ 241	
	一般退火:760 ~ 780℃ ×4 ~ 6h,炉冷至 500℃ 以下空冷		197 ~ 241	
	锻模翻新退火:710 ~ 730℃ ×4 ~ 6h,炉冷至 500℃ 以下空冷		197 ~ 241	
4CrMnSiMoV	840 ~ 860℃ ×3 ~ 5h	700 ~ 720℃ ×4 ~ 8h	—	
5SiMnMoV	860 ~ 880℃ ×3 ~ 5h	700 ~ 720℃ ×4 ~ 6h	—	
	一般退火:760 ~ 780℃ ×2 ~ 4h,炉冷至 500℃ 以下出炉空冷			
4Cr2NiMoVSi	790 ~ 810℃ ×2 ~ 3h	710 ~ 730℃ ×3 ~ 5h	—	
5Cr2NiMoVSi	(800 ± 10)℃ ×3 ~ 5h	(720 ± 10)℃ ×4 ~ 6h	—	
3Cr2MoWVNi	810 ~ 830℃ ×3 ~ 5h	700 ~ 720℃ ×4 ~ 6h	—	

(2) 最终热处理 低耐热高韧性热作模具钢的淬火、回火工艺规范见表 2-40。

表 2-40 低耐热高韧性热作模具钢的淬火、回火工艺规范

牌 号	淬火加热温度/℃	淬火硬度 HRC	回火温度/℃		回火硬度 HRC
5CrMnMo	推荐淬火:820 ~ 850 (油冷,小型模具空冷)	52 ~ 58	工作部分	小型:490 ~ 510	41 ~ 47
				中型:520 ~ 540	38 ~ 41
			燕尾部分	小型:600 ~ 620	35 ~ 39
				中型:620 ~ 640	34 ~ 37
	高温淬火:890 ~ 900(油冷)	61.5	高温回火: 420 ~ 550℃ 回火 2 次		(回火下贝氏体)
等温淬火: 1) 840 ~ 860℃加热后在 160 ~ 180℃硝盐中分级停留,使其发生部分马氏体转变,然后在 280 ~ 300℃硝盐中冷却 2 ~ 3h 2) 840 ~ 860℃加热后淬入油中,待模具表面冷却到 150 ~ 200℃时转入等温槽,在 280 ~ 300℃保温 2 ~ 3h					(降低模具开裂倾向)
5CrNiMo	830 ~ 860(油冷)	53 ~ 58	工作部分	小型:490 ~ 510	44 ~ 47
				中型:520 ~ 540	38 ~ 42
				大型:560 ~ 580	34 ~ 37
			燕尾部分	小型:620 ~ 640	30 ~ 35
				中型:640 ~ 660	34 ~ 37
	高温淬火:890 ~ 910(油冷)	61.5	高温回火: 420 ~ 550℃ 回火 2 次		38 ~ 47
4CrMnSiMoV	860 ~ 880(油冷)	56 ~ 58	小型:520 ~ 580		43.7 ~ 48.7
			中型:580 ~ 630		40.7 ~ 43.7
			大型:610 ~ 650		37.8 ~ 41.7
			特大型:620 ~ 660		36.9 ~ 39.7
5SiMnMoV	840 ~ 860(油或水冷, 小型模具空冷)	≥56(油冷)	工作部分	490 ~ 510(油冷)	40 ~ 46
		≥60(水冷)	燕尾部分	600 ~ 620(油冷)	35 ~ 39
4Cr2NiMoVSi	960 ~ 1 100(油冷)	54 ~ 61	工作部分	630 ~ 670	40 ~ 44
			燕尾部分	680 ~ 700	34 ~ 39
5Cr2NiMoVSi	960 ~ 980(油冷)	54 ~ 61	600 ~ 680		48 ~ 35
3Cr2MoWVN	980 ~ 1 020(油冷)	50 ~ 52	610 ~ 660		41 ~ 43

2. 中耐热高韧性热作模具钢热处理工艺

中耐热高韧性热作模具钢主要有: 4Cr5MoSiV (H11)、3Cr3Mo2WVSi、4Cr5MoSiV1 (H13)、8Cr3、4Cr5W2V1Si、4Cr3Mo2MnVB (ER8)、3Cr3Mo3W2V (HM1)、3Cr3Mo3VNb (HM3)、4Cr3Mo3SiV (H10) 及 4Cr4WMoSiV 等。这类钢广泛应用于热变形用模具 (如机锻模、高速锤锻模) 及压铸模等。

(1) 预备热处理 中耐热高韧性热作模具钢预备热处理通常采用退火工艺。

表 2-41 为中耐热高韧性热作模具钢毛坯退火工艺规范。

表 2-41 中耐热高韧性热作模具钢毛坯退火工艺规范

牌 号	加热温度×保温时间	等温温度×保持时间	硬度 HBW	显 微 组 织
4Cr5MoSiV (H11)	860 ~ 890℃ × 2 ~ 4h, 炉冷至 500℃ 以下空冷		≤229	—
4Cr5MoSiV1 (H13)	860 ~ 890℃ × 3 ~ 4h, 炉冷至 500℃ 以下空冷		≤229	球状珠光体 + 少量碳化物
4Cr5W2VSi	860℃ × 3 ~ 5h	750℃ × 4 ~ 6h	≤229	球状珠光体 + 碳化物
	一般退火: 860 ~ 880℃ × 3 ~ 4h, 炉冷至 500℃ 以下空冷		≤229	珠光体 + 碳化物
4Cr3Mo2MnVB (ER8)	840℃ × 3 ~ 4h	730℃ × 2 ~ 3h	—	—
8Cr3	790 ~ 810℃ × 3 ~ 6h, 炉冷至 500℃ 以下空冷		207 ~ 255	珠光体 + 碳化物
3Cr3Mo3W2V (HM1)	860 ~ 880℃ × 4h	720 ~ 740℃ × 6h	≤255	—
3Cr3Mo3VNb (HM3)	850 ~ 870℃ × 3 ~ 4h	700 ~ 720℃ × 4 ~ 6h	≤229	均匀细小粒状珠光体
4Cr3Mo3SiV (H10)	860 ~ 900℃ × 3 ~ 4h	710 ~ 730℃ × 4 ~ 6h	≤229	—
4Cr4WMoSiV	860 ~ 890℃ × 3 ~ 4h, 炉冷至 500℃ 空冷		≤229	—
3Cr3Mo2WVSi	840 ~ 860℃ × 6 ~ 10h	720℃ × 6 ~ 10h	—	—
42Cr9Si2	850 ~ 900℃ × 4 ~ 6h, 炉冷至 500℃ 以下空冷		193 ~ 230	—
40Cr10Si2Mo	850 ~ 900℃ × 4 ~ 6h, 炉冷至 500℃ 以下空冷		217 ~ 248	—

(2) 最终热处理 中耐热高韧性热作模具钢的热处理工艺规范见表 2-42。

表 2-42 中耐热高韧性热作模具钢的热处理工艺规范

牌 号	淬火加热温度/℃	淬火硬度 HRC	回火温度/℃	回火硬度 HRC
4Cr5MoSiV (H11)	1 000 ~ 1 030 (油冷或空冷)	53 ~ 55	530 ~ 580℃ 回火 2 次	47 ~ 49
	气体渗氮: 540℃ × 12 ~ 20h, 氨分解率 30% ~ 60%, 渗氮层深 0.15 ~ 0.20mm, 表面硬度 550 ~ 760HV			
4Cr5MoSiV1 (H13)	1 020 ~ 1 050 (油冷或空冷)	56 ~ 58	560 ~ 580℃ 回火 2 次 (第 2 次回火温度比第 1 次低 20℃)	47 ~ 49
4Cr5W2VSi	1 060 ~ 1 080 (油冷或空冷)	56 ~ 58	590 ~ 610℃ 回火 2 次 (第 2 次回火温度比第 1 次低 20℃)	48 ~ 52
	1 030 ~ 1 050 (油冷)	53 ~ 56	560 ~ 580℃ 回火 2 次 (第 2 次回火温度比第 1 次低 30℃)	47 ~ 49
	气体渗氮: 530 ~ 550℃ × 12 ~ 20h, 氨分解率 30% ~ 60%, 渗氮层深 0.12 ~ 0.20mm, 表面硬度 650 ~ 1 115HV			
4Cr3Mo2MnVB (ER8)	1 000 ~ 1 030 (油冷或空冷)	52 ~ 57	600 ~ 650	41 ~ 49

(续)

牌 号	淬火加热温度/℃	淬火硬度 HRC	回火温度/℃	回火硬度 HRC
8Cr3	850 ~ 880(油冷)	≥55	480 ~ 520	41 ~ 46
3Cr3Mo3W2V (HM1)	1 060 ~ 1 130(油冷)	52 ~ 56	增加耐磨性:640	52 ~ 54
			提高韧性:680	39 ~ 41
3Cr3Mo3VNB (HM3)	1 060 ~ 1 090(油冷)	47 ~ 49	锻造变形抗力小模具:570 ~ 600	47 ~ 49
			锻造变形抗力大模具:600 ~ 630	42 ~ 47
4Cr3Mo3SiV (H10)	1 010 ~ 1 040(油冷或空冷)	50 ~ 55	600 ~ 620	50 ~ 55
			620 ~ 640	40 ~ 50
4Cr4WMoSiV	1 060 ~ 1 080(油冷)	≥50	600 ~ 640	48 ~ 52
3Cr3Mo2WVSi	980 ~ 1 030(油冷)	—	600 ~ 650	41 ~ 44
42Cr9Si2	1 000 ~ 1 050(油冷)	58 ~ 63	700 ~ 750(快冷)	28 ~ 32
40Cr10Si2Mo	1 020 ~ 1 050(油冷或空冷)	58 ~ 63	720 ~ 780	36 ~ 40

3. 高耐热高韧性热作模具钢热处理工艺

高耐热高韧性热作模具钢主要有：3Cr2W8V（H21）、4Cr3Mo3W4VNB（GR）、4Cr3Mo2MnVNB（Y4）、4Cr5Mo2MnVSi（Y10）、4Cr3Mo2NiVNB（HD）、4Cr3Mo2WVMn（TM）等。这类钢主要用于压力机镦锻模、挤压机上尺寸小于150mm的模具（加工高强度钢、不锈钢、钛合金、耐热合金等）、压铸模及工作温度较高（680~690℃）且高磨损条件下工作的模具等。

（1）预备热处理 高耐热高韧性热作模具钢预备热处理通常采用退火工艺。表 2-43 为高耐热高韧性热作模具钢毛坯退火工艺规范。

表 2-43 高耐热高韧性热作模具钢毛坯退火工艺规范

牌 号	加热温度 × 保温时间	等温温度 × 保持时间	硬度 HBW	显微组织
3Cr2W8V(H21)	840 ~ 880℃ × 2 ~ 4h	720 ~ 740℃ × 2 ~ 4h	≤241	—
	一般退火:800 ~ 820℃ × 2 ~ 4h,炉冷至 600℃ 以下出炉空冷		207 ~ 255	珠光体 + 碳化物
4Cr3Mo3W4VNB(GR)	850℃ × 2 ~ 4h	720℃ × 2 ~ 4h	—	—
4Cr3Mo2MnVNB(Y4)	840 ~ 860℃ × 2 ~ 4h	680℃ × 4 ~ 6h	—	—
4Cr5Mo2MnVSi(Y10)	840 ~ 860℃ × 2 ~ 4h	680℃ × 4 ~ 6h	170 ~ 187	点状珠光体 + 少量共晶碳化物
4Cr3Mo2NiVNB(HD)	840 ~ 860℃ × 4h,炉冷至 500℃ 以下空冷		—	—
4Cr3Mo2WVMn(TM)	840 ~ 860℃ × 4h	720℃ × 4 ~ 6h	—	—

（2）最终热处理 高耐热高韧性热作模具钢的淬火、回火工艺规范见表 2-44。

表 2-44 高耐热高韧性热作模具钢的淬火、回火工艺规范

牌 号	淬火加热温度/℃	淬火硬度 HRC	回火温度/℃	回火硬度 HRC
3Cr2W8V (H21)	1 050 ~ 1 100(油冷)	49 ~ 52	600 ~ 620	40.2 ~ 47.4
	高温淬火:1 140 ~ 1 150(油冷)	55	—	—
	等温淬火:1 150℃加热后 在 350 ~ 450℃等温后油冷	47	340 ~ 380	—
	固溶超细化处理:1 200 ~ 1 250℃加热固溶, 热油中淬火		720 ~ 850	—
4Cr3Mo3W4VNb(GR)	1 160 ~ 1 200(油冷)	≥55	630℃ × 2 ~ 3h,回火 1 次, 600℃ × 2 ~ 3h,回火 1 次	50 ~ 54
4Cr3Mo2MnVNB(Y4)	1 050 ~ 1 100(油冷)	58 ~ 59	600 ~ 630℃ × 2h,回火 2 次	44 ~ 52
4Cr5Mo2MnVSi(Y10)	950 ~ 1 050(油冷)	50 ~ 56	550 ~ 620	42 ~ 51
	1 050(油冷)	50 ~ 56	650℃回火 2 次	39
4Cr3Mo2NiVNb(HD)	1 130(油冷)	53.5	650 ~ 700	40 ~ 47
4Cr3Mo2WVMn(TM)	1 050 ~ 1 100(油冷)	≥50	570 ~ 650	45 ~ 50
4SiMnW3Mo2VN	1 140(油冷)	>50	660	50

4. 特殊用途热作模具钢热处理工艺

特殊用途热作模具钢主要有：奥氏体型热作模具钢（Cr14Ni25Co2V、45Cr14Ni14W2Mo、5Mn15Cr8Ni5Mo3V2、7Mn10Cr8Ni10Mo3V2、7Mn15Cr2Al3V2WMo等）、高速钢型耐热钢（W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2）、马氏体时效钢〔（18Ni（250）、18Ni（300）、18Ni（350）〕、沉淀硬化型热作模具钢（2Cr3Mo2NiVSi、YHD3、YHD26、YHD28、DH76）和冷热兼用基体钢（6W8Cr4VTi、6Cr5Mo3W2VSiTi、6Cr4Mo3Ni2WV、5Cr4W5Mo2V、5Cr4Mo3SiMnVAl、5Cr4W2Mo2SiV）等。这类钢主要用于特殊热加工用途的热作模具等。

（1）预备热处理 特殊用途热作模具钢预备热处理通常采用退火工艺。表 2-45 为特殊用途热作模具钢毛坯退火工艺规范。

表 2-45 特殊用途热作模具钢毛坯退火工艺规范

牌 号	退火规范	硬度 HBW	显微组织
奥氏体型热作模具钢 45Cr14Ni14W2Mo	退火:860 ~ 880℃,空冷	—	奥氏体
高速工具钢型耐热钢 W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2	退火工艺见冷作模具钢用高速工具钢		—
沉淀硬化型热作模具钢 2Cr3Mo2NiVSi(PH)	780℃ × 2 ~ 3h,以≤40℃/h 冷至 680℃后随炉冷却	217 ~ 229	—
冷热兼用基体钢	退火工艺见冷作模具钢用基体钢		—

(2) 最终热处理 特殊用途热作模具钢的淬火、回火工艺规范见表 2-46。

表 2-46 特殊用途热作模具钢的淬火、回火工艺规范

牌 号	淬火加热温度/℃	回火温度/℃	回火硬度 HRC
奥氏体型热作模具钢 45Cr14Ni14W2Mo	1 000 ~ 1 100(水冷)	时效处理:750℃,空冷, 组织为奥氏体	—
	1 170 ~ 1 200(水冷)		—
高速工具钢型耐热钢 W18Cr4V、6Mo5Cr4V2	热处理工艺见冷作模具钢用高速工具钢		—
马氏体时效型耐热钢	固溶处理:800 ~ 900℃,硬度达 30HRC(适合切削或其他加工), 然后在 480 ~ 500℃进行时效处理 3h,析出沉淀相		57 ~ 60
沉淀硬化型热作模具钢 2Cr3Mo2NiVSi(PH)	990 ~ 1 020[油冷(截面尺寸 >100mm)或 空冷(截面尺寸 ≤100mm)]	370 ~ 400	40 ~ 45
		525 ~ 550	47 ~ 49
冷热兼用基体钢	热处理工艺见冷作模具钢用基体钢		—

2.3.5 典型热作模具热处理实例

实例 1 大模块,外形尺寸 310mm × 315mm × 2 500mm,重量为 2t,材料为 5CrNiMo 钢,要求硬度为 38 ~ 48HRC。

(1) 原工艺及存在问题 5CrNiMo 钢热锻模以往是开好型腔后热处理,但现在有些用户要求先进行热处理,然后多次重复开出型腔使用,直至模具的高度不足为止。淬火时采用淬火油或水冷却,淬火效果不佳,不是心部组织及性能不佳,就是超声波检测不合格或开裂。

(2) 改进后热处理工艺及效果 将锻坯经 860℃ 加热保温后淬入 44℃ 左右 15% (质量分数) UCON E 水基淬火冷却介质,冷却 70min,出液时表面温度 70℃,5min 后上升至 99℃。然后在 420℃ 回火两次。经检测,模块的表面硬度为 40HRC,截面最大硬度差约 6.5HRC,超声波检测在合格范围内。

实例 2 BN1250 型摆辗机 (设计最大压力 12 500kN) 用摆辗模具,外形尺寸 φ603mm × 222mm (高度),材料为 5CrNiMo 钢,要求热处理淬火、回火处理。

(1) 失效原因分析 模具在生产 300 件和 800 件产品时,分别出现了明显可见的表面疲劳龟裂纹和表面环状波纹。其原因是在生产过程中,为防止摆辗模具型腔表面发生高温回火而导致硬度下降,每加工一件产品后都对其进行一次喷水冷却,正是这种冷热交替使型腔表面在交变热应力的作用下产生了疲劳裂纹,并经继续使用一段时间后,由于其力学性能降低,致使表面产生波纹状变形。

原热处理工艺为:650℃ × 2h 和 750℃ × 2h 预热,860℃ × 4h 淬火加热,出炉空冷至 780 ~ 760℃ 后入油淬火,冷却至 150℃ 后模具出油槽空冷;500℃ × 6h 高温回火,空冷。因淬火组织以针片状马氏体为主,故材料的力学性能 (如断裂韧度) 不足。

(2) 改进后热处理工艺及效果

1) 增加 910℃ 正火工序, 以细化原始组织和碳化物, 为下一步降低淬火温度作好组织准备。

2) 降低淬火温度。为提高锻模的韧性及防止疲劳裂纹的过早产生和扩展, 采用了 760℃ (5CrNiMo 钢的临界温度) 淬火 + 500℃ 回火的工艺 (图 2-3)。

改进工艺后, 经生产使用, 平均每副模具已经摆辗 5 000 件, 模具寿命得到了大幅度提高。

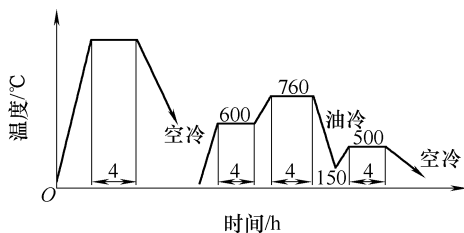


图 2-3 改进后的模具热处理工艺

实例 3 195 型柴油机飞轮螺母热挤压模上模, 材料为 W18Cr4V 钢, 要求硬度为 50 ~ 55HRC。

(1) 原模具材料、技术要求与存在问题 由于要求硬度低 (50 ~ 55HRC), W18Cr4V 钢淬火后回火温度很难控制, 使用寿命不稳定, 经常发生早期磨损、纵横热裂纹及棱边尖角处断裂现象。

(2) 改进工艺与效果 改用 3Cr2W8V 钢, 并采用复合热处理工艺, 经 860℃ × 6h 固体渗硼, 1 080 ~ 1 100℃ 分级淬火 + 560℃ 回火 2 次处理后, 比用常规热处理工艺处理的模具寿命提高了 4 倍, 比 W18Cr4V 钢制模具寿命提高了 1 倍以上。

实例 4 铝合金压铸模, 外形尺寸 110mm (长度) × 100mm (宽度) × 32mm (厚度), 材料为 3Cr2W8V 钢, 整体硬度要求 47 ~ 52HRC, 氮碳共渗处理硬度要求 ≥ 850HV, 渗层为 0.08 ~ 0.18mm。

(1) 模具加工工艺路线 下料 → 锻造 → 球化退火 → 粗加工 → 稳定处理 → 精加工 → 淬火、回火 → 钳工修整 → 研磨 → 装配 → 表面处理 (氮碳共渗)。

(2) 热处理工艺

1) 稳定化处理工艺。650 ~ 680℃ × 4 ~ 5h, 然后冷却到 400℃ 出炉。其目的是消除机加工应力, 减少变形。

2) 淬火、回火工艺。热处理工艺如图 2-4 所示。工艺曲线中, 第 1 次预热在箱式炉或井式炉中进行, 随后的预热、加热、冷却与回火等均在盐浴炉内完成。

3) 氮碳共渗工艺。采用一般热锻模的液体氮碳共渗工艺即可。

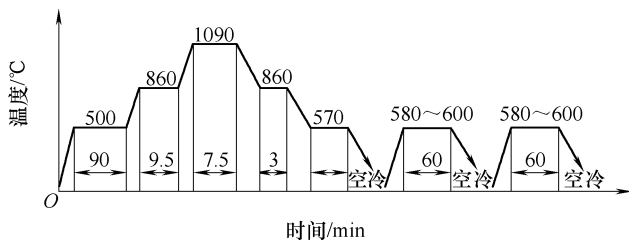


图 2-4 3Cr2W8V 钢制铝合金压铸模热处理工艺曲线

实例 5 铝合金压铸模（见图 2-5），材料为 3Cr2W8V 钢，要求热处理后的硬度为 42~47HRC。

（1）压铸模加工工艺路线 下料→锻造后退火→粗加工→去应力退火→机械加工→淬火→回火→磨削加工→装配。

（2）预备热处理 3Cr2W8V 钢制压铸模的等温退火工艺曲线如图 2-6 所示，退火后的硬度为 207~255HBW，金相组织为珠光体+碳化物。

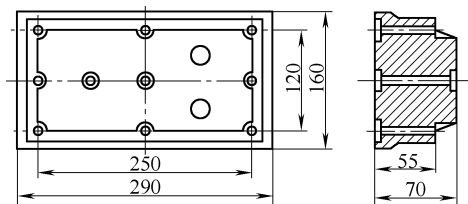


图 2-5 3Cr2W8V 钢制铝合金压铸模结构简图

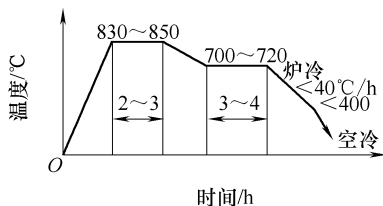


图 2-6 3Cr2W8V 钢制压铸模的等温退火工艺曲线

（3）去应力退火 目的是消除粗加工应力。退火工艺为 650~680℃保温 4~6h，随后断电随炉冷却或空冷。

（4）淬火和回火 考虑到该模具为中型零件，且钢中合金元素多，导热性差，故为了减少变形和防止开裂，淬火加热前的预热分两次进行。当模具冷却到 180~200℃时，应迅速转入回火炉内回火，时间为 1~2h。为了进一步提高压铸模的使用寿命，可对模具进行表面强化处理，如氮碳共渗、渗硼及气相沉积等。

2.4 塑料模具钢与热处理

塑料模具钢主要有碳素塑料模具钢、渗碳型塑料模具钢、预硬型塑料模具钢、时效硬化型塑料模具钢及耐蚀性塑料模具钢等。

塑料模具的失效形式主要以磨损、腐蚀、变形和断裂为主，故塑料模具的选材及热处理应考虑模具的尺寸、形状、工作条件和失效特点等要求。塑料模具钢的热处理主要包括预备热处理和最终热处理（包括表面热处理）。

2.4.1 塑料模具的分类和工作条件

塑料模具按生产方式可分为注射成型模、挤出成型模及热压成型模等。塑料模具按照成型固化的方式可分为热固性和热塑性塑料模具两种。热固性塑料模具工作时，塑料以固态粉末物料形式加入型腔并在一定温度下（如 200~250℃）经热压成型，因此模具受力大，并受一定冲击，且摩擦力、热机械负荷和磨损较大。热塑性塑料模具是使塑料在黏流状态下通过注射、挤压等方法进入模具型腔加工成型的模具，故塑变抗力小，受热、受压、受磨损情况不严重（但当加入固体填充物料

时，磨损会大大增加)。由于部分塑料制品中含有氯或氟，故压制时易释放出腐蚀性气体，使模膛经受气体腐蚀作用。塑料模具的工作条件见表 2-47。

表 2-47 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	2 000 ~ 8 000	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	2 000 ~ 6 000	150 ~ 250	摩擦磨损较小。当 加入某些固态填充料 时，磨损增大	黏流状态	有时有 腐蚀	受热、受压及 磨损较小

2.4.2 塑料模具材料的性能要求

塑料模具型腔形状复杂，表面质量要求较高，磨损后常发生制品出现拉毛、工作部位塌陷及断裂等形式的失效。因此，塑料模具钢应具有以下性能：

(1) 镜面加工性能 型腔表面要求抛光成镜面，表面粗糙度 Ra 低于 $0.4\mu\text{m}$ ，以保证塑料压制件的外观光滑并便于脱模。对此，要求钢材冶金质量好。

(2) 耐磨性 随着塑料制品用途的扩大，往往在塑料中需添加玻璃纤维之类的无机材料以增强其塑性。由于添加物的加入，使塑料的流动性大大降低，易导致模具的磨损，故要求模具型面要有足够的硬度，以使其对塑料中的填充物有足够的抗力，即具有良好的耐磨性。

(3) 耐蚀性 如果在 ABS 树脂中添加抗燃剂、聚氯乙烯等，则在成形过程中释放出的腐蚀性气体会使模具锈蚀而损坏，故要求模具钢具有良好的耐蚀性。

(4) 在工作温度下具有足够高的硬度与强度 塑料注射成型时对模具的压力很大，而合模压力一般为注射压力的 $1.5 \sim 2$ 倍，有的甚至高达 4 倍左右。因此，模具钢应有较高硬度，并具有足够的硬化层深度和心部强度，以防止模具工作时型腔表面塌陷、变形等。

(5) 切削加工性能 塑料制品的大型化、形状复杂化及精密化，要求模具钢应具有良好的切削加工性能，并且在机械加工过程中加工硬化现象较小，硬度适当，表面粗糙度值低。为了避免模具变形而影响精度，还要求加工残余应力能够控制在最小限度。

(6) 冷压性能好 在使用冷压反印法制作复杂模具时，模具钢应具有退火态硬度低、塑性好、冷作硬化倾向小的性能。

(7) 耐热性能 随着高速成形机械的出现，塑料制品的生产速度大大加快。一般用于塑料成型的温度在 $200 \sim 350^{\circ}\text{C}$ 之间，但如果塑料流动性不好，同时成型

速度又很快，则会使模具部分成型表面温度在极短时间内超过 400℃。因此，为了保证模具在使用时的精度及变形微小，模具钢应具有较高的耐热性能。为了减少升温，模具钢还应有良好的导热性及较低的热膨胀系数。

(8) 尺寸精度高 由于模具镶块的加工精度和配合精度都很高（型腔尺寸精度一般为 3~5 级），拼镶型腔的接合面要求密合（以免制品挤入缝隙内，使制品表面出现飞边），故要求模具钢淬火变形小，尺寸精度高。

(9) 花纹图案光蚀刻性能好 不少塑料制品为了美化，在其表面增添了花纹图案，因此要求模具钢应具有较好的花纹图案光蚀刻性，以利于进行图案的加工。

2.4.3 塑料模具材料的选择与应用

塑料模具的品种规格多、形状复杂、要求表面粗糙度值低、制造困难，应根据塑料的种类及对成型塑料制品的尺寸、精度、质量、数量的要求，以及模具的工作条件、性能、失效形式等合理选择塑料模具材料，从而最大限度地提高模具使用寿命，保证加工质量，降低制造成本。

塑料模具材料选用原则：①应根据模具工作条件及对模具性能的要求，合理选用能够满足要求的钢种；②应选用冶金质量好、性能稳定可靠、来源方便、有保证的钢材；③应选用工艺性能好、使用性能可靠、工作寿命长的钢种；④应选用切削性能好、能节约加工工时的钢种；⑤应选用镜面性能好、能够保证精度的钢种；⑥对有特殊性能要求（如耐蚀性）的模具，应选用具备特殊性能的钢种。

为了保证模具精度，除了要求模具材料具有良好的机械加工性能，同时还要求其具备一定的硬度及镜面抛光性能，故应优先选用塑料模具钢。塑料模具钢主要有：碳素塑料模具钢、渗碳型塑料模具钢、预硬型塑料模具钢、时效硬化型塑料模具钢、耐蚀性塑料模具钢及淬硬型塑料模具钢等。塑料模具钢的选用可参照表 1-8。

表 2-48 为现行塑料模具用钢标准及牌号。

表 2-48 现行塑料模具用钢标准及牌号

类 别	牌 号	引 用 标 准
渗碳型	20、20Cr	—
淬硬型	45、40Cr、T10A、CrWMn、9SiCr、9Mn2V	
预硬型	5CrNiMnMoVSCa、3Cr2Mo、3Cr2NiMnMo、8Cr2MnWMoVS	
耐蚀性	20Cr13、40Cr13、12Cr18Ni9	
非合金钢	SM45、SM50、SM55	YB/T 094—1997 《塑料模具用扁钢》
合金钢	SM1CrNi3、SM3Cr2Mo、SM3Cr2Ni1Mo、SM4Cr5MoSiV、SM2CrNi3MoAl1S、SM4Cr5MoSiV1、SM2Cr13、SM3Cr17Mo、SM4Cr13	
—	SM45、SM48、SM50、SM53、SM55、SM3Cr2Mo、SM3Cr2Ni1Mo	YB/T 107—2013 《塑料模具用热轧钢板》

(续)

类 别	牌 号	引 用 标 准
—	SM45、SM50、SM55、SM3CrMo、SM3Cr2Ni1Mo	YB/T 129—1997 《塑料模具钢模块技术条件》
常用钢	12CrNi3A、T8A、5CrW2Si、Cr12MoV、5CrMnMo、5CrNiMo	—
新型用钢	3Cr3Mo3VNb、3Cr2MnNiMo、Y55CrNiMnMoV、Y20CrNi3AlMnMo、 25CrNi3MoAl、10Ni3MnCuAl、06Ni6CrMoVTiAl、0Cr16Ni4Cu3Nb、 18Ni(250)、18Ni(300)等	—
—	3Cr2Mo、3Cr2MnNiMo	GB/T 1299—2000 《合金工具钢》

2.4.4 塑料模具钢的热处理工艺

塑料模具钢热处理包括预备热处理和最终热处理（包括表面热处理）。处理后的模具钢要求有适中的硬度、足够的强度和韧性、较小的淬火变形量、型腔表面容易抛光，以及一定的耐蚀性和耐热性。

要提高塑料模具的寿命，最主要的措施是提高其工作表面的硬度以使其具有足够的耐磨性。为此，可将塑料模具只进行调质处理改进为成形加工后进行淬火处理，最后再进行渗氮处理。以前的塑料模具多用 45 钢、55 钢和碳素工具钢（T7、T8、T10、T10A、T11A）等材料，为了延长塑料模具寿命，现在多选用塑料模具专用钢。在使用塑料模具专用钢时，为了进一步提高模具的耐磨性，可进行气体氮碳共渗处理。经过气体氮碳共渗后，成型含玻璃纤维 20% 以下的塑料制品的模具寿命可提高 3~5 倍。对于有高硬度碳化物析出的模具材料，如 Cr12MoV、Cr6WV 等钢材，可先进行调质处理，以得到能够进行机械加工的硬度（36HRC 左右），加工成形后再进行渗氮处理。对于成型含玻璃纤维 20% 左右的塑料制品的模具，此方法也能得到相当好的效果。

对于成型硬质热塑性树脂和热固性树脂的模具，其型腔除了必须有高的耐磨性以外，还要有较高的抗压强度，因此必须采用淬硬型钢，以便通过淬火可以获得高的硬度。根据需要，与树脂接触的模具型腔部分既可以进行表面局部淬火，也可以进行整体淬火，或者为使型腔部分淬火方便而把模具做成镶嵌件组成形式（此时模具的本体仍采用模具专用钢）。由于形状复杂的模具淬火后要发生尺寸变化和变形，所以对于需要淬火的模具要考虑周密一些。

1. 碳素塑料模具钢热处理工艺

碳素塑料模具钢主要有 45 钢、50 钢、55 钢、T7~T12A 钢，以及 SM45、SM50、SM55 等。其主要用于制造生产批量不大、没有特殊要求的小型塑料模具，以及普通热塑性塑料成型模具等。

(1) 预备热处理

1) 正火规范。碳素塑料模具钢正火的目的主要是细化晶粒和消除网状碳化物，降低硬度，以利于切削加工，并为最终热处理作好组织准备。45 钢、50 钢、55 钢、T7 ~ T12A 钢等的正火规范可参见冷作模具钢部分。表 2-49 为几种碳素塑料模具钢的正火规范。

表 2-49 几种碳素塑料模具钢的正火规范

牌 号	正火温度/℃	冷却方式	硬度 HBW
SM45	830 ~ 880	空冷	—
SM50	820 ~ 870	空冷	—
SM55	810 ~ 860	空冷	217 ~ 248

2) 退火工艺。SM45、SM50、SM55，以及 45 钢、50 钢、55 钢、T7A ~ T12A 等的预备热处理通常采用退火。45 钢、50 钢、55 钢、T7A ~ T12A 等的退火工艺参见冷作模具钢退火部分。表 2-50 为碳素塑料模具钢毛坯退火工艺规范。

表 2-50 碳素塑料模具钢毛坯退火工艺规范

牌 号	退火工艺规范	硬度 HBW
SM45	820 ~ 840℃,保温一定时间,空冷	—
SM50	810 ~ 830℃,保温一定时间,炉冷	—
SM55	770 ~ 810℃,保温一定时间,炉冷	197 ~ 225

(2) 最终热处理 碳素塑料模具钢的淬火、回火工艺规范见表 2-51。

表 2-51 碳素塑料模具钢的淬火、回火工艺规范

牌 号	淬火加热温度/℃	淬火硬度 HRC	回火温度 /℃	回火硬度 HRC
SM45	820 ~ 860(水冷或油冷)	≥50	500 ~ 560	25 ~ 33
SM50	820 ~ 850(水冷或油冷)	≥50	根据需要选择	—
SM55	790 ~ 830(水冷)	58	400 ~ 650	24 ~ 45
	820 ~ 850(油冷)	≥55		

2. 渗碳型塑料模具钢热处理工艺

渗碳型塑料模具钢主要有：20、20Cr、20CrMnTi、12CrNi2、12CrNi3A、20Cr2Ni4A、2CrNi3MoAlS、0Cr4NiMoV（LJ）、美国 P1（相当于国产 10 钢）、P2、P4（相当于国产 12CrMo）、P6（相当于国产 12CrNi3）、CH1、CH2、CH41 和瑞典 8416 等。这类钢主要用于冷挤压成型塑料模具。

(1) 预备热处理

1) 正火规范。渗碳型塑料模具钢正火的目的主要是细化晶粒和消除网状碳化物,降低硬度,以利于切削加工,并为最终热处理作好组织准备。表 2-52 为几种渗碳型塑料模具钢的正火规范。

表 2-52 几种渗碳型塑料模具钢的正火规范

牌 号	正火温度/℃	硬度 HBW
20	890 ~ 920	≤156
20Cr	870 ~ 900	≤217
20CrMnTi	920 ~ 950(风冷)	156 ~ 207
12CrNi3	正火 880 ~ 940(空冷) + 回火 650 ~ 680	≤229
12CrNi2	885 ~ 940(空冷)	156 ~ 228
12Cr2Ni4	885 ~ 940(空冷)	156 ~ 228
20Cr2Ni4	正火 880 ~ 940(空冷) + 回火 640 ~ 650	≤269
2CrNi3MoAlS	880 ~ 900(空冷)	—

2) 退火工艺。渗碳型塑料模具钢毛坯退火工艺规范见表 2-53。

表 2-53 渗碳型塑料模具钢毛坯退火工艺规范

牌 号	退火工艺规范	硬度 HBW
20	880 ~ 900℃,保温一定时间,炉冷	—
20Cr	860 ~ 890℃,保温一定时间,炉冷	≤179
20CrMnTi	860 ~ 880℃,保温一定时间,炉冷	≤217
12CrNi3	670 ~ 680℃,保温一定时间,炉冷	≤229
12CrNi2	670 ~ 680℃,保温一定时间,炉冷	≤207
12Cr2Ni4	670 ~ 680℃,保温一定时间,炉冷	≤269
20Cr2Ni4	670 ~ 680℃,保温一定时间,炉冷	≤229
2CrNi3MoAlS	680 ~ 700℃,保温一定时间,炉冷	≤241
0Cr4NiMoV(LJ)	880℃ × 2h,炉冷至 650℃后空冷	100 ~ 105

(2) 最终热处理 渗碳型塑料模具钢的热处理工艺规范见表 2-54。

表 2-54 渗碳型塑料模具钢的热处理工艺规范

牌 号	淬火加热温度/℃	淬火硬度 HRC	回火温度 /℃	回火硬度 HRC
20	淬火:860 ~ 900(水冷或油冷)	—	160 ~ 180	—
	渗碳淬火:渗碳 900 ~ 920℃(缓冷罐冷却),再加热淬火 780 ~ 800℃,水冷	≥60	160 ~ 180	表面 58 ~ 62 心部硬度 160 ~ 190HBW

(续)				
牌 号	淬火加热温度/℃	淬火硬度 HRC	回火温度 /℃	回火硬度 HRC
20Cr	淬火:860~880(油冷或水冷)	—	450~480	≤250HBW
	渗碳淬火:渗碳 900~920℃(罐冷),再加热淬火 860~890℃,油冷或水冷	—	170~190	58~62
20CrMnTi	淬火:860~900(油冷)	—	500~650	—
	渗碳淬火:渗碳 900~920℃(罐冷),再加热淬火 820~850℃,油冷	>60	180~200	表面 56~62 心部 35~40
12CrNi3	淬火:860(油冷)	—	200~600	—
	渗碳淬火:渗碳 900~920℃(罐冷),再加热淬火Ⅰ:860℃,油冷;淬火Ⅱ:760~810℃,油冷,硬度≥60HRC		160~180	表面 58~62 心部 26~40
12CrNi2	淬火:840~880(油冷)	—	200~600	—
	渗碳淬火:渗碳 900~920℃(罐冷),再加热淬火Ⅰ:860℃,油冷,硬度≥60HRC;淬火Ⅱ:760~810℃,油冷,硬度≥60HRC		160~180	表面 58~62 心部 26~40
12Cr2Ni4	淬火:840~880(油冷)	—	200~600	—
	渗碳淬火:渗碳 910~930℃(罐冷),再加热淬火 820~840℃,油冷	≥60	160~200	≥58
20Cr2Ni4	淬火:860(油冷)	—	200~600	—
	渗碳淬火:渗碳 900~920℃(罐冷),高温回火 640~680℃,再加热淬火 820~840℃,油冷	≥60	160~200	≥58
2CrNi3MoAlS	淬火:880±20(水冷或空冷)	48~50	680	22~23
	渗碳淬火:渗碳 900~920℃,罐冷,再加热淬火 820~840℃,油冷	≥60	160~180	≥58
0Cr4NiMoV(LJ)	渗碳淬火:渗碳 900~930℃,罐冷,再加热淬火 850~870℃,油冷	≥60	160~180	表面≥58 心部 27~29

3. 预硬型塑料模具钢热处理工艺

预硬型塑料模具钢主要有：3Cr2Mo（P20）、3Cr2MnNiMo（718）、40Cr、42CrMo、5CrMnMo、5CrNiMo、5CrNiMnMoVSCa、30CrMnSiNi2A、8Cr2MnWMoVS、Y55CrNiMnMoV、Y20CrNi3AlMnMo 等。这类钢主要用于高精密塑料模具。对于在冷作模具钢和热作模具钢中已经介绍过的部分牌号，如 5CrMnMo、5CrNiMo、4Cr3Mo3SiV、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1 等，其热处理工艺可参阅本章 2.2 和 2.3 小节。

(1) 预备热处理

1) 正火规范。预硬型塑料模具钢正火的目的主要是细化晶粒和消除网状碳化

物，降低硬度，以利于切削加工，并为最终热处理作好组织准备。表 2-55 为几种预硬型塑料模具钢的正火规范。

表 2-55 几种预硬型塑料模具钢的正火规范

牌 号	正火温度/℃	硬度 HBW
40Cr	850 ~ 880	≤250
42CrMo	850 ~ 900	241 ~ 302
30CrMnSiNi2A	900 ~ 920	≤255
38CrMoAl	930 ~ 970	—

2) 退火工艺。预硬型塑料模具钢毛坯退火工艺规范见表 2-56。

表 2-56 预硬型塑料模具钢毛坯退火工艺规范

牌 号	加热温度 × 保温时间	等温温度 × 保持时间	硬度 HBW
3Cr2Mo(P20)	840 ~ 860 × 2h	710 ~ 730℃ × 4h	≤229
3Cr2MnNiMo(718)	840 ~ 860℃ × 2h	690 ~ 710℃ × 4h	≤229
40Cr	一般退火:825 ~ 845℃ × 2h, 炉冷		≤207
42CrMo	一般退火:680 ~ 700℃ × 2h, 炉冷		≤217
5CrNiMnMoVSCa(5NiSCa)	750 ~ 770℃ × 2 ~ 4h	670 ~ 690℃ × 4 ~ 6h	217 ~ 220
30CrMnSiNi2A	一般退火:650 ~ 680℃ , 炉冷		≤255
Y55CrNiMnMoV(SM1)	810℃ × 2 ~ 4h	680℃ × 4 ~ 6h	≤235
38CrMoAl	一般退火:840 ~ 870℃ , 炉冷		≤229
4CrNiMnMoVSCa(4NiSCa)	760 ~ 780℃ × 2 ~ 4h	660℃ × 6 ~ 8h	≤230

(2) 最终热处理 预硬型塑料模具钢的热处理工艺规范见表 2-57。

表 2-57 预硬型塑料模具钢的热处理工艺规范

牌 号	淬火加热温度/℃	淬火硬度 HRC	回火温度 /℃	回火硬度 HRC
3Cr2Mo (P20)	淬火:850 ~ 880(油冷)	50 ~ 52	580 ~ 640	28 ~ 36
	化学热处理:渗碳、渗氮(包括离子渗氮)、氮碳共渗			—
3Cr2MnNiMo (718)	840 ~ 870(油冷或空冷)	≥50	550 ~ 650	30 ~ 38
40Cr	830 ~ 860(油冷)	≥50	140 ~ 200	≥48
			400 ~ 600	25 ~ 43
42CrMo	淬火:840 ~ 880(油冷)	≥53	450 ~ 650	25 ~ 40
	感应淬火:900	≥53	160 ~ 180	≥50
5CrNiMnMoVSCa (5NiSCa)	860 ~ 920(油冷)	62 ~ 63	600 ~ 650	35 ~ 45

(续)

牌 号	淬火加热温度/℃	淬火硬度 HRC	回火温度 /℃	回火硬度 HRC
30CrMnSiNi2A	淬火:880~900(油冷)	≥50	240~330	≥45
	等温淬火:加热900℃,180~220℃等温淬火	47~48	250~300	≥45
Y55CrNiMnMoV	800~860(油冷)	57~59	620~650	40
38CrMoAl	930~950(油冷)	≥55	600~680	241~321HBW
	渗氮:500~600	—	—	≥1 000HV
4CrNiMnMoVSCa (4NiSCa)	840~900(油冷)	≥55	600~650	33~40

4. 时效硬化型塑料模具钢热处理工艺

时效硬化型塑料模具钢主要有：18Ni（200）、18Ni（250）、18Ni（300）、18Ni（350）、06Ni（06Ni6CrMoVTiAl）、AFC-77（1Cr14Co13Mo5V）、25CrNi3MoAl、PMS（10Ni3MnCuAl）、PCR（0Cr16Ni4Cu3Nb）、SM2（Y20CrNi3AlMnMo）、P21、NAK（15Ni3MnMoAlCuS）等。这类钢主要用于精密、复杂的热塑性塑料制品用模具。

（1）预备热处理 时效硬化型塑料模具钢毛坯预备热处理工艺规范见表 2-58。

表 2-58 时效硬化型塑料模具钢毛坯预备热处理工艺规范

牌 号	预备热处理工艺规范	硬度 HBW
06Ni6CrMoVTiAl(06Ni)	高温回火:680℃	—
10Ni3MnCuAl(PMS)	退火:750~770℃×2~4h,炉冷至600℃空冷	—
05Cr17Ni4Cu4Nb	退火:820~840℃,保温一定时间,炉冷至500℃以下空冷	28~30
Y20CrNi3AlMnMo (SM2)	软化处理:870~930℃加热,油冷,高温回火680~700℃×2h,油冷,硬度为≤30HRC	

（2）最终热处理 时效硬化型塑料模具钢的热处理工艺规范见表 2-59。

表 2-59 时效硬化型塑料模具钢的热处理工艺规范

牌 号	热处理规范
06Ni6CrMoVTiAl(06Ni)	固溶处理:850~880℃×1~2h,油冷。固溶加热后,冷却速度越快,硬度越低,如820℃固溶后,空冷硬度26~28HRC,油冷硬度24~25HRC,水冷硬度为22~23HRC
	时效处理:500~540℃×4~8h,时效硬度为42~45HRC
1Ni3Mn2CuMoAl(PMS)	固溶处理:870℃×3h,空冷,固溶硬度为28~33HRC
	时效处理:500~520℃×4~8h,硬度为40~43HRC

(续)

牌 号	热处理规范
25CrNi3MoAl	固溶处理及回火: $(880 \pm 20)^{\circ}\text{C}$, 水冷或空冷, 硬度为 48 ~ 50HRC 回火 $680^{\circ}\text{C} \times 4 \sim 6\text{h}$, 水冷或空冷, 硬度为 22 ~ 23HRC
	时效处理: $520 \sim 540^{\circ}\text{C} \times 6 \sim 8\text{h}$, 空冷, 硬度为 39 ~ 42HRC
	化学热处理: 离子渗氮或气体渗氮
18Ni(250)、18Ni(300)、 18Ni(350)	固溶处理: $815 \sim 830^{\circ}\text{C} \times$ 加热时间(盐浴炉 1min/mm, 空气炉 $2 \sim 2.5\text{min/mm}$), 固溶硬度为 28HRC
	时效处理: 480°C [18Ni(250)、18Ni(300)], 时间 3h, 硬度 43HRC; 时间 6h, 硬度 52HRC。时效温度 510°C [18Ni(350)], 时间 6h, 硬度 57 ~ 60HRC
	气体渗氮: 对于 18Ni(300) 钢, $(455 \pm 10)^{\circ}\text{C} \times 24 \sim 28\text{h}$
0Cr16Ni4Cu3Nb (PCR)	固溶处理: $1\ 050^{\circ}\text{C}$, 空冷, 硬度 32 ~ 35HRC, 基体组织为低碳马氏体
	时效处理: 时效温度 460°C , 时效后硬度为 42 ~ 44HRC
05Cr17Ni4Cu4Nb	固溶处理: $1\ 040^{\circ}\text{C}$, 水冷, 硬度为 32 ~ 35HRC, 基体组织为低碳马氏体
	时效处理: $480^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$, 硬度为 40HRC
	气体渗氮: $510 \sim 520^{\circ}\text{C} \times 48\text{h}$, 氨气流量 $0.4\text{m}^3/\text{h}$, 炉压为 294 ~ 490Pa, 渗氮层深 0.17mm, 表面硬度 966HV
1Cr17Ni7Al	固溶处理: $1\ 050^{\circ}\text{C}$, 水冷或空冷, 硬度 $\leq 229\text{HBW}$
	1) 时效处理: $760^{\circ}\text{C} \times 90\text{min}$ (空冷) + $565^{\circ}\text{C} \times 90\text{min}$ (空冷), 时效硬度 $\geq 363\text{HBW}$ 2) 时效、冷处理: $950^{\circ}\text{C} \times 10\text{min} + (-73^{\circ}\text{C} \times 8\text{h}) + 510^{\circ}\text{C} \times 30\text{min}$, 硬度 $\geq 388\text{HBW}$
07Cr15Ni7Mo2Al	固溶处理: 700°C 预热, $1\ 050^{\circ}\text{C} \times$ 保温时间(盐浴炉按 1.0min/mm), 水冷或空冷, 硬度为 269HBW
	时效、冷处理: $950 \times 10 \sim 15\text{min}$ 空冷 + $(-73^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 8\text{h}$ 冷处理) + $480^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ 沉淀硬化后空冷, 硬度为 435 ~ 475HV
Y20CrNi3AlMnMo (SM2)	固溶处理: 900°C , 油冷, 硬度为 42 ~ 45HRC 回火温度 $680 \sim 700^{\circ}\text{C}$, 油冷, 硬度为 28HRC
	时效处理: $500 \sim 520^{\circ}\text{C} \times 6 \sim 10\text{h}$, 硬度为 40HRC
1Cr14Co13Mo5V(AFC-77)	固溶处理: $1\ 040^{\circ}\text{C}$, 油冷, 其组织为马氏体 + 体积分数为 50% 的残留奥氏体
	冷处理: 固溶处理后进行冷处理 $(-73^{\circ}\text{C} \times 6 \sim 8\text{h})$, 以减少残留奥氏体 时效处理: 565°C , 时效硬度最高 $\geq 50\text{HRC}$

5. 耐蚀性塑料模具钢热处理工艺

耐蚀性塑料模具钢主要有: SM2Cr13、SM3Cr17Mo、SM4Cr13、20Cr13、30Cr13、40Cr13、95Cr18、102Cr17Mo、Cr14Mo4V、14Cr17Ni2、12Cr18Ni9、Cr18MoV、SM3Cr17Mo、PCR、AFC-77、CLC2316H(法国)、X36CrMo17(材料号 W-Nr1.2316, 德国)、M300(奥地利)、ASSAB S-136(瑞典)、S-STAR(日本)

等。这类钢主要用于具有腐蚀性的塑料制品（聚氯乙烯、氟塑料、阻燃塑料等）用模具。

（1）预备热处理 耐蚀性塑料模具钢毛坯预备退火工艺规范见表 2-60。

表 2-60 耐蚀性塑料模具钢毛坯预备退火工艺规范

牌 号	预备热处理工艺规范	硬度 HBW
20Cr13	软化退火:750 ~ 800℃,保温一定时间,炉冷	—
	完全退火:860 ~ 900℃,保温一定时间,炉冷	160 ~ 187
30Cr13	退火:750 ~ 800℃,保温一定时间,炉冷	≤207
	完全退火:860 ~ 900℃,保温一定时间,炉冷	≤207
40Cr13	退火:750 ~ 800℃,保温一定时间,炉冷至 500℃空冷	≤217
95Cr18	软化退火:800 ~ 840℃,保温一定时间,炉冷至 500℃以下空冷	≤255 珠光体
	完全退火:840 ~ 860℃,保温一定时间,炉冷	≤255
102Cr17Mo	退火:850 ~ 870℃ × 4 ~ 6h,炉冷至 600℃以下空冷	≤255
	再结晶退火:730 ~ 750℃,空冷	—
14Cr17Ni2	去应力退火:660 ~ 680℃,保温一定时间,炉冷	珠光体
	高温退火:850 ~ 870℃,保温一定时间,炉冷	≤250
SM3Cr17Mo	退火:850 ~ 870℃ × 4 ~ 6h,炉冷至 550℃以下空冷	≤201
	再结晶退火:730 ~ 750℃,保温一定时间,空冷	—
Cr14Mo4V	等温退火:880 ~ 1 000℃ × 4 ~ 6h,炉冷至 600℃,保温 2 ~ 5h,出炉空冷	197 ~ 241

（2）最终热处理 耐蚀性塑料模具钢的淬火、回火工艺规范见表 2-61。

表 2-61 耐蚀性塑料模具钢的淬火、回火工艺规范

牌 号	淬火加热温度/℃	淬火硬度 HRC	回火温度 /℃	回火硬度 HRC
20Cr13	淬火:1 000 ~ 1 050(油冷或水冷)	≥45HRC	660 ~ 670	20 ~ 23
30Cr13	淬火:1 020 ~ 1 050℃(油冷或空冷)	52 ~ 54	200 ~ 300	50 ~ 52
40Cr13	淬火:1 000 ~ 1 050(油冷)	52 ~ 55	200 ~ 300	50 ~ 53
95Cr18	淬火:1 030 ~ 1 070(油冷)	≥55	200 ~ 300	56 ~ 58
102Cr17Mo	淬火:1 050 ~ 1 100℃(油冷)	≥58	160 ~ 180	≥58
14Cr17Ni2	淬火:980 ~ 1 050℃(油冷或空冷)	44 ~ 51	275 ~ 300	≥40
			560 ~ 605	26 ~ 34
SM3Cr17Mo	淬火:1 000 ~ 1 050(油冷或空冷)	48 ~ 50	160 ~ 180	47 ~ 48
Cr14Mo4V	淬火:淬火加热 1 100 ~ 1 120℃,油冷,硬度≥58 回火 500 ~ 525 × 2h,4 次			61 ~ 63

2.4.5 典型塑料模具热处理实例

实例1 胶木用模（见图2-7），材料为20Cr钢，要求渗碳、淬火与回火处理后硬度为50~54HRC，变形量要求为0.1mm。

在910℃渗碳后出炉空冷，830℃装箱加热，出炉预冷至750℃后淬入热油中，最后在230℃进行回火处理。20Cr钢制胶木用模热处理工艺曲线如图2-8所示。

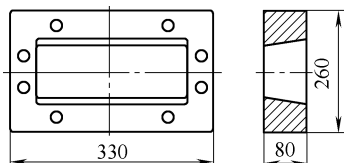


图2-7 20Cr钢制胶木用模简图

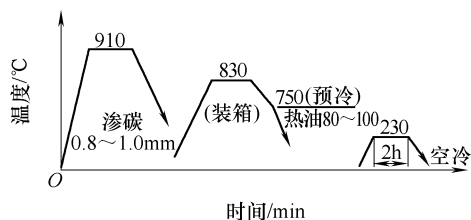


图2-8 20Cr钢制胶木用模热处理工艺曲线

实例2 胶木用模（见图2-9），材料为CrWMn钢，要求淬火与回火后硬度为51~55HRC，变形量要求为 $A=0.07\text{mm}$ ， $B=0\text{mm}$ 。

首先在400℃的电阻炉中预热，转入830℃的盐浴炉中加热，淬入230℃的硝盐炉等温，入油冷却10min，最后在350℃进行回火处理。CrWMn钢制胶木用模热处理工艺曲线如图2-10所示。

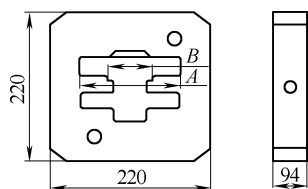


图2-9 CrWMn制胶木用模简图

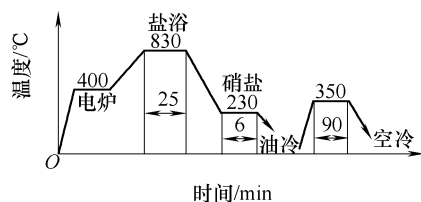


图2-10 CrWMn制胶木用模热处理工艺曲线

实例3 大模块，外形尺寸为1260mm×660mm×2520mm，重量为16.5t，材料为718（3Cr2NiMnMo）钢，要求以预硬化（调质）状态交货（硬度28~36HRC）。

(1) 大模块调质工艺 锻造模块经台车式电阻炉860℃加热保温后，在23℃、15%（质量分数）UCON E水基淬火冷却介质中冷却5h，然后进行550℃高温回火。

(2) 检测结果 检测模块的表面硬度平均为35HRC（锤击式布氏硬度计测试后换算），长度1200mm的截面上最大硬度差为2HRC。

实例4 胶木模，材料为25CrNi3MoAl钢，要求热处理。

(1) 热处理工艺

1) 一级固溶处理为加热至860~880℃，水冷，硬度为40~45HRC。

2) 二级固溶处理为加热至 $670 \sim 690^{\circ}\text{C}$, 水冷。水冷后进行 $400^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ 的去除应力处理, 处理后硬度 $< 28\text{HRC}$ 。

3) 时效处理为 $510 \sim 530^{\circ}\text{C} \times 6 \sim 7\text{h}$, 如果时效后硬度未达到预定的要求, 可重复时效 1 或 2 次, 直到时效硬度达到 40HRC 以上。

(2) 应用效果 用黑色胶木粉压制的 AR-300 型电焊机的手轮, 原采用 T10A 钢制的压模, 热处理时变形较大, 型腔尺寸容易超差, 有时胀大, 有时缩小, 影响压制件质量, 且压模型腔在压制 200 件后就发生拉毛和压伤现象。改用 25CrNi3MoAl 钢制造后无变形, 使用中不易被拉毛和压伤, 可以显著提高模具寿命。

2.5 玻璃模具材料与热处理

玻璃模具是玻璃制品成形的重要工艺装备, 且模具质量直接影响到玻璃制品的外观与生产成本。

国外玻璃模具材料主要是耐热铸铁、合金结构钢或合金工具钢, 这些材料经表面强化处理, 模具寿命可高达 $40 \sim 50$ 万次。国内较多采用铸铁 (HT200、低锡铸铁、铜铬铸铁、中硅稀土铸铁、中硅钼稀土铸铁、低锡蠕墨铸铁、低铝蠕墨铸铁等) 及不锈钢 (如 $12\text{Cr}18\text{Ni}9$ 、 $12\text{Cr}13$ 、 $30\text{Cr}13$ 、 $40\text{Cr}13$ 、 $4\text{Cr}13\text{Ni}$ 、 $\text{Cr}25\text{Ni}20\text{Si}2$ 、 $\text{Cr}17$ 型、 $14\text{Cr}17\text{Ni}2$ 等) 等制造玻璃模具。针对玻璃制品的技术要求, 选择合适的模具材料, 再进行适当的热处理, 可以最大限度地提高模具的使用寿命与玻璃制品的外观质量。

2.5.1 玻璃模具材料的性能要求

由于玻璃的熔化温度较高, 其熔液中含有 Si、Al、Li、Na、F 等元素, 有一定的腐蚀性, 故在工作过程中模具的型腔会受到严重的腐蚀。玻璃熔化的温度通常为 $1\,000 \sim 1\,400^{\circ}\text{C}$, 倒入模具型腔后的温度为 $1\,060^{\circ}\text{C}$, 压制成形后的温度约为 800°C , 而此时模具的表面温度在 $600 \sim 700^{\circ}\text{C}$ 。模具在如此高的温度下工作, 很容易发生氧化和变形、体积膨胀及玻璃粘模。玻璃制品出模后, 由于需对模具进行冷却处理 (或在工作过程中冷却), 因此模具在冷热交替的交变热应力作用下, 其表面会出现热疲劳裂纹、粘模及型腔尺寸发生变化等缺陷。从玻璃的熔化到制品的形成过程来看, 优质的玻璃模具应具有良好的抗氧化性、导热性、耐冷热疲劳性、耐磨性、切削加工性, 以及组织致密、均匀、膨胀系数小等特性。因此, 模具材料应满足下列要求: ①较好的耐冷热疲劳和耐热冲击能力; ②较好的抗高温氧化性和抗浸蚀性; ③较低的热膨胀系数; ④良好的导热性, 易于散热; ⑤良好的切削加工性, 加工后具有低的表面粗糙度; ⑥价廉、耐用。

上述要求中, 玻璃模具材料的耐冷热疲劳性、抗高温氧化性和抗浸蚀性是最为重要的。

2.5.2 玻璃模具材料及其热处理特点

玻璃模具工作温度较高（在压制玻璃制品时，模膛表面温度可达 600 ~ 700℃，甚至高达 800℃），工作条件极为恶劣，即使采用 3Cr2W8V 钢或耐热钢制造也常因氧化、拉毛或合模口压塌而过早失效。对此，可以采用表面强化工艺来提高模具使用寿命。强化方法主要有火焰淬火、接触电阻淬火、等离子喷涂、高频淬火、激光淬火、化学热处理、金属堆焊及喷焊等。

玻璃模具材料大多为铸铁或铸造不锈钢等，目前用得较多的为马氏体时效钢 4Cr13Ni 及低锡蠕墨铸铁等。蠕墨铸铁是在熔炼时加入适量的蠕化剂，使石墨呈蠕虫状。蠕虫状石墨的端部圆滑，且分布比较均匀，因此蠕墨铸铁的力学性能介于灰铸铁与球墨铸铁之间。

（1）常用蠕墨铸铁的性能 表 2-62 为常用蠕墨铸铁牌号与力学性能。

表 2-62 常用蠕墨铸铁牌号与力学性能

牌 号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率(%)	硬度 HBW	基体组织
RuT420	420	335	0.75	200 ~ 280	珠光体
RuT380	380	300	1.75	193 ~ 274	珠光体
RuT340	340	270	1.0	170 ~ 240	珠光体 + 铁素体
RuT300	300	240	1.5	140 ~ 217	珠光体 + 铁素体
RuT260	260	195	3.0	121 ~ 197	铁素体

普通铸铁玻璃模具一次上机的连续使用寿命为 2 ~ 5 万次，最终使用寿命仅为 7.5 ~ 12 万次。而采用低锡蠕墨铸铁后，模具使用寿命大大提高，达到了 36.7 ~ 82 万次。

（2）4Cr13Ni 不锈钢的热处理规范、力学性能与应用

1）为了提高玻璃制品的质量和模具使用寿命，可对 4Cr13Ni 不锈钢制模具型腔进行镀铬处理，镀铬层厚度为 0.01 ~ 0.02mm。经镀铬的模具可以压制出一级玻璃壳。

该钢的抗冷热疲劳性显著高于铸铁，如果采用水冷金属衬套陶瓷型精铸，可更好地保证玻璃壳模具的激冷层，细化表面层晶粒，从而进一步提高模具的使用寿命。

2）化学成分。该钢的化学成分（质量分数）：C0.40% ~ 0.42%、Si0.27% ~ 0.38%、Mn0.4%、Cr13.44% ~ 13.45%、Ni1.10% ~ 1.14%、S0.01%、P0.029% ~ 0.031%。

3）热处理规范。工艺 1：可在铸造后立即以 700℃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：将铸造模具在 1 000℃加热淬火后以 700℃回火 2 次，硬度为 25HRC，热处理后碳化物分布更加均匀。

4）力学性能。铸造后 700℃回火 2 次，抗拉强度为 800MPa，断后伸长率为 3.5%，断面收缩率为 4.5%，冲击韧度为 6J/cm²，硬度为 24HRC。

5）应用。在 11 位自动压力机上分别安装 4Cr13Ni 不锈钢、Cr25Ni20Si2 不锈

钢、Cr17 型不锈钢及铸铁等材料制作的显像管屏凹模，进行使用对比试验。其中，铸铁凹模压制玻璃壳 5 000 件时因凹模中心严重龟裂而报废；Cr25Ni20Si2 钢制凹模因导热性差，不能适应压力机的连续操作，无法和 4Cr13Ni 钢制凹模同机继续试验；Cr17 型不锈钢制凹模压制 5 万件时因模具表面有砂眼而不能再压制出合格产品；4Cr13Ni 不锈钢制作的玻壳模具压制零件数量在 15 万次以上时仍可以继续使用，也未出现龟裂。

2.5.3 典型玻璃模具热处理实例

实例 1 玻璃瓶模具，材料为蠕墨铸铁，要求高频淬火处理。

(1) 模具高频淬火 模具放入感应圈内。感应圈通过交变电流，在其周围形成交变磁场，并在模具表面感应出频率相同、方向相反的电 流，即所谓涡流。涡流转换成的热能可以迅速加热模具表层，使其达到淬火温度，然后喷射淬火冷却介质进行淬火，即可将表层淬硬为马氏体。感应加热时所使用的感应圈（矩形铜管）的几何形状是沿成形模的合缝线仿制成的。

(2) 效果 高频淬火处理后沿模具的合缝线强化后的模具使用寿命见表 2-63。实际上机使用表明，蠕墨铸铁玻璃模具沿模具的合缝线强化处理后，既有良好的合缝线硬度，又改善了加工性能，不但能够缩减合模面变形，还能够进一步提高材料的热导率，同原采用 HT200 灰铸铁材料相比，大大延长了模具一次上机的连续使用寿命。

表 2-63 沿模具的合缝线强化后的模具使用寿命

模具材料及编号		一次上机连续使用寿命			延续使用寿命		
		使用时间 /昼夜	模具使用 次数	下机原因	使用时间 /昼夜	模具使用 次数	下机原因
原 HT200 灰铸铁		2 ~ 3	17 280 ~ 25 920	倒棱或氧化	7. 5	64 800	倒棱、氧化报废
珠光体蠕墨铸铁		8 ~ 13	69 120 ~ 112 320	倒棱	—	548 496 (10 付模具平均值)	合缝线大, 变形、 修理报废
蠕墨 铸铁	004(淬火)	26. 75	211 860	瓶口倒棱	64. 7	525 336	更换瓶子模型
	005(正火)	—	—	—	86. 45	697 272	更换瓶子模型
	006(正火)	7. 7	60 984	瓶颈倒棱	53. 24	432 876	更换瓶子模型

实例 2 医用盐水瓶模具，要求具有高的精度、耐磨性、耐热疲劳性、抗氧化性，选用稀土蠕墨铸铁制造玻璃模具，可获得满意的性能与使用寿命。

其热处理工艺为：950℃ × 4h 加热，炉冷至 500℃ 出炉空冷。处理后的硬度为 225HBW，抗拉强度为 528MPa，使用寿命为合金铸铁的 4 倍。

实例 3 玻璃模具，材料为 QT400-15 稀土球墨铸铁，要求采用热喷焊表面强化技术处理。

(1) 热喷焊表面强化技术 合金粉末的氧乙炔喷焊设备简单、造价低、操作

方便，喷焊层对基体金属的适应性强，母材不熔化，喷焊层几乎不受基体金属化学成分的影响。喷焊层厚度可在0.2~3mm范围内选择，喷焊层与基体之间结合强度高，一般为350~400MPa，组织致密、无孔、表面光滑。采用该项技术主要是提高玻璃模具圆柱面的抗高温氧化能力及耐磨性，不但能使合模面边缘始终保持锐角而不被压塌，还能使整个模具的易损部位均由性能优良的喷焊层所包裹，从而提高模具的使用寿命。

(2) 喷焊层材料及基体材料 喷焊层材料采用镍铬-12 自熔合金粉末。基体选用 QT400-15 稀土球墨铸铁。

(3) 喷焊工艺 喷焊工艺为：模具表面清理→预热（200~250℃）→喷敷（采用 SYH-E 火焰喷枪进行喷敷，每层喷敷层的厚度为0.2~0.5mm）→重熔（采用 SPH-C 专用重熔枪、中性火焰将喷敷层加热到该合金的熔点范围使之熔融，并与模具基体金属之间发生相互扩散，形成合金层，每次喷焊厚度为0.2~0.3mm）→冷却→精加工（先采用硬质合金刀具进行切削加工，再采用砂轮进行湿法磨削来保证加工精度）。表 2-64 为三种材料制作的玻璃镜片压铸模寿命对比。

表 2-64 三种材料制作的玻璃镜片压铸模寿命对比

模 具 材 料	上模使用时间/h	单次压制数量/件	总压制数量/件
合金工具钢 3Cr2W8V	34	3 461	27 688
钢结硬质合金 Cr1Mo2W50	110	12 998	103 984
稀土球铁 QT400-15 喷焊镍铬-12 粉末	145.5	21 068	168 544

2.6 铸钢、铸铁及硬质合金等模具材料与热处理

模具制造主要选用钢铁材料，但在实际生产中，有时也会考虑选用其他类型的模具材料，如铸铁、铸钢、有色金属及其合金、硬质合金及钢结硬质合金、陶瓷合金及非金属材料（如陶瓷、橡胶、塑料）等。

2.6.1 铸钢模具材料与热处理

1. 常用铸钢模具材料

铸钢作为一种模具材料，它的化学成分与轧制或锻制钢材基本一致，各种力学性能也无太大的差异，只是铸钢中杂质的含量多，不能进行锻造加工。常用的模具铸钢的力学性能与应用见表 2-65。

表 2-65 常用的模具铸钢的力学性能与应用

牌 号	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	冲击初度 /(J/cm ²)	伸长率 (%)	断面收缩率 (%)	硬度 HRC	应 用
ZG270-500	270	500	35	18	25	—	负荷较大的模 具底板、模座等

(续)

牌 号	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	冲击韧度 /(J/cm ²)	伸长率 (%)	断面收缩率 (%)	硬度 HRC	应 用
ZG310-570	310	570	30	15	21	—	负荷较大的模 具底板、模座等
ZG45Mn2	≥700 (调质)	≥1 000 (调质)	≥30	≥8 (调质)	≥20 (调质)	29 ~ 33 (调质)	堆焊锻模模体
ZG50Cr3Mo	—	—	—	—	—	—	堆焊模的焊条 (板极)
ZG50CrNiMo	≥900 (调质)	≥1 100 (调质)	20 ~ 40 (调质)	≥6 (调质)	—	38 ~ 44 (调质)	中小批量生产 的小型锻模
ZG8Cr3	350	600	—	20	30	—	热切边模
ZG30Cr2W8	—	—	—	—	—	—	大型压铸模
ZG6CrMnMoCuTi	—	—	—	—	—	58 ~ 61 (火焰淬火)	大型翻边模
ZG55CrMnMo	—	—	—	—	—	—	中小批量生产 的小型锻模

2. 模具铸钢的热处理工艺

一般小型铸钢模具的热处理工艺规范与普通模具钢的相同。如果是锻模、水压机砧模等大型与特大型模具零部件，为确保获得要求的力学性能，常采用ZG55CrMnMo、ZG6CrMnMo、ZG50CrNiMo等钢来制造，因为这几种钢具有良好的淬透性。考虑到铸钢模具的工作条件和技术要求，通常采用正火和高温回火来提高模具的整体性能。

该类铸钢模具的热处理工艺为：①正火处理，即在加热炉中加热至830～850℃奥氏体化后（加热透烧），立即在空气中冷却或进行喷雾冷却。②高温回火，即在630～650℃的热处理炉中加热一定的时间，然后空冷。

3. 新型模具铸钢及其热处理工艺

(1) 新型铸钢的化学成分 新型铸钢的化学成分见表2-66。

表 2-66 新型铸钢的化学成分（质量分数，%）

牌 号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	S	P
4Cr13Ni	0.35 ~ 0.45	≤1.0	≤1.0	12 ~ 14	0.6 ~ 1.5	—	—	—	≤0.03	≤0.03
ZG4Cr3Mo2WV	0.32 ~ 0.42	0.6 ~ 1.0	0.4 ~ 0.6	2.8 ~ 3.2	—	1.5 ~ 1.8	0.7 ~ 1.0	0.6 ~ 1.0	≤0.03	≤0.03
ZGMn13	1.0 ~ 1.4	≤0.60	10.0 ~ 14.0	—	—	—	—	—	≤0.03	≤0.03

(2) 新型铸钢的热处理工艺

1) 4Cr13Ni 铸钢模具采用砂型铸造，铸造后的热处理工艺规范和力学性能分别见表 2-67 和表 2-68。4Cr13Ni 铸钢可用于制造玻璃模具等。

表 2-67 4Cr13Ni 铸钢模具的热处理工艺规范

处理类别	铸造后处理工艺	回 火 工 艺	组 织	硬度 HRC
铸造后 高温回火	铸造后立即进行回火	690 ~ 710℃ × 5 ~ 8h, 回火 2 次	铁素体 + 均匀分布的细 颗粒状碳化物	23 ~ 25
铸造后淬火 + 高温回火	铸 造 后 加 热 到 990 ~ 1 020℃, 空冷淬火	690 ~ 710℃ × 6 ~ 8h, 回火 2 次	铁素体 + 更加均匀分布 的细颗粒状碳化物	24 ~ 27

表 2-68 铸造后 4Cr13Ni 铸钢的力学性能

铸造后热处理工艺	抗拉强度 /MPa	冲击初度 /(J/cm ²)	伸长率 (%)	断面收缩率 (%)	硬度 HRC
铸造后高温回火	800	6	3.5	4.5	24
铸造后淬火 + 高温回火	800	7.6	5.0	6.0	25

2) ZG4Cr3Mo2WV 铸钢（陶瓷型精铸锻模用钢）热处理工艺。包括预备热处理和最终热处理：①预备热处理分为球化退火和正火 + 高温回火。球化退火工艺为：500℃ × 2h 预热，以 50℃/h 速度升温至 870 ~ 890℃，保温 8 ~ 10h，炉冷至 720 ~ 740℃，保温 8 ~ 10h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷。正火 + 高温回火工艺为：正火，500℃ × 2h 预热，680℃ × 6h 预热，升温至 890℃ 保温 10h 后出炉空冷；高温回火，500 ~ 550℃ × 1h 预热，升温至 700℃，保温 8h，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷。②最终热处理为淬火 + 高温回火。淬火工艺为：预热 490 ~ 520℃ × 0.5 ~ 1h，以 50℃/h 升温至加热温度 1 050 ~ 1 100℃，保温后淬油（20 ~ 60℃），淬火后硬度 ≥ 50HRC；高温回火工艺为：570 ~ 650℃ × 2 ~ 3h，回火后硬度为 45 ~ 50HRC。

3) ZGMn13 铸钢热处理工艺。ZGMn13 铸钢为高耐磨钢，用于制造冷挤压成形模、压铸模、锻压模和拉深模等。为了改善其切削加工性能，可在加工前进行 600 ~ 650℃ 的长时间回火，使奥氏体析出碳化物并发生索氏体转变。表 2-69 为 ZGMn13 铸钢的一般热处理工艺规范。

表 2-69 ZGMn13 铸钢的热处理工艺规范

工艺 类型	第一次热处理或水韧处理			第二次热处理		
	预热温度 /℃	加热温度与 要求	淬火冷却 介质	预备热 处理	加热规范	淬火冷却 介质
水韧处理	650 ~ 700	1 050 ~ 1 100℃	≤60℃ 的水或 质量分数为 5% ~ 10% 的盐水	—	—	—
余热热 处理	—	浇注成形后 1 050 ~ 1 100℃		—	—	—
	—	高温成形后直接加 热到 1 050 ~ 1 100℃		—	—	—

(续)

工艺类型	第一次热处理或水韧处理			第二次热处理		
	预热温度/℃	加热温度与要求	淬火冷却介质	预备热处理	加热规范	淬火冷却介质
晶粒细化处理	—	1 000 ~ 1 200℃	≤60℃的水或质量分数为	500 ~ 700℃保温,获得珠光体	950 ~ 1 100℃	≤60℃的水或质量分数为
弥散处理	—	1 050 ~ 1 100℃	5% ~ 10%的盐水	460 ~ 480℃ × 4 ~ 6h	840 ~ 860℃ × 3 ~ 6h	5% ~ 10%的盐水

2.6.2 铸铁模具材料与热处理

铸铁材料具有高的碳含量，经合金化处理后，具有耐热、耐蚀和耐磨等特殊性能。该类材料具有一定的力学性能和优良的工艺性能，其基本特点为铸造性好、易于成形、工艺简单、成本低、有良好的抗振性、减摩性和切削加工性，因此较为广泛地应用于各种拉深模、压型模、玻璃模及模具的有关附件等。铸铁模具材料多为灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁及特殊性能铸铁（合金铸铁）等。

1. 灰铸铁及其热处理工艺

（1）灰铸铁牌号 常用的灰铸铁牌号有 HT100、HT150、HT200、HT250、HT300 和 HT350 等（执行 GB/T 9439—1988 标准），应用最为广泛的为 HT200 和 HT250。

（2）灰铸铁热处理工艺 灰铸铁的热处理工艺规范见表 2-70（供参考）。

表 2-70 灰铸铁的热处理工艺规范

热处理类型	加热温度/℃	保温时间/h	冷却要求	金相组织	目的
去应力退火	500 ~ 550	1 ~ 3	炉冷至 100℃以下出炉	片状石墨	去除内部应力或加工应力
正火	880 ~ 920	1 ~ 3	出炉空冷	珠光体 + 碳化物 + 片状石墨	提高铸铁中的珠光体数量,提高硬度、强度及耐磨性
淬火 + 回火	淬火:850 ~ 900 回火:400 ~ 500	1 ~ 3	出炉后水冷或油冷 出炉后空冷	回火索氏体 + 片状石墨 (硬度为 400 ~ 500HBW)	提高铸件的硬度、强度及耐磨性

2. 球墨铸铁及其热处理工艺

球墨铸铁可进行热处理强化，它不仅可进行一般的去应力退火、石墨化、正火及表面淬火等，还可进行调质处理、等温淬火和化学热处理等。球墨铸铁可用于制造各种压型模、冲压模和热切模等。

（1）球墨铸铁牌号 球墨铸铁牌号有 QT900-2、QT800-2、QT700-2、QT600-3、

QT500-7、QT450-10、QT400-15、QT400-18 和 QT400-18L 等（执行 GB/T 1348—2009 标准）。

（2）球墨铸铁热处理工艺 球墨铸铁的热处理工艺规范见表 2-71（供参考）。

表 2-71 球墨铸铁的热处理工艺规范

热处理类型		热处理工艺规范	目的或金相组织	适用范围
退火	1) 去应力退火	1) 550 ~ 560℃ × 4 ~ 7h, 炉冷至 200℃ 空冷	1) 消除应力	1) 形状复杂、截面悬殊的铸件 2) 高韧性的铸件 3) 产生白口、自由渗碳体和局部成分偏析的铸件
	2) 低温石墨化退火	2) 720 ~ 760℃ × 3 ~ 4h, 炉冷至 600℃ 空冷	2) 获得一定的韧性	
	3) 高温石墨化退火	3) 900 ~ 950℃ × 3 ~ 4h, 炉冷至 600℃ 空冷	3) 充分石墨化, 消除成分偏析	
正火	1) 完全奥氏体化正火	1) 880 ~ 950℃ × 1 ~ 2h, 空冷或吹风、喷水雾等	1) 获得珠光体为基体的球墨铸铁, 消除白口组织	1) 要求珠光体多及强度、硬度、耐磨性高的铸件 2) 用于要求改善铸件塑性与韧性的铸件
	2) 不完全奥氏体化正火	2) 840 ~ 860℃ × 1 ~ 3h, 空冷或吹风、喷水雾等	2) 获得珠光体 + 铁素体为基体的球墨铸铁, 消除白口组织	
调质处理		1) 淬火加热温度 860 ~ 920℃, 充分保温后油冷, 形状简单的采用水或热水冷却 2) 回火温度为 600 ~ 650℃ × 2 ~ 6h, 快冷, 以防产生回火脆性	1) 细片状马氏体 + 球状石墨 2) 索氏体 + 球状石墨	用于受力比较复杂、综合力学性能要求较高的模具, 以及大截面的模具铸件
等温淬火		淬火加热温度 860 ~ 920℃, 保温一定时间后, 在 260 ~ 320℃ 硝盐浴中等温保持 2 ~ 3h, 空冷。等温淬火后如果再进行消除内应力处理, 可采用 180 ~ 220℃ 低温回火	下贝氏体 + 少量残留奥氏体 + 少量马氏体 + 球状石墨	用于综合力学性能较高、外形比较复杂、一般淬火后容易变形和开裂的模具零件
表面淬火(感应淬火、火焰淬火等)		淬火加热温度为 900 ~ 950℃, 油冷。回火温度为 180 ~ 220℃, 保温 2 ~ 3h	提高表面硬度和耐磨性	用于要求表面硬度较高和耐磨性好的简单模具铸件

3. 蠕墨铸铁及其热处理

蠕墨铸铁的力学性能介于灰铸铁与球墨铸铁之间，既具有近似于球墨铸铁的较

高强度、刚度、耐磨性和一定韧性，同时又具有灰铸铁的良好铸造性和导热性。蠕墨铸铁对壁厚的敏感性较小，导热性优于球墨铸铁，且抗热性和抗氧化性好于其他类型的铸铁。

(1) 常用蠕墨铸铁牌号 常用蠕墨铸铁牌号有 RuT420、RuT380、RuT340、RuT300 及 RuT260 等（执行 JB/T 4403—2009 标准）。

(2) 蠕墨铸铁的组织与应用 铸态下的蠕墨铸铁的基体组织为铁素体（质量分数约为 50% 或更高），加入 Cu、Ni、Sn 等珠光体稳定元素后，可使铸态珠光体的含量达到 70%（质量分数）以上，如果对其进行正火处理，则可使珠光体的含量达到 90% ~ 95%（质量分数）。

蠕墨铸铁用于铸造玻璃模具等，已获得了较好的效果，如医用盐水瓶模具选用稀土蠕墨铸铁制造，热处理后（其热处理工艺为 950℃ × 4h 加热，炉冷至 500℃ 出炉空冷）硬度为 225HBW，抗拉强度为 528MPa，使用寿命为合金铸铁的 4 倍。

4. 特殊性能铸铁（合金铸铁）及其热处理工艺

当普通铸铁不能满足更高的力学性能要求或要求铸铁材料具有耐热性、耐磨性和耐蚀性等性能时，就需要用到合金铸铁。合金铸铁是向材料中加入一定量的合金元素，以获得特殊性能的铸铁，又称为特殊性能铸铁。

合金铸铁的性能与某些合金钢相似，其力学性能低于铸钢，脆性大且容易开裂，但工艺简单、浇注方便且成本低，因此多用来制作小批量生产的拉深模和受冲击力比较小的热态工作模具，如玻璃模、塑料模及热压模等。根据性能的差异，合金铸铁分为耐磨铸铁、耐热铸铁及耐蚀铸铁等。

(1) 耐磨铸铁 该类铸铁具有高的耐磨性和均匀的高硬度，是在白口铸铁的基础上加入适量的 Cr、Mo、Cu、W、Ni 和 Mn 等合金元素而形成的合金铸铁。

1) 合金耐磨铸铁的成分与性能见表 2-72。

表 2-72 合金耐磨铸铁的成分与性能

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
	C	Si	Cr	Ni	Mo	Cu			
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
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
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
高铬钼	2.0 ~ 2.8	≤1.0	13.0 ~ 18.0	≤1.0	≤3.0	≤1.2	450 ~ 1 000	39 ~ 62	75

(续)

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
	C	Si	Cr	Ni	Mo	Cu			
高铬钼	2.8 ~ 3.5	≤1.0	13.0 ~ 18.0	≤1.0	0.5 ~ 3.0	≤1.2	450 ~ 1 000	39 ~ 62	75
高铬钼	2.0 ~ 3.0	≤1.0	18.0 ~ 22.0	≤1.5	1.5 ~ 3.5	0.8 ~ 1.2	450 ~ 1 000	39 ~ 62	300
高铬	2.3 ~ 3.0	≤1.0	23.0 ~ 28.0	≤1.5	≤1.0	≤2.0	560 ~ 960	39 ~ 62	200

2) 合金耐磨铸铁通过适当的热处理工艺,可以改善其碳化物的分布和形态,并改善基体的组织,提高其硬度、耐磨性及韧性。表 2-73 为耐磨合金铸铁的热处理工艺规范。

表 2-73 耐磨合金铸铁的热处理工艺规范

热处理工艺 类型	热处理工艺规范	硬度 HRC	组织与用途	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	冲击韧度 /(J/cm ²)
常规热处理	淬火 950 ~ 1 000℃ × 1 ~ 3h,空冷淬火。回火 200 ~ 260℃ × 3 ~ 4h,空冷	55 ~ 58	B _下 + M ₂₃ C ₃	352.8	705.6	5.2
改进热处理	淬火 950 ~ 1 000℃ × 1 ~ 3h,空冷淬火;回火 525 ~ 535℃ × 3 ~ 4h,空冷	566 HV	α + M ₂₃ C ₃	—	—	7.39
高铬铸铁固 溶热处理	1) 1 050℃ × 8h,缓慢冷却	1) 62 ~ 63	1) 室温下工作的高铬铸铁,具有高的硬度	—	—	—
	2) 1 050℃ × 8h,快速冷却(风吹)并及时回火(650℃ × 2h)	2) 55 ~ 58	2) 较高温度下连续工作的模具			

(2) 耐热铸铁 耐热铸铁是在铸铁中加入 Al、Si、Cr 等合金元素形成的合金铸铁。铸铁中加入 Al、Si、Cr 等元素后,可以使铸件表面形成一层致密的保护性氧化膜,从而提高铸件的抗氧化能力并改善铸件的耐热性。这类铸铁可分为中硅球墨铸铁和高硅球墨铸铁。表 2-74 为耐热铸铁的分类与性能。耐热铸铁主要用于制造小批量生产和受冲击比较小的热态工作模具,如塑料模、热压模及玻璃模等。采用中硅球墨铸铁制造的啤酒瓶成形模,使用寿命高达 65 万次,比用其他铸铁制造

的模具提高了 1 ~2 倍。

表 2-74 耐热铸铁的分类与性能

分 类	名 称	主要合金元素 (质量分数,%)	抗拉强度 /MPa	硬度 HBW	应用温度范围 /℃
硅系	中硅球墨铸铁	Si;5.0 ~ 6.0	100	140 ~ 255	800 ~ 850
		Si;3.5 ~ 4.5	450	157 ~ 239	600 ~ 750
		Si;4.5 ~ 5.5	350	197 ~ 282	750 ~ 900
		Si;5.0 ~ 6.0	220	228 ~ 321	900 ~ 950
		Si;6.0 ~ 6.5	200	270 ~ 301	950 ~ 1 000
铝系	中铝铸铁	Al;5.5 ~ 7.0	—	—	600 ~ 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	1 000 ~ 1 100
铝硅系	铝硅球墨铸铁	Si;4.4 ~ 5.4、 Al;4.0 ~ 5.0	220 ~ 275	—	900 ~ 1 050
铬系	高铬铸铁	Cr;30 ~ 33	347 ~ 409	250 ~ 350	1 000 ~ 1 100

(3) 耐蚀铸铁 耐蚀铸铁是在铸铁中加入大量的 Si、Al、Cr、Ni 及 Cu 等合金元素形成的合金铸铁。铸铁中加入这些合金元素后，可以在铸件表面形成致密、牢固及完整的保护膜，并提高铸件基体的电极电位，从而有效地提高铸铁的耐蚀性。耐蚀铸铁分为高硅耐蚀铸铁、高铝耐蚀铸铁、高铬耐蚀铸铁和奥氏体耐蚀铸铁等几类，其中应用最为广泛的是高硅耐蚀铸铁和奥氏体耐蚀铸铁。耐蚀铸铁适于制造生产批量不大、强度要求不高及要求耐腐蚀的模具。

表 2-75 和表 2-76 分别为高硅耐蚀铸铁和奥氏体耐蚀铸铁的成分与力学性能。

表 2-75 高硅耐蚀铸铁的成分与力学性能（GB/T 8491—2009）

牌 号	化学成分(质量分数,%)								最小抗弯强度 /MPa	最小挠度 /mm
	C	Si	Mn≤	Cr	P/S ≤	Mo	Cu	R 残留 量≤		
HTSSi11Cu2CrR	≤1.20	10.00 ~ 12.00	0.50	0.60 ~ 0.80	0.10/ 0.10	—	1.80 ~ 2.20	0.10	190	0.80
HTSSi15R	0.65 ~ 1.10	14.20 ~ 14.75	1.50	≤0.50	0.10/ 0.10	≤0.50	≤0.50	0.10	118	0.66
HTSSi15Cr4MoR	0.75 ~ 1.15	14.20 ~ 14.75	1.50	3.25 ~ 5.00	0.10/ 0.10	0.40 ~ 0.60	≤0.50	0.10	118	0.66
HTSSi15Cr4R	0.70 ~ 1.10	14.20 ~ 14.75	1.50	3.25 ~ 5.00	0.10/ 0.10	≤0.20	≤0.50	0.10	118	0.66

表 2-76 奥氏体耐蚀铸铁的成分与力学性能

石墨形式	化学成分(质量分数,%)						抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	硬度 HRC
	C ≤	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	170~210	—	140~220
	3.0	1.0~2.8	0.5~1.5	18.0~22.0	1.0~2.5	≤0.5	170~210	—	120~215
	2.5	4.5~5.5	0.5~1.5	18.0~22.0	1.5~4.5	≤0.5	190~280	—	140~250
	2.4	1.0~2.0	0.5~1.5	34.0~36.0	≤0.2	≤0.5	120~180	—	120~140
球状	3.0	1.5~3.0	0.5~1.5	18.0~22.0	1.0~1.5	≤0.5	370~470	210~250	140~220
	3.0	4.5~5.5	0.5~1.5	18.0~22.0	1.0~2.5	≤0.5	370~430	210~260	180~230
	2.6	5.0~6.0	0.5~1.5	28.0~32.0	4.5~5.5	≤0.5	390~490	240~310	170~250

2.6.3 硬质合金及钢结硬质合金模具材料与热处理

1. 硬质合金

硬质合金是以难熔金属碳化物为基体及硬质相，以铁族金属（Co 或 Ni，主要是 Co）为粘结剂，用粉末冶金的方法生产的多相复合材料。硬质合金是一种高生产率的模具材料，具有以下特点：①硬度高，耐磨性高，耐疲劳性好，使用寿命长。在常温下，硬质合金的硬度一般为 86~93HRA。硬质合金高温硬度高，在 500℃以下硬度不会改变，超过 500℃才有明显下降，但在 800~1 000℃范围内仍可以工作。硬质合金的耐磨性高，可比高速工具钢高 15~20 倍。②抗压强度高，热导率低及线胀系数小，耐腐蚀、耐氧化、耐酸、耐碱。③材料不需要淬火、回火，不存在尺寸、硬度及时效等变化问题。④脆性大，加工困难，价格昂贵。

硬质合金品种繁多，用途广泛，主要用于制造拉丝模、冷挤压模及模具零件或模块等。

(1) 硬质合金种类 常用的硬质合金有以下 3 种：

1) 钨钴类（YG）硬质合金。它是由 WC 与 Co 粉末烧结而成。YG 类硬质合金模具或模具镶块的使用寿命比一般的工模具高几倍到几十倍。YG 类合金制造的模具直接烧结而成，无需机械加工和热处理。

2) 钨钛钴类（YT）硬质合金。它是由 WC、TiC 和 Co 粉末冶金烧结而成。

3) 钨钴钽类（YW）硬质合金。它是由 TaC、TiC、WC 3 种粉末和 Co 粘结剂烧结而成。

3 类硬质合金中，YG 硬质合金的韧性高，YT 硬质合金的热硬性高，YW 硬质合金兼有 YG 与 YT 硬质合金的优点。因此，YW 硬质合金应用比较广泛。

(2) 硬质合金的成分与性能 国产硬质合金的成分、性能与应用见表 2-77。

(3) 硬质合金的应用 硬质合金作为一类模具材料，在冷作模具钢领域应用

较为广泛，如冲裁模、弯曲模、拉深模、拉丝模、冷挤压模及冷镦模等。表 2-78 为不同工作条件下推荐模具选用的硬质合金。

表 2-77 国产硬质合金的成分、性能与应用

牌号	化学成分(质量分 数,%)		力 学 性 能				应 用
	WC	Co	硬度 HRA	抗弯强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	冲击韧度 /(J/cm ²)	
YG3X	97	3	92	980			拉丝模
YG3	97	3	91	1 180			拉丝模
YG4C	96	4	90	1 370			拉丝模
YG6X	94	6	91	1 325			拉丝模
YG6A	92	6	91.5	1 372			拉丝模
YG6	94	6	89.5	1 370	4 510	2.6	拉丝模
YG8N	91	8	89.5	1 519			拉丝拉伸、成形及冷镦模
YG8	92	8	89	1 470	4 385	2.5	拉丝拉伸、成形及冷镦模
YG8C	92	8	88	1 720	3 825	3	拉丝拉伸、成形及冷镦模
YG10C	90	10	86	1 764			拉丝拉伸、成形及冷镦模
YG10H	90	10	91.5	2 156			拉丝拉伸、成形及冷镦模
YG11C	89	11	87	1 960		3.8	拉丝拉伸、成形及冷镦模
YG15	85	15	87	1 960	3 590	4	冲裁、冷镦及冷挤模
YG20	80	20	85.5	2 550	3 430	4.8	冲裁、冷镦及冷挤模
YG20C	80	20	82	2 155		7.0	冲裁、冷镦及冷挤模
YG25	75	25	84.5	2 650	3 250		冲裁、冷镦及冷挤模

表 2-78 不同工作条件下推荐模具选用的硬质合金

模具类别		加工(被冲)材料	小型模具		大中型模具	
			凹模	凸模	凹模	凸模
冲 裁 模	切断模	≤0.5mm 的电工硅钢板	YG8	YG8	YG15	YG15
	冲孔模和落料模	≤0.5mm 的电工硅钢板	YG11	YG15	—	—
		≤4mm 的 45 钢板等	YG20	YG25		
	形状复杂的落料模	≤0.5mm 的电工硅钢板	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	—	—

2. 钢结硬质合金模具及其热处理工艺

钢结硬质合金是介于硬质合金和工具钢之间的一种工模具材料。钢结硬质合金的硬质相也是难熔的金属碳化物，但粘结相则是钢基体。钢基体可以是碳素钢、合金钢、高速工具钢及不锈钢等。硬质相赋予材料以高硬度和高耐磨性，而基体赋予材料可加工性和可热处理性。与硬质合金生产方式相同，钢结硬质合金也是用粉末冶金方法制作的（经球化退火后供给用户）。钢结硬质合金已在冷挤压模、冲模、整形模及冷镦模上得到广泛的应用。

(1) 常用钢结硬质合金 常用钢结硬质合金牌号有：TLMW35、TLMW50、GW50、GJW50、R5、T1 及 D1 等。

(2) 热处理工艺 钢结硬质合金模具热处理包括预备热处理和淬火、回火处理。

1) 预备热处理。钢结硬质合金的预备热处理为锻造后等温球化退火处理，这是由于锻造后硬度较高，只有通过退火处理降低基体硬度，才能改善机械加工性能。为确保钢结硬质合金表面无氧化脱碳，推荐球化退火在真空炉或保护气氛的热处理炉内进行。如果在箱式炉内进行等温球化退火，则应采用装箱法，并在箱内填充保护剂。其退火的基本工艺为：缓慢加热到 850 ~ 880℃，保温足够时间（约 4h），炉冷至 730℃左右并保温 6h，最后炉冷至 500℃以下出炉。退火后的金相组织为硬质相 + 粒状珠光体 + 合金碳化物，硬度为 40HRC，可进行切削加工。常用钢结硬质合金锻造后退火工艺规范见表 2-79。

表 2-79 常用钢结硬质合金锻造后退火工艺规范

牌 号	加热温度/℃	等温温度/℃	硬度 HRC
TLMW35	860 ~ 880	720 ~ 740	35 ~ 40
TLMW50	860 ~ 880	720 ~ 740	35 ~ 40
GW50	850 ~ 870	690 ~ 710	35 ~ 42
GJW50	840 ~ 850	720 ~ 730	35 ~ 38
GT35	860 ~ 880	710 ~ 730	39 ~ 46
R5	820 ~ 840	720 ~ 740	44 ~ 48
T1	820 ~ 840	720 ~ 740	44 ~ 48
D1	820 ~ 840	720 ~ 740	44 ~ 48
DT	860 ~ 880	700 ~ 720	32 ~ 36

2) 淬火及回火。钢结硬质合金模具的热处理工艺与合金工具钢基本相同，可采用普通淬火、分级淬火及等温淬火等，目的是确保基体转变为高度合金化的马氏体组织，获得较高的力学性能。

由于钢结硬质合金的导热性差，因此淬火加热应进行一次或两次预热，第一次

为 500 ~ 550℃，第二次为 800 ~ 850℃。表 2-80 为不同钢结硬质合金的热处理工艺规范。

表 2-80 不同钢结硬质合金的热处理工艺规范

牌 号	淬火温度/℃	淬火后硬度 HRC	回火工艺规范	回火后硬度 HRC
TLMW35	1 020 ~ 1 050	67 ~ 68	180 ~ 200℃ × 1.5h,回火 2 次	65 ~ 66
TLMW50	1 020 ~ 1 050	68 ~ 70	180 ~ 200℃ × 1.5h,回火 2 次	66 ~ 67
			490 ~ 510℃ × 1.5h,回火 2 次	63 ~ 64
GW50	1 050 ~ 1 100	68 ~ 72	180 ~ 200℃ × 1.5h,回火 2 次	68 ~ 69
GJW50	1 000 ~ 1 020	69 ~ 70	180 ~ 200℃ × 1.5h,回火 2 次	66 ~ 67
GT35	960 ~ 980	69 ~ 72	180 ~ 200℃ × 1.5h,回火 2 次	68 ~ 69
			400 ~ 500℃ × 1.5h,回火 2 次	61 ~ 64
R5	1 020 ~ 1 050	71 ~ 73	180 ~ 200℃ × 1.5h,回火 2 次	68 ~ 69
			450 ~ 500℃ × 1.5h,回火 2 次	67 ~ 70
T1	1 240 ~ 1 260	70 ~ 73	500 ~ 510℃ × 1h,回火 3 次	70 ~ 72
D1	1 220 ~ 1 240	72 ~ 74	500 ~ 510℃ × 1h,回火 3 次	66 ~ 69
DT	1 000 ~ 1 020	69 ~ 72	200 ~ 650℃ × 1h,回火 3 次	66 ~ 68

表 2-81 为冷作模具用钢结硬质合金的应用情况。

表 2-81 冷作模具用钢结硬质合金的应用情况

序号	模 具 名 称	原使用钢材及其寿命	钢结硬质合金寿命	提高寿命倍数
1	冷镦 M4、M5 半圆头模具	T10A,8 万件	250 万件	31
2	冷镦 M22 六角螺母模具	Cr12MoV,0.4 万件	22.5 万件	56
3	铁芯(0.35 H12 硅钢片)冲裁模	Cr12,30 万次	625 万次	20.8
4	冷挤压模	CrWMn,1.5 万件	150 ~ 200 万件	100 ~ 133
5	冷挤压轿车轮胎螺钉凹模	Cr12,0.2 万件	1 万件	5
6	冷挤压传动链条滚子凹模	W18Cr4V,2 万件	10 万件	5
7	φ6mm × 20mm 铆钉冷挤压模	T10,10 万件	60 万件	6
8	防尘盖成形凹模	GCr15,0.5 万件	15 万件	30

2.6.4 典型铸钢、铸铁及硬质合金等模具材料热处理实例

实例 1 模具材料为球墨铸铁 QT600-3，要求氮碳共渗处理。

(1) 热处理工艺 球墨铸铁 QT600-3 经 (900 ± 10)℃ 正火，(560 ± 10)℃ 回火 (硬度为 240 ~ 300HBW)，再经 700℃ × 4h 氮碳共渗 (氨气 600 ~ 700L/h，酒精 70 ~ 75 滴/min，炉内压力为 490 ~ 784Pa，硝盐水冷却)，200℃ × 1h 回火，渗层深度为 0.05mm，硬度为 760 ~ 850HV0.1。

(2) 使用效果 几种球墨铸铁制模具氮碳共渗的处理效果见表 2-82。

表 2-82 几种球墨铸铁制造模具氮碳共渗的处理效果

模 具 名 称	处理工艺	处 理 效 果
柴油过滤壳体二次拉深模	氮碳共渗	使用寿命超过 1 万件,超过了 Cr12 钢拉深模的 300 件及 GW 钢结合金凹模的 857 件
空气过滤壳体凹模		单次寿命 3 000 件左右,总寿命达 64 820 件
低碳钢拉深凹模		使用寿命达 3 900 件(原来模具寿命仅为 200 ~ 300 件)
铝压力锅拉深模		使用寿命 > 5 000 件(原来模具寿命仅为 1 000 ~ 2 000 件)

实例 2 拉丝模,材料为 YG8 硬质合金,要求氮离子注入处理。

YG8 硬质合金模具氮离子注入处理可以提高其表面硬度、耐磨性、耐疲劳性和耐蚀性,是提高硬质合金模具寿命的有效方法。

(1) 离子注入工艺 离子注入可采用 C-200KeV 型半导体离子注入和离子束分析两用机。其注入系统由离子源、加速管、磁分析器和靶室等组成。将高纯度的氮气引入注入机的离子源中,电离为氮离子,再经高压电场加速形成高速离子束流,强行注入装有靶室中的模具孔的工作表面上,迫使氮离子和模具材料元素的原子形成强固结合。也可将其表面的位错钉扎在一起,形成所谓“位错网络”。这些效应能够引起材料表面的硬化作用,同时离子注入的轰击作用与喷丸相似,也可使模具表面产生硬化作用。经检验,YG8 拉丝模的氮离子注入深度为 $(3 \sim 8) \times 10^{-5} \text{ mm}$ 。

(2) 拉丝模使用寿命 YG8 硬质合金拉丝模经氮离子注入后,使用寿命大大提高(见表 2-83)。

表 2-83 YG8 硬质合金拉丝模的使用寿命

热处理工艺	孔径磨损到 0.03mm 时的寿命/h
注入氮离子	13 ~ 19
未注入氮离子	6 ~ 8

实例 3 搓丝板,材料为 GW30 钢结硬质合金,要求盐浴淬火与回火。

(1) 球化退火 $830 \sim 850^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 3\text{h}$,炉冷至 $720 \sim 740^{\circ}\text{C}$,保温 $4 \sim 5\text{h}$,再炉冷至 300°C 出炉空冷。退火硬度为 32 ~ 35HRC。

(2) 淬火与回火 600°C 、 830°C 两次盐浴预热,加热系数按 4min/mm 计算; $960 \sim 970^{\circ}\text{C} \times 2\text{min/mm}$ 加热,淬油; $160 \sim 180^{\circ}\text{C} \times 1.5\text{h}$ 硝盐回火 2 次。回火后硬度为 60 ~ 62HRC。

(3) 使用效果 按上述工艺处理后,搓丝板的使用寿命比原 Cr12 钢提高了 7 倍以上。

实例 4 冷镦模,材料为 GJW50 钢结硬质合金,要求硼硫复合渗处理。

(1) 复合处理工艺 GJW50 钢结硬质合金经 $950^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ 渗硼 + $980^{\circ}\text{C} \times 30\text{min}$ 扩散后空冷, 再经 $1\,000^{\circ}\text{C}$ 加热淬油 + $200^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ 回火 + $140^{\circ}\text{C} \times 5\text{h}$ 渗硫, 最后在 120°C 热油中进行去应力浸油处理。

(2) 效果 经硼硫复合渗处理后, 基体组织为 $\text{M} + \text{WC}$ + 残留奥氏体 + 二次碳化物, 硬度为 $66 \sim 68\text{HRC}$, 表面可获得一层厚 $40 \sim 60\mu\text{m}$ 的硫化物与硼化物的化合物层。其中, 渗硼层硬度为 $1\,600 \sim 1\,900\text{HV}$; 表面硫化物层厚度为 $10 \sim 15\mu\text{m}$, 硫化物的硬度为 $90 \sim 100\text{HV}$ 。经上述处理, 模具具有高的耐磨性和抗咬合性, 使用寿命比 Cr12MoV 钢制模具提高了 18 倍以上。

第3章 模具热处理质量控制与检验

模具热处理是精密、复杂、长寿命模具制造过程中的关键环节，因此必须严格控制模具热处理质量，其中包括严格要求模具原材料的质量，严格校核热处理仪表，严格执行热处理工艺，严格检测热处理过程中和热处理后产品的质量等。一般来说，生产现场检查模具热处理质量的主要依据是硬度和金相组织（化学热处理有时还需要检测渗层深度），工件只要硬度符合要求，表面没有氧化、脱碳、裂纹、磕碰伤、拉毛和锈蚀等现象就是合格件。实际上仅满足这些要求是不够的，热处理全面质量控制还要求热处理后模具的变形量能够控制在较小的范围内，而且必须同时满足韧性和耐磨性等性能的要求。

3.1 模具热处理质量的控制方法与手段

模具热处理是模具制造工艺的重要组成部分。热处理是通过改变材料组织来改善其性能，而模具零件的热处理质量一般需要使用专用仪器来进行检测。由于受到抽检率和检测部位的限制，一般只是对部分工件进行局部检验，因此这种检验不能准确地反映整批零件或每个零件的热处理质量。但模具（或零件）的热处理质量关系重大，一旦出现问题，不仅对生产进度和产品质量影响极大，而且还会造成高额的经济损失。因此，对工件应采取有效的热处理措施和方法，实施全面的质量控制，制订合理的工艺规程和检验规程。

ISO 9000 系列标准认证将热处理列为必检内容，该标准强调“人、机、料、法、环”诸因素的全面质量控制。我国也制订了热处理全面质量控制的专业标准，如 JB/T 10175—2008《热处理质量控制要求》等。而热处理过程中的质量控制，实际上就是贯彻热处理相关标准的过程。

热处理全面质量控制，就是对零件在整个热处理过程中的全部影响因素实施控制，它要求全体热处理有关人员都参与热处理质量控制工作，对热处理过程的每一个环节都实现质量控制，包括基材质量控制、热处理前质量控制、热处理中质量控制、热处理后质量控制等，其中最主要的是人员素质控制、设备与仪表控制、工艺材料及槽液控制、工艺控制、技术文件资料控制等。

实现模具热处理全面质量控制，就是实现以预防为主、预防与检验相结合的主动控制质量保证模式，把重点放在质量形成过程的控制上，把热处理缺陷消灭在质量形成过程中，最终获得较高热处理质量的模具。

模具的热处理是通过选用适宜的热处理设备、加热介质、加热温度、保温时

间、冷却方式，以及回火或时效处理等来实现设计和使用的要求，并满足模具工作需要的。因此，过程控制是确保模具热处理质量的关键，要根据模具的设计图样、技术要求、工作条件、主要失效形式等正确制订热处理工艺（或热处理作业检验指导书）。例如：对于要求表面硬化的模具，可选用高频淬火、火焰淬火、激光淬火等工艺；对于要求渗层浅、变形量小、表面硬度高、耐磨性好的模具，可选用渗氮、氮碳共渗等化学热处理或离子注入及气相沉积等处理。

设备的选择要依据模具的技术要求、精密程度、生产成本等来考虑。对于要求表面光亮、无氧化脱碳的模具，应优先考虑采用真空炉或可控气氛炉；对长形模具（或零件），可首选井式电阻炉或盐浴炉；对大批量生产的模具零件，可使用机械化程度高的连续式热处理炉；对品种多、数量少的模具零件，可采用小型多用炉；对于锻造后退火的模具毛坯，可在普通箱式电阻炉中进行；对工模具钢的淬火加热，最好在盐浴炉或真空炉中进行。

在实际的热处理过程中，应严格按照制订的热处理工艺（或热处理作业检验指导书）中的工艺参数（包括热处理设备、装炉方式、装炉量、加热升温方式、加热温度、保温时间、冷却方式、淬火冷却介质、淬火冷却介质温度、渗剂种类、渗剂流量、感应淬火加热温度、感应加热时间及电参数），并按模具质量的检验项目、标准及规范要求等进行过程控制。

模具的预备热处理和最终热处理的质量检验主要包括外观、硬度、金相组织、变形等的检验，模具的表面处理和化学热处理则主要检验外观、有效硬化层深度、硬度（包括心部硬度）、金相组织及变形等。

对模具零件的外部表面质量（如熔化、腐蚀、裂纹、氧化皮、硬度、变形等）的检验，不需使用复杂的检测工具或仪器，采用放大镜、量具、硬度计、锉刀等即可进行检测；而对模具零件内部的化学成分、硬化层和渗层深度、金相组织、材料内部缺陷等，则需借助光学显微镜、光谱分析、电子探针、无损检测仪等来检验及分析。

模具零件硬度的检测通常使用洛氏硬度计、布氏硬度计、维氏硬度计等，零件内部缺陷的检测可采用光学显微镜、电子探针、超声波或荧光检测机等，零件表层裂纹缺陷的检测可使用磁力、渗透或涡流等检测仪，力学性能检测应使用冲击试验机、疲劳试验机、磨损试验机、室温或高温拉伸试验机（如万能材料试验机，它也可进行弯曲、压缩、剪切等材料力学性能试验）等，这些检测仪器应在编制模具热处理的检验规程时合理选用。

3.2 对模具用钢的原材料要求

模具用钢是市场供应的钢材产品（其是在大型大工业炉中大批量生产的轧材、锻件等），必须保证钢材的质量，如化学成分、宏观质量、微观质量、显微组织及

基本力学性能等都要符合国家或行业标准规定的要求，或者符合用户订货时与钢厂签订的合同的要求。模具用钢大多为高碳钢和高合金钢，这些钢的冶炼质量及其后的轧制或锻造质量对模具的热处理质量和模具的服役性能有着重要影响。如果模具制造商对钢材有特殊要求，还可在订货时专门提出，或者按以下标准向钢厂订货：GB/T 1298—2008《碳素工具钢》、GB/T 1299—2000《合金工具钢》、GB/T 9943—2008《高速工具钢》等。另外，还可以参考以下几个标准：JB/T 7715—1995《冷镦模具用钢及热处理技术条件》、JB/T 8431—1996《热锻成形模具钢及其热处理技术条件》等。

3.2.1 对碳素工具钢的原材料要求

1. 化学成分

碳素工具钢的牌号与化学成分见表 3-1。碳素工具钢中硫、磷含量及残余铜、铬、镍含量见表 3-2。

表 3-1 碳素工具钢的牌号与化学成分（GB/T 1298—2008）

序 号	牌 号	化学成分(质量分数,%)		
		C	Mn	Si
1	T7	0.65 ~ 0.74	≤0.40	≤0.35
2	T8	0.75 ~ 0.84		
3	T8Mn	0.80 ~ 0.90	0.40 ~ 0.60	
4	T9	0.85 ~ 0.94	≤0.40	
5	T10	0.95 ~ 1.04		
6	T11	1.05 ~ 1.14		
7	T12	1.15 ~ 1.24		
8	T13	1.25 ~ 1.35		

注：高级优质钢在牌号后加“A”。

表 3-2 碳素工具钢中硫、磷含量及残余铜、铬、镍含量

钢 类	P	S	Cu	Cr	Ni	W	Mo	V
	质量分数(%) ≤							
优质钢	0.035	0.030	0.25	0.25	0.20	0.30	0.20	0.02
高级优质钢	0.030	0.020	0.25	0.25	0.20	0.30	0.20	0.02

2. 宏观状态

碳素工具钢表面质量应符合 GB/T 1298—2008《碳素工具钢》的要求。

1) 压力加工用热轧和锻制钢材表面不允许有目视可见的裂纹、折叠、结疤和

夹杂。

2) 切削加工用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表 3-3 规定的局部缺陷。

表 3-3 碳素工具钢局部缺陷允许深度 (单位: mm)

钢材公称尺寸	局部缺陷允许深度
<100	公差之半
≥100	公差

3) 热轧和锻制扁钢的表面质量由供需双方协商。

4) 冷拉钢材表面应清洁、光滑, 不应有裂纹、折叠、结疤、夹杂和氧化皮。经退火的冷拉钢材表面允许有氧化色, 钢材表面允许有深度不大于从钢材实际尺寸算起的该公称尺寸公差的麻点、发纹、凹坑、黑斑、拉痕、轻微的校正辊印及润滑剂和清理痕迹。

3. 微观状态

(1) 低倍组织 应符合 GB/T 1298—2008 《碳素工具钢》的要求。

1) 钢材的横截面酸浸低倍组织试片上不允许有目视可见的缩孔、夹杂、裂纹、气泡和白点。中心疏松及锭型偏析按照 GB/T 1299—2000 附录 A 中第一级别图评定, 其合格级别应不超过表 3-4 的规定。

表 3-4 碳素工具钢中心疏松及锭型偏析的要求

钢材公称尺寸/mm	中心疏松	锭型偏析
	合格级别/级≤	
≤50	4.0	4.0
>50 ~ 100	4.5	5.0
>100 ~ 155	5.0	6.0
>155	双方协议	

2) 切削加工用钢允许有不超 过表面缺陷允许深度的皮下气泡、皮下夹杂等缺陷。

(2) 显微组织 应符合 GB/T 1298—2008 《碳素工具钢》的要求。

1) 珠光体组织。①截面尺寸 ≤60mm 的退火钢材应检验珠光体组织, 并按 GB/T 1298—2008 附录 A 中第一级别图评定, 其合格级别规定: T7、T8、T8Mn、T9 钢均为 1~5 级, T10、T11、T12、T13 钢均为 2~4 级; ②截面尺寸 >60mm 的退火钢材, 根据需方要求, 可检验珠光体组织, 合格级别由供需双方协议规定; ③热压力加工用钢不检验珠光体组织。

2) 网状碳化物。退火钢材应检验网状碳化物, 并按 GB/T 1298—2008 附录 A 中第二级别图评定, 其合格级别应符合表 3-5 的规定。牌号为 T7、T8 和热压力加工用钢不检验网状碳化物。

表 3-5 碳素工具钢中网状碳化物要求

钢材公称尺寸/mm	合格级别/级≤
≤60	2
>60 ~ 100	3
<100	双方协议

注：碳素工具钢在退火状态下检验。

3) 脱碳层。钢材应检验脱碳层深度。钢材一边总脱碳层深度（铁素体 + 过渡层）应符合表 3-6 的规定。银亮钢不允许有脱碳层。

表 3-6 碳素工具钢脱碳层深度要求

品 种		总脱碳层深度/mm≤
热轧、锻制钢材		$0.25 + 1.5\% D$
冷拉钢材	≤16mm	$1.5\% D$
	>16mm	$1.3\% D$
	高频淬火	$1.0\% D$
扁钢及尺寸大于 100mm 钢材		双方协议

注：1. D 为钢材截面的公称尺寸。

2. 扁钢的脱碳层深度在宽面上检查。

4. 钢材取样、检验项目和试验方法

碳素工具钢取样、检验项目和试验方法见表 3-7。

表 3-7 碳素工具钢检验项目和试验方法（GB/T 1298—2008）

序 号	检验项目	取样数量/个	取样部位	试验方法
1	化学成分	1/炉	按照 GB/T 20066	GB/T 223、GB/T 4336、 GB/T 20123、GB/T 20125
2	布氏硬度	3	不同支钢材	GB/T 231.1
3	洛氏硬度	2	不同支钢材	GB/T 230.1
4	低倍组织	2	相当于钢锭头部的不同支钢材	GB 226
5	珠光体组织	2	不同支钢材	GB/T 13298
6	网状碳化物	2	不同支钢材	GB/T 13298
7	脱碳层	3	不同支钢材	GB/T 224
8	淬透性	3	按照 GB/T 1298 附录 B	GB/T 1298 附录 B
9	尺寸	逐支	—	千分尺、卡尺、样板
10	表面	逐支	—	目视

3.2.2 对合金工具钢的原材料要求

1. 化学成分

1) 合金工具钢的牌号与化学成分应符合表 3-8 的规定。

表 3-8 合金工具钢的牌号与化学成分（GB/T 1299—2000）

序号	钢 组	牌 号	化学成分(质量分数, %)									
			C	Si	Mn	P	S	Cr	W	Mo	V	其他
						≤						
1-1	量 刃 具 用 钢	9SiCr	0. 85 ~ 0. 95	1. 20 ~ 1. 60	0. 30 ~ 0. 60	0. 030	0. 030	0. 95 ~ 1. 25				
1-2		8MnSi	0. 75 ~ 0. 85	0. 30 ~ 0. 60	0. 80 ~ 1. 10	0. 030	0. 030					
1-3		Cr06	1. 30 ~ 1. 45	≤0. 40	≤0. 40	0. 030	0. 030	0. 50 ~ 0. 70				
1-4		9Cr2	0. 80 ~ 0. 95	≤0. 40	≤0. 40	0. 030	0. 030	1. 30 ~ 1. 70				
1-5		W	1. 05 ~ 1. 25	≤0. 40	≤0. 40	0. 030	0. 030	0. 10 ~ 0. 30	0. 80 ~ 1. 20			
2-1	耐 冲 击 工 具 用 钢	4CrW2Si	0. 35 ~ 0. 45	0. 80 ~ 1. 10	≤0. 40	0. 030	0. 030	1. 00 ~ 1. 30	2. 00 ~ 2. 50			Co: ≤1. 00
2-2		5CrW2Si	0. 45 ~ 0. 55	0. 50 ~ 0. 80	≤0. 40	0. 030	0. 030	1. 00 ~ 1. 30	2. 00 ~ 2. 50			
2-3		6CrW2Si	0. 55 ~ 0. 65	0. 50 ~ 0. 80	≤0. 40	0. 030	0. 030	1. 10 ~ 1. 30	2. 20 ~ 2. 70			
2-4		6CrMnSi2Mo1	0. 50 ~ 0. 60	1. 75 ~ 2. 25	0. 60 ~ 1. 00	0. 030	0. 030	0. 10 ~ 0. 50		0. 20 ~ 1. 35	0. 15 ~ 0. 35	
2-5		5Cr3Mn1SiMo1V	0. 45 ~ 0. 55	0. 20 ~ 1. 00	0. 20 ~ 0. 90	0. 030	0. 030	3. 00 ~ 3. 50		1. 30 ~ 1. 80	≤0. 35	
3-1	冷 作 模 具 钢	Cr12	2. 00 ~ 2. 30	≤0. 40	≤0. 40	0. 030	0. 030	11. 50 ~ 13. 00				Nb: 0. 20 ~ 0. 35
3-2		Cr12Mo1 V1	1. 40 ~ 1. 60	≤0. 60	≤0. 60	0. 030	0. 030	11. 50 ~ 13. 00		0. 70 ~ 1. 20	0. 50 ~ 1. 10	
3-3		Cr12MoV	1. 45 ~ 1. 70	≤0. 40	≤0. 40	0. 030	0. 030	11. 00 ~ 12. 50		0. 40 ~ 0. 60	0. 15 ~ 0. 30	
3-4		Cr5Mo1 V	0. 95 ~ 1. 05	≤0. 50	≤1. 00	0. 030	0. 030	4. 75 ~ 5. 50		0. 90 ~ 1. 40	0. 15 ~ 0. 50	
3-5		9Mn2V	0. 85 ~ 0. 95	≤0. 40	1. 70 ~ 2. 00	0. 030	0. 030				0. 10 ~ 0. 25	
3-6		CrWMn	0. 90 ~ 1. 05	≤0. 40	0. 80 ~ 1. 10	0. 030	0. 030	0. 90 ~ 1. 20	1. 20 ~ 1. 60			
3-7		9CrWMn	0. 85 ~ 0. 95	≤0. 40	0. 90 ~ 1. 20	0. 030	0. 030	0. 50 ~ 0. 80	0. 50 ~ 0. 80			
3-8		Cr4W2MoV	1. 12 ~ 1. 25	0. 40 ~ 0. 70	≤0. 40	0. 030	0. 030	3. 50 ~ 4. 00	1. 90 ~ 2. 60	0. 80 ~ 1. 20	0. 80 ~ 1. 10	
3-9		6Cr4W3Mo2VNb	0. 60 ~ 0. 70	≤0. 40	≤0. 40	0. 030	0. 030	3. 80 ~ 4. 40	2. 50 ~ 3. 50	1. 80 ~ 2. 50	0. 80 ~ 1. 20	
3-10	6W6Mo5Cr4V	0. 55 ~ 0. 65	≤0. 40	≤0. 60	0. 030	0. 030	3. 70 ~ 4. 30	6. 00 ~ 7. 00	4. 50 ~ 5. 50	0. 70 ~ 1. 10		
3-11	7CrSiMnMoV	0. 65 ~ 0. 75	0. 85 ~ 1. 15	0. 65 ~ 1. 05	0. 030	0. 030	0. 90 ~ 1. 20		0. 20 ~ 0. 50	0. 15 ~ 0. 30		

(续)

序号	钢 组	牌 号	化学成分(质量分数,%)										其他
			C	Si	Mn	P	S	Cr	W	Mo	V	Al	
						≤							
4-1	热作 模具 钢	5CrMnMo	0.50 ~ 0.60	0.25 ~ 0.60	1.20 ~ 1.60	0.030	0.030	0.60 ~ 0.90		0.15 ~ 0.30			Ni: 1.40 ~ 1.80
4-2		5CrNiMo	0.50 ~ 0.60	≤0.40	0.50 ~ 0.80	0.030	0.030	0.50 ~ 0.80		0.15 ~ 0.30			
4-3		3Cr2W8V	0.30 ~ 0.40	≤0.40	≤0.40	0.030	0.030	2.20 ~ 2.70	7.50 ~ 9.00		0.20 ~ 0.50		
4-4		5Cr4Mo3SiMnVAI	0.47 ~ 0.57	0.80 ~ 1.10	0.80 ~ 1.10	0.030	0.030	3.80 ~ 4.30		2.80 ~ 3.40	0.80 ~ 1.20	0.30 ~ 0.70	
4-5		3Cr3Mo3W2V	0.32 ~ 0.42	0.60 ~ 0.90	≤0.65	0.030	0.030	2.80 ~ 3.30	1.20 ~ 1.80	2.50 ~ 3.00	0.80 ~ 1.20		
4-6		5Cr4W5Mo2V	0.40 ~ 0.50	≤0.40	≤0.40	0.030	0.030	3.40 ~ 4.40	4.50 ~ 5.30	1.50 ~ 2.10	0.70 ~ 1.10		
4-7		8Cr3	0.75 ~ 0.85	≤0.40	≤0.40	0.030	0.030	3.20 ~ 3.80					
4-8		4CrMnSiMoV	0.35 ~ 0.45	0.80 ~ 1.10	0.80 ~ 1.10	0.030	0.030	1.30 ~ 1.50		0.40 ~ 0.60	0.20 ~ 0.40		
4-9		4Cr3Mo3SiV	0.35 ~ 0.45	0.80 ~ 1.20	0.25 ~ 0.70	0.030	0.030	3.00 ~ 3.75		2.00 ~ 3.00	0.25 ~ 0.75		
4-10		4Cr5MoSiV	0.33 ~ 0.43	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50	0.030	0.030	4.75 ~ 5.50		1.10 ~ 1.60	0.30 ~ 0.60		
4-11		4Cr5MoSiV1	0.32 ~ 0.45	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.50	0.030	0.030	4.75 ~ 5.50		1.10 ~ 1.75	0.80 ~ 1.20		
4-12		4Cr5W2VSi	0.32 ~ 0.42	0.80 ~ 1.20	≤0.40	0.030	0.030	4.50 ~ 5.50	1.60 ~ 2.40		0.60 ~ 1.00		
5-1	无磁 性模 具钢	7Mn15Cr2Al3- V2WMo	0.65 ~ 0.75	≤0.80	14.50 ~ 16.50	0.030	0.030	2.00 ~ 2.50	0.50 ~ 0.80	0.50 ~ 0.80	1.50 ~ 2.00	2.30 ~ 3.30	
6-1	塑料 模具 钢	3Cr2Mo	0.28 ~ 0.40	0.20 ~ 0.80	0.60 ~ 1.00	0.030	0.030	1.40 ~ 2.00		0.30 ~ 0.55			Ni: 0.85 ~ 1.15
6-2		3Cr2MnNiMo	0.32 ~ 0.40	0.20 ~ 0.40	1.10 ~ 1.50	0.030	0.030	1.70 ~ 2.00		0.25 ~ 0.40			

2) 5CrNiMo 钢经供需双方同意允许钒含量小于 0.20% (质量分数)。

3) 钢中残留铜含量应不大于 0.30% (质量分数), “铜 + 镍”含量 ≤0.55% (质量分数)。

4) 钢材或坯料的化学成分允许偏差应符合 GB/T 222—2006 中表 2 的规定。

2. 低倍组织

钢材应检验酸浸低倍组织, 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按照 GB/T 1299—2000 标准第三级别图评定, 并应符合表 3-9 的规定。

表 3-9 合金工具钢中心疏松及锭型偏析的要求

钢材直径/mm	一组		二组	
	中心疏松	锭型偏析	中心疏松	锭型偏析
	≤			
≤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	4.5	6.0
>155	供需双方协议			

注：1. 一组指表 3-8 中下列序号的钢：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。
2. 其余牌号为二组。

3. 显微组织

(1) 珠光体组织

1) 退火状态交货的 9SiCr、Cr2、Cr06、W、9Cr2、CrWMn、9CrWMn 模具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。

2) 热压力加工用钢不检验珠光体组织。

(2) 网状碳化物

1) 退火状态交货的 CrWMn、Cr2、Cr06 和 9SiCr 模具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 模具钢材，其合格级别不大于 3 级。扁钢和截面尺寸大于 60mm 的钢材，其合格级别按供需双方协议。

2) 热压力加工用钢不检验网状碳化物。

4. 共晶碳化物不均匀度

1) 退火状态交货的 Cr12、Cr12MoV、Cr12Mo1V1、6Cr4W3Mo2VNB 钢应检验共晶碳化物不均匀度，并按 GB/T 14979—1994 标准第四评级图评定，其合格级别应符合表 3-10 规定。6Cr4W3Mo2VNB 钢当供方保证满足此项要求时，可不做检验。根据需方要求，经供需双方协议并在合同中注明，共晶碳化物不均匀度可按表 3-10 中 I 组供应。

表 3-10 合金工具钢共晶碳化物不均匀度要求

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

注：合金工具钢在退火状态下检验。

2) 扁钢共晶碳化物不均匀度合格级别按供需双方协议。

5. 脱碳层

1) 热轧和锻制钢材一边总脱碳层应符合表 3-11 规定。根据需方要求，经供需双方协议并在合同中注明，可按 I 组供应。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。

表 3-11 合金工具钢脱碳层深度要求 (单位：mm)

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

注：D 为钢材截面公称尺寸。

2) 6W6Mo5Cr4V、4Cr3Mo3SiV 和 3Cr3Mo3W2V 钢的脱碳层按供需双方协议。

3) 无磁性模具钢 7Mn15Cr2Al3V2WMo 不检验脱碳层。

6. 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。

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表 3-12 规定的局部缺陷。

表 3-12 合金工具钢局部缺陷允许深度 (单位：mm)

钢材直径或边长	局部缺陷允许深度
< 8	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。

4) 扁钢的表面质量按供需双方协议。

7. 钢材取样、检验项目及试验方法

合金工具钢检验项目和试验方法应符合表 3-13 的规定。

表 3-13 合金工具钢检验项目和试验方法（GB/T 1299—2000）

序号	检 验 项 目	数量	试验方法	取 样 部 位
1	化学成分	1	GB/T 222 GB/T 223	按照 GB/T 222
2	低倍组织	2	GB/T 226	相当于钢锭头部的不同根钢坯或钢材
3	脱碳层	3	GB/T 224	任意钢材端部
4	布氏硬度	3	GB/T 231. 1	任意钢材端部
5	洛氏硬度	2	GB/T 230	任意钢材端部
6	珠光体组织	2	GB/T 13298	任意钢材端部
7	网状碳化物	2	GB/T 13298	任意钢材端部
8	共晶碳化物	2	GB/T 13298	任意钢材端部
	不均匀度		GB/T 14979	
9	磁性	1	单磁秤或单螺线管弱磁测试仪	任意钢材端部
10	外形、尺寸	逐支	卡尺、千分尺、样板	任意钢材端部
11	表面	逐支	目视	任意钢材端部

3.2.3 对高速工具钢的原材料要求

1. 化学成分

1) 高速工具钢的牌号及化学成分应符合表 3-14 的规定。

表 3-14 高速工具钢的牌号及化学成分（GB/T 9943—2008）

牌 号	化学成分(质量分数, %)								
	C	Mn	Si	S	P	Cr	V	W	Mo
W18Cr4V	0. 73 ~ 0. 83	0. 10 ~ 0. 40	0. 20 ~ 0. 40	≤ 0. 030	≤ 0. 030	3. 80 ~ 4. 50	1. 00 ~ 1. 20	17. 20 ~ 18. 70	—
W6Mo5Cr4V2	0. 80 ~ 0. 90	0. 15 ~ 0. 40	0. 20 ~ 0. 45	≤ 0. 030	≤ 0. 030	3. 80 ~ 4. 40	1. 75 ~ 2. 20	5. 50 ~ 6. 75	4. 50 ~ 5. 50
W6Mo6Cr4V2	1. 00 ~ 1. 10	≤0. 40	≤0. 45	≤ 0. 030	≤ 0. 030	3. 80 ~ 4. 50	2. 30 ~ 2. 60	5. 90 ~ 6. 70	5. 50 ~ 6. 50
W9Mo3Cr4V	0. 77 ~ 0. 87	0. 20 ~ 0. 40	0. 20 ~ 0. 40	≤ 0. 030	≤ 0. 030	3. 80 ~ 4. 40	1. 30 ~ 1. 70	8. 50 ~ 9. 50	2. 70 ~ 3. 30
W6Mo5Cr4V3	1. 15 ~ 1. 25	0. 15 ~ 0. 40	0. 20 ~ 0. 45	≤ 0. 030	≤ 0. 030	3. 80 ~ 4. 50	2. 70 ~ 3. 20	5. 90 ~ 6. 70	4. 70 ~ 5. 20
W6Mo5Cr4V4	1. 25 ~ 1. 40	≤0. 40	≤0. 40	≤ 0. 030	≤ 0. 030	3. 80 ~ 4. 50	3. 70 ~ 4. 20	5. 20 ~ 6. 00	4. 20 ~ 5. 00

2) 钢棒的化学成分允许偏差应符合表 3-15 的规定。

表 3-15 高速工具钢的化学成分允许偏差 (质量分数,%)

元 素	规定化学成分上限值	允许偏差	元 素	规定化学成分上限值	允许偏差
C	—	±0.01	Mo	≤6	±0.05
Cr	—	±0.05		>6	±0.10
W	≤10	±0.01	Co	—	±0.15
	>10	±0.20	Si	—	±0.05
V	≤2.5	±0.05	Mn	—	±0.04
	>2.5	±0.10			

3) 钢中残留铜含量应不大于 0.25% (质量分数), 残留镍含量应不大于 0.30% (质量分数)。

2. 宏观组织

(1) 低倍组织 钢棒的低倍组织应按 GB/T 1979 检验并评级。在钢棒横向酸浸低倍试片上不允许有目视可见的缩孔、气泡、翻皮、内裂和夹杂。中心疏松、一般疏松和锭型偏析的合格级别应符合表 3-16 的规定。

表 3-16 高速工具钢中心疏松、一般疏松和锭型偏析的要求

截面尺寸(直径、边长、厚度或 对边距离)/mm	中心疏松/级		一般疏松/级		锭型偏析/级	
	电炉	电渣	电炉	电渣	电炉	电渣
≤120	1	1	1	1	1	1
>120~150	1.5	1	1.5	1	1.5	1
>150~200	双方协议	1.5	双方协议	1.5	1.5	1.5
>200~250	双方协议	2	双方协议	2	2	2

(2) 断口 钢棒不允许有蔡状断口, 供方若能保证无蔡状断口可不作检查。

3. 显微组织

(1) 共晶碳化物不均匀度 钢中共晶碳化物不均匀度应按 GB/T 14979—1994 检验并评级:

1) 尺寸不大于 120mm 的钢棒, 钨系牌号按第一级别图, 钨钼系牌号按第二级别图, 其合格级别应符合表 3-17 的规定, 且不应有不变形或少变形的共晶碳化物存在。

2) 尺寸大于 120mm 的钢棒, W6Mo5Cr4V2 和 W9Mo3Cr4V 钢按第二级别图评定, 合格级别应符合表 3-17 的规定, 其他牌号钢棒的共晶碳化物不均匀度由供需双方协商确定。

表 3-17 高速工具钢中共晶碳化物不均匀度要求

截面尺寸(直径、边长、厚度或对边距离)/mm	共晶碳化物不均匀度合格级别/级≤	截面尺寸(直径、边长、厚度或对边距离)/mm	共晶碳化物不均匀度合格级别/级≤
≤40	3	>100~120	7
>40~60	4	>120~160	6A、5B
>60~80	5	>160~200	7A、6B
>80~100	6	>200~250	8A、7B

(2) 脱碳 钢棒表面的总脱碳层深度从钢棒实际尺寸算起应符合表 3-18 的规定。

表 3-18 高速工具钢脱碳层深度要求

分 类	脱碳层深度①/mm ≤	
	钨系	钨钼系②
热轧、锻制棒材、盘条	$0.30 \pm 1\% D$	$0.40 \pm 1.3\% D$
冷拉	$1.0\% D$	$1.3\% D$
银亮	无	无

注： D 为圆钢公称直径或方钢公称边长。
① 热轧、锻制扁钢的脱碳层深度按其相同面积方钢的边长计算，扁钢脱碳层深度在宽面检查。
② W9Mo3Cr4V 钢的脱碳层深度为 $0.35 \pm 1.1\% D$ 。

4. 表面质量

- 1) 供压力加工用的钢棒表面不允许有目视可见的裂纹、折叠、结疤和夹杂。
- 2) 供切削加工用的热轧和锻制钢棒表面允许有从钢棒公称尺寸算起深度不大于表 3-19 规定的局部缺陷，但缺陷深度应不使钢棒小于允许的最小尺寸。

表 3-19 高速工具钢局部缺陷允许深度 (单位：mm)

钢棒截面尺寸	同截面允许深度
<80	公差之半
80~250	公差

3) 冷拉钢棒表面应洁净、光滑，不允许有裂纹、折叠、结疤、发纹、夹杂和氧化皮。经退火的冷拉钢棒表面允许有氧化色或轻微氧化层，钢棒表面允许有深度不大于从实际尺寸算起的该尺寸公差的麻点、个别划痕、凸面、黑斑和润滑剂痕迹等轻微表面缺陷。

- 4) 银亮钢表面不允许有目视可见的任何影响使用的缺陷。

5. 试验方法

钢棒各项目的取样部位、取样数量及试验方法应符合表 3-20 的规定。

表 3-20 高速工具钢检验项目和试验方法（GB/T 9943—2008）

序号	检 验 项 目	取样数量	取 样 部 位	试 验 方 法
1	化学成分	1/炉	按照 GB/T 20066	GB/T 223、GB/T 20123
2	脱碳层	3	不同支钢棒	GB/T 224
3	退火硬度	3	不同支钢棒	GB/T 231.1
4	试样淬火回火硬度	2	不同支钢棒	GB/T 230.1
5	低倍组织	2	相当于钢锭头部不同支钢棒或钢坯	GB/T 226、GB/T 1979
6	断口	2	不同支钢棒	GB/T 1814
7	共晶碳化物不均匀度	2	不同支钢棒	GB/T 14979—1994
8	大块碳化物	2	不同支钢棒	GB/T 9943—2008 中附录 A
9	晶粒度	1	任一支钢棒	GB/T 6394
10	非金属夹杂物	2	不同支钢棒	GB/T 10561
11	尺寸	逐支	整根钢棒	卡尺、千分尺
12	表面	逐支	整根钢棒	目视

3.3 冷作模具钢热处理质量控制

冷作模具是我国所使用的模具中用量最大的一类模具。随着成形加工速度和对产品质量的要求不断提高，模具单位面积承受的负荷越来越大，而冷作模具的工作条件也变得非常复杂，尤其是近年来推广的无切削加工技术，对模具的质量要求越来越高。模具的质量直接影响着压力加工工艺的优劣和产品的精度、产量及经济效益，而模具的质量与使用寿命，除了取决于合理的结构设计和加工精度外，在很大程度上还取决于模具材料的选用和热处理的质量。

冷作模具钢用于制造冲裁模、拉深模、挤压模、冷镦模、弯曲模、成形模、剪切模、滚丝模及拉丝模等。虽然各种模具的工作条件有所不同，但它们也有着共同的特点，如工作温度不高（一般不超过 300℃），承受高的压力或冲击力，模具与被加工金属之间有强烈的摩擦等。因此，对冷作模具钢的主要技术要求为具有高的硬度、耐磨性及一定的韧性；在工艺上，则要求其具有足够的淬透性且淬火变形小。

3.3.1 冷作模具钢预备热处理质量控制

冷作模具钢的预备热处理主要包括正火、退火和调质处理。

1. 正火质量控制

正火的目的是消除碳素工具钢和合金工具钢中的网状碳化物，细化不均匀的片状珠光体。存在带状组织的工具钢，因其易产生切削裂纹，故预备热处理采用正火

处理比退火效果更好。而对于高碳高合金模具钢，由于一次碳化物不易在奥氏体中固溶，故预备热处理一般不采用正火处理。

正火温度需根据钢种来确定。正火处理时，加热温度不宜过低，否则网状碳化物不能充分溶于奥氏体中，正火后仍可能存在残余网状碳化物，这对以后的球化退火不利。冷却时，为抑制碳化物沿晶界析出，应采用较快的冷却速度，至于哪种冷却速度合适，应根据钢种、模具大小及变形开裂倾向而定。例如：大型模具应采用喷雾冷却，或油冷至 Ar_1 以下出油；尺寸小的模具可空冷或风冷。对于存在带状组织的钢种，在 $Ar_3 \sim Ar_1$ 之间更应快速冷却。

模具钢在正火出炉冷却时，如果采用空冷或风冷，应将其放在干燥地面上，切勿置于潮湿地面，以防止局部发生淬火而产生应力，导致模具钢开裂或变形。即使不发生淬火情况，模具钢也会因冷却不均造成组织不均匀而影响正火处理的效果。

2. 球化退火质量控制

球化退火的目的是改善毛坯的组织，降低硬度，便于切削加工，同时减小淬火时的变形与开裂倾向，使工件得到相当均匀的最终性能。等温球化退火的关键在于控制加热温度、等温温度和保温时间。球化退火的温度以在 A_{c1} 以上 $20 \sim 50^\circ\text{C}$ 为宜，以保证能够加速球化过程和形成均匀的球化组织。球化退火应避免退火温度过低而出现残留的厚片状碳化物及退火温度过高而出现新的片状或棱角状碳化物。球化退火的等温温度和保温时间要选择在以不出现片状或片状与球状混合组织、并有合适的球化速度范围为宜。通常等温温度控制在稍低于 Ar_1 点，等温温度下的保温时间以碳素钢一般 $1 \sim 2\text{h}$ 、合金工具钢一般 $3 \sim 4\text{h}$ 为宜。球化退火要求缓慢冷却，高合金钢和合金钢的冷却速度分别为 $30 \sim 50^\circ\text{C}/\text{h}$ 和 $50 \sim 100^\circ\text{C}/\text{h}$ 。另外，大型件的冷却速度比小型件要慢。在球化退火时，为保证一定的冷却速度，对于单件或小批量毛坯，可采用装箱退火的方法。当然，最好的方法是通过工艺验证后制订最佳的球化退火工艺参数。

3. 调质质量控制

调质的目的是获得细珠光体和超细碳化物，消除网状和带状碳化物以及加工后的残余应力，改善组织，便于机械加工，防止淬火开裂和减小淬火变形，并最终提高模具的综合力学性能。

冷作模具钢的调质处理，可采用常规加热温度淬火后再进行 $640 \sim 680^\circ\text{C}$ 高温回火的工艺。调质后的硬度一般为 229HBW 左右。

冷作模具钢在最终热处理前还应进行去应力退火，其目的是消除机械加工后的残余应力，减少淬火开裂及变形倾向，或避免高速工具钢返修淬火时出现的綫状断口。一般情况下，碳素工具钢去应力退火工艺为 $630 \sim 650^\circ\text{C} \times 1 \sim 2\text{h}$ ，高合金工具钢去应力退火工艺为 $680 \sim 700^\circ\text{C} \times 1 \sim 3\text{h}$ 。

模具钢调质处理后的质量问题多为淬火硬度不足和出现淬火软点。造成硬度不足的原因有以下几个方面：①加热温度低或保温时间不足，表面或心部存在未溶解

的块状铁素体；②冷却不足，在 500 ~ 650℃ 范围内冷却速度低，导致发生珠光体型转变，组织出现托氏体并沿晶析出，有时伴随铁素体析出；③表面氧化皮过厚，影响了冷却能力；④表面脱碳，淬火硬度低等。

淬火软点只是出现在整体模具钢的局部区域，其产生的原因有：①淬火冷却不均匀，如冷却过程中局部氧化皮未脱落；②模具表面有污物；③淬火用水中有油或其他杂质；④模具在冷却过程中晃动或运动不当；⑤淬火冷却介质温度过高；⑥模具钢的原始组织粗大等。

3.3.2 冷作模具钢最终热处理质量控制

为了获得优异的强韧性和耐磨性，要求冷作模具钢的组织具有如下特点：①要求淬火、回火后的组织中有一定数量的剩余碳化物，碳化物应分布均匀、形态圆整、尺寸细小；②马氏体针要均匀、细小，要提高马氏体中板条马氏体的份额；③对于莱氏体钢，改善共晶碳化物的形态、粒度、分布是提高其强韧性的关键。为此，推荐采用锻造余热淬火-双细化、固溶双细化、低温淬火及等温淬火等工艺。

1. 碳素工具钢和低合金工具钢淬火回火质量控制

(1) 淬火加热和冷却 淬火加热温度的确定主要根据钢的化学成分，其次还应考虑模具零件的尺寸和形状，对硬度、变形量和组织的具体要求，奥氏体晶粒长大的倾向，淬透性，采用的加热介质、淬火方式及淬火冷却介质的选择，加热设备等。因此，淬火工艺的制订要先进行相应的工艺试验。

冷作模具淬火处理时的脱碳、氧化、内应力及组织不均匀性对其磨损、开裂、疲劳强度及抗咬合性能均有显著的影响。模具的加热应优先采用真空加热、保护气氛加热及盐浴加热方式，在空气炉中加热时应采取装箱保护加热、涂料保护加热和包装热处理等方式，以防表面氧化和脱碳。对于要求耐磨或随后进行电加工的模具，应采用上限的加热温度和保温时间系数；对于要求强韧性的模具，可采用下限的加热温度和保温时间。为了减少模具的变形，最理想的淬火方法是采用分级淬火（常用硝盐浴分级淬火）。此外，采用低温、短时、快速加热淬火，可在淬火后得到以板条马氏体为主的组织，使模具钢在保持高硬度的同时具有良好的韧性。只是采用此工艺时，淬火前的原始组织中碳化物应尽量细小，才能保证获得好的强韧化效果。

(2) 回火 冷作模具钢淬火后应立即回火。回火温度通常为 150 ~ 200℃，保温时间为 90 ~ 180min，回火后硬度一般大于 58HRC。应保证模具的回火质量，生产实践证明，经充分回火的模具，在正常使用条件下，其使用寿命可大大提高。而未经回火及回火不足的模具除了在使用中容易发生崩刃、脆裂或断裂等现象外，还容易引起磨削裂纹、线切割变形与开裂。例如，CrWMn 钢模具回火不足时非常容易产生磨削裂纹。为了防止磨削裂纹的产生，对高精度的模具，粗磨后应再进行一次回火以消除磨削应力。此外，冷作模具钢应避免在表 3-21 所列的回火脆性温度

范围内回火。

表 3-21 部分冷作模具钢的回火脆性温度范围

牌 号	CrWMn	9Mn2V	GCr15	9SiCr	Cr12	Cr12MoV
温度/℃	250 ~ 300	180 ~ 230	200 ~ 250	200 ~ 240	290 ~ 330	325 ~ 375

2. 高合金工具钢淬火回火质量控制

(1) Cr12 型钢淬火回火质量控制 制造冷作模具应用最广泛的高合金工具钢之一是 Cr12 型钢，其中以 Cr12MoV 钢使用最多。它是一种高碳高铬莱氏体钢，由于钢中含有大量的铬，因而具有高的淬透性，截面 200 ~ 300mm 以下工件可以完全淬透。Cr12MoV 钢主要用于制造大尺寸、形状复杂及承受载荷较大的模具。

1) 淬火加热和冷却。Cr12 型钢淬火后的正常组织为马氏体 + 残留奥氏体 + 过剩碳化物（体积分数约占 12%）。过剩碳化物是随着淬火温度的提高而逐渐溶入奥氏体中的。如果淬火温度偏低，则溶解到奥氏体中的碳元素少，合金元素也少，使得淬火后马氏体中碳含量减少，从而削弱钢的耐回火性；如果淬火温度偏高，则溶解到奥氏体中的碳元素增加，淬火后除了马氏体含量增加之外，残留奥氏体含量也随之增加。因此，淬火温度的波动可引起组织和性能的较大变化。过剩碳化物的数量、形状、大小及分布情况，均直接影响钢的脆性及耐磨性。严重的带状碳化物偏析、网状碳化物及大块状碳化物密集，都会造成模具局部过热和大的变形，并在淬火时或使用中容易引起开裂和崩裂。

Cr12MoV 钢中的合金元素含量很高，但导热性差，因此淬火加热时需经两次预热，以减少热应力的产生。这对于形状复杂或尺寸大的模具尤为必要。第一次预热温度为 500 ~ 600℃，第二次预热为 800 ~ 850℃。Cr12MoV 钢淬火温度的选择原则为：要求耐磨性高、需低温回火的模具宜采用 1 000 ~ 1 020℃；要求在 400 ~ 450℃ 条件下工作，保证热硬性的模具宜采用 1 030 ~ 1 050℃，甚至淬火温度可适当再提高一些，其目的是淬火后得到较多的残留奥氏体，以便多次高温回火后提高模具的硬度和热硬性。

2) 回火。Cr12MoV 钢淬火后待模具温度不低于 60℃ 时，应立即转入 50 ~ 100℃ 的炉中回火，回火后空冷。回火温度的选用原则是：对于要求耐磨性的模具，宜采用 150 ~ 200℃ 进行低温回火，回火后的硬度为 60 ~ 63HRC；对于既要求耐磨性又要求韧性的模具，宜采用 200 ~ 250℃ 回火，硬度为 57 ~ 60HRC；对于要求热硬性高的模具，宜采用 500 ~ 530℃，进行两次高温回火，目的是充分发挥 Cr12MoV 钢的二次硬化作用，硬度为 60 ~ 61HRC；对于大尺寸或特别要求韧性好的模具，宜采用 530 ~ 550℃ 高温回火，硬度为 53 ~ 57HRC。

(2) Cr12 型钢冷作模具显微组织评级 Cr12 型钢显微组织级别特征及评定方法按 JB/T 7713—2007《高碳高合金钢制冷作模具显微组织检验》标准执行。显微组织级别在放大 500 倍的显微镜下观察，腐蚀剂采用三氯化铁（5g）+ 盐酸

(15mL) + 乙醇 (100mL) 配制的溶液。Cr12 型钢大块碳化物级别按其颗粒大小及数量多少分为 5 级，各级别的最大尺寸见表 3-22。Cr12 型马氏体级别按其形貌特征也分为 5 级，各级别马氏体针最大长度见表 3-23。

表 3-22 Cr12 型钢大块碳化物级别 (JB/T 7713—2007)

级 别	1	2	3	4	5
大块碳化物最大尺寸/mm	0. 009	0. 013	0. 017	0. 021	0. 025

表 3-23 Cr12 型钢马氏体级别 (JB/T 7713—2007)

马氏体级别	显微组织特征	马氏体针最大长度/mm
1	隐针马氏体 + 残留奥氏体 + 碳化物	0. 003
2	细针马氏体 + 残留奥氏体 + 碳化物	0. 006
3	针状马氏体 + 残留奥氏体 + 碳化物	0. 01
4	较大粗针状马氏体 + 残留奥氏体 + 碳化物	0. 014
5	粗大针状马氏体 + 残留奥氏体 + 碳化物	0. 018

注：检验视场不少于 3 个。

(3) 过热与过烧缺陷及对策 Cr12 钢型淬火加热温度太高，将导致钢中碳化物大量溶解，奥氏体晶粒急剧长大，奥氏体稳定性上升，淬火后的组织为奥氏体和共晶碳化物，几乎没有马氏体，因而工件体积收缩，硬度明显降低，韧性明显恶化，表现为过热倾向。Cr12MoV 钢的严重过热组织为粗大的马氏体 + 残留奥氏体，以及少量白色共晶碳化物。当淬火加热温度上升到 1 200℃左右时，大量碳化物溶入奥氏体中，晶界碳化物堆积处开始熔化出现液相，冷却后晶界附近有鱼骨状莱氏体，晶粒中心仍然是奥氏体，这种高温时出现液相的组织称为过烧组织。过热与过烧情况通常在热电偶失灵或工件接触到盐浴炉电极时才可能发生。过热组织的特征是晶粒粗大，过烧组织的特征是晶界出现莱氏体组织。

防止过热与过烧的对策如下：①严格控制淬火加热温度及保温时间；②及时进行炉前金相组织检查；③保证模具放置在炉中有效加热区内，且不接触电极及电热体等；④及时校对热电偶及温控仪表等。

3.4 热作模具钢热处理质量控制

热作模具是我国工业用量大、需求面广、性能要求特别苛刻的一类模具。由于其工作时常接触炽热的金属或液体金属，除了承受高的单位压力和冲击载荷外，还承受急剧的周期性温度变化，因此要求模具具有高抗热塑性变形能力、高韧性、高

抗热疲劳性及良好的抗热蚀性等。根据被加工金属的种类、负荷大小、使用温度和成形速度等条件，一般把热作模具钢分为三类：一是高韧性热作模具钢（如 5CrMnMo、5CrNiMo、H11 等）；二是高热强性模具钢（如 3Cr2W8V、GR、Y4、Y10、6WMo5Cr4V、5Mn15Cr8Ni5Mo3V2、HM1 及 RM2 等）；三是强韧兼备的热作模具钢（如 H13、HM3、4Cr5W2VSi、012Al、CG-2、ER8 等）。根据工作条件，热作模具钢也可分为三大类：一是热锤锻模具钢；二是热挤压、热镦锻及精锻模具钢；三是压铸模具钢。

3.4.1 热作模具钢预备热处理质量控制

热作模具钢一般以退火状态供应，但由于需要锻造加工，为消除加工应力、细化晶粒、降低硬度以及便于切削加工，因而锻造后还需要进行退火处理。

热作模具钢退火时宜缓慢加热，退火的质量主要取决于加热和冷却。热作模具钢因含有较多组元的合金元素，因而退火温度较高，这样有利于锻造后的不平衡组织能够充分地转变成奥氏体。但加热温度也不能过高，否则溶于奥氏体中的合金元素含量增加，退火后硬度较高，不利于切削加工。另外，过高的加热温度也会使奥氏体晶粒粗化，提高了材料的淬透性，从而增加了模具淬火开裂与变形倾向。

加热保温后，应采用缓慢的冷却方式。冷却时，均匀的奥氏体除先析出先共析相外，其余都将转变成珠光体。转变温度与冷却速度有关，冷却速度过快，则奥氏体的转变温度降低，转变的珠光体片间距细小，先共析相的数量减少，硬度有所提高。特别是对于多元合金及合金含量高的钢，由于奥氏体的稳定性增加，在冷却过快时，奥氏体易分解成贝氏体、托氏体甚至马氏体之类的组织，使钢发生硬化，这不仅造成切削加工困难，而且还会因冷却过程中过大的组织应力促使模具开裂。因此，退火时应严格控制加热和冷却。

(1) 热锤锻模具的退火及其质量控制 热锤锻模具用钢主要有 5CrNiMo、5CrMnMo、5Cr2NiMoVSi 和 5CrNiW 钢等。这类钢锻造后通常进行完全退火或等温退火处理。表 3-24 为热锤锻模具退火工艺规范。

表 3-24 热锤锻模具退火工艺规范

牌 号	加 热		等 温		硬度 HBW	冷却方式
	温度/℃	时间/h	温度/℃	时间/h		
5CrMnMo	850 ~ 870	4 ~ 6	650 ~ 680	2 ~ 4	179 ~ 241	以 50℃/h 炉冷至 500℃ 出炉
5CrNiMo	760 ~ 780	4 ~ 6	650 ~ 680	2 ~ 4	179 ~ 241	

对于易形成白点的模具钢（如 5CrMnSiMoV 钢），需要进行预防白点退火处理。

(2) 热挤压模具及压铸模具的退火及其质量控制 热挤压模具毛坯在锻造后需经良好的球化退火，以改善显微组织，消除内应力，降低硬度，为最终热处理作好组织准备。表 3-25 为常用热挤压模钢退火工艺。

表 3-25 常用热挤压模钢退火工艺

牌 号	退 火 工 艺	硬度 HBW	冷 却 方 式
3Cr2W8V	840 ~ 880℃ 加热→720 ~ 740℃ 等温	≤241	炉冷至 500℃ 出炉
3Cr3Mo3W2V	870℃ 加热→730℃ 等温	197 ~ 229	
5Cr4W5Mo2V	850℃ 加热→750℃ 等温	197 ~ 212	
4Cr5MoSiV	860 ~ 890℃ 加热	≤223	
4Cr5MoSiV1			
4Cr5W2VSi	860 ~ 880℃ 加热	≤229	
5Cr4Mo3SiMnVAI	860℃ 加热→720℃ 等温	≤229	

对于 3Cr2W8V、5Cr4W5Mo2V 等钢还可以采用快速球化退火工艺。该工艺由一次加热油淬（温度可为淬火温度）和二次加热（850 ~ 870℃）后随炉冷却两个工序组成。其工艺特点是在两次加热时不需保温和等温时间，只需均温即可，炉冷的冷却速度可在较大的范围内变化，而且对组织和退火的硬度影响不大。快速球化退火后，组织均匀，可避免链状碳化物的出现。此外，为获得均匀的圆形、细小碳化物分布，热挤压模具也可以采用调质作为预备热处理。

对于中碳高合金、大截面（>φ100mm）的热挤压模具钢，由于易出现沿晶界链状碳化物，所以在球化退火前，必须用正火给予消除。为确保热挤压模具钢具有良好的耐磨性、韧性和小的热处理变形，退火后要十分注意碳化物的形状、大小及分布状态。

目前，常用的压力铸造金属大致可分为锌合金、铝合金、镁合金、铜合金和钢铁材料五类。这些金属的熔点、压铸温度、压铸模工作温度、硬度要求及模具材料见表 3-26。压铸模用钢的选择首先要根据浇注金属的温度和浇注金属的种类来决定。

表 3-26 压铸金属的熔点、压铸温度、压铸模工作温度、硬度要求及模具材料

压铸金属种类及模具材料	锌合金	铝合金	镁合金	铜合金	钢铁材料
熔点/℃	400 ~ 450	580 ~ 740	630 ~ 680	850 ~ 920	1 345 ~ 1 520
压铸温度/℃	—	≈680	—	≈930	1 470 ~ 1 600
压铸模工作温度/℃	—	<593	—	600 ~ 700	800 ~ 850
压铸模硬度要求 HRC	48 ~ 51	40 ~ 48	40 ~ 48	37 ~ 45	42 ~ 44
模具材料	结构钢或 优质模具钢	3Cr2W8V、H13、 4Cr5MoSiV1		钼基合金、钨基合金	

压铸模用钢与热挤压模用钢基本相同，其退火工艺可参照热挤压模的退火工艺。

3.4.2 热作模具钢最终热处理质量控制

1. 热锤锻模的淬火回火及其质量控制

热锤锻模在淬火加热前应检查和消除刀痕（尤其是在型腔的尖角部分）等加工缺陷。为了避免氧化、脱碳，可以采用保护气氛、装箱保护及真空加热方式。模具型腔凸起或易变形的部位，为防止加热时变形翘曲，应将这些部位（如燕尾）朝下。常用热锤锻模钢的淬火工艺见表 3-27。

表 3-27 常用热锤锻模钢淬火工艺

牌 号	淬火温度/℃	淬火冷却介质	硬度 HRC
5CrMnMo	820 ~ 850	油	52 ~ 58
5CrNiMo	830 ~ 860	油	53 ~ 58
5Cr2MoNiV	940 ~ 970	油	60 ~ 61
5Cr2NiMoVSi	960 ~ 1 010	油	54 ~ 61
4CrMnSiMoV	860 ~ 880	油	56 ~ 58
5CrNiW	840 ~ 860	油	55 ~ 59
5CrNiTi	830 ~ 850	油	55 ~ 58

（1）淬火加热 由于热锤锻模具尺寸较大，而且合金钢的热导率较小，因而热锤锻模在淬火加热时要进行一次或二次预热。预热时应尽量保证心部热透，以免升温至淬火温度时产生过大的热应力导致模具变形开裂。热锤锻模常规的淬火温度应选在奥氏体晶粒不易长大的温度范围内，以保证有较高的冲击韧度。由于热锤锻模承受很大的冲击载荷，因此要求模具有好的韧性。提高淬火加热温度，有利于获得较多的板条马氏体，有助于提高热锤锻模的断裂抗力，减少开裂倾向。对此，对应用最多的锤锻模具钢 5CrMnMo 及 5CrNiMo 采用高温淬火-回火工艺。在 900℃ 高温淬火、420 ~ 550℃ 回火二次后，模具强度、韧性和塑性均出现了峰值，即这两种钢的强度、韧性、塑性和热稳定性都处于最佳状态。当然，提高热锤锻模淬火加热温度的前提是加热温度不能引起奥氏体晶粒长大，否则冲击韧度等性能会降低。为防止淬火开裂，可采取预冷措施。淬火后切忌带余温直接回火，应先在 300℃ 左右均温后再升到回火温度，以使模具中心部位的奥氏体先转变成下贝氏体，然后再升温回火，这样即可避免上贝氏体的产生。

锤锻模具钢在箱式电炉和盐浴炉中加热时，加热系数分别为 2 ~ 3min/mm 和 1min/mm。尺寸较大的锤锻模淬火前要在空气中预冷到 780 ~ 800℃ 后再油冷。小模块与大模块的预冷时间分别为 3 ~ 5min 和 5 ~ 8min。模具入油槽冷却时，应将工作面向下，但型腔如果凹陷较深，直径又小时，必须将型腔朝上或侧立入油。

5CrMnMo、5CrNiMo 钢等温淬火工艺规范是：先将模具加热后油冷淬火，待模

具表面冷却到 150 ~ 200℃ 时，带余温转入等温槽（应足够大），在 280 ~ 300℃ 等温 2 ~ 3h。由于先获得少量马氏体组织，可以促进随后的下贝氏体转变，提高了转变速度，缩短了等温时间，因此可以使模具内外提前均温。另外，油冷后再回火还可以避免因常规热处理时带温回火使模具中心部位组织转变成上贝氏体恶化模具性能的后果。

锤锻模带余温回火虽是防止淬火开裂的措施，但常使模具中心部位未转变的奥氏体转变成上贝氏体组织，从而导致模具脆裂。5CrNiMo 钢的等温转变图中，中温转变区的孕育期较短，仅 1 ~ 2min，因此大型模具常规淬火时，中心部位经常出现各类贝氏体组织（其中也包括上贝氏体），故模具脆性较大。

（2）淬火冷却 锤锻模采用热油冷却时，油温应低于 80℃。油温过高，易造成冷却不均匀，从而导致硬度不足或淬火软点。油冷至 150 ~ 200℃ 时，应出油空冷，以免冷透时产生裂纹。模块冷却时也不能过早出油，否则，虽然表面硬度达到要求，但心部却不能硬化（此时表面淬硬层与未淬硬的心部存在拉应力）。另外，心部未能强化而不能支撑表面，在使用时模具容易产生裂纹。

锤锻模由型腔和燕尾两部分组成。燕尾和锤锻模模面的硬度要求不同，大中型模的型腔部分要求硬度在 36 ~ 42HRC，而燕尾部分主要承受冲击力，要求硬度为 30 ~ 35HRC。燕尾部分往往是机械加工应力集中的部分，为了防止在冷却时开裂，最好是在模具整体入油冷却 3 ~ 5min 后，将燕尾露出油面停留一段时间，使其温度回升，然后再放入油中，再提出油面，这样反复 3 ~ 5 次，即可达到燕尾自回火和防止开裂的目的。

（3）回火 锤锻模淬火后应立即装炉回火。根据要求硬度的不同，应选用不同的回火温度。表 3-28 为部分锤锻模具钢的回火温度与硬度的关系。

表 3-28 部分锤锻模具钢的回火温度与硬度的关系

牌 号	回火温度/℃	硬度 HRC	牌 号	回火温度/℃	硬度 HRC
5CrNiMo	490 ~ 510	44 ~ 47	4CrMnSiMoV	610 ~ 650	38 ~ 42
	520 ~ 540	38 ~ 42		620 ~ 660	37 ~ 40
	560 ~ 580	34 ~ 37	5CrNiW	520 ~ 540	41 ~ 45
5CrMnMo	490 ~ 510	41 ~ 47		530 ~ 550	39 ~ 43
	520 ~ 540	38 ~ 41		590 ~ 610	37 ~ 38
4CrMnSiMoV	520 ~ 580	44 ~ 49		670 ~ 700	25 ~ 30
	580 ~ 630	41 ~ 44	5Cr2NiMoVSi	600 ~ 680	35 ~ 48

锤锻模淬火结束后加热至回火温度前，应先预热一次，并需要热透。由于锤锻模体积大，不经预热直接加热至回火温度，则会产生很大的温差从而形成热应力。锤锻模回火的时间应充分，否则将会造成模具心部硬度偏高，产生开裂。锤锻模淬

火后应进行两次回火，第二次的回火温度需低于第一次回火温度约 10℃，保温时间缩短 20% ~ 25%。回火后最好用油冷却，这样不但能够防止第二次回火脆性的产生，而且还可以避免回火后因在空冷时模具发生氧化而提高其表面粗糙度值。

对于 5CrNiMo、5CrMnMo 钢，为了消除油冷时产生的应力，可在 160 ~ 180℃ 再回火一次。特别应指出的是，这两类钢无论是淬火还是回火都不能在油中冷到室温，否则容易产生开裂。

2. 热挤压模和压铸模淬火回火及其质量控制

(1) 淬火加热 热挤压模和压铸模的淬火温度范围较宽，提高淬火温度时，有助于提高室温强度、高温强度和热硬性。但提高淬火温度易引起模具钢晶粒粗化，导致冲击韧度降低。降低淬火温度虽然对韧性有利，但不利于回火过程中二次硬化的充分发挥。因此，淬火温度的选择要按模具的工作条件、结构及形状、制造工艺和性能要求来确定。对断裂韧度、抗热疲劳性和抗热磨损性要求较高及淬火处理后需要电加工的模具要采用上限的温度淬火，对要求变形小、晶粒细、冲击韧度高的模具应采用下限的温度淬火。被压铸液体合金的温度高时，为保证良好的耐热性，应选用高一点的淬火温度。表 3-29 列出了部分热作模具钢的淬火工艺。

表 3-29 部分热作模具钢淬火工艺

牌 号	淬火温度/℃	淬火冷却介质	硬度 HRC
3Cr2W8V	1 050 ~ 1 100	油	50
	1 150 ~ 1 160	油	53 ~ 55
3Cr3Mo3W2V	1 030 ~ 1 090	油	52 ~ 55
3Cr3Mo3VNb	1 060 ~ 1 090	油、盐水	46 ~ 48
5Cr4W5Mo2V	1 130 ~ 1 150	油	56 ~ 60
4Cr3Mo3W4VTiNb	1 160 ~ 1 200	油	55 ~ 57
4Cr5MoSiV(H11)	1 000 ~ 1 050	油、空气	56 ~ 58

淬火加热、保温时间的选择应保证组织转变的完成和获得所要求的合金元素的固溶程度。淬火加热、保温时间过短，将降低钢的热硬性及耐回火性。

(2) 淬火冷却 中碳合金钢制热作模具的淬火冷却介质一般可采用油。对变形要求较高的模具，还可以采用 80 ~ 150℃ 的热油冷却。对于要求高韧性的模具，要采用高的淬火冷却速度以抑制碳化物沿晶界析出和出现上贝氏体，提高其强韧性和耐回火性，但其冷却速度必须控制在不出 现 淬 火 开 裂 情 况 及 变 形 在 允 许 的 范 围 内。

(3) 化学热处理 部分热作模具钢可采用渗碳、渗氮等化学热处理工艺来提高模具的表面硬度、耐磨性，并使其心部仍保持一定的强韧性。例如，钢丝钳模具和尖嘴钳锻模采用 3Cr2W8V 钢制造，经 920 ~ 930℃ 气体渗碳 7h，渗碳层深

1.2mm，表面碳的质量分数为1.6%，再经950~1050℃加热淬火，560℃回火三次，每次保温2h，表面硬度可达57~58HRC，心部硬度为49~51HRC，不但克服了模具使用过程中的黏模问题，推迟了热疲劳裂纹出现的时间，而且使用寿命也比未渗碳的模具提高了50%~100%。

(4) 回火 模具在淬火后应立即回火，入炉前最低温度不能低于50℃，目的是防止开裂。压铸模回火的目的不仅仅是消除淬火应力，更重要的是稳定组织，以保证使用中力学性能不致有过大的变化。热挤压模具的回火温度应在不影响模具的抗脆断能力及抗热疲劳性，并尽可能提高模具硬度的前提下来选择。因此，应根据模具的工作条件和具体的失效形式来确定具体的回火温度和硬度。小尺寸模具回火可不预热，但形状复杂、壁厚不均匀的模具，最好先经预热；大尺寸的模具必须进行预热，其预热温度为250℃，预热后再升温至回火温度。通常热挤压模和压铸模要进行二次回火，根据需要也可以进行三次回火。采用两次回火时，第二次回火温度应比第一次回火温度低20~40℃；采用三次回火时，第一次回火温度为500℃，第二次回火温度根据硬度要求而定，第三次回火温度应比第二次回火温度低20~40℃。表3-30为热挤压模和压铸模用钢的回火工艺。

表 3-30 热挤压模和压铸模用钢的回火工艺

牌 号	回 火 工 艺				硬度 HRC
	温度/℃	时间/h	次数	冷却方式	
3Cr2W8V	560~580	>2	>1	空气、油	44~48
	600~640	>2	>1	空气、油	40~44
	600~620	≥1	≥2	空气、油	44~48
	640~660	≥1	≥2	空气、油	40~44
4Cr5W2VSi	580~620	≥2	≥2	空气、油	48~52
	520~560	≥2	≥2	空气、油	52~56
3Cr3Mo3W2V	650~660	≥2	≥2	空气、油	38~44
	600~620	≥2	≥2	空气、油	48~52
5Cr4Mo3SiMnVAI	580~600	≥2	≥2	空气、油	53~55
4Cr3Mo3W4VNb	620~640	≥2	≥2	空气、油	50~52
3Cr3Mo3VNb	610~630	≥2	≥2	空气、油	45~47
5Cr4W5Mo2V	620~640	≥2	≥2	空气、油	49~51

3.5 塑料模具钢热处理质量控制

塑料模具形状复杂，尺寸精度和表面质量要求很高，因而对模具材料的机械加工性能、镜面抛光研磨性能、图案蚀刻性能、热处理变形和尺寸稳定性都有很高的

要求。此外，还要求材料具备一定的强韧性、耐磨性、耐蚀性和较好的焊补性能。

塑料模具类型分为热塑性塑料成型的注塑模和热固性塑料成型的压塑模。此两大类模具通常均在 200 ~ 300℃ 温度范围内工作。塑料模具热处理包括预备热处理和最终热处理。预备热处理通常采用普通退火、球化退火及正火，最终热处理有常规淬火回火、表面化学热处理、固溶与时效处理及先进表面强化处理等。塑料模具主要热处理工序一般都安排在机械加工前进行，并要求热处理后模具材料有适中的工作硬度，易于加工，利于表面粗糙度值降低，有足够的强度和韧性、较小的淬火变形量，型腔表面容易抛光及具有一定的耐蚀性和耐热性。

1. 预备热处理及其质量控制

塑料模具毛坯在机械加工前通常进行退火或正火处理，以降低模具钢硬度，改善显微组织，消除残余应力，并为最终热处理作好组织准备。塑料模具的预备热处理应注意改善切削加工性能或冷压加工性能等。

2. 最终热处理及其质量控制

(1) 模具钢的淬火 塑料模具型腔表面要求十分严格，因此在淬火加热过程中要确保型腔表面不氧化、不脱碳、不侵蚀、不过热等。塑料模具钢应在保护气氛炉中或在严格脱氧后的盐浴炉中加热，如果采用普通箱式电阻炉加热，应在模具型腔表面涂覆保护涂料，同时要控制加热速度。淬火冷却时应选择比较缓和的淬火冷却介质（如热油、硝酸盐浴、碱浴），控制冷却速度，以避免在淬火过程中产生变形和开裂（有些模具并不要求淬透，只要求有一定的淬硬层）。对于合金钢模具，可根据其硬度要求采用等温淬火，以进一步减少变形。模具淬火温度的选择的基本依据是钢的化学成分，共析或过共析钢的淬火加热温度为 $A_{c1} + 30 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 。表 3-31 为常用塑料模具钢淬火工艺。

表 3-31 常用塑料模具钢淬火工艺

牌 号	淬火温度/℃	淬火方式	牌 号	淬火温度/℃	淬火方式
20Cr	860 ~ 880	油或水冷	5CrNiMo	840 ~ 860	油
40Cr	840 ~ 880	油或水冷	Cr12MoV	960 ~ 980	油
45	820 ~ 860	油或水冷	SM2Cr13	980 ~ 1 000	油
Cr2	830 ~ 850	油	SM4Cr13	1 000 ~ 1 050	油
9Mn2V	780 ~ 800	油	SM3Cr2Mo	850 ~ 880	油
CrWMn	800 ~ 820	油	SM3Cr2NiMnMo	850 ~ 870	油或水冷
5CrMnMo	830 ~ 850	油	8Cr2MnWMoVS	860 ~ 900	空冷

(2) 模具钢的渗碳 对于要求高硬度、高耐磨性和高韧性的塑料模具，要选用渗碳钢来制造，并把渗碳、淬火和低温回火作为最终热处理。一般渗碳层深度为 0.8 ~ 1.5mm，如果是压制含有硬质填料的塑料，则模具渗碳层深度的要求为 1.3 ~

1.5mm；如果是压制软性塑料，则渗碳层的深度要求为 0.8 ~ 1.2mm；如果是带有尖角、薄边等模具，则渗碳层的深度要求为 0.2 ~ 0.6mm。渗碳层的碳含量以 0.7% ~ 1.0%（质量分数）为佳，渗层不允许有粗大的未溶碳化物、网状碳化物及内氧化等缺陷。如果采用碳氮共渗，则模具的耐磨性、耐蚀性、抗氧化性及防黏着性会更好。渗碳温度一般为 900 ~ 920℃，复杂型腔的小型模具可选取 840 ~ 860℃ 进行中温碳氮共渗。渗碳保温时间应根据对渗层深度的要求来选择，一般为 5 ~ 10h。

例如，Cr12 型钢的莱氏体钢强度高，耐磨性好，但韧性显得不足，若以 20Cr13 钢进行表面渗碳或碳氮共渗，则可以获得硬度高、耐磨性好的表层，中心组织的韧性和塑性也俱佳，且有一定强度。但是 20Cr13 钢表层钝化膜在渗碳或碳氮共渗时需要去除，方可获得一定深度的渗层。利用 20Cr13 钢取代 Cr12 型钢制造冲孔模和拉拔模，进行渗碳、淬火回火后，其表面硬度可达 62 ~ 65HRC，心部硬度则为 38 ~ 41HRC，使用寿命可比常规处理的 Cr12 型钢模具提高 1 ~ 2 倍。

(3) 模具钢的固溶与时效处理 对于形状复杂、要求精密和高耐磨性的塑料模具，要选用时效硬化钢。时效硬化模具钢热处理工艺规范见表 3-32。

表 3-32 时效硬化模具钢热处理工艺规范

牌 号	固溶温度/℃	时效温度/℃	硬度 HRC
18Ni(250)	815	482	50 ~ 52
18Ni(300)	816	482	53
18Ni(350)	816	510	57 ~ 60
25CrNi3MoAl	850 ~ 900(油冷)	510 ~ 530(8 ~ 10h)	40 ~ 42

固溶处理加热一般可在盐浴炉或箱式炉中进行，其相应加热系数分别取 1min/mm 和 2 ~ 2.5min/mm，冷却采用油冷，淬透性好的钢种也可空冷。如果锻造毛坯时能够准确控制终锻温度，则可采用节能的锻造余热固溶处理。时效处理最好在真空炉中进行，如果在箱式炉中进行，为防止模具型腔表面氧化，则炉内必须通入保护气氛，或者用氧化铝粉、石墨粉等在装箱条件下进行时效处理。要注意的是，装箱保护加热要适当延长保温时间，否则难以达到时效效果。

(4) 调质处理 3Cr2Mo 钢（P20 钢）模具毛坯在机械加工前需进行调质处理，其工艺如下：淬火加热温度为 840 ~ 860℃，油冷淬火后硬度为 50 ~ 54HRC；高温回火温度为 600 ~ 650℃，回火后硬度为 28 ~ 36HRC，组织为回火索氏体。P20 钢在调质处理以后再进行机械加工，可避免热处理变形，故称为“预硬型”塑料模具钢。将 P20 钢调质到 30HRC 以上硬度，再进行机械加工，然后进行抛光研磨，可达到表面粗糙度 Ra 为 0.05 ~ 0.10 μm 的镜面光亮度的要求。P20 钢适于制造大型塑料模具。如果 P20 钢经化学热处理后再抛光处理，则表面粗糙度 Ra 可降低到 0.03 μm 左右，表面光亮度还可进一步提高。

(5) 模具钢的回火 模具钢的回火应正确选择回火温度、回火时间，以及适

当的冷却方法，以免因回火不充分而引起磨削裂纹、线切割变形与开裂，或因回火不及时而出现自行开裂现象。模具淬火后应及时回火，回火应保证充分，且回火温度应高于工作温度，以免在工作时模具继续发生回火转变，致使在模膛表面产生组织应力。表 3-33 为塑料模具钢回火温度与硬度的关系。

表 3-33 塑料模具钢回火温度与硬度的关系

牌 号	达到下列硬度的回火温度/℃					
	28 ~ 32HRC	30 ~ 35HRC	35 ~ 40HRC	40 ~ 45HRC	45 ~ 50HRC	50 ~ 54HRC
45	470 ~ 500	430 ~ 480	370 ~ 430	310 ~ 370	260 ~ 310	160 ~ 180
40Cr	420 ~ 480	400 ~ 440	340 ~ 400	270 ~ 340	210 ~ 270	160 ~ 180
8Cr2MnWMoVS	—	—	~ 650	~ 630	~ 580	~ 500
5CrNiMnMoVSCa	—	—	≈ 650	≈ 600	≈ 550	≈ 300
SM3Cr2Mo	≈ 700	≈ 650	≈ 550	400 ~ 500	300 ~ 400	≈ 200
SM3Cr2NiMnMo	—	≈ 650	≈ 600	≈ 550	350 ~ 450	≈ 150
SM2Cr13	—	≈ 600	≈ 550	300 ~ 500	< 200	—
SM4Cr13	650	≈ 600	≈ 580	≈ 550	500 ~ 530	200 ~ 300

耐腐蚀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 JB/T 9197—2008 《不锈钢和耐热钢热处理》。

3.6 高速工具钢热处理质量控制

高速工具钢除用来制作高速切削刀具外，还可以制作冷作模具，也可制作高温下工作的热冲压冲头、挤压模具、热锻模具及热成形用轧辊等。凡是要求具有高热强性的工具和热作模具，一般都可选用 W18Cr4V（简称 W18）高速工具钢来制造，而要求能够经受一定冲击载荷的热作模具，一般可选用 W6Mo5Cr4V2（简称 M2）高速工具钢。高速工具钢具有很高的硬度、抗压强度和耐磨性，采用低温淬火、超过二次硬化温度回火及快速加热等工艺措施，可以有效地改善其韧性。因此，高速工具钢越来越多地被用来制造要求重载荷、高寿命的冷作模具。W6Mo5Cr4V2 高速工具钢有较高的韧性，在制作重负荷冷作模具方面取得了很好的效果。W9Mo3Cr4V（简称 9341）钢的特点是兼有上述两种高速工具钢的优点，成材率高，生产成本相对较低。试验证明，其使用寿命比上述两种高速工具钢略高。因此，W9Mo3Cr4V 钢得到了较大规模的生产和应用。

3.6.1 高速工具钢退火质量控制

高速工具钢在锻造后或经淬火返修后都需要进行退火处理。高速工具钢的 Ac_1 为 820 ~ 840℃，退火温度需略高于 Ac_1 。退火的保温时间根据装炉量等情况来定，一般应在 3 ~ 4h 之间。保温后可采用 10 ~ 20℃/h 的速度冷却至 550℃ 以下出炉，

也可采用冷至 740 ~ 760℃ 时停留 4 ~ 6h、再冷至 550℃ 以下出炉的等温退火方法。图 3-1 所示为高速工具钢等温球化退火工艺曲线。为了缩短退火周期，提高退火质量，也可以采用高速工具钢高温退火工艺（见图 3-2），即将退火温度由原先的 840 ~ 860℃ 提高到 880 ~ 920℃。普通的退火方法由于加热温度较低，虽然保温时间长，但高速工具钢仍然不能进行充分的再结晶，钢材不能充分软化，如果采用高温退火，则相变可以瞬间完成且相变进行得很充分，显微组织还可进行完全再结晶，因而钢材能够充分软化。

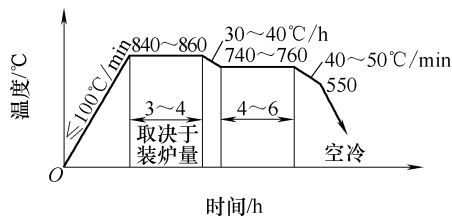


图 3-1 高速工具钢等温球化退火工艺曲线

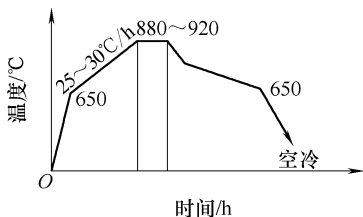


图 3-2 高速工具钢高温退火工艺曲线

由图 3-2 可见，高温退火工艺的冷却阶段的保温时间几乎被取消，因而退火周期大大缩短。高温退火后的高速工具钢的硬度比普通退火的低，切削性能更好，切削效率还可以提高 20%。

3.6.2 高速工具钢淬火、回火质量控制

1. 高速工具钢的淬火及其质量控制

高速工具钢的淬火加热及保温是为了获得高合金的奥氏体，以便淬火后可获得高合金的马氏体。这种马氏体具有高的耐回火性，在高温回火时析出弥散合金碳化物，产生二次硬化现象，使模具具有高的硬度和热硬性。由于高速工具钢中有大量的 Cr、W、Mo 及 V 的合金碳化物，因此只有在很高的加热温度下才能使这些合金碳化物较快较多地溶解于奥氏体中。但必须注意，淬火加热温度不能过高，温度过高会使碳化物形状发生变形，长大成角状，并优先沿晶界扩展，进而形成网状（这就是过热组织）；如果温度再高，由于合金元素的分布不均匀，会导致晶界熔化，从而出现铸态组织特征，主要为鱼骨状共晶莱氏体及黑色组织（这就是过烧组织）。过烧和严重过热的钢脆性很大，不能使用。

（1）淬火加热 高速工具钢热作模具淬火工艺见表 3-34。

表 3-34 高速工具钢热作模具淬火工艺

牌 号	淬火加热温度/℃	冷 却 方 式	Ms 点/℃
W18Cr4V	1 260 ~ 1 290	油冷淬火或分级淬火	约 210
W6Mo5Cr4V2	1 210 ~ 1 250		约 180
W9Mo3Cr4V	1 200 ~ 1 250		约 210

高速工具钢淬火加热的温度可结合模具工作条件及材料中碳化物不均匀程度在表 3-34 中的温度范围内选择。要求高硬度和高热硬性的冲头等，只要碳化物分布比较均匀，可选择上限淬火加热温度；要求热硬性和韧性兼备的热作模具等以及碳化物均匀度较差的材料，应选择下限，甚至下限以下淬火加热温度。

高速工具钢导热性差，不容易热透，淬火加热前必须进行预热。根据模具形状和要求，可分别选用一次预热或多次预热。一次预热适用于形状简单或开裂变形倾向小的、尺寸不大的模具，其加热温度为 $800 \sim 850^{\circ}\text{C}$ ，保温系数为 $0.4 \sim 1\text{min/mm}$ （盐浴炉）。如果是含钴（Co）的高速工具钢，则预热温度需提高至 950°C 。二次预热适用于大型及形状复杂的模具，第一次预热的加热温度为 $550 \sim 650^{\circ}\text{C}$ ，保温系数为 $0.8 \sim 1\text{min/mm}$ （盐浴炉）；第二次预热的加热温度为 $800 \sim 850^{\circ}\text{C}$ ，保温系数为 $0.4 \sim 1\text{min/mm}$ （盐浴炉）。三次预热适用于形状极为复杂、易变形开裂的大型模具，第一次和第二次预热与前相同，第三次预热的加热温度为 $1\ 050 \sim 1\ 100^{\circ}\text{C}$ ，保温时间与淬火加热时间相同。三次预热工序复杂，经济性差，较少使用。

高速工具钢在正常温度加热淬火后，组织有如下特征：晶粒度为 9 ~ 10 级，马氏体为隐针马氏体和细针马氏体，残留奥氏体分辨不清，碳化物没有快速长大，也没有角状化。如果淬火加热温度过低，大量的碳化物未溶解，就会形成欠热组织。这种情况将降低模具的使用寿命。

高速工具钢淬火加热保温时间确定的基本原则是：一定量碳化物溶入奥氏体，而奥氏体晶粒不长大。对于一定的淬火温度，应有一个合适的保温时间。高速工具钢的保温时间控制很严格，一般是以秒（s）来计算与控制的。通常以模具的有效厚度乘以加热系数来计算，在盐浴炉中以 $1\ 150 \sim 1\ 240^{\circ}\text{C}$ 加热时可选用 $10 \sim 12\text{s/mm}$ ，以 $1\ 250 \sim 1\ 300^{\circ}\text{C}$ 加热时可选用 $8 \sim 12\text{s/mm}$ 。

W18Cr4V 高速工具钢在正常温度加热淬火后，晶粒度为 9 ~ 10 级，马氏体为隐针马氏体和细针马氏体，残留奥氏体分辨不清，碳化物未开始长大，也没有角状化。W18Cr4V 高速工具钢在上下限温度区间内加热时，晶粒度和马氏体针长变化比较缓慢，钢材不易过热。如果超出以上温度范围，达到 $1\ 300^{\circ}\text{C}$ 后油冷时，晶粒尚未长大，晶粒度为 8.5 ~ 9 级，组织为粗针马氏体，碳化物颗粒明显减少，但个别碳化物开始长大，并有角状化倾向。

W6Mo5Cr4V2 高速工具钢采用下限温度 $1\ 220^{\circ}\text{C}$ 加热淬火，晶粒度为 9 级，马氏体针已清晰可辨，为细针马氏体。采用上限温度 $1\ 250^{\circ}\text{C}$ 加热奥氏体化、油冷淬火时，晶粒已长大到 8 级，碳化物已不圆整，大部分已角状化，组织为轻度过热。

W9Mo3Cr4V 高速工具钢采用下限温度 $1\ 220^{\circ}\text{C}$ 加热、油冷淬火后，马氏体细针特别清晰，奥氏体也清晰可辨，晶粒度为 9 级，碳化物比较均匀且细小，比 W6Mo5Cr4V2 高速工具钢还要细小。采用 $1\ 240^{\circ}\text{C}$ 加热奥氏体化、油冷淬火后，晶粒已长大到 8.5 级左右，碳化物明显减少，并有轻度角状化，残留奥氏体清晰可见。

综合上述情况,高速工具钢的淬火晶粒度和马氏体针长可以同时作为评价高速工具钢热处理工艺质量的主要参数。对此应予以重视。

(2) 淬火冷却 高速工具钢的冷却很重要,从确保在冷却过程中碳化物不从奥氏体析出、保证最好的合金化程度的角度来说,冷却速度应该越快越好;但从避免模具产生开裂和减少变形的角度来说,冷却速度越慢越好。实际生产往往都是在保证淬火硬度的前提下,尽量缓慢冷却,以免产生废品。对于淬火后变形和开裂倾向不严重,以及淬火硬度要求较高的模具用高速工具钢,通常采用油冷淬火;如果淬火后变形和开裂倾向严重,则应采用分级淬火,如在 $580 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 进行一次分级淬火。

2. 高速工具钢的回火及其质量控制

高速工具钢的回火应达到最佳的二次碳化物析出硬化效应、残留奥氏体充分分解和彻底消除残余应力的三个目标。普通高速工具钢的回火硬化峰值在 560°C 左右,所以高速工具钢的回火温度通常选择在 560°C 。高速工具钢淬火后存在体积分数为 $20\% \sim 25\%$ 的残留奥氏体,这些奥氏体稳定性很高,在回火加热过程中不易分解,只有在冷却到室温时部分残留奥氏体才能发生马氏体转变,残留奥氏体量可减少到 10% (体积分数)左右。但高速工具钢淬火后仅回火一次还不够,其残留奥氏体量还需要进一步降低,并且要消除新产生马氏体引起的内应力,所以高速工具钢一般需要在 560°C 左右进行三次回火。经三次回火后残留奥氏体下降到体积分数为 2% 左右,并出现回火二次硬化现象,硬度可达 $65 \sim 66\text{HRC}$ 。回火后的显微组织为回火马氏体、碳化物以及少量残留奥氏体。形状简单的一般高速工具钢模具可以采用两次回火,形状复杂的大型模具要采用三次回火。

高速工具钢淬火后应及时回火,否则会使残留奥氏体形成稳定化,导致回火转变不能充分进行,造成模具硬度低而脆性大。形状复杂的大型模具入炉的温度应比回火温度低,可先在 400°C 加热后再升温至回火温度进行回火。

3. 高速工具钢过热与过烧缺陷及其对策

高速工具钢淬火加热温度超过淬火温度上限时,会造成奥氏体晶粒粗大,马氏体针粗长,碳化物不但数量减少,而且会随着淬火温度升高逐步长大并出现角状化,甚至进一步会沿奥氏体晶界扩展成拖尾碳化物和断续网状或网状碳化物,这就是程度不等的过热组织。对此,应经常校对炉温仪表,严格控制淬火加热温度和保温时间,并加强炉前金相组织的检验。

3.7 模具热处理质量检验内容和方法

模具热处理质量检验应按照国家标准、行业标准或企业内控标准规定的程序,对工艺文件或技术标准中规定的项目进行严格的检查,并在生产中监督工艺纪律的执行情况,以防止和减少废品与返修品的产生。质量检验是模具热处理中非常重要

的环节，也是信息化、数字化管理的基础。

对批量生产的模具，必须在首件或首批检验合格的前提下才可继续生产。检验的项目和检验的方法及合格标准，应按图样、工艺卡片、技术要求及标准的规定执行。对于没有明确规定的，可按照相应的国家标准或用户要求进行检测。

热处理质量检验主要分为两大类：一类是产品的最终质量检验；另一类是各工序间的质量检验，目的是控制各工艺的质量，如淬火后硬度等性能检验。

(1) 模具热处理质量检查内容和要求 模具热处理质量检查一般包括外观检查、硬度检查、变形检查和金相检查四项内容，其技术要求见表 3-35。

表 3-35 模具热处理质量检查内容和要求

序 号	检查内容	技 术 要 求
1	外观检查	1) 模具热处理后不允许有裂纹、烧伤和明显的腐蚀痕迹 2) 预留两次磨量的模具零件,表面氧化层的深度不允许超过磨量的 1/3
2	硬度检验	1) 硬度的检查应在模具零件的有效工作部位进行 2) 硬度应符合图样要求 3) 硬度检查时,应按硬度试验的有关规程进行 4) 检查硬度不得在表面质量要求高的部位进行
3	变形检测	1) 模具零件热处理后的尺寸应在图样及工艺规定范围之内 2) 若模具零件预留两次磨量,应保证变形量小于磨量的 1/3 3) 表面氧化脱碳层不超过加工余量的 1/3 4) 模具的基准面一般应保证平面度误差 <0.02mm 5) 级进模(连续模)各孔距、步距变形应保证在 ±0.01mm 范围内
4	金相检查	主要检查模具零件的金相组织及化学热处理后的渗层深度、表面及心部组织。渗层深度应符合图样要求,金相组织级别应符合标准要求

(2) 模具化学热处理检验内容 模具化学热处理检验内容包括尺寸、外观、渗层深度、硬度和金相组织等。例如，渗氮模具零件的检查，渗氮层深应按工艺规定检查，其深度按从表面到过渡层的 1/2 计算；渗氮后表面硬度，3Cr2W8V 钢制模具要求 650 ~ 750HV，Cr12MoV 钢制模具要求 850HV 以上；渗氮层的脆性小于 2 级。

(3) 模具热处理变形检测 可用游标卡尺、百分表、塞尺、显微镜等测量仪器进行热处理前后的变形情况检测。薄板类模具零件可用塞尺在检验平台上检测其变形和翘曲量；轴类模具零件可用顶尖或 V 形铁支撑，用百分表进行变形检测；孔类模具零件的圆度检测可用游标卡尺、内径百分表及塞规等；特殊模具零件可用专用检验工具或仪器来检测。以上各项变形检测应按图样要求来进行。

主要模具零件工作部分变形检测标准：留有磨量的模具，应以磨削后尺寸不超

出规定为准；未留磨量的模具，变形不应超出规定要求。

(4) 模具硬度的检验 硬度是模具热处理质量的一项重要指标。在热处理现场，硬度往往是判断淬火质量的唯一依据。不仅如此，它对修改工艺参数和改善热处理质量还起着指导作用。

水淬和油淬钢种的淬火操作难度较大，容易出现硬度不均匀或硬度不足的缺陷。空冷钢虽然硬度均匀，但如果操作不当，也会使模具表面脱碳或残留奥氏体量过多造成硬度不足。因此，需要经常测量硬度，以保证每批（件）产品的硬度合格。但是，在热处理现场也经常会因测量失误而作出错误判断，以致造成批量废品。防止硬度测量失误，重要的是保证测量仪器的准确性和采用正确的测量方法。为此，应正确地选用硬度计，并选择合适的硬度试验方法。模具测量硬度常用的有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度及用锉刀测量硬度等试验方法。

1) 布氏硬度试验法。该方法是对一定直径（ D ）的硬质合金球施加试验力（ F ），使之压入试样表面，经保持规定的时间后，卸除试验力，通过测量试样表面压痕的直径，计算出布氏硬度值。布氏硬度值就是试验力除以压痕表面积所得的商。

布氏硬度法容易得到正确的硬度值，但模具淬火后硬度高，硬质合金球压入试样时要产生变形，测量误差大，且压头寿命低，因此不能采用布氏硬度计测量淬火硬度，它只适用于测定模具的退火硬度、正火硬度及调质硬度。

2) 洛氏硬度试验法。该方法是给压头（金刚石圆锥或硬质合金球）先加初试验力，然后加主试验力，使之压向待测试样表面，经保持规定时间后，卸除主试验力，再通过测量在初试验力下的残余压痕深度计算出硬度值（实际上可由洛氏硬度计的刻度盘或显示屏直接显示）。

洛氏硬度法是最常用的一种硬度测量方法，具有简便、快速的特点。常用洛氏硬度标尺及硬度符号分别为 A、B、C 和 HRA、HRB、HRC。此方法常用于测量模具的淬火硬度、淬火后低温回火硬度。表 3-36 为洛氏硬度标尺及适用范围。

表 3-36 洛氏硬度标尺及适用范围

洛氏硬度 标尺	硬度符号	压头类型	初试验力 /N	主试验力/ N	总试验力 /N	适用范围
A	HRA	金刚石圆锥	98.07	490.3	588.4	20 ~ 88HRA
B	HRB	直径 1.587 5mm 硬质合金球	98.07	882.6	980.7	20 ~ 100HRB
C	HRC	金刚石圆锥	98.07	1 373	1 471	20 ~ 70HRC

3) 维氏硬度试验法。该方法是将顶部具有规定角度（ 136° ）的正四棱锥体金刚石压头以选定的试验力压入试样表面，经保持规定时间后，卸除试验力，测量试样表面压痕的对角线长度。维氏硬度值是试验力除以压痕表面积所得的商。

使用维氏硬度计容易得到正确的硬度值，可以测量淬火模具的硬度。但是压头锥角为 136° ，压头容易损坏，而且测量需要一定的时间，因此一般在热处理现场不用来测量模具的淬火硬度。

4) 用锉刀测量硬度试验法。用锉刀检验不同硬度的工件时，锉痕深度不同，手感也不同。锉削比锉刀硬度低的工件，会形成不同深度的锉痕，工件的硬度越低，锉痕就越深。当工件硬度等于（或大于）锉刀硬度时，工件与锉刀之间会产生滑动，锉痕也小。利用这种现象，可以将不同硬度的专用标准锉刀从高硬度到低硬度分成组，标定其硬度后再将硬度值打印在锉刀上，用其来检测不同硬度的工件。该方法只要稍加练习就可以掌握，适用于 39 ~ 67HRC 的常规硬度检验，尤其是在没有洛氏硬度计或大型模具无法使用洛氏硬度计时检测硬度极为方便。另外，由于脱碳或冷却不均匀等造成的局部硬度不足也可以使用该方法检查出来。

需要注意的是，在锉刀用了一段时间后，锉齿磨损变钝，此时检测硬度数值容易偏高，应及时更换。

硬度检验应按图样要求的部位来进行。未指定位置时，可根据既不破坏模具精度又具有代表性的原则来确定硬度检验位置，一般以不少于 3 点的平均值作为模具的硬度值。在检验硬度均匀性时，一般检验位置应不少于 3 处，每处不少于 3 点。此外，所用硬度计必须按要求进行标定，并将模具的检验部位清理干净，整个模具应放平。

(5) 模具外观检查 可通过目视或低倍放大镜来观察其表面有无裂纹、烧伤、麻点及锈斑等缺陷。重要模具零件可用磁粉、超声波等仪器进行检测。

(6) 金相检查 当工艺或图样要求进行金相检验时，或者对某些模具零件的内部组织产生怀疑时，可在模具零件上对规定部位取样后进行金相检查。

(7) 原材料的成分检验 模具用钢品种繁多，而且大多数单件生产，因此在热处理前必须确认其化学成分，否则不但可能浪费工时，有时还会造成不可弥补的损失。对重要的模具，最好有上道工序的用料数据，必要时要对其化学成分进行化验。对一般模具，可通过对其进行火花鉴别来判断其所用材料。

(8) 力学性能检查 图样或工艺有要求的，必须准备试样，随模具一起热处理，并进行力学性能测定。

3.7.1 热作模具热处理质量检验内容和方法

热作模具热处理质量检验内容主要包括外观检查、硬度检测、变形检测及金相检验等。有些热作模具钢还要作表面强化处理（如氮碳共渗、渗硼、TiN 涂层等），则应按相关技术标准进行检验（如渗层深度）。

(1) 外观检查 一般情况下，模具上任何部位不得有目视可见的裂纹，关键部位应用 5 ~ 10 倍的放大镜仔细观察。此外，模具表面不得有明显的磕碰伤痕。

(2) 硬度检测 首先将待检测部位抛光或磨光，一般用布氏或洛氏硬度计检

测3~4点,或根据具体情况,选用维氏、肖氏、里氏硬度计来检测。模面硬度的检验部位应选在型腔附近的平面上,不允许在型腔内检验。在实际检测过程中,如果硬度值超高,应多检测几点,再根据检测数值,作出是否要提高回火温度的决定;若硬度偏低,则应在原位置打磨后继续检测,如果硬度还不能满足要求,则需对牌号作火花鉴别,以找出硬度偏低的原因。

(3) 变形检测 模面变形是指模面翘曲,通常采用刀口尺或平尺观测模面的平面度,并用塞尺进行测量。一般规定变形量应小于预留磨量的1/3。压铸模的平面允许变形量≤0.15mm。锤锻模及压力机模模面允许变形量分别见表3-37和表3-38。

表 3-37 锤锻模模面允许变形量

模 具 类 型	小 型	中 型	大 型	特大型
变形量/mm	≤0.25	≤0.30	≤0.50	≤0.50

表 3-38 压力机模模面允许变形量

模块长度/mm	≤500	>500~600	≥600
变形量/mm	0.5~0.6	0.6~0.8	1.0~1.2

压铸模及热锻模允许的变形范围见表3-39。

表 3-39 压铸模及热锻模允许的变形范围

模具种类	尺寸/mm	允许变形量/mm	模具种类	尺寸/mm	允许变形量/mm
压铸模	≤150	±0.10	热锻模	≤275	±0.20
	>150~200	±0.15		>275~375	±0.30
	>200~350	±0.20		>375	±0.50

(4) 金相检验 热作模具钢金相检验内容主要包括:①高韧性热锻模具钢:原材料带状组织、碳化物偏析带、热处理组织(马氏体针)、碳化物网和球化质量;②强韧兼备的热作模具钢和高热强性钢:共晶碳化物不均匀性、球化质量、碳化物偏析带和碳化物网。

1) 热作模具一般均用中碳合金工具钢制造。其热处理后的金相组织应为细针马氏体+少量残留奥氏体+少量过剩粒状碳化物。少量残留奥氏体用金相法很难精确鉴别和定量测定;剩余碳化物由于数量较少且颗粒细小,对模具的影响不像高碳合金钢中大块碳化物那么大。因此,显微组织级别的确定以马氏体形貌和马氏体针长度来区分,并从粗到细分为6级。其中,以3级、4级为最佳,2级、5级次之,6级(过热)和1级(欠热)一般不用。

2) 显微晶粒度主要按GB/T 6394—2002《金属平均晶粒度测定方法》中的金相比较法评定,即通过显微镜投影图片或代表性视场的显微照片与标准评级图片

(放大 100 倍) 直接比较, 得出晶粒度的级别。

3) 热作模具钢显微组织评级执行 JB/T 8420—2008 《热作模具钢显微组织评级》标准。显微组织均在放大 500 倍的显微镜下进行评定。马氏体均以金相比较法评定, 检查不得少于 3 个视场, 取其马氏体针最长的视场对照相应钢种的评级图进行评定。通常热作模具的马氏体级别以 2 ~ 4 级为宜, 晶粒度级别以 7 ~ 10 级为宜。表 3-40 为热作模具钢显微组织特征及马氏体针最大长度。

表 3-40 热作模具钢显微组织特征及马氏体针最大长度 (JB/T 8420—2008)

牌 号	马氏体级别	显微组织特征	马氏体针最大长度/mm
5CrNiMo	1	马氏体 + 细珠光体 + 铁素体	0.006
	2	隐针状马氏体 + 极少量残留奥氏体	0.008
	3	细针状马氏体 + 少量残留奥氏体	0.014
	4	针状马氏体 + 残留奥氏体	0.018
	5	较粗大针状马氏体 + 较多残留奥氏体	0.024
	6	粗大针状马氏体 + 大量残留奥氏体	0.040
5Cr4W5Mo2V	1	马氏体 + 细珠光体 + 少量碳化物	0.003
	2	隐针状马氏体 + 极少量残留奥氏体 + 碳化物	0.004
	3	细针状马氏体 + 少量残留奥氏体 + 碳化物	0.010
	4	针状马氏体 + 残留奥氏体 + 碳化物	0.016
	5	较粗大针状马氏体 + 较多残留奥氏体 + 碳化物	0.030
	6	粗大针状马氏体 + 大量残留奥氏体 + 碳化物	0.036
3Cr2W8V	1	马氏体 + 细珠光体 + 少量碳化物	0.003
	2	隐针状马氏体 + 极少量残留奥氏体 + 碳化物	0.004
	3	细针状马氏体 + 少量残留奥氏体 + 碳化物	0.010
	4	针状马氏体 + 残留奥氏体 + 碳化物	0.016
	5	较粗大针状马氏体 + 较多残留奥氏体 + 碳化物	0.030
	6	粗大针状马氏体 + 大量残留奥氏体 + 碳化物	0.036
4Cr5MoSiV	1	马氏体 + 上贝氏体	0.003
	2	隐针状马氏体 + 极少量残留奥氏体	0.004
	3	细针状马氏体 + 少量残留奥氏体	0.010
	4	细针状马氏体 + 少量残留奥氏体	0.016
	5	较粗大针状马氏体 + 较多残留奥氏体	0.030
	6	粗大针状马氏体 + 大量残留奥氏体	0.036

4) 对有些还要作表面强化处理 (如氮碳共渗、渗硼、TiN 涂层等) 的热作模具钢, 则应按照相关技术标准验收, 重点检测渗层深度、表面硬度及金相组织三大项。

(5) 原材料的成分检验 合金工具钢执行 GB/T 1299—2000 标准, 其化学成分试验方法执行 GB/T 222、GB/T 223 等标准。

(6) 力学性能检测 对于特殊重要模具零件, 还要增加随炉试样力学性能检验。室温拉伸和高温拉伸试验分别按照 GB/T 228.1—2010 和 GB/T 4338—2006 等

标准进行，室温冲击和高温冲击试验按照 GB/T 229—2007 等标准进行。

3.7.2 冷作模具热处理质量检验内容和方法

冷作模具热处理质量检验内容主要包括外观检查、硬度检测、变形检测、金相检验、原材料的成分检验及力学性能检验等。冷作模具表面渗氮、渗硼及其他渗金属等按各相关标准进行检验。

(1) 外观检查

- 1) 模具表面不允许有磕碰、划伤、烧损及严重的氧化脱碳、麻点腐蚀及锈蚀现象。
- 2) 表面不得有各种裂纹，必要时用磁力探伤等检测仪检查。
- 3) 淬火、回火后模具表面必须光洁，模具上孔眼特别是不通孔内不得有堵孔用泥和盐渍等，绑扎铁丝等附着物必须去除。
- 4) 火焰淬火模具表面应无烧熔、氧化及裂纹等缺陷。

(2) 硬度检测

- 1) 模具毛坯退火后硬度要求：碳素工具钢通常为 180 ~ 207HBW，低合金工具钢通常为 207 ~ 241HBW，高（中）合金工具钢通常为 217 ~ 225HBW。或者按图样技术要求和合同要求进行检查。
- 2) 凸、凹模淬火后应 100% 进行硬度检验，批量件（>5 件）应选取其中的 40% 用硬度计检查，其余的 60% 用锉刀检查。
- 3) 冲裁模和冷冲模在距刃口 5mm 范围内的硬度必须达到要求，不得有软点。冷镦、冷挤、弯曲及拉深类模具的主要受力工作面必须达到技术要求。
- 4) 碳素工具钢小凸模尾部固定部分的硬度应控制在 30 ~ 40HRC，其余部位硬度应达到图样要求。
- 5) 火焰淬火的大型模具的工作面硬度需大于规定值上限，一般不允许有回火带及低硬度区。结构及形状复杂的大型模具允许有 20mm 的低硬度区，但硬度值不得低于下限值 10HRC。

(3) 变形检测

- 1) 凸、凹模热处理后的变形量不得超过规定留磨量的 2/3。
- 2) 通常冷作模具热处理后的变形量不得超过预留磨量的 1/2。冷作模具热处理后的允许变形量见表 3-41。

表 3-41 冷作模具热处理后的允许变形量

工作部位名义尺寸 /mm	允许变形量/mm		
	碳素工具钢	低合金钢	高合金钢
≤50	- 0.05	± 0.03	± 0.02
>50 ~ 120	- 0.10	± 0.06	+ 0.02 - 0.04

(续)

工作部位名义尺寸 /mm	允许变形量/mm		
	碳素工具钢	低合金钢	高合金钢
>120 ~ 200	-0.15	+0.05	+0.03
		-0.15	-0.06
>200 ~ 300	-0.20	+0.06	+0.04
		-0.15	-0.08
中心孔距变形率(%)	±0.10	±0.06	±0.04

(4) 金相检验 冷作模具钢金相检验主要包括：①莱氏体钢：共晶碳化物不均匀度、珠光体球化、二次碳化物网、淬火组织及晶粒度；②基体钢：脱碳层(包括退火脱碳和淬火回火脱碳)、碳化物带状偏析、二次碳化物网和共晶碳化物、回火程度。

1) 冷作模具钢退火后的金相组织要求见表 3-42。

表 3-42 冷作模具钢退火后的金相组织要求

钢 种	珠光体等级	网状碳化物等级	带状碳化物等级
碳素工具钢	4 ~ 6	≤3	—
低合金工具钢	2 ~ 4	≤2	≤4
高合金工具钢	1 ~ 3	≤2	≤3

2) 淬火后马氏体等级按马氏体评级图片评定，通常要求碳素工具钢马氏体级别≤3 级，高碳合金工具钢马氏体级别≤2 级，中碳合金工具钢马氏体级别≤4 级。冷作模具钢热处理金相检验项目要求见表 3-43。

表 3-43 冷作模具钢热处理金相检验项目要求

模 具 类 别	牌 号	金 相 组 织	
		马氏体级别	网状碳化物级别
落料冲孔模	T7A ~ T12A	≤3	≤3
	9Mn2V	≤2	≤3
	GCr15	≤2	≤2
	CrWMn	≤2	≤2
	9CrWMn	≤2	≤2
	9SiCr	≤2	≤3
冲头	T7A ~ T12A	≤2	≤3
	W6Mo5Cr4V2	淬火晶粒度≤11 号,回火程度≤1 级	
	9Mn2V	≤2	≤2
硅钢片冲模	Cr12、Cr12MoV	≤2	共晶碳化物≤3 级
	9SiCr	≤2	≤3

(续)

模 具 类 别	牌 号	金 相 组 织	
		马氏体级别	网状碳化物级别
弯曲模	T7A ~ T12A	≤3	≤3
	9Mn2V	≤2	≤2
	Cr12、Cr12MoV	≤3	共晶碳化物≤3级
拉深模	T7A ~ T12A	≤3	≤3
	Cr12、Cr12MoV	≤3	共晶碳化物≤3级
滚丝模	9SiCr	≤2	≤3
	Cr12MoV	≤2	≤3
	W6Mo5Cr4V2	淬火晶粒度≤11号,回火程度≤1级	

高碳合金钢制冷作模具显微组织可按 JB/T 7713—2007《高碳合金钢制冷作模具显微组织检验》标准进行检验。W18Cr4V 等高速工具钢中大块碳化物按照 GB/T 9943—2008《高速工具钢》标准进行评级，淬火回火后金相组织按企业内控标准评级。

- 3) 模具表面渗氮、渗硼及其他渗金属按各相关标准评定。
- (5) 原材料的成分检验 碳素工具钢、合金工具钢及高速工具钢分别执行 GB/T 1298—2008、GB/T 1299—2000 和 GB/T 9943—2008 标准。其化学成分检验方法执行 GB/T 222、GB/T 223 等标准。
- (6) 力学性能检测 室温拉伸及室温冲击试验分别按照 GB/T 228.1—2010 和 GB/T 229—2007 等标准进行。

3.7.3 塑料专用模具钢金相检验

塑料专用模具钢金相检验主要包括：①精炼的结构钢对非金属夹杂物要求较高，因此主要检测原材料的非金属夹杂物；②易切削预硬型钢主要检测切削相的带状、纺锤形和条状分布；③时效硬化塑料模具钢主要检测淬火回火组织的均匀性，碳化物的形态、大小和分布，使模具具有较好的镜面。

模具钢检验按 JB/T 1255—2001《高碳铬轴承钢滚动轴承零件热处理技术条件》、GB/T 1299—2000《合金工具钢》等标准进行。

塑料成型模热处理允许变形范围见表 3-44。

表 3-44 塑料成型模热处理允许变形范围

尺寸/mm	允许变形量/mm		
	碳素工具钢	低合金工具钢	优质渗碳钢
≤100	±0.10	±0.06	±0.04

(续)

尺寸/mm	允许变形量/mm		
	碳素工具钢	低合金工具钢	优质渗碳钢
> 100 ~ 250	+0. 15	+0. 10	+0. 10
	-0. 20	-0. 15	-0. 05
> 250 ~ 400	+0. 20	+0. 15	+0. 15
	-0. 30	-0. 20	-0. 18
孔中心距变形率(%)	±0. 08	±0. 06	±0. 04

3.7.4 高速工具钢模具热处理质量检验内容和方法

高速工具钢模具热处理质量检验主要包括外观检查、硬度检测、变形与开裂检测及金相组织等。

(1) 外观检查 按工艺守则及质量检查规程目视观察或用放大镜观察，表面不应有裂纹、烧伤、腐蚀和碰伤等。

(2) 硬度检测 按质量检查规程内容，硬度值应符合图样和工艺规定。重要模具不允许有软点等。

(3) 变形与开裂检测 按工艺规定检查模具变形。任何模具表面不允许有裂纹，因此热处理后必须 100% 检查模具表面，重点检查应力易集中部位、尖角、槽、薄壁孔、厚薄交界处凸出及凹陷处等。

(4) 原材料的检查 高速工具钢毛坯退火后的硬度在 269HBW 以下；低倍组织热浸蚀后宏观不得有残余缩孔、夹杂、分层、裂纹、气泡和白点等缺陷，表面不允许有目视可见的裂纹、折叠、结疤和夹杂，中心疏松和一般疏松不大于 1 级；碳化物不均匀级别应符合技术要求。

(5) 高速工具钢的金相检验 退火组织主要检测共晶碳化物不均匀度，测定脱碳层深度；淬火组织主要检测晶粒度大小及过热程度；回火组织主要检测回火程度。用金相显微镜检测金相组织。

1) 淬火晶粒度。高速工具钢淬火晶粒度的大小是淬火加热温度和加热时间的直接反映，它与钢的强度、韧性、耐磨性、热硬性和模具的使用寿命有密切关系。晶粒度小为欠热，晶粒度大为过热，晶界熔化为过烧。W6Mo5Cr4V2 等 Mo 系高速工具钢晶粒度级别按 GB/T 6394—2002《金属平均晶粒度测定方法》中的金相比较法评定，如果发现检测面上有晶粒不均匀现象，则观察视场应不少于 10 个，按大多数晶粒度级别评定。

2) 淬火过热程度的检查。高速工具钢过热程度以碳化物形貌的变化来确定，根据碳化物沿晶界的伸长、拖尾及呈网状的程度的不同来确定过热级别。W 系高速工具钢一般根据碳化物形态变化和网状严重程度把过热组织分成 5 个级别。淬火后不允许有粗针状马氏体过热组织及晶界氧化的过烧组织。

3) 回火质量的检验。高速工具钢的回火组织主要检测回火程度。高速工具钢正常回火后,用质量分数为4%的硝酸酒精溶液(室温)浸蚀后基体组织为黑褐色,回火不充分时颜色变浅,甚至有时会显现出晶界。根据基体组织对浸蚀剂的接受程度,可以判断回火是否充分。高速工具钢的回火程度一般分为3级,其中1~2级为合格。例如,W6Mo5Cr4V2等Mo系高速工具钢回火程度,1级和2级为回火充分和正常回火,3级为回火不充分。W系高速工具钢和大尺寸高速工具钢的回火程度级别另有规定。大尺寸高速工具钢碳化物偏析严重,碳化物聚集处奥氏体合金化程度高,不易浸蚀,容易显示回火不充分。

高速工具钢的金相组织按照GB/T 9943—2008《高速工具钢》进行检测。

第 4 章 模具热处理常见缺陷分析与对策

模具在退火、正火、淬火和回火等热处理（包括表面热处理）过程中，由于原材料组织不良、热处理工艺或操作不当，以及模具形状和尺寸等因素的影响将会产生各种缺陷。模具热处理常见缺陷包括硬度不足和软点、氧化和脱碳、过热或过烧、淬火组织粗大、石墨碳、球化组织不良、网状碳化物、腐蚀、萁状断口、脆性大、裂纹及变形等。这些缺陷的存在都会在不同程度上影响钢的工艺性能和模具的使用寿命，对此应采取相应措施加以预防与控制。

4.1 模具热处理缺陷种类及特点

模具的热处理常见缺陷按其性质分为裂纹、变形、残余应力、组织不合格、性能不合格、脆性及其他缺陷。其中裂纹是最严重的缺陷（一般称为第一类热处理缺陷），常造成模具的报废，主要包括淬火裂纹、加热不当引起的各种加热裂纹，以及淬火后由于工序不当而产生的延迟裂纹、回火裂纹、时效裂纹、冷处理裂纹、磨削裂纹和电镀裂纹等；热处理变形称为第二类热处理缺陷，其是造成精密模具报废的主要原因之一；残余应力一般称为第三类热处理缺陷。变形、开裂及残余应力通常被认为是模具热处理的三大难题。

模具的热处理是其获得要求的组织与力学性能的重要工序。由于热处理过程复杂，故其缺陷产生的类型和原因也是多种多样的，除了热处理过程中的不良工艺与操作不当外，还与原材料、锻造工艺、铸造工艺、预备热处理及其他的表面硬化处理有关。因此，正确认识与分析模具的缺陷特征，是解决模具热处理缺陷并提高模具质量的基础。表 4-1 列出了模具热处理类别与缺陷形式，表 4-2 列出了模具的一般热处理缺陷。

表 4-1 模具热处理类别与缺陷形式

热处理的类别		缺 陷 形 式
普通热处理	退火和正火	软化不充分，退火脆性，碳化物石墨化，表面氧化与脱碳，过热，过烧，网状碳化物，球化组织不良，萁状断口和石状断口，组织反常等
	淬火	淬火裂纹，淬火变形，硬化不充分，淬火软点，氧化与脱碳，过热，过烧，放置裂纹，放置变形，鱼鳞状断口，表面腐蚀等
	回火	回火不足，回火裂纹，回火脆性，过回火，回火变形，表面腐蚀，残余应力过大，性能不合格

(续)

热处理的类别		缺陷形式
普通热处理	冷处理	冷处理裂纹, 冷处理变形, 冷处理不充分等
	后续处理	磨削裂纹, 磨削烧伤, 磨削淬火, 酸洗脆性, 浸镀脆性等
表面硬化处理	渗碳和碳氮共渗	渗碳过度, 组织异常, 渗碳不均匀, 内部氧化, 表面剥落, 表层碳化物不合格, 心部组织不合格, 变形大, 渗层深度不合格, 心部硬度不合格, 表面硬度不合格, 表面脱碳等
	渗氮和氮碳共渗	白亮层, 剥落, 渗层硬度低, 渗层深度不合格, 渗层有网状或脉状组织, 变形大, 心部硬度低, 渗层脆性, 耐蚀性差, 表面氧化等
	表面淬火 (感应淬火、火焰淬火等)	变形大, 裂纹, 表面硬度过高或过低, 硬度不均匀, 硬化层不足或过深, 烧伤, 晶粒粗化 (过热), 螺旋状回火带, 斑疤等
特种热处理	真空热处理	表面合金元素贫化, 表面增碳或增氮, 表面不光亮, 淬火硬度低, 表面晶粒长大, 粘连等
	可控气氛热处理	表面增碳或增氮, 表面不光亮, 氢脆, 表面腐蚀, 氧化, 脱碳等

表 4-2 模具的一般热处理缺陷

分 类	主要的表现形式
脆性	退火脆性, 回火脆性, 热脆性, 蓝脆性, 低温脆性, 氢脆性, 浸镀脆性, 酸脆性, 碱脆性等
硬度	淬火软点, 硬化不充分, 过度回火, 不完全淬火, 硬度不均匀等
金相组织	碳化物石墨化, 魏氏组织, 异常组织, 晶粒粗大, 混晶, 内部氧化, 带状组织, 条纹组织, 鱼鳞状断口, 黑点, 白点, 过热组织, 过烧组织等
表面缺陷	表面氧化与脱碳, 渗碳, 白亮层, 剥落, 晶界腐蚀, 应力腐蚀开裂, 气泡, 凸起, 浸镀不良等
热处理工艺的缺陷	奥氏体化温度和淬火温度不当, 加热时间和保温时间不当, 淬火冷却介质和冷却方法不当, 冷却效果不良, 硬化层不良, 淬火硬度和淬硬层深度不合格, 存在残余应力, 残留奥氏体过多
力学性能的不足	弯曲强度, 屈服强度, 疲劳强度, 冲击韧性, 耐磨性, 耐蚀性等不足

4.2 模具常见缺陷分析与对策

4.2.1 硬度不足或不均产生原因与对策

模具热处理硬度是非常重要的力学性能指标, 硬度不合格是十分严重的缺陷。模具热处理后硬度不足或硬度不均将使模具耐磨性及疲劳强度等性能降低, 导致模

具早期失效，严重降低模具的使用寿命。

1. 产生原因

- 1) 模具截面大，钢材淬透性差，如大型模具选用了淬透性低的钢种。
- 2) 模具钢原始组织中碳化物偏析严重或组织粗大，钢中存在石墨碳和碳化物偏析、聚集。
- 3) 模具锻造工艺不正确，锻造后未进行很好的球化退火，使模具钢球化组织不良。
- 4) 模具表面未除净退火或淬火加热时产生的脱碳层。
- 5) 模具淬火温度过高，淬火后残留奥氏体量过多；或淬火温度过低，加热保温时间不足，使模具钢的相变不完全。
- 6) 模具淬火加热后冷却速度过慢，分级与等温温度过高或时间过长，淬火冷却介质选择不当。
- 7) 碱浴水分过少，或淬火冷却介质中含杂质过多，或淬火冷却介质老化。
- 8) 模具淬火冷却后出淬火冷却介质时温度过高，冷却不足。
- 9) 回火不充分及回火温度过高等。

2. 对策

- 1) 正确选用模具钢种，大型模具应选用淬透性高的高合金模具钢。
- 2) 加强原材料检查，确保原材料符合标准。对不良原材料钢材进行合理的锻造并进行球化退火处理，确保获得良好的组织。碳素工具钢不易多次退火，以防石墨化。
- 3) 严格执行锻造工艺和球化退火工艺，保证有良好的预备热处理组织。
- 4) 热处理前应彻底清除模具表面的锈斑和氧化皮，并注意加热时的保护，尽量采用真空加热淬火或保护气氛加热淬火，盐浴加热时应进行良好的脱氧处理。
- 5) 正确制订模具淬火加热工艺参数，确保相变充分，以大于临界冷却速度的冷却速度进行快速冷却，以获得合格的金相组织。
- 6) 正确选用淬火冷却介质和冷却方式，严格控制分级与等温温度和时间。
- 7) 要严格控制碱浴水分含量，对长期使用的淬火冷却介质要经常进行过滤及定期更换，并保持清洁，定期检测其淬火冷却特性曲线。
- 8) 对尺寸大的模具，适当延长浸入淬火冷却介质的时间，防止模具出淬火冷却介质的温度过高。
- 9) 模具淬火后应及时、充分回火，并防止回火温度过高。
- 10) 对硬度要求高的模具可采用深冷处理（如 $-110 \sim -196^{\circ}\text{C}$ ）。
- 11) 进行表面强化处理。

4.2.2 软点产生原因与对策

模具在热处理过程中出现软点，即模具表面硬度不一致，会直接影响其耐磨性

与尺寸的稳定性，同时会造成模具寿命的降低。例如，高碳钢（如碳素工具钢）常以自来水作淬火冷却介质，如果水循环不好，或者采用水淬油冷而水淬时间又太短时，常常会出现淬火软点，且软点附近很容易出现裂纹。经分析，T10 钢淬火软点的组织中，黑色组织是托氏体，灰白色基体是马氏体 + 残留奥氏体 + 少量剩余碳化物。

1. 产生原因

- 1) 原材料中存在带状组织或大块铁素体组织；或预备热处理不当，在钢中保留了大量的大块铁素体。
- 2) 模具在热处理前表面有氧化皮、锈斑或局部脱碳。
- 3) 模具淬火时，选择的淬火冷却介质，冷却能力差，造成局部冷速过低而发生珠光体型的转变。
- 4) 淬火冷却介质在长期使用过程中混有较多杂质或出现老化，造成冷却不均匀。
- 5) 碱浴水分过多。
- 6) 模具的冷却方法选择不当，模具在淬火冷却介质中未进行移动或移动不够充分（尤其对大型模具），模具之间相互接触或叠加。
- 7) 淬火冷却介质温度过高等。

2. 对策

- 1) 严格检查原材料质量，进行正确的预备热处理，保证正火或退火质量。
- 2) 淬火加热前去除模具表面氧化皮、锈斑、脱碳层，在淬火加热时对模具表面作适当保护，防止产生氧化脱碳，如采用真空炉、盐浴炉和保护气氛炉加热。
- 3) 模具淬火加热后冷却时，应选择合适的淬火冷却介质。
- 4) 对长期使用的淬火冷却介质要经常进行过滤及维护，或定期更换。
- 5) 控制碱浴水分，避免水分过多。
- 6) 模具装夹（炉）应合理。淬火时要分散冷却，防止其内外冷却不均。模具浸入淬火冷却介质后，要适当往复移动或使淬火冷却介质充分搅动。
- 7) 安装热交换装置及温控系统，防止淬火冷却介质温度过高等。

对因软点不合格的模具零件可以重新加热淬火，但应先经正火、退火或高温回火处理。对有组织缺陷的模具要进行预先处理。

4.2.3 氧化和脱碳产生原因与对策

模具在热处理过程中如果保护不当，表面常常会氧化、脱碳，使模具淬火后的硬度、耐磨性和疲劳强度降低，并严重影响模具的使用寿命。氧化使模具表面金属烧损，形成氧化皮，不仅使模具的表面质量降低，还会影响模具冷却时的均匀性，从而造成模具淬火后硬度不均匀，甚至报废。脱碳使模具表面贫碳，会造成模具淬火后硬度不足或出现软点，不仅降低其抗压性、耐磨性和抗咬合性，还会促成其表

面形成拉应力状态而恶化强韧性,降低模具的使用寿命。严重的脱碳甚至会形成表面全脱碳的铁素体,导致模具报废。脱碳层的存在往往是模具产生淬火裂纹的原因之一,因此需要对脱碳层深度进行测定。脱碳层深度按照 GB/T 224—2008《钢的脱碳层深度测定法》中规定的方法测定。

1. 产生原因

1) 钢材表面有脱碳层。毛坯锻造时在氧化气氛中加热,致使表面氧化脱碳。钢材球化退火常在箱式炉中进行,如无保护措施,由于加热时间较长,会使得钢材表面氧化脱碳严重。模具最终热处理时,也产生一定程度的氧化脱碳。

2) 模具在盐浴炉中加热时,盐浴老化或未能很好地进行脱氧处理,都会使模具表面氧化脱碳。这是因为盐浴用盐加入浴槽前含有结晶水,或由于长期在仓库中放置从空气中吸收了水分,加热化成熔盐后会发生化学反应。同时,盐浴表面与空气接触,空气中的氧溶入盐浴,也会与熔盐作用生成氧化物。

3) 模具的工夹具向盐浴中带进的铁锈会发生化学反应($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{FeO} + \text{O}_2 \uparrow$),释放的氧会使模具表面脱碳。

4) 有些盐浴用盐中含有少量杂质,如 Na_2CO_3 、 BaCO_3 及 Na_2SO_4 等,带入熔盐中发生化学反应,生成 BaO 、 Na_2O ,导致模具表面脱碳。

5) 加热温度过高,保温时间过长。

6) 淬火冷却介质中含有氧和杂质(如硫酸盐和硝酸盐等)。

2. 对策

1) 检查钢材表面脱碳层。模具毛坯锻造后要加工去除脱碳层。模具热处理用电炉加热时,要采用保护气氛(如氮气、甲醇裂解气氛、RX 气体等)或保护措施(如涂覆保护涂料、或将模具装入带有保护剂的箱中,装箱时要检查箱体和箱盖的密封性,不应漏气,铸铁屑要经 600°C 烘干),最好采用真空加热薄箔打包法。

2) 盐浴应充分脱氧,严格控制盐浴中的氧化物含量 [BaO (或 Na_2O) 含量应不大于 0.2% (质量分数), FeO 含量应不大于 0.3% (质量分数)],并定期清除炉渣,以免盐浴中氧化物增长过快。高温盐浴(BaCl_2)脱氧时需将炉温升至 $1\,290 \sim 1\,310^\circ\text{C}$,夏季和冬季应分别每隔 2~3h 和 4h 脱氧一次,再每 8h 捞渣一次。中温盐浴 [70% (质量分数) BaCl_2 + 30% (质量分数) NaCl] 脱氧温度为 900°C ,每天脱氧、捞渣各一次。

3) 所用工夹具用喷砂处理清除铁锈,并清洗干净后作干燥处理。

4) 盐浴加热时,用盐的质量必须符合标准的要求,并经 $300 \sim 500^\circ\text{C} \times 2 \sim 4\text{h}$ 的烘干脱水处理。

5) 严格执行工艺规范,防止在加热过程中超过工艺温度及保温时间。

6) 对淬火冷却介质中的杂质含量严格控制,并经常进行检测及去除。

7) 对已经脱碳的淬火模具采用复碳(即补碳)的方法加以补救。

实例 1 合理选用热锻模的防氧化脱碳涂料。重量为 $300 \sim 7\,000\text{kg}$ 的大型热锻

模，采用硼酸-硅胶保护涂料，在高温（860 ~ 900℃）加热时有良好的保护作用，并能够获得光洁的银灰色金属表面。

（1）涂料的组成 配方 1：90% ~ 95%（质量分数）工业硼酸 + 5% ~ 6%（质量分数）硅胶 + 羧甲基纤维素（酌量）+ 水，在搅拌下加热至沸腾，呈糨糊状后备用。配方 2：90% ~ 95%（质量分数）工业硼酸 + 酒精。

（2）涂覆工艺 涂覆前应清除干净模具表面的锈斑及污物，然后用毛板刷将配好的涂料涂覆于需保护的模具表面。采用配方 1 作为保护涂料时，需在涂料配制好后趁热将其刷涂在预热至 80 ~ 100℃ 的模具表面。采用配方 2 作为保护涂料时，刷涂需在常温下进行，对于涂覆不均匀的地方，可将粉状硼酸用手均匀地撒在模具表面，以使整个涂层均匀，厚度为 1mm 左右。零件经涂刷后即可装炉加热。对热处理后未脱落的涂层，应磨光或抛光，或在含有质量分数为 15% ~ 20% NaNO_2 的水溶液（温度 70 ~ 80℃）中浸泡 1 ~ 1.5h，用铁刷清除。

（3）涂料涂刷效果 涂料在 900℃ 以下时，无论停留多长时间，均能够起到良好的保护作用（见表 4-3）。加热温度超过 900℃ 后，由于硼酸生成的无机抗氧化性涂层被烧损，失去了氧化性气氛与模具表面间的隔绝作用，故而会使模具表面产生氧化。

表 4-3 模具涂料涂刷保护的效果

试样尺寸 /mm	加热温度 /℃	停留时间 /h	淬火冷却 介质	淬火后模具表面状态	硬度 HRC	氧化程度
φ20 × 60	860	6.00	油	涂层部分脱落，表面呈银灰色	60 ~ 61.8	无氧化
φ20 × 60	860	9.00	油	涂层部分脱落，表面呈银灰色	62.5 ~ 66	无氧化
φ60 × 60	860	12.00	油	涂层部分脱落，表面呈银灰色	61 ~ 66	无氧化
φ70 × 400	950	2.00	油	涂料烧损	—	有氧化皮
350 × 350 × 350	910	7.00	油	涂料烧损	44（520℃回火）	有氧化
1100 × 940 × 804	880	10.30	油	涂层部分脱落，表面呈银灰色	37（600℃回火）	无氧化

实例 2 模具的装箱保护加热法。耐热箱用不锈钢按图 4-1 所示的结构制成。首先在耐热箱（可用经过渗铝处理的不锈钢制作）底部放上防脱碳剂（如生铁屑或木炭），然后把模具装入其中，盖好不锈钢盖子，再连同箱子一起加热。箱中产生的 CO 可以防止模具氧化脱碳。装箱时应注意以下问题：

1) 生铁屑要预先在 600℃ 加热除去水分和粉尘。

2) 木炭要尽可能选用硬质木炭，并先将其破碎成豆粒大小，再筛除粉

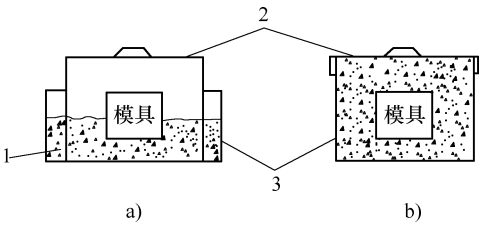


图 4-1 模具装箱法简图

1—生铁屑或木炭 2—不锈钢盖 3—不锈钢箱子

末。注意在使用前要晒干或烘干。

3) 对 9CrWMn 和 Cr12MoV 这类高碳工具钢, 可使用木炭或生铁屑。对于中碳工具钢, 为了防止渗碳, 只能使用生铁屑而不能使用木炭。

4) 模具的凹孔处最好用报纸包装封口, 以防止保护剂进入。

5) 箱内产生的 CO 很轻, 容易从箱盖细缝处逸出, 因此应采用图 4-1b 所示的结构形式, 并在模具四周放上 30mm 左右厚的生铁屑。

6) 油淬钢种 (如合金工具钢 CrWMn、9CrWMn) 模具从箱中取出淬火时要迅速, 空冷钢 (Cr12、3Cr2W8V、Cr12MoV、Cr6WV 等) 则以慢冷为好。合金工具钢制模具有时可以不加防护剂, 只需把箱子做成和模具一样大小, 再将模具装入箱子一起加热和冷却, 也可以得到满意的防氧化脱碳效果。

碳素工具钢、低合金工具钢和高合金工具钢模具采用装箱保护加热时, 其加热系数分别取 1.2 ~ 1.5min/mm、1.5 ~ 1.8min/mm 和 1.5 ~ 2min/mm。若采用图 4-1a 所示的结构装箱加热, 则加热系数以取下限为好。

4.2.4 过热或过烧产生原因与对策

碳素工具钢和合金工具钢的淬火过热组织是粗大马氏体。模具出现过热组织, 其力学性能将变差, 热处理时易产生变形和开裂, 使用时会过早损坏。高合金钢过热及残留奥氏体大量存在, 均会使淬火钢的硬度降低。模具在加热过程中发生过热或过烧情况, 将使其奥氏体晶粒及马氏体组织粗大, 脆性大增, 造成模具在工作时易产生崩刃、掉块、剥落等问题, 导致模具早期失效。

1. 产生原因

1) 原材料球化组织不良, 或碳化物偏析, 有网状碳化物。

2) 淬火加热温度过高或保温时间过长, 造成晶粒急剧长大。

3) 模具零件在热处理炉加热区内放置位置不当, 过分靠近加热元件而产生过热。

4) 对截面变化较大的模具, 由于淬火工艺参数选择不当, 使得在薄壁和尖角处产生过热。

5) 加热设备用控温仪表或热电偶失灵, 或热电偶位置放置不当, 不能反映真实温度。

6) 钢材混料, 如将碳素工具钢和低合金钢当成高合金钢使用。

另外, 结构钢锻造加热温度达到 1 350℃ 时, 易引起奥氏体晶粒粗大, 产生过热。若加热温度更高, 则会出现过烧现象。表 4-4 为钢的组织过热主要特征。

2. 对策

1) 改善原材料预备热处理的质量, 保证组织合格。

2) 正确制订淬火工艺, 严格控制淬火加热温度和加热时间。

3) 模具与加热体之间应保持足够的距离, 即模具与电极或炉底之间不应距离

过近。

4) 严格控制炉温和保温时间，降低加热速度，如采用阶梯式升温或预热方式。

表 4-4 钢的组织过热主要特征

序号	过热名称	主 要 特 征
1	晶粒粗大	奥氏体的晶粒度大于 3 级
2	马氏体粗大	板条或针状马氏体长度为 7~8 级
3	残留奥氏体过多	组织中碳含量和合金元素含量多的钢材，在淬火后的组织中残留奥氏体多
4	魏氏组织	亚共析钢的铁素体在奥氏体晶界及解理面析出，呈现细小的网状组织
5	网状碳化物	过共析钢在显微组织中出现网状沿晶分布碳化物
6	石墨化（黑脆）	高碳钢退火组织中有部分渗碳体转变为石墨，断口呈灰黑色
7	共晶组织	高速工具钢过热出现共晶莱氏体组织
8	萘状断口	断口有许多取向不同、比较光滑的小平面，像萘晶体一样闪闪发光
9	石状断口	在纤维状的断口上呈现不同取向、无金属光泽、灰白色的粒状断口
10	δ 铁素体过多	Cr13 型不锈钢在组织中有大量的 δ 铁素体

5) 定期检测和校正测温仪表，保证仪表的正常运行，如检查热电偶（精度）是否符合要求，放置位置是否正确。

6) 热处理前要先确定模具材料。简便方法是对材料进行火花鉴别。

模具过烧组织不可恢复，必须报废。对于已产生过热组织的模具，必须重新加热到奥氏体再结晶温度以上，然后以快速冷却的方式来细化晶粒。对出现石状断口的模具，则必须先通过高温锻造细化晶粒，再进行退火处理，然后重新加热淬火、回火后方能使用。

4.2.5 淬火组织粗大产生原因与对策

模具淬火后组织粗大，将会严重降低模具的力学性能，使用时易使模具产生脆性断裂，并严重影响模具的使用寿命。

1. 产生原因

1) 模具材料混淆，实际材料的淬火温度远低于要求材料的淬火温度，如把 GCr15 钢当成了 3Cr2W8V 钢。

2) 模具钢淬火前未进行正确的球化处理工艺，球化组织不良。

3) 模具淬火加热温度过高或保温时间过长。

4) 模具在加热炉中放置位置不当，过于靠近加热体（如电极），致使易产生

过热。

5) 对截面变化较大的模具, 由于淬火加热工艺参数选择不当, 致使在薄截面和尖角处产生过热等。

2. 对策

1) 钢材入库前应进行严格检验, 严防钢材混淆乱放。

2) 模具淬火前应进行正确的锻造和球化退火, 以确保获得良好的球化组织。

3) 正确制订模具淬火加热工艺规范, 严格控制淬火加热温度和保温时间。

4) 模具在炉中加热时应与加热体(电极)保持适当的距离。

5) 进行预热或阶梯式升温, 模具薄壁处表面用铁皮包裹, 以减少温差并防止过热。

6) 定期检测和校正测温仪表, 保证仪表正常工作等。

4.2.6 石墨碳产生原因与对策

高碳工具钢(如 T10、T12、T13)容易出现石墨碳(有石墨析出的钢的断口呈黑色)。石墨碳有时呈团状、点状, 有时呈片状。石墨四周贫碳, 常有铁素体相伴而生, 易于与杂质和表面凹坑区别。石墨碳的存在能使材料塑性、韧性大幅度下降, 并降低模具硬度和耐磨性等性能, 故称“黑脆”。在淬火加热时, 石墨不易回溶到奥氏体中, 模具淬火硬度因此偏低。同时, 石墨割裂了基体组织的连续性, 使模具在使用中易于脆裂或出现剥落现象。因此, 除非特殊需要, 模具中一般不允许有石墨存在。

1. 产生原因

1) 终锻或锻轧温度太高, 随后缓慢冷却, 又在 750 ~ 800℃ 长时间停留。

2) 在 700 ~ 720℃ 进行长时间退火, 或在 720 ~ 740℃ 时缓慢冷却至 600℃, 或多次球化退火(3 ~ 4 次), 导致钢的晶粒长大并出现石墨碳。图 4-2 所示为 T12 钢

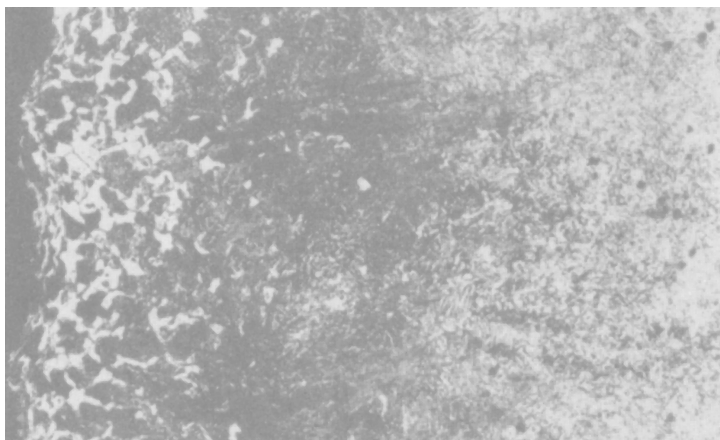


图 4-2 T12 钢退火后的表面组织 (×100)

退火后的表面组织。由该图可以看出,表层存在脱碳组织,外表层是白色网状铁素体+片状珠光体(黑色),次层是黑色片状珠光体层,内层是片状珠光体+球状珠光体的混合组织,从片状珠光体和球状珠光体混合区开始,到中心正常球化组织中,都有点状黑色石墨碳(这是因退火温度失控所致)。

3) 冷变形量过大或淬火成马氏体的钢在退火时更容易产生石墨碳。

4) 钢中促进石墨化的元素 Si 和 Al 的含量接近上限等。

2. 对策

1) 严格执行锻造工艺规范。

2) 认真执行退火工艺规范,防止加热温度过高、保温时间过长及冷却缓慢。

3) 对于预先冷变形或淬火成马氏体的模具,应选择较低的温度和保温时间进行退火。

4) 严格控制模具钢中 Si 及 Al 含量,尽量选用这两种元素下限含量的钢材。

采用高温正火处理可以消除石墨碳。若效果不良,可重新锻造或轧制(压缩比不小于 35%),然后快速冷却。

4.2.7 球化组织不良产生原因与对策

模具最终球化组织粗大不均、球化不完善,组织中有网状、带状和链状碳化物,将使模具在淬火后易产生裂纹,造成模具报废。

1. 产生原因

1) 模具钢材料原始组织中存在严重碳化物偏析。

2) 锻造工艺不良(如锻造加热温度过高、锻造变形量小、停锻温度高、锻后冷却速度缓慢等)使锻造组织粗大,并有网状、带状及链状碳化物存在,球化退火难以消除。

3) 球化退火工艺不良(如退火温度过高或过低,等温退火温度低或等温时间短等),造成球化退火组织不均或球化不良。

4) 碳素工具钢和合金工具钢退火温度过低、保温时间不足时,将产生点状碳化物和片状珠光体;若退火温度过高、保温时间过长,则产生大颗粒碳化物和粗片状珠光体。这些组织影响加工性能,甚至导致模具产生淬火裂纹。

5) 模具毛坯退火时装炉不当,加热不均匀,导致退火组织不良等。

2. 对策

1) 一般应根据模具的工作条件、生产批量及材料本身的强韧化性能,尽量选择品质好的模具材料,确保原材料组织合格。

2) 改进锻造工艺或采用正火预备热处理,消除模具原材料中网状、带状及链状碳化物的不均匀性。对无法进行锻造的、碳化物偏析严重的高碳模具钢可进行固溶细化热处理。

3) 为锻造后的模具毛坯制订正确的球化退火工艺规范。

4) 可采用调质处理代替球化退火, 以获得较好的金相组织和切削性能; 或采用双重热处理工艺、快速均匀球化退火工艺。

5) 合理装炉, 保证炉内模具毛坯的温度均匀等。

4.2.8 网状碳化物产生原因与对策

模具如果在热处理过程中出现网状碳化物, 将降低材料的塑性, 并使其脆性增大, 在模具工作时易产生脆性断裂, 严重降低模具的使用寿命。

1. 产生原因

过共析碳素工具钢和合金工具钢热处理淬火加热温度过高或退火温度超过 Ac_{cm} (过共析钢所有渗碳体完全溶入奥氏体的温度) 且冷却速度过慢时, 就会沿奥氏体晶界析出网状碳化物。

在大截面碳素工具钢制模具锻造时, 如果停锻温度较高, 在中心冷却最缓慢的地区, 最容易形成网状二次碳化物。此类模具毛坯如果不经正火就直接进行球化退火, 则粗大的碳化物网便不能被球化, 仍被保留下来, 并一直遗留到最终热处理后的组织中。图 4-3 所示是 T10 钢模具最终热处理后遗留的碳化物网 (图中金相组织为淬火回火组织, 二次碳化物 4 级, 魏氏组织 1 级)。

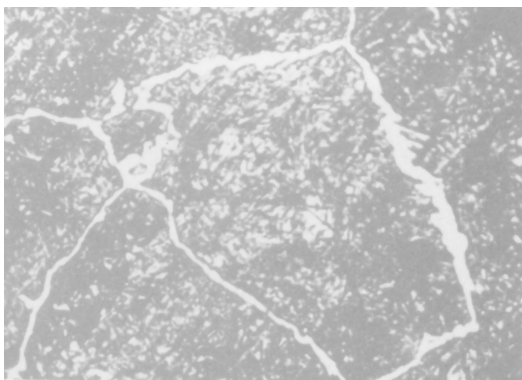


图 4-3 T10 钢中的网状碳化物 (×500)

此外, 球化退火时加热温度失控, 也可能形成二次碳化物网。由于碳化物网比较粗大, 晶粒内部碳含量偏低, 淬火加热后晶粒内基本没有剩余碳化物, 故淬火马氏体长得很长, 内应力特别大, 从而使模具脆性增大, 易于脆裂。

2. 对策

1) 在对碳素工具钢材料退火时, 应按 GB/T 1298—2008《碳素工具钢》检验网状碳化物。

2) 严格执行模具钢淬火加热工艺规范, 防止淬火加热温度过高。

3) 正确制订退火工艺, 防止退火加热温度过高及冷却速度过慢, 同时应注意合理装炉, 防止加热温度不均匀。

4.2.9 其他热处理组织不合格产生原因与对策

热处理后组织不合格是指通过宏观观察和显微分析发现组织不符合技术要求, 或存在明显的热处理组织缺陷。模具热处理过程中产生的不合格组织除了以上介绍的几种之外, 其他组织不合格产生原因及对策见表 4-5。

表 4-5 模具热处理其他组织不合格产生原因及对策

缺陷名称	产生原因	对 策
残留奥氏体 过多	1) 钢中 C、Mn、Ni、W、Mo、V 等元素含量增加, 降低了 M_s 点, 残留奥氏体量增加 2) 模具的淬火温度过高或保温时间过长, 使奥氏体中的碳与合金元素含量提高, 奥氏体稳定性增加, 造成残留奥氏体过多 3) 在 M_s 点以上温度停留时间过长, 冷却速度慢, 使奥氏体稳定化	1) 钢中合金元素含量应符合要求; 降低高碳钢的淬火加热温度 2) 正确制订模具的淬火加热工艺规范, 严格控制淬火加热温度和保温时间 3) 在满足尺寸要求的前提下, 尽可能加快淬火冷却速度 4) 对于模具进行深冷处理 (如 $-110 \sim -196^{\circ}\text{C}$), 并在 300°C 以上回火, 以降低残留奥氏体的数量
奥氏体晶粒 粗大	1) 淬火温度高或保温时间长, 造成奥氏体晶粒迅速长大 2) 钢的化学成分中含有难溶于奥氏体的细小氮化物或碳化物, 使晶粒的粗化温度升高 3) 管理不良, 模具材料混料 4) 模具未进行正确的球化退火处理, 球化组织不良 5) 模具在炉中位置放置不当, 靠近加热体 (如电极), 从而产生过热 6) 截面尺寸变化较大的模具淬火工艺参数选择不当, 在薄截面和尖角处产生过热	1) 严格执行正确的热处理工艺参数, 避免晶粒粗大 2) 采用含 Al、Ti、Zr、Nb 及 W 等合金元素的奥氏体晶粒粗化温度高的钢种 3) 模具材料入库前进行严格的检验, 以防混料 4) 进行正确的锻造和球化退火, 确保获得良好的球化组织 5) 模具加热时与加热体 (如电极) 保持适当距离, 定期检测和校正测温仪表, 保证温度的准确性 6) 采用阶梯升温或对截面悬殊部位表面包裹铁皮后再加热, 制订合理的加热工艺规范 7) 对产生奥氏体晶粒粗大的模具, 采用正火进行晶粒细化
铁素体晶粒 粗化	1) 在相变前奥氏体晶粒已经粗大 2) 在临界变形区变形后再结晶造成晶粒粗大	1) 严格执行热处理工艺规范, 避免奥氏体晶粒粗大 2) 在临界变形区外进行冷变形
过共析钢 网状碳化物	1) 锻造或热轧后冷却速度慢 2) 退火或淬火温度过高	1) 按工艺要求进行快速冷却 2) 严格控制退火及淬火温度 3) 重新进行锻造和正火处理
亚共析钢 魏氏组织	1) 淬火加热温度高, 造成奥氏体晶粒粗大 2) 冷却速度过快, 造成钢中游离渗碳体沿晶界析出, 伸向内部形成魏氏组织	1) 严格控制钢材的加热温度 2) 严格执行热处理冷却规范 3) 通过退火处理消除魏氏组织
过共析钢 石墨化	在 650°C 附近退火处理, 使部分渗碳体发生分解而石墨化	1) 严禁在 650°C 左右的温度区间内退火 2) 采用高温正火处理, 以消除石墨化

(续)

缺陷名称	产生原因	对 策
奥氏体 不锈钢 碳化物析出	完全固溶的奥氏体在 450 ~ 850℃ 下加热、焊接或在该温度下缓冷, 使 Cr ₂₃ C ₆ 类碳化物从晶界析出, 晶界区附近奥氏体中的 Cr 的固溶量减少	1) 进行快速冷却或钢中加入与碳结合牢固的合金元素 2) 降低钢中的碳含量, 使其在危险区域也不会析出碳化物 3) 使碳化物重新固溶处理
带状组织	1) 钢中合金元素的偏析引起带状组织的出现 2) 钢液凝固时产生树枝状偏析	1) 采用扩散退火处理消除偏析 2) 进行锻造处理并退火
碳化物 带状偏析	钢中存在严重的树枝状偏析, 沿轧制方向生成	1) 对于坯料进行反复锻锻, 以消除偏析 2) 采用十字锻造方法

4.2.10 表面腐蚀产生原因与对策

模具在用盐浴加热时, 由于受到盐浴中氧化物的腐蚀, 模具的表面质量会变差。模具在空气中加热和在硝酸盐中冷却时, 模具表面也会受到氧化、脱碳及腐蚀作用。这些缺陷如果不能及时清除, 将严重影响模具表面的硬度和使用性能, 并且明显降低模具的使用寿命。

1. 产生原因

- 1) 在箱式炉或井式炉中加热时, 模具表面保护不良。
- 2) 盐浴炉中碳酸盐或硫酸盐的含量过高。
- 3) 盐浴炉中的熔盐脱氧不良或模具表面有氧化、脱碳现象。
- 4) 模具和夹具将氧化物带进盐浴炉。
- 5) 用硝酸盐冷却时, 硝酸盐中氯离子过多或硝酸盐使用温度过高, 使模具产生电化学腐蚀。
- 6) 模具淬火及回火后未及时清洗, 其表面黏附的氯盐或硝酸盐将其腐蚀。
- 7) 模具淬火时在空气中预冷时间过长。

2. 对策

- 1) 优先采用真空加热方法, 如果在箱式炉或井式炉中加热, 应采用保护气氛或保护措施。
- 2) 应严格控制盐浴中碳酸盐的含量, 不用黄血盐作高温盐浴脱氧剂, 添加活性炭去除硫酸盐。
- 3) 对盐浴应严格进行脱氧与捞渣, 以防止模具氧化脱碳。
- 4) 模具和夹具在盐浴加热前应清理表面, 避免向盐浴中带入氧化物。
- 5) 如果用硝酸盐分级冷却, 应定期检查硝酸盐成分, 硝酸盐使用温度应低于 500℃。

- 6) 模具淬火、回火后应及时清除模具表面残盐。
- 7) 尽量不采用空冷淬火方式。

4.2.11 蔡状断口产生原因与对策

高速工具钢（属于高合金莱氏体钢）在铸锭凝固时，由于冷却速度较快，合金元素来不及扩散，所以在结晶和固态相变过程中的转变不能完全进行。通常高速工具钢的铸态组织由鱼骨状莱氏体、黑色组织（ δ 共析体等）和白亮组织（马氏体 + 残留奥氏体）组成。如果在锻造时终锻温度太高，就会使高速工具钢晶粒粗大，形成蔡状断口。蔡状断口能降低模具韧性及使用寿命。

1. 产生原因

- 1) 高速工具钢锻造的终锻温度过高（ $>1\,000^{\circ}\text{C}$ ），且锻造变形量也不足。
- 2) 热塑性变形或退火不充分。
- 3) 两次淬火之间未经中间退火处理。
- 4) 高合金钢锻件重新锻造时未经中间退火处理。

2. 对策

1) 铸态高速工具钢必须经反复锻造（需控制锻造的终锻温度，并使终锻变形程度不小于10%）和多次镦拔，才能将组织中粗大的共晶碳化物击碎，使其转变成均匀分布的颗粒状碳化物。锻造后的高速工具钢应进行去应力退火，以获得由索氏体和碳化物组成的组织。

- 2) 热塑性变形及两次淬火之间应进行充分退火。
- 3) 高合金钢锻件重新锻造前应进行退火处理。

4.2.12 脆性大产生原因与对策

模具热处理后如果脆性大，就会降低模具材料的韧性，在使用时易造成模具崩刃或脆断失效。

1. 产生原因

1) 钢中非金属夹杂物超标，如氧化物、硫化物、碳化物和点状不变形硅酸盐等含量过高。

- 2) 碳化物分布不均匀，如呈网状、带状、聚集、堆集等状态分布。
- 3) 原始组织粗大。
- 4) 淬火加热温度过高，时间过长，导致奥氏体晶粒粗大。
- 5) 回火温度偏低或回火时间不足。
- 6) 回火温度处于脆性区。

7) 过度渗碳。淬火加热温度超过 850°C 的中、高合金模具钢，如果在碳势高的保护介质中加热，则会因过度渗碳而脆性增大、韧性降低，致使模具在使用时出现崩刃或脆断失效的现象。例如，Cr6WV 钢制的小冲头，装入旧渗碳剂箱淬火

加热，回火后出现异常脆性（落地或轻敲即可断裂），经金相分析，发现其组织并不粗大，但表面碳化物密度超过心部，表面有渗碳层存在。

2. 对策

- 1) 严格控制模具钢质量。
- 2) 对模具钢进行预备热处理（如退火、正火）以改善组织。
- 3) 严格执行热处理工艺，保证淬火加热温度及保温时间。
- 4) 选定合适的回火温度，并保证足够的回火时间。
- 5) 避免在回火脆性温度区回火。
- 6) 适当降低碳势，避免过度渗碳，如上述 Cr6WV 钢制小冲头重新制作一批后，以木炭保护淬火加热，韧性良好。

4.2.13 模具热处理后力学性能不合格产生原因与对策

为了便于分析和掌握正确的解决问题的思路和方法，现将常见的模具零件热处理后力学性能不合格的原因分析及对策列于表 4-6 中，以供模具缺陷分析时参考。

表 4-6 常见的模具零件热处理后力学性能不合格的原因分析及对策

缺陷类型和名称	产生原因	对 策	补救措施
一般热处理后硬度不合格	表面软点		进行退火、正火或高温回火处理后重新淬火处理。但对有组织缺陷的模具零件，则应进行必要的预备热处理
	加热不均匀（加热温度低、保温时间不足）	保证均匀加热（加热温度适当、保温时间充分）	
	淬火冷却介质中杂质过多或老化，造成淬火冷却速度不均匀或冷却能力不够	去除杂质或更换新的淬火冷却介质	
	模具零件表面局部有脱碳层、锈斑或氧化皮，造成加热时局部脱碳	去除模具零件表面脱碳层、锈斑或氧化皮	
	冷却方式不正确或淬火冷却介质选择不当	合理选择冷却方式和淬火冷却介质	
	原材料显微组织不均匀（如碳化物偏析严重、分布不均匀）或淬透性差	控制模具原材料质量，保证合格	
	碱浴中水分过多或过少	按工艺要求，合理控制碱浴中的水分	
	模具尺寸较大，淬入淬火冷却介质中未作平稳的上下或左右的移动，降低了部分区域的冷却速度	大型模具在淬火过程中要进行合理地移动，以保证冷却均匀与充分	

(续)

缺陷类型和名称		产生原因	对 策	补救措施
一般热处理后硬度不合格	硬度不足或不均匀	加热温度过低或保温时间不足，模具材料相变不完全	严格执行模具热处理工艺	退火、正火或高温回火后重新淬火处理
		淬火冷却速度不够，分级等温温度过高或时间过长，淬火冷却介质选择不当，或淬火冷却介质中杂质含量过多，双液淬火时水冷时间太短，碱浴水分过少等	执行正确的淬火工艺规范，正确地选择淬火冷却方式（方法）及淬火冷却介质	
		模具表面脱碳或淬火时产生脱碳层	加工去掉表面脱碳层，模具加热时进行保护以防脱碳	
		钢材的淬透性低	更换模具材料，大型模具选用淬透性高的钢材	
		模具原始组织中碳化物偏析严重，锻造后退火处理时球化组织不良	控制原材料质量，锻造后退火处理时保证组织合格	
		淬火温度过高，残留奥氏体过多	合理控制淬火温度，减少残留奥氏体数量	
		回火不充分或回火温度过高等	保证回火质量，适当降低回火温度	
感应淬火不合格	软点和硬度不足	模具原材料选择不当或原始组织不良	使用符合要求的模具材料	
		电参数、感应器和冷却装置不当	调整和选用合理的工艺参数、感应器和冷却装置	
		喷射角度不当，喷射孔的大小、数量和位置不合理	调整喷射角度，合理选择喷射孔的大小、数量和位置	
		喷射孔有堵塞情况	清理喷射孔，保证喷射孔畅通	
	硬化层过浅或过深	感应加热频率选择不当	合理选择感应加热频率	
		加热功率的选择不合适	合理选择加热功率	
		感应器与模具零件的间隙过小	改进感应器的结构，调整间隙	
		感应加热时间短	合理选择感应加热时间	
	硬化层不均匀	连续加热时，感应器与模具零件不同心	调整感应器与模具零件之间的间隙，调整定位装置，防止模具零件偏心	
		感应器的喷水孔分布不均匀	确保感应器的喷水孔均匀分布	
		淬火机床不同心	调整淬火机床的上、下顶尖，使其中心对正	

(续)

缺陷类型和名称		产生原因	对 策	补救措施
渗碳不合格	硬度不足和软点	渗碳不足	加强渗碳过程的控制，各工艺参数要符合要求	
		淬火时脱碳	缩短模具淬火转移时间	
		淬火温度低	适当提高淬火温度，缩短模具淬火转移时间	
		冷却速度低或冷却不均匀	严格执行淬火冷却工艺	
		表面残留奥氏体过多	控制残留奥氏体数量	
		模具零件表面不清洁	模具零件的表面应清洁，无积炭等污物	
		渗碳不均匀	合理装夹，保证渗碳气氛流动均匀	
	渗碳淬火硬化层过厚或过薄	渗碳温度过高或过低，时间过长或过短	严格执行渗碳工艺	
		碳势过高或过低	对渗碳剂流量进行严格控制，加强炉前的渗层检查	
		装炉量过少或过多	合理控制装炉量	
	渗碳淬火硬化层不均匀	模具零件表面不清洁，有锈迹和油污等	模具零件的清洗要干净彻底	
		装炉量不合理，模具零件间间隙过小，炉内气体流动不畅	选用合适的夹具和装炉方式，确保气体流动畅通	
		炉内风扇转动不良，气氛不均匀	对风扇进行维修，保证其正常转动	
		炉内温度不均匀	调整加热区域的功率并加强搅拌，保证炉内温差 $\leq \pm 10^{\circ}\text{C}$	
		零件表面有炭黑、滴注介质结焦物等阻碍渗碳	定期清理炉内积炭、结焦物等	
拉伸性能不合格	淬火不充分		严格执行热处理工艺，实现完全淬火，获得要求的组织和硬度	
	淬硬层深度不足		加强过程控制，确保淬硬层合格	
	模具表面存在脱碳现象		在保护性气氛中加热，或进行复碳处理，也可将脱碳层车削或磨削掉	

(续)				
缺陷类型和名称		产生原因	对 策	补救措施
耐腐蚀性不良		回火温度不当，碳化物沿晶界析出，局部贫铬	严格控制回火温度，避免贫铬情况的发生	
		退火温度不当，再结晶不完全或晶粒显著粗化，冷却过程中出现晶界沉淀	选择合理的退火温度	
		固溶处理温度低，铬碳化物溶解不足	提高固溶处理的温度，以确保铬碳化物的充分溶解	
		固溶处理温度高，铬碳化物沿晶界析出	适当降低固溶处理的温度，避免碳化钛、碳化铌等碳化物的溶解	
持久蠕变性能不合格		固溶处理温度偏低和时效工艺参数不当	提高固溶温度和选择合格的时效工艺参数	
铝合金力学性能不合格	淬火后强度和塑性不合格	固溶温度偏低或保温时间不足，淬火转移时间过长，出现过烧现象	调整固溶处理的温度和时间，严格执行淬火时间的要求，重新进行处理；检查仪表情况，避免产生过烧	
	时效后强度和塑性不合格	时效温度偏低或保温时间不足造成欠时效；时效温度偏高或保温时间过长造成软化	严格执行时效处理工艺，或重新进行处理	
	退火后塑性偏低	退火温度偏低、保温时间不足或冷却速度过快	调整工艺参数，或重新进行退火	
	模具各部分性能不均匀	模具的截面差过大，透烧时间不足，影响固溶效果	均匀加热，延长保温时间，或重新热处理	
	性能未达到技术要求	合金成分偏差大，炉温不均匀，工装夹具等挂装零件不正确	严格执行工艺规范和控制炉温，正确挂装，或重新热处理	
铜合金力学性能不合格	拉伸时出现晶界脆断	含氧纯铜在还原性气氛中加热，氧还原氧化亚铜	在中性或弱氧化性气氛中加热	
	硬度不均匀	装料多、温度不均匀	控制装炉量和温度	
	淬火不足，硬度高、塑性低	固溶温度低或保温时间短；淬火转移时间长，淬火冷却介质温度高	调整热处理工艺参数；缩短淬火转移时间，使用循环水	

(续)

缺陷类型和名称		产生原因	对 策	补救措施
铜合金力学性能不合格	过热和过烧, 脆性大	固溶温度过高, 仪表失灵	调整工艺参数, 更换仪表	
镁合金力学性能不合格	性能不均匀	炉温不均匀, 冷却不均匀, 截面厚薄不均匀, 保温时间短, 晶粒粗大	改进热处理设备, 提高炉温的均匀性, 延长保温时间	
	性能达不到技术要求	固溶温度偏低, 加热时间不足, 冷却速度不足	调整工艺参数, 或重新进行热处理	

4.2.14 模具热处理常见缺陷分析与对策的典型实例

实例 1 电机硅钢片冲孔冲裁模 (见图 4-4) 由四个拼块组成, 材料为 Cr12MoV 钢, 要求淬火与回火处理。

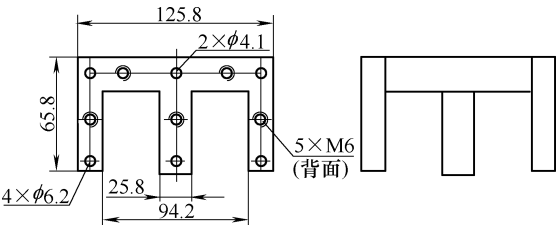


图 4-4 硅钢片冲孔冲裁模简图

- (1) 模具加工工艺路线 下料→锻造→球化退火 (加热 850 ~ 870℃ × 3 ~ 4h, 炉冷至 720 ~ 750℃ 后保温 6 ~ 8h, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷) →切削加工 (线切割、电火花加工) →淬火 (预热 400℃ × 1h, 盐浴炉加热 1 030 ~ 1 040℃ × 10 ~ 15min, 转入硝盐炉分级淬火 260℃ × 1.5 ~ 2min, 空冷) →回火 (170℃ × 1.5h, 2 次) →精加工→装配。
- (2) 硅钢片冲孔冲裁模的热处理缺陷与对策 表 4-7 为硅钢片冲孔冲裁模的热处理缺陷与对策。

表 4-7 硅钢片冲孔冲裁模的热处理缺陷与对策

缺陷名称	产生原因	对 策
硬度不足 (锻粗)	与碳化物的不均匀性有关, 如碳化物偏析和聚集	减轻碳化物的不均匀性, 这也是提高模具使用寿命的途径之一
	一般局部碳化物分布比较集中, 此处晶粒粗大	进行正火处理可以消除网状碳化物

(续)		
缺陷名称	产生原因	对 策
硬度不足 (锻粗)	热处理工艺不规范，表面有残留脱碳层，形成过多的残留奥氏体，回火不充分，加热不足或冷却时间不足	严格执行有关的热处理工艺要求，正确制订工艺参数等，避免造成加热或冷却缺陷
	回火温度过高，使回火马氏体发生分解聚集	严格执行正确的回火工艺规范
过热或 过烧	球化组织不良	正确执行退火工艺规范
	淬火温度过高或保温时间过长	严格控制淬火加热温度和时间
	模具放置位置不当，靠近电极或加热体	合理装炉，在有效加热区内保证炉内温度一致
裂纹	模具结构存在尖角或应力集中部位	改进模具设计，将尖角倒钝，避免形成应力集中
	原材料存在裂纹、折叠或严重的网状、带状碳化物等	对原材料进行无损检测，或经合理锻造处理，消除网状、带状碳化物等
	热处理操作不当（加热或冷却过快，淬火冷却介质选择不当，冷却温度过低等），淬火后未及时回火或回火不充分，未经退火就进行二次加热淬火	执行正确的热处理工艺
	磨削不当，形成模具表面的淬火，导致应力的叠加	减少磨削进给量，并进行充分的冷却
	模具中存在较大的机加工应力未予以消除	机加工后进行去应力退火；淬火前采取预热或预冷的措施
脆性大而 折断	淬火温度过高，或保温时间过长，形成粗大马氏体组织	严格执行热处理工艺，进行金相组织检查
	未执行回火工艺规范，导致回火不充分，造成韧性降低	严格执行回火工艺规范，进行充分的回火
刃口磨损	加工出的模具形状、尺寸不合格	改进模具设计，确保要求的尺寸和精度
	硬度不足，加热温度低	采用中温或高温回火，并确保硬度在 60HRC 以上，以提高模具的耐磨性
	钢中碳化物的均匀性差	对模具毛坯进行锻打和球化退火处理，使其成分均匀化
开裂脆断 或刃口局部剥落	硬度高或回火不充分造成模具脆性大	严格执行正确的热处理工艺规范，并进行检查
	碳化物的均匀性差，分布比较集中	通过锻打处理击碎碳化物，并进行退火处理

实例 2 搓丝板，材料为 9SiCr、CrWMn、Cr12MoV、W9Mo3Cr4V 钢，热处理

技术要求：齿根以下 3~5mm 内的硬度为 58~61HRC，淬火马氏体<3 级，齿面无脱碳。

(1) 搓丝板加工工艺路线 下料→锻造成形→球化退火→机加工→去除应力退火→搓螺纹→热处理（预热、加热、回火或冷处理）→磨削加工→检验。

(2) 搓丝板的常见热处理缺陷分析与对策（见表 4-8）

表 4-8 搓丝板的常见热处理缺陷分析与对策

缺陷名称	原因分析	对 策
螺纹部分 氧化脱碳	加热炉中的 O ₂ 、CO ₂ 、H ₂ O 等与钢中的 Fe、C 反应	预热及加热均应在保护气氛的电阻炉、真空炉或脱氧彻底的盐浴炉中进行
	添加的盐未进行烘干处理，或盐的杂质含量超标	添加的盐的纯度应符合要求，经过脱水和烘干处理
	淬火夹具表面有氧化皮或锈蚀严重	淬火夹具应进行酸洗或喷砂处理，以避免将氧化皮、盐渣等带入盐浴中
晶粒粗大	淬火加热温度过高或保温时间过长	严格执行热处理工艺
	测温仪表不准或失灵	定期进行仪表、热电偶的检测和校验，确保准确测温
	预备热处理不当，原始组织未得到细化	按要求进行球化效果的检验
表面腐蚀	Cr12 型钢中共晶碳化物偏析严重	严格执行锻造工艺，并进行质量检验
	未对盐浴进行彻底的脱氧处理，氧化钼、硫酸盐、碳酸盐超标	热处理前对盐浴进行彻底的脱氧处理，保证盐浴中的氧化物和杂质的含量在要求的范围内
	淬火后未清洗干净搓丝板表面的残盐，回火过程中加重了盐浴的侵蚀	回火前清洗干净搓丝板表面的残盐
淬火软点	退火时产生的脱碳层未完全去除	去除脱碳层后再进行热处理
	加热时造成氧化脱碳	搓丝板加热前对盐浴炉进行彻底脱氧处理
硬度超差	淬火温度过高或过低	执行正确的淬火加热工艺
	回火温度低或高	严格执行回火工艺规范，保证搓丝板回火后的硬度
螺纹面内 凹变形	淬火冷却速度过快	采用专用夹具进行防护，以防淬火冷却速度过快
	Cr12 型钢中共晶碳化物未被完全击碎，造成性能和变形有明显的方向性	正确锻造并进行严格的检验
	滚压成形时，表面存在较大的内应力，受力与金属流动各部位不一致，造成齿形面与底平面发生变形	进行充分的预热，消除加工应力。对已变形的搓丝板背部加热后（热点校），先在 180℃ 炉中保温 30~60min，然后在 180~200℃ 硝盐浴中进行 12h 的回火处理，以消除校直应力

(续)

缺陷名称	原因分析	对 策
外凸变形	淬火加热和冷却时未采用背靠背的淬火夹具	使用专用夹具
	螺纹牙顶部冷却过快, 造成螺纹部分凸起	检查变形后, 将淬火后的搓丝板螺纹部分向上放在螺纹压力机上, 加压校直, 保持到室温

4.3 模具热处理变形原因分析及对策

除了硬度、耐磨性和韧性等性能, 模具的尺寸精度也是非常重要的。如果模具经机械加工后精度很高, 但淬火或回火后发生了严重的变形或尺寸变化, 必然会增加后期精加工的工作量, 甚至造成工件因尺寸超差而报废, 导致生产成本的提高。引起模具变形的主要原因有以下几种: 模具的形状、模具钢种及原材料质量、热处理条件、机械加工的残余应力、淬火工艺等。

工件的热处理变形是热处理常见的主要缺陷之一。目前, 随着对产品精度要求的提高, 对模具的热处理变形要求也越来越严格。减少模具热处理的变形和尺寸变化, 不仅可以避免废品的产生, 而且还可以减少或者省去热处理后的精加工。这也是降低成本、缩短模具生产周期的主要途径。

由于模具在热处理过程中需要加热和冷却, 除了因热胀冷缩导致材料变形外, 组织转变引起的体积变化也会导致模具变形, 因此模具在热处理过程中的变形是不可避免的。对于模具热处理过程产生的变形, 如果掌握了其变形规律, 就可采取相应措施来减小其变形程度, 或者是预先留出变形量, 使得最终尺寸精度不受影响。

(1) 热处理变形的类型 工件在热处理过程中发生的体积和形状的变化 (包括扭曲), 统称为热处理变形。模具常见的变形形式有畸变、翘曲及尺寸胀缩。

畸变是指工件的轮廓线发生弯曲, 或平面位置发生了变化; 翘曲是指工件的轴向发生弯曲、扭曲, 或各部分相对位置发生了变化; 尺寸胀缩是指模具型腔及孔间距的尺寸发生了变化。

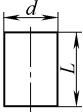
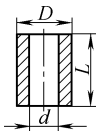
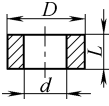
(2) 模具变形趋向 由热应力、组织应力和体积效应引起的典型钢件变形趋向见表 4-9。模具壁厚均匀性、形状对称性、结构刚性等对淬火变形有显著的影响。

1) 热应力造成的变形趋向是使工件的体积在最大尺寸方向收缩, 最小尺寸方向胀大, 内孔一般缩小。或者说, 热应力犹如在一个真空容器中施加的内压力, 其造成的变形趋向是使工件表面趋于球形或鼓形。

2) 组织应力造成的变形趋向是使工件在最大尺寸方向伸长、最小尺寸方向收缩, 内孔一般胀大。或者说, 组织应力犹如在一个真空容器中施加的外压力, 其造成的变形趋向是使工件表面趋于凹形, 尖角变突出。

3) 体积效应造成的变形趋向是使工件的体积在各方向作均匀地膨胀或缩小。对于圆（方）孔体工件（尤其是壁厚度比较薄的）来说，变形趋向是当工件体积增大（或缩小）时，高度、外径（外廓）和内径（内腔）的尺寸都均匀同时增大（或缩小）。

表 4-9 由热应力、组织应力和体积效应引起的变形趋向

零件类型	轴类	扁平体	立方体	套类	圆环类
原始状态					
热应力作用 变形或尺寸 变化	$d+, L-$ 	$d-, L+$ 	趋向球状 	$D+, d-, L-$ 	$D+, d-$ 
组织应力作用 变形或尺寸 变化	$d-, L+$ 	$d+, L-$ 	平面内凹 	$D-, d+, L+$ 	$D-, d+$ 
体积效应作用 尺寸变化	$d+, L+$ 或 $d-, L-$	$d+, L+$ 或 $d-, L-$	$a+, c+$ 或 $a-, c-$	$D-, d+, L-$ 或 $D+, d-, L+$	$D-, d+$ 或 $D+, d-$

注：1. 当圆（方）孔体的内径 d 很小时，则变形规律如轴类或正方体类；当扁圆（方）孔体的内径 d 很小时，则其变形规律如扁平体。
2. “-”表示收缩趋势，“+”表示胀大趋势。

(3) 变形原因 热处理过程中，体积变化是由金属的热胀冷缩以及相变时比体积变化引起的；形状变化主要是由于应力超过了材料的弹性极限（高温下材料的弹性极限较低），产生塑性变形引起的。

在模具实际热处理过程中，引起其变形的因素主要有变形应力、碳化物偏析、脱碳、淬火温度、模具形状、清洗过早、回火不及时和返修处理不良等。模具变形不但影响制件精度，还影响模具的使用寿命，对此应采取相应措施加以预防。

4.3.1 模具热处理变形影响因素

模具热处理过程中产生的尺寸变化和形状变形主要由热应力和组织应力引起，这两种应力受多种因素的影响，如钢的碳含量、模具的尺寸形状、钢的基本特性及热处理工艺等。表 4-10 和表 4-11 分别为模具钢基本特性对热处理变形倾向的影响和工艺因素。对冷作模具型腔变形倾向的影响。

表 4-10 模具钢基本特性对热处理变形倾向的影响

钢的特性	特性的变化	对模具变形倾向的影响
Ms 点	高	马氏体转变量多，组织应力占主导，使型腔趋于胀大
	低	残留奥氏体多，热应力占主导，型腔趋于缩小
淬透性	高	可采用缓和的淬火冷却介质，有利于减少翘曲和变形
	低	需用强烈的淬火冷却介质，变形大且难控制
碳化物均匀性	优	各向变形均匀，可减少翘曲程度
	劣	通常变形大，加重翘曲及各向胀缩
各组成相成分的影响	马氏体量增多	增加体积膨胀量，增大组织应力，不利于减小变形
	残留奥氏体增多	能够补偿马氏体的体积膨胀，有利于减小变形或实现微变形
	贝氏体量增多	有利于减小变形
	碳化物量增多	对体积变化无影响
回火转变	残留奥氏体分解成马氏体	使体积膨胀
塑性变形抗力	强韧性高	有利于减小热应力引起的变形
	马氏体转变区强度高	有利于减小组织应力引起的变形
锻造纤维方向	垂直于型孔	型孔趋于缩小
	平行于型孔	型孔趋于胀大

表 4-11 工艺因素对冷作模具型腔变形倾向的影响

工艺因素		中碳钢 (45、50)	高碳工具钢 (T10A)	低合金工具钢 (CrWMn、9Mn2V)	高合金工具钢 (Cr12、Cr12MoV)
常规淬火		显著趋胀	显著趋胀	趋胀为主	趋缩
淬火温度		上限时多胀	上限时剧缩	上限时多胀	上限时剧缩
		下限时少胀	下限时少缩	下限时少胀	下限时少缩
淬火冷却介质	盐水	胀	缩	—	—
	油	缩	缩	①	①
	碱浴	胀	②	胀	—
	硝盐	胀	胀	②	②
深冷处理		—	—	趋胀	明显趋胀
回火影响		收缩	显著收缩	200 ~ 300℃ 回火区趋胀，其他区回火趋缩	<450℃ 趋缩， 500 ~ 550℃ 趋胀
金属流线的影响		—	—	—	纵向趋胀，横向趋缩
模具形状		厚壁少缩	薄壁趋胀，厚壁趋缩	薄壁趋胀，厚壁趋缩	薄壁趋胀，厚壁趋缩

- ① 合金工具钢用热油作淬火冷却介质时，会增大模具型孔胀大的趋向；用冷油作淬火冷却介质时，则型孔呈收缩的趋向。
- ② 碳素工具钢、合金工具钢淬入碱浴或硝盐时，碱浴或硝盐中水分多、碱浴或硝盐的使用温度低、在碱浴或硝盐中停留时间短，都易使型孔趋向于胀大。

在热处理过程中，造成模具零件变形的因素是很多的。例如，模具的毛坯如果锻造，就会有锻造应力产生；模具锻坯在退火时，如果操作不当（如装炉量过多，炉温不均匀），就会使锻造应力得不到完全的消除；热处理之前的切削加工，也会使模具产生加工应力；模具在热处理时，在加热及冷却过程中所产生的热应力和组织应力等，都是造成热处理变形的因素。模具的尺寸变化是由材料组织变化所造成的，引起模具变形和尺寸变化的因素很多，如模具钢基本特性（如 M_s 点、淬透性、碳化物均匀性等）及工艺因素（模具形状、淬火温度、淬火冷却介质、钢的纤维方向等）等。影响模具变形的因素主要有以下几点：

(1) 钢的淬透性对模具变形的影响 碳素工具钢淬透性低，淬火变形大；合金工具钢淬透性高，淬火变形小。

(2) 钢的碳含量对模具变形的影响 钢中的碳含量无论对淬火时的翘曲变形还是体积变形的影响均很大。钢件热处理时所形成的各种组织和钢的塑性变形抗力虽然与热处理操作过程有关，但最主要的是取决于钢的化学成分。对于一般钢材来说，碳含量起着较重要的作用。一般来说，碳素工具钢碳含量高的比碳含量低的变形倾向大，如 T12A 钢比 T10A 钢变形倾向大。

(3) 钢中合金元素对模具变形的影响 合金元素的影响是通过对钢的淬透性、临界淬火速度和 M_s 点的影响来起作用的。例如，Mn、Cr、Ni、Si、B 等元素含量增加，可使临界淬火速度降低，淬透性增加，变形趋向于膨胀； M_s 点低时，变形趋向于缩小。合金元素对 M_s 点的影响最为突出。凡能够降低 M_s 点并增加淬火后残留奥氏体数量的合金元素，均能够减小组织应力所引起的变形。相反，由于碳素钢的 M_s 点高于合金钢的 M_s 点，碳素钢淬火冷却时在较高的温度下就开始马氏体转变，又因为在较高的温度下钢具有较好的塑性而易于变形，故带有内孔（或型腔）的碳素钢模具，其内孔（或型腔）的胀大趋势大。

(4) 截面尺寸对模具变形的影响 模具零件截面尺寸对热处理变形的影响很大，特别是高碳工具钢和碳素结构钢在淬透性较差的情况下影响尤为突出。

(5) 冷却速度对模具变形的影响 冷却条件是淬火工艺的重要组成部分。淬火冷却介质的性能与热处理变形关系极大，即冷却性能越强，变形量越大，如盐水淬火变形量比清水大，水冷比油冷变形大，冷油淬火比热油淬火变形大。

淬火冷却速度越快，则模具内外（或厚薄不同处）温差越大，由此产生的应力也就越大，因此快速冷却必然导致变形增大。另外，快速冷却易产生冷却不均现象，冷却不均均是淬火模具发生翘曲变形的一个主要原因。

(6) 淬火温度对模具变形的影响 淬火温度是淬火过程中的重要工艺参数。通常情况下，提高淬火加热温度，其变形量加大。淬火加热温度高，钢件的塑性及热应力相应增大，淬火后的变形及开裂的倾向也相应增大。因此，对于结构复杂而又容易变形的模具，淬火温度宜选用下限。

(7) 回火对模具变形的影响 通常情况下，模具在淬火后会产生胀大变形，

而在回火后又有缩小变形的倾向，这主要是由于回火使马氏体转变成托氏体、索氏体，比体积减小，从而导致体积减小，缩小了变形。对于多数常用的碳素钢、低合金钢来说，回火后的变形量总的趋势是缩小，但其缩小量比淬火时胀大量要小得多，一般还不到胀大量的 15%，因此不可能恢复到原来的尺寸。模具尺寸大的、淬火后胀大变形多的，回火后的缩小量也比较多些。另外，回火温度高的，比回火温度低的缩小量要多一些。

(8) 残余应力对模具变形的影响 模具在机械加工时，由于被加工部位附近的金属受到挤压，会产生较大的机械加工应力。如果不对其进行去应力退火，则在后续热处理的加热过程中应力将得到释放，并伴随有变形的产生。残余应力的诱发将使模具淬火后的变形量增加。

(9) 钢的原始组织对模具变形的影响 模具淬火前的原始组织状况（如球化组织是否均匀一致，是否有偏析和网状组织存在）对淬火后的变形，特别是对细长模具的弯曲变形影响很大。高碳合金工具钢（如 9Mn2V、CrWMn 及 GCr15 钢等）淬火前的球化组织等级，对淬火后的热校直工艺影响很大，这些钢如果预先进行球化退火处理，达到 2.5 ~ 5 级球化组织，则在淬火后冷却到 200 ~ 260℃ 时，很容易进行热校直，且稳定性较好。

模具毛坯在淬火前如果经过调质处理，则淬火后变形的最突出特点就是变形的规律性强，而且绝对变形量会有所减小。其原因主要是毛坯经过淬火和高温回火后，其组织的不均匀性已经在奥氏体化的过程中基本得到改善，并且使得因锻造过热而造成的粗大晶粒得到细化。因此，模具毛坯淬火前进行调质处理对控制变形是有利的。

预备热处理后的组织对淬火变形趋势也有很大的影响。表 4-12 列出了不同组织的 T10A 试样的淬火变形倾向。表 4-12 中所用试样如图 4-5 所示。

表 4-12 不同组织的 T10A 试样的淬火变形倾向

预备热处理组织	缺口处淬火变形量/mm
调质细球化体	-0.02
退火不完全球化体	-0.06
残存碳化物网	-0.10
片状珠光体	-0.12

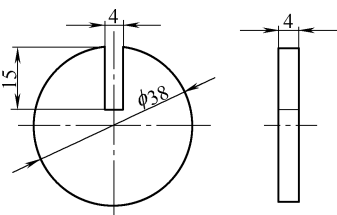


图 4-5 表 4-12 中所用试样

(10) 钢的纤维方向对模具变形的影响 模具钢的纤维流线方向对变形有显著影响，平行于纤维流线方向的变形要大于垂直方向的变形。例如，空淬微变形钢 Cr12MoV，淬火变形小，但当毛坯中的纤维流线分布不当时，则呈现强烈的方向性变形。

炼钢时，锻轧和压延工序会造成钢的纤维存在方向性。淬火对工件尺寸变化影响较大。例如，65mm（压延方向）× 60mm（垂直方向）× 18mm（厚度）的

Cr12MoV 钢试样，在试样的压延方向尺寸变化量较小，而在垂直于压延方向上，随着奥氏体化温度的升高，尺寸变化呈急速收缩现象，而且淬火和回火的尺寸变化倾向相同。为此，在设计制造模具时，不仅要考虑热处理条件，而且还要充分考虑到材料的方向性。

形状和开口方向对其尺寸的影响：图 4-6 所示为 Cr12 钢试样形状和开口方向对尺寸变化的影响。图 4-6 中 A 表示切口方向垂直压延方向，B 表示切口方向平行于压延方向。Cr12 钢试样淬火回火后尺寸变化的测量结果见表 4-13。由表 4-13 可知，尺寸变化在平行压延方向呈膨胀趋势，在垂直压延方向呈收缩趋势。

在此必须注意开口的尺寸变化情况。就开口方向 A 而言，测量位置为 1→4 时，淬火回火的尺寸变化由大到小，最后尺寸变化量的收缩值差为 -0.024mm。相反，开口方向为 B，测量位置为 1→4 时，淬火回火的尺寸变化由小到大，最终尺寸变化量差为 +0.024mm。因此，在设计有开口形状的模具时，必须考虑钢的纤维方向。

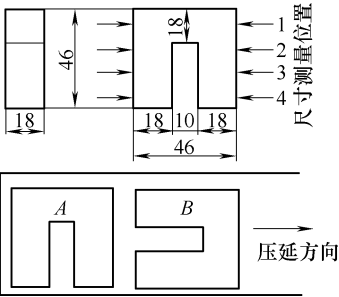


图 4-6 Cr12 钢试样形状和开口方向对尺寸变化的影响

表 4-13 Cr12 钢试样淬火回火后尺寸变化的测量结果 (单位: mm)

尺寸测量位置	开口方向 A		开口方向 B	
	淬火后	回火后	淬火后	回火后
1	+0.041	+0.028	-0.020	-0.039
2	+0.023	+0.014	-0.010	-0.021
3	+0.018	+0.010	-0.004	-0.021
4	+0.010	+0.004	-0.003	-0.015

注：热处理条件：1 000℃ ×30min 淬火加热，油冷；200℃ ×60min 回火，空冷。

(11) 加热速度和冷却速度对变形的影响 加热或冷却速度快，会造成模具的表里及厚薄处的温差增大，膨胀和收缩的时间差也大，由此产生的热应力和组织应力就极不均衡，因而产生大的变形。

钢的导热性越差，模具的形状越复杂，加热速度越快，则模具加热时变形也就越大。例如，真空炉加热只能靠辐射来进行热传导，加热速度较慢，因此用真空炉淬火的模具变形比用升温快的电阻炉要小。

(12) 淬火冷却介质的影响 表 4-14 所列是淬火冷却介质对不同钢种的淬火变形趋势的影响。要说明的是，表 4-14 中的胀缩趋势是对形状较匀称的凹模型腔而言，如果是薄壁或大型腔模具的内腔，则冷油淬火反而趋于胀大。

(13) 淬火操作对模具变形的影响 淬火操作（如模具在炉中的放置和支撑方式、淬火冷却时入液的方向和夹持方法等）对模具淬火变形影响较大，主要反映在翘曲变形方面。

表 4-14 淬火冷却介质对不同钢种的淬火变形趋势的影响

钢种	淬火冷却介质				
	盐水或碱水	油	硝酸盐	碱浴	金属板
45, 50	显著胀大	—	未淬硬收缩, 淬硬微胀	胀大	—
T8, T10	显著收缩	—	微胀	水少胀大, 水多收缩	—
CrWMn, 9Mn2V	—	冷油趋缩, 热油趋胀	分级胀大, 等温微缩	收缩	微胀
Cr12, Cr12MoV	—	收缩	微缩	—	微缩

模具返修重复淬火时, 变形量将随着淬火次数的增加而增加。另外, 装炉时的吊挂方式和吊挂工具, 对模具 (特别是内径、外径都较大的薄壁环类模具零件) 的变形也有很大影响。

(14) 模具形状对变形的影响 模具的壁厚均匀性、形状的对称性和结构刚性等对模具热处理变形有着显著的影响。就普通热处理来说, 模具热处理后出现的变形主要是受其形状、大小、所用材料及热处理方法的影响, 而其根本原因是模具由于存在厚薄不均或型孔等情况在淬火时产生的内应力不均衡。例如, 图 4-7 所示的模具形状和大小就容易产生比较大的热处理变形, 而形状比较简单的模具 (如方形模具) 变形就小。就模具的大小而言, 一般认为边长小于 200mm 时, 变形与壁厚无关, 平面变形可以控制在 0.03mm 以下。当变形量超过某一数值时, 必须予以校正, 或预先留有足够的磨削加工余量。

模具形状千变万化, 要完整归纳出热处理变形的确切规律十分困难, 只能在实践中不断地摸索、分析和总结。一般凹模或模套的变形趋向见表 4-15, 圆孔形凹模或模套形状的变形

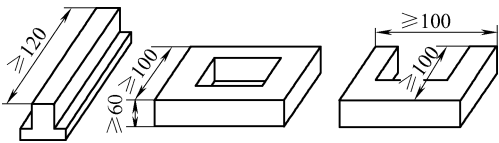


图 4-7 容易产生热处理变形的模具形状和大小

趋向见表 4-16, 其他形状模具的变形趋向见表 4-17。值得注意的是, 当模具截面对称, 厚薄相差不大时, 变形比较规则; 当模具截面不对称, 厚薄相差较大时, 由于淬火冷却不均匀, 往往造成不规则的变形 (如扭曲等)。

表 4-15 一般凹模或模套的变形趋向

$C, D \leq b$ 时	$D \leq b, C > b$ 时	$D > b, C \leq b$ 时	$C, D > b$ 时
型孔可能沿 AA' 及 BB' 方向胀大	型孔可能沿 AA' 方向胀大, 沿 BB' 方向缩小	型孔可能沿 AA' 方向缩小, 沿 BB' 方向胀大	型孔可能沿 AA' 及 BB' 方向缩小

表 4-16 圆孔形凹模或模套的变形趋向

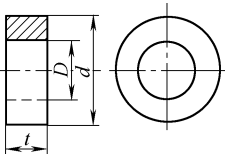
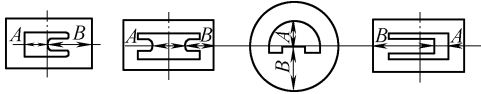
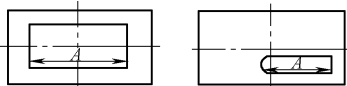
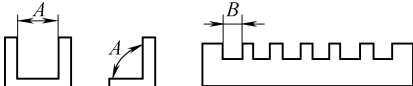
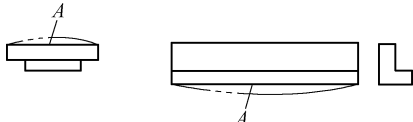
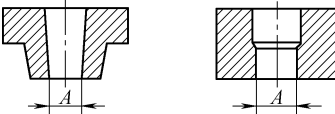
模具形状	变形趋向			说 明	
	D/t	d/D			“ - ”表示收缩趋向, “ + ”表示胀大趋向 无论是胀大还是收缩, 均产生不同程度的圆度超差
		<0.5	$=0.5$	>0.5	
	<1	-	-	+, -	
	$=1$	-	+, -	+, -	
	>1	+	+, -	+, -	

表 4-17 其他形状模具的变形趋向

模具形状简图	变形趋向
	模块突出部分趋向胀大 (即型腔收缩) $A - , B +$
	薄壁薄边均易胀大 $A +$
	槽形尺寸容易胀大、型面弯曲。多槽形模具槽的变形有胀有缩 $A + , B \pm$
	凸出形平板、剪刀口等大型面弯曲, 向外凸起 $A +$
	带有台阶刃口、封闭刃口, 均易收缩 $A -$

4.3.2 模具热处理变形原因分析

模具的热处理变形主要是由加热和冷却时的热应力、组织转变时的组织应力所造成的。热处理变形主要有三种：①外形变形，这类变形比较明显，也是比较容易判断的，其是复杂应力综合作用的结果，很容易目测发现；②体积变形，这类变形量一般比较小，目测难以发现，其是由组织转变引起的；③微小变形，其是随着时间的推移由组织状态改变或应力松弛引起的。引起模具热处理变形的原因主要有如

下几个方面:

(1) 模具的几何形状不佳 模具形状复杂、壁厚不均、有尖角、结构不对称等,在热处理时会加大热应力和组织应力,使模具热处理变形较大。

(2) 模具材料选择不当 碳含量高的碳素工具钢比碳含量低的热处理变形大,碳素工具钢比合金工具钢的热处理变形大。时效硬化钢变形小。

(3) 模具原材料组织不良 原材料组织不良(如存在碳化物严重偏析),会使得碳化物富集区和合金元素含量较高区的 M_s 点下降,而不同区域的 M_s 点不同,淬火时就会引起奥氏体转变为马氏体有先后,增加组织应力。另外,碳化物富集区残留奥氏体较多,回火时会产生较多的二次马氏体,再次加大组织应力,从而引起模具变形。

(4) 锻造工艺不良 锻造比选择不当或未进行充分锻造,对改善碳化物偏析和毛坯纤维流线的合理排列不利。

(5) 预备热处理不良 如果正火、球化退火及调质等不良,则得不到较理想的均匀、细小的显微组织。

(6) 未消除模具加工的残余应力 模具毛坯在锻轧及其冷却过程中,以及机械加工时,都存在较大的内应力,如果未进行消除应力处理,则会引起热处理时的变形。

(7) 热处理工艺规范不良 热处理工艺规范不良主要包括:

1) 模具的装炉方式不当。

2) 淬火温度过高或保温时间过长。淬火温度过高会使奥氏体晶粒过分长大,降低力学性能,增加脆性,从而增加变形和开裂倾向。

3) 淬火方法不当。淬火方法不当,容易使模具各部位的应力分布不均而产生较大的变形。

4) 清洗过早。高速工具钢模具淬火冷却后未降至室温时还处在马氏体转变区,这时如果用水清洗,则会因冷却速度过快而产生变形,甚至开裂。

5) 回火不及时。模具淬火后存在一定的热应力和组织应力,若不及时回火会引起模具变形。

6) 脱碳。模具表面脱碳将提高 M_s 点,形成较大的组织应力,引起模具热处理变形。

(8) 返修热处理时未进行退火 当模具热处理后不合格并允许返修热处理(重新淬火)时,如不进行退火处理,则内应力加大,同时造成组织粗大,淬透性增加,使模具变形加大。

4.3.3 模具热处理变形控制

虽然模具热处理变形不可避免,但通过合理选材、合理设计模具、控制原材料质量、正确锻造、合理机械加工、正确热处理等是可以减少和控制的。另外,掌握

模具形状的变形规律，在设计或加工时预先留出变形余量，对减少热处理变形也是有利的。

1. 模具热处理变形控制措施

(1) 合理选用模具材料 合金钢比碳素钢淬火变形小，而高合金钢又比低合金钢淬火变形小。对于有硬度要求的模具，应尽量选择能够在较缓和的冷却条件下便能达到硬化目的的模具材料，通常可采用淬透性较好的合金钢等，因为这种钢淬火变形倾向较小。此外，模具设计时还可根据需求，选择高强度钢和非调质钢，这类钢淬火变形控制效果较好。一些塑料模具还可采用预硬化型塑料模具钢（如 3Cr2Mo、B25、B30 等），因为这类钢在进行预硬化处理（调质）后可以获得要求的使用性能，最后加工成形后可直接使用，故而避免了因热处理而引起的淬火变形和裂纹等缺陷。大截面及要求变形小的模具则应尽量采用微变形钢，如 5CrNiMnMoVSCa、Cr5Mo1V、Cr12MoV、8Cr2MnWMoVS 钢等。

例如，用 T10A 钢制的陶瓷模型芯凹模，采用双介质淬火后口部呈喇叭口状，变形大（0.12mm），根部易开裂。若改用 CrWMn 钢，则变形较小并能满足技术要求。

(2) 合理设计模具 合理的模具结构是实现模具热处理微变形的重要条件之一。如果模具结构设计不合理，就会导致其工艺性先天不良，而这往往是造成淬火变形的根本原因。合理的模具结构，能够使其在热处理过程中加热时均匀受热，冷却时均匀散热，而模具加热冷却均匀，应力分布也就均匀，因此可以减小淬火变形。

模具设计时要根据其不同的工作条件，满足不同的要求。例如：对于切削性能要求高的模具，应该重点保证耐磨性和硬度；对于承受较大冲击的模具，则应保证冲击韧性。另外，模具设计者和热处理工作者都应熟悉和掌握材料的特性。

实例 模具（见图 4-8），材料为 Cr12MoV 钢，采用直径 200mm 的圆棒料锻成。当钢材碳化物分布方向与模具的孔型中心线相垂直时，经 960℃ 装箱加热后油淬，孔形产生了严重的圆度超差，即顺着碳化物方向的直径缩小了 0.04mm，而垂直于碳化物方向的直径缩小达 0.17mm。后改用直径 120mm 圆棒料锻粗后加工，使钢材的轧制方向与模具孔型的中心线一致，同上规范淬火后，孔形的圆度误差减小到了 0.02mm 左右。

为了减少模具的淬火变形，设计模具时应力求形状简单、均匀、截面对称。当确实因结构需要无法满足上述要求时，也可采用组合或镶套方法，在淬火回火后再进行加工也是减少变形的有效方法。

实例 Cr12MoV 钢制压胶模（见图 4-9）上的 5 个圆孔为工作部分，淬火后 5 个圆孔都出现了变形，磨削加工比较困难。后改为镶嵌式结构，件 2 仍为 Cr12MoV 钢，件 1 为 40Cr 钢（淬火硬度为 45~50HRC）。件 2 淬火后变形

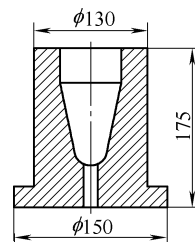


图 4-8 Cr12MoV 钢制模具简图

小，可磨削加工。这样既解决了模具变形问题，又可节约大量高合金钢。

模具的形状多种多样的，在设计时，有时可以采用不容易变形的形状，有时则不能避免。模具设计者如果能够掌握模具形状的变形规律，在设计或加工时预先留出变形余量，对减少热处理变形或减少热处理后精加工工时是大有好处的。图 4-10 所示是由于模具的形状或材料的方向性引起的在热处理时可能出现的变形倾向，很有参考价值。

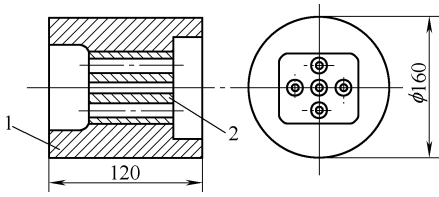


图 4-9 Cr12MoV 钢制压胶模简图

1—40Cr 钢 2—Cr12MoV 钢

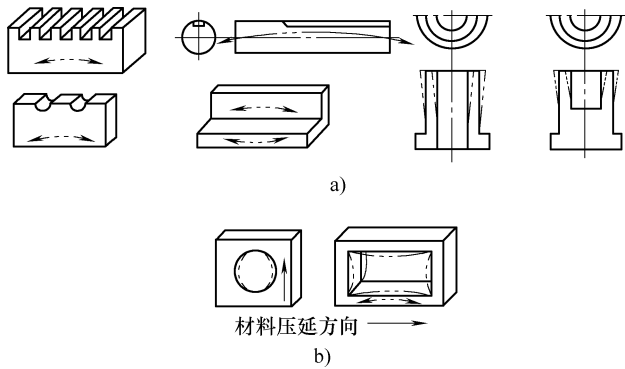


图 4-10 模具的变形趋势

a) 由于模具形状产生的变形倾向（双点画线） b) 由于材料的方向性出现的变形倾向（双点画线）

模具设计时，对壁厚不均匀的模具，可采用增加工艺孔的方法（目的是增加冷却均匀性）来减少因截面相差悬殊造成的热处理变形与开裂，如图 4-11 所示。对有薄壁、尖角的模具，要尽量改用圆角过渡并增大圆角半径。

实例 图 4-12 所示为大型剪切凸模，材料为 T10 钢。原设计为减轻重量，结构采用方框形，要求整体淬火后硬度为 58 ~ 63HRC。但其淬火后经常因歪扭变形而报废（刃口用火焰淬火变形稍小，但也超差）。采用组合式结构又不易并合。为了减小变形，改为图 4-12 所示的中心多孔的平板形状，用 T10 钢制造后，刃口处用氧乙炔焰加热淬火，获得较好的效果。

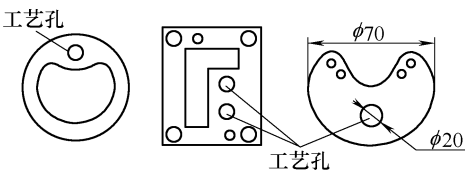


图 4-11 模具增加工艺孔减少变形的示意图

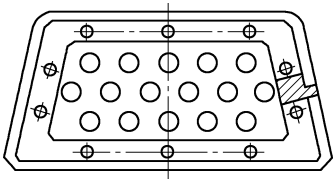


图 4-12 大型剪切凸模简图

模具设计时应保证其具有一定的厚度，以使模具具有足够高的强度。例如，薄壁冲模的壁厚，应尽可能厚一些，并在下冲模的四周留有余量，如图 4-13a 所示的下冲模冲孔边缘的宽度应为下冲模厚度的 1.5 ~ 2 倍。对于大型模具，该宽度应为下冲模厚度的 2 ~ 3 倍。导向孔和冲模冲孔边缘的距离应为厚度的 2 倍。当模具上的冲孔形状比较简单且规则时，该宽度可选下限；如果冲孔形状比较复杂，该宽度则应选上限。如果冲孔是圆形，则下冲模最好也是圆形，如图 4-13b 所示。

设计冲压大圆孔的下冲模时，圆孔中心必须和冲模外形保持同心，以保证其截面均匀一致，如图 4-14a 所示。另外，从冲孔到定位孔（辅助孔）之间的距离，应和冲模的厚度相适应，如图 4-14b、c 所示。

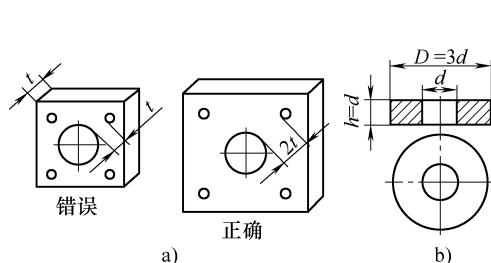


图 4-13 薄壁冲模减小变形的设计

a) 上、下冲模宽度选择 b) 圆孔冲模的下模形状

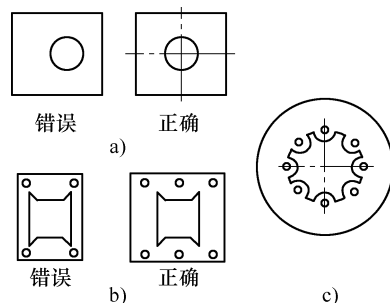


图 4-14 冲压大圆孔的模具中心工艺设计

a) 大圆孔模具中心 b) 辅助孔的间距
c) 合理的辅助孔

(3) 严格控制原材料质量 原材料应避免存在偏析、疏松、发纹、脱碳、带状组织及碳化物分布不均等质量缺陷。改善碳化物偏析程度，可采用增加模具毛坯的锻造比等措施。

(4) 采用正确的锻造方法 模具毛坯在锻造时应保证一定的锻造比。采用六面锻造、十字锻造、反复锻拔等方法，并配合预先正火、快速球化退火等工艺，可消除模具钢碳化物网、碳化物带及碳化物链，并获得分布均匀、细小的碳化物，同时保证毛坯流线的合理排列，而且在淬火时可使模具变形最小。

(5) 进行预备热处理 预备热处理（正火、球化退火及调质）的作用是：消除残余应力及不良组织；改善切削加工性能和冷压加工性能；细化晶粒以改善淬火质量，减小淬火变形，防止淬火开裂。

1) 毛坯退火预备热处理。模具毛坯锻造后一般都应经过退火处理，以使基体重结晶组织均匀化，并消除锻造应力，降低锻件硬度，便于切削加工。该方法对减小模具变形也是有利的。

2) 调质预备热处理。其工艺过程是在稍高于 A_{c1} 点的温度进行淬火及高温回火（550 ~ 650℃），使模具体积变化小于退火状态，并抵消由马氏体转变而产生的体积膨胀。调质预备热处理可以削弱高速工具钢、高铬钢的异常变形倾向，可使

Cr12MoV 钢的纵向横向淬火变形胀缩率差异降低 50%，并减轻翘曲作用，还可以显著减少体积的膨胀程度。例如，先经过调质处理，再按常规工艺淬火后，Cr2、9SiCr、CrWMn 钢等的尺寸变化可减少 70% ~ 90%，Cr12MoV、W18Cr4V 等合金工具钢和高速工具钢可减少 30% ~ 50%。再如 20mm × 100mm × 2 000mm 的 T10 钢制剪刀板，若不经调质处理，淬火后其长度将伸长 5 ~ 6mm，并使螺纹孔的距离拉长，无法安装到剪板机上，但如果预先对其进行调质处理，再钻孔并加工到尺寸，只要孔的直径比螺纹孔大 1.5mm，就可以顺利地安装使用。

模具毛坯调质处理所采用的淬火温度通常为 A_{c1} 或 $A_{c3} + 20 \sim 40^{\circ}\text{C}$ ，回火温度通常采用 600°C 左右，保温时间为 2 ~ 4h。常用模具钢的调质工艺参数见表 4-18。

表 4-18 常用模具钢的调质工艺参数

牌号	Cr2、CrWMn	9SiCr	6CrW2Si、 5CrW2Si	Cr12、Cr12MoV	W18Cr4V、 W6Mo5Cr4V2
淬火温度/ $^{\circ}\text{C}$	745 ~ 755	755 ~ 765	780 ~ 790	850 ~ 865	880 ~ 900
回火温度/ $^{\circ}\text{C}$	550 ~ 600	550 ~ 600	520 ~ 580	550 ~ 600	600 ~ 640
硬度 HRC	27 ~ 29	23 ~ 25	23 ~ 25	23 ~ 31	34 ~ 38

在调质处理后，由于硬度提高，机械加工应力相应增加。因此，对于形状复杂的模具，在调质及机械加工后，有必要再进行一次去应力退火，以去除加工时所产生的应力，然后再以变形最小的热处理工艺淬火，以控制其变形量，达到设计的要求。

(6) 冷热加工配合 掌握模具的变形规律及其特点后，预留加工余量、变更加工工序、合理安排冷热加工工序对减少模具变形非常重要。

(7) 减小和消除毛坯锻造及机械加工残余应力 合理选择切削加工量（避免大的吃刀量）、淬火前消除残余应力、做好模坯的预备热处理，对减少模具变形比较重要。

模具在机械加工后及淬火前采用去应力退火可减少淬火变形。其工艺是将模具加热到 $550 \sim 650^{\circ}\text{C}$ （尽可能接近回火温度），保温 4 ~ 8h，再随炉缓冷到 300°C 左右出炉。经此处理后，模具的残余应力得以消除，从而使变形减小。消除应力温度越高，材料的塑性越好，应力消除得也越彻底。如果模具在淬火前经过弯曲及校直处理，则消除应力是必不可少的。否则，模具一经加热淬火，必定会再次发生严重的弯曲变形。

(8) 合理的热处理工艺规范并选用先进的热处理设备

1) 合理的装炉方式。模具钢在淬火加热成奥氏体状态时由于塑性增大，在其自重的作用下会产生变形。因此，模具在装炉时应通过堵塞孔、用铁皮包裹薄壁处、采用合理的捆绑及吊装方式来减小其变形。

2) 采用预热、分阶段升温、下限的淬火温度加热。淬火时的奥氏体化温度要

尽可能低，且保温时间不要超过规定值，以减小热应力。另外，必须采用缓慢加热或分阶段式加热的方法来减缓加热速度，特别是在加热导热性差的高合金钢和大尺寸模具的时候。如图 4-15 所示为 Cr12MoV 和 W6Mo5Cr4V2 钢在普通加热炉中加热时通常采用的分阶段式加热方法。

形状比较简单的模具因淬火变形小，可以不进行预热，但精密的、形状复杂的模具必须进行预热。如果对大型模具要进行预热，第一阶段预热温度可采用 550℃。预热保温的时间要根据模具的有效厚度来定，一般按每 25mm 厚度保温 15min 来计算。有些高合金工具钢（如 Cr12MoV 钢）为空冷钢种，几乎没有冷却变形，所以适宜制造精密模具。表 4-19 为几种代表性钢种尺寸变化率。高合金钢的导热性比较差，如果加热速度快，则整体升温速度就不一致，这将引起较大的加热变形，所以必须进行预热。预热的方式可采用 550℃ 和 800℃ 两段预热。第一段预热按壁厚每 25mm 加热 15min 计算，第二段预热按每 25mm 加热 8min 计算。形状简单的模具可以省去 550℃ 的第一段预热。

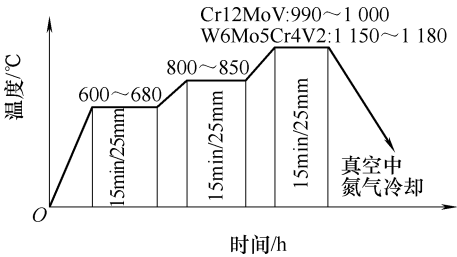


图 4-15 Cr12MoV 和 W6Mo5Cr4V2 钢的淬火加热曲线

表 4-19 几种代表性钢种尺寸变化率

钢种	尺寸变化率（%）	备注
Ti10, Ti11A	+0.3	$\text{尺寸变化率} = \frac{B - A}{A} \times 100\%$ A: 淬火前的尺寸 B: 淬火后的尺寸
9CrWMn	+0.2	
Cr12MoV	±0.05	

采用盐浴炉加热时，可以采取静态加热、局部加热、多次预热、合理吊挂、避开电极等措施来减少变形；采用箱式电阻炉加热时，可以采取合理放置、装箱架空加热（利于均匀受热）及快速加热（仅适用于截面尺寸相差不大的模具）等措施来减少变形。

一般的原则是，在保证模具性能的前提下，应尽量选用下限的淬火加热温度，这样可减小与淬火冷却介质的温差和热应力，而且模具的强度较高，对减小变形有利。另外，通过控制淬火温度还可以调整残留奥氏体的含量，从而达到控制模具变形的目的。例如，Ti10A 钢冲模经 760 ~ 770℃ 加热淬火后，其变形量仅为 820℃ 加热淬火的 1/10 ~ 1/7。

3) 控制淬火冷却。模具的淬火变形大多发生在淬火冷却阶段，故淬火冷却的方式方法非常重要。淬火冷却的原则是在保证性能的基础上，尽可能采用缓慢冷却

的方法来减少变形。例如，采用预冷（空气预冷、局部预冷、恒温预冷）淬火、马氏体分级淬火、贝氏体等温淬火、真空炉加热气淬和浅层淬火等工艺都可减少模具变形。同时，冷却槽要有足够的冷却能力，一次淬入量要适当，冷却方式要合理；还要使模具各部位产生的热应力和组织应力尽量均衡，从而减少变形。显然提高淬火油温度，以减小温差，使热应力减小，对减少变形是很有利的。

采用分级淬火可减少变形。例如，CrWMn 钢制模具（见图4-16），经调质处理及机械加工成形后，在 800 ~ 820℃ 盐浴炉加热 10min，在空气中预冷 1min 后淬入 200 ~ 220℃ 硝盐浴中冷却，停留 45 ~ 50s 后取出在空气中继续冷至室温，结果孔距 $90\text{mm} \pm 0.02\text{mm}$ 变形量符合图样要求，即小于 0.02mm。实践证明，该模具在 160℃ 硝盐中等温，停留 1.5 ~ 3min 也可以得到符合图样规定的公差要求。

采用多次分级淬火（即复合淬火），可进一步降低模具淬火变形。例如，T10 钢制凹模（外形尺寸为 $120\text{mm} \times 94\text{mm} \times 22\text{mm}$ ），其热处理工艺过程为：预热 $400^\circ\text{C} \times 30\text{min}$ ，加热 $800^\circ\text{C} \times 3.9\text{min}$ ，出炉预冷 30s 后淬入 160℃ 碱浴中保温 2min，再转入 180℃ 硝盐浴中保温 10min 后出炉，回火 $180^\circ\text{C} \times 60\text{min}$ 。经检验，模具变形甚微，变形量为 $-0.05 \sim -0.01\text{mm}$ 。

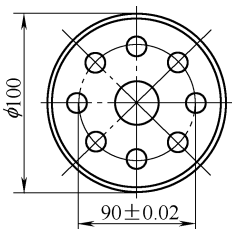


图 4-16 CrWMn 钢制模具简图

采用等温淬火也可减少变形。该方法是避免淬火裂纹、减少变形的重要工艺措施。等温淬火时，奥氏体直接转变为下贝氏体，可降低体积变化及淬火组织应力，促使热应力得到松弛。例如，低合金工具钢制模具，因刃口薄而凸起、截面形状不对称，以多种淬火工艺处理，均变形超差，后改用 230 ~ 250℃ 硝盐等温淬火，结果平面度误差为 0.1mm，型腔收缩 0.04 ~ 0.06mm，满足了技术要求。

4) 采用合理的淬火冷却介质、进入淬火槽的方向与冷却方式。在满足硬度及硬化层深度的前提下，尽量选用冷却作用缓和、均匀的淬火冷却介质（如热浴淬火冷却介质等）来减少淬火变形。表 4-20 为减少模具淬火变形常用的几种淬火冷却介质。

表 4-20 减少模具淬火变形常用的几种淬火冷却介质

淬火冷却介质	成分（质量分数）	使用温度/℃	适用范围
盐水	5% ~ 15% NaCl 水溶液	室温	截面大（直径与厚度 > 30mm）或形状简单的碳素钢模具
碱水	40% ~ 60% NaOH 水溶液	室温	截面大（直径与厚度 > 30mm）或形状简单的碳素钢或 GCr15 钢模具
水溶性淬火冷却介质	PAG 等	室温	截面较大或形状不太复杂，但要求变形小的碳素钢模具

(续)

淬火冷却介质	成分 (质量分数)	使用温度/℃	适用范围
冷油	L-AN46、L-AN68 等全损耗系统用油	< 80 (或室温)	形状简单的合金工具钢模具
热油	全损耗系统用油、专用淬火油	80 ~ 200	形状不太复杂, 但要求变形小的合金工具钢模具
碱浴	80% KOH + 20% NaOH + 6% H ₂ O	160 ~ 180	形状较复杂, 但要求变形小的碳素工具钢及合金工具钢模具
硝碱浴	85% KOH + 15% NaNO ₂ + 6% H ₂ O	140 ~ 160	
硝盐浴	50% KNO ₃ + 50% NaNO ₂ + 1% ~ 2% H ₂ O	160 ~ 220	形状较复杂, 但要求变形小的合金工具钢模具
	50% KNO ₃ + 50% NaNO ₂	260 ~ 380	
低温盐浴	20% NaCl + 30% KCl + 50% BaCl ₂	500 ~ 700	形状复杂, 要求变形严格的合金工具钢模具
铜板或铁板 (内部通水冷却)		室温	形状复杂, 要求变形极严格的高合金工具钢模具
静止或压缩 空气 (氮气)		室温	

模具进入淬火槽的方向及冷却方式合理是减少模具热处理变形的有效措施。操作时需注意以下几点：平板状或截面尺寸均匀的模具，沿长轴方向垂直进入淬火冷却介质中；截面不对称的模具，以凹面向下并沿长轴与液面成一角度的方向进入淬火冷却介质中，然后作水平小行程起伏运动；截面大体均匀的长条形模具（如直剪刀），以水平位置、凹面向下进入淬火冷却介质（即横向淬火法，该方法对细长的轴、剪刀、刀片等减少淬火变形的效果极为明显）；如果模具无凹处（在凹处可能积聚气泡），则可以静止于水中。

局部加热的模具，应将未加热部分先行入水预冷后再全部入水。薄板类模具零件（垫板等）进入淬火冷却介质时动作应迅速而平稳。

5) 通过控制残留奥氏体量来减少热处理变形。采用较低温度对模具材料淬火加热，既可以减少热应力，还可以使材料得到适量的残留奥氏体，因此有利于减少模具变形，防止晶粒粗大，从而提高材料韧性。如果要求模具具有较高的耐磨性和抗压强度，当然还应采用较高的淬火温度。

高合金钢淬火后，由于存在大量的残留奥氏体，故会使模具的尺寸在使用过程中发生变化。如果对其淬火冷却 4h 后进行冷处理，使残留奥氏体转变为马氏体，则能够稳定组织，减少变形。例如，Cr12MoV 钢制电影胶卷冲孔模（见图 4-17），尺寸精度要求极高，淬火后经 -80℃ × 6h 冷处理，能够使其尺寸大大稳定。

6) 及时并充分回火。模具淬火后可以利用回火来调整残留奥氏体的转变量，

以减小模具时效变形或进行变形校正。操作时需注意以下几点：应使淬火后的模具表面冷却到 60 ~ 80℃ 以下，再进行充分保温回火；形状复杂、存在内尖角的模具，可在表面冷却到 100 ~ 150℃ 时直接进行首次回火，冷却到室温后再重新加热回火。另外，需要进行线切割加工的模具，经充分回火后再附加热油（140 ~ 160℃）时效 12 ~ 24h，可有效地克服加工过程中自行破碎或尺寸变化的缺陷。例如，用 Cr12 钢制小电机硅钢片落料模，经淬火及 180 ~ 220℃ 回火后硬度为 60 ~ 64HRC，在随后进行线切割时，由于残余应力的作用，加工后变形量达 0.07 ~ 0.1mm 而超差，后增加 140 ~ 160℃ 热油浴 12 ~ 20h 时效处理，线切割加工变形量降低到 0.01 ~ 0.02mm，保证了精度要求。

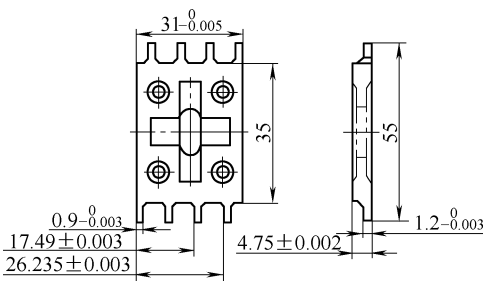


图 4-17 Cr12MoV 钢制电影胶卷冲孔模简图

7) 深冷处理。模具淬火后进行 -150℃ ~ -195℃ 深冷处理，可使奥氏体进一步转变为马氏体，但这时所获得的马氏体能够引起时效收缩变形。因此，经深冷处理后进行低温稳定化回火是很必要的。

8) 补充回火。等温淬火和分级淬火后具有较多量的残留奥氏体，易产生时效变形。因此，为防止时效变形，在等温淬火和分级淬火后必须进行补充回火。

9) 采用机械加固以减少热处理变形。采用机械加固以减少热处理变形的方法如图 4-18 所示。

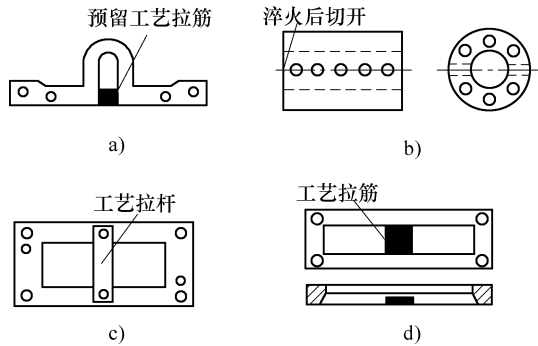


图 4-18 模具机械加固以减少热处理变形的措施示意图

a) 加工时预留工艺拉筋 b) 成对加工 c) 加设工艺拉杆
d) 长槽形凹模预留工艺拉筋

10) 采用热平衡辅具减少热处理变形。当模具变形难以用机械手段控制，且改变淬火工艺参数效果不明显时，可采用图 4-19 所示的热平衡辅具（如型芯、套、填充块等）来改变各部位的相对冷却速度，以便调节变形趋势，控制变形量。

模具在冷却过程中,还可利用压力机或其他机械夹具对模具施加限制,以减少翘曲变形。例如, T10A 钢凹模经常规双液淬火后, 型腔纵横向分别收缩了 0.1 ~ 0.15mm, 后采用合模淬火, 770℃ 加热 7min, 盐水冷却 5s 后取出, 再立即塞入凸模转热油停留片刻后于 220℃ 回火, 槽宽仅收缩了 0.02mm, 长度未发生变化。

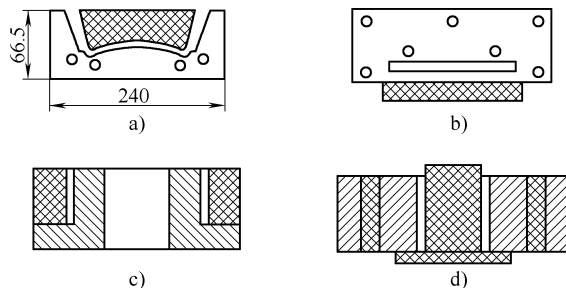


图 4-19 减少模具热处理变形应用热平衡辅具

- a) 安置在型腔中 b) 安置在背面单薄部位
c) 安置在孔外单薄部位 d) 安置在内孔中

11) 采用气体氮碳共渗。气体氮碳共渗具有尺寸变化小和变形小的优点。由于氮碳共渗时的尺寸变化和变形大多数是由残余应力引起的, 因此通常可使用调质处理来消除残余应力。调质作为氮碳共渗前的预备热处理时, 必须注意以下两点: ①先粗加工, 后调质; ②回火温度在 600℃ 以上时, 为了减少新的残余应力产生, 应该缓慢冷却 (随炉冷却)。此外, 还可以采用退火作为预备热处理。如果必须采用正火作为预备热处理, 则应在正火后再进行低温回火, 以消除正火后的残余应力。通常渗氮处理的尺寸膨胀量随材料和处理条件的不同而不同, 膨胀量大体上为氮化物形成深度的 20% ~ 25%。对于要求特别精密的模具, 设计时最好把这个膨胀量考虑进去。对于公差要求特别严格的模具, 也可以先进行试验, 再根据试验结果来决定加工尺寸。

12) 采用快速加热方法。快速加热方法适用于模具的工作部分, 如冲模的刃口。具体方法是, 将模具的工作部分加热到需要的淬火温度即可, 而其心部可以保持稍低的温度。这样做的好处是模具中心部分具有较大的塑性变形抗力, 能够阻止模具淬火冷却后产生的较大变形。

对有些小型简单模具, 为减小变形也可采用快速加热方法。由于快速加热时相变可迅速完成, 所以晶粒细化, 变形减小, 而且氧化脱碳倾向也大大减少, 但必须严格控制加热温度和时间, 并在淬火后迅速回火。

碳素工具钢和低合金钢的快速加热规范如下: 采用箱式电阻炉时加热温度为 950 ~ 980℃, 加热时间为 20 ~ 25s/mm; 采用盐浴炉时加热温度为 960 ~ 980℃, 加热时间为 3 ~ 5s/mm。要注意的是, 对截面复杂的模具, 应选用下限值。

实例 T8 钢制凹模 (见图 4-20), 要求硬度 54 ~ 58HRC, 用于冲压 1.5mm 纸

胶板, 允许间隙 0.02mm。采用 980℃ 快速加热 (3~5s/mm), 淬入 160℃ 硝盐浴中, 冷至 300℃ 左右即转入 100℃ 油中, 结果变形很小, 能够达到要求。

13) 采用浅层淬火。这种淬火方法适用于冲压凹模。一般凹模在使用时, 主要工作部位是棱边刃口, 如果在淬火时控制好加热时间, 仅使刃口部位组织奥氏体化, 再选择适当的淬火冷却介质, 使淬火后硬化层的深度为 2~4mm, 心部组织仍为珠光体, 则淬火应力可大为减小, 故淬火后的变形很小。这种方法又称为微变形淬火法。其

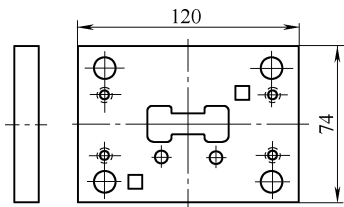


图 4-20 T8 钢制凹模简图

工艺过程及要点如下: ①为了确保硬化层深度为 2~4mm, 模具在淬火前必须经过预热。对于截面厚度在 15mm 以上的高碳工具钢模具和截面厚度为 10~20mm 的低合金工具钢模具, 应预热到 300~350℃; 对于截面厚度大于 20mm 的模具, 必须预热到 500~550℃。预热时, 保温必须足够, 以免入炉淬火加热时炉温出现过多的下降。②为了保证模具钢加热后不致全部奥氏体化而只加热刃部, 并防止硬化层过深或过薄, 加热温度可选用常规淬火温度的上限。保温时间按加热系数乘以有效厚度的 1/2 计算, 并根据模具形状、尺寸等因素予以修正。③加热设备可采用盐浴炉, 每次加热 1 件, 在炉温到温后入炉。④截面厚度小的模具, 可采用 180℃ 碱浴淬火冷却。低合金钢模具, 可采用 160~180℃ 硝盐或 120℃ 热油淬火冷却。

实例 下冲模 (见图 4-21), 材料为 CrWMn 钢, 技术要求: 硬度为 58~62HRC, 配合间隙为 0.45~0.65mm。

下冲模热处理工艺规程及效果如下: 调质处理后先进行机械加工; 预热 500℃ × 60min; 840℃ 盐浴炉中加热, 保温 8min, 淬入 250℃ 硝盐, 停留 4min 后空冷; 回火 290℃ × 90min。经检验, 尺寸为 10mm 的局部缩小了 0.02~0.03mm, 其他部位无变化; 刃口四周硬度为 60HRC, 其他部位硬度为 47HRC。

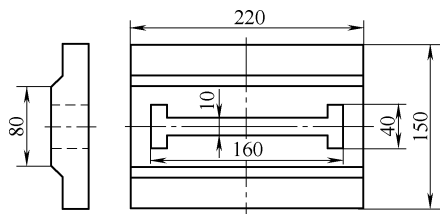


图 4-21 下冲模简图

14) 采用低温和恒温预冷淬火工艺。低温淬火可防止淬火裂纹的产生, 减少变形并提高韧性。例如, CrWMn、MnCrWV 钢制小型冲头以 790~810℃ 淬火, 9Mn2V 钢以 750~770℃ 淬火, 可获得微变形、少磨削裂纹、强韧化的效果。大型模具加热时也不宜超过常规加热温度上限, 而要通过适当延长保温时间来保证淬火硬化效果。

例如, 外形尺寸为 130mm × 130mm × 24mm 的 CrWMn 钢制凹模, 型腔尺寸为 65mm × 67mm, 经 820℃ 加热后转入 700~720℃ 电炉中, 恒温预冷 30min 后油冷。经检验, 硬度为 59~63HRC, 模具变形微小均匀。

15) 采用真空热处理设备。真空热处理只以辐射方式加热, 升温速度缓慢,

炉温均匀,如果再选用空冷钢种,除了因材料特性引起的少量尺寸变化外,基本上可以达到无变形的要求。当然,对于水冷或油冷来说,由于冷却速度快而引起的变形还是无法避免的。但如果采用高压气淬真空炉进行热处理,则可以通过调整冷却速度来减少热处理变形,这是因为在高压气淬真空炉中,模具与气体(氮气)接触,冷却速度均匀且较为缓慢,故淬火变形较小。

(9) 采用新的模具材料 为了解决工模具的淬火变形问题,国外从 20 世纪 60 年代已开始了研制时效硬化钢。采用这种钢制造的工模具,由于不需要淬火,在时效过程中就可达到硬化的目的,因此有效地解决了工模具的淬火变形问题。国内 20 世纪从 80 年代开始,也开发和推出了一系列新的可用于制造精密模具的钢种,如马氏体时效钢、易切削钢、空冷淬火钢等。对于要求变形极小的模具,可选择在空气中即可淬火硬化的微变形钢制造,如 5CrNiMnMoVSCa、Cr5Mo1V、Cr12MoV、8Cr2MnWMoVS 钢等。

(10) 防止线切割加工过程中的模具变形方法 淬火后获得高硬度的模具在线切割加工过程中出现的变形不但与热处理产生的残余应力有关,同时与模具厚度及材料特性(特别是淬透性)也有密切关系。耐回火性好的材料(如 Cr12MoV 等高合金模具钢)在线切割前必须进行充分的回火,其残余的相变应力通常加热到 500~520℃ 就能够消除。而碳素工具钢(T7、T8、T9、T10 等)和低合金工具钢(CrW、9CrWMn)的耐回火性比较差,如果也加热到 500~520℃ 回火,硬度就会降低。所以,对耐回火性差的钢不能采用回火来消除热处理产生的相变应力。由于碳素工具钢和低合金工具钢淬透性低(如碳素工具钢模具的有效淬透深度在 15mm 以下,低合金工具钢模具的有效淬透深度在 20mm 以下),因此这些材料只适于做薄壁的模具。如果模具大于上述尺寸而必须采用这种钢,则必须在热处理前按图 4-22 所示先粗加工成形,以保证工作面淬火后具有足够的硬度,并减少线切割加工过程中的模具变形。

对于精度要求特别高的模具,应该留有热处理后的精加工余量,或者在线切割好以后再进行淬火。例如,图 4-23 所示的凸模和凹模为边长小于 150mm 的模具,如果冲裁单边间隙允许范围相当于被加工材料厚度的 5%~7%,则线切割成形后再淬火也可以达到要求。但要注意,淬火前进行线切割时,凸模和凹模材料的取向应该一致,并最好选用 Cr12MoV 等空冷钢。

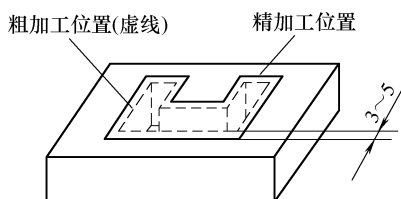


图 4-22 模具粗加工简图

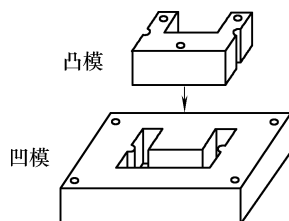
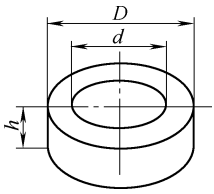
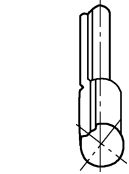
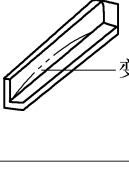
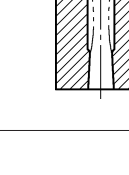
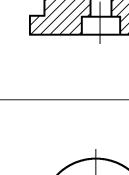


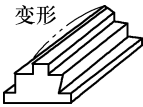
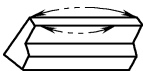
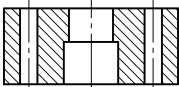
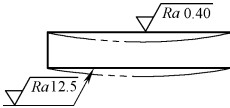
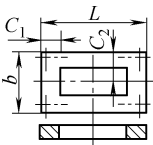
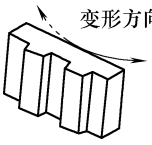
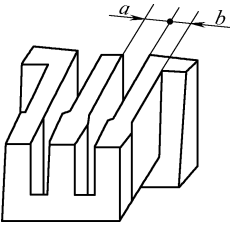
图 4-23 凸模和凹模材料的正确取向

(11) 模具淬火变形趋向及控制措施 如果能掌握模具材料的变形规律，则在模具设计时就有效地减少或控制热处理变形。表 4-21 为模具零件淬火变形趋势及控制措施。

表 4-21 模具零件淬火变形趋势及控制措施

模具零件形状和变形示意图	变形趋势说明			减小变形措施	备注
	D/h	d/D			1) 减缓冷却速度 2) 采用预冷 3) 采用预热 圆形冲裁凹模
		$<1/2$	$1/2$	$>1/2$	
	<1	-	-	+, -	
	1	-	+, -	+	
	D/h	d/D			1) 采用铁棒嵌入凹槽内改变冷却速度 2) 硝盐分级淬火 凹模镶件后加热，油冷
		$<1/2$	$1/2$	$>1/2$	
	<1	-	-	+, -	
	1	-	+, -	+	
	D/h	d/D			1) 采用分级淬火 2) 改变进入淬火油方向，内角向下成一定角度 角形直通凸模加热后油冷
		$<1/2$	$1/2$	$>1/2$	
	<1	-	-	+, -	
	1	-	+, -	+	
	D/h	d/D			1) 采用装箱加热以减缓薄壁处冷却速度 2) 采用分级淬火 复合模中的凸、凹模
		$<1/2$	$1/2$	$>1/2$	
	<1	-	-	+, -	
	1	-	+, -	+	
	D/h	d/D			1) 四周包裹铁皮或石棉绳 2) 碱浴分级淬火 T10 凹模 800℃水淬油冷
		$<1/2$	$1/2$	$>1/2$	
	<1	-	-	+, -	
	1	-	+, -	+	

(续)

模具零件形状和变形示意图	变形趋势说明	减小变形措施	备注
	冷却速度快的小面发生凸起	采用空冷或硝盐冷却	Cr12MoV 钢直角凸模油淬
	冷却速度快的一面发生外凸起	截面较厚的部分先淬入水中, 并迎着水移动	T10 钢直角凸模
	销钉孔径收缩, 孔距同纤维方向一致时会变大	1) 采用分级淬火 2) 堵塞销钉孔后淬火	CrWMn 钢制凸、凹模
	表面粗糙度高的一面凹陷	1) 预冷后再进行淬火 2) 薄壁板可进行油冷	45 钢模具
		1) 碳钢四周包裹铁皮后水淬、油冷至 300℃ 时, 压入凸模, 限形淬火 2) 分级淬火	T10 钢制方形凹模, 800℃ 时淬火加热
	平面发生内凹变形	1) 减缓冷却速度 2) 依靠冷却槽壁冷却	CrWMn 钢组合凹模
	$a > b$ 时, $a +$ $a < b$ 时, $a -$	1) 采用分级等温淬火 2) 将槽口油冷	CrWMn 钢制 E 形凹模, 820℃ 加热, 油冷

2. 控制与减小模具热处理变形实例

实例 1 M3×16mm 木螺钉搓丝板，材料为 Cr12MoV 钢，为了减少变形，采取真空热处理设备与工艺。

(1) 真空热处理工艺

1) 预热。加热温度 800°C ，真空度为 0.133Pa ，保温 40min 。

2) 淬火。加热温度 $1\ 080 \sim 1\ 120^{\circ}\text{C}$ ，保温 $40 \sim 50\text{min}$ ，然后加氮气使真空度为 0.266Pa 。

3) 冷却。模具气冷到 700°C 以下再入油冷却。

4) 回火。510 ~ 540℃回火 3 次, 每次 2h。

(2) 效果 经检验, 搓丝板真空淬火与盐浴炉加热淬火后, 齿面平面度误差分别为 -0.01mm 和 $-0.025 \sim +0.01\text{mm}$, 螺距变形分别为 -0.02mm 和 -0.03mm 。因此, 真空淬火与盐浴炉加热淬火相比, 不仅平面度误差小, 而且硬度也均匀。另外, 真空淬火模具的使用寿命可稳定在 16 个班以上, 而经盐浴炉加热的模具的使用寿命仅为 5 个班。

实例 2 Cr12MoV 钢制多孔塑料压缩模型腔板的外形尺寸为 140mm×120mm×12mm, 有 60~70 个工作孔, 孔径为 1.3~13.3mm, 要求各孔距极限偏差范围为 $\pm 0.01 \sim \pm 0.03\text{mm}$, 平面度误差不大于 0.02mm, 硬度为 53~58HRC。

在最初选用 Cr12MoV 钢制造该模具时, 由于钢中碳化物数量多, 偏析严重, 故脆性大, 并对硬度的均匀性、变形都带来不利的影响。为防止型腔板变形, 就要采取综合的技术措施, 除在锻造后要进行球化退火外, 在铣切平面之后还要进行调质处理, 以减少淬火时的孔距变形和改善钻孔的切削加工性能。此外, 钻孔后还要再进行稳定化处理。

塑料压缩模型腔板的预备热处理及最终热处理工艺分别如图 4-24 和图 4-25 所示。为防止型腔板的氧化脱碳和变形, 采取了装箱保护法加热, 并进行了二次预热; 为防止孔径胀大, 在淬火冷却至 760℃ 左右时, 要将型腔板放置在预热到 350~450℃ 的两块铁板中, 并在压力机上加压冷却至室温。经过上述处理, 平面度误差可控制在 0.02mm 以下。

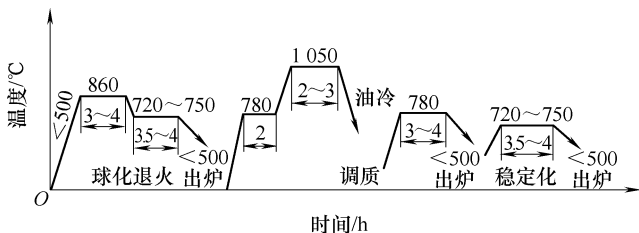


图 4-24 型腔板的预备热处理工艺

回火温度要根据淬火后的残留奥氏体量（体积分数约 20%）及胀、缩情况选定，以调整和控制型腔板尺寸。如果型腔板淬火后尺寸胀大，则可采用 340 ~

430℃回火，以缩小尺寸；如果型腔板尺寸已经缩小，则可采用 450 ~ 520℃回火，以增大尺寸。

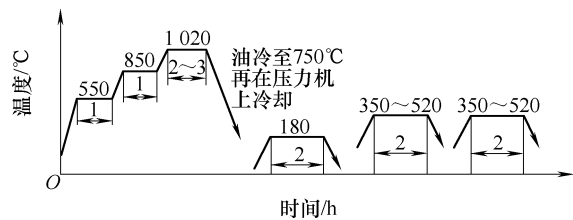


图 4-25 型腔板淬火及回火工艺

此外，Cr12MoV 钢制型腔板在改锻时应尽量击碎碳化物，并使金属纤维流向垂直于大平面，以有利于控制和调整变形。

实例 3 冲压凹模（见图 4-26），材料为 T10 钢，技术要求：硬度 58 ~ 62HRC，变形量 < 0.03mm。

（1）淬火 盐浴炉中加热，加热温度为 950 ~ 980℃，保温时间为 132s（6s/mm × 22mm）；淬火冷却，在 160 ~ 180℃ 碱浴（80% KOH + 20% NaOH，另加 3% KNO₃ + 3% NaNO₂ + 6% H₂O，上述各含量为质量分数）中冷却 180s，然后迅速转入油中冷却。

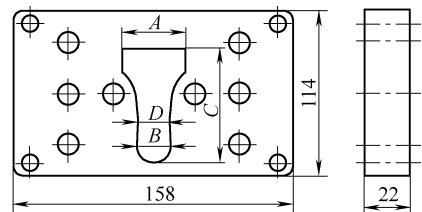


图 4-26 冲压凹模简图

（2）回火 回火温度为 200 ~ 220℃，保温时间为 60min。

（3）效果 经检验，硬度为 58 ~ 60HRC，变形符合要求，其变形量见表 4-22。

表 4-22 T10 钢冲压模淬火变形量（单位：mm）

	测 量 部 位			
	A	B	C	D
淬火前	27.28	36.62	55.44	8.32
淬火后	27.30	36.64	55.44	8.34
变形量	+0.02	+0.02	0	+0.02

4.3.4 模具热处理变形原因分析与对策的典型实例

实例 1 采用纵向压力淬火改善 Cr12MoV 钢制精密模具的淬火变形。

先用 Cr12MoV 微变形钢，不能满足精密模具对淬火变形的要求，如 DD10 型电度表硅钢片连续冲模中的大号冲头（77mm × 91mm × 70mm，见图 4-27），经常规热处理（见图 4-28）后，刃口面收缩变小，导致其与凹模双面间隙达 10 ~ 15μm，超出了工艺要求的 2 ~ 3 倍（要求 5μm）。采用纵向压力淬火，可将 Cr12MoV 钢冲头

和凹模间隙控制在工艺要求范围内。

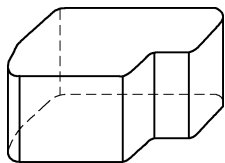


图 4-27 冲头简图

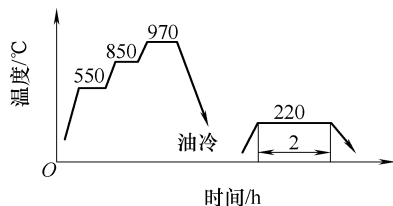


图 4-28 Cr12MoV 钢常规热处理工艺

(1) 淬火变形 Cr12MoV 钢制冲头在按图 4-28 所示工艺处理时，在淬火冷却的相变过程中，体积发生了膨胀，并且在组织应力和热应力这两种应力的共同作用下发生了变形。

(2) 纵向压力淬火 Cr12MoV 钢制冲头从 980℃ 油淬至 500 ~ 300℃ 时出现收缩。若在 500 ~ 300℃ 之间，采用纵向压力淬火，则可抑制冲头的收缩变形。通过调整压力，可以控制冲头的变形量。冲头加压淬火的热处理工艺如图 4-29 所示。如果适当降低淬火温度，还可使效果更好。回火温度降为 190℃，可减少回火变形。

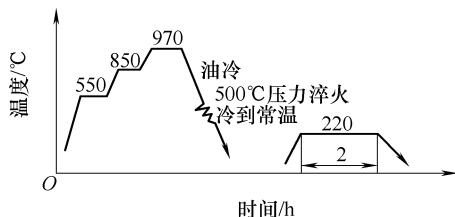


图 4-29 冲头加压淬火的热处理工艺

实例 2 Cr12MoV 钢制模板，尺寸为 400mm × 300mm × 50mm，经过 1 030℃ 淬火及 200℃ 回火后，模板发生微变形，长、宽、高分别缩小了 1.0mm、0.74mm、0.2mm。另外，在处理厚薄悬殊的 Cr12MoV 钢制模具时也发生了一定程度弯曲（圆孔变成椭圆）的现象。

针对 Cr12MoV 钢制模具出现的变形，进行相关检验分析后发现，模具变形受钢中碳化物偏析、结构设计、淬火回火后钢中的残留奥氏体量、热处理工艺及冷热加工的残余应力等影响很大。

(1) 模具中碳化物偏析的影响与对策 Cr12MoV 钢制模具中含有大量共晶碳化物，如果碳化物分布不均匀，呈带状、网状及块状分布，就会使钢材具有各向异性，从而导致模具淬火后发生变形（如圆孔变成椭圆）。

1) 变形原因分析。由于模具钢内部存在呈一定方向且分布不均匀的碳化物，而碳化物的膨胀系数比基体组织小 30% 左右（其加热时阻止模具膨胀，冷却时又阻止模具收缩），故使模具在热处理时产生不均匀的变形，如模具淬火后沿带状碳化物分布方向的纵向伸长量大、横向伸长量小，圆孔出现圆度超差等情况。

2) 对策。对于存在碳化物分布不均匀、材料性能各向异性钢等缺陷的模具，可采用一重一轻双十字锻造，并利用锻造余热进行淬火，当其在油中冷却至 200℃ 后再立即投入回火炉中进行高温回火（750℃ × 2h）的方法，获得碳化物分布均

匀、细小、弥散的索氏体组织。调质处理可显著减少最终淬火体积膨胀量的 30%~50%，并可降低最终淬火后的各向异性程度，减少最终淬火后的模具翘曲变形。

对于尺寸较大或无法进行锻造的模具（改锻并不能打碎模具心部的碳化物并使其均匀分布），可采取固溶双细化处理，使碳化物细化、分布均匀、棱角圆整化，达到减少模具淬火变形的目的。

（2）模具结构设计的影响与对策 模具结构设计不合理，往往是造成 Cr12MoV 钢制模具热处理变形的重要因素。

1) 变形原因。由于 Cr12MoV 钢制模具存在壁厚不均或存在尖锐棱角，淬火时会引起各部分之间的热应力和组织应力不同，导致各部分体积膨胀不同，使模具淬火后产生变形。

2) 对策。在满足实际生产要求的情况下尽量减少厚薄悬殊、结构不对称的情况，在模具的厚薄交界处尽可能采用平滑过渡等结构设计。此外，还应根据模具的变形规律预留加工余量，使模具在淬火后不至于因为变形而报废。

（3）残留奥氏体的影响与对策 Cr12MoV 钢制模具淬火和低温回火后，模板长、宽、高均发生缩小现象，这是因为模具淬火后残留奥氏体量过多而引起的。

1) 变形原因。Cr12MoV 钢淬火后含有大量残留奥氏体，因此模具体积会发生变化。钢中各种组织有不同的比体积，奥氏体比体积最小，这是 Cr12MoV 钢模具淬火后体积发生缩小的主要原因。因为淬火后 Cr12MoV 钢中含有大量残留奥氏体，所以模具在淬火、低温回火后一般都发生收缩。

2) 对策。Cr12MoV 钢淬火温度越高，残留奥氏体量越多，因此选择适当的淬火温度是减少模具变形的重要措施。一般在保证模具技术要求和综合性能的情况下，要适当降低 Cr12MoV 钢模具的淬火温度。生产实践发现，500℃回火时模具变形量最小，而且硬度降低不多（仅 2~3HRC）。要说明的是，淬火后采取冷处理，既可以减少残留奥氏体量，又可以减少模具变形、稳定模具尺寸。有关资料介绍：Cr12MoV 钢采用真空淬火油冷后进行冷处理，一般采用 $-65^{\circ}\text{C} \times 1.5\text{h} + 170^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$ 二次回火，模具变形量最小。

（4）残余应力的影响与对策 Cr12MoV 钢模具在冷热加工过程中的残余应力在淬火后会使得模具产生一定的变形。

1) 变形原因。在机械加工过程中存在的残余应力和淬火后的应力叠加，增加了 Cr12MoV 钢模具淬火后的变形。

2) 对策。①去应力退火：粗加工后、半精加工前应进行一次去应力退火，即 $630 \sim 680^{\circ}\text{C} \times 3 \sim 4\text{h}$ ，炉冷至 $\leq 500^{\circ}\text{C}$ 后出炉空冷，也可以采用 $400^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 3\text{h}$ 去应力退火；②降低淬火温度，减少淬火后的残余应力；③采用等温淬火工艺可减少淬火残余应力；④采用淬油后 170℃出炉空冷（分级淬火），可使模具淬火后残余应力减少，模具淬火后变形小。

4.3.5 模具热处理变形的校正

在模具热处理过程中，尽管采取许多措施加以控制，但其变形仍难以避免。模具变形与许多因素有关，如模具的材料、形状、结构、尺寸大小、锻造与铸造、机械加工、热处理及设备。对于变形的模具，应认真分析其变形的原因和特点，并结合其硬度、材质、形状等，合理选用校正的方法加以补救，使模具零件恢复原有形状，达到要求的尺寸。

钢件热处理变形的校正，就时间而言，有的在热处理前进行，有的在热处理后进行；就校正时工件所处的温度来说，有热态校正和冷态校正两种；就校正时对钢件所施用的外力情况看，有冲击（动载）的和静压（静载）的两种方式。

表 4-23 为各种淬火变形校正方法，供模具校正时参考。

表 4-23 各种淬火变形校正方法

类别	方 法	操作详细分类
冷态校正	冷压校正法	1) 正向冷压校正 2) 偏向冷压校正 3) S 弯形轴冷压校正
	冷态正敲击校正法	1) 冷态正向锤击校正 2) 冷态预弯锤击校正
	冷态反敲击校正法	1) 冷态反向锤击校正 2) 冷态反向喷砂校正
热态校正	热压校正法	1) 烧红热压校正 2) 局部热压校正
	局部烘热校正法	局部烘热校正
	热态反敲击校正法	热态反向锤击校正
	热点校正法	1) 热点校正 2) 热点、加压校正
淬火状态校正	淬火趁热校正法	1) 趁热正向加压校正 2) 趁热镶嵌校正 3) 趁热滚搓校正
	残留奥氏体稳定化校正法	1) 淬火时残留奥氏体稳定化校正 2) 回火时残留奥氏体稳定化校正
	局部速冷校正法	1) 正向局部速冷校正 2) 反向局部速冷校正 3) 内孔收缩校正
回火状态校正	回火校正法	1) 回火加压校正 2) 回火定形校正 3) 偶件配合回火校正

1. 冷态校正法

(1) 冷处理校正法 模具在淬火后其内部组织中存在一定数量的残留奥氏体, 当将模具冷却到 0°C 以下时, 残留奥氏体会继续发生相变, 使模具产生变形, 如果此时对模具施加一定的校正外力则不但可控制淬火冷却造成的变形, 还可以减少和防止其在以后使用或加工过程中的变形。

该方法适用于淬火后有较多残留奥氏体的钢种, 应在淬火后短时间内进行冷处理, 随后在残留奥氏体转变的温度范围内回火。为防止冷处理过程中的开裂, 在冷处理前应进行热水煮沸, 并在冷处理后迅速放入热水中快速加热。

冷处理温度应在 0°C 以下, 多采用在 -70°C 以下进行, 这样效果较为显著。冷处理多用于模具的胀大处理。

(2) 冷压校正法 对于淬火后硬度在 35HRC 以下的模具, 施加的外力超过材料屈服强度即可使其产生塑性变形, 且施加压力越大, 反变形越大。具体方法是, 用检测仪测出变形的最高点, 对其进行手动或机械加压, 注意应有一定的过量(反变形), 以弥补其弹性变形。冷压时两支承点的距离与加压大小应根据变形量的大小来定。校正后的模具应立即进行回火处理。要说明的是, 加压时间对变形的影响不大。

(3) 冷态敲击反击校正法 该方法是敲击模具局部, 使其产生塑性变形。敲击还可使应力得到松弛。具体做法是, 在凹陷的最大一侧, 用校直锤子由中间向两端敲击, 然后再由一端向另一端敲击。

反击敲打部位应为凹陷最大的一侧, 敲击面应浅而宽。这种方法适用于硬度在 40HRC 以上的、高硬度的长杆类小型模具(如冲头等)。

2. 热态校正法

(1) M_s 点校正法 在淬火冷却过程中, 模具的温度下降到 M_s 点附近时, 其组织中存在较多的奥氏体, 加上马氏体相变存在超塑性, 因此淬火模具在此温度附近具有较好的塑性, 易于进行校正。将模具冷却到 M_s 点附近, 可采用硝盐或碱浴作为分级或等温淬火冷却介质, 比较容易控制。在盐水中淬火后模具的校正温度在 200°C 左右, 其特征为模具从盐水中提出后盐水立即蒸发并呈一层白色盐霜即可校正。

(2) 回火校正法 该方法是利用模具回火过程中的组织转变, 使导致变形的内应力得到完全或部分消除, 再利用此时回火相变的超塑性条件, 在外力作用下, 使模具变形得到校正。具体方法是, 将模具加热到 $150 \sim 200^{\circ}\text{C}$ (回火加压温度不能超过模具的回火温度) 再采用适合的夹具对其施加外力紧固。常用形式有薄板类压平回火、长剪刀等细长模具类反弯回火、镶嵌回火、夹持回火、装夹回火及合模(偶件配合)回火等。

如果需要对模具反复数次进行回火校正, 则需要逐次提高回火温度 $10 \sim 20^{\circ}\text{C}$, 并每次进行加压处理。

1) 偶件配合回火校正法。该方法尤其适用于冲压加工的凸、凹模淬火变形的校正。如果凹模淬火时有使型腔产生收缩倾向,则可以把事先加工好的并经热处理的凸模用压力压入凹模中,一起进行回火。采用该校正方法时应注意以下事项:①无间隙模具(凹模)可以在淬火冷却到 200°C 左右时,直接将凸模压入凹模后进行回火;②有间隙模具,先用填料(铜皮或钢皮)等衬好后,再将凸模压入凹模进行回火;③凡模具结构中有易产生应力集中的模具不能采用此法,否则用外力将凸模压入凹模时易出现裂纹。

2) 镶嵌回火法。该方法是将带有凹槽的模具零件淬火冷却到 200°C 左右时,把易变形的部位(凹槽)嵌入镶块一起回火。例如,图4-30所示的硅钢片冲模的凹模淬火冷却到 200°C 左右时,把易变形的部位嵌入镶块(片或柱),再在合适的温度下进行回火,则可以把歪扭变形校正过来。

(3) 热点校正法 该方法是利用氧乙炔焰或氧丙烷焰等使热点处(变形部位)温度迅速升高,塑性增大,体积膨胀(由于受到周围未加热部位的挤压限制,该部位承受压应力,故膨胀趋势受到抑制),当热点处冷却时,再使其体积收缩来达到校正变形的目的。采用热点校正法时应注意以下几点:

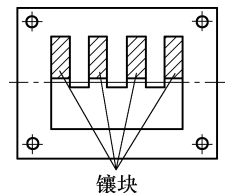


图 4-30 硅钢片冲模的凹模加镶块回火示意图

1) 此法校正变形的程度较难控制,需要操作人员具有丰富的现场经验,一般适用于公差范围大、变形严重的模具零件。

2) 加热温度不能过高,当受热区出现暗红色(温度为 $600\sim 650^{\circ}\text{C}$)时,即可用水冷却。

3) 在对刃口等要求高硬度的工作部位附近进行热点校正时,要采取措施(如采用通水冷却方式)使工作部分的硬度不致降低。

(4) 型腔内孔收缩法 即利用淬火热应力作用,使模具型腔或孔距收缩。该方法常用于校正变形、废模翻新和冷加工超差模具的补救。

1) 无相变加热后热缩处理方法。该方法应用较为广泛。模具在稍低于 A_{c1} 点加热透烧后急冷,如45、50钢及T7~T12碳素工具钢加热温度选取 $700\sim 720^{\circ}\text{C}$,低合金工具钢加热温度选取 $720\sim 740^{\circ}\text{C}$,高铬钢、高速工具钢加热温度选取 $770\sim 790^{\circ}\text{C}$ 。热缩处理效果(收缩程度、均匀性)取决于冷却介质及冷却方式,一般可采用水冷或夹板冷却等。形状复杂的合金钢模具以硝盐或碱浴冷却效果更好,收缩作用显著而且均匀。需要注意的是,淬火状态模具应经退火、正火或高温回火后再进行缩孔处理,缩孔处理后需要进行消除应力回火。另外,反复3~4次缩孔处理后应进行一次正火处理。

对于只要求型腔淬硬的模具,可将铁皮或石棉板包裹在模具的不需淬硬部分后再进行加热淬火。由于型腔冷却后首先收缩,而温度较高、塑性良好的表面产生内缩变形,因此可以达到收缩型腔的目的。

对于一些内孔胀大的凸、凹模，应加热至 500 ~ 700℃，然后在水中快冷。型腔内孔收缩处理后需再进行去应力回火。

2) 型腔和内孔填充覆盖后浸冷收缩方法。该方法是在型腔内孔填充沙子、耐火泥或石棉板，装夹或自由状态加热后再用木板夹持浸冷，从而达到使温度较高的内孔在周围冷缩压力下收缩的目的。例如： $\phi 20\text{mm}$ Cr2 钢制拉丝模内孔的收缩量为 0.2mm；Cr12MoV 钢滚丝模内孔可收缩 0.15 ~ 0.30mm；T8A 钢凹模用耐火泥堵孔，经加热后用木板夹持水冷处理，型腔长度收缩了 0.3mm，宽度缩小了 0.26mm。

3) 高温加热收缩方法。模具按常规淬火温度加热，再在高于 M_s 点 50 ~ 100℃ 的硝酸盐中冷却，具有收缩作用显著而且均匀的特点，尤其适用于 45、50 钢模具（350 ~ 400℃ 硝酸盐冷却）及 T7 钢薄壁件（250 ~ 300℃ 硝酸盐冷却）的预收缩处理，并可反复进行，不易翘曲。T10A 钢凹模应用上限加热及短时冷却，型腔与孔距的收缩作用显著而且操作简单，如采用 820 ~ 830℃ 加热后空气中预冷（3 ~ 4s/mm），再在盐水中冷却到 200 ~ 300℃ 后空冷自身回火。

需要注意的是，对于高碳高铬钢等塑性较差的模具材料，如果采用 A_{c1} 点温度加热急冷，产生的收缩效果并不明显，而采用高温奥氏体区加热急冷，利用奥氏体较大的热膨胀系数和较好的塑性，则可使之产生较大的热应力收缩变形，如 Cr12MoV 钢制模具，可将其加热到 1 020 ~ 1 080℃，经过保温后先在水中急冷很短时间，使模具产生热应力而收缩，并确保模具的各部位温度仍在 M_s 点以上后，立即转入 500 ~ 600℃ 的氯化盐低温盐浴中等温停留至内外温度一致，以减少随后冷却时的组织应力变形，然后再进行分级淬火冷却，效果较好。

(5) 胀孔（或胀大）法 该方法适用于组织应力变形特征明显的低、中碳碳素工具钢及低合金工具钢，是利用淬火冷却时的组织应力使模具变形主导方向产生胀大的方法。低合金工具钢采用上限加热温度并尽可能获得较深的淬硬层淬火后，可获得少量的胀大变形。

(6) 冷处理膨胀效应方法 利用残留奥氏体在低温下的马氏体转变膨胀效应，校正 Cr12 系钢制模具由于过热淬火所带来的体积收缩，具有迅速可靠的特点。轻度收缩的模具经过 -20 ~ -30℃ 冷处理即可复原；发生显著收缩的模具，经 -70℃ 处理后可迅速复原，甚至超过淬火状态，并可以结合回火进行精细调整。

(7) 化学腐蚀法 型腔内孔收缩或外形胀大的凸模，可用质量分数为 25% 的硝酸和质量分数为 75% 的盐酸配制的王水进行腐蚀。不需腐蚀的部位应涂上硝基漆或石蜡进行保护。

(8) 镀铬法 对于胀大的内孔或收缩的外形，可通过镀硬铬方法来修复。

(9) 退火返修法 对变形过大无法校正的模具零件，可先退火软化，然后进行校正，再重新淬火。

3. 其他校正法

(1) 复合校正法 复合校正法参见下例。

实例 9SiCr 钢制剪刀片的冷校直。

9SiCr 钢制剪刀片（外形尺寸为 20mm × 60mm × 1050mm），技术要求：硬度为 57 ~ 60HRC，弯曲变形 ≤ 0.35mm。

热处理工艺为：先以 850 ~ 860℃ × 0.5min 加热，再以 240 ~ 260℃ × 10 ~ 12min 硝盐 [50%（质量分数）NaNO₂ + 50%（质量分数）KNO₃] 等温冷却，冷至室温并清洗后进行校直（由于等温淬火减少了热应力和组织应力，弯曲变形量为 0.4 ~ 0.8mm，故容易进行校直），校直后再在硝盐炉中进行 300 ~ 320℃ × 1.5 ~ 2h 回火（夹具夹紧回火）。回火后刀片变形量 ≤ 0.35mm，符合要求。

（2）对淬硬模具采用电火花加工和线切割等方法加以修整，以保证其精度。

1）电火花加工方法。该方法不但可以加工、修整淬火后变形的模具，而且可以在全部淬硬的模块上加工出模具型腔（经电火花加工后，模具仍具有表面强化的作用）。要注意的是，为了减小电火花加工的工作量，模具在淬火时应尽可能减小其变形量。

2）线切割法。这是用来加工淬硬工模具的一种方法。线切割常用来加工型腔形状复杂、精度要求高的上冲头和下冲模等。

（3）采用新型超硬硬质合金刀具加工技术 YH1、YH2 及 726 等型号硬质合金刀具，对淬硬的模具进行半精车或精车、铣削都有较好的效果。这种刀具特别适宜用来修整电火花、线切割等难以进行加工的模具。

实例 模具如图 4-31 所示，材料为 T10A 钢，要求硬度为 50 ~ 55HRC，表面粗糙度 *Ra* 为 0.1μm。由于型面处有 25.35^{+0.02}₀ mm、1.7⁰_{-0.03} mm 和 2^{+0.01}₀ mm 环形槽，如果先精车后淬硬，则淬火后模具变形易超出公差；如果预留余量，淬硬后再磨削加工，则又因槽的宽度太窄无法解决砂轮修整问题。对此，可采用新型超硬硬质合金加工技术，如先用线切割法将超硬硬质合金刀坯制成成形刀具，然后对其进行修磨，再用修磨后的刀具对淬硬模具进行加工。切削工艺参数为：车床转速为 250r/min，进给量为 0.04mm，切削深度为 0.05mm。

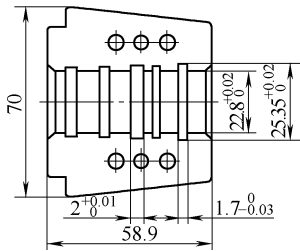


图 4-31 模具简图

4.4 模具热处理开裂原因分析与对策

模具的开裂主要发生在两个阶段：一是热处理过程（主要是淬火开裂）；二是在热处理后的精加工过程，如磨削和电加工（如电火花、线切割）过程。常见的开裂包括裂纹和断裂两大类。由于模具在淬火后产生开裂将使加工好的模具报废，给生产和经济造成很大损失，所以对此应予以高度重视。

模具淬火裂纹的种类及特点见表 4-24。

碳素工具钢水-油双液淬火后的开裂以边孔裂纹及交接面开裂最为常见，而各种合金钢模具则极少发生边孔淬裂。

表 4-24 模具淬火裂纹的种类及特点

种 类	产生原因及特点
纵向裂纹	又称为轴向裂纹,多因冷却过快、组织应力过大,以及原材料缺陷(如严重的带状组织)造成。柱状、轴类模具零件淬透时容易形成纵向裂纹
横向裂纹	截面较大的高碳钢模具零件未淬透时容易形成横向裂纹,裂纹产生于淬透层与未淬透的心部之间的过渡区
弧形裂纹	模具零件中的尖角、凹槽、内孔等部位未淬透时容易产生弧形裂纹
内孔壁纵向裂纹	这类裂纹主要出现在模具套筒类零件的内孔壁上,外端部看裂纹呈放射状
网状裂纹	一种表面裂纹,深度一般在 0.01 ~ 2mm 范围内。裂纹处于任意方向,许多裂纹相连构成网状。表面脱碳的高碳钢模具零件淬火后容易产生网状裂纹
应力集中部位裂纹	具有尖角、凹槽、切口、台阶等的模具零件容易在应力集中部位产生裂纹
截面急变处裂纹	当模具零件截面尺寸相差悬殊而又要求高硬度时,容易产生截面急变处裂纹
过热淬火裂纹	模具零件(特别是高碳钢和高合金钢)淬火加热温度过高,极易引起奥氏体晶粒长大,降低钢的强度和塑性,冷却时容易产生裂纹;当采用剧烈淬火冷却介质时产生裂纹的倾向更大
夹杂物裂纹	当模具零件材料夹杂物较多,分布不合理(如条状、网状分布)时,容易产生淬火裂纹

淬火开裂是模具的敏感部位在淬火冷却时产生的拉应力和压应力不均衡引起的。一般认为能够获得高硬度的工具钢产生淬火开裂的概率较大。

模具淬火时拉应力和压应力产生原因与过程如下：热态模具的冷却是按先表面后心部的顺序进行的。淬火硬度是由淬火得到的马氏体组织所决定的，所以要获得高硬度就必须得到马氏体组织。淬火马氏体组织的形成温度由材料成分所决定，通常为 180 ~ 220℃（ M_s 点）。冷却时，模具表面层最先达到 M_s 点，开始形成马氏体，体积膨胀，可是此时心部还未冷到 M_s 点，体积继续收缩，因此此时表面承受压应力，心部承受拉应力。当心部继续冷却，达到 M_s 点时，表面温度已接近室温。这时，表面的膨胀停止，心部却开始膨胀，由此产生了对表面的拉应力，而心部则承受着压应力。这种现象在处理尺寸较大或壁厚不均匀的模具时表现尤为明显。通常所说的变形和开裂都是由于上述所产生的表面拉应力引起的。假如模具有足够的强度（即该温度下钢的断裂强度）能够抵抗这个拉应力，开裂就不会产生。图 4-32 所示为模具淬火开裂过程图。

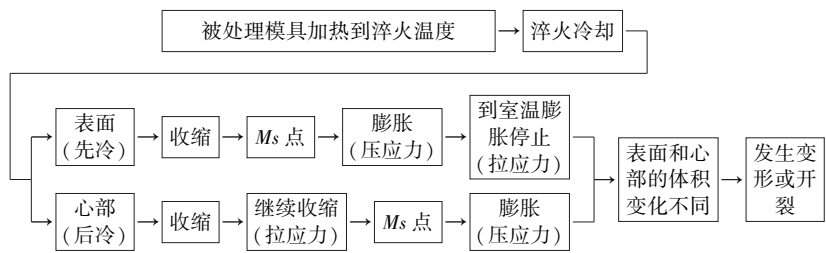


图 4-32 模具淬火开裂过程图

4.4.1 模具热处理开裂影响因素

影响模具开裂的主要因素有：钢的化学成分、模具的组织结构、钢的淬透性、模具的尺寸和形状、模具的表面粗糙度及切口状况、热处理工艺规范，以及热处理后的再加工（如磨削、线切割、电火花）等。其具体影响因素如下。

（1）钢的化学成分的影响 在钢中含有的所有元素中，碳对钢的力学性能影响最大。随着淬火钢组织中马氏体的碳含量的增加（一直到质量分数为 0.8% 为止），钢的破断抗力不断下降。因此，钢的淬裂倾向将随其碳含量的增加而增大。钢中的 S、P 等杂质元素形成的夹杂物较多时，将加大模具的淬火开裂倾向。合金元素的含量影响材料的淬透性，而淬透性的不同对形成裂纹的类型有着不同的影响，如完全淬透时易于形成纵向裂纹，而未淬透的钢件则易于形成弧形裂纹。钢中 Si 元素含量较高时能够引起钢件表面脱碳，如高速工具钢及一些合金钢等热处理时的表面脱碳能够使钢件的淬裂倾向增大，容易形成网状的表面龟裂。

（2）原材料缺陷的影响 模具的原材料缺陷（较严重的碳化物偏析、非金属夹杂物、疏松、内部裂纹、白点、皮下气泡等）往往是导致模具出现淬火裂纹的主要原因之一。

（3）热加工因素的影响 热加工（锻造、轧制、铸造）不当所造成的缺陷也会造成后续热处理时形成裂纹。

（4）模具结构特点的影响 模具淬火裂纹的形成倾向与模具的尺寸和形状等设计结构特点有关，如具有截面急剧变化或有尖锐槽口的模具都易产生淬火裂纹。

（5）淬火前的原始组织和应力状态的影响 钢的原始组织对加热时奥氏体晶粒度及其长大有影响。原始组织为细的球状珠光体时，因其加热时比较稳定，在向奥氏体转变时碳化物溶入得较缓慢，因此能够阻碍奥氏体晶粒的成长，即在正常淬火加热温度下可以保持较细小的奥氏体晶粒，且淬火后易于获得细密的马氏体组织，减小内应力，这对减少淬火裂纹十分有利；而原始组织为片状珠光体时则增大淬裂倾向。当然，如果原始组织中存在较严重的网状碳化物或碳化物偏析严重等缺陷，则都将增大淬裂倾向。

（6）加热因素的影响 淬火加热温度越高，钢的晶粒越趋向于长大，同时还会使钢的淬透性增加，并使得淬火冷却时产生的内应力相应增大及钢的破断抗力下

降, 导致模具开裂倾向加大。

(7) 冷却因素的影响 冷却因素对模具开裂影响很大。在马氏体转变区间内的冷却速度越快, 就越易于引起裂纹的产生。在生产实践中发现, Cr12MoV 钢制搓丝板从 1 030℃ 淬入 280 ~ 300℃ 硝盐中停留一段时间后 (分级淬火冷却) 取出, 由于操作失误而直接放入水中清洗, 造成模具因在水中快冷进行了马氏体转变, 形成了纵向裂纹。

有些工具钢, 特别是高碳工具钢, 淬火后往往保留有较多的残留奥氏体。为了减少其残留奥氏体数量, 有的工厂采用零下温度的冷却方法。在生产实践中发现, W18Cr4V 钢在 100℃ 热油中淬火后, 立即转入冰箱中进行冷处理, 结果有裂纹产生。这是由于在马氏体转变区间内快冷, 造成钢件表层和心部马氏体转变的不等时性所致。

(8) 模具中心硬度的影响 T10 钢 (或低合金工具钢) 模具如果淬火后中心硬度为 36 ~ 45HRC, 则容易形成内部弧形裂纹; 当中心硬度高于 46HRC 或低于 35HRC 时, 则不容易形成裂纹; 当中心硬度接近表面硬度时, 则容易形成纵向裂纹。

(9) 机械加工因素的影响 模具经机械加工后表面粗糙度高, 即表面有不同程度的加工刀痕时, 可能形成无数的细小应力集中场, 或模具非工作面 (如锻模型腔以外的四周) 处于锻造后不再进行切削加工的自由公差状态时, 由锻造加热产生的氧化皮痕迹或局部重叠、夹层等也可能成为应力集中场, 这些应力集中场往往是模具淬火后形成裂纹的发源地。

另外, 钢制模具在切削加工时也会产生很大的内应力, 如果不将其去除, 则在淬火加热过程中 (特别是高合金钢制造的复杂模具), 切削加工产生的内应力有可能与由于加热速度过快产生的内应力发生叠加而导致模具开裂。

通常钢厂供应的模具材料都是经过冷轧或热轧等塑性加工的。经过轧制的材料, 其纤维状组织会沿材料的长度方向延伸, 即具有方向性。材料的流线方向不同, 其力学性能不同, 且材料在轧制方向和垂直方向上的断面收缩率、冲击韧性和伸长率等差异很大。这种差异的存在, 主要是由于高硬度的碳化物呈条带状分布所致。冷作模具钢和高速工具钢中都存在各向异性, 而且这种差异很明显。因此, 在模具取料时必须严格注意材料的取向。材料的长度方向 (纤维状组织的流线方向) 应与工作时的主应力方向垂直, 只有这样, 材料的特性才能得到发挥, 特别是冲压模需要较高的韧性, 因此要更加注意材料的取向。正确的材料取向方法如图 4-33 所示。

如果材料的取向不正确, 如加工主应力方向与材料的长度方向一致, 则模具在使用时容易沿

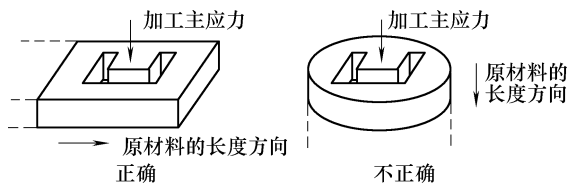


图 4-33 正确的材料取向方法

着碳化物流线方向开裂。对此,在材料购入和材料切断时就必须严格加以管理,如对材料做统一规定的标记。同时,严格控制原材料的带状组织等缺陷,也是减少模具热处理开裂的措施。

4.4.2 模具热处理开裂原因分析

造成模具开裂的原因主要有:设计结构不佳、材质差、锻造工艺不良、预备热处理不当、最终热处理不佳和机械加工不当等。

(1) 模具设计结构不佳 如模具薄厚不均、形状复杂、带尖角和螺纹孔、无圆角过渡等,这些部位会使热处理后热应力及组织应力过大,容易造成模具开裂。

(2) 模具材质差 模具的原材料缺陷往往是导致其开裂的主要原因之一。如果模具钢内部有严重的网状(或带状、链状)碳化物、发纹、皮下气泡、较严重的非金属夹杂物,则会使材料断裂强度降低,在模具热处理过程中容易产生开裂现象。

(3) 锻造工艺不良 如锻造加热温度过高、锻造变形量小、终锻温度高、锻造后冷却速度缓慢等,这些不良的锻造工艺会使锻造组织不佳,且球化退火时难以消除。如果终锻温度过低,则容易产生内部裂纹。

如果重载模具中的最大拉应力与流线方向垂直,则模具很容易发生早期脆性劈裂失效,其特征为断口粗糙呈纤维状、无光泽,无明显疲劳源及扩展区。

(4) 预备热处理不当 球化退火组织不均匀或球化不良,在加热温度偏高或保温时间过长时,容易引起奥氏体晶粒粗大,产生过热倾向,以致在淬火时容易产生开裂现象。

(5) 最终热处理不佳

1) 模具淬火加热温度过高,材料淬透性增大并造成过热或过烧,使淬火组织粗大,以致淬火冷却时内应力增大,并降低材料的破断抗力,加大模具开裂倾向。

应当指出,淬火温度过低,淬火后组织中有网状铁素体时,尽管铁素体组织有着较高的塑性,但因其强度很低,也会沿着铁素体网形成裂纹。残留铁素体数量越多,则这种不均匀结构的破断抗力越低,即使淬火时未出现裂纹,但在以后使用时也极易形成裂纹,如标准件模具中的60Si2Mn钢冲头等常在加热不足的条件下,内部存在网状残留铁素体,从而形成裂纹。

2) 加热或冷却过快。淬火冷却介质选择不当、在马氏体转变区冷却过快、淬火冷却操作不当(如冷却时间过长)均加大内部热应力,在模具薄弱处易于引起裂纹。淬火软点及表面脱碳也往往会引起模具裂纹。

3) 模具淬火后回火不及时或回火不足。有许多淬火模具的开裂不是在淬火冷却之后立即出现,而是当模具从淬火冷却介质中取出一定时间后才显现出来的,即产生了时效裂纹。如果模具淬火后能够及时回火降低淬火应力,便可以有效地防止时效裂纹。回火升温过快也易增加淬裂的倾向。

有时回火不足是由于模具淬火后心部还未冷到室温（心部温度为 $80 \sim 100^{\circ}\text{C}$ ）就转入回火炉中回火，在回火完毕冷到室温后，心部将出现了淬火马氏体（其体积分数可达 30% 以上），使模具的外表层中产生拉应力，在这种情况下如果对模具施以水冷或磨削加工，则极易使模具出现开裂或变形。

4) 模具返修未经中间退火而再次加热淬火时，奥氏体晶粒极易显著长大，使组织粗大和内应力增加，开裂倾向加大。

(6) 机械加工不当

1) 机械加工表面粗糙度值高，模具表面存在着的不同程度的加工刀痕，淬火冷却后可能会形成许多小的应力集中场；或模具表面有严重的脱碳层（脱碳的表面不能淬硬），这些都是引起淬火开裂的原因。

2) 机械加工应力过大。模具（特别是高合金钢的复杂模具）在淬火加热时，机械加工应力有可能与加热速度过快产生的内应力发生叠加而导致开裂。

3) 模具热处理后线切割、电火花加工工艺不当。模具热处理后进行电火花、线切割加工时，如果硬化层中存在高的拉应力和显微裂纹，则易产生开裂。

4) 模具热处理后，进行磨削加工时，如果磨削工艺不当（如进给量大、冷却不良、砂轮粒度选择不当等），易产生磨削裂纹。

(7) 残余应力过大 当模具中存在机械加工应力或冷塑变形应力时，如果淬火加热前未将其消除，则在模具的薄弱处容易诱发裂纹。

4.4.3 防止模具开裂的措施

在模具制造过程中，为了防止模具开裂，应根据模具的形状、尺寸、技术要求及淬裂倾向等，选择适当的、质量优良的钢材，正确进行模具毛坯材料的取向、锻造及预备热处理，保证机械加工质量，制定合理的热处理工艺规程，并进行正确的热处理操作等。

1. 防止模具开裂的措施

(1) 正确选用钢材 一般来说，碳素工具钢中含碳量高的比含碳量低的开裂倾向要大，合金工具钢比碳素工具钢的开裂倾向要小。对大型复杂模具应选用淬透性好的模具钢。一般情况下，钢中合金元素含量越多，则它的淬透性越大，且所需的临界淬火冷却速度越小，即可以用较温和的淬火冷却介质使钢进行淬火冷却时形成较小的内应力，以避免形成淬火裂纹。而钢的淬透性指标，一方面可以为设计者在考虑模具热处理后的硬度能否满足工作状态使用性能的要求时提供依据；另一方面，在衡量模具淬火过程形成裂纹敏感性时，可以作为参考。

(2) 严格控制原材料的内在质量 如果模具钢坯料中有缩孔、夹层、白点及严重的树枝状偏析等缺陷，则在加热和锻造时易于产生裂纹。为了避免锻造加工产生裂纹，在钢材投入生产前，应首先对锻坯进行一次低倍的热酸蚀检查。对于有较严重的碳化物偏析的钢材，可以通过加大总的锻造比或增加镦粗与拉伸次数来改善

碳化物的不均匀性,从而减少模具钢热处理的开裂倾向。

(3) 正确设计模具 改进模具结构、合理确定技术条件非常重要。模具各部分的壁厚要尽量均匀,减少截面尺寸的急剧变化。设计模具形状和尺寸时应当注意:①如果既对防止裂纹有必要又不影响其使用性能,则可将模具较厚的部分和较薄的部分先分别加工成形,然后再装配在一起;②为了减少淬火应力,在不破坏整体结构的基础上可附加工艺孔,或将盲孔改成通孔;③大型模具也可以制成中空的结构。如图4-34所示就是利用对壁厚不均匀的模具增开工艺孔,来增加冷却均匀性,减少开裂倾向。

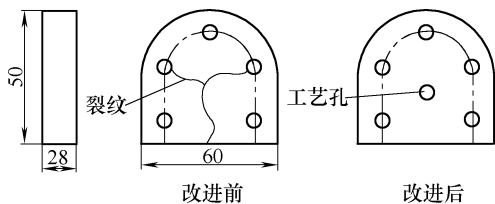


图4-34 模具增加工艺孔减少
开裂倾向的示意图

模具在设计形状时还要避免有尖锐的棱角,因为淬火时在尖锐棱角处容易形成应力集中,以至引起开裂,或者在使用过程中因尖角处的应力集中引起早期疲劳破裂。

此外,合理地确定技术条件也是减少淬火裂纹的办法之一。例如,局部硬化或表面硬化即可满足使用性能要求的模具,尽量不要整体淬火;对于整体淬火钢件,局部可以放宽要求的,尽量不强求高硬度。图4-35所示为T10钢制冲模(凸模),要求硬度为58~62HRC。如果要求工作刃口(A面)和装夹面(B面)硬度一致,则淬火冷却时极易在B面的螺纹孔处产生弧形裂纹。实际上,该模具并不需要整体硬度一致,在刃口硬度满足58~62HRC的前提下,其余部分的硬度为30~35HRC即可。因此,在淬火时只要根据A面的有效尺寸,控制好其在水中的停留时间,并适当地降低B面的冷却速度,便可减轻淬裂倾向。

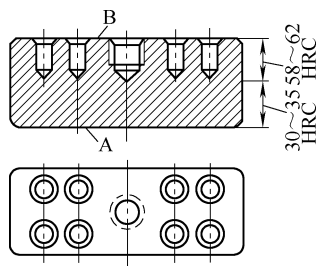


图4-35 冲模(凸模)

模具开裂多数是由在冷却时产生的拉应力和压应力不均衡而引起的,所以设计模具时对其结构、形状必须予以特别的注意,应尽量避免尖角并使得壁厚均匀,如图4-36所示。实际上,要求所有的模具设计完全达到理想的形状并不现实,但可以通过选择合适的材料和热处理方法来弥补形状结构上的不足。当然,即使采用空冷钢,由于形状、结构存在缺陷或热处理操作不当也会产生开裂。因此,在考虑热处理操作能否产生开裂的问题时,一定要和模具形状的影响紧密地联系起来加以考虑。

(4) 合理选用锻造方法 选用锻造方法时应考虑模具的工作要求和原材料的情况。一般来说,对于较小锻件或心部质量要求不是很高的模具锻件可采用轴向反复锻拔,通常高合金钢需不少于三火(即三次加热三次锻拔成形);对于工作部位在心部的某些模具的锻件,尤其像冷锻凹模等工作部位不太深的模具,可采用反复

锻拔，沿纤维方向横向拔出成形；对内部及外部质量要求很高的锻件（如冲模、拉深模），可采用十字锻拔和三向锻拔方法（即对钢料轮番从三个方位进行反复换向锻造）。锻拔的次数取决于碳化物不均匀的级别和对锻件碳化物不均匀度级别的要求，一般每锻拔三次可提高 1~2 级。采用六面锻造方法（该工艺是三向锻粗和拔长的联合工艺，每次锻拔都要有一定的锻造比，以使共晶碳化物逐步变成无规则的均匀分布），有利于改善莱氏体钢内部存在的粗大枝晶状共晶碳化物有效。

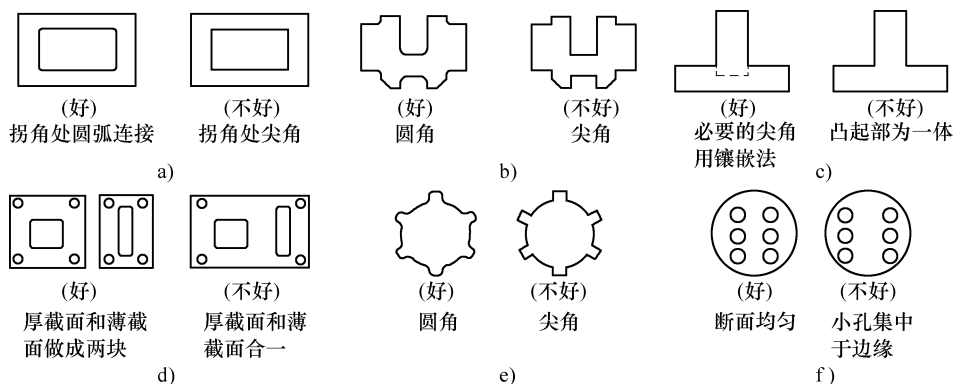


图 4-36 模具形状设计好与不好的示例

a) 内腔 b) 机械零件 c) 凸起处 d) 厚截面和薄截面 e) 内部或外部凸起或沟槽
f) 位置的设计

锻造比是指锻造坯料在锻造前后的横截面积之比。锻造比越大，则杂质破碎细化程度越大。如果锻造比太小，则不能改变碳化物的形状及分布状态。当碳化物级别高时，应使总的锻造比（反复锻拔时总的锻造比等于各次锻造比之和）大于 6（对于高合金钢，总的锻造比一般选取 8~10）。由于工具钢的热变形抗力比普通结构钢大好几倍，因此反复锻锻时每次的锻造比应为 2 左右，不宜太大。

改进锻造工艺与操作以及球化退火工艺，可消除网状、带状和链状碳化物，改善球化组织的均匀性。在生产中常见的 Cr12 型钢成为豆腐渣状或因内裂而报废，都是因锻造工艺不当而造成的。

(5) 进行去应力退火 对在机械加工后或冷塑变形后的模具进行去应力退火（一般在 550~650℃ 保温 2~4h），可以消除内部残余应力，并使其在后续加工过程中（如磨削、电加工）减少开裂倾向。

(6) 合理进行预备热处理 如选用正确的退火（如球化退火）及调质工艺等。钢件淬火前的原始组织和应力状态对形成淬火裂纹有一定的影响，因此为改善其应力状态并为后续淬火奠定良好的组织基础，应当正确地进行钢件的预备热处理。对截面尺寸较大（直径或厚度 50mm 以上）、容易形成弧形裂纹的高碳钢制件，可进行正火处理（尤其组织中有网状碳化物时），以获得较小的片状珠光体；对截面尺寸较小的高碳钢和低合金工具钢件，可采用球化退火工艺，以获得球状珠光体组织。

实例 3Cr2W8V 钢韧性、塑性较差，在生产中易产生裂纹，原锻造后退火工艺路线为：500~600℃装料→(790±10)℃×2h 加热→空冷至 550℃+升温至 600℃均温后保温 2h→空冷至 550℃+再升温至 660℃均温后保温 25h→空冷至 400℃后以 20℃/h 冷至 200℃出炉。退火后在表面清理检查时发现纵向裂纹，裂纹都是由表面向内扩展，裂纹深度大于其半径。

现采用 (790±10)℃均温后保温 2h，然后以 ≤30℃/h 冷却至 550℃，再升温进行去氢退火，则可完全可避免马氏体的产生，不但能够使锻件获得粒状或球状珠光体组织，还避免了裂纹的产生。

(7) 合理制定热处理工艺规范 适宜的热处理规范包括：合理装炉（保证加热均匀）、正确加热（对高碳高合金钢及截面变化大的模具应缓慢加热、合理保护以防止氧化脱碳）、选用合理的淬火温度和保温时间、采用合适的淬火冷却介质及冷却方式（如采用 PAG 水基淬火冷却介质并采用预冷淬火、双介质淬火、低温淬火、分级淬火、等温淬火及复合淬火等冷却方式）。生产实践证明，淬火时使钢在马氏体转变区域内缓慢冷却，是防止裂纹形成和提高模具使用寿命的重要措施之一。

1) 对形状复杂的模具应采用石棉堵塞螺纹孔，包扎危险截面和薄壁处，并采用分级淬火或等温淬火来防止裂纹的产生。

对高碳钢模具的淬火，一般都采用双介质淬火法，即水淬、油冷的工艺方法。由于模具形状各异，且分布着各种孔洞（如固定和紧固模具用的光孔、阶梯孔或螺纹孔等），因此对高碳钢模具来说，有选择地堵孔极为重要。这样做的目的是使模具各部分冷却速度尽量均匀，以防残余应力过大，超过该处的断裂强度而产生裂纹，使模具报废。对此，可采用以下几种堵孔方法：①黏土堵孔方法，即选用较干燥（有一定粘结力的前提下）且黏性较大的黏土泥堵住孔洞，再分层用锤子砸紧实，对于光孔及阶梯孔，宜砸成铆钉状。②耐火泥堵孔方法，即用水玻璃与耐火泥搅拌均匀（搅拌成比糨糊状略干即可）后堵孔，在高温加热时，孔的两端水玻璃与耐火泥会膨胀成铆钉状，起固定作用，效果较好。③棉绳堵孔方法，即用石棉绳堵孔，最好在石棉绳中浸少许水玻璃，若没有水玻璃，用干石棉绳也可以，但必须使石棉绳在孔中相互牵连拉扯，为了达到这一目的，所用石棉绳的量要大于将该孔堵紧实时所需要的量，并用直径为孔径 1/2 的圆钢棒和锤子将其砸紧实。

为了避免形状复杂模具的薄壁处在加热时过热或在冷却时过冷，生产现场也常用铁皮包扎或石棉绳包扎薄壁处的方法来减缓其加热或冷却速度，以防止裂纹的产生，如图 4-37 所示。

2) 返修或翻新模具时需进行退火或高温回火。

3) 模具在淬火加热时应采取预热措施（尤其是大尺

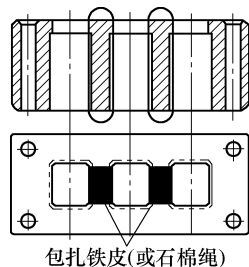


图 4-37 用铁皮包扎的
冲压凹模示意图

寸和高合金钢模具最好采用分段预热方法，如合金钢第一次预热 500℃ 左右，第二次预热 800℃ 左右）且冷却时采取预冷措施，并选择合适的淬火冷却介质。

4) 应严格控制淬火加热温度和时间，防止造成模具过热和过烧。在保证模具性能要求的前提下，尽量采用下限淬火加热温度，尤其对具有薄边的碳素工具钢模具或有内尖角的合金钢模具，这样做有显著降低淬裂倾向的效果。例如，T10A 钢凸模在 830℃ 加热双液淬火后严重开裂，而改为 780℃ 加热后，在同样淬火冷却介质中淬火不再开裂；用 45 或 50 钢制作的小截面模具辅助零件，常规采用 820 ~ 840℃ 加热淬火，易于开裂，后改为 790℃ 充分透烧淬火（即临界淬火工艺），降低了淬裂的废品率。

5) 采用合适的冷却方式。模具的淬火开裂大多发生在冷却阶段，因此模具在淬火冷却时应尽可能采用缓慢的冷却方法，如采用热介质（热油、碱浴、硝酸盐浴等）分级或等温淬火，以减少变形与开裂倾向。

6) 模具淬火后应及时回火，保温时间要充分。淬火后的模具最好在其冷至 70 ~ 80℃ 再进行回火，以防开裂。同时，必须保证充分回火。实验证明，碳素工具钢在 200℃ 回火 1h 和 2h，应力分别消除 50% 左右和 75% ~ 80%；在 500 ~ 600℃ 回火 1h，应力消除 90% 左右。因此，必须充分回火，以防在热处理后的磨削中产生裂纹或开裂。对合金钢，在回火时还会发生残留奥氏体向马氏体的转变，因此只有充分回火，有时要多次回火（如高合金复杂模具应回火 2 ~ 3 次）才能消除残余应力，得到所需的组织和性能，并避免后续的磨削和电加工中的变形和开裂。此外，还要正确选择回火后的冷却方式，并避免在回火脆性区回火。

(8) 正确制定淬火后的机械加工工艺规范

1) 制定正确的磨削工艺，选择合适的砂轮、切削液及磨削进给量，可减少加工应力，避免产生磨削裂纹。例如，T10A 钢制冷镗螺钉光冲模，其型腔深而陡，使用中经常发生早期塌陷失效，寿命小于 4000 次，经分析，其原因是由于磨削型腔时砂轮进给量过大，使表面烧伤软化，导致表面出现网状裂纹，后改进磨削工艺，光冲模寿命显著提高，稳定在 3 万次以上。

2) 改进模具电火花加工工艺，并进行去应力回火，以防止裂纹产生。

3) 改进线切割加工工艺。线切割加工后，模具表面会形成一定厚度的变质层。变质层非常不稳定，它的存在不但使模具表面产生非常大的拉应力，而且导致模具晶粒粗大，强度低，极易形成细微裂纹，甚至有时受到轻微冲击就会开裂，所以对模具寿命非常不利。对此，如果采用线切割后再精磨切割面的方法来消除变质层。则模具的寿命可以大大提高。

为了提高模具寿命，必须在线切割加工后以略低于原来的回火温度再回火一次来提高模具的韧性。线切割加工后再次进行回火处理，在一定程度上能使粗大晶粒组织得到细化，这对消除应力、防止开裂、提高模具的耐磨性及寿命无疑是一种重要的热处理工艺措施。当然，如果其他条件允许，把线切割电加工放在热处理之

前,更有利于改善加工表面的质量。

(9) 模具淬火裂纹的补救方法 如图 4-38 所示,在锻模燕尾部位产生裂纹。建议按下列情况进行处理。

1) 若上模的裂纹长度小于 10mm,或下模的裂纹长度小于 35mm,允许经修补后使用;若 $a:b \geq 2$,裂纹深度在 25mm 以内时,可以补焊;若 $a:b \leq 2$,裂纹深度在 35mm 以内时,也可以补焊;如果裂纹情况超出上述规定,则必须报废。

2) 裂纹应全部切除,直至完全露出金属面为止,切口宽度最小不得小于 22mm (见图 4-38)。此外,需注意切口及切槽应便于补焊。

3) 补焊前,锻模需预热到 450 ~ 550℃。

4) 补焊时,用直流或交流电焊机均可。使用的焊条应符合或接近被补焊锻模的化学成分和性能。焊条直径选择 $\phi 4 \sim \phi 5\text{mm}$ 即可。用 $\phi 4\text{mm}$ 和 $\phi 5\text{mm}$ 焊条时,其电流强度可分别选 160 ~ 180A 和 180 ~ 200A。

5) 补焊后立即放入 450 ~ 550℃ 炉中进行预热,然后升温到 650 ~ 680℃ 进行退火。

6) 检查合格后应先进行机械加工整形,然后再进行正常的淬火和回火处理。

2. 防止模具热处理开裂的措施与实例

实例 1 带尖角的薄壁模具 (尺寸为 70mm × 80mm × 60mm), 材料为 CrWMn 钢, 要求淬火与回火处理。

(1) 原工艺及模具开裂情况 按普通工艺淬火后,模膛尺寸经常胀大 0.04 ~ 0.06mm 或开裂而报废。

(2) 改进措施与效果 采用淬火加热后在 200 ~ 210℃ 热油中等温停留 30min, 然后随炉冷却,一般只胀大 0 ~ 0.02mm, 消除了淬火裂纹, 达到了技术要求。

实例 2 带尖角的薄壁模具 (见图 4-39), 材料为 CrWMn 钢, 要求淬火与回火处理。

(1) 原工艺及模具淬火裂纹情况 经一般工艺淬火后,常发生尺寸胀大并在尖角处出现裂纹 (见图 4-39)。

(2) 改进措施与效果 将模具装入 RX3-15-9 型箱式电阻炉中,随炉升温,淬火加热 810 ~ 830℃ × 2.5h, 然后采用分级淬火 (160 ~ 180℃ 碱浴中等温 15min, 转入 160 ~ 220℃ 油炉中冷却)。经检验,模具硬度为 59HRC, 变形为 0.01mm, 无裂纹产生。

实例 3 大型压模, 外形尺寸 $\phi 371\text{mm}$ (外径) × 70mm (厚度), 在模具上均布 24 个小槽 [13mm (宽度) × 12mm (深度)] 和 24 个 $\phi 13\text{mm}$ 通孔, 以及多

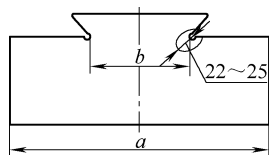


图 4-38 锻模裂纹
切除示意图

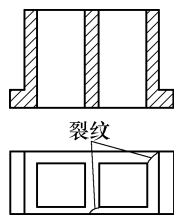


图 4-39 CrWMn 钢制薄壁
模具的淬火裂纹示意图

个其他通孔，材料为 45 钢，要求整体淬火与回火处理，硬度为 38~43HRC。

(1) 模具特点 该模具特点是形状复杂、多孔多槽且截面尺寸厚薄相差很大，模具尺寸较大、较重、操作不方便，常规淬火容易出现淬火裂纹。

(2) 措施 采用断续淬火法解决淬火开裂问题。其工艺过程如下：为了防止薄壁处产生过热，用石棉绳堵塞全部边孔。在 850℃ 的 RX3-60-9 型箱式炉中保护加热，透烧后预冷至 810~830℃。淬入水中，停留 2~3s 后提出在空气中冷却 1~1.5s，重复 3 次。出水后检查硬度较高，再在 350℃ 保温 1h（回火）后空冷。检查质量合格且无裂纹。

实例 4 铝合金挤压模，外形尺寸为 $\phi 270\text{mm}$ （外径）/ $\phi 170\text{mm}$ （内径） $\times 210\text{mm}$ （厚度），材料为 H13 钢，要求淬火与回火处理。

(1) 模具产生淬火裂纹情况 采用真空炉加热，1 030℃ 保温缓冷后淬入 35℃ 油中，冷却到 80℃ 左右出油空冷，在室温下放置 1h 后，其中一件沿着模具表面的沟槽开裂。

(2) 裂纹原因分析与改进措施

1) 冷加工时刀痕的影响。检查发现，裂纹是沿模具表面的沟槽开裂，其沟槽底部过渡圆角偏小。

2) 油冷时淬火油温较低，应采用 60℃ 以上油温淬火冷却。

3) 模具出油温度低，应在 150℃ 左右出油。

4) 出油后应及时回火。

实例 5 采用正确的热处理操作，防止淬火裂纹的产生。

1) 用石棉、耐火泥将一些非工作孔、型腔或截面尺寸剧烈变化的部位堵塞（见图 4-40），使其冷却减慢或均匀，以防开裂，减少变形。

2) 在模具截面变化悬殊处用铁丝、石棉、耐火泥或铁皮加以绑扎（见图 4-41），以防开裂，减少变形。

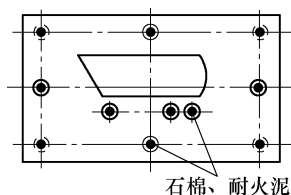


图 4-40 采用堵塞模具上小孔的方法防止开裂示意图

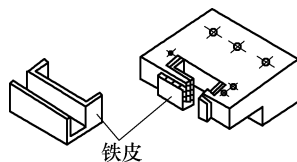


图 4-41 采用绑扎方法防止模具开裂示意图

4.4.4 模具热处理开裂原因分析与对策的典型实例

实例 1 Cr12MoV 钢制冲模块（见图 4-42），尺寸为 60.5mm $\times$ 65.5mm $\times$ 196mm，要求硬度为 60~64HRC。

(1) 原热处理工艺及模具开裂情况 在 ZCT-65 型真空淬火炉中按图 4-43 工艺处理后, 硬度为 63~64HRC。在线切割时发生严重开裂现象, 如图 4-42 所示。

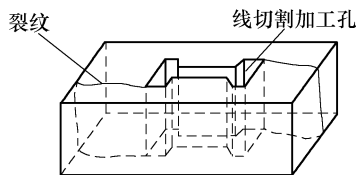


图 4-42 模块线切割后的开裂情况

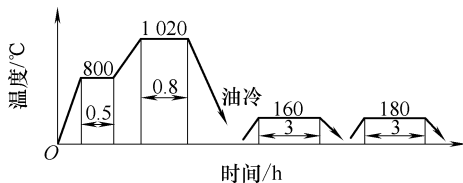


图 4-43 模块的原热处理工艺

(2) 裂纹分析 开裂的特点是裂纹贯穿整个模块的纵向且与线切割路线相交, 其主要原因为回火不充分, 应力消除不彻底, 以致在线切割过程中引起模块的开裂。

(3) 对策 为了能够彻底消除淬火时产生的相变应力和热应力, 把回火温度提高到高于二次硬化区的温度 (见图 4-44)。经此处

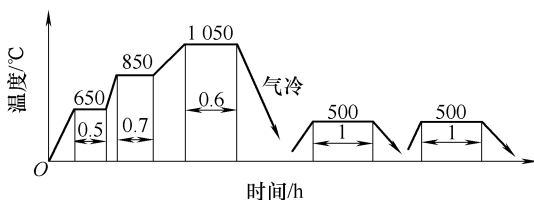


图 4-44 改进后的热处理工艺曲线

理, 硬度保持在 60~61HRC, 可消除模块的开裂现象。

实例 2 Cr12 钢与 Cr12MoV 钢制模具断裂原因分析及对策。

1. Cr12 钢模具断裂分析

大型模具, 外形尺寸为 700mm×300mm×50mm, 材料为 Cr12 钢, 要求硬度为 54~58HRC。

(1) 热处理工艺 模具在具有保护气氛的井式电炉中加热, 加热温度为 980℃, 保温时间为 60min, 出炉后淬油, 在 180~200℃出油后空冷, 淬火后立即放入 400℃回火炉中保温 4h, 回火后硬度检测为 55HRC, 符合技术要求。

(2) 模具失效原因分析 该模具经磨削后投入使用时发现多处裂纹, 通过对模具材料的化学成分和金相分析, 结果如下:

1) 化学成分 (质量分数): C1.69%, Cr10.11%, S0.023%。其中 C 和 Cr 含量不符合国家标准。

2) 金相组织为针状马氏体, 级别为 6 级并伴有大量网状分布的碳化物。经现场调查, 模具锻造后未进行球化退火。

断裂原因分析如下: 由于 Cr12 钢模具在锻造后未进行球化退火, 致使模具钢内部粗大的晶粒未得到细化, 锻造过程中产生的网状碳化物也未能很好地消除, 因此模具在淬火、回火后产生针状马氏体并伴有网状碳化物, 这是模具断裂的主要原因。

2. Cr12MoV 钢模具的断裂分析

模具由 Cr12MoV 钢直接下料加工而成, 其外形尺寸为 $\phi 180\text{mm} \times 250\text{mm}$, 硬度

要求为 56~60HRC。

(1) 热处理工艺及质量检验 其热处理工艺如图 4-45 所示。淬火加热在盐浴炉中进行, 淬火后立即进行回火。淬火、回火后的硬度为 58HRC, 符合技术要求。

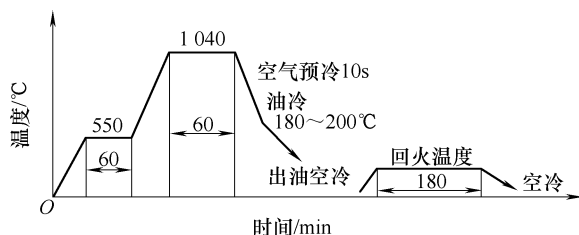


图 4-45 Cr12MoV 钢模具热处理工艺曲线

(2) 失效原因分析 模具在热处理后产生断裂。通过对断裂模具的材料进行化学成分和金相分析, 结果如下:

1) 化学成分(质量分数): C1.60%, Cr10.82%, Mn0.439%, V0.226%, S0.008%。其成分基本符合国家标准。

2) 原材料金相组织中存在着明显的碳化物偏析(呈带状分布)。

因此, Cr12MoV 钢原材料中的碳化物严重偏析是造成模具热处理后断裂的主要原因。

3. 防止 Cr12 钢与 Cr12MoV 钢制模具断裂的措施

1) Cr12 钢、Cr12MoV 钢均属于莱氏体钢, 铸态下有共晶组织存在, 需要进行充分热加工, 才能将网状共晶碳化物打碎。这两种钢由于碳化物数量较多, 虽经钢厂的热加工, 但往往仍存在着一定的碳化物偏析, 以致使钢的力学性能呈各向异性且易引起热处理后的变形及断裂。因此, 在使用这两种钢制作较复杂的模具时, 应对原钢材进行反复的锻粗、拔长, 以消除钢中碳化物的不均匀性, 这也有利于减少模具机械加工后的热处理变形与断裂倾向。

2) 锻造后的 Cr12 钢、Cr12MoV 钢必须进行球化退火, 为最终热处理作好组织准备。Cr12 钢的球化退火温度为 840℃, 保温一段时间后炉冷至 730℃, 再保温一段时间后随炉冷至 550℃ 出炉空冷。Cr12MoV 钢的球化退火温度为 860℃, 保温一段时间后炉冷至 730℃, 再保温一段时间后炉冷至 500℃ 出炉空冷。球化退火后的金相组织为基体上均匀分布合金碳化物的索氏体。

3) 为节能和提高产品质量, 可采用锻造余热淬火及高温回火来代替锻造后的球化退火工艺。其工艺规范如下: Cr12 钢、Cr12MoV 钢在停锻后稍作停留, 使奥氏体得到回复并开始再结晶, 然后立即淬火, 淬火后立即将毛坯在 750℃ 左右高温回火 2h。完成此过程后即可进行机械加工。由于其内部金相组织均优于球化退火后的组织, 因此无需再进行球化退火。

4) 固溶双细化处理。该工艺完全利用热处理方法, 使碳化物细化及棱角圆整

化,同时使奥氏体晶粒超细化。其工艺(Cr12钢系)如图4-46所示。

实例3 3Cr2W8V钢经工频炉冶炼、电渣重熔、锻造成形、球化退火及机械加工成形后模具尺寸为120mm×120mm×200mm。

(1) 裂纹产生原因分析 模具经淬火、回火后发现表面有纵向裂纹,裂纹源大致在模具型腔倾角处,并向两端扩展。金相检

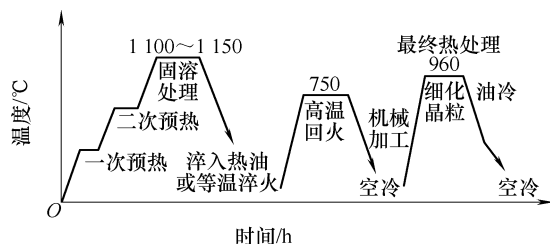


图4-46 Cr12钢系模具的固溶处理工艺

查后发现,模具表面有严重脱碳层,总深度达0.14mm,模具的金相组织为长针状回火马氏体+回火托氏体,晶粒呈六角形,模具严重过热。在模具型腔处取样,在低倍显微镜下观察,金相组织除有粗针回火马氏体+回火托氏体外,还观察到有树枝状分布且不易浸蚀的白区,该区是马氏体组织,估计是高碳高合金偏析区。电渣重熔的钢锭容易产生树枝状偏析,在钢锭中心有大量亚稳定共晶碳化物呈树枝状分布。钢锭一般直接锻造成形,变形量不大。晶界有大量共晶碳化物偏聚,未能破碎均匀化,尤以钢锭中心为甚。模具毛坯成形时,钢锭的横向剖面锻造成型腔所在面,有呈树枝状分布的亚稳共晶碳化物暴露在型腔表面。超高温加热奥氏体化时,碳化物溶解,但很难均匀化,形成树枝状分布的高碳高合金区,该区淬火组织不易被回火,制样时难于被浸蚀,故在金相组织中留下树枝状分布的白斑区(即白区)。综上所述,模具淬火开裂的原因如下:①淬火严重过热,热处理应力很大;②碳化物呈树枝状分布,淬火组织极不均匀,形成附加的组织应力,尤以模具型腔表面为甚;③模具表面严重脱碳,促使表面形成拉应力;④模具型腔加工后有倾角,形成应力集中,首先形成裂纹源,然后向两端扩展。

(2) 对策 严格执行热处理工艺规范,防止过热,检查控温仪表系统;控制原材料质量,对存在不良碳化物的模具材料进行合理锻造,并进行球化退火处理,以改善组织结构;模具加热时应采取保护措施,以防氧化与脱碳;合理设计与加工模具,过渡应圆滑,圆角半径不得过小。

实例4 T10A钢模具在线切割时发生开裂。对此,进行分析并提出改进措施。

(1) 开裂原因 经分析,开裂是由于淬火回火残余应力与线切割二次淬火应力叠加造成的。

(2) 对策

1) 淬火并低温回火的模具可用高频振动(如WZ-86A振动时效仪)消除残余应力,一般可降低20~50MPa。振动时效还可以提高材料的变形抗力,改善尺寸精度的稳定性。

2) 也可以采用(800±10)℃加热淬火,-130℃×60min冷处理后,立即返回50~60℃热水中,经30~60min升温,再进行200℃×90~120min回火。冷处理除

解决线切割开裂外，还使模具硬度提高1~2HRC。

实例5 在模具磨削过程中常出现磨削缺陷，尤其是在对渗碳、硫氮共渗等表面硬化模具和高碳高合金钢模具进行加工时，更容易产生磨削裂纹，甚至产生加工变形（薄壁件），致使模具报废。磨削裂纹的产生不仅与磨削加工工艺及操作有关，而且还与热处理工艺、操作及材质有密切联系。

（1）磨削时产生的应力影响

1) 磨削应力。磨削过程中，砂轮的砂粒刃口与模具进行摩擦切削，刃口前面的模具金属受挤压与撕裂，刃口后面的模具金属与砂轮剧烈摩擦，使晶粒受拉和滑移，引起金属的弹性和塑性变形。当切削停止后，金属表面在弹性变形力的作用下力求恢复原位，故出现平行于磨削轨迹的拉伸应力。磨削的进给量越大，刃口切削能量越差，则残余切削应力越大。

2) 切削热应力。磨削过程中，金属塑性变形和砂轮与模具剧烈摩擦会产生大量的热，再加上磨削所消耗的功几乎80%变成热，上述热量可使金属模具表面温度升高到800℃以上，并向模具内部扩散。模具表面受热特点是瞬时（约0.01s）快速升温，形成很陡的温度梯度，随即又以800~1000℃/s的速度冷却。受热后表层金属体积膨胀，但受到内层冷金属的制约，引起塑性变形；当急剧冷却时，产生残余拉应力，即磨削热应力。温升越高，金属导热性能越差，温度梯度越陡，则热应力越大。

3) 组织应力。在磨削过程中产生的磨削热使模具表面温度升高，组织也伴随着发生转变。当表面温度低于模具材料的 A_{c1} 温度时，模具表面组织被高温回火而发生体积收缩，使表层产生附加拉应力。当磨削温度高于 A_{c1} 时，模具表面出现二次淬火层和高温回火层。当二次淬火层中残留奥氏体的体积分数大于50%时，表面都为残余拉应力；当残留奥氏体的体积分数小于50%时，拉应力移向次表层的高温回火层。

（2）模具材质的影响 钢中组织不同，热导率不同。奥氏体和碳化物的热导率最低，而马氏体的热导率又随着含碳量及合金元素含量的增加而降低。残留奥氏体和碳化物最多、马氏体中含碳量最高的模具钢首推Cr12钢系，其对磨削热的热导率最差，磨削时温升高，磨削应力也高，最容易产生磨削裂纹。因此，磨削积热除了与磨削工艺有关外，还随着材质的不同而变化。

钢中网状碳化物、带状碳化物、共晶碳化物和杂质等不仅本身断裂强度和导热系数低，而且形成切口效应，磨削应力大时最容易导致磨削裂纹的出现。

（3）热处理工艺的影响 提高模具淬火加热温度会增加马氏体中碳及合金元素的含量，提高残留奥氏体的份额，增加马氏体针的长度和微裂纹的数量，并大幅度增加内应力和材料脆性，导致磨削时出现裂纹。实验证明，随着淬火加热温度的升高，磨削裂纹出现的概率也相应增加。同时，若存在过热的粗大马氏体，则即使轻微磨削也极易出现磨削裂纹。

回火温度太低,保温时间太短,回火次数太少,残余热应力高,则出现磨削裂纹的概率增加。

试验证实,经淬火并冷处理的 Cr12MoV 钢模具,回火后在以正常磨削加工工艺磨削时,通常不会出现磨削裂纹,这是因为冷处理后基本上消除了残留奥氏体,且经充分回火以后残余应力较小的原因。

(4) 磨削裂纹的检查与判断 磨削裂纹较粗时,可用放大镜检查出来。而细小裂纹目视检测困难,可用磁粉检测仪或荧光检测仪检查。金相检查也可以检测磨削裂纹,而且可检查裂纹深度。检查时必须垂直于磨削面切取试样,经抛光浸蚀后观察裂纹处附近金相组织情况,以及裂纹的深度及走向。

磨削裂纹形成的原因一般是因磨削加工工艺不当。磨削裂纹一般都呈有规律的分布,细小、深度浅(一般小于 0.5mm,终止于高温回火层与中心组织交界处附近)、密集,并且与砂轮磨削方向有一定的关系。在磨削裂纹区一般都存在磨削烧伤情况。在磨削加工工艺正常情况下,因前期的热处理工艺不当,也会产生磨削裂纹,这是由于淬火内应力太大,导致磨削时出现裂纹。此时的裂纹比较粗长,开口较宽而深,裂纹分布和走向与砂轮磨痕走向无关。经无损检测,裂纹周围无烧伤痕迹,显微组织中也观察不到回火烧伤和二次淬火烧伤层。

模具原材料内部组织不均匀,如碳化物呈网状分布时,也容易在磨削过程中沿脆性碳化物出现磨削裂纹。

(5) 对策

1) 严格检查模具钢材质,如检查网状二次碳化物、共晶碳化物堆积、碳化物带状偏析、非金属夹杂物、疏松、化学成分、内部微裂纹等。

2) 制订合理的热处理工艺,并按操作规程执行,防止过热。可采用低温硝盐或中温盐浴分级冷却;及时充分回火(最好回火 3 次),以消除或缓解热处理应力;冷处理可减少残留奥氏体数量,减少磨削裂纹出现的概率。

3) 正确制订磨削工艺,防止过量磨削(磨削吃刀量过大和工件移动速度过快是造成过量磨削的主要原因)。最好粗磨时吃刀量小于或等于 0.03mm,精磨时吃刀量小于或等于 0.02mm。最好选用中软 SA 单晶刚玉砂轮磨削莱氏体钢。磨钝的砂轮要及时用金刚石进行修整,以保持刃口锋利。另外,由于磨削切削液对模具可起到冷却、冲洗切屑、防止砂轮孔穴堵塞等作用,因此要选择冷却性能好、有表面活性剂和富有润滑效果的切削液。

4.5 模具退火和正火缺陷分析与对策

退火和正火作为模具钢热处理的基本工艺,在生产实际中应用广泛,尽管多作为预备热处理,但其作用是不可忽视的。退火和正火常见处理的缺陷分析及对策见表 4-25。

表 4-25 退火和正火处理的常见缺陷分析及对策

缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
表面熔化	控温失灵、严重超温	检查测温热电偶、仪表是否正常工作,测温位置是否合理	已经熔化的模具只能报废
	加热温度过高,造成晶界局部熔化	严格执行工艺规范	
脆性增大	退火加热温度超过晶粒长大温度、保温时间长	严格执行退火工艺	对晶粒已经长大的亚共析钢采用正常的温度进行正火或完全退火重新处理
	原始组织中的碳化物网未消除	退火前进行合理锻造(如六面锻造),将碳化物击碎	
	过共析钢退火温度高于相变点 $A_{c_{cm}}$,产生网状碳化物,以及冷却时过于缓慢所致	严格控制退火温度及冷却速度	对已产生网状碳化物的过共析钢模具正火后再重新退火
	加热温度过高、冷却速度快致使出现非珠光体组织,如贝氏体等	严格控制加热温度及冷却速度	对已出现非珠光体组织的模具重新进行退火处理
硬度过高	加热温度偏低,保温时间短	严格执行正火、退火工艺规范	按照正常的工艺规范重新进行退火处理。
	等温退火的温度过低	适当提高等温退火的温度	如果组织符合要求,仅硬度偏高,则采用在 $A_{c_1} - 20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 温度正火后再重新退火
	冷却速度过快	适当调整冷却速度	
	应该采用等温退火的钢但未采用该工艺	采用等温退火工艺	
球化退火时珠光体球化不良	原始组织中碳化物偏析严重、粗大或呈网状	采取合理锻造工艺(如六面锻造),击碎碳化物	重新进行球化退火或改用循环球化退火
	球化退火工艺规范选择不当	退火前先进行正火处理,消除碳化物网	
出现魏氏组织	过热造成奥氏体晶粒粗大,随后冷却速度又较快	按照正常工艺进行正火处理	
网状组织	加热温度过高或冷却速度缓慢	严格执行热处理工艺	再进行一次高温回火,随后迅速冷却,以抑制先共析相沿晶界析出
石墨碳	加热温度过高或保温时间过长	严格执行工艺,并检查炉温仪表、热电偶等	对出现石墨碳的模具零件只能报废

(续)

缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
表面脱碳严重	在氧化性气氛中长时间加热或重复加热	采用保护气氛、涂覆保护涂料、装箱等保护方法加热,并适当增加模具的加工余量	对无加工余量的模具进行复碳处理,对有加工余量的则采用机械加工方法把脱碳层去掉

4.6 模具普通淬火和回火缺陷分析与对策

在模具钢的普通淬火和回火过程中常出现一些缺陷,因而影响到模具热处理质量,甚至造成报废,因此必须采取有效措施加以预防,并对已经出现的缺陷设法加以挽救。表 4-26 为钢的常见淬火缺陷和对策,表 4-27 为回火过程中常见的缺陷和对策,供参考。

表 4-26 钢的常见淬火缺陷和对策

缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
硬度不足	原材料有混料情况	严格钢材管理,下料前对钢材进行火花鉴别	
	加热温度低(欠热),保温时间短	按照正常的淬火工艺规范操作	重新淬火前应先正火或退火处理
	冷却速度太慢,出现珠光体或贝氏体组织	以大于临界冷却速度快速冷却	
	加热温度过高(过热),保温时间过长,增加了奥氏体的稳定性,淬火后保留了大量的残留奥氏体	严格执行淬火工艺	采用冰冷处理提高硬度
	加热时零件表面脱碳	对盐浴进行脱氧捞渣,或采用保护气氛加热	
	钢材内部其他杂质超标	选用符合技术要求的钢材	
	淬火操作不当,造成预冷时间过长、双液淬火水冷时间短、分级淬火温度太高或停留时间长	严格执行淬火操作规程,按照热处理工艺参数执行	
淬火变形	零件的形状不对称或厚薄相差悬殊	改进零件的结构,合理选材,调整加工余量等	

(续)

缺陷类型		产生原因	对 策	补救措施
淬火变形		机械加工应力大,淬火前未予以消除	增加预热或去应力退火工艺,进行合理的预备热处理	
		加热和冷却不均匀	采用多次预热及预冷淬火、双液淬火、分级淬火、等温淬火等多种操作方法	
		零件的夹持方式或冷却不当	正确操作,合理支撑及捆绑淬火加热零件,分散冷却	
		淬火组织的转变	对变形零件进行校正	
开裂	1) 淬火前已存在的裂纹在淬火后裂纹的两侧可见到有氧化脱碳现象,断口发黑	由于轧制或锻造不当,有缩孔、夹层和白点等	严格控制原材料质量,确保原材料合格	
		原材料非金属夹杂物偏析呈带状、网状、堆积等	采用适当锻造方法降低碳化物级别,热处理时采用预冷、分级淬火、等温淬火等并及时回火	
		原材料有混料情况	加强现场管理,下料前进行火花鉴别	
		冷却不均匀,应力集中,模具形状复杂、截面厚薄不均,有尖角、拐角和加工刀痕	改进设计,尽量使厚薄均匀,无引起淬火裂纹的缺陷	
	2) 冷却引起的淬火裂纹断口色泽发红、透油或发紫色	冷却不当,淬火冷却介质选择不当	选用合理的淬火冷却介质和淬火方法	
		重复淬火时中间未进行退火处理或未及时回火	再次淬火前应进行退火处理	
	3) 脆性引起的裂纹	淬火温度过高引起组织的过热,断口白亮,晶粒粗大	严格控制加热温度,认真执行工艺规范,加强金相组织检验	
		原始组织中碳化物偏析严重或未球化处理	采取正火处理或进行球化退火	
淬火软点		零件表面局部脱碳或附着有脏物,造成局部冷却速度太慢	采用机械加工方法去掉脱碳层,清洗干净零件表面	
		淬火冷却介质中有杂质或使用温度过高	保持淬火冷却介质的清洁,淬火槽安装热交换和温控装置,以防淬火冷却介质温度过高	
		淬火冷却介质冷却能力差	选用合适的淬火冷却介质	

(续)			
缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
淬火软点	零件的冷却方法不当,如零件之间相互接触、冷却不均	零件要分散冷却	重新淬火,但应先进行正火或退火处理
	原材料缺陷或预备热处理不当,在钢中保留了大量的大块铁素体或带状组织	保证原材料质量和热处理工艺	
	加热温度低或保温时间短	严格执行热处理工艺	
氧化与脱碳	在氧化性气氛中加热	采用保护气氛、可控气氛、表面涂覆保护涂料、装箱或真空加热	对已脱碳的淬火零件用复碳的方法加以补救
	盐浴脱氧捞渣不彻底	经常对盐浴脱氧捞渣	
	加热温度过高,保温时间过长	严格执行工艺规范,控制加热温度和加热时间	
	重复加热,增加了氧化的倾向	加热时采取保护措施,在盐浴脱氧后进行加热	
过热与过烧	加热温度过高或加热时间过长	正确选择淬火加热温度和加热时间	对出现过热的零件进行 1 或 2 次的正火或退火细化晶粒后,再按正常的工艺重新退火。对过烧零件只能报废
	测温仪表失灵	对测温仪表定期校准,安装双支热电偶,防止超温	
	装炉不合理,距离加热元件太近	合理装炉,防止零件与加热元件过近	
腐蚀	盐浴中硫酸盐含量超过工艺要求范围	1) 选择符合技术要求的加热用盐 2) 用镁铝合金或木炭除去盐浴中的硫酸盐 3) 及时脱氧及捞渣	
表面增碳	采用气体渗碳剂或固体渗碳剂保护加热淬火时,易造成表面层增碳,厚度为 0.5 ~ 2.0mm,碳的质量分数可达 0.7% ~ 1.0%、表层碳化物过多、淬火后马氏体呈粗针状,并导致早期热疲劳龟裂	严格执行渗碳保护加热规范,防止过度渗碳	

表 4-27 回火过程中常见的缺陷和对策

缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
硬度不足	回火不充分,回火温度太高	选择合适的回火温度,并进行充分回火	对硬度不足零件重新淬火和回火处理
	亚共析钢的淬火温度偏低	适当提高亚共析钢的淬火温度	

(续)			
缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
硬度偏高	回火温度低	选择合适的回火工艺规范	
	回火保温时间不足	对回火不足零件补充回火	
回火裂纹	淬火后未及时回火	及时、充分回火	
	高速工具钢表面脱碳	在淬火加热时应采取措施(如脱氧、捞渣),避免氧化脱碳	
	回火加热速度过快	按工艺要求进行	
回火脆性大、 韧性过低	在回火脆性温度区内回火	回火温度不应选择在回火脆性温度范围	
	回火脆性严重的零件,高温回火后未进行快冷	对必须在回火脆性区进行高温回火的零件要快速冷却	
	回火不足	高合金钢应进行多次回火	

4.7 模具感应淬火常见缺陷分析与对策

感应淬火由于加热速度快、时间短、加热温度难以控制，加上表面局部淬火，经常出现硬度不足、软点、淬火裂纹、局部烧熔等缺陷。模具感应淬火常见缺陷与对策见表 4-28。

表 4-28 感应淬火常见缺陷与对策

缺陷类型	产生原因	对 策
硬度不均匀	原始组织中有粗大的块状铁素体存在	用正火或调质等预备热处理获得均匀而细小的组织
	感应器与冷却器设计不合理,感应器的内径与零件不一致,造成加热与冷却不均	改进感应器、冷却器的设计,保证零件加热与冷却均匀
	原材料的含碳量偏差大	选用符合要求的钢材
	原材料表面脱碳或预备热处理过程中脱碳	去掉零件表面脱碳层或更换钢材,预备热处理采用保护气氛。可进行补碳处理
	原材料的原始组织出现带状组织、偏析、局部氧化脱碳	进行正火处理,改善原材料的组织状态
	加热比功率小、加热时间短	合理选择感应设备的功率和感应器的尺寸,确保零件表面得到充分加热和冷却
	感应器内存积有水,附在零件上造成淬火后形成软点	采取措施以避免感应器内存积水
	淬火冷却介质的压力小,介质的流量小,喷水孔堵塞	按要求调整淬火冷却介质的压力和流量,并清理喷水孔

(续)		
缺陷类型	产生原因	对策
裂纹	零件形状、尺寸不均匀,模具零件的结构设计不合理;形状复杂,尺寸突变;淬火部位表面粗糙度高或有凹槽、孔、台阶、端头、尖角及孔洞等	改进零件的结构,淬火前各部位不允许有毛刺、严重的划痕;将孔洞用铜塞住;避免上述不良设计的发生
	加热温度不均匀,如感应设备频率选择不当、感应器的设计不合理、操作程序不合理、预热温度不适宜、预备热处理质量不良等	合理选择加热规范,如选择合适的感应设备的频率、功率、加热方式和加热顺序等
	淬火冷却介质选择不当,冷却速度过大	选择合适的淬火冷却介质,改进感应器和冷却器的设计,使喷水孔布置合理
	零件回火不及时,重新淬火时操作不当	感应淬火后及时回火,可采用炉内或自回火方式,正火或退火后再进行感应淬火
	原材料内部存在质量缺陷(组织不均匀、成分偏析、晶粒粗大、有害杂质多、严重的非金属夹杂物、内部裂纹等),材料淬硬性过高,钢的含碳量高于上限的要求	加强原材料的检验,严格控制钢材的成分
	淬火前机械加工应力大,未进行预备热处理,表面粗糙度高,存在较深的加工刀痕	感应淬火前进行去应力退火处理,降低表面粗糙度
	加热温度过高,冷却过快或操作不规范,淬火冷却介质选择不当,冷却器设计不良,冷却不均匀	严格执行工艺规范,加强现场的硬度和金相组织的检查,选择合适的淬火冷却介质,改进冷却器设计
	淬火冷却介质的成分、温度及压力等选择不当	淬火冷却介质的各项技术要求应符合感应淬火工艺的规定
硬化层深度与分布不合理,硬度低	感应设备的功率选择不当	合理选择感应设备的功率
	感应器设计不合理	改进感应器的设计
	加热和冷却工艺不合理	严格执行加热、冷却工艺规范,零件正火后重新进行淬火处理
	加热功率大和加热时间长	调整感应淬火加热工艺参数
	材料的淬透性过高或过差	更换零件材料或选用合适的淬火冷却介质
	回火温度或回火时间选择不当	加强回火温度的控制和硬度的抽查
	感应淬火温度低	严格按照感应淬火加热温度的要求进行加热
	零件表面脱碳,晶粒粗大不均	严格控制原材料的成分和组织,检查原材料晶粒度及脱碳等

(续)		
缺陷类型	产生原因	对策
变形	加热不均匀	改进感应器的设计和操作方法,尽可能采用使零件旋转的加热方式。形状复杂零件在高频淬火前增加高温回火或去应力退火工序
	高频淬火前的机械加工应力大,并未作消除处理	零件粗加工后进行一次高频正火,可解决高频淬火零件的内孔收缩问题
淬硬层或尖角脱落	原始组织粗大	采用正火、调质处理等预备热处理方法来改进原始组织
	尖角过热	设计零件时尽可能将尖角变成圆角
	淬硬层硬度梯度太陡	改进感应器的设计
局部烧熔、麻点或烧坑	感应器结构不合格,感应加热淬火时间过长	选择合适的感应器,严格控制加热时间
	零件带有尖角、槽和孔等	对易造成缺陷的部位采取屏蔽或保护的措施
	零件表面有缺陷	消除表面缺陷或将其报废
	感应设备性能与零件的技术要求不匹配	根据零件的硬度和淬硬层深要求选用合适的频率、功率以及感应淬火加热和冷却工艺
	感应器未固定好,与零件接触	严格控制感应器与零件的间隙,并加以紧固

4.8 模具火焰淬火常见缺陷分析与对策

火焰淬火具有设备投入少、操作灵活、生产率高、成本低等特点,适合于单件及大件模具的局部热处理。由于其主要依靠人工经验操作,因此同其他热处理相比,模具的热处理质量波动较大,经常出现硬度低、淬火裂纹、淬火变形和烧熔等缺陷。

1. 火焰淬火硬度低或硬度不均原因分析及其对策

- 1) 模具钢材含碳量太低或者淬透性差。碳的质量分数低于 0.3% 的碳钢不适于表面淬火。
- 2) 冷却速度慢。火焰淬火时,因只对表面加热,被加热层同时向内、外方向散热,降温较快,若冷却不及时,就可能在淬火前发生非马氏体转变,造成淬火硬度低。

3) 冷却水量不足、冷却能力低或水压低。可适当增加冷却水孔的排数, 增加水压。

4) 硬度不均大多是因火焰喷嘴堵塞、喷水孔大小不一致、排列不规则, 或喷水孔水量低等因素造成的。

5) 加热温度低。在连续表面淬火时, 由于加热速度快, 相变点升高, 淬火加热温度也相应提高, 若加热温度低, 则不能得到单一的奥氏体组织, 淬火冷却后也就不能得到全部马氏体组织(亚共析钢), 导致硬度降低。

6) 模具火焰淬火后出现硬度低的原因主要是加热不足或过热。其检验方法是: 在与喷嘴移动相垂直的方向测定表面硬度, 如果硬度依次降低(如离开火焰尖端硬度依次为40HRC、35HRC、20HRC、17HRC), 则属于加热不足; 如果表面有熔融现象, 或硬度的分布从由低到高再依次降低(如离开火焰尖端硬度依次为40HRC、50HRC、60HRC、50HRC), 则属于过热。加热不足引起的硬度低, 可通过第二次淬火(其加热温度略低于原淬火温度20~30℃)使硬度达到要求。但过热造成的硬度偏低, 即使再进行淬火回火处理, 也很难想得到正常的韧性和耐磨性。

当整个模具的表面进行火焰淬火时, 加热开始部位和终了部位的交界处容易出现硬度降低情况, 这是水冷或油冷钢种无法解决的, 但如果是空冷钢, 则可通过采取预热的措施来解决, 即将模具加热到300℃以上(M_s 点以上100~150℃), 然后进行火焰淬火, 这样开始加热部位的硬度就不会降低了。另一种需要预热的情况是因某种需要再次进行局部的火焰淬火。

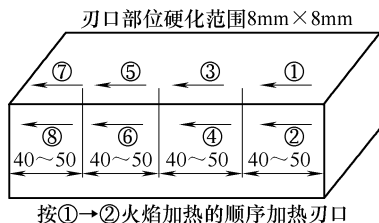


图4-47 大范围的刃口部分
火焰淬火方法

对模具的刃口部分进行火焰淬火时, 应先加热一部分以防止开始加热的部分温度低于 M_s 点, 即要按图4-47所示的方法加热, 则硬度不仅合格而且均匀。

对于大面积的双面刃口淬火, 可以采用双头喷嘴的方法进行双面同时加热。

2. 火焰淬火裂纹产生原因分析及其对策

(1) 裂纹产生原因分析

1) 模具设计不良。淬火裂纹的产生, 除工艺方面的原因外, 常常与模具的几何形状有关, 如模具上的孔、槽、沟附近易于产生裂纹。对此, 进行合理设计, 并在加热前镶入铜锭(塞), 可以避免产生这类裂纹。

2) 过热。在火焰淬火时, 由于过热而造成淬裂的现象是常见的。这种情况多出现在含碳量高的模具零件, 以及模具零件的尖角、键槽、圆孔及边缘等处。对此, 可通过严格执行火焰淬火操作规程来防止产生过热现象。

3) 重复淬火。对已经淬硬的模具, 如果未消除应力就进行重复淬火, 则也可能产生裂纹。这里有两种情况: 有些模具零件尺寸比较小, 因为淬火未达到技术要

求(如硬度不足、硬度不均),则重复淬火前,应进行高温回火处理;对于环类模具零件,在淬火开始和淬火终结处往往出现重复淬火情况,对此在淬火开始阶段,让淬火温度缓慢上升,形成一个淬火硬度较低区域,并做上记号,当淬火终结时,控制喷嘴一旦进入该区域,立即闭火,并增加冷却用水量。

4) 材质原因。在生产过程中,应经常注意模具用钢化学成分的改变。对于ZG55铸钢(含碳量的质量分数为0.52%~0.60%),一般当含碳量的质量分数高于0.55%时,或C+Mn的含量大于1.1%(质量分数)时,在表面淬火中很容易出现裂纹。当钢材中含有连续分布的杂质(如金属氧化物杂质)时,也会在淬火时产生裂纹。对此,应控制模具的原材料质量。

5) 冷却速度过大。当冷却方式或淬火冷却介质选择不当时,常常会因冷却速度过大而产生裂纹。如果产生了这种裂纹,则应调整喷水冷却时的水压(降低)和水温(提高),或根据模具情况改换淬火冷却介质与冷却方式(采用浸液冷却、风冷或自冷淬火,也可以提高终冷温度或自回火温度)。

(2) 防止火焰淬火裂纹产生的措施 提高操作技能;合理设计模具结构;保证模具原材料质量;保证加工质量,降低表面粗糙度值;执行正确的工艺规范,淬火温度不要过高,力求加热均匀,以模具光滑无过热现象为准(但也不得温度过低,以免硬化深度不足);要正确控制火焰强度、加热距离和喷嘴的移动速度等;及时回火。

3. 火焰淬火延迟裂纹产生原因分析与对策

有的模具在火焰淬火后没有立即产生裂纹,放置以后却产生了裂纹,这往往是由于淬火后未及时回火所致。对此,模具在完成火焰淬火后应及时并充分回火。

4. 火焰淬火后模具表面烧熔(熔化)原因分析与对策

(1) 产生原因 模具表面烧熔(熔化)是火焰淬火的常见缺陷之一(被烧熔的部位表面呈“汗珠”状)。模具表面熔化是由于火焰喷嘴移动过慢,或在某一位置停留时间长造成的。喷嘴火孔变形、误将氧气阀门开大和加热不均等也能引起模具烧熔。此外,模具零件的尖角、内孔的边缘受热温度高也会造成熔化。

(2) 对策

- 1) 提高操作者的技术水平,因其具有决定性作用。
- 2) 严格执行火焰淬火操作规程。
- 3) 模具表面轻度的烧熔可以用砂轮处理,严重的就要报废。

5. 火焰淬火模具变形分析及其对策

火焰淬火造成的模具变形通常与加热和冷却不均匀有关。对于板状模具零件的淬火变形能够通过改变加热技术条件来调整,如通过改进喷嘴形状和尺寸、改进加热和冷却的措施来控制淬火变形,或使模具零件旋转减少其变形,以提高零件淬火后的合格率。通常淬火变形可分为形状变形(如圆形变成椭圆形,长杆形变成弯曲形等)和尺寸变化。模具形状变形的原因较多,有的是由于加热或冷却不均匀,有的是由于淬火前模具零件表面残存加工应力及组织不均匀等。火焰淬火时的尺寸

变化, 主要是由马氏体转变的体积效应所引起的。

火焰淬火变形主要表现为弯曲, 而弯曲是由于淬火部位的收缩引起的。通常因收缩而引起的变形与其他情况相比较, 收缩变形量较小。一般情况下, 火焰淬火时只要模具材料和淬火方法选择得当, 变形就能控制在较小的范围内。一旦发生变形, 也可采用以下办法加以校正:

1) 解决好选材和取料问题。对于 T11A、T10 和 9CrWMn 等淬透性低的钢种采用火焰淬火时, 加热后用水或油冷容易产生变形。Cr12MoV 钢淬透性虽好, 但允许的加热温度范围较小, 采用火焰淬火很难控制, 因此应选用淬火温度范围宽、淬透性好的火焰淬火专用钢 (如日本 SX105V、国产 7CrSiMnMoV 钢), 这类钢即使淬火时产生较大的变形也容易校正。模具材料在火焰淬火前的原始组织应为细小均匀的粒状珠光体, 因此模具材料在淬火前一定要经过球化退火处理。

模具用钢一般都经过轧制或锻造。轧制或锻造拔长方向与垂直方向相比收缩倾向小, 因此取料时应尽量沿轧制或锻造的长度方向取料 (这样做对提高淬火后的韧性也很有利)。另外, 在设计模具时, 要注意模具的端面尺寸, 对于细长件 (端面尺寸过小), 淬火时表面会产生拉应力而使变形增大。因此, 从减少变形的角度考虑, 端面尺寸以大为好, 最小应在 $45\text{mm} \times 45\text{mm}$ 以上。

2) 气枪喷嘴和火焰大小的选择。从防止变形的要求出发, 应当使用淬火专用喷嘴, 且对模具刃口部位加热的火焰以尽可能小为好。另外, 对于大面积的双面刃口淬火, 可以采用双头喷嘴的方法对双面同时加热。该方法具有加热时间短、淬硬深度大、变形小的优点。

3) 正确操作。利用加热方法和操作技巧来减少火焰淬火变形, 如将火焰的喷射方向与淬火加热的行进方向成 $60^\circ \sim 70^\circ$ 角, 一边预热, 一边淬火, 对减少变形有利。又如在模具淬火时, 如果采用从模具一端向另一端移动的加热方法, 则收缩量大; 反之, 先从距离一端 10mm 处左右开始加热, 喷嘴先向该端移动到距端点 5mm 处, 当加热至淬火温度时, 喷嘴再开始向另一端移动, 且一边移动一边进行加热, 直至距离模具另一端 5mm 处为止, 当末端达到淬火温度时停止加热, 则可减少变形。

对于整体的凸模淬火, 喷嘴移动路线是封闭的折线或曲线形。此时, 无论哪里作为起始点, 起始部位和终了部位都需重叠 10mm。

4) 火焰淬火变形的校正方法。因变形超差的模具可以用火焰加热法来校正, 校正时的加热部位和加热方法视模具形状而定。如果模具的形状薄而大, 可以在对应于变形最大部位的反面进行火焰加热来加以校正。如果模具近似于方形, 其相邻边长比例近似于 1:1.5 时, 校正的加热部位选在图 4-48a 所示的对角线的另一面 (图中箭头所指); 如果相邻边长比例超过 1:1.5, 成为扁平状时, 则按图 4-48b 所示, 在长度方向的下方一侧进行加热矫正; 如果是如图 4-48c、d 所示的整体模具, 则在凹模和凸模各自喷嘴移动线的下侧加热校正。

总之，采用与当初火焰淬火相同的加热方式，使两者应力相等，是校正变形的一个技巧。

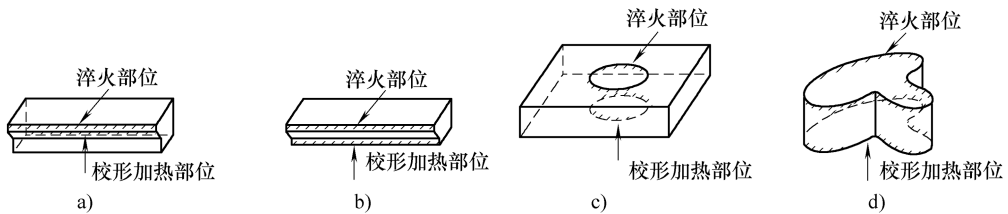


图 4-48 模具校正变形时的加热部位

a) 断面近似正方形的模具 b) 断面扁平的模具 c) 整体式凹模 d) 整体式凸模

4.9 模具化学热处理缺陷分析与对策

模具钢经过化学热处理后，一般可以获得比该钢种普通淬火更高的硬度、更好的耐磨性和疲劳强度，而且心部仍具有良好的塑韧性和较高的强度。因此，化学热处理在模具制造过程中得到广泛的应用。但在模具渗碳、渗氮、碳氮共渗及氮碳共渗等过程中，常常因多种因素影响，会产生热处理缺陷，以致严重影响模具的质量，降低模具的使用寿命。对此，应进行具体分析，查找原因，并采取措施加以预防。

4.9.1 模具渗碳热处理缺陷分析与对策

渗碳是将钢件置于含有富碳原子的介质中，一般加热到 860 ~ 950℃，保温一定的时间，以使碳原子渗入钢件表层，并使钢件在保持心部高韧性的条件下获得高硬度的表面层，从而提高耐磨性和疲劳强度的化学热处理工艺。模具常用的渗碳方法有气体渗碳、固体渗碳和真空渗碳等。表 4-29 为渗碳的常见缺陷产生原因及对策，供分析模具渗碳缺陷时参考。

表 4-29 渗碳的常见缺陷产生原因及对策

缺陷类型	产生原因	对 策	补 救 措 施
渗碳层过深， 渗碳层碳浓度 梯度太陡	渗碳温度过高，保温时间 过长	按正确的渗碳工艺执行，严格控制 工艺参数，安装超温报警装置	对碳浓度梯度太 陡而渗层深度不合 格的零件，在中性介 质中加热至正火温 度并保温，随后在油 或空气中冷却即可 降低碳浓度梯度，得 到合格的质量
	固体渗碳的渗碳剂活性过 分强烈或气体渗碳碳势过高	固体渗碳采用新渗碳剂时，应放入 一定比例的旧渗碳剂；气体渗碳应控 制渗碳剂的流量及碳势	
气体渗碳效果差， 表面脱碳	排气不充分，炉内碳势未 达到气氛要求	加大加高排气管，延长排气时间，保 证渗碳炉的密封性	

(续)			
缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
气体渗碳效果差, 表面脱碳	炉内循环系统不良, 造成炉内气氛循环不良	改善循环系统, 保证炉内气氛循环流动良好	对表面脱碳件进行短时间复碳处理
	在扩散期内炉内的碳势过低或炉内压力小于要求	适当提高扩散期炉内的碳势或炉内压力	
	出炉温度过高, 在空气中引起氧化和脱碳	在炉内进行适当预冷, 避免高温出炉	
	渗碳后进行多次加热	零件出炉后避免在空气中停留时间过长并防止多次加热	
渗碳层薄, 渗碳层的碳浓度过低	渗碳温度太低, 保温时间短	制订合理的渗碳工艺, 并严格执行	对零件进行重新渗碳处理
	固体渗碳剂的活性差、碳势低、气体渗碳剂的滴注量不足、炉气碳势低或炉子密封不严造成炉内压力低	在固体渗碳剂中添加质量分数为 30% ~ 40% 的新渗碳剂或增大气体渗碳剂的流量	
	装炉量过多或更换了新的渗碳罐、夹具、吊具等	各种工卡具应符合技术要求, 装炉量应适宜, 对新工装要进行预渗碳, 加大渗碳剂的流量	
	零件表面有氧化皮等脏物或碳含量低	渗碳前去除表面氧化皮, 使用化学成分合格的钢材	
渗碳层厚薄不均	零件表面的氧化皮、锈迹等未清理干净, 存在油污等	渗碳前清理干净零件表面, 确保表面清洁	重新进行渗碳
	零件的装炉方式不当, 零件之间距离太近, 无气流通道, 循环或搅拌不良, 局部有死角或富碳原子不足	合理装料, 零件之间应有一定的距离, 确保渗碳气氛的正常流动, 按要求装炉, 保证循环或搅拌正常, 提高渗剂浓度	
	固体渗碳时渗碳剂搅拌不均匀	固体渗碳剂要搅拌均匀	
	零件表面沉积炭黑	降低碳势, 定期清理炉内炭黑	
渗碳层表面脱碳	固体渗碳时密封不严, 进入空气, 或气体渗碳时炉体漏气, 渗剂流量小, 炉内压力小或出现负压	提高渗碳箱或气体渗碳炉的密封性, 确保没有空气进入, 气体渗碳时加大渗剂流量, 炉内压力应为正值	在正确的渗碳温度下作短时间的表面复碳, 或去掉脱碳层
	渗碳后期渗剂浓度减小过多, 造成碳势过低	合理控制扩散过程中渗碳剂的流量, 确保炉内的碳势符合要求	

(续)			
缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
渗碳层表面脱碳	固体渗碳或气体渗碳后冷却过慢	适当提高渗碳后的冷却速度,以防表面脱碳	在正确的渗碳温度下作短时间的表面复碳,或去掉脱碳层
	淬火加热或冷却时保护不当造成脱碳	渗碳后应以较快的速度冷却或直接淬火,并改善淬火加热或冷却时的保护条件	
渗碳层淬硬后出现剥落	渗碳零件表面碳浓度梯度太陡或急剧变化,硬度不均	采用活性较弱的渗碳剂,适当延长扩散时间	
	淬火时淬火冷却介质选择不当,冷速过快	采用较缓和的淬火冷却介质	
表面淬火硬度偏低或不均匀	淬火冷却速度慢或冷却不均匀	选择合适的淬火冷却介质,确保具有足够的冷却能力,冷却应均匀	对渗碳不均匀的零件可重新进行补渗处理
	高合金渗碳钢渗碳层的碳浓度太高,渗碳不均匀,淬火温度偏高或过低,保温时间过长,淬火油温过高,造成渗碳层保留大量的残留奥氏体组织或表面形成了托氏体。回火温度高	控制渗碳层表面的碳浓度,按正确的渗碳工艺操作。高合金渗碳钢渗碳后,在 680℃ 左右进行长时间的高温回火,然后低温淬火(780℃),可明显降低残留奥氏体的含量。适当降低回火温度	
	表面出现内氧化层,加热时表面脱碳严重,残留奥氏体量过多形成托氏体。晶界氧化	避免渗碳过程中出现氧化,将炉内水分等氧化性杂质控制在要求的范围内,对出现过多残留奥氏体的零件进行冷处理	
	零件表面不清洁,或被炭黑、氧化皮、污物等覆盖,导致渗碳不均匀	清理干净零件表面的脏物,同时确保均匀加热、气氛循环通畅、固体渗碳剂的大小和渗碳剂的填充方法等相关要求	
表面有腐蚀麻点或氧化	固体渗碳剂中含有质量分数为 0.3% 以上的硫或硫酸盐,渗剂不良	控制渗碳剂中硫酸盐的含量,选用合格的渗剂	
	液体渗碳后零件表面黏附有残盐或渗碳零件淬火加热时盐浴脱氧不良	对零件表面及时清理,确保盐浴炉内氧化物的含量符合工艺规定	
	渗碳件高温出炉	渗碳后随炉预冷,避免高温出炉或采用保护气氛	

(续)			
缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
表面有腐蚀麻点或氧化	渗碳炉盘根或炉盖等严重漏气	确保渗碳炉密封良好	
	渗碳剂滴注管堵塞造成炉内进入空气	渗碳剂滴注管应垂直、通畅	
晶界氧化或内氧化	含有微量的 H ₂ O 和 CO ₂ 的吸热性气体进行渗碳时,因 H ₂ O 和 CO ₂ 与钢反应而在晶界形成氧化物	严格控制渗碳过程中 H ₂ O 和 CO ₂ 的含量,使渗碳气氛中不存在氧,避免形成晶界氧化物	
	钢中的 Cr、Mn 极易氧化,当氧从钢的表面侵入时,晶界或晶粒附近的 Si、Cr 和 Mn 比其他元素优先扩散到晶界,与固溶在表面的微量氧结合,在钢的表面形成氧化物,金相观察晶界处的氧化物呈网状分布	在渗碳能够满足要求的前提下缩短渗碳时间,降低炉内氧势,合理控制碳势	
表面存在的残留奥氏体过多	渗碳或淬火时的温度高,使奥氏体中碳及合金元素的含量过高	严格执行渗碳工艺规范或淬火后进行冷处理、回火,降低渗碳或淬火加热的温度	进行高温回火,随后重新加热淬火处理
	炉内的碳势过高	调节炉内扩散期渗剂的滴注量和时间	
	淬火冷却介质的温度过高	降低淬火冷却介质的温度,安装热交换和温控装置	
晶粒或马氏体针粗大	炉内的碳势过高	调整炉内的渗碳剂的分解速度,适当降低碳势	对晶粒粗大零件重新加热淬火处理,细化晶粒
	渗碳加热温度高、保温时间长	合理确定渗碳工艺,加强金相组织的检查	
	与冶炼方法、原材料的化学成分不均匀等有关	选用完全脱氧的合金钢,淬火前进行高温回火或正火处理	
	渗碳后的热处理方法不合理	正确选用淬火方法	
表面碳化物过多,呈大块或网状分布	炉内碳势高,扩散时间短,造成表面碳浓度过高	降低渗碳剂活性,或重新在低的渗碳气氛中扩散一段时间	
	采用渗碳后直接淬火工艺时预冷时间长,表面温度过低	正火后再进行淬火处理	

(续)			
缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
表面碳化物过多,呈大块或网状分布	采用一次淬火时,淬火温度太低,预冷时形成网状、块状碳化物	如碳化物级别低,可先进行正火处理。渗碳结束后进行快速冷却	
表面出现托氏体网,出现非马氏体组织	渗碳介质中含有少量的氧向钢内扩散,表层下的 Mn、Cr、Si 等合金元素被严重氧化形成氧化物,出现贫 Mn、Cr、Si 区域,使淬透性降低,淬火后出现黑色组织(托氏体)	1) 改善炉气的成分,控制气氛中氧、二氧化碳和水的含量 2) 减少渗剂中 S 等杂质的含量 3) 保持炉内压力的稳定 4) 在排气期尽早恢复炉气的碳势 5) 防止炉子漏气,保证循环系统正常运转 6) 向渗碳炉内通入 N ₂ 7) 减少加热次数,选择合理的加热时间	对表面有轻微缺陷(非马氏体组织层深≤0.02mm)的组织可采用喷丸处理
开裂(渗碳后,在以低于淬火冷却的速度冷却时产生表面裂纹)	渗碳后在以低于淬火冷却的速度冷却时组织转变不均匀所致,如 20CrMnTi 钢渗碳后空冷,在表层托氏体里未转变的奥氏体在随后的冷却中转变为马氏体,渗层完成了共析转变	1) 采用合理的渗碳工艺,确保组织均匀转变 2) 渗碳后缓冷,确保整个渗层获得均匀一致的珠光体 3) 渗碳后快冷,得到马氏体+残留奥氏体组织,快冷到 150~200℃或 450~500℃,将零件转入 650℃的炉中高温回火,得到珠光体组织	

冷挤压成形塑料模具是采用冷挤压的方法,在淬硬的凸模上将硬度低、塑性好的低碳钢直接压制出型腔,因此省去了型腔的切削加工。这对于成批生产一种模具是十分经济的工艺方法。该模具经压制成形并经过渗碳、淬火和低温回火后,具有高硬度、高耐磨性的表面和韧性良好的心部组织,但在热处理过程中常出现渗碳硬化层偏浅、渗碳层深度不均匀、表层过度渗碳、表面和心部硬度不足、表层内氧化、氢脆及模具淬火后开裂等缺陷。冷挤压成形塑料模具渗碳热处理缺陷及对策见表 4-30。

表 4-30 冷挤压成形塑料模具渗碳热处理缺陷及对策

缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
渗碳硬化层偏浅	模具材料选择不当。对重要的、复杂的冷挤压成形模具不应选择渗碳速度慢、淬透性差的钢(如 20 钢、20Cr 钢),而应采用冷挤压成形专用钢 0Cr4NiMoV(LJ) 钢,其渗碳速度快,相同渗碳时间内渗碳深度比 20 钢深 1 倍	选择淬透性较好的钢材作为形状复杂的冷挤压成形塑料模具材料,如美国 P2 及 P4、瑞典 8416、国产冷挤压成形专用钢 0Cr4NiMoV 钢等,或采用中淬透性合金钢 12CrNi3、12Cr2Ni4、20Cr2Ni4 钢等	对渗碳层不足的模具进行补渗

(续)			
缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
渗碳硬化层偏浅	渗碳层偏浅。原因是渗碳时间太短、渗碳温度偏低、渗碳炉温度不均、碳势控制不当、模具入炉前未清除油污或装炉量过多等	严格控制渗碳前的模具表面质量、装炉量,以及炉内温度、碳势、强渗与扩散时间等	对渗碳层不足的模具进行补渗
	淬火冷却介质冷却能力不足	选择冷却性能合适的淬火冷却介质	
渗碳层深度不均匀	气体渗碳时,主要原因是炉内温度不均匀。其次,模具入炉前未清除表面油污,炉内渗碳气氛循环不良,炉内炭黑过多等都对渗碳层深度有影响	气体渗碳时,入炉前应清除模具表面油污,装炉量不宜过多,模具摆放位置要适当,保证炉温均匀、炉气循环充分、渗碳剂中不饱和碳氢化合物少以防止模具工作面形成炭黑或结焦,气体渗碳炉密封要良好,并定期清理炉内炭黑及污物等	
	固体渗碳时,渗碳箱内温度相差较大、催渗剂不均匀、渗碳箱的大小、装箱量、装炉方式及渗碳升温速度等均是其影响因素	对成批生产和重要、复杂塑料模具尽量避免采用固体渗碳,必须采用固体渗碳时应严格执行操作工艺,装炉量及渗碳箱在炉内摆放位置要适宜,催渗剂和木炭要搅拌均匀,宜用市售固体渗碳剂	
表面硬度偏低	模具材料淬透性差及淬火冷却介质性能过低	选择淬透性好的低碳合金钢作渗碳模具材料,并在具有适当冷却性能的淬火冷却介质中淬火冷却	
	渗碳后淬火温度偏高造成淬火后表面残留奥氏体过多	选择合适的加热温度进行淬火,以便减少渗碳模具淬火后的残留奥氏体量。对残留奥氏体过多的模具可重新加热淬火或进行冷处理,以减少残留奥氏体量	
	表层含碳量太低。原因是渗碳炉温低,碳势低,模具表面有炭黑,装炉量过多及炉子漏气等,或模具渗碳后在冷却过程或加热过程中表面脱碳	采取适当的控制措施,保证表面含碳量。对表层含碳量低的模具应进行增碳处理。模具渗碳冷却或重新加热淬火时应在保护气氛下进行,对已产生氧化的模具应除掉氧化层后补碳并进行淬火处理	
	模具渗碳淬火回火后温度过高,保温时间过长	对因回火温度过高或保温时间过长造成硬度偏低的模具应在保护气氛下重新加热淬火,并采取正确回火工艺进行回火	

(续)			
缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
表层过度渗碳	固体渗碳时,渗碳剂活性越高,渗碳温度越高,则过共析的程度就越大,尤其是对含有强碳化物形成元素 Cr、Mo 的渗碳钢,模具表面碳浓度易增高,冷却时表层易形成网状碳化物	固体渗碳时为防止过度渗碳,应采用较低的渗碳温度或使用较弱的渗碳剂(如新旧渗碳剂按一定的比例混合使用)	对已造成过度渗碳的模具,可在碳势较低的气氛中进行高温扩散球化处理(920℃×2h)后再重新加热淬火处理
	气体渗碳时炉内碳势过高、强渗时间过长、扩散时间太短等均容易出现表层碳浓度过高现象	气体渗碳时应保证一定的扩散时间,并适当降低炉内的碳势,使表层粗大碳化物逐步溶解并向内层扩散	
心部硬度偏低	模具材料淬透性差或淬火冷却介质冷却能力差	选用淬透性及材质好的钢材作渗碳模具材料,选择冷却能力强的淬火冷却介质	
	模具渗碳后直接淬火前预冷温度过低或渗碳后重新加热淬火时温度偏低	适当提高模具淬火温度	
表层内氧化	渗碳气氛中含有的 CO ₂ 、H ₂ O、O ₂ 等氧化性气体在模具表面形成氧原子并在模具表面形成氧的富集,使模具表层产生一定的氧浓度梯度。模具表面富集的氧向内部扩散。由于晶界处存在大量的位错及空位,因此氧在晶界的扩散速度快于晶内。在合金模具材料中,比铁更易氧化的 Cr、Si、Mn、Ti 等元素与氧发生反应,在晶界处生成 Cr ₂ O ₃ 、MnO、SiO ₂ 、TiO ₂ 等氧化物。因可提高淬透性 Cr、Mn 等元素形成氧化物,造成这些合金元素在模具表面贫化,降低了渗碳模具的淬透性,从而使模具表面硬度下降	1) 为了防止内氧化造成的淬透性降低,形成托氏体组织,可采用在渗碳结束后一定时间内通入适量氨气的方法,即通过补充氮原子以提高表层淬透性 2) 对允许有一定变形的模具,可通过加快冷却速度的方法减少内氧化层珠光体析出,相应提高表面硬度	
高合金钢模具出现氢脆	模具在渗碳时炉内气氛中含有质量分数为 40%~60% 的氢,由于渗碳温度高,氢在钢中的扩散速度及溶解度都较大,因此渗碳时必然有相当数量的氢渗入钢中。如果渗碳后直接淬火,则氢来不及析出,而以过饱和状态存在于钢中。在模具放置或使用过程中,这些氢向钢中拉应力区和微裂纹处析出并聚集,使模具钢塑性降低或自行开裂	1) 在模具渗碳后缓冷或直接淬火后在 250℃ 以上回火可使氢扩散逸出而不出现氢脆 2) 在模具硬度要求较高、不允许提高回火温度的情况下,可在模具渗碳出炉前停止供给渗碳剂,通入氨气排氢后直接淬火	

(续)

缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
渗碳模具淬火后开裂	钢材混料或原材料存在严重缺陷,如材料内部存在较多的非金属夹杂物、疏松等	加强模具材料的管理,严防混料。对模具材料要进行严格的质量检查,如检查原材料缺陷、化学成分、淬透性、力学性能等	
	锻造工艺不当,模具毛坯锻造后未正火,使锻造过程中产生的黑色网状组织未能消除	采用正确的锻造工艺,对锻造后毛坯必须进行严格的正火处理	
	过度渗碳、渗碳不均匀、表面脱碳、渗碳后缓冷等	严格控制碳势,并采用正确的渗碳工艺。渗碳后冷却时应在保护气氛下进行,以防表面产生氧化脱碳	
	渗碳后淬火冷却不当、回火不及时或未进行回火	为减少内应力,在保证表面硬度的前提下可适当降低淬火温度和保温时间,并提高出油温度。淬火后必须及时和充分回火	

4.9.2 模具碳氮共渗缺陷分析与对策

碳氮共渗工艺是介于渗碳与氮碳共渗之间的化学热处理工艺,比渗碳温度低,因此变形量小且晶粒度细小,适于直接淬火处理的零件。碳氮共渗的目的是在保持心部高韧性的条件下获得高硬度的表面层。碳氮共渗层不仅比渗碳层具有更高的耐磨性,而且有更高的耐蚀性、疲劳强度和抗压强度。此外,碳氮共渗还具有生产周期短等特点。

碳氮共渗适用于要求基体具有良好韧性,且表面硬度高、耐磨性好的模具零件,如塑料料模及冲裁模中的凸模和凹模等零件。表 4-31 为气体碳氮共渗淬火缺陷分析及对策。

表 4-31 气体碳氮共渗缺陷分析及对策

缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
表面硬度不足	渗层浓度偏低,淬火后马氏体中碳的过饱和度小,甚至很难获得马氏体组织	合理控制炉气中的碳势和氮势,定期校正炉温,确保正常的共渗温度;随时检查炉内的压力、渗剂的滴注量和氨气的通入量,防止炉子漏气;根据装炉量大小调节共渗介质的流量,保证炉内气体循环畅通,防止出现积炭	对表面硬度不足的零件可采用补渗处理
	网状托氏体或黑色组织使其周围基体中碳和合金元素的浓度不足,淬透性降低,淬火后出现托氏体组织,从而造成表面硬度降低	具体措施见本表的“表面出现网状托氏体组织”内容	

(续)			
缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
表面硬度不足	碳氮共渗后冷却或淬火时,表面发生脱碳现象,淬火后出现非马氏体组织	共渗后,冷却时在缓冷罐内加入少量的渗碳剂,以防止出现氧化脱碳;淬火加热时要采取保护措施或在盐浴炉中加热	对表面硬度不足的零件可采用补渗处理
	淬火加热温度过高或过低,淬火冷却介质选择不当或淬火冷却介质温度太高	制订正确的碳氮共渗工艺,选用理想的淬火冷却介质,淬火槽安装热交换和控温装置	
	由于表面碳浓度过高或淬火温度过高,造成表面的残留奥氏体数量增多	控制好炉内的碳势,适当降低淬火加热温度,淬火后进行冷处理,或高温回火后重新进行淬火处理	
渗层过深,表面硬度不足或不均匀	渗层深度控制不当,共渗温度过高,保温时间长,碳势过高	合理调整碳氮共渗工艺参数,加强炉温及其仪表的校验	对表面硬度不足或不均匀的零件,可重新进行碳氮共渗处理
	共渗温度过低,保温时间短,碳势低	严格执行工艺规范	
	炉子的密封性差	检查炉子密封性,并进行维修,保证炉内压力符合要求	
	零件表面不清洁,有锈斑、炭黑、脏物等	共渗前的零件应清洗干净,定期清理炉膛内的炭黑	
	装炉量过多,炉气循环差,零件之间的间隙太小,炉温不均匀	按工艺要求合理装炉,保持零件间一定的间隙,保证炉气循环畅通	
表层出现网状或粗大块状、爪状碳化物	共渗时碳(氮)势太高,扩散时间短,造成碳氮浓度过高	控制炉内的碳(氮)势,调整好共渗与扩散时间的比例	
	共渗后的冷却速度太慢或直接淬火时预冷时间过长,致使碳氮化合物沿奥氏体晶界析出	零件在缓冷罐内冷却时,应使缓冷罐内部安装的蛇形管通水冷却。对直接淬火的零件,要控制好预冷时间	
表面出现网状托氏体组织	钢中的Cr、Mn及Si合金元素被氧化,造成奥氏体中的合金元素贫化,降低了奥氏体的稳定性,导致出现黑色的奥氏体分解产物(托氏体)等	尽可能选用含Cr、Mn、Ti等合金元素低的钢材(如二次精炼含W、Mo、Ni、Co的合金钢),控制炉气的成分,降低气氛中氧的含量,改善炉子的密封性,保证炉内压力处于正压	如果黑色组织深度小于0.02mm,可采用磨削方法或进行喷丸处理将其去除
	共渗温度偏低,产气量少,炉气内活性原子少,造成表面碳氮含量的不足,奥氏体的稳定性差而出现黑色的奥氏体分解产物—托氏体等	适当提高共渗温度。考虑到内氧化发生在排气阶段,在初期应加大排气速度,氮气应经过干燥处理	
	共渗后冷却缓慢,淬火加热过程中发生脱碳和氧化,造成黑色网状组织的产生	适当加快共渗后的冷却速度,在淬火加热过程中应采取措施防止氧化脱碳	

(续)			
缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
黑色斑点状组织	共渗介质中的氮的含量过高	适当降低共渗介质中的氮含量	
	共渗层表面的氮含量(质量分数)大于0.5%	根据要求,合理控制氮的通入量	
	共渗温度低或共渗时间长	提高碳氮共渗的温度或缩短共渗时间	
心部硬度超差	心部硬度高是淬火温度偏高造成的	根据硬度的要求进行共渗,降低淬火加热温度	重新进行淬火回火处理
	心部硬度低是钢的淬透性低,淬火时出现游离的铁素体;或淬火加热温度太低,造成铁素体未溶入奥氏体中;或淬火冷却介质的冷却能力低	选用要求的碳氮共渗钢种,保证淬透性,适当提高淬火加热温度,并选用具有一定冷却能力的淬火冷却介质	
变形与开裂	零件形状复杂、厚薄不均、有尖角或孔洞等	改进零件的结构设计,力求简单和对称	
	零件的装炉方式、装炉量和夹具选用不当	改进装炉方式,薄壁零件应平放,长轴(杆)类零件要垂直吊挂,所用的夹具应平稳和对称	
	合金钢共渗后空冷时表层组织为托氏体+碳化物,而次表层出现淬火马氏体组织,表层因拉应力的作用而产生裂纹	降低合金钢共渗后的冷却速度,使共渗层发生共析转变或快冷获得马氏体+残留奥氏体。如果表层出现网状或大块状碳化物,要采取提高淬火温度的方法处理	
	渗层碳氮浓度和渗层厚度分布不均匀或出现大块和网状碳化物,在淬火时易发生变形或开裂	零件装炉前应清洗干净,定期清理炉膛内的炭黑,检查炉子密封性,保证炉内压力符合要求,或者合理控制碳(氮)势,采用较快冷却速度	
	淬火温度过高或返修次数太多	应根据零件的技术要求等选择合理的工艺,减少返修次数。在返修前应进行高温回火处理,以防开裂	
	淬火加热方法和冷却方法不当	选择合适的淬火加热方法和冷却方法	

4.9.3 模具渗氮缺陷分析与对策

一般热作模具钢（回火温度为 550 ~ 650℃）都可以在淬火、回火后以低于回火温度的温度进行渗氮，一般碳素钢和低合金钢在制作塑料模具时可以在调质后的回火温度下进行渗氮，一些特殊要求的冷作模具钢也可以在渗氮后再进行淬火、回

火处理。模具钢由于工艺不正确或操作不当，渗氮时常出现渗氮硬度低、渗层浅、硬度不均匀、表面有氧化色、渗氮层不致密、表面出现网状和针状氮化物等缺陷，因此严重影响模具的使用寿命。

模具渗氮缺陷原因分析与对策见表 4-32。

表 4-32 模具渗氮缺陷原因分析与对策

缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
渗氮层硬度低或硬度不均匀	渗氮模具表层含氮过低;因渗氮时炉温偏高或在渗氮第一阶段的氨分解率过高,使炉内氮势过低;渗氮罐、通气管未退氮	适当降低渗氮温度;对控温仪表要经常校正,保持适当的渗氮温度;在渗氮第一阶段应适当降低氨分解率;对渗氮罐、通气管作退氮处理	补充渗氮(520℃×8~10h)。氨分解率 20%~30%
	预备热处理后基体硬度太低	适当降低预备热处理的回火温度,以提高模具基体硬度	
	渗氮炉密封差、漏气或使用新的未经预渗氮的渗氮罐	渗氮炉要密封良好,漏气的渗氮罐应及时更换。新的渗氮罐要进行预渗氮,使炉内氨分解率达到平稳	
	装炉不当或装炉量过多,吊挂不良,造成气氛流动不畅	合理装炉,正确吊挂,保证炉气的正常循环	
	渗氮温度低或时间短、升温速度太快,渗氮炉内温差大,表面脱碳严重,晶粒异常粗大	严格执行渗氮工艺;去除掉脱碳层	
渗氮层浅	渗氮时间太短,渗氮温度偏低,渗氮过程第一阶段氨分解率过高或过低,分解率不稳定	严格控制炉内氮势、渗氮温度及时间,并按工艺要求控制氨分解率	在正常的扩散温度下再渗氮数小时
	模具装炉前未清除掉表面油污,装炉量过多,模具间距太近	严格控制装炉前模具表面质量及装炉量,加强渗氮炉密封,保证炉内渗氮气氛循环正常	
	渗氮罐使用过久未退氮	在 650~700℃进行退氮处理	
	新换夹具和渗氮罐未进行渗氮	预先进行渗氮处理	
渗氮面产生亮块、白点或有软点	由于渗氮炉上、下区不均匀加热或渗氮气氛不畅通,炉内温度不均匀	严格控制渗氮炉内上、下区炉温,保证炉温均匀及渗氮气氛循环通畅	
	氨气通入管道局部堵塞,影响炉内氮势,使炉内渗氮气氛不良	定期清理氨气进气管道,保持管道的畅通	

(续)			
缺陷类型	产生原因	对策	补救措施
渗氮面产生亮块、白点或有软点	模具装炉前表面油污未清理干净	模具装炉前需用汽油或酒精等脱脂,表面不得有油污或其他脏物	
	渗氮炉模具装载太多或炉内模具间距太小、部分有接触	模具装筐时,模具间要保持一定距离,严防模具工作面接触和重叠	
渗氮后表面有氧化色	气体渗氮罐漏气或炉盖密封不良	经常检查渗氮炉密封情况,对漏气的渗氮罐应及时更换,保持炉盖密封良好	在低的空气压力下喷砂清除氧化色,并补充渗氮 510℃ × 4h。渗氮后炉冷至 200℃ 以下出炉
	氨气干燥装置中的干燥剂失效,通入炉中的氨气含有较多水分	要定期更换干燥剂,脱水效果要好,使含水量 <0.2% (质量分数)	
	渗氮结束后随炉冷却时供氨不足,造成罐内负压吸入空气,造成氧化色	渗氮后的模具最好采用油冷。对要求严格控制变形的模具在渗氮结束冷却时要继续通入少量氨气,避免炉内产生负压	
	模具渗氮后出炉温度过高致使在空气中氧化	出炉温度控制在 200℃ 以下,避免渗氮模具在空气中氧化	
渗氮后变形	模具结构设计不合理、形状复杂,或模具在机械加工后的残余应力未能很好消除	设计制造模具时要尽量使模具结构对称、简单,避免厚薄悬殊。对机械加工后的模具应进行退火以消除应力	
	气体渗氮炉内温度不均匀,模具装炉后加热升温过快或出炉时冷却速度太快	要保证炉温均匀,上、下区温差控制在 ±5℃。对变形要求较小和形状复杂的模具应严格控制加热和冷却速度,升温速度 < 50℃/h, 300℃ 以上每升温 100℃ 保温 1h; 冷却时要随炉降温,出炉温度 < 200℃	
	渗氮工艺参数不当,渗氮温度过高、时间过长、氮势过高、产生过厚渗氮层等使变形增大	制订合理的渗氮工艺,尽量采用较低的渗氮温度及合适的渗氮时间、氮势、渗氮层厚度等	
	模具装炉方法不当,炉内温度不均匀,炉内气氛循环不畅	采用合理的装炉方式,保证渗氮炉内温度均匀、气氛循环畅通	
表层出现网状、波纹状、针状或鱼骨状氮化物及厚的白色脆性层	渗氮温度过高、升温加热和降温冷却速度过快,控温仪表失灵使炉内实际温度比仪表指示温度高,在温度过高时扩散层中的氮化物聚集长大、弥散度下降,在晶界上形成高氮相的网状或波纹状组织	正确制订渗氮工艺,渗氮温度控制在 500 ~ 580℃,定期校对控温仪表,升温及降温速度不宜过快	可在渗氮炉中进行扩散处理 (540℃ × 10 ~ 15h)

(续)			
缺陷类型	产生原因	对策	补救措施
表层出现网状、波纹状、针状或鱼骨状氮化物及厚的白色脆性层	模具预备热处理时淬火温度过高,模具基体晶粒粗大	预备热处理的淬火加热温度不宜过高,以免因过热出现粗大组织与晶粒;加热应在保护气氛中进行,避免氧化脱碳;调质件应在机械加工时除掉脱碳层	可在渗氮炉中进行扩散处理(540℃×10~15h)
	液氨含水量高,通入气体渗氮炉中的氨气含水量超标(水的质量分数>0.2%)	液氨的含水量(质量分数)应不大于0.2%,氨气要经过干燥装置充分干燥后[含水量(质量分数)<0.2%]再通入渗氮炉内,并定期更换干燥剂	
	模具设计与加工不合理,有尖角、锐边、凹槽等	模具设计与加工时应尽量避免出现尖角、锐边、凹槽等	
	气体渗氮炉中氨分解率太低(即氮势过高),出现ε相	严格控制渗氮炉内的氨分解率,不应使炉中氮势过高	
	热处理时,淬火加热未在保护气氛中进行。模具表层脱碳严重时,在渗氮后极易出现针状、鱼骨状氮化物	热处理时应采取保护措施,防止加热过程中产生氧化脱碳现象	
渗氮层不致密、耐蚀性差	模具渗氮前表面质量差	模具毛坯应预先进行正火或调质处理,机械加工后表面质量要高	将表面清理干净后严格按照气体渗氮工艺再进行一次补充渗氮处理
	模具装炉前表面有锈蚀等未除净或清洗不干净	模具装炉前应仔细清理表面,不得有锈蚀,并清洗干净	
	气体渗氮炉内氨分解率过高,模具渗氮层表面氮浓度太低,使ε相太薄或不连续	采用合适的氨分解率(氨分解率不宜过高)	
	在一定的温度下,渗氮时间太短,模具渗氮层含氮量不足,或冷速太慢,造成氮化物的分解	采用合理的渗氮时间,保证渗氮层有足够的含氮量,渗氮后应适当快冷	
表面剥落及脆性大	原材料的冶金质量不合格	选用合格的钢材	对因表面脱碳引起的脆性,允许重新退氮处理。对允许表面有氧化色的零件可在空气炉内进行
	渗氮工艺不当	改进渗氮工艺	
	渗氮前磨削量过大,出现局部退火	减小磨削量,分几次磨削,加强冷却	
	表面氮浓度过大或退氮时间不足,渗氮层与心部含氮量陡降	严格控制氨分解率,确保退氮彻底(可在570~580℃保温4~5h),去除零件尖角、棱边或提高表面质量	

(续)			
缺陷类型	产生原因	对策	补救措施
表面剥落及脆性大	调质时淬火温度太高,出现过热,晶粒粗大	正火后重新调质处理,提高预备热处理的质量	对因表面脱碳引起的脆性,允许重新退氮处理。对允许表面有氧化色的零件可在空气炉内进行
	表面有脱碳,表面质量差或有锈蚀,液氮的含水量(质量分数)超过1%,造成表面脱碳	提高渗氮炉罐的密封性,降低氨中的含水量,去掉脱碳层或锈迹,更换干燥剂	
	模具零件的外形有尖角、锐边等	模具零件设计时尽可能避免出现尖角、锐边	
	冷却速度过慢	加快渗氮零件的冷却速度	

4.9.4 模具氮碳共渗缺陷分析与对策

氮碳共渗是一种同时进行氮、碳两种活性原子渗入的化学热处理过程,又称为软氮化。氮碳共渗具有渗层浅、耐蚀性好、脆性小、耐磨性高、抗咬合性好及共渗时间短等特点,适用于要求硬化层薄、负荷较小的模具,不易在重载荷条件下工作。氮碳共渗通常用于热态工作的压铸模、塑料模、热挤压模、热锤锻模等,也常用于某些冷作模具。

在模具氮碳共渗过程中,常会出现一些缺陷,对此应进行细致分析,查找原因,并采取有效措施加以预防,以提高模具寿命。表4-33为气体氮碳共渗常见缺陷原因分析及对策。

表 4-33 气体氮碳共渗常见缺陷原因分析及对策

缺陷类型	产生原因	对策	补救措施
硬度低,渗层浅	炉罐、炉盖漏气或炉内压力小	定期检查共渗用设备,保证炉子的密封性及共渗时炉内压力	按正常的氮碳共渗工艺重新处理
	零件的表面质量差	零件表面粗糙度 Ra 应控制在 $0.5\mu m$ 以下	
	零件表面切削液或乳化液清洗不干净,或表面有锈蚀、脱碳层	零件表面要清洗干净,并去除脱碳层及铁锈	
	炉内的氮势和碳势低,渗层氮含量太低。炉内气体循环不良	加大共渗介质的流量,提高渗剂的浓度,增加炉内氮势和碳势,使表层的含碳量(质量分数)大于 0.7% 。炉内零件的放置要保证气体流动畅通	
	气氛中氮势低	增加氨的供给量,使表层的含氮量(质量分数)达到 $0.2\% \sim 0.4\%$	

(续)			
缺陷类型	产生原因	对策	补救措施
硬度低,渗层浅	共渗时间短或温度低	采用正确的温度和时间重新进行氮碳共渗	按正常的氮碳共渗工艺重新处理
	零件的截面尺寸过大或装炉不良	改变零件的设计,合理装炉,提高炉内气氛的流动性	
	共渗结束后冷却速度低	共渗后进行水冷或油冷,改善冷却效果或选用冷却能力较强的淬火冷却介质	
	零件材料选择不当	选择符合要求的原材料	
表面疏松	主要因氮的含量过高	严格控制通氮量	磨去表面疏松层
	共渗的温度过高或共渗的时间过长	严格执行氮碳共渗工艺,合理控制氮碳共渗的时间和温度	
	原材料采用铝脱氧时,容易产生表面疏松	选择符合要求的模具原材料	
表面出现花斑	零件共渗前未清洗干净或有水分黏附在表面	入炉前应将零件清洗干净,并进行干燥处理	
	零件彼此之间相互接触或与其他夹具、工装接触	合理装炉,确保零件之间有一定的间隙,以利于气氛循环畅通	
表面出现托氏体组织	零件表层的合金元素氧化	改善共渗用炉子的密封性,加速排气,控制炉气成分,确保渗层的氮浓度;对共渗用氮进行充分干燥处理	
	淬火冷却速度慢	加快淬火冷却介质的搅拌或更换淬火冷却介质	
	模具材料选择不当	选用氧化性倾向小的钨钼钢材	
渗层脆性大	氮的供给量过大,导致渗层表面的氮浓度过高,形成了大量的壳状碳氮化合物	提高共渗温度,减少氮的供给量	
渗层残留奥氏体过多	共渗温度过高,碳浓度过高	调整炉温和共渗气氛的碳势	
	共渗温度过低,氮浓度过高	调整炉温和供氮量	
零件变形大	零件的加热速度过快;结构复杂的零件内外温差过大,造成热应力增大	采用缓慢升温或阶段加热,在 300℃ 以上,每升温 100℃ 保温 1h;控制加热和冷却速度,保证炉温均匀	
	机械加工残余应力大,共渗前未进行去应力退火或退火不充分	零件粗加工后进行去应力处理(590~620℃ × 2 ~ 3h,高于正常的共渗温度)	

(续)

缺陷类型	产生原因	对策	补救措施
零件 变形大	零件尺寸大,形状复杂,吊挂或放置不垂直,或受零件自重的影响	零件设计应尽量简单、对称,吊挂时注意重心的位置,放置应平稳、牢固	
	零件不对称或进行局部处理	采用捆绑、填塞或其他方法,尽量使零件均匀对称。也可在共渗后去掉硬化层	
	炉罐内温度均匀性差	合理装炉,不允许出现叠加放置,应有利于炉内气体的流通,搅拌风扇运转正常	
	氨气流通不畅,装炉不当	改进零件的装炉方式或通气管的位置,保证零件进行均匀的共渗	
	共渗处理后的冷却速度太快	根据要求选择适当的淬火冷却介质或合理控制冷却速度	
表面呈红色或有锈蚀	所用的渗剂水分过多,液氨干燥剂失效	对渗剂需进行脱水处理,或更换新的干燥剂	将零件除锈并清洗干净后重新进行氮碳共渗
	出炉温度过高,在空气中冷却	随炉冷却到 200℃ 以下再出炉或进行油冷	

4.9.5 高速工具钢模具热处理缺陷分析与对策

高速工具钢具有高硬度、高强度、高耐磨性和高热稳定性等特点，而且对其采用低温淬火、快速加热等工艺措施还可以有效地改善其韧性，因此越来越多地被用于要求重负荷、长寿命的冷作模具（如冷挤压凸模、重载冷镦凸模等）。在高速工具钢模具零件热处理过程中，因多种因素的影响，常产生一些热处理缺陷。高速工具钢热处理常见缺陷原因分析与对策见表 4-34，供分析高速工具钢模具热处理缺陷时参考。

表 4-34 高速工具钢热处理常见缺陷原因分析与对策

缺陷类型	产生原因	对策	补救措施
过热、过烧	原材料碳化物偏析严重,局部区域含碳量过高	加强原材料的金相组织检查,确保其质量合格	过热零件进行退火处理,过烧零件报废
	淬火温度高,加热时间长,控温不准确	严格控制加热温度和时间,定期检验控温系统,保证控温系统正常	
	零件在盐浴炉中加热时靠近或接触电极	将零件放在有效加热区域内进行加热	

(续)			
缺陷类型	产生原因	对策	补救措施
过热、过烧	零件插入盐浴炉盐渣中	根据零件的长度来选择合适的炉膛深度,并彻底捞渣	过热零件进行退火处理,过烧零件报废
	淬火前或加热时产生表面脱碳或增碳	严格控制加热介质的气氛,在中性的介质中进行加热	
硬度不足	淬火加热温度低或加热时间短	严格执行工艺规范,加强现场金相检查,合理控制淬火加热温度和时间	
	分级温度过高、时间过长	将分级温度和时间控制在要求的范围内	
	回火温度低或时间短、次数少	应在规定的范围内进行充分的高温回火,保证回火次数,以使其产生二次硬化,增加硬度	
	回火冷却不当,未冷到室温	回火后的零件应在空气中冷却,避免吹风冷却或喷水冷却	
	在盐浴炉加热时表面产生氧化、脱碳	严格控制盐浴中硫酸盐的含量,并脱氧捞渣	
淬火脱碳	未定期进行盐浴脱氧捞渣,或捞渣不彻底	严格执行盐浴脱氧捞渣的操作规程	
	零件与工装等表面氧化皮带入了盐浴炉内	零件表面的氧化皮或脱碳层应除掉;对工装进行喷丸或酸洗处理,去除氧化皮	
淬状断口	热加工过程中停锻或停轧温度太高,而最后一道变形加工接近临界变形度	严格控制停锻或停轧的温度和最后的变形度	
	重新淬火前未进行退火处理或退火不充分	重新淬火前必须进行充分的退火处理	
腐蚀	零件局部加热时,在盐浴与空气的交界处产生麻点	将零件整体浸入盐浴中后立即提出,再进行局部加热	
	盐浴中有夹杂物存在或硫酸盐超标	严格控制盐浴中硫酸盐及杂质的含量,并彻底脱氧捞渣	
	零件表面在淬火后未清洗干净,留有残盐	在沸水中将零件清洗干净	
变形与开裂	淬火加热速度过快,加热不均匀,冷却速度过快	严格执行热处理工艺规范	

(续)

缺陷类型	产生原因	对 策	补救措施
变形与开裂	加热温度过高、时间过长	控制加热温度和时间,加强现场金相检查	
	原材料碳化物偏析严重、夹杂物超标	加强原材料的检查,确保原材料质量合格	
	淬火后未及时回火或回火不充分	淬火后及时进行回火处理,避免快速冷却	
	淬火后零件未完全冷却就直接用水清洗	严禁将未完全冷却的淬火零件直接用水清洗	
	零件表面脱碳或磨削加工冷却不当	严格进行脱氧处理以防止表面脱碳,磨削加工时应控制磨削量大小	

第5章 模具的失效分析与对策

模具是工业生产中不可缺少的重要工艺装备。在机电工业中，70%以上的零件采用模具加工，此外，塑料、陶瓷及建材等制品大部分也采用模具成形。随着工业技术的快速发展，对模具使用寿命的要求越来越高，因而正确分析和研究模具使用中失效的原因，采取相应的有效措施来提高模具的使用寿命是模具设计、制造过程中的一项重要内容。

模具失效主要是指模具工作部分发生严重破损，不能用一般修复方法（如刃磨）使其复原的现象。模具失效有偶然失效和工作失效两类。

模具的早期失效是指模具的使用时间不及其平均寿命的 $1/3$ ，甚至在更短时间内因变形过量、开裂或断裂等原因造成模具完全失效的现象。造成模具早期失效的原因，除去选材不当外，更主要的原因是热处理不当。

模具的失效分析，是研究提高模具寿命的基础工作，首先要弄清楚一个模具有几种损坏形式，在这些失效形式中哪种损坏形式对模具寿命影响最严重，而且是最早产生的；其次要知道各种失效形式的主要特征，找出产生各种失效形式的主、次因素，以便采取相应措施加以解决，并为模具材料的选择、确定热处理工艺方法及参数提供依据。

5.1 模具失效的形式

1. 模具损伤的基本形式

模具在工作时，其不同部位承受不同的作用力和不同的温度变化，因此可同时出现几种不同形式的损伤。不同形式的损伤，其发展速度随模具的结构、模具材料的性能、模具的制造工艺、压力加工设备的特性和操作方法的不同有很大差别。

一般情况下，模具出现损伤后不会立即丧失工作能力，只有当某种损伤形式发展到使模具生产出的产品成为废品时，模具才完全失效。因此，所谓失效形式，就是使模具丧失正常工作能力的某种损伤形式。

为提高模具寿命，应首先对已失效的模具进行全面的分析，只有充分掌握了导致模具损伤的各种原因及影响因素，才能在消除某一种损伤形式时不至于顾此失彼，忽略了其他损伤形式的存在。

模具损伤的基本形式有五种，即塑性变形、磨损、疲劳、冷热疲劳、断裂或开裂。冷热疲劳主要出现于热作模具，在冷作模具上不出现，而其他四种损伤形式在冷、热作模具上均可能出现。

任何模具所出现的损伤形式并非一成不变，它与各种因素有关。不掌握这些影响因素，就无法预测模具的失效形式及工作寿命，也就难以提高模具的质量。

2. 模具的失效形式

形状各异的模具在工作过程中各部分承受的作用力不同，可能同时出现多种形式的损伤，当其中一种损伤发展到足以妨碍模具正常工作或出现废品时，就造成模具的完全失效，尤其是当模具硬度较高时，更容易发生突然断裂，其危害更为严重。另外，模具在工作时除了受到正常工作载荷外，还受到一些随机波动载荷的作用，它与模具加工质量、尺寸结构、装配精度、设备精度、操作人员的技术水平和责任心等因素有关。因此，模具失效的形式和特征，因模具结构、材料性能、制造工艺及工作条件等因素的不同而不同。对此，应根据具体情况进行具体分析，找出模具失效的主要原因。

模具的基本失效形式包括断裂或开裂、磨损、疲劳及冷热疲劳、变形、腐蚀等。

冷作模具常见的失效形式为磨损、断裂、塑性变形与疲劳等；热作模具的失效形式除了冷作模具出现的磨损、断裂与变形外，更多的是冷热疲劳、塌陷和热侵蚀等。有文献指出，模具出现早期断裂破损的比例占全部失效形式的 60% ~ 80%。

不同类型的模具，其失效形式不同，即使是同一种模具，其出现失效的形式也不是一成不变，如冷作模具容易发生脆断而不会出现冷热疲劳失效，热作模具容易发生冷热疲劳、开裂及变形失效，而冷、热作模具都可能因磨损而失效。

如果了解模具的失效形式，就可以进一步分析模具失效的原因，找出影响模具失效的各种因素，从而提高模具质量，延长模具使用寿命。

表 5-1 为国内外模具早期失效的原因所占比例。通过表 5-1 可以看出，热处理工艺不当（国内和国外分别为 44% 和 52%）占早期失效原因的第一位。

表 5-1 国内外模具早期失效的原因所占比例

失效原因	日本统计数据（%）	我国统计数据（上海地区）（%）
模具材料选用不当	7	17.8
模具设计不合理	10	3.3
热处理工艺不当	44	52
模具加工方法不好	7	8.9
对模具材料性能缺乏认识	5	—
模具材料下料不当	3	—
模具材料使用不当	3	—
模具使用条件不好	7	11
锻造工艺不当	—	7
其他	14	—

5.2 模具的失效分析

模具失效分析是对已经失效的模具进行失效过程分析,以探讨模具失效的原因,为以后制造模具时正确选用模具材料、优化模具结构设计、合理制定模具制造工艺(包括热处理工艺)积累经验,并为模具新材料的研制、推广和新工艺的开发等提供数据,对提高模具的使用寿命有着十分重要的意义。

为了提高模具使用寿命,应对已经失效的模具进行分析。在制定提高模具寿命的技术方案及采取技术措施之前,首先必须了解此类模具的主要失效形式,即了解导致模具失效的最常见、大量的失效形式及其失效原因和主要影响因素。由于同一类模具也会有不同的失效形式(如某些模具可能因发生断裂而失效,而另一些模具则可能因塑性变形而失效),因此需要全面掌握各种失效形式所占的比例以及每种失效模具的使用寿命。例如某类模具,虽有部分模具最终因磨损而失效,但其使用寿命很高,而另一部分模具以断裂形式失效,其寿命极短,这就要重点分析断裂原因,首先解决断裂问题。

5.2.1 模具失效分析方法

一批模具不可能均以同一种形式失效,某些模具可能以发生断裂而失效,另一些模具又可能以塑性变形而失效。因此,在研究提高模具寿命的技术方案时,首先应当了解在一批模具中,各种失效形式所占的比例以及每一种失效形式的模具寿命的上、下限和平均值,从而确定这一批模具的主要失效形式(对模具寿命危害最严重的失效形式),并分析其原因和影响因素,从而提出解决问题的方案。

在分析失效原因时,有可能同时存在多种影响因素,但必须查明其主要原因。下面以冷、热作模具断裂失效分析为例加以说明。

(1) 冷作模具断裂失效原因分析 在分析冷作模具的断裂失效原因时,应了解有哪几种损伤形式参与了对断裂过程的交互作用以及作用的大小。如果确认是磨损加速了疲劳裂纹的萌生,则应注意提高耐磨性。如果确认疲劳裂纹并不萌生于磨损处(磨损沟痕),则应排除磨损对断裂的影响,另找其他原因。

(2) 热作模具断裂失效原因分析 在分析热作模具的断裂失效原因时,应了解冷热疲劳、热磨损、内应力等因素的影响。热作模具所受的机械作用力并不大,因为坯料在高温时已软化,但由于热作模具中存在温度差别,再加上模具表层有可能继续发生回火转变,因而在热作模具中存在热应力和组织应力,两种应力叠加后的数值是相当大的,足以引起开裂,因而不可忽视。

提高模具寿命,就必须了解模具失效的原因及影响因素,然后据此制订相应的技术措施。模具失效原因分析的步骤如下:

1) 生产现场调查。在生产现场了解模具的使用情况(如是否装配精度不够,

使用不当等)、设备状况(如是否精度降低,维护不当等)、操作规范(如是否模具润滑、冷却不良等)等,统计模具的寿命和失效形式,并保管好模具供分析之用。

2) 模具制造工艺调查。分析复查模具材料的化学成分和冶金质量(如是否非金属夹杂物超标,组织不合格,性能不合格等),详细了解模具的锻造工艺、机械加工(如是否表面粗糙度值高,尖角未倒钝,有磨削裂纹等)、设计方案(如是否因开口不当造成应力集中,模具强度设计不够,受力分布不合理,选材不当等)、热处理工艺及操作过程,其中重点了解热处理(如是否存在过热过烧,显微组织不合格,淬火出现较大变形或裂纹,晶粒粗大,脱碳或增碳等情况)、锻造工艺操作过程(如是否锻造加热温度过高,冷速过快产生微裂纹,碳化物分布不合理,纤维方向不正确等)及质量检验方法等。

3) 对模具进行失效分析。对收集到的已失效模具的损伤形式进行全面分析。其分析内容包括:①通过对模具外观的仔细观察,了解模具上共有多少种损伤形式、各种损伤形式的损伤程度、是何种损伤形式造成模具失效;②通过仔细观察裂纹的起裂点位置、裂纹源部位的表面粗糙度和几何形状,判断是否有造成应力集中的因素;③找出模具发生塑性变形的部位,检测该处的硬度,测量该处的壁厚;④找出模具出现磨损的位置,检测该处的硬度,测量该处的壁厚;⑤断口分析,如检查开裂处断口形貌,找出开裂源的位置及裂纹的扩展方向;⑥测量晶粒的粗细程度,检查断口是沿晶断口还是穿晶断口;⑦金相分析,如检查表面到心部的金相组织;⑧硬度测量,如检测从模具表面到心部的硬度变化情况。④通过将上述观测结果汇总后进行综合分析,判断引起损伤和失效的各种原因,找出造成损伤和失效的各种因素,以便在此基础上制定改善和提高模具质量的技术措施。

模具失效的原因一般包括四个方面:模具工作环境、操作人员使用模具情况、模具本身质量及生产管理制度,其中最重要的是模具本身质量。模具在使用时其工作条件往往很复杂,因此其失效形式和原因也是多种多样。但只要掌握了失效分析的方法,充分利用现有技术手段对模具进行综合分析,就能准确地找出模具失效的原因。

5.2.2 影响模具失效的因素

影响模具使用寿命的因素较多,除了热处理工艺和操作外,还与模具的设计、材料、锻造工艺、机械加工、装配、使用情况(包括模具的预热、润滑及冷却等)等密切相关。根据有关方面的调查统计,在造成模具失效的诸多因素中,由于模具用材和热处理不当而引起的失效约占70%。由此可见,正确地选用模具材料及热处理工艺对提高模具寿命的重要作用。

(1) 模具设计 模具设计不仅要结构合理,还应根据模具工作条件和受力状态选择合适的材料,设计合理的热加工工艺,以得到所期望的性能。此外,还要对

钢材纤维的取向、模具几何形状、圆角曲率半径的大小等作全面的考虑,以防止热处理和工作过程中产生裂纹、断裂、塌陷和变形等早期失效。

1) 结构设计。模具结构是否合理,对模具的承载能力有很大的影响。不合理的结构由于能引起严重的应力集中或使模具温度过高,因而恶化模具的工作条件。

模具结构主要包括模具几何形状、模具间隙、冲头的长径比、端面倾斜角、过渡角大小,以及热作模具中开设冷却水路、装配结构等。不合理的模具结构设计往往容易造成模具早期失效。例如,图 5-1 所示为三种反挤压凸模结构,其中图 5-1a、b 所示两种尖端结构的凸模与图 5-1c 所示平端凸模相比,其单位挤压力降低 20%,因而平端型结构凸模易于产生早期失效,其寿命比图 5-1a、b 所示的两种类型凸模的寿命短。又如塔形热挤压凹模使用图 5-2a 所示的整体式凹模时,由于模膛经受急冷急热,极易产生热疲劳裂纹,且随着微裂纹的不断扩展,最终会发生断裂失效(见图 5-2b)。当改用图 5-2c 组合式凹模后,由于降低了型腔表面的拉应力,避免了应力集中,因此不再出现早期断裂现象。

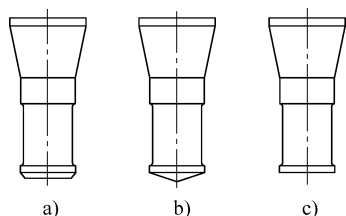


图 5-1 三种反挤压凸模结构

a) 带锥台型 b) 带锥角型
c) 平端型

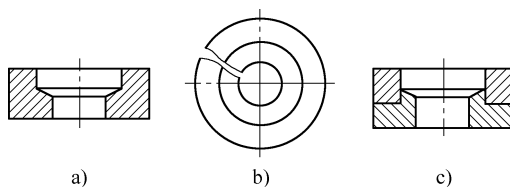


图 5-2 塔形热挤压凹模结构及其早期断裂形式

a) 整体式凹模 b) 整体式凹模早期断裂
c) 组合式凹模

2) 硬度要求。不同类型的模具,由于工作条件不同,故硬度要求也不相同。如果硬度过高,则韧性不足,在使用过程中受到冲击压力时容易发生脆性断裂;但如果硬度过低,则常会在使用过程中因型腔塌陷、变形和墩粗而导致模具失效。例如,大型摩托车机匣压铸模,材料为 4Cr5MoSiV 钢(H11),设计要求硬度为 48~53HRC,在压铸 400~4 000 件产品时陆续发生了脆性断裂,甚至有时在试压过程中就发生断裂,后改进设计,将硬度降低为 44HRC,不但避免了脆性开裂,还使模具使用寿命提高了 5~6 倍。

3) 选材。模具材料的选择应根据模具的受力状态、工作条件和材料性能来确定。例如齿轮热锻模,开始选择材料为 3Cr2W8V 钢,经 1 150℃ 加热淬火、580℃ 两次回火,硬度为 51~52HRC,在将其用于锻打 20CrMnTi 钢坯料时,由于变形抗力较大,且 3Cr2W8V 钢在高硬度下塑性和韧性都较低,仅锻打了 30~60 件产品即发生断裂,后将模具用钢改为 4Cr5MoSiV 钢(H11),该钢在中温(400~500℃)具有较高的热强性,而且耐磨性、韧性、热疲劳性都较好,在硬度为 52~55HRC 时,模具使用寿命提高了 2~4 倍。

4) 模具材料纤维组织取向。钢锭在轧制过程中, 组织内部原有的树枝状晶体、夹杂物、碳化物、疏松、缩孔和气泡等沿加工方向被延伸拉长, 形成彼此平行的线条, 通称为纤维或流线。由于材料存在纤维组织, 故纵向(锻轧方向)和横向(垂直于锻轧方向)的性能有很大的差异, 尤以冲击韧性最为突出。一般材料的横向冲击韧度与纵向冲击韧度之比小于 0.60。因此, 模具设计时不仅要选择合适的钢种, 还应根据模具受力方向来合理安排金属材料的纤维方向, 即使其最大受力方向与金属材料纤维方向垂直。例如, 用 Cr12 钢棒制造的纺织纲领冲模, 硬度为 52~54HRC, 使用寿命仅 500~1 000 件, 甚至在试生产过程中就沿纵向开裂, 经分析研究发现断口呈朽木状, 沿裂纹方向的纵向剖面上共晶碳化物呈严重的带状、堆积状、网状分布, 后改变制模工艺, 下料后经合理锻造、球化退火、机械加工后再进行最终热处理, 改善了碳化物分布, 使模具使用寿命提高了 9~10 倍。

(2) 原材料 用于制造模具的材料要具有适应模具工况的优良性能, 最重要的是材料本身的质量要合格, 如材料内部不应存在严重的非金属夹杂物、碳化物偏析、碳化物不均匀及疏松等缺陷, 因为这些均是导致模具早期失效的重要因素。例如冲切钢板的凹模, 材料为 CrWMn 钢, 由棒料直接加工而成, 硬度为 62.5HRC, 冲切 1 300 件产品后发生开裂, 经取样分析, 发现断口平整, 呈低周疲劳特征, 另外显微组织中有二次碳化物网。由于网状碳化物使模具脆性增加, 在冲切过程中易在应力集中部位形成微裂纹, 且随着冲切次数的增加, 微裂纹不断扩展, 故最终导致模具开裂。经锻造快冷消除了材料中的网状碳化物后, 模具使用寿命提高了 6 倍左右。

模具钢原材料中存在带状组织时, 淬火后的组织也会呈带状, 而组织不均匀导致内应力增加, 严重影响模具的使用寿命。另外, 球化退火不良或其他原因遗留的网状碳化物也是模具淬裂的重要原因。

(3) 锻造 锻造的目的不仅是将坯料塑造成所需的形状, 还可改善模具钢的性能。模具钢经合理的锻造后可使原材料中大块碳化物破碎, 使其分布均匀; 改变模具中流线的方向, 使流线合理分布; 焊合钢中的气孔, 提高钢的致密度。

(4) 机械加工 模具制造周期长, 机械加工复杂(涉及车、钳、刨、铣、钻、线切割、电火花及磨削等多道工序), 如果加工工艺不合理或操作不当, 就可能造成模具早期失效。

模膛圆角曲率半径太小、残留的加工刀痕或较粗的磨痕等, 都会造成应力集中而导致裂纹的萌生。裂纹在应力作用下迅速扩展, 就会造成模具开裂, 从而降低模具的使用寿命。磨削加工时, 砂轮进给量太大、砂轮选择不当、冷却不良及磨削瞬时温升都会引起模具烧伤, 从而使其局部硬度降低, 并导致耐磨性和疲劳性能降低。电加工(线切割、电火花)过程中, 放电产生大量的热会使加工表面温升到熔融状态, 而急冷后就会在加工表面形成熔融凝固层, 并在次层形成淬火层。这两层在浸蚀后都是白色, 白色层的存在不仅会使硬度出现异常, 而且会产生微裂纹。

如果表面白色层未经去除或未采取低温回火方法防止微裂纹的扩展,则在模具工作过程中微裂纹就可能成为疲劳源,使模具使用寿命降低。

(5) 热处理 模具热处理包括预备热处理(如正火、球化退火、调质处理等)和最终热处理(如淬火、回火及表面强化处理等)。在模具热处理过程中,如果热处理工艺不合理或操作不当,则会导致变形、开裂或严重影响到模具钢的组织形态,引起模具早期失效。据统计,因热处理原因导致模具早期失效的数量约占模具失效总数的60%。热处理加热温度、保温时间、冷却速度和炉内气氛等工艺参数选择不当,都会造成模具淬火开裂或早期失效。

模具在预备热处理时,如果加热温度过低,则不能够保证碳化物充分溶解或合金元素充分固溶,从而降低模具钢的断裂抗力;如果冷却速度或等温温度不当,则不能保证析出的碳化物均匀分布,从而影响模具钢的组织性能。

最终热处理时,如果淬火加热温度过高,则会引起钢中奥氏体晶粒长大,大量碳化物溶入基体中,淬火后出现粗大针状马氏体,增加模具应力,从而使冲击韧性下降,导致模具开裂、崩刃及脆断。

模具在淬火或高温回火时未加保护或保护不良,将引起表面脱碳。如果未将脱碳层除去,将严重降低模具的耐磨性,容易引起淬火裂纹,缩短机械疲劳或冷热疲劳寿命。

如果因热处理不当导致模具出现淬火裂纹,必将严重缩短模具的疲劳或冷热疲劳寿命,严重的还会引起早期断裂。

模具淬火温度过低,将降低热作模具钢的高温强度和组织稳定性,容易使热作模具发生早期塑性变形。

模具回火不充分,将在模具中残留较大的淬火应力,并使模具的韧性下降,容易发生早期断裂。

(6) 使用情况 在模具使用过程中,正确的操作对延长模具寿命是非常重要的。模具的预热、锻造温度、润滑剂与润滑方法、冷却条件、浇注温度和压铸模表面的涂覆保护,以及使用过程中的补充回火等,都必须严格控制 and 正确操作,才能充分发挥模具材料的性能而获得较高的使用寿命。

被锻打毛坯温度过高时,会使模具型腔表面发生相变而急剧软化,尤其是下模,它与高温坯料接触时间长,表面软化快,容易出现变形、拉毛、沟槽、严重磨损及塌陷而造成早期失效。为了降低模具温度,保持模具的高温强度,常常采用各种冷却液对其进行冷却。冷却液的选择必须根据模具材料来定,如高合金钢模具的导热性差,采用水冷却会使模具内外形成很大的热应力,容易在模具表面产生龟裂而使模具早期失效。

在压力加工时,采用合适的润滑剂可大幅度降低冲击力,有利于金属在型腔中的流动和锻件的顺利脱模。

模具装配不当或未按规定的工艺操作,会引起受力不均和附加应力,从而导致

模具的恶性损坏。例如,在420t挤压机上挤压铝合金时,由于放入挤压筒内的铝合金锭较多,违反了放入的铝锭加挤压垫应小于350mm的规定,超出了挤压筒的实际长度,使挤压轴和挤压筒偏离中心,引起挤压轴受力不均而弯曲和折断。图5-3所示为铝合金挤压示意图。

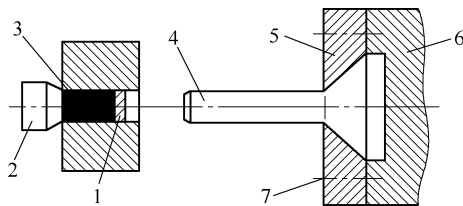


图 5-3 铝合金挤压示意图

1—挤压垫 2—型材模具 3—铝锭 4—挤压轴 5—法兰盘 6—主轴塞 7—螺钉

5.3 失效模具的金相组织检验方法和碳化物提取方法

为了对失效模具金相组织进行鉴别和研究,需要将所分析的模具材料制备成一定尺寸的试样,经磨制、抛光及腐蚀等工序后,再通过金相显微镜来观察、分析失效模具的显微组织状况及其分布情况。

通常用组织试验法来判断导致模具损坏的原因是材料问题还是热处理问题。因为模具钢的性能受到钢中碳化物种类和数量的影响,故从母材中把碳化物提取出来,这对检查模具的耐磨性和力学性能是否正常很有必要。

一般通过对失效模具的宏观检查、金相分析、断口分析以及共晶碳化物的评判等来分析和判断模具失效的原因,如参照 GB 226—1991《钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法》,以热酸浸法显示低倍组织和缺陷,用质量分数为4%硝酸乙醇溶液浸蚀试样以显示显微组织;参照 GB/T 10561—2005《钢中非金属夹杂物含量的测定——标准评级图显微检验法》评定其非金属夹杂物级别;参照 GB/T 14979—1994《钢的共晶碳化物不均匀度评定法》评定共晶碳化物不均匀度;参照 JB/T 7713—2007《高碳高合金钢制冷作模具显微组织检验》评定大块碳化物级别;用补充回火方法验证失效模具是否存在回火不足现象。

5.3.1 失效模具的金相组织检验法

1. 取样和制样

(1) 取样 取样应根据被检查和分析模具的特点、失效形式、加工工艺及不同的研究目的,取其具有代表性的部位。在检验和分析失效模具损坏原因时,除了在损坏部位取样,还需要在距离损坏处较远的部位截取试样,以便于分析比较。对于轧制和锻造模具材料则应同时截取横向(垂直于轧制方向)及纵向(平行于轧制方向)的金相试样,以便于分析比较表层缺陷、碳化物及非金属夹杂物的分布

情况。选取试样及评定非金属夹杂物级别的方法可参照 GB/T 10561—2005 《钢中非金属夹杂物含量的测定——标准评级图显微检验法》。

试样的大小一般做成 $\phi 12\text{mm} \sim \phi 15\text{mm}$ 圆形或 $12 \sim 15\text{mm}$ 方形较好。此外，试样厚度要比直径或边长小一些为好。

确定试样截取位置时的重要条件是不能使其产生组织变化，同时，必须选择正确的切断方法。此外，磨制电镀层和表面硬化层的断面时容易产生飞边和毛刺，这些缺陷将影响对组织的观察。对此，可采用机械镶样法和热压镶样法来解决这个问题。

(2) 制样 试样磨制分为粗磨和细磨。粗磨的目的在于磨平表面，一般在砂轮机上进行磨削，使用砂轮机侧面进行磨削，以保证试样磨平，并不断用水冷却，以避免温度升高造成试样内部组织发生变化。细磨好后的试样还需要进行抛光。试样的抛光一般可分为机械抛光、电解抛光和化学抛光。机械抛光可在专用抛光机上进行。在最后精密抛光时，采用稀的抛光液将得到良好的效果。

2. 腐蚀

如果只观察分析硫化物、氧化物等非金属夹杂物大小及分布状态，检查有无龟裂和内部氧化等缺陷，也可以不必腐蚀。一般腐蚀方法有化学腐蚀方法和电解方法两种。此外，还可以利用加热法和喷镀法等。

(1) 化学腐蚀方法 表 5-2 为在模具用钢中使用的主要化学腐蚀剂。碳素工具钢和低合金工具钢的腐蚀采用硝酸酒精溶液，硝酸浓度（质量分数）为 3% ~ 10%。退火材料和回火材料的腐蚀采用低浓度硝酸酒精溶液，而淬火材料则使用高浓度硝酸酒精溶液。此外，冲模钢和高速工具钢的淬火材料采用高浓度的硝酸酒精溶液效果较好。

表 5-2 在模具用钢中使用的主要化学腐蚀剂

目的	名称	成分	特 性
热处理状态下，显示出全部组织	硝酸酒精溶液	浓硝酸：3 ~ 10mL 酒精：100mL	对碳素工具钢和合金工具钢有效。淬火材料用高浓度，其他材料用低浓度
	氯化铁盐酸水溶液	FeCl ₃ ：10g 盐酸：30mL 酒精或水：120mL	各种不锈钢、冲模钢、高速工具钢等高合金钢
渗碳体着色	氢氧化钠苦味酸水溶液	苦味酸：5g 氢氧化钠：25g 水：100mL	煮沸 5 ~ 20min。Fe ₃ C 着色为黑色或褐色，但高 Cr 的渗碳体难以着色

当只对试样进行碳化物的识别或检查碳化物分布状况时，使用着色腐蚀非常方便，如对 T10 钢用氢氧化钠苦味酸水溶液腐蚀。

(2) 电解腐蚀法 该方法是以试样为正极, 另一极(白金板)为负极, 在几伏特电压的条件下进行定电压或定电流电解。前者由于不能进行微调控制, 故要确定电解液必须先确定组织状态。而后者由于可实现电位微调控制, 故可以通过测量各试样的极化曲线(电位-电流密度曲线), 得到同一种试样材料和同一种电解液的各种组织状态。

例如, 对 1.15C-13Cr 钢进行化学腐蚀和定电压电解, 可以观察到渗氮层和母材交界处的情况。当用质量分数为 10% 的硝酸酒精溶液对试样进行化学腐蚀时, 交接处氮化物并不明显, 但是, 当采用苦味酸水溶液的定电位电解时, 将获得如下信息: ①交接处十分明显; ②扩散层有氮化物; ③母材中的碳化物分布状况; ④母材中粗大的碳化物在扩散层内转变成其他物质等。

定电压电解法得到如下信息对于判断组织状况是十分有效的, 这些信息是: ①奥氏体晶粒度; ②碳化物种类和分布状况; ③各种金相组织; ④各种合金元素的偏析状况。

5.3.2 失效模具碳化物的提取法

模具钢中的碳化物种类和数量将直接影响到模具的耐磨性和力学性能。为了正确检测其耐磨性和力学性能, 必须把碳化物从钢中提取出来。一般提取碳化物的方法有酸溶解法和电解法两种。通常, 对于高速工具钢和冲模钢的碳化物用磷酸溶解法提取, 其他钢种的碳化物用盐酸水溶液的定电压电解法提取。

(1) 酸溶解法 采用酸溶解法不需要昂贵的设备便可迅速分离出碳化物来。例如, 对于只含 $(C, Fe)_{23}C_6$ 的 13Cr 钢, 将用磷酸水溶液分离出的碳化物量与计算值进行比较, 两者大体是一致的。当要求分离出 Fe_3C 时, 由于 Fe_3C 在磷酸中不稳定, 所以最好采用盐酸水溶液。

酸溶解法的操作步骤如下: ①将失效模具钢材切成小片(试样), 并测量出重量; ②将试样放在酸中, 静置; ③用磁铁等确认 Fe 的溶解情况(Fe_3C 无磁性); ④进行过滤和吸附; ⑤用溶解酸和水洗净; ⑥用干燥机干燥; ⑦测量重量并用 X 射线分析组织。

(2) 电解法 电解法分为定电压电解法和定电位电解法, 其所用的电解液主要是各种酸或氢氧化钠苦味酸等中性溶液。采用定电位电解法时, 首先要测量各种碳化物的极化曲线(即碳化物的电位-电流密度曲线), 以便估计分离条件。碳化物是粉末状态, 测量其极化曲线可采用很多方法。极化曲线的测量方法是改变电解电位, 取出碳化物残渣, 再通过 X 射线分析, 便可确定碳化物的金相组织情况。

5.4 预防模具早期失效的措施与方法

通过对模具早期失效现象进行分析发现, 设计(结构设计、硬度要求、选材

等)、制造(锻造、铸造、机械加工、焊接等)及热处理不当是造成模具早期失效的主要原因,因此在模具设计和制造过程中,要重点针对这几个方面采取必要的措施与方法,来达到提高模具精度及综合性能、延长模具使用寿命的目的。

5.4.1 模具的设计与制造

实际生产中发现,许多模具的早期失效都可以归因于模具设计。模具设计不仅要求科学、合理,而且还应根据模具工作条件和受力状态,选择合适的材料,制订适当的热处理工艺,以防止在热处理时及使用中出现裂纹、变形、断裂、塌陷等模具早期失效现象。

1. 合理设计模具

模具设计是模具制造过程中的重要环节,如果模具设计不合理,则在随后的热处理和使用的过程中常会发生裂纹、折断、崩刃及塌陷等形式的失效,以及显著降低模具的使用寿命。模具设计主要包括结构设计、硬度要求及材料选用等。

(1) 结构设计 模具的结构设计是影响其使用寿命的一个重要的环节,因此预防模具早期失效必须从最初的结构设计开始考虑。合理的模具结构设计应使模具工作时受力均匀、应力集中小、不容易偏载,同时结合模具的结构形式和工作条件,综合、统筹地提出模具结构设计的方案。

设计模具时,还要根据理论分析及模具使用的实际情况,充分利用 CAD 系统功能对产品进行二维及三维设计,以保证产品原始信息的统一性和精确性及避免人为因素的影响,并不断进行改进和优化结构设计,从而提高模具的设计质量。这也是提高模具寿命的最经济、最有效的方法之一。

1) 模具厚、薄壁相接处的设计。具有不同壁厚型腔的模具,往往在模具的厚、薄相接处容易产生淬火裂纹。因此,设计这种模具时应适当加大壁厚。一般要求模具型腔的壁厚为槽深的 1~1.5 倍。

2) 模具过渡角的设计。模具型腔内或外部有尖角或过渡角过小时,在热处理和使用过程中常会因应力集中而开裂。如果适当增大圆角,则有可能避免开裂的发生,如当外圆角半径由 1mm 增大到 5mm 时,最大应力可减少 40%。

3) 模具的工作间隙设计。模具的工作间隙是冷冲裁模设计的重要技术指标,从某种意义上说,凸、凹模间隙的大小决定了模具的制造质量与使用寿命的高低。我国冲裁模所选冲裁间隙适用范围为板料厚的 16%~22%。适当放大间隙有利于提高冲模寿命及冲裁件截面质量。

4) 采用组合式或镶套设计。将模具中容易产生应力集中的整体式结构分为两部分或几部分,可有效避免整体模具在凹模、尖角等处引起的应力集中,防止模具的开裂。

①组合设计。即将模具结构设计成组合式,如组合凸模结构(有可动、固定、多层及带芯杆的结构)和组合凹模结构等。采用硬质合金凹模时,为了防止脆裂,

更需采用多层组合式。

许多冷镦模采用整体结构,其优点是制造方便,缺点是寿命低。例如,整体式冷镦滚子凹模,使用中常常发生早期纵向劈裂或型腔底部环形开裂,改为组合式凹模后,不但消除了上述早期开裂现象,而且还可提高寿命4~5倍。

热锻压模采用组合结构,也有利于避免早期断裂失效而提高模具寿命。例如热挤压轴承圈凹模,原采用整体结构,容易发生早期断裂,改用组合结构后,在同样硬度下使用,提高了寿命2~3倍。

尺寸变化较大而圆角半径又不能过大的冲头,经常由于在尺寸过渡处产生裂纹而早期折断,改为组合式后,消除了应力集中,从而避免了早期折断失效。

②镶套设计。为防止模具胀裂,对于冷镦、冷挤压凹模,既要求其具有高的硬度和耐磨性,同时还要求其具有高的强度与韧性,但采用整体结构很难满足这些要求。如果采用预应力镶套结构(工作部分采用淬硬的高速工具钢或硬质合金等高硬度、高耐磨性的材料制造,再通过压力将工作部分镶入凹模体中,其他部分可采用高强韧性的材料),则可兼顾高硬度和高强韧性,使模具获得高寿命。

镶套结构也适用于热作模具。例如,热切边模要求刃口部分具有高的硬度及热稳定性,要求模具本身具备高的强韧性,如果在工作部分镶入YG20硬质合金,其他部分采用高强韧性结构钢制造,则可满足要求。又如汽车行星齿轮热切边模具,原采用8Cr3钢制造成整体结构,刃口部分经常发生早期变形失效,仅能冲切0.3~0.4万件,后改为在刃口部分镶入YG20硬质合金,可切边15~20万件,提高了寿命约50倍。

除了以上设计外,还应考虑模具的尺寸过渡方式、结构刚度、几何角度及不同模具的特殊性能要求等。

(2) 硬度要求 不同类型的模具,硬度要求也不相同。硬度设计过高,则韧性不足,在模具工作过程中易产生裂纹,甚至造成脆性断裂;如果硬度设计过低,则会造成型腔塌陷、变形和镦粗而失效。因此,要根据工作条件、失效形式及材料特性,设计合理的模具硬度。例如,某大型H13钢热压铸模具,外形尺寸为 $\phi 500\text{mm} \times 140\text{mm}$,设计要求硬度为52~54HRC,模具经热处理后硬度符合设计要求,但在装配试用阶段模具产生断裂。经分析,失效原因是模具硬度太高、韧性不足,属脆性断裂,后将模具硬度降至46~48HRC,解决了模具脆性断裂问题。

(3) 选材 模具材料的选择应根据模具受力状况、生产批量大小、工作条件及材料的性能来确定,如生产同一种工件的模具,选择9Mn2V钢制模具材料,其使用寿命为5万次,而采用Cr12MoV钢渗氮处理后,其使用寿命可达40万次。在选择冷作模具钢时,静载模具(如薄板冲裁模)可选用高碳模具钢(耐磨性高而强韧性差),动载模具(如冷镦模)应选用强韧性高的中碳或高合金工具钢(耐磨性不足时可对其进行表面强化处理)。在选择热作模具钢时,对模具工作时承受急冷急热的热作模具,应选用冷热疲劳抗力、断裂韧度、热稳定性均高的模具钢;

只有对工作温度较高而温度波动较小的模具，才能选用高温强度及热稳定性均很高而冷热疲劳性能较低的热作模具钢。

2. 合理选用优质模具材料

模具材料除了要具有适应模具工况的优良性能，更重要的是材料本身的质量要合格。因此，选择模具材料时要选择质量可靠厂家的钢材，并且对进厂钢材要进行质量复检，以保证其化学成分符合相应的国家标准和行业标准；100kg 以上的大型模块要采用电渣重熔钢，以确保其内在质量，并避免可能出现的严重成分偏析及非金属夹杂物等内部缺陷。另外，对模具材料还要采用超声波检测等无损检测仪器设备进行检查，以保证每件模块毛坯内在质量良好，避免废品的产生。

对于特殊要求的模具材料，可以采用粉末高速工具钢和粉末高合金模具钢，以便更好地改善钢的显微组织和性能，提高模具的使用寿命。

3. 改进模具制造质量

模具制造一般需经过车、铣、刨、磨、钻及电加工（电火花、线切割等）等冷加工，以及铸造、锻造、焊接及热处理等热加工。在诸多加工工序中，任何一道加工工序不当都会影响到模具使用寿命。

（1）改进模具钢锻造质量 良好的锻造不但可以将铸锭或成形材料中的气孔、疏松、缩孔和微裂纹焊合，提高锻坯的致密度，而且还可以使共晶碳化物破碎并细化，把粗大的枝晶状共晶碳化物打碎、打散，提高碳化物分布的均匀性，细化碳化物的粒度，同时可以进一步改善钢的各种性能，提高模具材料的等向性，特别是对于 W6Mo5Cr4V2 高速工具钢及 Cr12MoV 钢，由于钢中碳化物分布的均匀性对热处理工艺和模具使用寿命影响很大，因此模具毛坯需要通过多次镦拔、锻打来提高碳化物的均匀度。例如 Cr12MoV 钢，要求锻造后碳化物的均匀度达 3 级以上，其锻造及退火工艺要点如下：

- 1) 选择碳化物均匀度较高的棒料作为模具材料。
- 2) 模具坯料锻造时预热温度为 880 ~ 900℃，保温时间为 1 min / mm。
- 3) 模具坯料锻造时加热温度为 1 080 ~ 1 120℃，保温时间为 1min/mm。
- 4) 采用综合锻造法镦粗、拔长 6 次，分两次加热完成，900℃ 停锻，然后在 550℃ 炉内保温。
- 5) 球化退火工艺为：加热至 860 ~ 880℃，保温 3 ~ 4h，炉冷至 720 ~ 740℃，保温 4 ~ 6h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷。

锻造后的模具毛坯必须进行球化退火或锻后余热淬火，并于 750℃ 左右高温回火，以使锻后毛坯中的碳化物晶粒细化，有效地改善模具钢的碳化物偏析，最大限度地消除模具钢中的网状碳化物。

（2）改进机械加工质量 精度是衡量模具质量的一个重要指标，要保证模具具有高精度，必须提高机械加工的质量。

- 1) 降低模具表面粗糙度值。模具表面加工时留下的刀痕、磨痕都是应力集中

的部位,在热处理或使用过程中极有可能转变成为早期裂纹源和疲劳裂纹源,因此在模具加工时一定要将其去除掉。

2) 消除磨削裂纹。模具在磨削后要在 260 ~ 315℃ 进行去应力退火。

3) 用机械加工方法去除电加工产生的白亮层及其中的微观裂纹。模具电加工后应进行 180℃ 左右的低温回火来消除残余应力,以减轻电加工层的脆性,防止裂纹扩展。

(3) 合理制订热处理工艺 在模具结构和模具材料不变的情况下,制订合适的热处理工艺是发挥模具材料性能、防止早期失效及提高模具使用寿命的关键。

对于采用不同的材料、不同加工方法制造的模具,应采用不同的热处理工艺。通过对 Cr12、Cr12MoV 钢制模具进行热处理失效研究发现,对于小型简单模具,一般热处理工艺即可解决模具热处理后的失效问题;对于较大型模具,如果材料中存在碳化物级别高、碳化物偏析严重等缺陷,则热处理后模具断裂现象严重。如果能在模具粗加工后进行一次高温调质处理(淬火加热温度为 1 100 ~ 1 150℃,高温回火温度为 720 ~ 760℃,保温 4 ~ 6h 后炉冷至 500℃ 以下出炉空冷),则可使钢中碳化物细化,同时使奥氏体晶粒超细化,减少模具热处理后早期失效,并可提高模具的使用寿命。

快速加热法具有加热时间短、氧化脱碳倾向小、晶粒细小的特点,可以满足碳素工具钢制大型模具淬火变形小、综合力学性能好的要求。高速工具钢模具采用低温淬火加热 + 高温回火工艺可以大大提高模具的韧性,尽管模具硬度略有降低,但因减少了折断及疲劳破坏的可能性,对提高模具寿命却极为有利。生产实践发现,对 3Cr2W8V 钢热挤压模具的热处理采用 1 150℃ 加热淬火、600℃ 回火工艺,可以使模具具有高硬度和较好的韧性。

淬火冷却是模具淬火后能否获得技术要求的关键工序。合金钢因淬透性高,淬火冷却可以采用油冷或空冷;对于碳素钢和低合金钢,因淬透性较差,必须采用冷却速度较快的油冷或水冷,才能获得较高的硬度。对于大型模具,如果冷却速度不能达到要求,将会使碳化物沿晶界析出或得不到马氏体组织,尤其是模具尺寸较厚的部位,其中心部位冷却速度较慢,将会使碳化物或杂质元素沿晶界析出并偏聚,形成黑色晶界,以致增加模具脆性,降低模具的使用寿命。

为了减少残余应力,淬火后应及时回火,并要保证回火充分,否则容易引起裂纹或导致早期失效。对碳素工具钢采用 200℃ 回火 1h、2h,残余应力可分别消除 50% 和 75% ~ 80%;采用 500 ~ 600℃ 回火 1h,残余应力可消除 90% 左右。某厂 CrWMn 钢制模具在淬火后 200℃ 回火 1h,使用不久后便发生断裂情况,而改为 200℃ 回火 2.5h 后,使用中未发生断裂现象,这说明原工艺回火不充分,虽然模具表面硬度达到了要求,但由于模具内部组织不均匀、残余应力消除不充分将诱发晶间微裂纹的扩展,因此导致了模具早期断裂失效。回火后一般采取空冷方式,但由

于在回火冷却过程中材料内部可能出现新的拉应力，因此一般应缓冷到 100 ~ 120℃ 以后再空冷，或在高温回火后再增加一次低温回火。

(4) 适当的表面强化处理 模具经适当的表面强化处理后，可以在心部具有一定韧性的同时获得高的表面硬度，以及良好的耐磨性、耐热性、耐蚀性、耐疲劳性及抗咬合性，充分发挥模具材料的性能并有效地减少模具的失效。模具表面强化处理的方法包括改变表面的化学成分方法（如渗碳、渗氮、碳氮共渗、渗硼及渗金属等）、不改变化学成分方法（如高频淬火、激光淬火等）及表面形成硬化层方法（如镀硬铬、热喷涂、化学气相沉积、物理气相沉积等）等。

5.4.2 模具的热处理

模具通过正常热处理可以获得所需的组织和性能，从而保证其在正常服役条件下能够具有一定的使用寿命。具体热处理工艺的制订要依据模具类型及对模具的性能要求、钢材成分、工作条件、失效形式及其结构特点等而定。例如对于淬透性很高的火焰淬火模具钢来说，退火冷却规范相当重要，稍不注意就可能造成硬度偏高而难以加工，甚至冷速过快时还可能产生裂纹。又如对用于模锻压力机上的合金含量较高的机锻模来说，因机锻模具虽承受冲击力较小，但与热工件接触时间较长，故要求其应具有高的低温强度，而对其冲击韧度的要求可适当放宽，因此在制订淬火工艺时，应采用较高的温度加热，以保证有足够的合金元素固溶于基体中，从而提高钢的高温强度、组织稳定性和冷热疲劳抗力。

对于用高合金钢制造的高精度模具，为了提高其硬度及尺寸稳定性，在淬火后可采用 -40℃ ~ -80℃ 的冷处理，处理时间为 30 ~ 120min。但为了减少冷处理产生的内应力，应采用分级冷却方式，且冷处理后温度也应分级回升到室温，并立即进行低温回火。

对于精密模具及性能要求高的模具，热处理时可采用真空加热或保护气氛加热，特别是真空热处理，可确保无表面缺陷、提高硬度并显著提高模具的强韧性及使用寿命。例如，Cr12MoV 钢制的录音机机芯冲模，采用常规热处理时平均使用寿命 10 万次，改用调质和真空热处理后模具寿命提高到了 25 万次。

模具钢的强韧化热处理是提高模具使用寿命的重要措施之一。模具强韧化热处理工艺主要包括：预备热处理工艺（如正火、球化退火、调质）、双细化处理工艺、高温淬火工艺、分级及等温淬火、低温淬火、复合处理工艺、真空热处理工艺等。

为了减少模具早期失效、提高模具使用寿命，还可以采用一些表面强化技术（如化学热处理技术，包括渗硼、渗硫、渗碳、渗氮、碳氮共渗、氮碳共渗等），也可以采用化学气相沉积、物理气相沉积、表面涂覆、刷镀、高频淬火、激光淬火等先进的表面强化技术。

5.5 冷作模具的失效分析与对策

冷作模具由于在工作中承受拉伸、压缩、弯曲、冲击、疲劳、摩擦等机械力的作用,因此易发生脆断、塌陷、磨损、咬合、啃伤及软化等现象。

5.5.1 冷作模具的主要失效形式

冷作模具常见的失效形式有磨损、断裂、啃伤、咬合和变形等。

(1) 磨损失效 冷作模具工作部位与被加工材料之间的摩擦引起的物质损耗,能使刃口变钝、棱角变圆、平面变凸起或变凹陷、工作部位(如刃口、冲头)形状和尺寸发生变化。当模具因磨损不能继续工作时,即为磨损失效,如冲裁模的刃口变钝,冷镦模的工作面出现沟槽等。磨损分为均匀磨损、局部磨损和局部剥落等形式。对工作表面尺寸和质量要求高的冲裁模、挤压模易产生此类失效。

(2) 咬合失效 咬合失效是指模具工作部位与被加工材料在高压摩擦下因润滑膜破裂发生咬合,使模具不能再继续工作的现象。此时,由于被加工金属材料“冷焊”到模具型腔表面,在型腔表面形成金属瘤,因此使工件表面被划出道痕。在拉深模、弯曲模、冷镦模及冷挤压模中易发生此类失效。咬合是冷作模具最常见的一种失效形式。

(3) 变形失效 其是指模具在使用过程中发生工作面变形,即失去原有的几何形状,使模具不能再继续工作的现象。这类失效通常发生在硬度低或淬硬层太薄的模具,具体表现为凸模镦粗、弯曲,凹模型腔下沉塌陷、棱角塌陷、模孔胀大等。

(4) 断裂失效 其是指模具在使用中突然出现裂纹或发生破损而失效的现象。这类失效按其损坏情况可分为局部破损(如剥落、崩刃、掉牙等)和整体性破损(如碎裂、断裂、胀裂、劈裂等),它们的特点是破损大多出现在受力最大的工作部位或是在因截面变化造成的应力集中处。由于模具发生断裂即必须报废,故断裂失效是模具最重要的失效形式之一。断裂失效按其断裂过程的特征,又可分为脆性断裂和疲劳断裂两种形式。脆性断裂主要是由于模具存在冶金缺陷、工艺缺陷或在工作过程中因操作不当造成超载而发生的早期失效,模具寿命一般仅数千件,其是冷作模具断裂失效最常见的形式。疲劳断裂主要由循环应力所造成,其断裂过程要比脆断失效缓慢得多,模具寿命为5 000~10 000件。疲劳断裂常见于各种重载模具,如冷镦模、冷挤压模等。

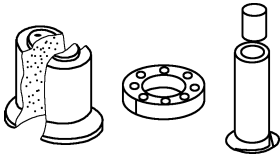
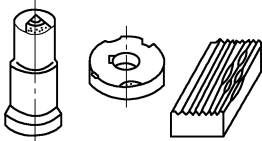
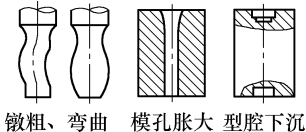
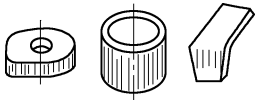
(5) 啃伤失效 当凸模与凹模发生直接碰撞时,将导致啃伤失效。其表现形式为模具刃口崩裂,并使被冲件的毛刺突然增大。

5.5.2 冷作模具失效分析与对策

1. 冷作模具的失效形式与原因

表 5-3 为冷作模具失效的形式及原因。

表 5-3 冷作模具失效的形式及原因

失效形式		简 图	失效原因
断裂	整体断裂		脆断的特征是断口平齐、颜色一致，多因冶金缺陷（如带状或网状碳化物）、工艺缺陷（晶粒粗大、粗糙刀痕、表面磨削烧伤、回火不足）或在工作时操作不当而超载造成。疲劳断裂主要由循环应力所造成，断口可见疲劳源和疲劳扩展区以及光滑的快速断裂区
	局部断裂（崩刃）		
变形		 敏粗、弯曲 模孔胀大 型腔下沉	因模具硬度偏低或淬硬层太薄、锻造模具强度不够，使型面产生变形
磨损		—	制件材料与模具工作面间的摩擦造成刃口变钝、棱角变圆、模膛表面损伤
咬合			制件材料与模膛表面在高压摩擦下发生“冷焊”现象

2. 典型冷作模具的失效原因及对策

(1) 冲裁模的失效原因及对策

1) 失效形式。冲裁模常见的失效形式为磨损、崩刃和局部断裂等。出现磨损（如刃口变钝、棱角变圆）的模具可以通过对刃口的修复而继续使用。冲裁模按照被冲裁板材的厚度（ t ）分为薄板冲裁模（ $t \leq 1.5\text{mm}$ ）和厚板冲裁模（ $t > 1.5\text{mm}$ ）。薄板冲裁模受力较小，磨损为主要的失效形式；厚板冲裁模受力较大，除了发生磨损外，还可能发生崩刃、局部断裂等失效，另外当 d/t （ d 为冲头工作部分的直径， t 为板材厚度）比值较小时，也有可能发生冲头的宏观塑性变形或折断等失效。

冲裁模如果安装调试不良、冲裁工艺不当、结构设计不合理或热处理不正确，会造成刃口剥落（俗称啃刀口）和凸模折断等失效。

按照冲裁模的刃口损伤过程，其磨损分为初始磨损、稳定磨损和剧烈磨损三个阶段。在模具工作过程中，刃口磨损从局部的塑性变形、摩擦磨损到最后的疲劳磨损是一个逐步加剧的过程。一般而言，影响模具磨损的主要因素有：①模具材料和板材的成分、组织和性能；②模具和坯料的表面状态以及粗糙度；③模具的工作条件，如冲裁力、冲裁速度、工作温度、润滑条件及设备的精度等。

2) 对策。冲裁模的正常失效形式为磨损，而崩刃及折断都属于非正常失效，这与模具在热处理过程中的表面脱碳、硬度偏低、淬火后晶粒粗大以及韧性不足有关，因此在制订热处理工艺时，除了硬度要求外，还要根据模具承受小能量多次冲击的次数来确定最佳的工艺参数，以达到耐磨性与强韧性的合理统一

由于凸模和凹模都承受多次反复的冲击载荷，因此应具有较高的硬度、耐磨性、强度和冲击韧度，还应具有较高的断裂韧度和疲劳强度。冲裁模根据被冲裁板材薄厚的不同，要求热处理工艺如下：①薄板冲裁模要求具有高的精度和耐磨性，故需要采用减少模具淬火变形的热处理方法，如预冷淬火、碱浴淬火、盐浴等温淬火及盐浴分级淬火等；②厚板冲裁模要求确保模具具有高强韧性和较高的耐磨性，通常采用高碳钢低温、短时、快速加热工艺，来获得较多的板条马氏体，采用等温淬火工艺或采用固溶双细化处理工艺细化碳化物和晶粒的方法来获得下贝氏体及提高冲裁模的强韧性，采用下限的淬火加热温度，来减少变形并获得细小的晶粒来提高强韧性，模具在使用过程中进行低温时效处理来消除加工应力，对线切割后的模具进行再回火来改善组织和尺寸的相对稳定性。

(2) 常用冷挤压模具的失效原因及对策 冷挤压模主要是由凸模（冲头）和凹模（可视壁厚筒）等组成。冷挤压模具的常见失效形式有热裂、裂纹、磨损、划痕、缴粗、塌陷和弯曲等。表 5-4 为常用冷挤压模具的失效形式与对策。

表 5-4 常用冷挤压模具的失效形式与对策

失效形式	产生原因	对 策
热裂	加热时渗碳或脱碳	1) 控制加热炉内的介质气氛，确保为中性 2) 及时检查模具表面的渗碳或脱碳情况
	硬度高于设计要求	1) 提高模具的回火温度 2) 控制模具的淬火加热温度和保温时间 3) 减少模具用钢中的含碳量
	在过高的温度下裸露	1) 对工作完的模具进行适当冷却 2) 选用导热性好的模具材料
	内应力过大	1) 淬火时选用冷却速度缓和的淬火冷却介质 2) 采用多次回火处理 3) 进行去应力退火处理

(续)

失效形式	产生原因	对 策
裂纹	热处理时冷却速度过快	1) 严格控制热处理后的冷却速度 2) 尽可能不采用水淬冷却方式
	渗碳或脱碳	1) 控制加热炉内的介质气氛, 防止模具渗碳或脱碳 2) 检查模具内部硬度和表面硬度
	组织过热	1) 降低淬火加热温度或缩短淬火保温时间 2) 重新淬火前应进行退火处理 3) 选用合理的热处理工艺参数
	选材不当	更换模具材料, 如采用 4Cr5MoSiV1 代替 3Cr2W8V 钢
	硬度过高	1) 控制回火温度及保温时间 2) 检查硬度
	机械加工不当, 力学性能不佳	1) 提高模具关键部位的配合精度 2) 通过合理设计模具结构及热处理, 保证模具具有足够的强度 3) 模具的表面粗糙度 Ra 以小于 $0.4\mu m$ 为宜; 凸模直径的过渡应平滑流畅 4) 改进模具支撑或加大模具支撑面积
	内部应力过大	1) 采用适当的热处理淬火工艺 2) 在模具研磨、再硬化、焊接或表面硬化后进行去应力退火
	温度梯度过大	1) 应对模具进行均匀的加热或预热 2) 使用中应避免急冷急热
磨损和划痕	脱碳	控制加热炉内的保护气氛, 防止模具表面脱碳
	硬度过低	1) 采用较低的回火温度 2) 检查模具表面的氧化与脱碳情况, 检查模具硬度
	型腔在高温下未保护	1) 采用热硬性好的模具材料 2) 及时冷却模具型腔的表面 3) 定期更换或修复模具
墩粗、塌陷和弯曲	硬度过低	1) 采用较低的回火温度 2) 检查模具硬度
	表面渗碳	1) 控制炉内的介质气氛, 防止模具表面渗碳 2) 检查模具表面与内部的硬度
	力学性能不合格	1) 避免模具表面存在锋利的尖角和应力集中源 2) 改进模具支撑或加大模具支撑面积 3) 检查模具的间隙和载荷, 使之符合设计要求
	强度不足	1) 改进模具的设计, 提高模具强度 2) 选用强度高的模具材料 3) 采用合理的淬火与回火工艺参数 4) 降低模具的挤压力

(3) 冷挤压凸模（冲头）的失效原因及对策 冷挤压凸模（冲头）工作时承受很大的压应力、弯曲应力和拉应力，因此在冲头直径变化处容易出现脆性断裂等。冷挤压凸模常见的失效原因及对策见表 5-5。

表 5-5 冷挤压凸模常见的失效原因及对策

失效形式或特征	产生原因	对 策
纵向弯曲	1) 凸模工作端面或成形材料表面不平整，使凸模承受较大的偏心载荷的作用 2) 模具的导向精度差 3) 凸模的长径比（长度与直径之比）超出允许的范围 4) 淬火硬度低或被成形材料硬度高	1) 提高成形材料的下料精度或下料后再增加一道镟平工序，以确保其表面平整 2) 提高模具的导向精度，确保模具良好对中 3) 凸模的长径比应在规定的范围内并确保凸模的纵向稳定性 4) 适当提高凸模的硬度并降低成形材料的硬度
永久变形	1) 淬火硬度不足，屈服强度未达到规定的数值 2) 淬火硬化层深度不够、韧性偏高而造成硬度低 3) 比压过大，单向抗压力超过了材料的屈服强度 4) 表面不平整	1) 提高凸模的硬度，确保凸模工作部分的硬度不低于 60HRC 2) 增加淬硬层深度，满足模具的技术要求 3) 确保加在凸模上的应力不超过模具的屈服强度，保证模具在全截面上有均匀的硬度和抗压强度 4) 从设计上减少长径比，提高稳定性 5) 采用钨系高速工具钢或钢结硬质合金等材料制造凸模 6) 保证表面的平整度
局部折断（断口呈倾斜性的撕裂条纹）	1) 凸模的圆弧过渡处半径过小、不圆滑或台阶转折处应力集中 2) 凸模的长径比过大或凸模一直在非稳定状态下工作 3) 表面凸凹不平或偏移、成形材料与凹模间隙过大或凸模与凹模同轴度太差等造成偏心、局部载荷较大 4) 凸模工作表面加工质量较差，存在明显的刀痕、磨削痕迹等缺陷，引起应力集中 5) 工作过程中承受反复的压应力与拉应力作用及周期性温度的变化 6) 模具的韧性差，硬度过高或脆性大 7) 设备的导向精度差或韧性不足	1) 尽量加大过渡处圆角半径 2) 减小长径比，提高稳定性 3) 提高成形材料的表面平整度 4) 尽量减小成形材料与凹模的间隙，控制在 0.10mm 以下 5) 提高凸模工作部分的加工质量及模具的安装和导向精度 6) 选择合适的模具材料（如强韧性材料或基体钢），采用合理的锻造、热处理工艺（如降低淬火温度），以提高模具的强韧性 7) 采用组合式凸模，减小过渡处的应力集中 8) 模具进行渗氮处理，以提高其高温下的耐回火性，并对模具进行必要的冷却和中间退火处理 9) 热处理后及时进行回火，并进行韧性强化处理 10) 提高设备的导向精度，同时改善其韧性

(续)

失效形式或特征	产生原因	对 策
拉断	1) 凸模过渡处圆角半径过小或截面过渡处尺寸变化大 2) 工作表面加工质量较差 3) 凸模材料的强韧性不够 4) 作用于芯棒上的拉应力过大或应力集中 5) 模具的润滑条件差 6) 凸模承受偏心载荷的作用	1) 尽量加大过渡处的圆角或改善截面悬殊的部分 2) 提高模具工作表面的加工质量,降低表面粗糙度值 3) 选择合理的锻造、热处理工艺,保证凸模具有较好的强韧性 4) 采用组合式凸模结构,以改善芯棒的受力情况 5) 改善模具的润滑,以降低摩擦因数 6) 确保凸模与凹模的同轴度符合要求,以防止偏心载荷的产生
工作部分的纵向 裂纹	1) 原材料中碳化物分布不均匀,非金属夹杂物严重,存在严重的带状碳化物偏析,致使强韧性降低 2) 工作端面与锥面过渡处存在较大的应力集中 3) 回火不足或内部组织不均匀,二次硬化效果不明显 4) 高工作应力下引起的疲劳破坏 5) 加工刀痕、磨削痕迹等引起的应力集中	1) 改善原材料的质量或选用碳化物偏析等级较小的材料制作凸模;采用合理的锻造工艺,以改善碳化物的分布状态 2) 保证工作端面与锥面的圆滑过渡 3) 采用合理的热处理工艺,以提高凸模材料的硬度和热强度 4) 合理设计凸模成形部分的形状和尺寸,以降低单位压应力;选用高速工具钢制作凸、凹模,反挤压冲头尤其必要 5) 提高模具表面加工质量,降低表面粗糙度值 6) 每挤压 2 000 ~ 3 000 件后进行研磨或油光修整
刃部(定径处) 疲劳(龟)裂纹	1) 周期性的冷热交变载荷造成热疲劳裂纹 2) 重复交变的温升作用,引起疲劳裂纹 3) 模具润滑不良 4) 凸模的硬度不足 5) 模具表面粗糙度高或存在磨削加工刀痕	1) 采用强韧性、抗压强度高及耐回火性高的钼系高速工具钢,并进行氮碳共渗处理,以提高表面耐磨性和抗疲劳性能 2) 从材质和热处理工艺(如采用低温回火工艺)上保证硬度和抗压强度的均匀性,提高抗弯强度 3) 改善凸模的润滑条件,减小摩擦力的作用 4) 严格执行热处理工艺,确保模具获得要求的硬度和强度 5) 正确选择砂轮的型号和进给量,并对模具进行表面抛光处理

(续)

失效形式或特征	产生原因	对 策
网状裂纹	1) 挤压时热效应引起的热疲劳裂纹 2) 磨削工艺参数不当, 造成局部过热 3) 挤压速度过快 4) 凸模端面存在端口	1) 对模具进行氮碳共渗处理, 以提高热疲劳性能 2) 正确选择磨削参数, 避免表面缺陷的产生 3) 按设计要求采用正确、合理的挤压速度 4) 凸模端面尾部取消中心孔, 垫块的厚度应足够; 提高凸模刚性以防止变形
剥落与角裂 (碎裂)	1) 热处理工艺或操作不当, 造成过热 2) 回火温度低或时间短, 造成回火不足 3) 凸模变形度大时单位压力过高 4) 凸模截面处尺寸变化较大 5) 模具材料的局部存在缺陷 6) 凸模表面受热软化 7) 凸模的表面润滑性变差	1) 执行正确的热处理工艺, 防止过热 2) 进行充分的回火处理 3) 采用多工位挤压工艺, 减少变形度 4) 加大凸模根部圆角 R , 使其圆滑过渡; 去除刀痕和磨伤; 采用分体结构 5) 选择优质的模具材料 6) 热处理后进行多次回火处理 7) 采用良好的润滑剂
压碎	1) 凸模硬度高、脆性大 2) 成形材料的体积过大	1) 按要求进行凸模的热处理, 充分回火; 对于有回火脆性的钢材应在回火后快速冷却 2) 对于成形材料进行筛选或进行抛丸处理, 确保符合尺寸要求
劈裂 (断口平整, 呈辐射形)	1) 模具原材料中碳化物偏析严重 2) 热处理温度高或保温时间长, 造成过热 3) 回火不足	1) 采用残余碳化物量低或带状碳化物级别低的材料; 采用特殊的锻造方法 (如六面锻造), 改善碳化物的分布状态 2) 严格执行正确的热处理工艺, 防止模具过热 3) 严格执行回火工艺, 保证回火充分
磨损	1) 模具材料的热处理硬度低, 耐磨性差 2) 反挤压凸模工作带部分尺寸和形状不合理 3) 凸模润滑不良造成摩擦阻力过大 4) 碳化物质点剥落, 成为磨料, 加剧磨损 5) 成形材料的硬度高, 变形抗力大 6) 模具的设计不合理	1) 采用合理的、热处理工艺, 提高模具材料的耐磨性; 采用高速工具钢或钢结硬质合金等, 确保凸模硬度在 60HRC 以上 2) 合理选择反挤压凸模工作带的高度及过渡区的圆角半径 3) 采用良好的润滑剂, 减少凸模工作部分的磨损 4) 最终热处理采用气体氮碳共渗等表面强化处理工艺 5) 对成形材料严格执行退火工艺, 避免表面硬度高或增碳 6) 采用最佳的模具设计结构

(4) 冷挤压凹模的失效原因及对策 冷挤压凹模在工作时，凹模内壁因承受切向应力作用，有胀裂倾向。冷挤压凹模的失效原因及对策见表 5-6，仅供参考。

表 5-6 冷挤压凹模的失效原因及对策

失效形式或特征	产生原因	对 策
型腔内壁裂纹，微小的纵向裂纹，不延伸到表面	1) 内壁机械加工后表面粗糙度值高 2) 热处理时表面脱碳 3) 原材料带状碳化物偏析严重 4) 润滑效果不良 5) 模具开孔处的强度过低，造成抗拉强度和抗压强度无法满足模具的要求	1) 提高凹模内壁的加工质量，不允许留有加工痕迹，确保内壁的表面粗糙度 Ra 值低于 $0.32\mu m$ 2) 热处理加热时采取保护措施防止表面脱碳 3) 采用反复的锻拔锻造工艺，改善碳化物的不均匀分布 4) 采用良好的润滑剂，以改善润滑条件 5) 改进模具设计，避免在内壁上开孔或采取保护措施；热处理后对凹模内壁进行氮碳共渗处理，以提高内壁的硬度、强度和耐磨性
横向裂纹，与轴线垂直或略呈倾角	1) 凹模导向部分或成形分界面内壁过渡处圆角半径过小，尺寸变化剧烈 2) 模具变形过大，造成该区域应力集中过大 3) 内壁表面加工质量差，如表面粗糙度高、存在加工刀痕等 4) 硬度不均匀，个别区域偏低，强度不足 5) 轴向拉应力过大	1) 适当加大过渡区域的圆角半径，加大模块内外径之比 2) 采用分割式组合凹模（即拼合结构），减少应力集中，适当增大过盈量，确保压力均匀；采用多层压套式组合凹模，以避免开裂 3) 提高内壁表面的加工质量，降低表面粗糙度值 4) 采用适宜的热处理工艺来提高内壁的表面硬度，保证材质和硬度的均匀性 5) 采用施加轴向预应力的挤压凹模
纵向裂纹，与轴线平行	1) 作用于凹模内壁处的切向拉应力超过凹模材料的抗拉强度 2) 组合凹模配合处的过盈量过小，造成预压力不足 3) 组合凹模各圈直径的比例分配不合理，造成内层凹模或加强圈强度不够 4) 模具材料的内部组织不均匀，存在较为严重的非金属夹杂物和碳化物偏析，强度低，各向异性大	1) 采用优化的设计方法设计凹模，合理分配直径的比例 2) 适当加大公盈量，以提高压配合的预压力 3) 选用合适的比例，确保强度符合设计要求 4) 利用合理的锻造及热处理工艺，改善非金属夹杂物和碳化物的不均匀性分布

(续)

失效形式或特征	产生原因	对 策
疲劳裂纹，断口呈贝壳状	1) 预应力加强圈或内壁凹模的强度不够、刚性差 2) 过渡区圆角半径过小 3) 多台阶的阶梯凹模型腔的直径差过大 4) 凹模内壁表面的加工质量较差 5) 模具硬度偏低 6) 重复的弹性变形所引起的弹性应力 7) 成形材料表面有残留氧化物，引起润滑不良，造成黏接以及表面软化 8) 润滑条件损坏，预加应力不足	1) 内层凹模或加强圈改用更好的材料，或采用合理的锻造和热处理工艺来提高凹模的强度、硬度和刚性等 2) 加大过渡区圆角半径 3) 采用横向分割式凹模，分割面取在台阶处或在台阶附近处 4) 提高内壁表面加工质量，降低表面粗糙度值 5) 提高模具的硬度，使其符合技术要求 6) 改进工作过程的加压条件，采用有良好预应力圈的组合式凹模 7) 及时清理型腔表面氧化物 8) 提高润滑效果，适当增大公盈量 9) 采用硬质合金制造凹模
剥落与角裂	1) 刃带边缘或孔截面小造成局部应力集中或材料韧性差 2) 圆角选择不当 3) 局部过热造成模具软化	1) 改进设计并采用韧性好的材料，避免局部的应力集中 2) 加大或选择合理的圆角半径，转折处将凹模部分分开完成 3) 采用具有良好润滑性能的润滑剂，避免模具局部摩擦过热
凹模工作带表面黏模或缺损	1) 工作带表面受热软化 2) 工作带高度过大 3) 内层凹模硬度偏高，韧性较差	1) 采用合理的表面强化工艺来提高工作带的表面硬度 2) 合理选择工作带的形状与尺寸 3) 提高内层凹模的强韧性
磨损	1) 被挤压材料的表面润滑不良 2) 润滑剂中混入杂质 3) 变形方式选择不当，产生较多的新生表面 4) 模具材料的硬度低，耐磨性差 5) 热处理硬度不均匀	1) 改善被挤压材料的表面润滑条件 2) 清洁或更换润滑剂并防止润滑剂中进入杂质 3) 采用合理的变形方式，以减小单位挤压力 4) 采用综合性能好的模具材料（如选用基体钢、钢结硬质合金等），或采用合理的锻造和热处理工艺来提高硬度和耐磨性 5) 提高材质和硬度的均匀性
变形	1) 冲击载荷超过材料的屈服强度 2) 凹模的中心线偏移中心，局部压力过大	1) 合理设计凹模的结构，选用最佳的材料和热处理工艺，确保获得要求的硬度和高的屈服强度 2) 进行装配时，要按设计和技术要求进行检测，确保上下模同心度符合要求

(续)

失效形式或特征	产生原因	对 策
压套纵向部分 裂纹	公盈量过大,使预应力在压套内表面 处拉应力大于材料的屈服强度	减小公盈量,避免过分拉应力的作用
镶块纵向部分 裂纹	1) 过盈量过大,造成预应力不足 2) 镶块圆度超差严重,本身壁厚太 小,强度不足	1) 适当过渡或增加镶块的厚度 2) 采用硬质合金,镶块外径的圆度误差控制 在 0.005mm 以下

(5) 冷拉深模的失效形式与对策 模具拉深过程主要是利用拉深模使塑性金属材料在一定压力下产生变形,制作出与拉深模型腔相仿的工件。在圆筒形工件拉深过程中,拉深载荷通过凸模圆角部位传递给工件,工件外表面部分在凹模端面与压边圈之间流动,因此成形过程中模具的受力虽然不是很大,但比较复杂。拉深模的正常失效形式为磨损与粘着,因此要求模具应具有高硬度、良好的耐磨性和抗粘着性能。

模具型腔磨损的表现形式为“拉毛”,这是粘着过程的终局,其产生原因和对策如下:

1) 在拉深模淬火过程中,往往会出现表面脱碳和软点(或软化带),使模具的表面硬度和耐磨性显著降低(表面硬度在 500HV 以下),而较低的表面硬度会使模具在使用中易产生拉毛,因此在热处理过程中应防止表面产生脱碳和软点,同时也应防止后续磨削加工引起的二次回火使表面硬度降低的情况发生。

2) 部分模具钢(T10、CrWMn)尽管热处理后表面硬度较高,但因其高硬度的合金碳化物较少,因此耐磨性不高,容易引起模具在工作过程中金属材料与型腔的咬合。对此,可采取模具渗氮或镀硬铬等表面强化技术,使模具表面形成均匀细致的强化层,从而起到提高表面硬度和耐磨性的作用。表面渗硫也可提高模具的抗咬合能力,降低表面的磨损。Cr12 钢拉深模经气相沉积 TiC 后,可提高寿命 8~10 倍。

3) 在拉深模使用时,对其进行润滑,可降低摩擦力并减少接触面的发热量。对被拉深材料进行退火处理,也可以使模具的拉毛和粘着情况得到改善。

4) 拉深模材料应具有良好的抗粘着性能及耐磨性。一般中、小型拉深模可选用质量较好的模具钢,而大型模具在满足工作条件的前提下,也可采用廉价的材料,如球墨铸铁等。若生产批量较大,模具可采用硬质合金、高速工具钢或高碳高合金工具钢制造。

另外,拉深模选材时应尽量选用与被拉深坯料亲和力小的材料。

(6) 冷镦模的失效形式与对策 冷镦模主要由凸模(冲头)和凹模两部分组成。冷镦模工作时,凸模承受强烈的冲击力作用(最大超过 2 500MPa)以及弯曲应力、剧烈的摩擦力作用,凹模的型腔承受冲击性胀力且型腔表面承受强烈的摩擦力和压力作用。冷镦模的失效形式为磨损(含擦伤)、疲劳断裂(含开裂)、折断、

崩落与凹陷等。磨损失效根据缺陷形式分为磨粒磨损、表面损伤、冲击磨损等多种。磨损造成的表面损伤、麻坑、擦伤痕等均可能成为疲劳裂纹源,导致模具的疲劳断裂。凸模在冲击力的作用下,还可能产生塑性变形和折断,引起凹模模口的胀大、棱角变圆、塌陷和型腔胀裂等,造成模具的早期失效。

1) 擦伤。擦伤是冷镦过程中,被变形的金属在凸模的冲击作用下,在型腔内产生大量的塑性流动,模具内表面由于受到流动金属的剧烈摩擦和咬合作用而造成的不同程度的损伤。擦伤也是一种磨损形式。

2) 崩落。崩落是冷镦过程中被变形坯料上的金属粘着在凹模上,形成一定厚度的环带,引起偏载而使局部区域承受的应力超过了抗拉强度,引起裂纹,裂纹在冲击力的反复作用下扩展汇合,使凹模成块掉落的现象。

3) 脆性开裂。冷镦凹模的开裂可分为两种:一种是源于擦伤严重处和崩落造成的尖角部位,该处应力集中导致裂纹的产生;另一种为贯穿式裂纹,多因模具的碳化物偏析严重且沿凹模的纵向呈带状分布,或因钢中含有较多的非金属夹杂,使材料的脆性增加而破裂。

4) 塌陷。塌陷源于冷镦模的硬度或强度不足、硬化层过浅,以致在使用过程中受到冲击后产生凹陷。

在上述冷镦模的失效形式中,擦伤和脆性开裂是导致失效的主要原因,因此应确保冷镦模具有较好的硬度、强度和冲击韧性,原则上冷镦凹模的硬化层深度应不低于1.5mm,硬度为58~62HRC,心部为硬度较低、韧性较好的索氏体组织。另外,淬火时应避免将整个截面淬透。

影响冷镦模失效的因素有模具结构、加工质量、润滑条件、维护保养及工艺设计等,因此可以在这几个方面加以改进。

对冷镦模的热处理可以采取以下措施:

1) 对碳素工具钢和低合金工具钢采取获得片状珠光体的预备热处理,最终热处理采取淬火+低温回火处理,可提高模具的抗压强度、断裂韧度的冲击韧度等,明显提高模具的使用寿命。

2) 对Cr12型(如Cr12MoV)钢冷镦模采用1 020~1 040℃淬火+390~410℃中温回火,可获得最佳的强韧性配合,明显提高冷镦模的断裂韧度。

3) 冷镦模淬火后应进行充分回火,以消除内应力,减少模具变形及开裂倾向。模具在使用过程中应进行低温时效处理,以消除加工应力。电加工后应再进行低温回火,以改善表层组织和稳定尺寸。

4) 为防止冷镦模因磨损和咬合造成早期失效,可通过对其进行渗硼处理来提高冷镦模的使用寿命。

5.5.3 冷作模具失效分析与对策的典型实例

实例1 变压器冲模,材料为CrWMn钢,要求淬火、回火处理。

(1) 模具加工工艺流程及其失效形式 锻造→调质 ($Ac_1 \sim Ac_1 + 20 \sim 40^\circ\text{C}$ 加热淬火, 600°C 左右回火) →退火→机械加工→淬火→回火→精加工。在精磨模具时发现裂纹, 裂纹粗且长。

(2) 原因分析 金相组织检验发现, 有带状组织, 2 级。在高放大倍数下, 可观察到较宽的裂纹, 裂纹两侧有氧化和脱碳, 脱碳层总深度 0.15mm 左右。经分析后认为, 导致模具脆裂的原因如下: ①原材料中有较严重的碳化物偏析带, 热处理后偏析带及其附近组织应力较大, 对裂纹的产生有促进作用, 但不是主导因素; ②裂纹两侧有氧化脱碳, 裂纹开口很大, 粗且长, 不同于最终淬火时形成的淬火裂纹, 说明裂纹在最终热处理前已经形成, 考虑到严重脱碳只有在箱式炉中进行球化退火时才有可能产生, 故裂纹应在退火前的工序中产生; ③锻后冷却时形成的粗大晶粒和片状珠光体组织最容易引起淬火开裂, 而将调质工序安排在退火之前进行, 又有碳化物带状偏析作诱因, 故调质时产生开裂, 并在其后球化退火过程中, 裂纹两侧产生严重脱碳氧化, 在最终热处理时, 裂纹又进一步扩展、变粗和加长。

(3) 改进措施 将调质工序安排在退火之后进行, 作为预备热处理, 可以进一步改善组织的均匀性, 减少最终热处理后的变形与开裂倾向。

实例 2 Z47-12 型多工位联合冷锻机冲模, 材料为 T10A 钢, 要求淬火、回火处理。

(1) 模具失效形式 在工作过程中, 机床冲击频率为 $70\text{次}/\text{min}$, 冲模要承受轴向及径向冲击力、径向摩擦力和工件退出模具时轴向拉力的作用, 工作条件较为苛刻。平均使用寿命仅为 2 500 件, 最低寿命才几十件。模具失效形式为疲劳脆性开裂。

(2) 原因分析及改进措施

1) 原热处理工艺。二序冲模 (见图 5-4) 预备热处理采用球化退火, 其组织为粒状珠光体。再经 800°C 加热, 水淬油冷, 200°C 回火 2h 后, 硬度为 $58 \sim 63\text{HRC}$, 其显微组织为细针状马氏体 + 粒状碳化物 + 少量残留奥氏体, 亚结构为孪晶。

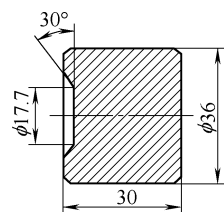


图 5-4 二序冲模简图

2) 改进措施。该模具要求具有高的硬度、强度、抗压屈服强度和一定的韧性、塑性, 若提高回火温度、降低硬度, 则模具型腔很快会因磨损超差或冲击塌陷变形而早期失效。为提高模具寿命, 对 T10A 钢二序冲模可在球化退火和机械加工后再进行一次完全退火处理, 其工艺为 840°C 保温 3h, 炉冷至 500°C 出炉空冷。退火组织为片状珠光体。

T10A 钢冲模最终热处理采用 600°C 充分预热, 淬火加热温度为 840°C , 在盐浴炉中加热时间为 $30\text{s}/\text{mm}$, 水淬油冷, 水温控制在 $20 \sim 40^\circ\text{C}$ 之间, 于 200°C 回火 2h。经此工艺处理后, 冲模硬度为 $60 \sim 62\text{HRC}$, 显微组织为细针状马氏体 + 碳化物 + 残留奥氏体, 其亚结构为高密度位错。不同工艺处理后的 T10A 钢二序冲模的

力学性能和平均寿命见表 5-7。

表 5-7 不同工艺处理后的 T10A 钢二序冲模的力学性能和平均寿命

处理工艺	硬度 HRC	抗压强度 /MPa	抗压屈服强度 /MPa	冲击韧性 / (J/cm ²)	断裂韧度 /MPa·mm ^{1/2}	平均寿命 /件	失效形式
常规工艺	58~62	2 380	1 280	46	500	2 500	疲劳碎裂
新工艺	58~61	5 955	3 980	21	655	60 000	均匀磨损

原始组织为片状珠光体的冲模，其抗压强度可较常规工艺处理的模具提高 1.5 倍，抗压屈服强度可提高 2.1 倍，断裂韧度提高 31%，而一次冲击韧性值有所下降。模具平均寿命可获得显著的提高，最高可达 7000 件。该工艺也可适用于其他 T10A 钢模具。

实例 3 电动机铁心精密冲裁凸模，材料为 T8A，要求淬火、回火处理。

(1) 原热处理工艺及其失效形式 常规热处理为 770~780℃ 淬火，200~220℃ 回火，在生产使用过程中平均寿命为 1.2 万件。失效形式为疲劳断裂。

(2) 改进工艺及效果 采用循环超细化热处理工艺（也称为摆动式循环快速加热—冷却淬火工艺），即采用温度分别高于 Ac_1 和低于 Ar_1 的两个盐浴炉，先将模具放入高于 Ac_1 的高温炉中加热到正常淬火温度，然后迅速转到另一炉内冷却到 Ar_1 以下 30~50℃，如此反复数次循环处理，最后一次在 Ac_1 以上温度淬火，淬火后在 200℃ 回火 2h，其工艺曲线如图 5-5 所示。

采用 T8A 钢制的电动机转子铁心冲裁凸模，使用循环热处理进行 4 次循环处理，770~780℃ 加热，660~670℃ 等温，淬火后在 200℃ 回火 2h。将此工艺应用于生产以后，模具平均寿命由原 1.2 万件提高到了 4 万件以上，且在模具表面和内部均没有裂纹产生。模具最终失效形式为凸模尺寸磨损超差，即由过载疲劳断裂转变为磨损失效。

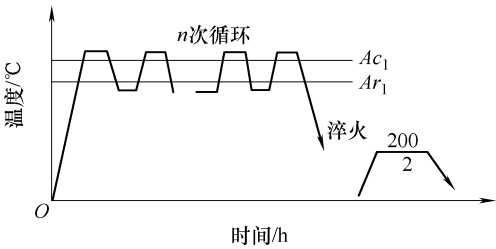


图 5-5 T8A 钢循环超细化热处理工艺曲线

实例 4 冲模，材料为 CrWMn 钢，要求淬火、回火处理。

(1) 原热处理工艺及失效形式 原常规淬火方法是加热至 830~850℃，保温后冷却，200℃ 回火 2h。回火后钢的内部组织为回火马氏体 + 细小碳化物 + 少量残留奥氏体，硬度为 60~62HRC。在生产使用中，由于冲模承受很大的压力和弯曲力，过早产生了崩刃、脆断及开裂现象。

(2) 改进措施与效果 过共析钢一般淬火加热温度为 $Ac_1 + 30 \sim 50^\circ\text{C}$ ，如果降低淬火加热温度，则可使钢中获得一定数量的板条状马氏体，有利于提高钢的强韧性；对高碳钢采用低温、快速、短时加热淬火的工艺，可减少奥氏体的含碳量，提

高钢的韧性和耐磨性，达到延长服役期的目的。

1) 调质处理。先进行调质处理，以获得细晶粒，为后续热处理作好组织准备。调质工艺为 $(850 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 油淬， $(650 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 回火，其内部组织为细颗粒状的珠光体 + 较细粒状碳化物。

2) 淬火与冷却。控制加热速度，模具先进行预热 $(680 \pm 10)^{\circ}\text{C} \times 30\text{min}$ ，再入盐浴炉迅速加热到 $800 \sim 820^{\circ}\text{C}$ 并保温 5min，然后油冷。淬火时为减少淬火应力，要控制模具在油中的冷却时间，模具表面温度降至 $200 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 即可出油空冷。

3) 回火。采用低温回火，回火温度为 $(200 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ ，回火时间为 120min。经检验，内部组织为极细的板条状马氏体 + 少量隐针马氏体 + 碳化物 + 少量残留奥氏体。淬火后不但形成板条状马氏体，而且还使 M_s 点由原 150°C 提高至 300°C 左右，减少了淬火变形与开裂倾向。低温回火可使淬火马氏体中析出微量弥散度很大的 ϵ 相，淬火应力基本消除。回火后硬度为 58 ~ 60HRC。原则上，凸模和凹模分别取下限硬度和上限硬度。改进工艺后，模具寿命提高了两倍以上。

5.6 热作模具的失效分析与对策

热作模具主要包括热挤压模具、压铸模具、热锻模具、热锤锻模具、高速锤锻模具、热冲裁模具、热切边模具和热铆钉模具等。由于每种模具的工作条件不同、材料不同、热处理条件不同，因此失效形式也不同。热作模具的失效形式主要有断裂失效、热疲劳失效、热磨损失效、塑性变形和塌陷、腐蚀等。对失效的热作模具应进行具体分析，找出其失效的主要原因，并采取相应措施加以改进，以提高模具的使用寿命。

5.6.1 热作模具的主要失效形式

热作模具使用的环境和条件都比较恶劣，它虽然也有冷作模具常出现的磨损、断裂和变形等基本失效形式，但更多的则是以冷热疲劳、塌陷和热侵蚀等形式失效。例如，在全部热锻模的失效类型中，下模失效的数量约占 80%，这可能是由于固定下模的液压机机座不像固定上模的压头刚性那样好，以致下模在工作时有较大的偏斜。此外，还与下模受热影响大并有比较复杂的压制型腔有关。

(1) 变形失效 其是指模具在高温下与被加工毛坯长期接触后出现软化而发生塑性变形导致的失效形式。模具表面软化后硬度低于 30HRC 时容易发生变形而塌陷。工作载荷大、工作温度高的热挤压模和热锻模凸起部位易发生这类失效。

(2) 断裂失效 断裂是指在材料本身承载能力不足以抵抗工作载荷时出现的材料开裂，包括脆性断裂、韧性断裂、疲劳断裂和腐蚀断裂。引起热作模具早期断裂的原因主要有：①锻压操作失误，造成模具过载；②加工质量不佳，降低了模具的承载能力；③模具设计不合理，产生了应力集中；④模具选材不当；⑤模具热处

理不当等。热挤压冲头及模具的凸起部位、根部等易出现断裂失效。

模具早期断裂是危害最大的失效事故。其中由于模具严重偏载、模具表面严重的应力集中或在模具表面已存在工艺裂纹而引起的瞬时断裂（即一次性断裂），使模具使用寿命往往只有几百件，甚至几件、几十件。这种失效形式的特点是断裂开始于表面并在断裂面上只有一个断裂区。另一种断裂失效形式是疲劳断裂，它是指在循环应力作用下，在模具表面萌生疲劳裂纹并不断扩展，最后发生失稳造成的断裂失效。据统计，在热作模具失效中，断裂和开裂失效占热锻模失效总数的20%~30%，占压铸模失效总数的5%~10%。

（3）热疲劳失效 由于环境温度周期性变化，导致模具出现的裂纹或断裂叫做热疲劳失效。模具的热疲劳裂纹有的呈网状，也有的呈放射状或直线状。热作模具中工作温差大、急冷急热反复速度快的热压铸模、热锻模等易出现热疲劳裂纹，此裂纹属于表面裂纹，一般较浅，但在机械应力作用下会向内部扩展，最终导致断裂失效。

（4）热磨损失效 其是指热作模具工作部位在高温下与被加工材料之间相对运动产生的损耗，包括尺寸超差和表面损伤两种形式。磨损不仅破坏模具的尺寸精度并使锻件超差，还会使模具表面出现擦伤沟槽，即降低锻件的表面质量。此外，擦伤沟槽的底部往往还是热疲劳裂纹的萌生处。热作模具的磨损主要以表面疲劳磨损为主，有些工况还伴随有粘着磨损和磨料磨损。摩擦表面的破坏特征主要有刮伤、沟槽、裂纹、麻点和剥落等。模具工作温度、被加工材料的硬度、模具材料中的合金元素、润滑条件等都会影响模具的热磨损。相对运动剧烈和带有凸起部位的模具（如热挤压冲头等）易出现磨损失效。

（5）工作部位塑性变形与塌陷 热锻模在工作过程中，如果型腔表面变形塌陷或被加工零件尺寸超差，则说明该模具已经失效。这种失效形式主要出现在热锻模和热辊锻模上，尤其易出现在热锻模的下模上，这是因为当锻造材料要求较高的始锻温度时，下模受热影响特别大，容易使型腔表面因过度回火而软化，当其硬度降低到30HRC以下时，就会发生塑性变形，导致塌陷。在锻造热强性较高的材料时，如果模具硬度较低或抗压强度不足，也容易引起型腔塌陷而失效。例如，在使用热锻模锻造18Cr2Ni4WA钢时，模具使用寿命仅1 000件左右。经分析，失效原因就是型腔表面下陷变形，而且由于受到拉伸应力的作用，在塌陷区周围还出现了细小的横向裂纹。

（6）腐蚀 腐蚀包括冲蚀、熔蚀及侵蚀等。压铸模在工作过程中，熔融金属被注入型腔，会对被高温金属液冲刷的模具部位产生冲蚀。这是在高温下模具受到液体金属的物理和化学作用，在模具表面产生的腐蚀现象。热锻模型腔的损坏，取决于金属坯料的塑变程度和受力状态，其腐蚀部位通常在模膛内的局部地区。除了冲蚀外，在液体金属与模具表面直接接触的部位还存在侵蚀及熔蚀的问题，一般情况下把它们也归为冲蚀。压铸模比热锻模容易形成冲蚀，而且压铸模的损坏程度也

较大。受到冲蚀的模具，其表面凹凸不平、棱角变钝，严重影响铸件的几何形状、尺寸精度和表面质量，容易出现早期失效。

热作模具失效特征及其概率统计结果见表 5-8。

表 5-8 热作模具失效特征及其概率统计结果

模具类别	模具名称	模 具 失 效	
		特 征	概率统计（%）
大截面锤锻模和机锻模	锤锻模	磨损 + 深型槽底角裂纹 塑性变形 燕尾开裂	70 20 10
	压力机模	磨损 + 深型槽底角裂纹 塑性变形	80 20
中小机锻模	工作温度为 600℃ 用中小机锻模	热磨损及压塌	74
		热磨损 开裂	少量（型腔较深的模具）
	工作温度为 650℃ 用中小机锻模	热磨损 压塌	>87.5
		热磨损 开裂	少量（型腔较深的模具）
热挤压模	铜管热挤压模	压塌 开裂	88 5 ~ 12
	铝合金挤压模	断裂 磨损 变形	> 50 25 ~ 40 ≈6
压铸模	铜压铸模	热疲劳 熔蚀与变形	95 5
	铝压铸模	热疲劳 熔蚀 变形	> 70 < 5 5 ~ 15
冲裁模	—	磨损 崩刃	≥80 ≤20

5.6.2 热作模具失效分析与对策

1. 热挤压模具的失效分析与对策

热挤压模主要由凸模（冲头）和凹模等组成，其常见的失效形式为早期脆断、疲劳断裂、热疲劳、型腔塌陷及磨损等。

(1) 模具的脆断失效 脆断失效对模具的危害最大。发生脆断失效的模具的寿命大多很短, 多的数百次或上千次, 少的仅数十次或数次。

1) 凸模折断失效 其失效原因为: ①凸模直径过细、长度与直径之比过大或强度低; ②凸模工作带柱面产生平行于挤压方向的条纹皱皮, 造成挤压件内孔的表面粗糙度值增高; ③凸模工作带部分 (包括直径尺寸和工作带下面的锥角) 产生严重变形; ④模具的结构不合理, 存在严重的应力集中部位; ⑤模具的表面粗糙度高; ⑥模具表面出现热疲劳裂纹或显微裂纹; ⑦模具的工作表面出现磨损沟槽; ⑧模具工作过程中产生的残余应力; ⑨模具原材料存在冶金缺陷; ⑩模具的载荷及工作温度过高等。

2) 凹模的脆断失效 其失效原因为: ①凹模存在裂纹及开裂; ②凹模内壁表面粗糙度高; ③凹模内壁产生倒锥度, 使热挤压件顶出十分困难。

(2) 模具的疲劳断裂与热疲劳失效 热作模具的疲劳断裂是一种大应力的低周疲劳断裂, 即在交变载荷下发生的断裂, 热挤压模具在使用一定的时间后普遍存在热疲劳裂纹, 其将破坏型腔的表面质量, 引起模具的脆性断裂。

(3) 模具的型腔塌陷和磨损失效 模具在高温下工作时, 会出现受热后软化现象, 使模具的整体硬度和强度降低, 从而造成模具的塌陷与磨损等失效。

(4) 预防热挤压模早期失效的措施

1) 模具钢的选用。选用含钨、钼较多的钢材 (如 3Cr2W8V、GR、HM1 等), 含铬较多的钢材 (如 4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、HD 等), 基体钢 (如 CG-2、012Al、RM2、5Cr4W2Mo2SiV 等), 以及耐热合金和硬质合金等。

2) 热处理工艺。预备热处理可采用锻后退火及正火处理, 也可采用高温调质处理, 即淬火加热温度与常规的淬火温度接近, 回火温度一般选择在 700 ~ 750℃, 以使模坯内部的碳化物分布均匀且形状小而圆。

最终热处理通常采用淬火 + 回火处理、高温淬火、硼氮复合渗、离子渗氮、双重热处理、强韧化处理 (即高温淬火与高温回火) 及真空热处理等。

2. 压铸模的失效分析与对策

(1) 压铸模的失效形式及失效原因 压铸模的常见失效形式为冷热疲劳裂纹、粘模、塌陷、沟槽、磨损、变形、侵蚀和开裂等。

1) 粘模、变形和开裂失效。模具在高压下工作, 受到金属的挤压与摩擦作用, 容易产生粘模、变形及开裂等失效形式。

2) 热疲劳失效。压铸模在工作时需要与 600 ~ 1 200℃ 的炽热金属接触, 其自身表面的温度也在 600 ~ 1 000℃, 模具在反复被加热和冷却时产生热应力, 最终导致热疲劳失效。

3) 磨损失效。模具的型腔反复受到压力和冲击力作用, 以及在型腔内塑性流动的金属产生的摩擦力, 最终导致型腔磨损失效。

4) 侵蚀失效。型腔与高速注入的炽热金属接触产生化学反应, 易产生氧化、

侵蚀等失效。

(2) 对策 压铸模应具有耐冷热疲劳性能、高温下的强度和韧性、耐液态金属冲蚀性能、较高的耐热性和高的导热性、良好的抗氧化性和高的淬透性及耐磨性等。预防压铸模具失效的措施如下:

1) 选用高强韧性的热作模具钢(优选中碳合金钢)制造,压铸较低熔点金属的模具用钢有:锌合金压铸模用钢为 40Cr、40CrMo、30CrMnSi、35CrMnSi、4Cr5MoSiV、3Cr2W8V、CrWMn、5CrMnMo 等;铝合金与镁合金压铸模用钢为 3Cr2W8V、4Cr5MoSiV1、4Cr5MoSiV、4CrW2Si、Y10、Y4 及马氏体时效钢等,推荐用 4Cr5MoSiV1 钢;铜合金压铸模用钢为 3Cr2W8V、4Cr5MoSiV1、3Cr3Mo3V、3Cr2W9Co5V 及马氏体时效钢等,推荐用 3Cr2MoWVN 钢;钢铁材料压铸模用钢为 3Cr2W8V、4Cr5MoSiV1、4Cr5MoSiV、3Cr2W9Co5V、3Cr3Mo3V、3Cr3Mo3Co3V 以及马氏体时效钢等。

2) 采用以难熔金属为基础的合金作压铸模,如钼合金比其他材料具有更高的寿命,其在 1 000℃ 左右仍具有高的热强度和高的持久强度,导热性好且热膨胀系数小,模具工作过程中不会出现热裂等失效形式。

3) 模具的设计应合理。如果压铸模壁厚不足,则在巨大压力下会造成型腔变形。引起应力的尖角或圆弧半径不宜过小,以免造成在尺寸过渡区开裂。模具体内冷却通道的位置或间距应设计合理,否则模具各部位之间的温差将增大,造成不同程度的膨胀而产生内应力,从而导致模具变形。

4) 锻造后的压铸模应进行球化退火或调质处理,以消除应力,降低硬度,便于切削加工,同时为最终热处理作好组织准备。退火后可获得均匀的组织及弥散分布的碳化物,利于改善模具钢的强韧性。

5) 模具的制造包括机械加工、热处理和装配等工序。如果磨削不当,则会使表面产生裂纹、存在磨削应力及表面软化等,因此应严格执行磨削工艺。热处理过程中应采取保护措施,防止表面氧化脱碳及降低表面硬度,如经正常热处理后将 3Cr2W8V 钢制的铝合金、铜合金及钢铁材料压铸模的硬度分别控制在 44~48HRC、42~44HRC 和 28HRC 为好。模具装配时,镶块与主体应接触紧密。

6) 压铸模用钢热处理回火后保持较高的硬度可改善其耐磨性,但却增加了热疲劳敏感性,因此压铸模用钢可先进行高温回火处理,以获得较好的耐热疲劳性。模具经过最终的机械加工和表面强化处理(如碳氮共渗、渗氮、氮碳共渗、渗硼),可使模具型腔表面获得高的耐磨性,并降低浇注金属的黏附作用,同时还可以消除淬火所造成的变形。

7) 压铸模在使用前应进行 300℃ 左右的预热,在工作过程中还应进行去应力退火(比正常回火温度低 30~50℃),以消除内部热应力。

3. 热锻模的失效分析及对策

(1) 热锻模的失效形式及失效原因 热锻模在高温下通过冲击力迫使金属成

形,除了承受很大的冲击载荷外,还受到很大的压应力、拉应力和弯曲应力的作用,还有炽热金属在型腔中因变形而产生的强烈摩擦力,同时也受到高温的影响,热锻模与空气、油、水的急冷、急热的反复作用,以及锻热设备精度、成形工艺、模具设计、制造质量、装配使用条件、预热和冷却条件、润滑条件、模具材料及热处理工艺等影响,常常产生断裂、塌陷、热疲劳、磨损、起皱、开裂及变形等失效形式。

(2) 对策

1) 合理选用模具钢。5CrMnMo 钢只适用于 3t 以下浅槽形的中小锻模,而深型槽锻模则应选用 5CrNiMo 钢来制造。有资料报道,连杆模采用 4CrMnSiMoV 钢制造,使用寿命可比 5CrNiMo 钢提高 68.6%。汽车前轴锻模选用 5Cr2NiMoVSi 钢制造比用 5CrNiMo 钢,可提高寿命近 1 倍。

2) 改善热处理工艺。提高淬火温度,可改善模具的强韧性,如 5CrMnMo 钢经过 910℃ 淬火,500℃ 回火 12h,可获得以板条马氏体为主的组织,可使汽车变速箱齿轮锻模使用寿命提高 2 倍以上,而且还避免了模具早期断裂。

采用等温淬火工艺,可获得下贝氏体组织,提高模具的强韧性,如 5CrNiMo 钢制的法兰盘模具经等温淬火后比常规淬火的寿命提高了 1.5 倍。一般等温淬火在 300℃ 左右等温,以使奥氏体转变为下贝氏体。5CrNiMo 和 5CrMnMo 钢回火温度分别为 490 ~ 510℃ 和 510 ~ 530℃。

采用化学热处理,可提高模具表面的硬度和耐磨性等,如热锻模经渗硼淬火后,可提高型腔的耐磨性和抗咬合性,容易脱模,而模具渗硼后采用高于 M_s 点的温度进行等温淬火,可获得下贝氏体 + 马氏体的混合组织,有利于提高模具的基体强韧性,避免了模具的开裂,还可使模具寿命成倍提高。

热锻模经碳氮共渗、氮碳共渗、硫氮碳共渗等化学热处理后,可显著提高模具的表面硬度、抗冷热疲劳性、抗氧化性和耐磨性等,故有利于避免模具型腔的早期塌陷、起皱等失效。例如,将 5CrMnMo 钢热锻模加热到 900℃ 进行碳氮共渗,并进行高温淬火及 500℃ 高温回火,可在确保模具具有高的耐热性、耐磨性及一定硬度的前提下提高热锻模的热疲劳性。如果再进行 540℃ × 4h 的气体氮碳共渗,则可提高模具的承载能力、抗挤压能力和高温强度,降低型腔塌陷变形倾向,而且与常规的热处理相比,还可将其使用寿命提高 5 ~ 6 倍。

3) 对模具进行预热。模具的预热对减少模具断裂破损是十分重要和必要的措施。预热到 200 ~ 250℃ 的模具,在工作过程中,其表面热应力可降低 2/3 ~ 1/3,模具的韧性和断裂强度得到提高,故可减少模具早期断裂。在寒冷冬季,特别是停机后重新开机或使用新模具时,预热就显得更为必要。

4. 热锤锻模的失效分析及对策

(1) 热锤锻模的失效形式及失效原因 热锤锻模在工作过程中主要是承受巨大的冲击载荷和高温流动金属的摩擦力的作用,同时还要受到交替的加热和冷却作

用,因此其主要的失效形式为模具型腔断裂、型腔的热疲劳、型腔的塑性变形及塌陷、型腔的磨损、燕尾开裂等。其中磨损和塑性变形失效占70%以上,断裂失效约占30%。从失效部位来看,型腔中的水平面和凸台处容易发生塑性变形,侧面易出现磨损,而在型腔深处及燕尾的凹形圆角半径处则易萌生裂纹并导致模具的断裂。

1) 模具型腔的断裂失效。这种断裂失效可分为冲击断裂和疲劳断裂。其中,冲击断裂是由于热锤锻模承受巨大的瞬时冲击载荷,当应力超过锻模材料的屈服强度时,裂纹便首先从应力集中处(如过深的加工刀痕、内部缺陷、小圆角半径等)产生,且从裂纹产生到整个锻模的突然断裂在短时间内即可完成;疲劳断裂是热锻模在较长时间内,在较小的反复改变方向的应力作用下,以应力集中处出现的裂纹为起点,然后逐渐扩展,进而破坏材料的连续性,当承受应力的有效截面减小到一定程度且不能抵抗破坏抗力时,整个截面便骤然断裂。

造成模具断裂的因素有:①模具结构设计不合理,存在强度薄弱环节和易引起应力集中的结构(如型腔厚薄不均,带有尖角结构等,尤其在燕尾处);②模具材料的冶金质量不高(如存在缩孔、白点、疏松及非金属夹杂物等);③锻造模块金属流线分布不合理;④大型模块锻造不充分;⑤热处理质量差(如模块表面氧化脱碳、组织差、硬度高、内应力大等);⑥模具材料选择不当(如吨位大的锤锻模未选择冲击值和断裂韧度高的钢材);⑦存在较大的热应力(模具工作前未预热、冷却不当)等。

2) 型腔表面的热疲劳或热裂纹失效。热疲劳可导致模具型腔表面产生微裂纹。这种裂纹有的呈单条状,有的则连成细网状(即龟裂)。模具在工作中受到急冷急热而产生的热应力,是导致模具产生热疲劳的主要原因。热疲劳是热锤锻模的普遍损坏形式。热疲劳裂纹常常是早期脆断、机械疲劳的裂纹源并能够加速模具的断裂。此外,热疲劳裂纹还能加剧模具的磨损过程。

3) 型腔表面的磨损失效。模具型腔表面的磨损可分为两类:一类的特点是在模具与锻造材料滑动摩擦少的地方产生麻点状表面,这种磨损的发生有热和机械方面的原因,但主要与是接触应力有关;另一类主要是由模具与锻造材料之间的滑动摩擦所造成。此时模具主要受切应力作用,由于同时发生氧化磨损与粘着磨损,所以在模具型腔表面生成了凸凹的线状沟槽。

影响模具磨损的因素主要有:①模具工作时的温度;②模具钢的硬度(尤其是高温硬度);③模具钢的成分;④模具的表面状态等。

4) 模具型腔的变形或塌陷。热锤锻模的塑性变形常发生在模具型腔受力大和受热温度高的位置或区域(如毛边槽桥部、型槽内薄的凸出部分等),这是因为高温毛坯与模具接触造成模具材料的屈服强度下降,而这些部位的温度超过材料自身的回火温度后,又会使模具软化,当该部位的屈服强度低于承受的压应力或冲击力时,将产生模具的塑性变形,如塌陷或永久变形。容易产生变形的部位处于型腔的

筋、凸台、棱边等突出部位,因为此处的温度高、受力大,当软化层超过了一定的数值的,就会造成棱角塌陷等塑性变形。软化层较浅的部位,在坯料的作用下表层会发生塑性流动。而模具型腔深处由于淬火未得到马氏体,热处理后硬度的偏低,故在较大的应力作用下就会产生塑性变形,表现为型腔凹陷。

5) 模具燕尾开裂。模具燕尾根部凹槽通常存在应力集中(尤其是存在加工刀痕时),在冲击载荷的往复作用下容易萌生疲劳裂纹,并沿着刀痕的横向延伸或向纵深扩展,造成燕尾的开裂。另外,裂纹也容易产生在燕尾凹槽底部,引起燕尾的开裂。

(2) 对策

1) 合理设计模具结构。热锤锻模的型腔设计应尽量简单、对称,避免锻模圆角半径太小,尽量减少或避免型腔内有尖角、棱边和薄厚不均的现象,型槽壁厚和模块厚度应足够大,毛边槽桥部尺寸应合适。另外,模块上部型槽的纤维方向应与打击方向垂直,以增强其抗冲击性能。

2) 保证模块冶金质量,加大锻造比,进行充分锻造,改善冶金缺陷。此外,对热锤锻模应当100%的进行无损检测,以防内部出现白点、裂纹和缩孔等缺陷。

3) 降低型腔的表面粗糙度值。在热处理过程中应采取保护措施,避免模具表面氧化、脱碳或增碳。

4) 针对磨损和热粘着磨损,可优选含有Cr、W、Mo、V等碳化物形成元素的钢材。此外,提高模具的高温强度、降低模具表面粗糙度、加强模具的使用与维护条件(如良好的润滑)、采取表面强化处理(如氮碳共渗、渗氮与渗硼处理等)都有利于防止热锤锻模失效。其中利用渗氮和渗硼可提高模具寿命1.8~2.2倍。

5) 针对热疲劳失效,可选用5CrNiTi、5CrNiW、5CrNiMo钢来制造模具,如5CrNiW、5CrNiMo钢制热锤锻模采用补充淬火可提高模具寿命50%~80%。另外,还可通过热处理适当提高模具的硬度和冲击韧度。

6) 针对型腔的变形或塌陷,可采取以下措施:①应选择高热强性模具钢,并保证模块的表面和心部的硬度符合要求;②严格执行模具操作规程,如锻模在工作前应进行充分的预热(通常为250~300℃),锻模在工作过程中应经常为其型腔涂抹润滑剂及使用冷却剂(如水雾冷却);③清除模具表面的氧化皮;④工间休息时应对模具进行保温处理;⑤适当进行去应力退火处理;⑥对坯料进行加热,以防止坯料硬度过高;⑦对模具进行渗硼处理等。

7) 针对模具断裂失效,可采取以下措施:①应合理设计模具结构,避免产生应力集中;②降低表面粗糙度值;③严格控制原材料冶金质量,并对模具锻坯进行充分锻造,改善内部组织;④正确进行热处理,保证达到模具技术要求;⑤大型模块优选5CrNiMo钢制造;⑥正确操作与维护等。

8) 针对燕尾开裂,可采取以下措施:①改善燕尾结构,如加大燕尾圆角半径;②降低型腔内部及燕尾圆角处的表面粗糙度;③模具安装牢固并合理;④进行

合理的热处理,使燕尾部分的硬度及金相组织达到技术要求等。

9) 为了减少模具在使用过程中表面与心部的温差,模具在使用前必须进行预热(一般为 $250 \sim 300^{\circ}\text{C}$),在使用中对模具进行润滑,以减小摩擦系数,降低锻造压力,减少磨损。

5. 热冲裁模的失效分析与对策

(1) 热冲裁模的失效 热冲裁模主要有热切边模和热冲孔模等。热冲裁模在工作条件下承受一定的冲击载荷,且在剪切过程中凹模刃口与毛坯相互摩擦,因此易使刃口磨损,同时刃口受热。凹模常见的失效形式为磨损、变形、塌陷和崩刃等。凸模的失效形式主要有断裂、磨损等。

(2) 对策 根据模具的工作条件,一般要求凹模的硬度相对较高,以保证其具有较高的耐磨性(相对来说,凸模并不要求高的耐磨性,故硬度不必过高)。在生产中,通常采用8Cr3制造凹模,硬度要求为 $43 \sim 45\text{HRC}$ 。如果被冲材料为耐热钢或高温合金,则其硬度还应相应增高,但不宜超过 50HRC ,否则易崩刃。凸模的硬度为 $35 \sim 45\text{HRC}$ 即可。

1) 模具材料的选用。模具材料多采用8Cr3钢,但如果采用硬质合金(如GT35)来制造热冲裁模,不但可充分发挥其高温耐磨性,使用寿命也可比一般钢制冲裁模提高30倍以上。

2) 热处理工艺。8Cr3钢制热冲裁模的淬火加热温度为 $820 \sim 840^{\circ}\text{C}$,油冷。为避免模具开裂及变形,入油前可在空气中预冷至 780°C 左右,在油中冷却到 $150 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 时出油,并立即进行回火。经 $480 \sim 520^{\circ}\text{C}$ 回火,其硬度为 $41 \sim 45\text{HRC}$ 。要注意的是,通常回火温度不应低于 460°C 。

如果采用堆焊或等离子喷焊等工艺在冲裁模的刃口部位熔覆一层耐高温磨损的钴基合金,则可大幅度提高刃口部分的耐磨性,显著提高模具寿命。

6. 热切边模与铆钉模的失效分析与对策

(1) 热切边模和铆钉模的失效形式

1) 热切边模是在加热状态下完成锻件飞边的剪切工作的,其组成主要有切边凹模与切边凸模。在凹模的剪切过程中,锻件毛坯与凹模的刃口相摩擦,刃口受热而温度升高,同时承受一定的冲击载荷,因此在工作过程中凹模最容易失效。凹模的主要失效形式为刃口磨损与崩刃。凸模的主要失效形式是断裂及磨损。

2) 铆钉模是安装在风动工具上工作的,其在工作时与 $900 \sim 1\,000^{\circ}\text{C}$ 的铆钉接触长达数分钟,模腔部分的温度可升高到 $400 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 。由于模具温度升高可造成其硬度和强度降低,且同时承受冲击压缩载荷和冲击弯曲载荷的作用,因此铆钉模的主要失效形式为肩部折断、尾部压塌、开裂以及窝边的磨损等。

(2) 对策

1) 模具材料的选用。热切边模具钢应具有高的硬度与热硬性、一定的强韧性、良好的加工性能等。通常凹模选用的材料为7Cr3、8Cr3、4CrW2Si、5CrNiMo

及5CrMnMo钢等,凸模材料为7Cr3、8Cr3钢等。

铆钉模具钢应具有高的硬度和耐回火性、足够的强度和冲击韧性、良好的疲劳强度与淬透性。常用材料有60Si2Mn、T8、T10等中碳钢。

为了提高热切边凹模的耐磨性,也可以采用硬质合金制造(如YG15、YG20等),并采用镶套方法装配使用。

2) 热处理工艺。8Cr3钢制模具淬火温度为820~840℃,加热时需采取保护措施,淬火入油前可在空气中预冷至780℃左右,在油中冷却到150~200℃时出油,并立即回火。8Cr3钢制切边模回火温度480~520℃,其硬度为41~45HRC。

为了提高热切边模刃口的耐磨性,可在其刃口部位堆焊一层(3~5mm)高耐磨、高热强性的钴基材料(硬度35~40HRC),模体可用45钢、40Cr钢等中碳钢来代替8Cr3钢。热切边模采用钴基或镍基及铁基粉末冶金材料,可采用等离子喷焊。为防止焊层开裂,喷焊前应对较大切边模进行550~650℃的预热处理,焊后应迅速置于550~650℃的炉中保温,然后随炉冷却到室温。测得合金喷焊层硬度为43~48HRC。

铆钉模选用T8制造时,采取整体淬火+低温回火的工艺可使其硬度达到55~59HRC,故可以有效地避免上述缺陷的产生。

7. 热挤压模和高速锤锻模的失效分析及对策

(1) 热挤压模具的失效形式及对策 热挤压模主要由冲头和凹模等组成,其工作时要较长时间与高温坯料接触,承受高温、高压、急冷急热反复的循环应力、偏心载荷和冲击载荷的作用,以及承受高温下的高摩擦作用。热挤压模(无论是冲头或凹模)常见的失效形式有早期脆断、疲劳断裂、热疲劳、型腔塌陷及磨损等。

1) 模具的脆断失效。出现脆断失效的模具寿命大多很短,多则数百次或上千次,少则仅为数十次或数次。为防止模具脆断可采取以下措施:①合理设计模具结构,避免应力集中;②降低表面粗糙度值;③防止表面出现热疲劳裂纹;④防止表面出现磨损沟槽;⑤模具在使用过程中及时进行低温回火处理,以消除残余应力;⑥保证模具钢材的冶金质量;⑦合理制订操作规范等。

2) 模具的疲劳断裂失效。模具承受大应力低周载荷,故易发生疲劳断裂失效。预防措施为:①合理选择模具材料;②适当提高模具硬度与冲击韧度;③正确操作与维护等。

3) 模具的热疲劳失效。热挤压模具经过一段时间的使用普遍出现热疲劳。如果模具出现热疲劳裂纹,轻则破坏型腔的表面粗糙度,重则使模具发生脆断。预防措施为:①合理设计模具结构,避免应力集中发生;②根据工作条件及技术要求,正确制订热处理工艺;③操作中及时进行维护、保养等。

4) 型腔塌陷及磨损失效。由于热挤压模具工作温度较高,因而型腔塌陷及磨损也是其主要失效形式。预防措施为:①应选择高热强性模具钢;②保证模块的表

面与心部的硬度要求；③认真执行模具操作规程；④使用中适当进行去应力退火处理；⑤进行表面强化热处理等。

(2) 高速锤锻模的失效形式及对策 高速锤锻模在高冲击载荷、高温、高能量及高摩擦条件下工作，因此其工作条件比其他热作模具更为苛刻。其失效形式主要有断裂、磨损、塑性变形及热疲劳等四种。

1) 断裂失效。高速锤锻模的断裂失效可分为早期脆断和疲劳断裂。

早期脆断造成的危害较大。凹模发生早期脆断（纵向破裂）的原因有：①热处理不当造成冲击韧性低；②使用前模具预热不充分；③出现摩擦沟槽，产生应力集中；④模具设计不合理，如壁厚过薄；⑤模具冶金质量不良，有严重的带状碳化物偏析等。冲头的脆断容易发生在尺寸过渡处，原因是过渡区的圆角太小或存在较深的加工刀痕等引起应力集中，若冲头受到偏载，则易产生折断。

疲劳断裂由热应力及机械应力引起。裂纹源首先出现在模具表面，然后向内部扩展。疲劳断裂的预防措施为：①正确设计模具结构，避免应力集中；②模具材料选用高韧性钢（如 5CrNiMo 钢）、高热强性模具钢（如 4Cr3Mo3W4VTiNb、3Cr2W8V 钢）、高热强高韧性钢（如 4Cr5W2VSi、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1 钢等）；③如果采用 4Cr5W2VSi 钢制造，则应对其进行预备热处理（去氢退火处理）和常规热处理（1 040 ~ 1 050℃ 盐浴炉加热，520℃ × 2h 等温分级淬火，570 ~ 590℃ 回火 2 次，每次 2h，硬度为 46 ~ 48HRC）；④工作过程中需对模具进行强制性冷却或润滑等。

2) 磨损失效。造成模具磨损的主要原因是热处理后硬度过低或型腔表面层受热软化。此外，型腔若表面粗糙度值高，也能够加速磨损。预防模具磨损失效的措施主要是提高模具表面硬度及降低表面粗糙度值。另外，模具在使用中适当进行润滑也可以有效地减少模具的磨损。

3) 塑性变形失效。冲头塑性变形失效主要表现为局部墩粗，其原因是因为冲头热处理后硬度偏低及使用中未及时冷却等。预防冲头局部墩粗可采取以下措施：①合理选用模具材料；②热处理时保证冲头基体及表面硬度（尤其是热硬性）符合技术要求；③使用中对冲头进行及时冷却等。

4) 热疲劳失效。高速锤锻模在工作中经常受急冷和急热，因而容易萌生热疲劳裂纹。热疲劳裂纹是高速锤锻模早期脆断及疲劳断裂的根源，且模具出现热疲劳裂纹后会加剧其磨损过程，故应对其加以预防。防止高速锤锻模热疲劳失效可采取以下措施：①合理选择模具材料；②正确制订热处理工艺，保证技术要求；③认真执行操作规程，及时对模具进行冷却或润滑等。

5.6.3 热作模具失效分析与对策的典型实例

实例 1 大型热压铸模具因硬度偏高造成模具早期断裂的分析与对策。

大型热压铸模具，材料为 H13 钢，外形尺寸为 $\phi 500\text{mm} \times 140\text{mm}$ ，要求模具硬

度为 52~54HRC。

(1) 热处理工艺 热处理工艺如图 5-6 所示。淬火加热在盐浴炉中进行, 回火后硬度为 52~54HRC, 回火后的金相组织为针状回火马氏体 + 回火索氏体, 符合技术要求。

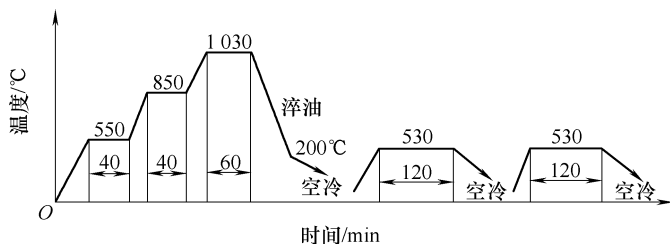


图 5-6 H13 钢模具热处理工艺曲线

(2) 模具断裂原因分析 模具在安装试用阶段就产生断裂。经分析发现, 模具硬度太高, 韧性不足, 属于脆性断裂。

(3) 对策 将模具技术要求改为 46~48HRC 后避免了模具脆性断裂。

实例 2 纺织配件用小型压铸模因表层硬度太低造成模具早期龟裂失效的分析与对策。

纺织配件用小型压铸模, 外形尺寸为 $\phi 180\text{mm} \times 85\text{mm}$, 材料为 H13 钢, 技术要求为 48~50HRC。

(1) 热处理工艺及其质量检验 模具淬火加热温度为 1030°C, 回火温度为 580°C, 热处理后磨去模具表层, 检测硬度为 49HRC, 符合技术要求。

(2) 模具失效及其原因分析 模具仅压铸 2000 件即出现表面龟裂而失效。经检验分析, 其表层 (距离表面 1mm 范围内) 碳的质量分数 $< 0.25\%$, 脱碳层为 1.5mm (碳的质量分数 $< 0.3\%$), 模具表面硬度仅为 33~35HRC, 这是由于在给模具加热时, 高温箱式电阻炉内无保护气氛, 引起模具表层脱碳所致。低碳表面层的强度低, 导致模具在使用过程中发生早期龟裂失效。

(3) 对策 将高温抗氧化防脱碳涂料涂覆在模具表面, 烘干后装入高温箱式电阻炉中加热, 模具淬火后表面硬度 $> 50\text{HRC}$, 回火后表面硬度为 45~50HRC。改进工艺后, 该模具在压铸 4000 件后还未发生龟裂等缺陷。

实例 3 热压铸模因表面硬度高、基体硬度低造成早期龟裂失效的分析与对策。

热压铸模, 外形尺寸为 $\phi 150\text{mm} \times 70\text{mm}$, 材料为 H13 钢, 基体硬度为 23~25HRC, 基体金相组织为细化了碳化物的球化组织, 要求热处理。

(1) 热处理工艺及质量检验 采用渗氮处理, 渗氮温度为 580°C, 保温时间 4.5h, 出炉后油冷。渗氮后表面硬度 $> 900\text{HV}$, 扩散层深度约为 0.2mm。

(2) 模具失效及其原因分析 模具仅挤压 2 000 件便发生龟裂失效而不能使用。经检验分析,发现模具基体硬度过低。

(3) 对策 将热处理工艺改为先进行 1 030℃ 加热淬火及 580℃ 回火(此时基体硬度为 45~50HRC),然后再进行氮碳共渗处理。经检测,模具表面硬度 > 900HV,渗氮层深为 0.2mm 左右,模具基体硬度为 48HRC。改进工艺后,模具工作状况良好,可热挤压零件 8 000 件以上。

实例 4 热穿孔冲头的变形与开裂失效分析与对策。

热穿孔冲头,材料为 3Cr2W8V 钢,要求淬火、回火处理。

(1) 失效形式及产生原因 热穿孔冲头经正常工艺处理。在冲制 55 钢和 60 钢时,使用寿命低,有的平均使用寿命仅 200~300 次。主要损坏形式是软化变形和开裂。其原因是与钢材存在带状碳化物或夹杂物有关。

(2) 改进措施与效果 对 3Cr2W8V 钢采用短时高温加热淬火处理,可使碳化物大量溶入奥氏体中,并使脆性夹杂物高度弥散地分布于晶粒内部,不但净化了晶界,提高了冲头材料的热硬性,还减少了应力集中,因此可大幅度提高模具使用寿命,并可基本上消除模具开裂现象。具体工艺如下: 850℃ × 40min 预热, 1 250 ~ 1 280℃ × 15min 加热保温, 300 ~ 320℃ × 15min 盐浴等温后空冷, 600 ~ 610℃ × 1.5h 回火 2 次,再进行 1 次 200℃ × 1h 回火。等温淬火盐浴的成分(质量分数)为 50% Na₂NO₃ + 50% KNO₃。

改进工艺后,冲头淬火硬度为 44~47HRC,回火硬度为 46~48HRC,使用寿命可达 1 500~2 200 次,基本上不发生开裂。

实例 5 汽车前轴模具断裂的失效分析与对策。

汽车前轴模具,外形尺寸为 2 300mm × 660mm × 480mm,材料为 5CrNiMo 钢,安装在 16t 蒸汽锤上使用。

(1) 原加工工艺流程 冶炼→浇注钢锭→锻造毛坯→等温退火→粗加工→超声波检测→调质→精加工。

(2) 原热处理工艺

1) 等温退火工艺。加热 780℃ × 11h,快速降温到 680℃ 并保温 12h,然后炉冷至 500℃ 以下出炉空冷。

2) 调质工艺。将模具型腔表面涂覆保护涂料,随炉升温至 650℃ 并保温 3h 进行预热,然后升温至 860℃ 并保温 11h,出炉后油冷,当模具表面冷至 180℃ 时出油并及时回火,高温回火 520℃ × 14h,出炉空冷。

(3) 失效分析 该模具生产汽车前轴约 80 件后横断面出现贯穿性裂纹,从模具断口上可以清楚看到粗大晶粒、组织疏松和非金属夹杂物。裂纹源位于模具的中心部分,而裂纹源附近冶金缺陷、锻造缺陷引起的应力集中又促使了裂纹的产生和扩展。由于模具尺寸较大,因此在冷却末期虽然外层金属温度低,但心部温度却较高。当模具心部继续降温时,心部金属因体积收缩会受到外层金属的强力阻碍,故

心部承受三向拉应力,使模具中心部位的冶金及锻造缺陷在拉应力作用下成为了断裂源,并迅速扩展直至模具断裂。

(4) 改进工艺 毛坯锻造后增加了正火工序,等温退火工艺不变,调质工艺进行了改进。

1) 改进后的加工工艺流程。冶炼→浇注钢锭→锻造毛坯→正火→等温退火→粗加工→超声波检测→调质→精加工。

2) 正火工艺。将模具装入炉内,随炉加热升温至 880℃ 并保温 12h,出炉空冷。

3) 改进后的调质工艺。将模具的型腔表面涂覆保护涂料,随炉升温至 620℃ 并保温 3h 进行预热,再升温至 840℃ 并保温 11h 后出炉,表面预冷至 750~780℃ 后迅速放入 20~50℃ 油中淬火,当模具表面温度达到 230~250℃ 时出油,在空气中冷却至 100~150℃ 时,立即转入回火炉中进行回火;第一次回火将温度升温至 350℃ 并保温 4h 进行预热,再升温至 600℃ 并保温 15h,随炉冷却至 300℃ 以下出炉后空冷;第二次回火将温度 600℃ 变为 580℃,其他的工艺参数均不变。在整个调质过程中,所有加热升温速度均控制在 50℃/h 以内。

实例 6 滚丝模螺纹牙顶崩裂或剥落的失效分析与对策。

滚丝模 (M156×2mm, 厚度 100mm), 材料为 Cr12MoV 钢, 淬火、回火后硬度 $\geq 58\text{HRC}$ 。

(1) 失效形式 经热处理及机械加工后,模具寿命在生产使用中不稳定(约 500 件),许多模具使用不久螺纹牙顶即发生较大面积脆性崩裂或剥落,导致早期失效,废品率高达 20%~30%。

(2) 加工工艺路线:棒料下料→机械加工→反滚压成形→真空炉 1 020℃ 油淬 + 200℃ × 2h × 3 次油中回火→磨削加工、抛光→成品出厂。

(3) 失效分析 经检验,化学成分合格。检测失效模具的硬度为 60~62HRC,合格。切块检查金相组织为回火马氏体 + 体积分数约 10% 的残留奥氏体 + 粗大碳化物,碳化物偏析级别为 3.0~4.5 级不等,表层与心部晶粒度等级分别为 10 级和 8 级。断口宏观分析可见螺纹牙顶大面积的崩裂或剥落,断口呈脆性断裂;模具表面及工作面无斑点、麻面,看不到严重氧化迹象,未发现因强度和硬度不足产生的工作部位挤压变形或磨损。

由于 Cr12MoV 钢属于高碳、高铬莱氏体钢,钢材内部共晶碳化物多、颗粒多、偏析严重,这些碳化物的存在加大了模具的脆性;因该模具直接采用棒料下料加工,机械加工前未经反复锻粗、拔长锻造,故钢中碳化物偏析严重,成为疲劳裂纹源,造成滚丝模早期崩刃失效;滚丝模淬火时,在 1 020℃ 高温长时间加热,致使 0.5~2.0mm 螺纹牙齿厚处奥氏体晶粒不断长大,容易引发过热等现象,加剧模具牙齿产生剥落等早期失效。

(4) 改进措施与效果 毛坯必须进行改锻,锻造后必须进行球化退火或调质

处理。改进热处理工艺为：1 100℃ × 10min 淬油 + 750℃ × 2h 调质处理；淬火加热 980℃ × 30min + 250℃ × 20min 等温油淬 + 200℃ × 2h × 3 次回火；- 120℃ × 4h 深冷处理 + 190℃ × 2h × 3 次回火。经以上改进后，每副滚丝模平均可加工零件 11 000 件，比原来的模具寿命提高了 22 倍。

实例 7 汽车半轴摆辗成形模具热疲劳裂纹的分析与对策。

汽车半轴摆辗成形模具，材料为 3Cr2W8V 钢，要求淬火、回火处理。

(1) 失效原因分析 该模具的受力情况是：不但承受压缩应力和弯曲应力，脱模时还承受一定的拉应力。此外，由于模具与炽热的毛坯接触，需要水冷，因而承受冷热应力引起的热疲劳和热冲蚀。在这种恶劣的使用条件下，模具产生热疲劳裂纹而报废。

原工艺采用 600 ~ 650℃ 预热 2h，升温至 870 ~ 890℃ 并保温 2.5h 后入油淬火，580 ~ 600℃ × 2.5h × 2 次回火，然后入油冷却。由于淬火加热温度低，大量的合金碳化物未溶解，所以淬火后硬度很低，只有 20 ~ 25HRC，通过回火的二次硬化也只能使硬度达到 30HRC 以上，虽然模具韧性较好，但容易出现热疲劳，热磨损严重，寿命低。

(2) 改进工艺与效果 在经过充分预热并在高温区保温 0.5h 后分级淬火，再经高温回火完成组织转变和消除应力，低温回火消除残余应力，可使模具表层具有高的耐疲劳性且心部具有良好的冲击韧度，同时还可获得高温强度和冲击韧度最佳的匹配。摆辗机的热挤压终锻模具用摆块和套模原来使用寿命分别为 800 ~ 1 200 件和 1 000 ~ 1 500 件，改进工艺后使用寿命分别为 2 000 ~ 3 000 件和 2 500 ~ 3 500 件，即使用寿命提高了 2 ~ 3 倍。

5.7 塑料模具的失效分析与对策

塑料制品成型模可分为热固性塑料压模和热塑性塑料注射模。前者工作温度一般为 160 ~ 300℃，受力大（一般为 160 ~ 200MPa，封闭模可达到 300MPa 或更高），型腔易磨损和腐蚀；后者工作温度为 150℃ 以下，承受的工作压力和磨损没有前者严重，但部分塑料在加热后的熔融状态下能够分解出氯化氢或氟化氢气体，对型腔有较大的压力和腐蚀性。由于对塑料制品的表面质量及精度要求较高，如果这两项指标下降即意味着塑料模具失效，故因表面磨损造成的模具失效比例较大。对此，应进行失效分析，找出具体原因，并采取相应措施加以预防。

5.7.1 塑料模具的主要失效形式

塑料模具的主要失效形式有塑性变形、断裂、表面腐蚀、疲劳和热疲劳、表面磨损失效等。

(1) 塑性变形失效 塑料模具在持续受热及压力的作用下，会在局部发生塑

性变形而失效。塑性变形失效产生的原因,主要是模具型腔表面的硬化层过薄、变形抗力不足、热处理时回火不足或因工作温度高于回火温度而使模具发生软化,如生产中常用的渗碳钢或碳素工具钢制胶木模就是常以表面起皱、凹陷、麻点及棱角塌陷等塑性变形方式失效。

(2) 断裂失效 断裂失效是一种危害性很大的快速失效形式。断裂是由于塑料制品成型模具形状复杂,存在许多棱角、薄壁等部位,易产生应力集中,当这些部位的应力超过模具材料的强度时就会发生断裂失效。另外,模具在使用时由温差产生的热应力或在模具内部产生的组织应力(因回火不足,在使用温度下残留奥氏体转变成马氏体,引起局部体积膨胀)也会导致模具断裂失效。

(3) 表面腐蚀失效 表面腐蚀会造成模具型腔表面质量下降及尺寸超差。热固性塑料中的固体添加剂及一些热塑性塑料在受热时分解析出的 HCl、HF 等强腐蚀性气体,都对模具型腔表面有侵蚀作用并加剧其损伤。

(4) 疲劳和热疲劳失效 塑料模具在工作过程中因承受循环的机械载荷作用,使模具的型腔表面承受脉动拉应力作用,而引起的模具破坏称为疲劳失效。塑料模具在工作工程中还承受循环的热载荷,反复的受热和冷却可导致模具型腔应力集中处萌生热疲劳裂纹,在模具型腔表面上的脉动拉应力作用下,热疲劳裂纹向纵深扩展,造成模具断裂或热疲劳失效。

(5) 表面磨损失效 熔融的塑料以一定的压力在型腔内流动及凝固后的塑料制品从模具中脱出,都会对模具的型腔表面造成磨损。热固性塑料对模具表面的摩擦不但使模具表面拉毛、型腔表面粗糙度值增高,而且还会影响压制件的外观质量。另外,热固性塑料中含有的固体添加剂(如云母粉、硅砂、钛白粉、石英砂、玻璃纤维等)也会加剧对模具型腔的磨损,不仅使型腔表面质量迅速恶化,而且还会使模具型腔尺寸超差,严重影响塑料制品的质量。

5.7.2 塑料模具失效分析与对策

塑料模具在工作中常发生磨损、表面腐蚀、断裂、塑性变形、热疲劳等失效形式。对此,可采取以下措施:

1) 选用耐蚀性塑料模具钢,如 0Cr16Ni4Cu3Nb (PRC)、SM2Cr13、SM4Cr13、SM3Cr17Mo、95Cr18、90Cr18MoV、40Cr13、12Cr18Ni9 等,或选用微合金非调质塑料模具钢,这类钢不需调质处理,但具有调质后的良好的综合力学性能,如果进行渗氮处理,则可以进一步提高模具型腔的表面性能。对于要求耐磨性良好的塑料模具,可选用渗碳型钢,如 20、20Cr、12CrNi3A 和 0Cr4NiMoV (LJ)、P2、P4、P6、CH1、CH2、8416 钢等。对于要求高耐磨性的大型、复杂精密的塑料模具可选用淬硬型塑料模具钢,如 SM4Cr5MoSiV、SM4Cr5MoSiV1、SMCr12Mo1V1 钢,以及碳素工具钢、低合金冷作模具钢、高碳高铬工具钢、热作模具钢、高速工具钢、基体钢等。淬硬型塑料模具钢应具有较高的硬度,以及较好的耐磨性、抛光性和电加

工性能,以减少或避免模具在使用中出现的塌陷、变形和开裂等缺陷。塑料模具也可选用无磁性塑料模具钢,如 7Mn15Cr2Al3V2WMo (7Mn15)、5Mn18Cr4WN (50Mn)、HPM75 钢等,此类钢具有高的硬度、强度和较好的耐磨性,通过气体氮碳共渗处理,还可进一步提高模具钢表面的硬度和耐磨性,显著延长模具的寿命。

2) 为防止塑料模具产生塑性变形,需使模具具有足够的硬度及硬化层深度,如使碳素工具钢的硬度达到 52~56HRC,渗碳钢的渗层厚度达到 0.8mm 以上,以获得足够的变形抗力,从而有效地防止因塑性变形所导致的塑料模具早期失效。

3) 为防止塑料模具发生早期断裂,除在设计中应予以注意(如防止产生应力集中)及在热处理中要充分回火外,更主要的是应选用韧性较好的模具材料,如对于大、中型复杂型腔(胶木)模具,应采用高韧性钢(渗碳钢或热作模具钢)制造,一般不用高碳合金工具钢。

4) 热固性塑料模具型腔表面粗糙度值 Ra 应低于 $0.4\mu\text{m}$,以保证压制件的外观质量满足要求,接缝密合、尺寸精度合格并便于脱模。

5) 为了提高模具表面的硬度、耐磨性及耐蚀性等,可对塑料模具进行表面化学热处理,如渗氮、氮碳共渗、渗碳等。

5.7.3 塑料模具失效分析与对策的典型实例

实例 1 注塑机料筒(见图 5-7),材料为 CrWMn 钢,要求复合热处理。

手表壳玻璃采用注塑机注塑成型。注塑机料筒分为上下两部分(见图 5-7)。

(1) 失效原因分析 注塑机料筒原热处理采用常规工艺,即 840°C 淬火及 200°C 回火,但在使用过程中使用寿命很低,在螺纹部分常出现碎裂现象,筒内壁也常过早发生磨损现象。经分析,失效原因是 CrWMn 钢存在较严重的碳化物偏析和网状碳化物,脆性较大。

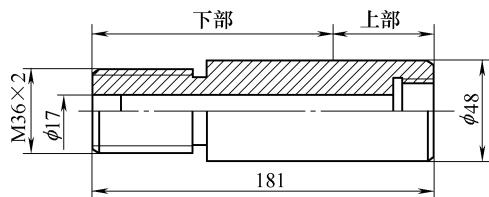


图 5-7 注塑机料筒简图

(2) 改进措施与效果 注塑机料筒上下两部分的工作条件不同:料筒上部在热状态下工作,要求具有高的塑性和一定的强度;料筒下部在工作时受活塞多次冲击,要求具有高的强度和冲击韧性。因此,应对其分段采取不同的热处理工艺。改为采用图 5-8 所示的改进后的热处理工艺后,不但可消除网状碳化物及提高模具的强韧性,而且还可使注塑机料筒使用一年以上,使用寿命显著提高。此外,还提高了手表壳玻璃的质量。

实例 2 线圈架塑料压铸模,材料为 T10A 钢,热处理后的硬度要求为 60~62HRC。

(1) 失效分析 该模具工作温度高于 200°C ,成形压力在 25MPa 以上,压铸

了不足2 000件即发生失效,其主要的失效形式为型腔拉毛和棱边塌陷等。经对失效模具进行硬度检查发现,型腔与棱边处的硬度为56~58HRC,表明这些部位有一定程度的软化。另外,金相检验发现其金相组织为回火马氏体+粒状渗碳体+少量残留奥氏体。

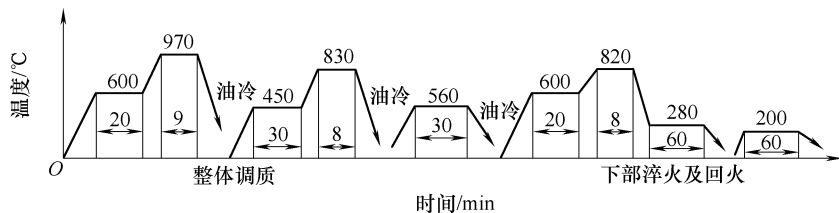


图 5-8 改进后的热处理工艺

模具的硬度降低显然与模具回火不足有关。由于模具的工作温度高于模具的回火温度(200℃),使其在工作过程中受热后继续回火,造成马氏体的分解和残留奥氏体的转变,因此在压力作用下产生“相变超塑性”流动,引起模具型腔表面拉毛和棱边的塌陷。另外,模具在装卸时经常承受的冲撞作用,也容易导致模具开裂和棱角塌陷。

(2) 对策 根据模具工作过程中的失效形式,结合其产生的原因,从以下几个方面来采取措施:

1) 适当提高模具的最终回火温度,同时增加回火保温时间。以250~270℃回火(即高于模具的工作温度),既可防止模具在工作过程中因回火不充分而造成的回火转变,又可明显减少模具棱边的塌陷、起皱和表面拉毛的缺陷。

2) 采用两段回火工艺,以确保模具回火充分,并使模具在保持较高硬度的前提下改善韧性。具体工艺为200℃×1.5h回火+260℃×1.5h回火。改进回火工艺后,模具硬度可控制在56~58HRC,使用寿命可达18 000件。由此可见,T10A钢制模具采用高于工作温度充分回火是防止模具失效和提高模具寿命的有效措施。

实例3 精密密封橡胶模和精密热塑性塑料模的失效分析与对策。

(1) 模具失效形式 45、40Cr、T8A钢制模具进行调质处理(硬度为28~32HRC)+镀铬工艺后,使用过程中出现硬度低、易磨损、型腔表面出现凹坑和麻点、变形等缺陷。如果采用38CrMoAl钢制造模具,在调质和氮碳共渗后,尽管寿命提高了2~3倍,但因该钢加工性能差,无法推广使用。

(2) 对策 采用5CrNiMnMoVSCa钢制造模具,该钢属于易切削预硬化模具钢,具有好的淬透性及强韧性,经过调质处理(880~920℃盐浴加热,油冷或空冷后硬度为60~62HRC,550~650℃高温回火后硬度为35~45HRC)后,该钢具有良好的可加工性和抛光性能,其使用寿命也比45钢和38CrMoAl钢高数倍。

第 6 章 提高模具使用寿命的途径与方法

随着社会经济的快速发展，模具已成为现代工业生产的重要装备，并成为发展方向之一。据有关组织机构预测，21 世纪机械制造工业的零件的粗加工的 75% 和精加工的 50% 都将依赖模具来完成。如何提高模具质量和使用寿命并降低模具生产成本已成为当前迫切需要解决的问题。

模具寿命的高低是衡量模具质量的重要指标之一。它不仅影响产品质量，而且还关系到产品的生产效率和成本。影响模具寿命的因素虽然很多，但模具材料及热处理工艺对模具寿命的影响是最重要的，即合理地选材及正确的热处理工艺是保证模具寿命的关键。采用高强韧性模具材料和强韧化处理及表面强化工艺，是提高模具使用寿命和性能的十分重要的措施，但由于模具的尺寸、形状的复杂程度、工作条件及失效类型千差万别，故在选材、确定热处理工艺和制订技术要求时要特别注意模具的具体使用要求。

6.1 提高模具寿命的途径

生产实践证明，影响模具使用寿命的因素主要有：结构设计、成形及制造工艺（如锻造、铸造、机械加工等）、模具材料的选用、热处理工艺及表面强化、装配精度及维护保养等。

提高模具的使用寿命应从内在因素与外在因素两个方面考虑，包括以下几个方面。

1. 模具的设计

（1）正确设计模具结构 实践表明，许多模具的失效皆可归因于设计不当，即模具结构设计不合理。合理的结构有助于增强模具承载能力，减轻模具工作时承受的热或机械载荷水平，防止凸模（冲头）与凹模之间的啃伤。不合理的模具结构则会引起严重的应力集中或使工作温度过高，从而恶化模具的工作条件，导致模具过早失效。

不合理的模具结构设计主要表现在以下几个方面：①尖角、圆角半径过小；②凹槽、窄槽和截面突变；③孔的位置不当造成截面太薄及间隙配合不当；④模具形状不对称，造成模具偏心受载和磨损不均等。

为避免应力集中，应尽可能加大尖角处的圆弧曲率半径，或采用镶嵌、镶套和组合式结构，或修改设计以减小应力集中系数，也可应用计算机辅助设计

(CAD), 建立新的强度校核方法, 提高强度设计精度, 增加可靠性系数等。例如, 高速锤凸模原为整体式结构, 因截面尺寸变化甚大, 工作寿命极短, 后改为组合式结构, 大大减轻了应力集中, 使模具使用寿命大幅度增高。

采用预应力结构设计可提高冷挤、冷镦凹模的承载能力, 充分发挥高耐磨材料的潜力, 特别是使用硬质合金制作的模具, 如果不采用预应力结构, 则容易发生早期胀裂失效。常用的预应力强化结构有预应力镶套径向强化及小锥度轴向加压强化两种方式, 前者可克服径向胀裂, 后者除增强径向断裂强度外, 还可克服脱底开裂。例如, 高速工具钢制 M12 螺栓冷镦模, 外形尺寸为 $\phi 66$ (外径) / $\phi 12$ (内径) mm $\times$ 33 (高度) mm, 原为整体式结构, 其寿命不及用碳素工具钢制模具的 1/4, 失效形式为胀裂, 后改为预应力镶套结构 (镶套外径 $\phi 28$ mm, 其他不变), 不但克服了早期胀裂现象, 还使模具使用寿命超过了碳素工具钢制模具的 8 ~ 10 倍。

设计模具时, 还应考虑加工工艺性, 并经价值工程分析证明是合理的。

(2) 合理制订模具硬度 模具的硬度影响着模具的强度、韧性及耐磨性等特性。模具发生早期失效, 大部分是由于硬度过高而导致早期断裂, 只有少部分是因为硬度低而造成早期变形或磨损。因此, 合理制订模具硬度可以提高模具寿命, 例如, T10A 钢模具, 硬度为 52 ~ 56HRC, 冲裁硅钢片时只能冲裁几千次, 将硬度提高到 60 ~ 62HRC 后则可以冲裁 2 万次以上。也有的模具硬度不易过高, 如 Cr12MoV 钢制造的六角螺母冷镦凸模, 硬度为 56 ~ 60HRC, 寿命为 2 ~ 3 万件, 如果将硬度降到 50 ~ 54HRC, 则模具使用寿命可提高到 6 ~ 8 万件。由此可见, 模具的硬度必须根据成形性质和失效形式而定。

2. 正确地选用模具材料

由于不同的模具的工作条件差别极大, 因此模具材料必须根据其工作条件、失效形式、技术要求、材料特性等进行合理选用。为了适应工作条件对模具的更高要求, 克服原有模具材料存在的不足, 可以选用国内外新研制的成熟的模具材料, 如易切削钢、火焰淬火钢、析出硬化钢、预硬型钢、ESR 重熔法精炼的模具钢及粉末高速工具钢等。根据这些钢种的特点, 正确地加以选用, 有效地加以利用, 可以较大幅度地提高模具使用寿命。

对于特殊要求的模具材料, 采用粉末高速工具钢和粉末高合金模具钢, 则可以更好地改善钢的组织 and 性能, 提高模具的使用寿命。

真正优质的模具钢材, 不仅要求材料化学成分符合标准, 而且要求材料的冶金质量也符合要求。因此, 应优先选用经电渣重熔或真空炉外精炼等二次精炼工艺取得的优质模具钢。

选用的模具材料必须满足其对塑性变形抗力、断裂强度、疲劳强度、硬度、耐磨性、耐冷热疲劳性等要求, 否则将会发生模具早期失效。显然, 模具材料不同, 模具的使用寿命也不相同。试验表明: 生产同一产品的模具, 9Mn2V 钢制模具寿命为 5 万次, 而 Cr12MoV 钢制模具寿命则可达 40 万次。

在选用模具材料时，还应考虑生产批量的大小、被冲压材料的性质及模具钢的特性，并兼顾其技术性与经济性。例如，当产品的批量较小时，可选用便于制造加工、价格低廉的模具材料；如果产品批量很大，则应选用承载能力强、工作寿命长的高性能模具钢。同时，还应考虑被冲压材料的变形抗力、使用温度、磨耗作用及咬合倾向等对模具的使用寿命的影响。

为了能够正确选择模具用钢，首先需对各种典型模具进行失效分析，找出能够表征模具工作特点的性能指标，然后以此为依据，有针对性地选用适当的材料。

3. 保证模具材料的冶金质量

模具淬火时出现的工艺缺陷及工作时的承载能力，主要与模具用钢的冶金质量有关。通常情况下，碳含量高及合金元素含量较多的模具钢具有较强的出现冶金缺陷的倾向。因此，应严格控制模具原材料中的非金属夹杂物、化学成分偏析、碳化物偏析、网状碳化物、疏松、白点等冶金缺陷，并按国家、行业等相关标准认真检验模具材料的冶金质量。

合格的模具用钢的冶金质量应具备下列条件：①材质洁净度高，各种有害元素、气体、非金属夹杂物的含量少；②碳化物分布均匀，颗粒细小；③无网状碳化物，带状偏析轻微；④断口宏观组织细密，无孔洞、疏松、白点等缺陷；⑤性能及成分稳定，不同炉号、不同规格之间的性能波动范围小。

4. 保证模具钢的锻造质量

为了获得优质锻坯，应选用足够能量的锻锤，以充分的变形量对锻件进行多向反复锻打，并注意控制锻件流线分布和型面位置。合理的锻造工艺不但可以将铸造成形材料中的气孔、疏松、缩孔和微裂纹焊合，提高锻坯的致密度，而且可以使共晶碳化物碎化和细化，把粗大的枝晶状共晶碳化物打碎打散，提高碳化物分布的均匀性，细化碳化物的粒度。采取加大锻造比（如大于4）和采用六面锻造的工艺，不仅能尽量消除或减少钢材中的不良组织（如组织偏析、液析碳化物以及粗晶组织等的遗传），而且还能提高钢材组织和性能的等向性，避免材料的应力的复杂化，为模具的最终热处理作好组织上的准备。例如，规格为M10~M12的搓丝板，如果用Cr12MoV钢轧材直接切削加工而成，则使用寿命不超过6万次，但对毛坯进行充分锻造后，其使用寿命则可提高近一倍，达到10万次。

另外，在对模具坯料采用合理锻造的基础上，锻造后采用锻造余热淬火+高温回火，或将锻坯进行高温固溶+短时等温球化处理，都可使碳化物不均匀分布得到改善，有利于提高模具使用寿命。

5. 保证模具热处理质量

模具的热处理主要包括预备热处理和最终热处理（包括表面强化处理）。模具毛坯预备热处理包括正火、退火、调质、去应力回火等，其作用是消除毛坯残存的组织缺陷，形成有利于强韧性、机械加工工艺性和减少淬火缺陷的原始组织。例如，对锻坯中的网状二次碳化物或链状碳化物采用高温固溶处理+正火进行消除

后,可以明显提高钢的断裂韧性。又如 T10A 钢冲头材料中的碳化物经微细化处理后再进行低温淬火,可以显著减少崩裂现象,并使模具的使用寿命提高 10 倍。

模具热处理常用的有锻造后的球化退火、粗加工后去除加工应力的高温回火或低温回火、精加工后的淬火及回火,以及电火花线切割后的去应力低温回火等。为保证模具热处理质量,可以采取以下措施:

1) 正确选择热处理工艺参数(如热处理加热温度、保温时间、冷却速度和炉内保护气氛等)并保证钢材中碳化物溶解,可以提高模具钢的基体强度和组织稳定性,有利于保证模具的硬度、耐磨性和热疲劳强度等。

2) 对较大断面的模具毛坯应加大切削量,以保证坯料表面的脱碳层能够全部被切削掉。对于需淬火加热的模具应优先选用真空热处理或保护气氛热处理,以免发生表面氧化脱碳。为减少模具热处理变形及防止出现裂纹,宜采用分级淬火或等温淬火等工艺。

3) 优先采用先进的热处理工艺,以提高模具的热处理工艺水平及热处理质量。模具材料在热处理时,应该采用合理的热处理工艺。例如:中碳模具钢(如 5CrMnMo 钢)采用高温淬火及高温回火工艺,可提高模具的断裂韧度和强度;高碳钢采用低温、短时加热淬火工艺,可提高模具韧性,并对提高模具精度和寿命有益。另外,利用获得一定数量残留奥氏体的淬火工艺,可提高模具的耐磨性和减少变形,适用于形状复杂、精度要求较高的模具;采用碳化物细化淬火工艺,可使模具的强度、韧性、耐磨性等综合性能提高,在轴承钢(GCr15 钢)上得到很好的应用;采用循环相变细化奥氏体晶粒的快速加热淬火工艺,可使奥氏体晶粒细化和超细化,提高模具钢的抗弯强度,如 Cr12 钢模具采用该工艺处理后,其奥氏体晶粒度较常规高温淬火细 2 级。

4) 对模具进行表面强化处理,是提高使用寿命的重要途径。模具工作型面直接承受机械载荷,是磨损、咬合断裂失效的发源地。为了提高模具的耐磨性、耐蚀性及耐热疲劳性等性能,可采用众多的表面处理技术,如堆焊技术、电镀及电刷镀技术、化学镀技术、非金属镀技术、热喷涂技术、等离子喷涂技术、物理及化学气相沉积技术、化学热处理技术、激光相变硬化技术、电子束相变硬化技术和离子注入技术等。

此外,采用表面强化处理工艺及基体强韧化工艺相结合也是延长模具寿命的有效途径之一。

6. 保证模具的机械加工质量

模具在制造过程中,要经过车、铣、刨、钻、磨、冷压、刻印等多种形式的机械加工工序。模具表面的机械加工质量,对模具的耐磨性、抗咬合能力和断裂抗力等都有着显著的影响,对此应予以足够重视。

(1) 合理选择模具材料纤维组织方向 除了采用合理锻造工艺,改善金属材料的纤维组织取向,在模具制造时,还应合理选择材料的纤维组织方向,以减少模

具变形及开裂倾向,提高模具强度。

(2) 保证模具表面加工精度 模具工作部位的几何形状(如过渡处圆角半径、拔模斜度、刀口角度的加工)应按设计要求进行,在不能实现机械加工时,应由人工修磨并严格测量,以保证模具合理的受力状态。有配合尺寸的部位,应保证公差或进行配磨。

(3) 降低模具表面粗糙度值 由于模具经热处理后处于高硬度、低塑性的状态,故对表面缺陷十分敏感。表面残存的加工刀痕、尺寸变化处的圆角半径、刻印的标记、锻压引起的夹层、裂纹、撞击伤痕等,如果位于应力很大的部位,就会很快成为断裂失效源,促成模具的早期脆断,降低其工作寿命。因此,应降低模具表面粗糙度值,减少表面宏观缺陷。

模具型腔表面粗糙度值的降低,一方面可以减少坯料流动的阻力,降低模膛的磨损率。另一方面,还可以减少产生表面缺陷和裂纹的倾向。例如,用6Cr3VSi钢制冷挤压模,表面粗糙度 Ra 为 $1.6 \sim 1.8\mu\text{m}$ 时,其寿命为3万件左右,在经过表面精抛光后,表面粗糙度 Ra 达 $0.1 \sim 0.2\mu\text{m}$ 时,其寿命可提高到4.5~5万件。

(4) 保证磨削加工质量 模具在磨削过程中,由于模具钢存在组织缺陷及磨削工艺不当,易造成模具表面烧伤及磨削裂纹。模具表面的磨削烧伤和磨削裂纹是模具制造过程中最常见、影响最大的冷加工缺陷。因此,磨削加工时应严格执行磨削工艺,合理控制磨削速度及进给量,选用粒度合适的砂轮,并用冷却液进行冷却。另外,模具磨削加工后应再经 $250 \sim 350^\circ\text{C}$ 回火,以消除磨削应力。

(5) 保证模具电加工(包括线切割及电火花成形)质量 目前,冷、热作模具都广泛使用电火花穿孔、线切割及电火花成形。模具经电火花加工后,其表面有一层具有较高硬度的白亮层,其厚度与电火花加工规范有关。白亮层较厚时,其内部可观察到显微裂纹。因此,模具在进行电加工后应用机械加工的方法去除白亮层,尤其是要去除其中的微裂纹,并进行一次低温回火,以降低电加工层的脆性。

(6) 除尽表面脱碳层 模具钢材或锻坯表面通常存在厚度为 $0.5 \sim 3.0\text{mm}$ 的脱碳层。脱碳层的存在会使模具表面在淬火后出现软点或软区,甚至会使整个表面硬度普遍偏低,并且降低模具的耐磨性、抗咬合能力、抗热疲劳能力和疲劳强度。此外,表面脱碳层还会明显加剧合金工具钢和高速工具钢的淬裂和磨裂倾向(对此较敏感的常用钢种有Cr2、CrWMn、W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2钢等)。因此,机械加工时应除尽表面脱碳层。

7. 改进加工设备和工艺,提高模具的制造精度

采用先进的模具加工设备和工艺,确保模具具有高的精度和互换性,以保证模具在合理的受力状态下工作,如机械加工优先采用数控加工设备及其工艺,热处理优先采用真空热处理设备及其工艺等。

8. 改善模具的工作条件,合理装配、使用及维护模具

在使用模具进行生产时,除设备调整不当会造成模具意外损伤外,工作条件、

设备的精度及刚性、模具的润滑及预热条件等均能够影响模具的承载能力及寿命。对此,应采取以下措施:①仔细调整模具间隙,增加配合承载面及合模接触面,保证凸模和凹模受力中心一致,提高模具的装配精度;②改善压力机等机械设备的特性(如设备的精度、刚度等);③改善被加工材料的性质(如被加工坯料的表面状态差、强度及硬度过高都会加剧模具磨损,而硬度过低又会产生粘模现象);④加强操作人员的责任心,严格执行操作规程,正确选用润滑剂,热作模具在使用前预热,使用中适当冷却,间歇工作时保温,长时间工作期间进行去应力回火等;⑤模具入库前进行防锈处理并及时维护等。

6.2 高强韧模具材料的应用及效果

正确、合理地选择及应用模具材料,对提高模具的性能和使用寿命十分重要。根据模具技术要求、使用条件及失效形式等,如果采用优质的高强韧模具材料,并配合强韧化处理及表面强化工艺,则可以进一步提高模具使用寿命。

6.2.1 高强韧模具材料的应用

1. 高强韧性冷作模具钢

高强韧性冷作模具钢包括低碳高速工具钢、基体钢和低合金高强度钢,其应用范围已经扩展到冷、热模具领域,是一类具有广阔应用前景的材料。

(1) 低碳高速工具钢 低碳高速工具钢主要有 6W6Mo5Cr4V (6W6) 等。该类钢的淬透性好,具有类似于普通高速工具钢的高硬度、高耐磨性、高强度和良好的热硬性,而韧性又高于普通高速工具钢,因此常用于制造钟表模具、冷挤压凹模和上下冲头、拉深模等。

低碳高速工具钢淬火及回火工艺规范为:600℃和850℃两次盐浴预热,1180~1200℃加热,600℃中性盐分级淬火后空冷,淬火后硬度为62~63.5HRC。回火温度根据模具硬度要求而定,如大部分钟表模具要求硬度为60~62HRC,故回火温度为560~570℃,回火3次,每次1h。

(2) 基体钢 基体钢主要有 6Cr4W3Mo2VNb (65Nb)、7Cr7Mo2V2Si (LD)、7Cr7Mo3V2Si (LD2)、6Cr4Mo3Ni2WV (CG-2)、5Cr4Mo3SiMnVAI (012Al)、6W8Cr4VTi (LM1)、6Cr5Mo3W2VSiTi (LM2)、5Cr4Mo2W2SiV、5Cr4W5Mo2V (RM2) 等。基体钢是指其成分与高速工具钢基体组织成分大致相同,而性能有所改善的一类特殊用途工具钢,该类钢共晶碳化物数量少且分布均匀,工艺性能好且强韧性较高。基体钢可广泛应用于制造高负荷、高速冲击的冷、热变形模具等。

1) 65Nb 钢。65Nb 钢具有高速工具钢的高硬度和高强度,且具有比高速工具钢更高的韧性和疲劳强度,故可以制造各类冷作模具,更适于制造复杂、大型或加工难变形金属的冷挤压模,以及受冲击载荷较大的冷镦模等。用 65Nb 钢制造的冷

镦模，经氮碳共渗后，用于冷镦 M10 × 30mm 螺栓时，平均寿命可达 16 万件，比原 T10A 钢模具寿命提高了 4 ~ 5 倍。65Nb 钢制连杆冷挤压模真空渗碳处理后使用寿命可达 3 万件，而原用 Cr12MoV 钢制模具的寿命一般只有 0.4 万件。

2) LD 钢。LD 钢是一种具有高强韧性和高耐磨性冷作模具钢。与 Cr12 型冷作模具钢及 M2 高速工具钢相比，LD 钢具有更高的强度和韧性，而且有更好的耐磨性，适宜制造承受高负荷的冷挤、冷镦及冷冲等模具。用 LD 钢制造的连杆盖落料模（刀口模），经盐浴淬火及回火后，平均寿命达到了 3 万件，而原用 Cr12MoV 钢制造的模具平均寿命只有 0.2 ~ 0.25 万件。LD 钢制花键套筒冷挤压模，经盐浴淬火、回火后，使用寿命超过了 1 万件，较 M2 钢制模具的平均寿命高 10 倍以上。

3) CG-2 钢。CG-2 钢是一种冷、热模具兼用的基体钢，具有强度高、热硬度好及冲击韧性高的优点。与 H21 钢相比，其强度较高；与 M2 钢相比，其韧性更好。CG-2 钢可用于制造冷挤压模、冲模及冷镦模等。用 CG-2 钢制造的轴承压力机模具，经盐浴淬火、回火后，一次寿命为 1.7 ~ 2.5 万件，是原 H21 钢制模具的 6 ~ 8 倍。CG-2 钢制热冲头经盐浴淬火、回火后，其寿命可达到 2 300 ~ 3 700 件，而原用 H21 钢制造的模具寿命只有 700 件。

4) LM1 钢。LM1 钢是一种冷、热模具兼用的基体钢，热膨胀系数小、导热性好、热强度高，其与 W18 高速工具钢相比，耐磨性高 1 ~ 3 倍，耐回火性、热硬性相似，硬度和抗压强度相近，而抗拉强度、断裂韧度高 1/3，抗弯强度高 1 倍，冲击韧度高 2 ~ 4 倍。LM1 钢可用于制作大型的复杂模具、冷挤压模、厚板冲模、冷镦模等。用 LM1 钢制造的冷挤压冲头，经盐浴淬火、回火后，使用寿命比 W18 钢高 2 ~ 8 倍，比 CrWMn 钢高 10 倍。

5) LM2 钢。LM2 钢是一种冷、热模具兼用的基体钢。与 Cr12MoV 钢相比，LM2 钢硬度高，抗压强度约高 1/3，抗弯强度高 1 倍，冲击韧度高 2 倍；与 H21 钢相比，LM2 钢的高温强度高 1/3。LM2 钢可用于制作冷挤压模、厚板冲模和冷镦模等。用 LM2 钢制作的定向套筒冷挤压凸模，经盐浴淬火、回火后，平均寿命超过 5 000 件，而原用 Cr12MoV、M2、W18 等钢制造的模具的平均寿命只有 300 ~ 500 件。

6) RM2 钢。RM2 钢是一种新型的冷、热模具兼用的基体钢，具有较高的热强性、耐磨性和热稳定性，可进行普通热处理和化学热处理。RM2 钢可用于制作冷镦模、冷挤模，也可用于制作热作模具等。用 RM2 钢制造的轴承套圈热锻冲头，经盐浴淬火、回火后，使用寿命可达到 8 000 件以上，而原用 H21 钢制造的冲头的使用寿命仅 3 000 件左右。

7) O12Al 钢。O12Al 钢是一种冷、热模具兼用的基体钢，属于中碳高合金工具钢，具有良好的综合性能和高的强韧性，通用性强。O12Al 钢作为冷作模具钢，具有比 Cr12 钢更高的韧性，可制造要求具有一定强韧性的冷镦模、冲模和冷挤模等；O12Al 钢作为热作模具钢，具有比 H21 钢更高的高温强度和优良的热疲劳性能。

012Al 钢可用于制造切边模、热挤压冲头和热镦模等。用 012Al 钢制造的螺栓冲模,经等温淬火、回火后,其使用寿命可超过 5 000 件,而采用常规淬火、回火处理后的模具使用寿命只有 2 000 ~ 4 000 件。012Al 钢制切边模深冷处理后,其使用寿命可由常规处理的 0.8 万件提高到 3 万件。

(3) 低合金高强度钢 低合金高强度钢主要有 6CrNiMnSiMoV (GD)、6CrMnNiMoVWSi (DS)、6CrMnSi2Mo1V 钢等。

1) GD 钢。GD 钢可以代替 CrWMn、9Mn2V、GCr15、9SiCr、60Si2Mn 和 Cr12 型钢等制造各类冲模、冷挤模、冷镦模等冷作模具及精密塑料模具,还可以用于制作中厚板剪刀、温(或热)挤压模,以及大型冷作模具等,模具的使用寿命可提高几倍至十几倍。用 GD 钢制造的中厚板冲裁模刃磨,使用寿命可达 1 万件,较原 Cr12MoV 钢模具提高了 4 ~ 5 倍。GD 钢制门窗冲模,等温淬火后平均使用寿命可达 2 ~ 3 万次,而原用 Cr12 钢制造的模具的使用寿命只有 0.7 万次。

2) DS 钢。DS 钢是一种新型的耐冲击冷作模具钢。这类钢的特点是工艺性能好、淬透性高、变形小、强韧性好,并且有较高的耐磨性。DS 钢通常用于制造承受冲击载荷且要求耐磨性高的模具。用 DS 钢制造的汽车起动机单向器冷挤压凸模,使用寿命为 Cr12MoV 钢制模具的 40 多倍。DS 钢制剪切刃剪切 $\phi 40\text{mm}$ 的 50Mn2 钢棒料比 Cr12MoV 钢制剪切刃的寿命高 1 倍以上,剪切 25mm 厚普通钢板、16mm 厚不锈钢板比 9SiCr 钢制剪切刃的寿命高 3 ~ 6 倍。

(4) 马氏体时效钢 马氏体时效钢主要有 18Ni (250)、18Ni (300)、18Ni (350) 等。该类钢具有高强度和高韧性,时效热处理变形小,焊接性良好,表面可以进行渗氮处理。马氏体时效钢主要用来制造高精度、超镜面、型腔复杂、大截面及大批量生产的模具。该类钢的热处理为固溶 + 时效处理,通过该工艺处理后,模具可获得要求的力学性能,从而满足其工作条件的需要。该类钢也可以用于制造塑料模具。

该类钢的固溶工艺规范为: 815 ~ 830℃ 加热,油淬或空冷后硬度 28HRC; 时效温度为 480 ~ 510℃,时效后硬度为 52 ~ 60HRC。该类钢可进行气体渗氮处理,渗氮温度为 445 ~ 465℃,保温时间为 24 ~ 28h,渗氮层深为 0.25 ~ 0.40mm。

2. 高强韧性热作模具钢

这类钢含有较多的 Cr、Mo、V 等碳化物形成元素,在截面较小时与 5CrNiMo 钢具有相似的韧性,在工作温度 500 ~ 600℃ 时具有更高的硬度、热强性和耐磨性,因此广泛应用在许多热作模具上。高强韧性热作模具钢主要有 4Cr5MoSiV1 (H13)、4Cr5MoSiV (H11)、4Cr5W2VSi (W2)、3Cr3Mo3W2V (HM1)、4Cr3Mo3SiV (H10)、3Cr3Mo3VNb (HM3)、2Cr3Mo2NiVSi (PH)、5Cr2NiMoVSi、4Cr2NiMoVSi、3Cr2MoWVNb、4Cr3Mo2WVMn (TM)、4Cr5Mo2MnVSi (Y10)、4Cr3Mo2MnVNb (Y4)、4Cr3Mo2NiVNb (HD) 钢等。

(1) H13、H11 及 4Cr5W2VSi 钢 该类钢的淬透性好,直径 100mm 的棒材在

空冷淬火时也可以完全淬透，故又称其为空冷硬化热作模具钢。此类钢广泛应用于铝型材挤压模和汽车、拖拉机、五金工具等行业的机锻模、辊锻模，以及轴承行业的挤压模、碾压辊和压铸模等方面。

这类钢淬火及回火工艺规范为：H11 钢淬火加热温度为 $1\ 000 \sim 1\ 020^{\circ}\text{C}$ ，油淬后硬度为 $50 \sim 52\text{HRC}$ ，在 $540 \sim 560^{\circ}\text{C}$ 与 $580 \sim 590^{\circ}\text{C}$ 回火后硬度分别为 $48 \sim 50\text{HRC}$ 和 $44 \sim 46\text{HRC}$ ；H13 钢淬火加热温度为 $1\ 020 \sim 1\ 040^{\circ}\text{C}$ ，油淬后硬度为 $53 \sim 55\text{HRC}$ ，在 $560 \sim 580^{\circ}\text{C}$ 与 $610 \sim 620^{\circ}\text{C}$ 回火后硬度分别为 $48 \sim 50\text{HRC}$ 和 $44 \sim 46\text{HRC}$ 。W2 钢淬火加热温度为 $1\ 030 \sim 1\ 050^{\circ}\text{C}$ ，油淬后硬度为 $53 \sim 56\text{HRC}$ ，在 $560 \sim 580^{\circ}\text{C}$ 与 $600 \sim 620^{\circ}\text{C}$ 回火后硬度分别为 $48 \sim 50\text{HRC}$ 和 $44 \sim 46\text{HRC}$ 。

铝型材挤压模采用 H13 钢制造后，比原用 3Cr2W8V 钢制模具寿命可提高 $3 \sim 5$ 倍；机锻模用 H11 或 H13 钢代替 5CrNiMo 及 3Cr2W8V 钢，模具寿命可提高 $2 \sim 3$ 倍；在轴承行业采用 H11、H13 钢代替 3Cr2W8V 制造碾压辊，寿命可提高 $2 \sim 3$ 倍。

(2) Y10 及 Y4 钢 Y10 及 Y4 钢是分别为压铸铝合金及铜合金而研制的热作模具钢，在热挤压模和热锻模等模具上也得到了较为广泛的应用。

其淬火与回火工艺为：淬火加热温度 $1\ 020 \sim 1\ 120^{\circ}\text{C}$ ，回火温度 $600 \sim 630^{\circ}\text{C}$ 。

同 3Cr2W8V 钢相比，该两种钢用于压铸模上，使用寿命可普遍提高 $1 \sim 10$ 倍。它们在热挤压模和热锻模的应用上也取得了明显效果。

(3) PH 钢 PH 钢属于析出硬化型热作模具钢，其特点是制造的模具在淬火和低温回火后进行机械加工，此时模具硬度约为 40HRC ，加工后可直接使用。在使用过程中，模具表面层受热，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，因此模具在具有表层所需的高温强度的同时还具有心部高韧性。另外，由于模具是在机械加工前进行热处理，也避免了热处理变形和表面氧化脱碳缺陷的产生。

PH 钢的淬火及回火工艺规范为：淬火加热温度 $990 \sim 1\ 020^{\circ}\text{C}$ ，截面 $\leq 100\text{mm}$ 时可采用空冷，截面大于 100mm 时可油冷。回火温度为 $370 \sim 400^{\circ}\text{C}$ 。

PH 钢适用于在 $500 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 范围内使用的热锻模及制造常啮合齿轮模具和连杆模具等，使用寿命较 H11 钢高 1 倍。

(4) HM1 及 HM3 钢 HM1 钢是一种综合力学性能优良的高强韧性热作模具钢，适用于制造锻造、压力机锻造、热挤压等热作模具。HM3 钢具有更高的耐回火性和热强性，存在明显的二次硬化效应，不足之处是有脱碳倾向。HM3 钢适用于制造耐热钢、不锈钢以及高温合金成形凹模，连杆辊锻、轴承套圈毛坯挤压凹模，高强韧性精锻模，小型机锻模，铝合金压铸模等，其使用寿命比 5CrNiMo、3Cr2W8V、4Cr5W2VSi 等钢制模具高 $2 \sim 10$ 倍。

HM1 及 HM3 钢淬火及回火工艺规范为：HM1 钢的淬火加热温度为 $1\ 060 \sim 1\ 130^{\circ}\text{C}$ ，油淬后硬度为 $52 \sim 56\text{HRC}$ ， 640°C 回火后硬度为 $52 \sim 54\text{HRC}$ （增加耐磨

性)。HM3 钢的淬火加热温度 1 060 ~ 1 090℃，油淬后硬度为 47 ~ 49HRC，600 ~ 630℃回火后硬度为 42 ~ 47HRC。

6.2.2 高强韧模具材料的应用效果

实例 高强韧模具材料的应用及使用寿命实例见表 6-1。

表 6-1 高强韧模具材料的应用及使用寿命实例

牌号	热处理工艺	模具名称	使用寿命/次
3Cr3Mo3W2V (HM1)	550℃ 第一次预热，800℃ 第二次预热，1 030 ~ 1 060℃ 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 万 ~ 3 万
	550℃ 第一次预热，800℃ 第二次预热，1 110 ~ 1 130℃ 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	约 1 000
3Cr3Mo3VNb (HM3)	550℃ 第一次预热，800℃ 第二次预热，1 040 ~ 1 060℃ 加热油淬，560 ~ 640℃ 回火，硬度为 38 ~ 42HRC	易脆裂的轴承套圈热挤压模	1 万 ~ 3 万
		连杆辊锻模	1 万 ~ 2 万
		压铸铝合金模具	15 万 ~ 20 万
5Cr4W5Mo2V (RM2)	550℃ 第一次预热，800℃ 第二次预热，1 120 ~ 1 140℃ 加热油淬，610 ~ 630℃ 回火 2 次，硬度为 50 ~ 52HRC	轴承套圈热锻冲模	1 万 ~ 2 万
5Cr4Mo3SiMnVAl (012Al)	550℃ 第一次预热，800℃ 第二次预热，1 090 ~ 1 110℃ 加热油淬，520 ~ 540℃ × 2h 回火 3 次，硬度为 60 ~ 62HRC	M12 六角螺母下冲模	11 万
6Cr4W3Mo2VNb (65Nb)	550℃ 第一次预热，800℃ 第二次预热，1 150 ~ 1 170℃ 加热油淬，540 ~ 570℃ 回火 3 次，硬度为 58 ~ 60HRC	M10 螺栓冷镦顶模	16 万 ~ 20 万
		平圆头十字槽冲模	9 万
		不锈钢异形件冷镦模	2 万 ~ 2.5 万
Cr4W2MoV	550℃ 第一次预热，800℃ 第二次预热，980 ~ 1 000℃ 加热油淬，400 ~ 420℃ 回火 2 次，硬度为 56 ~ 58HRC	钢板弹簧冲孔凸模	约 800
8Cr2MnWMoVS (8Cr2S)	预硬状态使用：860 ~ 880℃ 加热空冷，硬度为 60 ~ 64HRC，560 ~ 620℃ 回火，硬度为 36 ~ 44HRC，560℃ 离子渗氮 8h，硬度为 1 000 ~ 1 100HV0.1	胶木模、陶土模	比原模具使用寿命高 2 ~ 10 倍
	高硬度状态使用：550℃ 第一次预热，800℃ 第二次预热，860 ~ 900℃ 加热空冷，160 ~ 250℃ 回火，硬度为 58 ~ 60HRC	电阻连接复合模	60 万 ~ 150 万

(续)			
牌号	热处理工艺	模具名称	使用寿命/次
7Cr7Mo3V2Si (LD-2)	550℃ 第一次预热, 800℃ 第二次预热, 1 090 ~ 1 100℃ 加热油淬, 520 ~ 540℃ 回火 2 次, 硬度为 58 ~ 60HRC	M10 六角螺母下冲模	18 万
		M12 六角螺栓冷镦模	40 万
		3/4in ^① 轴承钢球冷镦模	3.5 万 ~ 4 万

注: 模具的热处理工艺及使用硬度要按模具的尺寸大小、形状复杂程度及工作条件制订。

① 1in = 0.0254m。

6.3 模具的强韧化热处理技术要求与方法

模具作为一类十分重要的成形工具, 不同的模具的工作条件有着较大差异。目前随着机械工业的快速发展, 对于模具在高速、重载、高温、耐磨、抗腐蚀等方面提出了更高的技术要求, 常规的热处理在追求硬度和强度的同时, 往往忽略了模具的韧性与塑性的良好配合, 对于要求强度与韧性兼备的模具, 传统的热处理工艺方法常常无法满足, 而只有采用提高模具性能的强韧化的热处理工艺, 才能使模具具有高的使用寿命。

6.3.1 模具的强韧化热处理技术要求

模具材料的性能是由材料成分及热处理后的组织所决定的。模具热处理主要包括锻后退火、粗加工后的预备热处理、精加工后的淬火及回火 (包括表面强化处理)、电火花或线切割加工后的去应力退火等。只有冷热加工的良好配合, 才能确保模具具备良好的使用寿命。合理的热处理技术及工艺, 将会使模具的成分和组织趋于均匀, 并获得均匀细小的晶粒, 从而保证模具具有良好的强韧性配合。模具的强韧化热处理技术要求如下:

(1) 成分的均匀化 生产中因热处理不当造成的模具表面脱碳、氧化、成分偏析等缺陷, 将直接影响到模具的整体性能, 而成分的均匀化则可使各向异性显著降低。真空热处理技术具有防止模具加热时氧化脱碳、真空脱气或除气、消除氢脆等作用, 因此对模具的热处理十分有利。

(2) 组织的均匀化 模具材料的内部组织越均匀, 则其各向异性越小, 出现组织内部应力集中的可能性也越小。对于大截面的模具, 组织的均匀性更为重要。通过合理的配制冶炼、热处理和锻造工艺, 可以达到组织的均匀化, 实现等向性能的一致性。

(3) 晶粒超细化 金属晶粒细化后可使金属材料的强度、韧性和塑性得到整体提高。通过热处理工艺控制来获得细小均匀的晶粒, 可使模具材料获得更高的综合力学性能。对于模具材料而言, 晶粒越细则晶界越多且晶粒畸变越大, 越有利于金属强度和硬度的提高, 且由于变形均匀分布在许多晶粒上, 故金属的塑性和韧性

也好。因此,晶粒超细化会明显提高模具的使用寿命。

6.3.2 模具钢的强韧化热处理方法

模具强韧化处理工艺主要包括预备热处理工艺(如正火、球化退火、调质)、锻造余热淬火、双细化处理工艺、高温淬火工艺、分级及等温淬火、低温淬火、复合处理工艺、真空热处理工艺等。

1. 模具的预备处理工艺

(1) 消除链状碳化物的正火处理 中碳中合金热作模具钢锻造后缓冷,或因模块截面较大(大于 $\phi 100\text{mm}$)冷却较慢时,在组织中容易出现链状碳化物。链状碳化物容易形成裂纹并导致模具(如精锻喷管模具、辊锻成形模具、C型轴承环成形模具等)早期脆断、热裂或龟裂。失效分析表明,链状碳化物是 M_6C 组织。在锻后冷却过程中,产生链状碳化物的程度随停锻温度、截面尺寸、冷却速度的不同而不同,但裂纹的形成与链状碳化物密切相关。

采用正火工艺可以使 M_6C 溶解,当冷却速度较大时,不会再形成链状碳化物,经退火后可获得颗粒状均匀分布的细小碳化物。模具经正火预备热处理后冲击韧度明显提高,使用寿命可提高将近1倍。

实例 热锻模,材料为3Cr3Mo3W2V(HM1)钢,要求进行消除链状碳化物的正火处理。

HM1钢含有 $M_{23}C_6$ 、MC、 M_6C 三类碳化物,其中 M_6C 是链状碳化物。HM1钢中链状碳化物的形成与临界冷却速度有关,因此模具在锻造后的冷却过程中产生链状碳化物的程度随冷速不同而不同。

国外对直径大于150mm的模具,均采用组织预备热处理工艺,以改善碳化物的形态和分布状态。

HM1钢采用正火工艺可使 M_6C 溶解,以空冷速度 $>15^\circ\text{C}/\text{min}$,即超过形成链状碳化物的临界冷速冷却时可消除链状碳化物,并在后续的球化退火后获得颗粒均匀细小、分布均匀的碳化物。

HM1推荐的正火温度为 $1\,130^\circ\text{C}$,经正火预备热处理后, α_K 值可从未经正火的 $26\text{J}/\text{cm}^2$ 提高到 $33\text{J}/\text{cm}^2$,而其断口则可由沿晶断裂变成由微孔聚合的晶间断裂,断面上有凹坑出现并伴有一定的塑性变形。

HM1钢制精锻喷管模具,不经正火处理时,使用寿命为1 500件,采用正火处理后,使用寿命可提高到2 000件。HM1钢制轴承热锻模经正火预备热处理后模具寿命可达2万件。由此可以看出,正火预备热处理在克服热裂和提高模具寿命方面有明显作用。

(2) 快速球化退火预备热处理工艺 热作模具钢存在组织不均匀和尺寸敏感性问题(这与模具的冷却条件和截面大小有关),采用一般的高温加热缓冷退火和等温球化退火工艺都难以消除,而且还存在生产周期长(约20h)、氧化脱碳严重

及损耗大（脱碳层深 0.8~2.0mm，全层损耗达 1.5%~5%）、模具强韧性低和使用寿命不高的问题。但如果采用快速球化退火工艺，则可有效地解决这些问题。此工艺是在远高于传统退火工艺的加热温度下进行短时加热，均温后迅速冷却，以获得均匀而细小的剩余碳化物，随后在高于等温球化退火工艺的温度下进行二次加热，随炉冷却。快速球化退火后的碳化物呈细小、均匀状态分布，故可提高钢的硬度及强韧性。经此法处理的 HM3 钢制铝合金压铸模的使用寿命达 23 万件以上。

实例 铝合金压铸模，材料为 3Cr3Mo3VNb（HM3）钢，要求进行快速球化退火预备热处理。

（1）快速球化退火工艺 HM3 钢经 1 030℃ 油淬预备热处理后，硬度为 47~49HRC，经 800~850℃ 的再加热和炉冷的快速退火处理后，硬度为 180~200HBW。快速球化退火后的碳化物细小、圆整，分布也非常均匀，并可提高淬火硬度及强韧性。与传统的高温加热缓冷退火和等温球化退火工艺相比，快速退火具有球化组织均匀、碳化物颗粒均匀细小、硬度低、易于切削加工，且可缩短退火周期 1/3 以上等优点，此外还可节电 20% 左右，并可减少氧化脱碳 50% 以上。

φ100mm 的 HM3 钢圆棒料，在快速球化退火后，心部硬度为 167~169HBW，表面硬度为 187HBW。

（2）快速球化退火工艺的生产应用 48 型吊扇上下盖的铝合金压铸模在采用图 6-1a 所示的快速球化退火的预备热处理工艺，并随后进行真空淬火和离子氮碳共渗处理后（见图 6-1b），心部硬度为 42HRC，表面硬度为 1 037HV，渗层深度为 0.21mm，模具的使用寿命可达 23 万件以上，且模具表面质量良好，脱模容易，未呈现热疲劳和冲蚀现象。

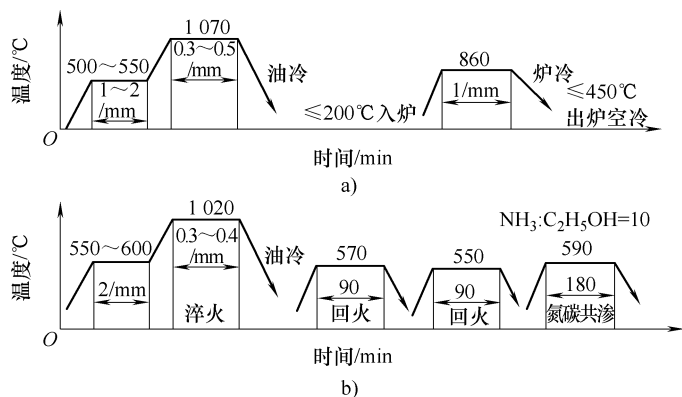


图 6-1 HM3 钢铝合金压铸模的热处理工艺

a) 快速球化退火工艺 b) 最终热处理

（3）调质处理 模具毛坯调质处理的目的是获得硬度为 180~320HBW、均匀分布、颗粒细小、形状圆整的碳化物，有效克服粗大的珠光体、二次碳化物网或轻

微带状碳化物的偏析及大截面模块心部的铸态组织,以及充分消除机械加工后的残余应力,从而减少淬火后的热处理变形。另外,调质处理作为预硬化处理,还可为后续的加工提供方便。

实例 滤清器壳体拉深模,材料为 Cr12 钢,要求调质处理。

(1) 改进材料与工艺 滤清器壳体拉深模原用 T8 钢制造,寿命较低。改用 Cr12 钢制造并采用调质处理后可获得高的寿命。其工艺流程为:下料→锻造→球化退火→粗加工→调质→精加工→淬火+低温回火→磨削。

(2) 球化退火 球化退火工艺为:加热 $860^{\circ}\text{C} \times 3 \sim 4\text{h}$,炉冷至 760°C 并保温 $3 \sim 4\text{h}$,随炉降温至 600°C 以下出炉空冷。

(3) 调质 调质工艺为:淬火加热 $1\,030^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$,高温回火 $760^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ 。

(4) 最终热处理 最终热处理工艺为:淬火加热 $970^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$,回火 $250^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$ 。Cr12 钢模具经低温淬火及低温回火后,可获得由回火马氏体+下贝氏体+弥散分布的碳化物及少量的残留奥氏体组成的混合组织。

2. 锻造余热淬火+双细化处理工艺

对于碳化物偏析比较严重的 Cr12 型钢材,为减少碳化物偏析及改善其分布,需对模具毛坯进行反复锻打;在锻造结束后且模具整体温度在该钢的淬火温度范围内时,立即进行淬火处理,这样既可以抑制奥氏体晶粒的长大聚集,同时也能有效抑制碳化物的重新积聚和角状化,从而获得满意的碳化物分布和形态;最后在 750°C 进行高温回火处理。实际上采用锻后余热淬火+高温回火+最终热处理的双重淬火工艺,可起到改善碳化物的分布、细化晶粒、提高基体韧性的作用,因而能够延长模具的使用寿命。

利用锻造余热进行模具毛坯的预备热处理是提高模具强韧性和使用寿命的有效途径之一,如对 Cr12MoV 钢采用在坯料 900°C 终锻温度下进行油冷或风扇吹风冷却,在温度达到 $200 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 时再重新加热到 750°C ,保温 $2 \sim 4\text{h}$ 后炉冷或空冷的调质处理来代替常规的球化退火工艺,不但能缩短周期和节约能源,同时还能达到细化晶粒和碳化物的双重目的。

3. 高温固溶+循环加热淬火双细化处理工艺

模具钢(如 GCr15 钢)经过高温固溶并进行等温淬火后再采用高温回火预备热处理,可使碳化物尺寸显著减少并改善钢的韧性和接触疲劳强度;再经过循环加热淬火(一般循环加热 $3 \sim 4$ 次),则可使奥氏体晶粒超细化,有效提高钢的强度、室温韧性并降低脆性转变温度,最终可使模具钢达到强韧化的目的。

实例 GCr15 钢制作的冷冲模,采用常规工艺(见图 6-2)处理后,碳化物平均直径为 $0.9\mu\text{m}$,奥氏体晶粒度为 8 级,在混合马氏体组织中以孪晶马氏体为主,低温回火后在马氏体中析出的 $\varepsilon\text{-Fe}_3\text{C}$ 相互垂直地分布在马氏体基体中,硬度为 $63 \sim 66\text{HRC}$,由于韧性不足,常发生早期脆断。

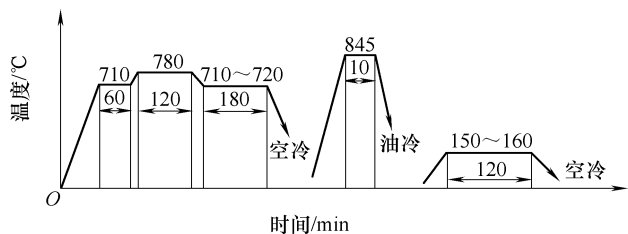


图 6-2 GCr15 钢常规热处理工艺

采用高温固溶 + 循环加热淬火双细化处理工艺（见图 6-3），即在贝氏体等温淬火后采用高温回火预备热处理，可使索氏体组织中碳化物的平均直径减小到 $0.32\mu\text{m}$ ，如 $820 \sim 860^\circ\text{C}$ 四次循环淬火处理后可使奥氏体晶粒度细化至 14 级。该工艺可细化 GCr15 钢晶粒，增加位错马氏体的数量，使塑性与韧性均有所提高，断口由常规处理的准解理脆性断裂变为准解理韧性断裂，并且增加了成片状分布在板状马氏体板条间及片状马氏体周围的残留奥氏体量，故可有效地提高 GCr15 钢的强韧性。经该工艺处理后，模具硬度为 62 ~ 63HRC，由于细化了晶粒和碳化物，增加了板条马氏体数量，提高了强韧性，防止了早期脆断，因此模具寿命由 0.2 万件提高到了 1.4 万件。

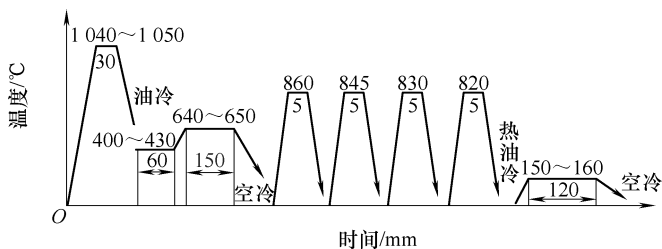


图 6-3 GCr15 钢的高温固溶 + 循环加热淬火双细化处理工艺

4. 固溶双细化处理工艺

利用固溶双细化处理工艺，可使碳化物细化、棱角圆整化及消除内部缺陷，并可使奥氏体晶粒得到超细化处理。其方法为高温固溶 + 循环细化（淬火 + 回火），其中前者可改善碳化物的形态和粒度，后者可使奥氏体晶粒超细化。例如 Cr12MoV 钢制钢丝钳热锻模，采用固溶双细化处理工艺，即 1120°C 加热油淬、 760°C 高温回火、 $1020 \sim 1040^\circ\text{C}$ 加热油淬、 400°C 回火 2 次后硬度为 57 ~ 59HRC，模具使用寿命为常规工艺的 4 倍。

5. 高温淬火及低温淬火处理工艺

热作模具在高温条件下工作，要求模具具有高强度、高韧性、高耐磨性、高热稳定性和高的冷热疲劳抗力等性能。因此，要求制订出最佳热处理工艺，以获得强韧性的最佳配合，即所谓综合力学性能。

(1) 高温淬火工艺 合金模具钢中含有较多的高熔点合金元素(如 W、Mo、Cr、V 等), 这些元素与 C 结合可生成高熔点的合金碳化物。由于只有当奥氏体化温度相当高时才能使合金碳化物固溶于钢的基体中, 提高基体的合金化程度, 从而提高钢的淬透性、淬硬性、高温强度及热稳定性, 最终提高模具寿命, 因此在应用高温淬火时, 应注意保证原始组织充分球化, 以降低过热敏感性。具体工艺如下: 预热温度为 680 ~ 700℃, 并充分保温; 淬火加热以盐浴为宜, 保温时间应适当缩短, 以表面到温为准, 以降低过热倾向; 回火温度宜取上限, 以减轻过热的影响。

对 3Cr2W8V 钢, 将常规淬火加热温度从 1 050℃ 提高到 1 150℃ 甚至 1 200℃, 可使模具寿命大大提高。例如, 3Cr2W8V 钢制热挤压轴承环凹模采用高温淬火工艺, 即 1 150℃ 高温加热淬火、670 ~ 680℃ 高温回火后, 使用硬度为 38 ~ 39HRC, 与常规工艺相比使用寿命提高了 3 倍。

(2) 低温淬火工艺 该工艺是指以低于某钢种的传统淬火加热温度进行淬火操作, 即以在淬火后能够保证下限工作硬度的淬火温度作为加热温度。低温淬火可以阻止晶粒长大, 控制基体碳含量, 使淬火后获得板条状马氏体并能够减小模具变形, 对使用中容易发生崩刃、掉块、开裂的冷作模具材料, 如高速工具钢(W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2)、Cr12、Cr12MoV、CrWMn 等钢均适用。在应用低温淬火工艺时, 应注意适当增大加热系数或提高预热温度及保温时间, 以保证硬度及淬硬层深度。

例如, W6Mo5Cr4V2 钢制冷镦模, 采用 1 160℃ 的低温淬火、300℃ 低温回火, 能够很好解决模具折断问题。与常规淬火工艺相比, 其强度、塑性、韧性和寿命都有显著提高, 而且可以很好地解决模具折断的问题。因此, 低温淬火工艺对要求高强度、高韧性、高塑性的冲压模和冷挤压模是适宜的。但采用低温淬火工艺时, 由于抗压屈服强度低, 耐磨性不足, 因此该工艺不适用于对单位挤压应力 > 2 500MPa 的以镦粗为主要失效形式的高负荷冲头, 而且由于耐磨性不足, 会造成黏模情况, 还可能导致脱模时将冲头打断。

6. 分级淬火和等温淬火工艺

分级淬火和等温淬火可以提高模具钢的强韧性。

(1) 分级淬火 小型高合金钢、高速工具钢等制造的模具经分级淬火后, 不仅硬度较高, 而且可以防止模具开裂并减少变形。其工艺为: 580 ~ 620℃ (高速工具钢) 或 260 ~ 280℃ (高合金钢) 硝盐浴中保持 3 ~ 10min, 随后在低于 M_s 点 10 ~ 20℃ 的硝盐浴中保持 5 ~ 10min, 空冷或立即进行回火处理。

(2) 等温淬火 其是将奥氏体化的模具浸入熔融的硝盐浴槽中, 停留一定时间, 然后取出空冷到室温。盐浴槽温度要高于 M_s 点, 而且停留时间要能够使过冷奥氏体转变为下贝氏体。每种模具材料等温停留时间应参照奥氏体连续冷却转变图来选定。模具等温淬火后具有高的硬度及强韧性配合, 变形小不易开裂, 且使用寿命显著提高。

实例 1 Cr12 钢制硅钢片落料模, 采用常规油淬易于崩刃且寿命很短。后改为分级淬火, 980℃加热, 200~240℃硝酸盐浴中分级保温 10min 后在油中冷却 20min, 然后在 180~200℃回火, 硬度为 61~64HRC, 刃磨寿命从直接油淬的 2 万次提高到 6~7 万次。

实例 2 Cr12MoV 钢制滚丝模，常规热处理后硬度为 54~56HRC，使用寿命很低。采用 1 000℃加热、280℃等温 4h、400℃回火 1~1.5h 的等温处理工艺后，组织为下贝氏体 + 极少量回火马氏体 + 残留奥氏体 + 碳化物，硬度虽仍为 54~56HRC，但强韧性高，变形小，模具内孔精度高，使用寿命达 5~8 万件，比原使用寿命提高了 4~5 倍。

7. 真空热处理工艺

高精密且要求尺寸和性能稳定的模具常常采用真空热处理工艺。采用真空热处理后的模具具有无氧化脱碳、表面光洁、硬度均匀及变形小的特点。在进行真空热处理时,模具加热主要依靠热辐射来实现,与其他加热方式相比,模具的升温速度较慢,因而升温过程中模具表面与中心的温差较小,各处膨胀比较均匀,故真空热处理后的变形较小。目前,模具制造行业已经越来越多地应用真空热处理设备及工艺来提高模具的强韧性及使用寿命。例如,厚度为0.5mm、硅的质量分数为3%的冷轧硅钢片用复式冲模,形状复杂易损伤,盐浴加热淬火后,平均刃磨寿命仅为2万次,失效形式以崩刃与早期磨损为主,后采用真空淬火工艺,即1010~1030℃加热油淬,160~180℃回火,硬度为61~63HRC,三套冲模刃磨的平均寿命为7万次左右,较盐浴淬火后的模具寿命提高了2.5倍左右。

常用模具钢真空热处理工艺参数见表 6-2。

表 6-2 常用模具钢真空热处理工艺参数

牌 号	预 热		淬 火			回火温度 /℃	硬 度 HRC
	温度/℃	真空度 /Pa	加热温度 /℃	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	油或氮气	480 ~ 500	39 ~ 44. 5
Cr5Mo1V	一次: 500 ~ 550 二次: 800 ~ 820	0. 1	970 ~ 1 000	1 ~ 10	油或氮气	160 ~ 200	60 ~ 62
3Cr2W8V	一次: 480 ~ 520 二次: 800 ~ 850	0. 1	1 050 ~ 1 100	1 ~ 10	油或氮气	560 ~ 580 600 ~ 640	42 ~ 47 39 ~ 44. 5
4Cr5W2VSi	一次: 480 ~ 520 二次: 800 ~ 850	0. 1	1 050 ~ 1 100	1 ~ 10	油或氮气	600 ~ 650	38 ~ 44

(续)

牌号	预 热		淬 火			回火温度 /℃	硬度 HRC
	温度/℃	真空度 /Pa	加热温度 /℃	真空度 /Pa	冷却		
7CrSiMnMoV	500 ~ 600	0.1	880 ~ 900	0.1	油或氮气	450 200	52 ~ 54 60 ~ 62
4Cr5MoSiV1	一次: 500 ~ 550 二次: 800 ~ 820	0.1	1 020 ~ 1 050	1 ~ 10	油或氮气	560 ~ 600	45 ~ 50
Cr12	一次: 500 ~ 550 二次: 800 ~ 850	0.1	960 ~ 1 000	1 ~ 10	油或氮气	180 ~ 240	58 ~ 62
Cr12MoV	一次: 500 ~ 550 二次: 800 ~ 850	0.1	980 ~ 1 050 1 080 ~ 1 120	1 ~ 10	油或氮气	180 ~ 240 500 ~ 540	60 ~ 64 58 ~ 60
W6Mo5Cr4V2	一次: 500 ~ 600 二次: 800 ~ 850	0.1	1 100 ~ 1 150 1 150 ~ 1 220	10	油或氮气	200 ~ 300 540 ~ 600	58 ~ 62 62 ~ 65
W18Cr4V	一次: 500 ~ 600 二次: 800 ~ 850	0.1	1 000 ~ 1 100 1 240 ~ 1 300	10	油或氮气	180 ~ 220 540 ~ 600	58 ~ 62 62 ~ 66
7Cr7Mo2V2Si (LD)	一次: 550 二次: 850	0.1	1 080 ~ 1 150	10	油或氮气	530 ~ 630	62 ~ 65
5Cr4Mo3SiMnVA1 (012Al)	850	0.1	1 100 ~ 1 150	10	油或氮气	510 ~ 560	58 ~ 62
60Si2Mn	600	0.1	830 ~ 860	10	油或氮气	220 ~ 250	57 ~ 59

实例 M8 × 1.25mm 弧形母螺钉（模），材料为 LM2 钢，要求淬火及回火处理。

母螺钉是用于滚轧螺纹工具的模具。母螺钉工作时，螺纹根部要受到反复弯曲应力的作用，失效形式为脆断和崩牙。

（1）原工艺及模具寿命 弧形母螺钉（模）盐浴淬火工艺为：预热 850℃ × 0.3min/mm，加热 1 180℃ × 0.2min/mm，出炉空冷，回火 550℃ × 60min。经过盐浴淬火后可轧制 7 块 504 型弧形丝板。

（2）改进工艺及效果 采用真空热处理（见图 6-4）后，硬度为 61.5HRC，可轧制 35 块 504 型弧形丝板。

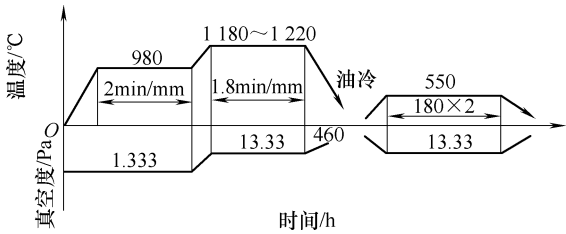


图 6-4 LM2 钢制弧形母螺钉（模）真空热处理工艺

6.4 模具的强韧化热处理工艺及实例

模具的强韧化热处理工艺及实例见表 6-3。

表 6-3 模具的强韧化热处理工艺及实例

模具名称	模具材料	强韧化工艺及方法	使用寿命/次
枪管座锻模	3Cr2W8V	高温淬火，高温回火： 1 130 ~ 1 150℃ 油淬，640 ~ 660℃ 回火。硬度为 38 ~ 42HRC	0.8 万 ~ 1 万
衡器刀承冷冲模	Cr12 钢	低温淬火，低温回火： 930 ~ 950℃ × 1min/mm（箱式炉，木炭保护）加热，油冷淬火，320 ~ 360℃ × 1.5h 回火。硬度为 52 ~ 56HRC	0.7 万 ~ 1 万
一字槽光冲模	60Si2MnA	贝氏体等温淬火： 850 ~ 870℃ 加热，230 ~ 240℃ × 25min 等温后空冷，280 ~ 300℃ 回火。硬度为 56 ~ 58HRC	2 万 ~ 3 万
六角螺母冷镦下冲模			10 万 ~ 15 万
分电器螺塞螺纹滚丝模	Cr12MoV	贝氏体等温淬火： 980 ~ 1 000℃ 加热，270 ~ 280℃ × 4h 等温后空冷，400 ~ 420℃ 回火。硬度为 54 ~ 56HRC	5 万 ~ 8 万
硅钢片冲孔模（φ10mm）		1 030 ~ 1 050℃ 加热后空冷，- 70℃ 冷处理 60min，然后在 180 ~ 200℃ 进行回火	刃磨寿命为 12 万（未冷处理的模具为 5 万次）
不锈钢餐具中温热辊轧模具	5Cr4W5Mo2V	中温回火： 1 130 ~ 1 140℃ 加热油淬，440 ~ 450℃ 回火。硬度为 54 ~ 58HRC	15 万 ~ 25 万
精密冲模	CrWMn	贝氏体等温淬火： 820 ~ 840℃ 加热，230 ~ 240℃ 等温后空冷，230 ~ 250℃ 回火。硬度为 54 ~ 56HRC	8 万 ~ 10 万
活塞销冷挤压冲头	W6Mo5Cr4V2	1 170 ~ 1 190℃ 加热油淬，560℃ 回火 3 次。硬度为 62 ~ 64HRC	1 万 ~ 1.5 万
螺钉冷镦模	W6Mo5Cr4V2	1 170 ~ 1 180℃ 加热油淬，200 ~ 220℃ 回火。硬度为 60 ~ 62HRC	10 万 ~ 15 万
M2.5 滚丝模	Cr12MoV	真空热处理： 850℃ × 60min 预热，真空度为 1.33Pa；升温至 1 010 ~ 1 100℃，保温 30 ~ 50min；冷却时充高纯度 N ₂ ，淬火压力为 6.65 × 10 ⁴ Pa；120 ~ 150℃ × 300 ~ 360min 回火。硬度为 59 ~ 62HRC	68.85 万件

(续)

模具名称	模具材料	强韧化工艺及方法	使用寿命/次
光栏片上冲模	CrWMn	复合处理工艺： 1) 调质：830℃ × 15min 加热，油淬，700 ~ 720℃ × 2h 回火，硬度为 22 ~ 26HRC 2) 去应力：淬火前进行 640℃ × 4h 去应力退火，低于 300℃ 出炉空冷 3) 淬火、回火：400℃ × 1h 预热，830℃ × 15min 加热，淬入 80 ~ 100℃ 热油中冷却 4 ~ 5min，170 ~ 180℃ × 3 ~ 4h 回火，硬度为 61 ~ 64HRC	1.2 万

6.5 模具的表面强化技术及应用实例

通过对模具的失效分析发现，80% 以上的失效形式是表面损伤。模具在承受外力时，通常表面受力形式最复杂，如零件结构及服役条件等因素引起的应力大多集中在表面，故模具表面的工作条件比心部更加严酷，模具表面容易早期损坏。因此，对模具表面进行强化处理如采用各种表面处理技术改变模具表层的成分、组织和性能，从而大幅度改善和提高模具的硬度、耐磨性、抗摩擦性、耐腐蚀性和高温抗氧化性，以及提高模具型腔表面抗擦伤能力、脱模能力、抗咬合性等，是提高模具使用性能和寿命的重要措施。

钢材表面强化处理的基本方法见表 6-4。

表 6-4 钢材表面强化处理的基本方法

不改变表面化学成分的方法	改变表面化学成分的方法	表面形成覆盖层的方法
1) 高频淬火 2) 火焰淬火 3) 电子束相变硬化 4) 激光相变硬化 (CO ₂ 激光束) 5) 加工硬化 (如喷丸硬化) 等	1) 渗碳 (气体渗碳、盐浴渗碳、固体渗碳、离子渗碳) 2) 渗氮 (气体、盐浴或离子渗氮) 3) 碳氮共渗 4) 渗硫 (低温盐浴渗硫) 5) 渗金属 (渗铬、渗硼) 6) 复合渗 (多元共渗) 7) 硼砂浴覆层 (TD) 法 (VC、TiC、Cr ₇ C ₃) 8) 离子注入 9) 蒸汽处理	1) 镀金属 (镀铬、镀锌、镀镍、镀硬铬)、镀合金 2) 堆焊 3) 电火花强化 4) 化学气相沉积 (CVD) 5) 物理气相沉积 (PVD) 等 6) 热喷涂 (火焰喷涂、等离子喷涂、电弧喷涂、激光喷涂) 等

模具表面强化处理的作用及应用见表 6-5。

表 6-5 模具表面强化处理的作用及应用

类别	处理工艺	作 用	应用举例
化学热处理	渗碳	提高表面硬度（达到 62 ~ 63HRC）、耐磨性及耐疲劳性	挤压模、穿孔工具等
	碳氮共渗	比渗碳及渗氮具有更高的硬度、耐磨性、耐疲劳性、热硬性和热强性，且生产周期短	成形模、冷挤模、热挤压模及模架等
	渗氮	提高硬度、耐磨性、抗粘着性、热硬性、耐疲劳性及耐蚀性，但生产周期长	挤压工具、冷挤模等
	离子渗氮	可消除表面白色的脆化层，耐磨性、耐疲劳性和变形均优于常规渗氮	挤压模、挤压工具等
	氮碳共渗	提高表面硬度（600HV 以上）、耐磨性、抗粘着性、耐蚀性和耐热疲劳性	冷挤模、拉深模、挤压模穿孔针等
	渗硼	具有极好的表面硬度、耐磨性、抗粘着性、抗氧化性、热硬性和良好的耐蚀性	拉深模、挤压模等
	TD 法	提高表面硬度、耐磨性、抗粘着性、耐热疲劳性、耐蚀性及抗氧化性等	挤压模等
表面涂覆处理	渗铬	提高表面硬度、耐磨性、抗粘着性、抗氧化性及耐蚀性	拉深模、挤压模等
	镀硬铬	降低表面粗糙度值，提高表面硬度、耐磨性及耐蚀性	挤压模、拉深模等
	钴基合金堆焊	提高表面硬度、耐磨性及热硬性	挤压模冲头、芯杆针尖等
	电火花表面强化	提高表面硬度、强度、耐磨性、耐疲劳性及耐蚀性	热挤压模、冷挤压模等
表面加工强化	喷丸硬化	提高表面硬度、强度、耐磨性、耐疲劳性及耐蚀性	热挤压模、冲头针尖等

6.5.1 模具的表面强化技术

1. 不改变表面化学成分的表面强化技术

不改变表面化学成分的表面强化技术主要包括高频淬火、火焰淬火、激光淬火、电子束淬火及加工硬化等技术。

（1）模具的感应淬火技术 目前模具感应淬火大多采用高频淬火工艺。其特点是加热速度快，淬火组织细小，硬度比普通淬火高 2 ~ 3HRC，提高耐磨性，表面氧化脱碳倾向极微。高频淬火对模具材料的原始组织有一定要求，即需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，并为高频淬火作好组织准备。高频淬火后的模具需进行低温回火，以减少淬火产生的内应力。

目前，高频淬火正在朝着超高频冲击淬火和大功率脉冲感应淬火的方向发展。与普通高频淬火相比，这两项技术淬火时间更短（仅 1 ~ 1 000ms），显微组织更加细小（细或极细马氏体），淬火变形更小（变形极小），淬火硬度更大（超常硬度），更适用于小型模具零件的感应淬火处理。

我国某合资汽车企业对汽车覆盖件模具采用 10 ~ 50kHz 的超音频加热电源进行感应淬火处理，该方法的优点是加热层深，一般与表面硬度相同的淬硬层深度为 2mm 左右，缺点是变形较大且易开裂。目前国内模具制造公司采用的大多是挪威 EFD 公司生产的感应淬火设备，该设备稳定可靠，功率多为 18 ~ 25kW，也有功率为 50kW 的。

（2）模具的火焰淬火技术 火焰淬火是将高温火焰（如氧乙炔焰、氧丙烷焰）喷向工件表面，将其迅速加热到淬火温度，然后立即加以冷却，使其表面具有高硬度、心部具有足够的强度和韧性的一种表面淬火方法。虽然火焰淬火工艺比高频淬火落后，但与感应淬火相比，火焰淬火的设备简单、操作方便、生产成本低，特别适用于大型模具和小批量、多品种模具的热处理，如汽车车身覆盖件大型拉深模、大型塑料模、大型冲模等模具的局部淬火（如模具的刃口等）和部分塑料成型模具的淬火。一些冷作模具钢（如 CrWMn、Cr12MoV 钢）通过适当的火焰淬火，可以避免淬火裂纹的产生。球墨铸铁、合金铸铁制模具也可以进行火焰淬火。

利用国内外已经研发出的火焰淬火专用钢，可以使火焰淬火操作时的技术难度大大降低，从而使火焰淬火法得到了推广应用。例如我国自行研制的 7CrSiMnMoV (CH) 火焰淬火冷作模具钢（可用于模具刃口部位），经氧乙炔焰加热到淬火温度后空冷即可达到淬硬的目的，而且还能使模具制造周期缩短近 10%，价格降低 10% ~ 20%，节省能源 80% 左右。国外的火焰淬火模具钢主要有日本爱知制钢公司的 SX4、SX5（Cr8MoV）、SX105V（7Cr5Mn3SiMoV）钢，日本大同特殊钢的 GO5 钢，日本日立金属公司的 HMD-1（Cr4MnSiMoV）、HMD-5 钢，以及瑞典的 ASSAB635 钢等。表 6-6 为部分日本与国产火焰淬火钢特性。

表 6-6 部分日本与国产火焰淬火钢特性

钢种	火焰淬火温度 (目测) /℃	热处理质量 及硬度	耐磨性	切削性	淬透性	淬火尺寸 变化
HMD1 (日)	850 ~ 980, (920)	58 ~ 62HRC, 均匀性好	好	好	好	小
HMD2 (日)	825 ~ 1 100, (950)				良	中
GO5 (日)	810 ~ 1 000, (920)				好	中
SX4 (日)	920 ~ 960, (920)				好	中
SX105V (日)	825 ~ 1 075, (950)				良	中
7CrSiMnMoV (中国)	880 ~ 920				好	小

火焰淬火时应加热模具刃口切料面, 模具一般经 $180 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 预热 $1 \sim 1.5\text{h}$, 再用喷枪加热至 $810 \sim 1\,000^{\circ}\text{C}$, 然后淬火。淬火后硬度一般在 60HRC 以上, 淬硬层厚度在 1.5mm 以上, 而变形量一般只有 $0.02\% \sim 0.05\%$ 。回火也可用火焰加热。

(3) 模具的喷丸表面强化技术 喷丸处理 (又叫喷丸强化) 是一种表面强化技术。喷丸处理就是将硬质丸粒高速、连续地喷射到金属表面, 使其形成一定厚度的冷作硬化层。喷丸处理可以明显改变金属表层的应力状态、显微硬度、表层的微观形貌和相成分, 从而提高模具的疲劳强度、抗冲击磨损性及抗应力腐蚀性能, 还可改善模具的表面质量, 并有效地去除电火花加工而产生的表面变质层。据统计, 喷丸处理能够提高模具使用寿命 $33.3\% \sim 50.53\%$ 。

喷丸处理工艺可应用于落料模、冷锻模和热锻模等以疲劳失效为主的模具上, 以延长模具的使用寿命。

锻模使用时要经受弯曲和热膨胀应力, 常因局部屈服而导致产生显微裂纹。喷丸处理产生的压应力能够推迟显微裂纹的形成, 从而推迟模具龟裂的发生。对模具进行喷丸处理, 可改善其磨削加工和电加工后的表面粗糙度值 $0.5 \sim 1$ 级, 并在一定程度上提高其疲劳强度。

另外, 喷丸处理可改善线切割落料模变质层的性能。例如, $\text{Cr}12$ 钢制洗衣机电机定、转子落料模, 在经淬火、回火处理和线切割加工后直接使用时发生折断失效, 平均使用寿命只有 3 万余次, 后改为在电火花加工后增加一道喷丸强化处理, 使用寿命提高到了 10 万次。

2. 模具表面形成覆盖层的强化方法

模具表面形成覆盖层的方法包括堆焊、镀金属、电火花强化、化学气相沉积 (CVD)、物理气相沉积 (PVD) 和热喷涂等。

(1) 模具的堆焊技术 堆焊是一种熔焊工艺, 它是用焊接来对金属进行表面改性的方法, 即在金属表面熔覆一层或几层具有特殊性能的材料, 使其具有耐磨、耐蚀、耐热等性能。这些材料可以是钢铁材料 (如碳钢、低合金钢、高合金钢)、有色金属合金 (如镍基合金、钴基合金、铜合金) 或碳化物, 也可以是氧化物陶瓷, 应根据具体要求而定。

堆焊既适用于模具制造, 也适用于模具修复, 许多模具的表面缺陷都可以通过堆焊来消除。堆焊技术在模具强化方面应用广泛, 如许多车身落料模具要求刃口具有很好的强韧性, 如果使用模具钢制造成整体模具, 则需消耗大量的昂贵的模具钢材, 而如果采用在价格较低廉的材料上堆焊刃口的方法, 则可以节约模具钢材并降低生产成本。

堆焊方法主要有火焰堆焊、电弧堆焊、埋弧堆焊、等离子弧堆焊及电渣堆焊等。

(2) 模具的镀金属技术 模具表面涂镀一层金属后不仅可以提高其耐蚀性, 同时还能够提高模具的硬度与耐磨性。常用镀金属的方法有电镀、化学镀、电刷镀

和热浸镀等。

1) 模具的镀硬铬方法。镀硬铬方法属于电镀方法中的一种,具有镀层摩擦系数小、硬度高(1 100HV左右)、应用简单并可以反复处理的优点。镀铬层的厚度较厚,一般为0.3~0.5mm。但如果镀层厚度选择不合理,就会造成模具的过早损坏。在模具承受强压或冲击时镀铬层容易剥落,效果不好,所以冷镦模和冲裁模不可使用镀硬铬方法。该方法只适用于加工应力较小的压弯和成型等模具,如塑料模、橡胶模和玻璃模等。

2) 模具的化学镀镍方法。化学镀镍与电镀镍的原理不同。化学镀镍可以均一地析出Ni,镀层均匀。如果使用还原剂,则析出的是Ni-P合金,硬度为500HV,在400℃焙烘时硬度可达1 000HV左右,所以用Cr12MoV钢制成的模具不会因焙烘而降低硬度。化学镀镍方法在铸造行业中多用于造型模具,也可以用于拉深类的冷作模具。

(3) 模具的电火花强化技术 该技术是利用工具电极与模具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入模具表层,形成合金化的表面强化层来改善模具表面的物理及化学性能。电火花表面强化层的性能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及硬质合金等,表面硬化层的硬度可达1 100~1 400HV,模具没有其他变形,其心部的组织和性能也不会发生变化,因此十分适用于模具表面强化处理。该工艺虽然简单,但大面积处理却很困难,而且处理后还要进行仔细的研磨加工。冷镦模的切边刀刃及磨损模具零件的局部修补采用电火花强化效果最好。

电火花合金层比未经电火花合金化处理的模具热疲劳性能高3倍,抗氧化性能高2倍,在各种试验介质中的耐蚀性高3~15倍。例如,用YG8作电极,对3Cr2W8V钢制模具刃口部分采用电火花表面强化后,模具的平均使用寿命由5万次提高到了20万次。

用电火花强化硬质合金冲模、拉深模、玻璃模和剪裁模等效果均良好,如冲压厚度为0.35mm硅钢片的冲模及厚度为4mm钢板的落料模,经电火花强化后使用寿命都提高了2~3倍。

3. 模具表面化学热处理强化技术

表面强化技术中最常用的表面化学热处理是提高模具表面的耐磨性、耐蚀性、抗咬合性及抗氧化性等最有效的途径之一。化学热处理的突出特点是渗层与基体之间具有很高的结合强度,模具表面可获得比普通淬火更高的硬度、更好的耐磨性和疲劳强度,而且心部仍有良好的塑性和较高的强韧性。

根据渗入元素的不同,模具的化学热处理可分为渗碳、碳氮共渗、渗氮、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(如渗铝、渗铬、渗钒、渗锌或多元金属共渗)等。

(1) 模具的渗碳技术 该技术是在富碳介质中使碳原子渗入低碳钢或低碳合

金钢模具的表面,使其在保持心部高韧性的条件下获得高硬度的表面层,从而提高工件耐磨性和疲劳强度的热处理工艺。常用的渗碳温度为 $900 \sim 930^{\circ}\text{C}$ 。常用的渗碳方法有:①在以木炭为主的渗碳剂中加热的固体渗碳方法;②在以 NaCl 为主要成分的熔盐中加热的液体渗碳方法;③在渗碳性介质气体中加热的气体渗碳方法;④在减压渗碳性介质气体中加热的真空渗碳方法;⑤在真空渗碳中进行辉光放电的离子渗碳方法等。与传统渗碳相比,离子渗碳具有渗碳效率高、碳浓度梯度平缓、工件变形小、环境污染小及狭缝、小孔都能处理的优点。

渗碳技术主要应用于同时承受严重磨损和较大冲击载荷的模具,在冷作模具、热作模具、塑料模具及模架零部件上都可起到提高模具使用寿命的作用。例如,汽车软管凸模,原用 Cr12MoV 钢制造,硬度为 $58 \sim 62\text{HRC}$,因模具承受很大的冲击载荷,寿命不足 2 000 件就产生断裂失效,后凸模材料改用 20Cr 钢,经渗碳处理后,渗层深 $1.0 \sim 1.2\text{mm}$,硬度为 $60 \sim 62\text{HRC}$,一次寿命提高到了 3 万件。

W6Mo5Cr4V2 和 65Nb 钢制模具进行渗碳以及 65Nb 钢制模具进行真空渗碳后,模具的使用寿命均有显著提高。

(2) 模具的碳氮共渗技术 该技术是使模具表面同时渗入碳及氮的热处理工艺。其目的是在保持心部高韧性的条件下获得高硬度的表面层。碳氮共渗层不仅比渗碳层具有较高的耐磨性,而且具有较高的耐蚀性、疲劳强度和抗压强度。此外,碳氮共渗还具有热处理变形小,生产周期短等特点。碳氮共渗工件的组织 and 性能主要取决于共渗温度,按照温度的不同,可分为高温 ($900 \sim 930^{\circ}\text{C}$)、中温 ($750 \sim 880^{\circ}\text{C}$) 及低温 ($500 \sim 700^{\circ}\text{C}$) 碳氮共渗三种。每一种温度的共渗均可以在气体、液体或固体介质中进行。其中,高温碳氮共渗多被渗碳所取代。

碳氮共渗适用于基体具有良好韧性且表面硬度高、抗粘着性好、耐磨性好的模具,如塑料模具及冲裁模中的凸模和凹模等。碳氮共渗可使模具使用寿命提高 $2 \sim 5$ 倍。

(3) 模具的渗氮(硬氮化)方法 该方法是在含有活性氮的介质中使模具表面渗入氮元素,以提高模具表面硬度、耐磨性、疲劳强度及抗咬合性等的化学热处理工艺。渗氮处理广泛应用于模具制造中,但由于渗氮层很薄,故只适合受轻负荷的模具。因为加热温度在钢的相变温度之下,即 $500 \sim 580^{\circ}\text{C}$,没有组织相变,因此渗氮后模具的变形量很小。渗氮方法有:①在含氮气氛中加热的气体渗氮;②在以 NaCl 为主要成分的盐浴中加热的盐浴渗氮;③真空炉中的离子渗氮;④电解催渗氮等。

为了使渗氮有较好的效果,模具应选择含有 Al 、 Cr 和 Mo 元素的钢种,以便渗氮后形成坚硬耐磨的氮化物,如 AlN 、 CrN 和 Mo_2N 。如果没有这些合金元素,则渗氮层硬度低,不足以提高模具的耐磨性。模具渗氮常用钢种有 Cr12 、 Cr12MoV 、 3Cr2W8V 、 38CrMoAl 、 4Cr5MoSiV 、 4Cr5W2VSi 、 5CrNiMo 及 5CrMnMo 钢等。

1) 模具的气体渗氮。在气体介质(如氨气)中进行的渗氮处理称为气体渗氮。按照工艺参数的不同,气体渗氮分为等温渗氮、二段渗氮及三段渗氮等。由于渗氮层比较脆,在使用中容易剥落和产生龟裂,因此渗氮不适用于受冲击和重负荷的模具。

2) 模具的盐浴渗氮。在盐浴中进行渗氮的热处理工艺称为盐浴渗氮。无毒盐浴的成分(质量分数)为:46% $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ + 40% Na_2CO_3 + 8% KCl + 6% NaCl 。

3) 模具的离子渗氮。在真空(133 ~ 1 330Pa)室内,离子渗氮在最初的20h内比普通渗氮快约3倍,因此离子渗氮速度较快(获得同样深度的渗层只需气体渗氮时间的1/2 ~ 1/4)。由于离子渗氮只加热表面层,故工件变形极小。另外,渗层韧性好,容易实现局部渗氮。离子渗氮是目前比较常用的一种渗氮工艺,现已广泛应用于热锻模、冷挤压模、压铸模和冲模等的表面处理,以提高其耐蚀性、耐磨性、抗热疲劳性、抗粘附性等性能及提高模具的使用寿命。不锈钢采用离子渗氮不需要预先进行去钝处理。

(4) 模具的氮碳共渗(软氮化)技术 氮碳共渗是在以渗氮为主的同时渗入碳原子的化学热处理工艺。该工艺是以渗氮为主的氮碳共渗过程。氮碳共渗不仅使模具具有较高耐磨性、耐腐蚀性、抗疲劳性能及抗擦伤性能,而且该工艺具有时间短、温度低、变形小、化合物层脆性小的特点,适用于要求硬化层薄、承受载荷不大及需要良好综合性能的模具,对变形要求严格的耐磨件(如模具、量具、刀具)的处理经生产验证效果也非常好,但不适用于在重载荷条件下工作的模具。模具经过氮碳共渗处理后,在其表面形成氮碳化合物,硬度为1 000HV左右,提高了模具表面的耐磨性、耐蚀性和热疲劳性能。氮碳共渗通常用于热态工作的压铸模、热挤压模、锤锻模以及塑料模等的表面处理,也常用于处理某些冷作模具(如冷锻模、冷挤压模、冲模和拉深模等)。

氮碳共渗可以使高速工具钢和基体钢的耐磨性提高2 ~ 5倍,大幅度提高模具使用寿命。例如,W18Cr4V钢制冷挤压模,经560℃ × 1.5h气体氮碳共渗处理后,模具平均使用寿命由2 ~ 3万件提高到了7.5万件。

按照共渗介质状态的差异,氮碳共渗通常分为固体氮碳共渗、气体氮碳共渗和液体氮碳共渗。其中,后两种较为常用。

气体氮碳共渗的工艺参数包括氮碳共渗的温度和时间以及渗入介质的活性及加入量,这些参数需根据模具的技术要求来选择。氮碳共渗的温度一般为530 ~ 580℃,时间为1 ~ 6h。对于高速工具钢和高铬模具钢,为保持模具零件整体的强度和热硬性,氮碳共渗温度不能超过其回火温度。

(5) 模具的渗硼方法 工件表面渗入硼(B)的化学热处理工艺称为渗硼。渗硼层具有极高的表面硬度(1 500 ~ 2 000HV)、耐磨性(远高于其他表面硬化层)、热硬性(900 ~ 950℃)以及在盐酸、硫酸及碱中的高的耐蚀性。渗硼温度在900 ~ 1 050℃之间,之后需要进行淬火,以提高模具心部强度,避免渗层在使用过程中

压碎剥落。渗硼是模具制造行业常用的一种高温化学热处理工艺，适用于钢、铸铁及硬质合金等材料，广泛应用于各种冷作模具（如拉丝模、冲裁模、拉伸模、冷墩模和冷挤模等），也适用于热锻模、压铸模、热挤压模、粉末冶金模具和塑料模具等。采用中碳钢渗硼取代价格昂贵的高合金钢制造模具也可以明显地提高经济效益。模具渗硼的缺点是渗层脆性高，淬火时易产生裂纹。因此，最好是渗硼温度与钢的淬火温度接近，渗硼与淬火相结合进行。渗硼钢的硬度、耐磨性、耐热性和耐蚀性均高于渗碳钢和渗氮钢，是一种提高模具寿命的有效方法。由于渗硼层脆性大、较薄，所以渗硼不适用于承载大的冲击、承受接触疲劳及形状复杂、尺寸精度要求高的工件。

渗硼工艺有固体渗硼、盐浴渗硼、膏剂渗硼、气体渗硼和电解渗硼等。

1) 固体渗硼的温度为 $800 \sim 950^{\circ}\text{C}$ ，保温时间 $2 \sim 6\text{h}$ ，优点是设备简单、操作方便、工件表面易清洗，因而应用较为广泛。

2) 盐浴渗硼温度一般为 $950 \sim 1\,000^{\circ}\text{C}$ ，时间一般不超过 6h ，否则渗层变脆。盐浴渗硼设备也比较简单，操作也很方便，但不易清洗，故不宜用于带有小孔、不通孔的模具。

3) 膏剂渗硼是在固体渗硼基础上发展起来的渗硼工艺，渗硼剂由固体渗硼剂粉末与粘结剂调制而成。渗硼时通常在模具表面涂覆厚 $1 \sim 2\text{mm}$ 的渗硼剂，然后装箱加热或在保护气氛中加热保温。膏剂渗硼易于实现局部渗硼，特别适用于模具渗硼。

4) 气体渗硼和电解渗硼等在工业上较少使用。

(6) 模具的渗硫方法 渗硫（硫化）是指在钢或铸铁制模具表面渗入硫的化学热处理工艺。渗硫的层深一般为数 μm 至数十 μm 。渗层的组织可能是 Fe_2S 、 FeS 或其混合物。渗硫层有良好的减摩性（使摩擦系数减小 $2 \sim 4$ 倍）及抗粘着磨损（咬死）性，但使渗硫工件表面的硬度降低。常用渗硫工艺有粉末渗硫、热浴渗硫、液体浸渍渗硫、盐浴电解渗硫及真空蒸发渗硫等。目前在生产中应用最多的是低温盐浴电解渗硫，模具淬火后经低温电解渗硫后仍能保持高硬度，模具变形较小。渗硫技术在压铸模和塑料模具中应用较广。

低温电解渗硫层摩擦系数很低，可显著提高模具的耐磨性和抗咬合性，特别适用于承受强烈摩擦的模具，如冷挤模等。

(7) 模具的硫氮共渗方法 硫氮共渗是提高模具钢、高速工具钢、结构钢零件表面耐磨性的一种低温化学热处理工艺。低温硫氮共渗在渗氮炉内进行，渗剂为氨气（体积分数为 $30\% \sim 50\%$ ）和硫化氢（体积分数为 0.02% ），共渗温度为 $540 \sim 560^{\circ}\text{C}$ ，共渗时间为 $1 \sim 3\text{h}$ 。此工艺可显著提高模具的使用寿命，如中温硫氮共渗可使模具表面具有良好的耐磨性和抗疲劳性，常用于压铸模等。 $3\text{Cr}2\text{W}8\text{V}$ 热锻模钢经硫氮碳三元共渗后比离子渗氮、离子氮碳共渗有更高的渗层硬度、耐磨性和抗咬合性。

(8) 模具的渗金属方法 渗金属是指将金属原子渗入钢的表面层，以提高模

具表面的耐磨性、耐蚀性和耐热性等性能。模具钢渗钒 (V)、渗铬 (Cr)、渗钛 (Ti)、渗铌 (Nb) 等均可获得碳化物型渗层, 这类渗层的硬度和耐磨性极高 (硬度可达 1 800 ~ 3 200HV)。渗金属工艺简便易行, 不需复杂设备。采用渗金属的化学热处理方法, 可使模具钢的表面获得某些特殊性能, 以满足模具的使用要求。渗金属常用的方法有: ①在粉末中加热的粉末法 (参见 JBT 8418—2008《粉末渗金属》); ②在熔融盐或熔融金属中浸渍的液体法; ③在气体中加热的气体法; ④涂抹涂敷剂加热的涂敷法等。其中以硼砂为基础的盐浴渗钒、渗铌、渗铬并形成碳化物的方法又称为反应浸镀法 (TD 法)。

TD 法是将含 C 的被处理件浸入高温盐浴 (如硼砂浴) 中, C 和加在盐浴中的金属元素 V、Nb、Cr、Ni 等形成碳化物层并覆盖在被处理件表面。被处理件可以从盐浴中取出直接淬火。TD 处理法可以显著地提高冲模和冷锻模等的综合性能。VC 表面覆层处理是 TD 处理法的核心。在硼砂盐浴中加入 FeV (钒铁), 与模具表面的 C 生成 VC, $1\,000^{\circ}\text{C} \times 10\text{h}$ 时可得到 $10\mu\text{m}$ 左右的覆盖层。通常模具在 (硼砂) 盐浴中处理后, 可根据要求进行油淬或在熔盐中淬火等。由于渗层与基体结合力强, 可以显著地提高模具的耐磨性、耐热性、耐蚀性、耐热疲劳性和抗粘着性等性能, 因而渗金属被广泛应用于各种模具, 特别是拉深模、切边模、剪切模、冲模、冷挤压模、锤锻模和压铸模等。常用的渗金属方法有固体法、热浸渍法及熔盐法, 渗剂包括供渗剂、催渗剂和填充剂。TD 法属于高温化学热处理技术。

1) 模具的渗铝法。渗铝可以提高模具的耐蚀性和耐热性。渗铝的方法有: ①在熔融状态的铝浴中浸渍的渗铝法; ②使用铝粉的铝化处理法。渗铝在 $800 \sim 1\,000^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行。

2) 模具的渗铬法。渗铬适用于锤锻模、压铸模、塑料模、拉深模等, 渗铬后模具使用寿命可提高几倍到数十倍。渗铬的方法如下: ①模具的固体渗铬适用于单件模具, $980 \sim 1\,100^{\circ}\text{C}$ 加热, 渗铬 4 ~ 8h 后将装有模具的渗箱取出空冷, 冷至室温后取出模具并进行清洗, 再根据模具需要进行二次加热淬火及回火, 以保证一定的心部强度; ②模具的气体渗铬适用于大规模模具生产, 一般采用半真空气体渗铬方法, $980 \sim 1\,100^{\circ}\text{C}$ 渗铬 4 ~ 8h, 取出装模具罐进行空冷, 在室温下取出模具并进行清洗, 再进行最终淬火及回火处理; ③模具的盐浴渗铬在坩埚内进行, 主要用盐是无水硼砂, 渗铬剂为铬粉 (加入量为质量分数 5% ~ 15%)、铬铁粉 (加入量为质量分数 15% 左右) 或 Cr_2O_3 (加入量为质量分数 10% 左右), 另加质量分数为 5% 的铝粉还原。在 $900 \sim 1\,050^{\circ}\text{C}$ 渗铬 4 ~ 6h, 可以获得厚度为 0.01 ~ 0.2mm 的渗铬层, 渗铬后可以直接淬火或冷却后重新加热淬火。

4. 模具的复合表面强化技术

复合表面强化技术具有单一工艺不能达到的复合性能和效果, 故一般常将常规热处理和表面强化工艺结合起来, 即复合表面强化处理, 从而达到更好的强化效果。目前, 国内外发展较快的复合表面强化处理工艺是: 表面化学热处理或表面覆

层处理 + 表面化学热处理（如低温碳氮共渗 + 低温电解渗硫、碳化钛沉积 + 低温电解渗硫、低温 + 中温碳氮共渗、中温 + 低温碳氮共渗）等。

例如，对 5CrNiMo 钢制模具进行铬钒共渗 + 渗氮复合处理，即 5CrNiMo 钢制模具在 1 050℃ 铬钒共渗 5h 后，连同装模具的密封容器一起在空气中冷却，然后重新加热到 850℃，油淬，再经 520℃ × 6h + 540℃ × 6h + 520℃ × 2h 的渗氮处理及 540℃ × 6h 的退火处理。结果发现，铬钒共渗加渗氮、退火处理后，模具的扩散层的表层显微硬度达到了 1 400 ~ 1 600HV，内层的显微硬度在 800 ~ 1 020HV 的范围内，比铬钒共渗后未加渗氮处理的 5CrNiMo 钢制模具相应部位的显微硬度提高了 200 ~ 500HV。

5CrNiMo 钢制冲头采用铬钒共渗加渗氮、退火复合强化处理后，心部硬度为 47HRC，表面硬度为 1 460HV，与不进行表面强化处理的 3Cr2W8V 钢制冲头相比，使用寿命提高了 1 ~ 2 倍。其中，3Cr2W8V 钢制冲头的使用寿命为 800 次，而经复合表面强化处理的 5CrNiMo 钢制冲头的使用寿命为 1 600 ~ 1 800 次。

又如，3Cr2W8V 钢制热锻模经气体碳氮共渗及补充一次气体氮碳共渗后，其表面抗塌陷性、耐蚀性及抗粘着性都有明显的改善，模具使用寿命比只经过单一工艺处理的模具可提高了 5 倍以上。如果将氮碳共渗和化学镀技术两者结合起来，从而形成一种新的模具表面低温复合强化工艺，则模具使用寿命可比只用单一的碳氮共渗处理的模具提高 2 ~ 4 倍。

实例 5CrMnMo 钢制热锻模碳氮共渗淬火及氮碳共渗复合处理工艺。

5CrMnMo 钢制热锻模经过碳氮共渗及 850 ~ 900℃ 高温淬火（淬火组织由片状马氏体 + 条状马氏体转变为单一片状马氏体），再经高温（500℃）回火，在保持钢的耐热性、耐磨性及一定硬度的前提下，热锻模的热疲劳寿命提高了 22%，断裂韧度 K_{IC} 提高了 20% ~ 30%，并且具有较高的硬度（>62HRC）与耐回火性。再对其进行 540℃ × 4h 气体氮碳共渗，则可使其具有良好的抗氧化性、抗咬合擦伤能力、耐磨性及减摩性，并可提高模具的承载能力、抗挤压能力及高温强度，降低型腔塌陷变形倾向，而且与常规工艺相比，模具的使用寿命可提高 5 ~ 6 倍。5CrMnMo 钢制热锻模复合热处理工艺如图 6-5 所示。

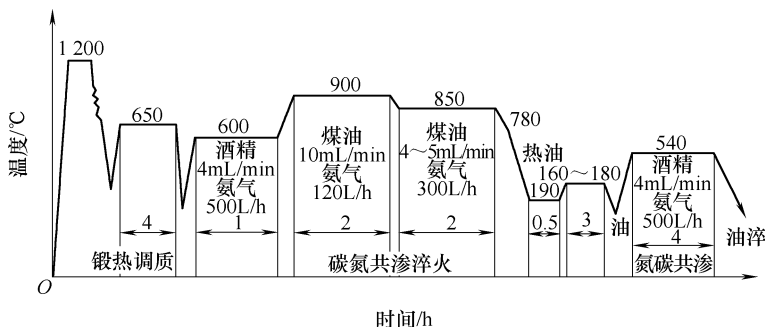


图 6-5 5CrMnMo 钢制热锻模复合热处理工艺

6.5.2 模具表面强化技术的选择原则

对模具采取的表面强化方法,应有助于提高其性能,并可进一步提高其使用寿命。

(1) 提高模具表面的耐磨性 模具钢的耐磨性与钢中碳化物的类型和数量有关,但即使是高碳高铬类模具钢,其耐磨性有时仍不能满足要求。如果采用合适的表面强化方法,则可以大幅度地提高模具表面的耐磨性。有资料表明,气体氮碳共渗可使高速工具钢表面的耐磨性提高2~5倍,如果对其表面进行渗硼、渗钒或碳化钛处理,则耐磨性更高。

(2) 使耐磨性与韧性良好配合 对有些模具材料来说,提高强韧性往往要以损失耐磨性为代价。解决这个矛盾的方法是选择合适的模具材料,先对其进行适当的热处理以使其获得最佳强韧性基体,然后再通过表面强化的方法来提高其表面耐磨性。例如,缝纫机梭子的冷挤压凸模,原采用高速工具钢W18Cr4V制造,模具在使用过程中经常碎裂,使用寿命极不稳定;改用基体钢6Cr4W3Mo2VNb钢后虽然韧性大大改善,但耐磨性不足,使用寿命仅1.6万件;后改为6Cr4W3Mo2VNb钢淬火后加气体氮碳共渗处理,其使用寿命达到了2.68万件,说明基体的强韧性与表面耐磨性达到了良好的配合。

(3) 提高抗咬合能力 拉深、挤压等类模具在工作过程中常发生“冷焊”现象,这是由于模具表面抗咬合能力所造成。解决这类问题的一个很有效的方法就是通过表面处理来降低模具表面的摩擦系数并提高模具表面的抗咬合能力。适当的表面处理方法可以使模具表面疏松、内部有微孔,不但有利于降低模具的表面摩擦系数,而且微孔中的油还可以改变润滑状况,提高其抗拉毛、烧伤和咬合能力。如表面渗硫就具有这类特性。

(4) 改变表面应力状态 模具钢经过淬火、回火后,表面处于拉应力状态,如果表面应力过大,将促使裂纹的形成。然而,利用表面处理方法则可以改变模具表面的这种应力状态,使表面承受的拉应力为转变压应力,从而延迟疲劳裂纹的产生和扩展,提高模具的冲击疲劳失效抗力,延长模具的使用寿命。这是仅靠更换模具材料和改变热处理工艺所不能做到的。例如,电子束相变强化表面和表面真空渗氮处理均可使模具表面形成600~800MPa的残余压应力。

(5) 提高抗氧化性和耐蚀性 一些热作模具和塑料模具在使用过程中存在氧化和腐蚀问题,而仅靠模具材料本身固有的性能往往难以克服这些缺陷,故常常需要利用表面强化处理的方法来弥补。例如,塑料模具钢表面镀铬就可使其具有较好的耐蚀性。

6.5.3 模具表面强化技术应用实例

实例1 500kN压力机切边凸模,材料为8Cr3钢,要求高频淬火处理。

切边凸模是生产钢柱式散热器的关键模具, 它可切 3mm 厚钢板, 1 次切边长度为 156mm。散热器用 $\phi 10\text{mm}$ 纯铜管制造, 截面压成长方形, 仿形弯制。淬火设备采用 200 ~ 300kW 高频设备, 低压预热 (6.5kV) 500 ~ 600℃ × 15min (暗红色), 高压加热 (13kV) 860 ~ 900℃ × 13min, 先断续后连续加热 (电参数: $I_{\text{阳}}$ 为 2A, $I_{\text{阴}}$ 为 0.4A, $V_{\text{槽}}$ 为 5kV), 到温后淬入 40 ~ 80℃ 的油中, 在硝酸盐中进行 200℃ × 2h 回火, 回火后空冷。刃口四周淬硬长度 > 10mm, 端面淬硬长度 > 5mm, 淬硬层深度为 3 ~ 4.5mm, 刃口硬度 > 55HRC。采用高频淬火处理的切边凸模切边达到 4 万次以上, 使用寿命远高于常规淬火。

实例 2 连杆辊锻成形模, 材料为 HM3 钢, 要求离子渗氮处理。

(1) 预备热处理 球化退火工艺为: 860 ~ 900℃, 保温 2h, 再快速冷至 720℃, 保温 4h, 然后炉冷至 550℃ 出炉空冷。退火后硬度为 180 ~ 200HBW。

(2) 淬火及回火处理 600℃ 和 850℃ 两次预热, 1 050 ~ 1 100℃ 加热油淬, 油冷至 200℃ 左右出油空冷。淬火后硬度为 47 ~ 49HRC, 残留奥氏体的体积分数约为 9%。回火时合金碳化物呈弥散析出且伴有残留奥氏体转变, 在 550℃ 左右出现二次硬化, 硬度可上升到 50HRC。但由于模具实际回火温度要高于 550℃, 采用 620 ~ 640℃ × 2h 回火处理 2 次, 故回火后硬度为 41 ~ 45HRC。

(3) 表面渗氮强化处理 连杆辊锻模常用离子渗氮法进行表面强化处理, 其工艺为 530 ~ 540℃ × 10h。渗层深度为 0.18mm, 表面硬度为 1 120HV。

(4) 生产应用效果 按上述工艺处理的连杆辊锻模使用寿命达 1 ~ 1.9 万件, 而 3Cr2W8V 钢制模具的使用寿命只有 0.3 ~ 0.6 万件。

实例 3 6in (1in = 0.0254m) 活扳手热压模, 材料为 H21 (3Cr2W8V) 钢, 要求喷丸强化处理。

(1) 加工工艺路线 下料 → 锻造 → 退火 → 机械加工 → 电火花加工 → 酸洗 → 手工抛光 → 凸模压平 → 热处理 → 喷丸强化 → 入库。

(2) 热处理工艺 锻后退火 830 ~ 850℃ × 4h, 炉冷至 400℃ 出炉, 退火硬度 255HBW; 850℃ × 0.6min/mm 预热, 1 150℃ × 0.3min/mm 加热, 560℃ × 0.25min/mm 淬火分级冷却, 硬度为 52 ~ 53HRC; 620 ~ 640℃ × 2.5h + 560℃ × 2.5h 回火 2 次, 硬度为 47 ~ 49HRC。

(3) 喷丸强化效果 喷丸后表面应力由拉应力 68.6MPa 转化为压应力 811.4MPa; 头部表面粗糙度 R_a 由 19.1 μm 降低到 14.7 μm , 飞边表面粗糙度 R_a 由 44.6 μm 降低到 15.5 μm ; 表面硬度由 470HV 提高到 485HV; 强化层深为 0.2 ~ 0.4mm。喷丸强化不仅使模具表面应力状态和表面质量明显改善, 而且使金属产生强烈的畸变, 晶粒进一步细化。由于细小的晶粒对于阻止解理裂纹的萌生有利, 故裂纹萌生期的延长会直接提高模具的疲劳寿命。同时, 由于 H21 钢的再结晶温度和耐回火性均比较高, 因此这种晶粒细化效应在 650℃ 以下仍有明显的作用。这也是喷丸强化能够提高模具寿命的重要因素之一。

实例 4 冲制弹簧片凸模，材料为 CH 钢，要求火焰淬火处理。

(1) 火焰淬火工艺 模具火焰淬火加热温度为 880 ~ 920℃，空冷后硬度为 60 ~ 65HRC；160 ~ 180℃ × 2h 回火 2 次。

火焰淬火加热时，一定要采用中性火焰加热，火焰长度为 10 ~ 15mm，乙炔压力为 0.05 ~ 0.12MPa，氧气压力为 0.3 ~ 0.6MPa。对于不同结构和尺寸的模具，加热方式及烧嘴的选择也应不同。使用这种方法进行表面淬火，不但变形小，操作方便，而且无需特殊的加热设备。

(2) 火焰淬火效果 经火焰淬火和回火后，模具硬度为 59 ~ 62HRC，油淬热处理变形量为 0.24 ~ 0.26mm，空冷热处理变形量为 0.02 ~ 0.04mm。用火焰淬火法对 CH 钢制凸模加热淬火，模具使用寿命可接近 80 万次，达到了国外先进水平。

实例 5 挑线连杆冷挤压模的真空热处理。

采用 Cr12MoV 钢制造的挑线连杆冷挤压模，由于韧性低，在使用过程中易开裂或胀裂，而且使用寿命不高，一般只有 1 万件左右。模具改用 65Nb 钢制造并经真空淬火处理后，使用寿命虽有显著提高，但抗压屈服强度不足，易产生变形。在进一步采用真空渗碳处理后，冷挤模的使用寿命提高了 1 ~ 5 倍。

真空渗碳可在内热式双层壁真空渗碳淬火炉中进行。真空炉的冷态极限真空度为 2.67Pa。渗碳介质为甲烷-氢（甲烷的体积分数约占 70%）。淬火冷却介质为真空油。65Nb 钢制挑线连杆冷挤压模的真空渗碳工艺如图 6-6 所示。65Nb 钢制挑线连杆冷挤压模经真空渗碳处理后的寿命可达 3 万件（见表 6-7）。

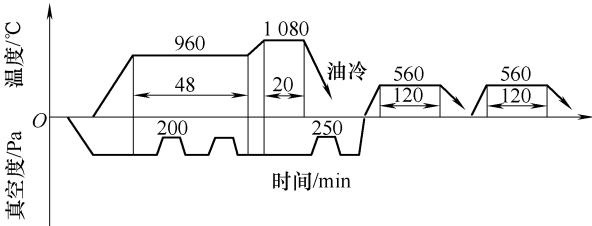


图 6-6 65Nb 钢制挑线连杆冷挤压模的真空渗碳工艺

表 6-7 65Nb 钢制挑线连杆冷挤压模的寿命

模具材料	热处理工艺	寿命/万件	失效原因
Cr12MoV 钢	淬火、回火处理	0.4	碎裂
65Nb 钢	真空淬火及回火处理	1.2	内孔超差，凹陷
65Nb 钢	真空渗碳淬火及回火处理	3.0	

实例 6 切边模的固体碳氮共渗。

用 9SiCr 钢和 Cr12MoV 钢制切边模在冷镦机上以 50 次/min 切削 Q235 钢螺栓六角头时寿命均较低。其中，9SiCr 钢制模具的使用寿命一般为 5 000 件，失效形式主要为磨损，少数为棱角及基体的开裂；Cr12MoV 钢制模具的使用寿命为 7 500

件，失效形式主要为刃部崩块，少数为刃口磨损超差。而改用 45 钢制的切边模，经固体碳氮共渗处理后，使用寿命可达 15 000 件。

(1) 改进热处理工艺 45 钢制模具采用盐水-油双液淬火方法控制变形，然后经表面除油、除锈后装箱进行碳氮共渗，其工艺见表 6-8。

(2) 改进后模具使用寿命 45 钢制模具经 800℃ 碳氮共渗处理后，距表面 0.05mm 处的碳含量（质量分数）为 0.88%，使用寿命见表 6-8。

表 6-8 模具碳氮共渗处理工艺及平均寿命

模具材料	热处理工艺	渗层深度 /mm	表面硬度		平均寿命 /件	失效形式
			HRC	HV		
9SiCr	870℃ 淬火 + 280℃ 回火	—	58 ~ 59	—	5 000	刃口磨损
	三次循环加热淬火	—	60	—	10 000	刃口磨损
Cr12MoV	970℃ 淬火，240℃ 回火	—	58 ~ 59	—	7 500	刃口崩块
	1 050℃ 淬火，560℃ 渗氮 3h，180℃ × 3h 回火	0.10 ~ 0.12	—	1 037	16 000	刃口崩刃
	800℃ 碳氮共渗 4h，淬火 + 180℃ 回火 2 ~ 3h	0.50 ~ 0.60	—	941	16 500	刃口磨损
45	820℃ 碳氮共渗 4h，淬火 + 180℃ 回火 2 ~ 3h	0.65 ~ 0.70	—	927	16 000	刃口磨损，少数崩刃
	850℃ 碳氮共渗 4h，淬火 + 180℃ 回火 2 ~ 3h	0.95 ~ 1.0	—	882	12 000	刃口崩块
	580℃ 碳氮共渗 2h + 900℃ 渗硼 4h + 180℃ 回火 3h	90 ~ 100μm	—	1 453	4 400	刃口塌陷

实例 7 M3 六方螺母冷挤模的真空渗硼。

V3N 钢制 M3 六方螺母冷挤模，原寿命为 1 ~ 2 万次，采用真空热处理后寿命可提高到 30 多万次，而采用真空渗硼后寿命可达到 40 万次。

真空渗硼剂为 B₂O₃（涂覆于模具表面）。不同模具材料的真空渗硼工艺为：V3N 钢，加热 1 250℃ × 30min，真空度为 1.33 ~ 0.133Pa；W18Cr4V 钢，加热 1 280℃ × 30min，真空度为 1.333 ~ 0.133Pa；Cr12 钢，加热 1 050℃ × 30min，真空度为 1.33 ~ 0.133Pa。

真空渗硼的优点是渗硼剂易于涂覆且消耗低，可进行局部和较小孔深部位的渗硼，渗硼后零件表面光亮无残渣。例如，V3N 钢经 1 250℃ × 30min 加热，油淬，560℃ 回火后的硬度为 880HV0.05，按上述真空渗硼工艺渗硼后，硬度为 1 050 HV0.02。

实例 8 照相机后盖板冲模，材料为 Cr12 钢，要求渗硫处理。

(1) 冲模失效形式 照相机后盖是用 0.5mm 厚的 Q235 钢板冲压成形的。经常规处理的 Cr12 钢制冲模在冲压 7~8 件后盖板后,在凹模的四个内角处发生严重的粘模现象,使冲制的后盖板在凸面的四角处发生严重的拉伤而成为废品。虽尝使采用润滑剂或在凹模内腔处进行镀硬铬处理,但都对改善冲制件的拉伤现象作用不大。

(2) 渗硫工艺的应用 渗硫模具冲压时可避免粘模现象,而且冲制件的边缘光滑。可将淬火、回火后高硬度的模具表面进行活化处理,然后在熔融硫中进行低温液体渗硫。其操作过程如下:

1) 预处理。模具用汽油洗净并用除油剂除油,然后用冷水冲洗,用酸去除表面锈迹和进行表面活化处理,最后进行清洗除酸处理。

2) 低温液体渗硫处理。渗硫配方(质量分数)为:99%工业硫黄+1%碘,另加质量分数为 0.2%的铁粉。将渗硫剂和模具放入搪瓷容器内,加盖后即可在恒温电热干燥箱内加热渗硫。渗硫温度为 180~190℃,时间为 6~8h。渗硫结束后,将模具取出擦净,再用二氧化碳清洗。渗硫层的组织为 FeS,并混有 FeS₂,其厚度为 20μm 左右。

(3) 应用效果 经渗硫后的模具在冲压 1 500 个零件后仍未发生粘模现象。

实例 9 家用缝纫机主轴弯头热锻模的硫氮共渗。

用 YG20C 硬质合金制造的热锻模在使用时易开裂损坏,用 BR40、TLMW 钢制造的模具寿命只有 1~2 万件。

采用 3Cr2W8V 钢制造的热锻模经常规热处理+气体氮碳共渗处理后,使用寿命可达 50 万次。但用氮碳共渗处理模具成形的锻件表面不够光洁。后将热处理工艺改为淬火、回火+气体硫氮共渗,模具寿命达到了 100 万次以上。具体工艺为 1 080℃加热淬火,650℃回火,570℃硫氮共渗 3h。共渗后表层为多孔质的硫化物层,次表层是硫化物、氮化物及氧化物层,里层是扩散层。硫化物层硬度为 60~100HV,但在距表面 10~15μm 处(含氮最高处),硬度可达 700~800HV,并且渗层具有良好的抗粘着磨损性能,因而可提高模具的寿命。

实例 10 拉深模,材料为 T8、Cr12 钢等,要求渗铬处理。

渗铬可提高模具的耐磨性、耐蚀性、抗氧化性和耐热疲劳性,延长模具使用寿命 1~3 倍。

(1) 渗铬剂 国外固体粉末渗铬剂(质量分数)成分为:60%铬铁粉(65%Cr, 0.1%C, 余量为 Fe)+0.2%氯化铵+39.8%无釉陶土。国内固体粉末渗铬剂成分(质量分数)为:50%铬粉(Cr 的质量分数大于 98%, 100~200 目)+48%氧化铝(经 1 100℃焙烧, 100~200 目)+2%氯化铵,其中氧化铝为稀释剂,起防粘结作用,氯化铵为催渗剂。

真空粉末渗铬剂(质量分数)成分为:30%铬铁粉+70%氧化铝,另加 5%浓盐酸。

(2) 渗铬工艺

- 1) 固体渗铬工艺。1 050 ~ 1 100℃ 加热，保温 6 ~ 12h。渗铬后低碳钢可获得 0.05 ~ 0.15mm 的渗层，高碳钢可获得 0.02 ~ 0.08mm 的渗层。
- 2) 真空粉末渗铬。渗铬剂与模具一同装炉后抽真空，真空度为 13.33 ~ 133.3Pa 时关闭机械泵，密封升温至 950 ~ 1 100℃，炉内压力一般保持在 9.8×10^4 Pa 左右，保温 5 ~ 10h。Cr12 钢制模具渗铬后可获得 0.01 ~ 0.03mm 的渗层。
- (3) 模具渗铬后的热处理及硬度 工模具钢渗铬后，需经淬火、回火处理，其工艺可按常规工艺进行。渗铬后及热处理后的硬度见表 6-9。

表 6-9 渗铬及热处理后的硬度

牌号	渗层深度 /mm	渗层表面硬度 HV0.2	热处理后硬度 HRC	
			表面	基体
T8	0.038	1 560	66	59
T10	0.04	1 620	66	61
CrWMn	0.038	1 620	66	63
Cr12	0.038	1 560	67	65

(4) 渗铬层组织及渗铬模具的变形 渗铬层组织为铬的碳化物 $(Cr, Fe)_7C_3$ 和含铬铁素体，次层为贫碳层。渗铬模具一般的变形规律为内孔收缩，外径胀大，变形量为 20 ~ 50μm。

(5) 渗铬模具的应用效果 渗铬模具的应用效果见表 6-10。

表 6-10 渗铬模具的应用效果

模具		加工材料	处理工艺		硬度 HRC	使用效果
名称	材料		渗铬	后续热处理		
罩壳拉深模	T8A	0.5mm 厚 08F 钢	1 100℃ × 8h	820℃ 淬入 160℃ 碱浴，低温回火	65 ~ 67	可拉深 1 000 件以上
	T8A	0.5mm 厚 08F 钢	—	820℃ 淬入 160℃ 碱浴，低温回火	58 ~ 62	每拉深 100 ~ 200 件需修磨一次，总寿命 1 500 件
铁盒拉深模	Cr12	1mm 厚 08F 钢	1 100℃ × 10h	1 000℃ 淬油，低温回火	66 ~ 67	可拉深 900 件以上
	Cr12	1mm 厚 08F 钢	—	1 000℃ 淬油，低温回火	60 ~ 62	—

实例 11 汽车发动机机油粗滤器外壳二次拉深凹模（见图 6-7）的渗钒处理。

Cr12MoV 钢制二次拉深凹模，在硬度为 58 ~ 62HRC 下使用时，由于零件材料较厚，拉延深度高，造成磨损十分严重。经对其进行氮碳共渗处理后，刃磨寿命有所提高。后改为盐浴渗钒处理，刃磨寿命得到了大幅度提高。见表 6-11。但渗钒淬

火后模具的型孔会缩小 0.2mm，引起尺寸超差而报废，要予以注意。

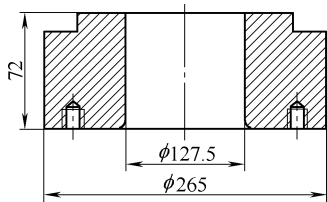


图 6-7 二次拉深凹模简图

表 6-11 二次拉深凹模经气体氮碳共渗及盐浴渗钒处理后的刃磨寿命

处 理 工 艺	变形/mm	刃磨寿命/件	备注
正常淬火、回火处理（1 050℃ 油淬，520℃ 回火 3 次）	- 0.10	20 ~ 30	—
气体氮碳共渗（540℃ × 4h）	+ 0.05	50 ~ 60	—
盐浴渗钒（920℃ × 6h 渗钒，1 000℃ 油淬，200℃ 回火）	- 0.20	> 130	未出现拉毛现象

实例 12 GJW50 钢结硬质合金制螺钉、螺母冷镦模的渗硼处理。

（1）失效原因 GJW50 钢结硬质合金制螺钉、螺母冷镦模经渗硼后，在使用过程中易出现裂纹或崩块等缺陷而过早失效。其原因是：①硬质相 WC 粒子强烈地阻碍渗硼层扩展，造成渗硼层厚度不均匀和不连续；②硬质相与硼化物的交界处易出现孔洞，降低合金的冲击韧性。因此，模具在受冲击负荷时其表面易出现开裂或崩块现象。

（2）改进的措施

1）根据模具的尺寸、形状和性能要求，确定合理的渗硼层厚度（可在 30 ~ 70μm 范围内选定）。

2）将渗硼后直接进行淬火、回火处理改为采用等温淬火处理（见图 6-8），并且在保证硬度要求的前提下尽量提高等温淬火温度。这是提高基体强韧性（见表 6-12）、防止出现崩块现象的有效途径。

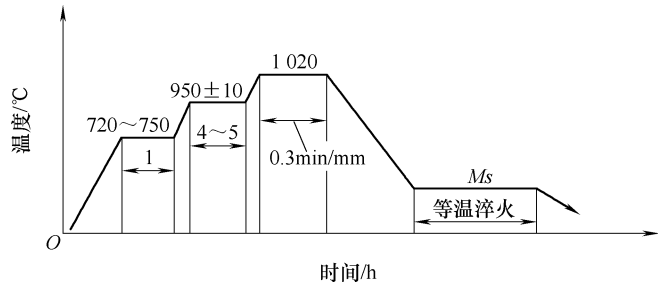


图 6-8 GJW50 钢结硬质合金模具的渗硼 + 等温淬火复合处理工艺

表 6-12 GJW50 钢结硬质合金经不同温度等温淬火后的性能

等温温度/℃	力 学 性 能			
	硬度 HRC	$a_k/(J/cm^2)$	σ_{bb}/MPa	$K_{IC}/(MPa/mm^{3/2})$
200	67 ~ 69	15. 0	2 210	721
280	62 ~ 64	16. 0	2 410	668
360	57 ~ 58	16. 0	2 900	751
440	51 ~ 53	18. 0	2 800	837

6.6 先进的模具表面强化技术及应用实例

先进的模具表面强化技术主要有热喷涂技术（包括火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂、激光喷涂和电热热源喷涂等）、高能量密度能源表面处理技术〔包括激光表面强化技术（如激光相变硬化和激光熔覆）、离子束表面强化技术（如离子注入技术）和电子束表面强化技术等〕、气相沉积技术（包括 PVD 和 CVD）、稀土元素表面强化技术（包括稀土碳共渗、稀土碳氮共渗、稀土硼共渗和稀土硼铝共渗等）和复合表面强化技术等。在生产实践中必须要结合各种表面强化技术的特点、模具的工作条件及其使用的经济性等因素综合考虑，选择最佳的表面强化工艺方案，以达到延长模具使用寿命、提高产品质量的目的并获取显著的经济效益。

6.6.1 模具的稀土元素表面强化技术及应用实例

在模具表面强化技术中，稀土元素以其优良的性质发挥着重要的作用，它在改善模具钢的表层组织结构和物理、化学、力学性能等方面有着极大的优势。有研究表明，稀土元素加入模具钢后具有明显提高渗速 20% ~ 30%、强化及净化表面、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功能，故可提高模具型腔表面的耐磨性、抗高温氧化性和抗冲击磨损性。目前，应用于表面强化技术的稀土主要采用稀土化合物形式，如 La₂O₃、LaF₃、CeS₂、Y₂O₃ 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、稀土硼共渗和稀土硼铝共渗等。这些技术已广泛应用于模具制造领域并获得了显著的经济效益。

例如：采用稀土碳共渗可明显使渗碳温度由 920 ~ 930℃ 将至 860 ~ 880℃，渗速也提高了 25% ~ 30%，大大减少了模具变形并降低了渗层脆性；采用稀土硼共渗后，模具的耐磨性较单一渗硼提高了 1.5 ~ 2 倍，而韧性则提高了 6 ~ 7 倍。再如，Cr12 钢制拉深模经稀土硼共渗后，其寿命可提高 5 ~ 10 倍。由于稀土硼铝共渗所得共渗层具有较高的热硬性和抗高温氧化能力，故非常适合热作模具的表面强化处理，如 H13 钢制铝挤压模经稀土硼铝共渗后其使用寿命可延长 2 ~ 3 倍，铝材表面光洁质量也提高了 1 ~ 2 个数量级，显现出了优良的使用效果。如果将稀土元

素加入采用电刷镀制备的 Ni-Cu-P-MoS₂ 镀层中,则可抑制 MoS₂ 的氧化,明显改善镀层的减摩性能,提高其耐蚀性,并使模具型腔的耐磨寿命延长近 5 倍。

除此之外,稀土在其他表面强化技术领域(如喷涂、电沉积、化学沉积及激光涂覆等方面)也具有明显的改善作用,故进一步扩大稀土元素在模具表面强化技术中的应用也是今后重点研究的一个课题。

1. 模具的稀土元素表面强化技术

(1) 模具的稀土碳共渗技术 稀土碳共渗可使渗碳温度由 920 ~ 930℃ 降低至 860 ~ 880℃,减少模具变形及防止奥氏体晶粒长大,在不改变渗碳温度的情况下可提高渗速 20% ~ 30%,并改善渗层脆性,使冲击断口裂纹形成能量和抗裂纹扩展能力提高约 30%。除此之外,稀土碳共渗时,容易在渗碳层表面获得细小弥散分布的颗粒状碳化物,基体的奥氏体晶粒度可达到 11 ~ 13 级,马氏体为细小板条状。这种在较高强韧性马氏体基体上分布着的细小弥散颗粒状碳化物组织具有较高的耐磨性、弯曲疲劳强度和接触疲劳强度,可明显改善模具的性能,延长其使用寿命。

实例 耐火砖模具,材料为 Q235 钢,要求稀土碳共渗处理。

1) 稀土渗碳工艺。稀土碳共渗设备为 RQ3-75-9 型井式气体渗碳炉。采用煤油加稀土渗剂进行高浓度渗碳,排气采用甲醇。

模具热处理工艺为:模具经 910℃ ± 10℃ 稀土碳共渗处理后出炉缓冷;二次加热淬火 780℃ × 1h,出炉水淬;低温回火 180℃ × 2h。

2) 使用效果。某厂使用 3MN 摩擦压力机进行黏土重质砖的压制生产,在采用未经稀土碳共渗处理的模具时,压制 4 500 块砖后模具因表面严重凹陷且呈现深浅不等、宽窄不一的犁沟而报废。后改为采用经稀土碳共渗处理的模具,在压制 13 000 块砖后其表面基本光滑平整,平均凹陷 0.5mm,且仍可以继续使用,使用寿命提高了 2 ~ 3 倍。

(2) 模具的稀土碳氮共渗技术 在模具碳氮共渗时向渗剂中加入稀土元素,可提高共渗速度,改善共渗层的组织结构,使渗层碳浓度提高且碳化物数量增多,并有利于细化渗层组织及改善渗层性能,提高渗层的显微硬度及耐蚀性,从而提高模具质量,并节约能源,降低成本。

实例 5CrMnMo 钢制热锻模稀土碳氮共渗及强韧性处理。

稀土碳氮共渗在 RQ3-105-9 型井式渗碳炉中进行。渗剂各成分的配比为:甲醇:甲酰胺:尿素:稀土 = 1 000:(160 ± 30):(130 ± 30):(7 ± 3)。共渗温度为 860℃。经强渗、扩散及预冷后油中淬火,以及燕尾和整体回火后,3t 汽锤锻模、驱动齿轮锻模的平均寿命提高了 0.6 ~ 1.6 倍,齿轮轴模套的平均寿命提高了 3.6 倍。

(3) 模具的稀土硼共渗技术 在模具渗硼时向渗硼剂中加入适量稀土元素(加入量有最佳值)即为稀土硼共渗。该工艺除可以显著提高渗速(较单一渗硼速度提高 1 倍左右)外,还可以提高渗层的硬度、耐磨性和耐蚀性,降低渗层的脆性,故经该工艺处理的模具可显著提高其使用寿命。

例如,与未经稀土硼共渗处理的模具相比较,经稀土硼共渗并进行淬火、回火处理后,GrWMn 钢制卷边模的使用寿命延长了 6~10 倍,T12 钢制盲孔凹模的使用寿命延长了 2~4 倍,T12 钢制角钢制品凸、凹模的使用寿命延长了 3 倍。

3Cr2W8V 钢制热作模具在组分(均为质量分数)为 60%~70%硼砂+20%~30%碳化硅+5%~10%氯化钠,外加 10%~15%稀土化合物的盐浴中,经 960℃×4~5h 热扩散后,可获得稀土硼共渗层深为 50~60μm,渗层硬度为 1 700~1 900HV,耐磨性比单一渗硼件提高了 4~20 倍。此外,稀土硼共渗层在 700℃时的氧化速度比单一渗硼层降低了 35%。

M27 高压螺母模具,常规工艺处理后寿命为 5 000 件,经稀土硼共渗处理后的模具寿命达 2 万件。

(4) 模具的稀土硼铝共渗技术 即在硼铝渗剂中加入适量的稀土元素,使稀土、硼和铝元素同时渗入模具表面的热处理工艺。该工艺可以提高渗层的耐磨性、热硬性、抗高温氧化性和耐蚀性等,并可降低渗层脆性,故有利于延长模具的使用寿命。

(5) 模具的其他稀土共渗技术 如稀土钒硼共渗,即在钒硼渗剂中加入适量的稀土元素,使稀土、钒和硼同时渗入模具表面的热处理工艺。

实例 切边模,材料为 GCr15 钢,要求稀土钒硼共渗处理。

(1) 稀土钒硼共渗工艺 盐浴炉稀土钒硼共渗工艺为:950℃×4h 稀土钒硼共渗,降温至 850℃×1min/mm 出炉,预冷至 820℃淬油,160℃×1.5h 空冷+150℃×1.5h 回火,油冷。

渗剂组分为工业硼砂+V₂O₅(纯度≥98%,粒度 200~300 目)+铝粉(纯度≥98%,粒度 20~80 目)及混合稀土。

(2) 效果 GCr15 钢制切边模经稀土钒硼共渗处理后,其使用寿命较常规热处理提高了 3 倍多。

2. 模具的稀土元素表面强化技术应用实例

实例 1 固体稀土碳氮共渗提高耐火砖模具质量。

(1) 原工艺及模具寿命 某耐火材料厂生产的铬铝砖属于铬刚玉性质的硬度极高的耐火砖,其成形模具一直采用经固体渗碳处理的 Q235 钢制造。渗碳剂为市售粒状固体渗碳剂。模具经 930℃×6h 渗碳,渗碳层深度为 1.3~1.5mm(渗层中无粒状碳化物的化合物层),渗碳淬火和低温回火后模具表面硬度为 58~62HRC。该模具耐磨性差,寿命低。

(2) 改进工艺及效果 将固体渗碳改为固体稀土碳氮共渗工艺,共渗剂成分(均为质量分数)由炭粉(65%)、尿素(30%)、碘化铵和黄血盐(5%)并另加稀土氟化物(5%~7%)组成。稀土碳氮共渗工艺为 840℃共渗 4h,渗层深度为 0.7mm(表层有 20~23μm 的细粒状碳氮化合物层),淬火、回火后表面硬度为 67~69HRC。与原工艺固体渗碳相比,虽然渗层总深度降低了,但由于表面硬度高,

粒状碳氮化合物耐磨性好，并且降低了热处理温度，因此大大改善了心部组织，不仅缩短了生产周期，而且模具使用寿命提高了两倍多，模具的变形也减少了。改进工艺后，一年可节省 Q235 钢 20 多吨，节约模具加工费十几万元，并相应降低了耐火砖的生产成本。

实例 2 CrWMn 钢制硬磁材料阻尼凹模的稀土硼共渗处理。

(1) 原工艺及模具寿命 该凹模原采用常规热处理工艺处理。由于在压制磁性铁氧体 [含硬脂酸盐润滑剂小于 1% (质量分数)，聚乙烯醇结剂小于 1% (质量分数)，粉末平均颗粒度为 0.3mm] 时，模具要受到 100~120MPa 的压力和强烈的磨粒磨损的作用，故易出现磨损失效 (型腔单边磨损超过 3μm 即为失效)。模具寿命一般只有 5~6 万次。

(2) 改进工艺及效果 模具采用盐浴电解稀土硼共渗后再进行常规热处理。

1) 盐浴电解稀土硼共渗工艺。渗剂成分为工业硼砂、NaCl、KCl 和稀土。工业硼砂应先经 400℃ 脱除结晶水处理。脱水的硼砂在 850~900℃ 全部熔化后，加入其他渗剂成分，待所有成分全部溶入并搅拌均匀后即可使用。模具稀土硼共渗工艺为 860℃ × 2~3h。电流密度为 0.1~0.2A/cm²。

2) 效果。模具经稀土硼共渗及采用常规热处理工艺进行淬火、回火后，使用寿命可提高 5 倍以上，达到了 25~30 万次。

实例 3 5CrMnMo 钢制热锻模的稀土碳共渗强韧化复合处理。

(1) 常规工艺及模具寿命 5CrMnMo 钢制热锻模原采用常规热处理工艺处理，在 42~46HRC 的硬度下使用时平均使用寿命为 2 000 件，主要损坏形式为断裂。

(2) 新工艺及效果 采用图 6-9 所示的稀土碳共渗强韧化复合工艺处理后，在渗层深为 0.7~1.1mm、渗层表面硬度为 47~48HRC、基体硬度为 42~43HRC 的条件下使用时，模具使用寿命提高了 1~3 倍。

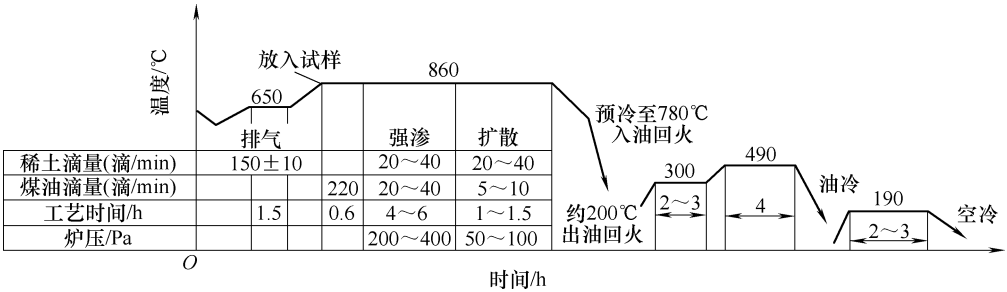


图 6-9 热锻模稀土碳共渗强韧化复合处理工艺

实例 4 Cr12MoV 钢制模具的盐浴稀土钒硼共渗。

模具经盐浴稀土钒硼共渗及淬火、回火处理，可显著提高使用寿命。

(1) 盐浴成分 V₂O₅ 与 Al 粉的质量比为：1:0.8~1.6，稀土为盐浴总量的 4%~6% (质量分数)，加入稀土后可提高渗速 30% 左右。

(2) 共渗工艺 稀土钒硼共渗工艺为: $950^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ 。

(3) 共渗层组织 渗层厚度可达 $60 \sim 77\mu\text{m}$, 显微硬度为 $1\ 931 \sim 2\ 195\text{HV}$ 。共渗层由表及里分别为 VC、 $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{B}$ 和 Fe_2B , 过渡层为 Fe_3C + 少量的 Cr_7C_3 。

(4) 共渗后的热处理工艺 共渗完毕后, 升温至 $1\ 030^{\circ}\text{C}$, 保温时间按 $1\text{min}/\text{mm}$ 计算, 出炉预冷至 $820 \sim 800^{\circ}\text{C}$ 淬油; $250^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ 空冷 + $230^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ 油冷共回火 2 次。

6.6.2 模具的气相沉积技术及应用实例

气相沉积可在模具表面覆盖一层厚度为 $0.5 \sim 10\mu\text{m}$ 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, 如在模具表面形成功能性或装饰性的化合物涂层。气相沉积现已广泛应用于各类模具的表面处理。

1. 模具的气相沉积技术

气相沉积是一种利用气态物质 (气相) 中发生的某种物理、化学过程, 在模具表面形成具有某些特殊性能的金属或化合物涂层的技术, 其是一种表面改性技术。根据涂层形成过程, 气相沉积分为化学气相沉积 (CVD)、物理气相沉积 (PVD) 和等离子体化学气相沉积 (PCVD) 等。在模具表面镀覆一层超硬镀层, 是提高模具寿命的有效途径, 先进的表面超硬镀层有 TiN、TiC、TiCN、金刚石和立方氮化硼等。

(1) 模具的化学气相沉积 (CVD) 法 CVD 是用化学方法使反应气体在模具基材表面发生化学反应, 形成一层薄的固相沉积物层 (或称覆盖层) 的方法。CVD 法可以用来沉积各种金属和碳化物、氮化物、氧化物、硅化物、硼化物等。通常 CVD 是在高温 ($800 \sim 1\ 000^{\circ}\text{C}$) 和常压或低压下进行的。

CVD 法设备简单、操作维护方便、多用性强, 可以对形状复杂或带有槽沟及孔的模具进行均匀涂覆。模具表面沉积 TiC 和 TiN, 特别适用于承受高负荷的模具。例如, 对 Cr12MoV 钢制落料模、拉深模、弯曲模、冲孔模等进行气相沉积 TiC, 模具寿命比常规处理可提高 3 倍以上; 对各类高速工具钢制作的冷作模具沉积 TiN 和 TiC 后, 使用寿命可提高 6 ~ 10 倍。

CVD 法常用于各种拉深模、冷挤模、冲裁模、冲头及粉末冶金模等。CVD 的发展趋势是降低温度, 开发新的涂层成分和工艺方法, 如金属有机化合物 CVD (MOCVD)、激光 CVD (LCVD) 和等离子 CVD (PCVD) 等。

模具基体中的碳含量对初期沉积速度有影响, 碳含量越高, 初期沉积速度越快, 故为了获得良好的沉积层, 一般多选用高碳合金钢。用 CVD 技术可以在模具材料表面沉积 TiC、TiN、Ti (C、N) 薄膜。

(2) 模具的物理气相沉积 (PVD) 法 PVD 法属于物理真空镀膜法, 常用的方法有真空蒸镀法、阴极溅射法和离子镀膜法等。PVD 法一般涂覆 TiN 涂层较多, 此

外还有 TiC、TiCN、TiAlN、CrN、Cr₇C₃ 和 W₂C 等涂层, 层深为 5μm 左右, 不影响模具精度。与 CVD 法相比, PVD 法的主要优点是处理温度较低 (<600℃), 沉积速度较快, 无公害等, 因而具有很高的实用价值。其缺点是沉积物与工件的结合力较小, 镀层均匀性稍差, 设备价格高, 操作、维护的技术要求也较高。用 PVD 法来提高冷作模具的使用寿命, 尤其是提高要求精度很高的冷作模具寿命最为适宜, 如对 65Nb 和 LM2 钢制造的电池冲模进行 PVD 法处理, 由于涂层具有高硬度及减少了摩擦力, 冲模使用寿命明显提高, 由常规处理的 6~10 万件提高到了 20 万件。

1) 模具的真空蒸镀方法。在真空中利用高温使金属、合金或化合物蒸发, 然后使之凝聚在模具表面上的方法称为真空蒸镀。具体方法是, 将被沉积的材料 (如 TiC) 置于装有加热系统的坩埚中, 被镀模具置于蒸发源前面, 当真空度达到 0.13Pa 时, 加热坩埚使被沉积的材料蒸发, 再使所产生的蒸气以凝聚形式沉积在模具表面, 形成涂层。

2) 模具的阴极溅射方法。其是利用辉光放电或离子源产生的荷能粒子轰击某一靶材 (阴极), 使靶材表面原子及其他粒子以一定能量逸出, 并沉积到工件表面形成镀膜的方法。该方法可用于 Cr12、3Cr2W8V、H13、W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2 钢等。

3) 模具的离子镀方法。离子镀是蒸镀和溅射镀两者相结合的技术, 其既保留了 CVD 的本质, 又具有 PVD 的优点。离子镀具有结合力强、均镀能力好、被镀模具材料和镀层材料可以广泛搭配等优点, 故获得了较广泛的应用。

综上所述, PVD 技术可以在各种模具材料表面沉积致密、光滑、高精度的化合物 (如 TiC) 镀层, 所以十分适合模具的表面处理。例如, Cr12MoV 钢制油开关冲模, 经 PVD 法沉积后, 表面硬度为 2 500~3 000HV, 同时减小了摩擦系数, 改善了抗粘着和抗咬合性, 模具原使用 1~3 万次即要刃磨, 而经 PVD 法处理后, 使用 10 万次不需要刃磨, 且尺寸无变化, 仍可使用。又如对用于冲压和挤压黏性材料的冷作模具, 采用 PVD 法处理后, 其使用寿命大为提高。

(3) 模具的等离子体化学气相沉积 (PCVD) PCVD 是利用低温等离子体作为能量源及其使物质在低温时具有高的化学活性的特点, 取代传统 CVD 的外加热源, 在低温 (450~600℃) 下对模具表面进行涂覆涂层的技术。而传统的 CVD 要在模具表面涂覆涂层需在高温 (1 000℃左右) 下才能进行。PCVD 的工艺特点是: 沉积温度低 (450~600℃)、变形甚微、绕镀性好、模具表面不受损伤等。PCVD 涂层的特点是: 硬度超高 (1 800~2 400HV)、膜-基结合力优良、减摩性能优良、耐蚀性良好、脆性低等。

2. 模具的气相沉积技术应用实例

实例 1 Cr12MoV 钢制指形触头精冲模的 PVD 处理。

对 Cr12MoV 钢制指形触头精冲模进行 PVD 处理, 可有效地提高模具的使用寿命。

(1) 常规工艺 该精冲模在进行 PVD 处理前应先经常规热处理。

模具球化退火工艺为：加热 850 ~ 860℃ × 3h，炉冷至 740 ~ 760℃，保温 5h，随炉冷至 500℃ 以下出炉空冷。

模具淬火、回火工艺为：模具经 880℃ 预热后，升温至 1 000 ~ 1 030℃，保温后淬火，经 200℃ × 2h 回火 2 次后，硬度为 60 ~ 62HRC。

(2) PVD 处理工艺 模具 PVD 处理可在 ATC400 型（电弧型）装置上进行。采用 PVD 处理的模具应事先经过脱脂、干燥、蒸汽清洗和漂洗。PVD 处理的工艺参数及处理结果见表 6-13。

表 6-13 PVD 处理的工艺参数及处理结果

极限真空度/Pa	0.013 3 ~ 0.001 33	涂层厚度/ μm	3 ~ 5
工作真空度/Pa	1.33 ~ 0.133	表面硬度 HV	2 500 ~ 3 000
处理温度/℃	400 ~ 600	尺寸变化	基本上无变形
时间	从抽气至出炉约 4h，其中沉积时间约 40min	颜色	金黄色

(3) PVD 处理效果 经 PVD 处理的精冲模，在冲裁厚度为 5mm 的纯铜（T2Y）板时，其使用寿命有显著提高（见表 6-14）。

表 6-14 经 PVD 处理后精冲模的使用寿命

模具名称		凸模	凹模
硬度要求 HRC		60 ~ 64	60 ~ 64
被冲裁切料		5mm 厚的 T2Y 纯铜板	
冲模使用寿命/件	未经 PVD 处理	1 ~ 3 万次	
	经 PVD 处理	10 万次后尺寸无变化，仍可使用	

实例 2 H13 钢制铝合金挤压模具的等离子体化学沉积（PCVD）TiN。

铝合金挤压模具是在极其复杂恶劣的条件下工作的，承受着高温、高压、急冷、急热和反复循环应力的作用，且剧烈的摩擦还会使模具表面黏附一层小的铝积屑瘤，造成模具工作表面严重磨损，导致模具早期失效。如果采用 PCVD 在模具表面沉积 TiN，则可有效地解决上述问题，并使模具寿命提高 3 ~ 5 倍。其工艺过程如下：

(1) 淬火、回火 采用 PCVD 在模具表面沉积 TiN 前，先对模具进行 1 070℃ 加热油淬及 560 ~ 580℃ × 2h 回火 2 次。

(2) 沉积 TiN 采用 PCVD 在模具表面沉积 TiN 所需的反应物为氮气、氢气和四氯化钛。

1) 清洗镀膜室及其周围，并将 H13 钢模具用酒精和丙酮严格清洗干净，烘干

后放入镀膜室。

2) 用真空泵将镀膜室抽真空至 $3.333 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 。

3) 向镀膜室通入 N_2 和 H_2 (N_2 和 H_2 的体积比为 1:1)。接通电源, 电压为 1 300V, 以低电流溅射清洗模具待镀表面, 并使其温度升至 $560 \sim 600^\circ\text{C}$ 。

4) 关闭真空管, 以 $0.5 \sim 0.6 \text{L/min}$ 的流量输入 TiCl_4 。真空度保持在 $3.333 \times 10^{-4} \text{Pa}$, 电流为 300mA, 进行 TiN 沉积。沉积速度一般为 $5 \sim 10 \mu\text{m/h}$, 一般沉积 30min。

5) 关闭气体及电源, 在真空状态下冷却至 150°C 以下出炉。得到的沉积层厚度为 $2.6 \sim 3.8 \mu\text{m}$, 颜色为金黄色。

经 X 射线分析得知, 金黄色的表层由单相 TiN 组成, 黑色层由 Fe_2N 组成。其中, 黑色层的氮化物是在沉积 TiN 之前的升温过程中, 由通入的 N_2 离解出的氮离子渗入模具材料表层并与之反应所形成的。

实例 3 CH 钢制汽车同步器齿环精锻模的多弧离子镀 TiAlN。

汽车同步器齿环精锻模工作条件恶劣, 工作时温度高达 700°C 左右且受到磨损作用。某汽车制造公司原采用 H21 钢制汽车同步器齿环精锻模, 经生产应用, 模具塌角、变形和磨损严重, 使用寿命仅为 7 000 件。将模具材料改为 CH 钢后, 模具寿命虽有所提高, 但平均寿命也只有 1.2 万件。后采用在模具表面进行多弧离子镀 TiAlN 处理, 其工艺如下:

(1) 离子镀前预备热处理 $800^\circ\text{C} \times 1.5 \text{min/mm}$ 盐浴炉预热, $1\ 100^\circ\text{C} \times 45 \text{s/mm}$ 盐浴加热, 油淬, $580^\circ\text{C} \times 2 \text{h}$ 回火。淬火、回火后硬度为 57HRC。

(2) 多弧离子镀 TiAlN 工艺及效果 热处理后的模具采用四弧源 DHD-600F 型多弧离子镀膜机进行镀膜, 极限真空度为 $5 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 。用 Ti 的质量分数为 70% 的 TiAl 复合靶作靶材。

1) 镀膜前的清洗工艺为: 金属清洗剂脱脂→碱液超声波脱脂→酸液浸泡活化表面→脱水→Ar 离子轰击清洗。轰击清洗时, Ar 的压强为 $7 \times 10^{-3} \text{Pa}$, 轰击电流为 50A, 电压为 -700V。

2) 清洗后在模具表面先沉积一层纯 Ti 膜。TiAlN 薄膜的沉积工艺为: 靶电流为 60~70A, 负偏压为 -200~-400V, N_2 分压为 1~2Pa, 沉积温度为 500°C , 沉积时间为 1h。

3) 效果。镀膜厚度为 $1.5 \mu\text{m}$, 硬度为 3 400HV, 镀膜后模具表面的耐磨性提高了 7 倍。经镀覆 TiAlN 薄膜的汽车同步器齿环精锻模在锻造齿环 24 835 件后, 模具表面仍很光滑, 镀膜附着良好且无剥落现象, 模具寿命较常规热处理提高了 1 倍多。

6.6.3 模具的高能量密度能源表面强化技术及应用实例

高能量密度能源表面强化技术的热源通常是激光、电子束及离子束等, 它们的

共同特点是加热速度快、加热面积可以根据需要选择、工件变形小、不需要冷却介质、可控性能好且便于实现自动化处理,它们的共同特征是供给材料表面功率密度至少为 10^3 W/cm^2 。目前比较成熟的高能量密度能源表面强化技术有激光相变硬化、小尺寸电子束处理和中等功率离子注入,这些技术在提高模具寿命方面已获得应用。

1. 模具的高能量密度能源表面强化技术

高能量密度能源表面强化技术包括激光表面强化技术(如激光相变硬化、激光表面熔覆)、离子束注入合金化技术和电子束加热淬火等。该技术功率密度高,可以通过对模具表面进行改性,使其获得特有的组织和性能,还可以提高生产率。只此,只要采用光学或电磁学技术把高能束引导到模具的不同部位,就能实现局部或复杂部位的强化处理,特别是计算机、自动控制等高科技的介入使能量操纵智能化,控制更加自如方便。

(1) 模具的激光表面强化技术 利用高功率、高密度激光束(一般为 $10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$)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(LTH,如表面淬火、表面非晶化及表面重熔淬火)、激光表面合金化(LSA,如表面覆层合金化、硬质粒子喷射合金化及气体合金化)、激光表面熔覆(LSC)、激光表面化学气相沉积(LCVD)、激光物理气相沉积(LPVD)和激光冲击(LSH)等表面改性工艺,其可产生其他表面加热淬火强化达不到的表面成分、组织及性能的改变。

1) 模具的激光相变硬化(LTH)。在模具表面激光强化方法中,激光相变硬化应用比较普遍,利用该方法对低碳钢、中碳钢和低合金工具钢等进行处理后,能够获得细晶马氏体组织,位错密度比常规加热淬火显著提高,淬火组织细小,硬度显著提高(较普通淬火的硬度高 $15\% \sim 20\%$),模具变形小,几乎无氧化脱碳,对模具的表面粗糙度没有太大影响,并使材料表面的综合性能得到很大改善,耐磨性显著提高。经该方法处理的模具钢表面强化效果可与高强度模具钢媲美。

激光淬火与高频、火焰淬火相比较,激光淬火受热及冷却区域极小,因而变形极小、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,甚至可以在最终精加工工序以后进行。激光淬火可以改善模具的表面硬度、耐磨性、热稳定性、抗疲劳性和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:GCr15 钢制轴承保持架冲孔用冲孔凹模,常规处理后的使用寿命为 1.12 万次,经激光处理后的寿命可达 2.8 万次;GCr15 钢制挤压孔边用压坡模具,经激光处理后连续冲压 6 000 件,而按常规热处理工艺处理后,最高使用寿命仅为 3 000 件。

如果在模具表面涂敷硬质合金粉,则可实现表面合金化。激光加热的优点是工件无需置于真空中。

2) 模具的激光表面合金化(LSA)。激光表面合金化是以激光作为热源的复合强化技术,其是在模具表面涂上合金粉,以足够功率及适当扫描速度,使模具表面

温度上升到熔点，形成合金熔化层。可根据对模具的耐磨性、耐蚀性、耐热性和抗氧化性等要求，配制适当的表面合金化成分来进行表面合金化。

激光相变硬化和表面合金化能够使模具寿命提高 1 ~ 3 倍。表 6-15 为激光强化处理模具的使用寿命。

表 6-15 激光强化处理模具的使用寿命

模具名称	模具材料	原热处理工艺	激光淬火后模具寿命提高百分比或倍数
山字形硅钢片铁心冲模	Cr12	淬火 + 低温回火	33%
B9 硅钢片铁心冲模	Cr12	淬火 + 低温回火	60%
裁纸刀	T10	调质	50 倍（达 300 万次）
铝饭盒盖拉深模	45	火焰淬火	6 ~ 9 倍

3) 模具的激光表面熔覆（LSC）。激光表面熔覆是利用大功率密度激光快速加热材料表面使其熔化，在激光停止加热以后，再借助基体的热传导作用，使液态金属快速凝固的技术。激光表面熔覆在显著提高模具材料表面硬度的同时，还能保持心部较好的塑、韧性，使模具材料表面具有良好的综合性能。

H13 模具钢具有高的淬透性和淬硬性，主要用于制造压铸模、挤压模、锻模和塑料模具，淬火、回火后的组织为回火索氏体。经激光表面熔覆处理后，熔覆层中含有普通热处理难以获得的大量 Cr_7C_3 、 Cr_{23}C_6 和 Mo_2C 碳化物，这些碳化物的弥散强化及快速熔覆固溶强化作用对提高模具的耐磨性非常有利。

Cr12MoV 及 W18Cr4V 等模具钢经激光表面熔覆处理后，在使用过程中，熔覆层中存在的大量残留奥氏体在应力诱发下发生马氏体转变，产生加工硬化，因此可使材料的表面硬度提高，耐磨性增强。

(2) 模具的电子束表面强化技术 电子束表面强化是利用高能量密度的电子束对模具表面进行加热淬火的表面强化工艺。电子束加热可以达到 $10^6 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ 的能量密度。利用高能量密度的电子束还可以实现相变硬化和表面合金化等工艺。

由于所用电子束能量非常集中，故加热速度极快（3 000 ~ 5 000℃/s），所得奥氏体晶粒极细（超细化晶粒），这是电子束加热淬火的最大特点。另外，由于加热层薄，故可进行自激冷淬火，且淬火后硬度较通常淬火高 1 ~ 2HRC。由于电子束加热速度快，使模具零件变形极小，故淬火后无需后续的校正工作。电子束加热淬火后的金相组织为细晶结构。与激光淬火相比，电子束加热淬火工艺更易控制，成本更低廉。

(3) 模具的离子束注入合金化技术 离子束注入合金化是将合金元素的原子离子化后使其在电场中获得高能量，再高速注入金属材料表层，以形成极薄的近表面合金层，从而改变金属表面的物理或化学性质的技术。离子注入深度一般在 $1\mu\text{m}$ 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结构形式存在。离子注入金属后可提高其表面硬度及改善其耐磨性、耐

蚀性及抗疲劳性能。离子注入在高真空及低温下进行，故不会引起模具变形，不影响表面质量，还可精确控制注入离子的浓度、浓度分布及注入深度。离子束注入合金化技术可用于冲裁模、拉丝模、挤压模、拉深模和塑料模等，特别适用于精密模具和形状复杂的模具以及零件的表面强化。例如，钢线拉丝模（YG8）、铜线拉丝模（YG3）和冲模（Cr 钢）经离子注入氮元素后，使用寿命分别提高了 3 倍、5 倍和 2 倍。

2. 模具的高能量密度能源表面强化技术应用实例

实例 1 GCr15 钢制轴承保持架冲孔模和挤压边用的压坡模具的激光强化处理。

GCr15 钢制轴承保持架冲孔模和挤压边用的压坡模具在生产中使用寿命都不高，失效形式为崩刃或刃边磨损。在把冲孔模的硬度由 58 ~ 62HRC 降至 45 ~ 50HRC，并用激光进行强化处理后，模具的使用寿命得到了显著提高。

(1) 冲孔模的激光处理 冲孔模的激光硬化层由白亮层（为隐针马氏体 + 细粒状合金碳化物组织）、灰白层（为细针马氏体 + 细粒状合金碳化物组织）和过渡层（为隐针马氏体 + 回火托氏体组织）等三层组成。白亮层的硬度为 849HV，基体的硬度为 490HV，硬化层深度为 0.37mm。

由于激光热处理可获得超细的隐针马氏体结构及显著提高强韧性，故可减少崩刃，延长模具使用寿命。轴承保持架冲孔模经激光硬化处理后的使用寿命见表 6-16。

表 6-16 轴承保持架冲孔模经激光硬化处理后的使用寿命

冲孔模的型号	激光处理后的寿命/万次	常规处理后的寿命/万次
7205	2.8	1.12
7206	2.6	1.26
7310E	3.65	1.60

(2) 压坡模具的激光处理经激光处理后，白亮层的硬度为 927HV，基体硬度为 733HV，硬化层深度为 0.268mm，硬化带宽度为 1.11mm。

经激光处理后的压坡模具可连续冲压 6 000 件，而按常规热处理工艺处理的压坡模具的最高使用寿命仅为 3 000 件。

实例 2 YG8 硬质合金拉丝模的氮离子注入处理。

离子注入可提高金属材料表面的硬度、耐磨性、耐疲劳性和耐蚀性。碳化钨基硬质合金拉丝模，经氮离子注入后，可使模具寿命提高 2 倍以上。

(1) YG8 硬质合金拉丝模的工作条件 YG8 硬质合金拉丝模的工作条件见表 6-17。

表 6-17 拉丝模的工作条件

模具	拉丝机	产品	拉丝速度 /(m/min)	润滑及冷却剂 (质量分数)
钢丝拉丝模	7/450 连拉机	φ1mm 轮胎钢丝	350	50% 硬脂酸钡 + 50% 硬脂酸铝
钢丝拉丝模	7318 型滑动式拉丝机	铜导线	600	2% ~ 3% 油脂皂水

(2) 离子注入工艺 离子注入可采用 C-200KeV 型半导体离子注入和离子束分析两用机，其注入系统由离子源、加速管、磁分析器和靶室等组成。操作时将高纯度氮气引入注入机的离子源中并电离为氮离子，再经高压电场加速形成高速离子束流，强行注入装在靶室中的模具的工作表面上，迫使氮离子和模具材料元素的原子形成强固结合，或将其表面位错钉扎在一起，形成“位错网络”。这些效应都能够引起模具材料表面的硬化作用。同时，离子注入时的轰击作用与喷丸相似，也可对模具表面产生硬化作用。

由于离子注入是在较高的真空度 (0.001 33Pa) 和低温或室温下进行的，故拉丝模在离子注入后表面十分光洁且无变形。

离子探针的分析结果表明，碳化钨硬质合金拉丝模的氮离子注入深度为 30 ~ 80nm。

(3) 氮离子注入后拉丝模的使用寿命 拉丝模经氮离子注入后，模具使用寿命可提高 2 倍以上，见表 6-18 和表 6-19。

表 6-18 氮离子注入钢丝拉丝模的寿命

材料工艺	到模具孔径磨损 0.03mm 时的 使用寿命/h
注入氮离子	13 ~ 19
未注入氮离子	6 ~ 8

表 6-19 氮离子注入铜丝拉丝模的寿命

处理工艺	寿 命	
	/kg	/h
氮离子注入模具	436	13
未经氮离子注入模具	196	6

实例 3 W6Mo5Cr4V2 钢制螺母孔冲头的离子注入处理。

用于冲制硬度为 130 ~ 160HBW 的冷拔低碳钢螺母孔的 W6Mo5Cr4V2 钢制 M12mm 螺母孔冲头 (见图 6-10)，经 1 190℃ 油冷淬火、560℃ × 1.5h 回火 3 次和离子注入的处理工艺后，可大幅度提高模具的使用寿命。

离子注入工艺参数为：离子束能量 $E = 100\text{KeV}$ ，注入剂量 $D = 5 \times 10^{17}\text{N}^+/\text{cm}^2$ (有效剂量 $D = 2.5 \times 10^{17}\text{N}^+/\text{cm}^2$)，注入温度低于 500℃。经离子注入后，模具表面的努氏硬度可提高 200HK0.005 左右，使用寿命可达 3.9 万件，而未经

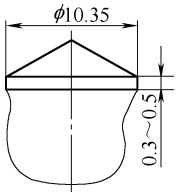


图 6-10 M12 螺母孔冲头头部简图

离子注入处理的模具使用寿命仅为 1.6 万件。

实例 4 热变形模具，材料为 Cr12 钢，要求电子束表面淬火。

(1) 预备热处理 预备热处理工艺为：1 050℃ 淬火，180℃ 回火。

(2) 电子束表面淬火工艺参数 对 Cr12 钢制模具的电子束表面淬火在 10kW 的电子束装置中处理进行，其工艺参数为：电压为 150kV，电流为 56mA，电子束直径为 2mm，扫描速度为 50 ~ 200mm/s，作用时间为 0.05 ~ 0.1s，冷却速度为 $2 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$ ℃/s。

(3) 电子束加热表面熔融后淬火检验结果 电子束加热表面熔融后淬火的表面硬度为 880HV，热影响区硬度为 780HV，基体硬度为 650HV，硬化层深度为 0.1 ~ 0.2mm，表层组织为由细小马氏体 + 残留奥氏体 + δ -铁素体 + 碳化物组成的树枝晶（从表面向内部有 5 ~ 10 μ m 深，可看出有碳化物薄层），热影响区组织为马氏体 + 残留奥氏体 + 碳化物，基体组织为回火马氏体 + 碳化物。

6.6.4 模具的热喷涂技术及应用实例

热喷涂技术是利用热源将喷涂材料加热至溶化或半溶化状态，并以一定的速度喷射沉积到经过热处理的基体表面形成涂层的方法。该技术近年来得到了快速发展。

1. 模具的热喷涂技术

热喷涂技术可利用某种热源（如电弧、离子弧或燃烧的火焰等），将要喷涂的材料加热至溶化或半溶化的雾状微粒，然后借助气流把其从喷嘴高速喷射在经过预先处理的工件表面上，形成附着牢固的涂层。热喷涂技术的优点是，几乎对所有材料（无论是金属母材还是非金属母材）的表面均可进行喷涂。涂层材料也是种类繁多，包括各种金属、合金、陶瓷、塑料、石墨和尼龙等。热喷涂涂层厚度可达数毫米，硬度高达 2 000HV 以上，涂层结合牢固且形成速度快，对模具大小没有限制。

热喷涂层由于具有耐磨、耐蚀、耐热、耐振动、隔热、密封、润滑、绝缘、导电等多种性能，并能为模具提供坚韧的表面，因此特别适用于修复大型模具和严重磨损的模具。

热喷涂技术一般按照喷涂热源的种类、喷涂材料、涂层结合方式和涂层功能等进行分类。按热源的种类，热喷涂可分为火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂和激光喷涂四种基本方法。在生产中应用较多的主要是等离子喷涂（约占 48%）和高速火焰喷涂（约占 25%）。

(1) 热喷涂技术的特点 与其他表面处理技术相比，热喷涂技术具有下述一些突出的特点：

1) 喷涂材料广泛，除了金属和合金外，陶瓷、金属陶瓷、许多化合物和物理混合物，甚至有机树脂等都可以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) 适用于各种基体材料的零件,如各种金属和非金属零件的表面都可以进行热喷涂。

3) 操作简单,速度快,生产率高。

4) 被喷涂零件的尺寸范围较宽,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。

5) 除喷焊外,热喷涂对工件的加热温度都较低,因此工件变形小。例如,氧乙炔焰喷涂、等离子喷涂或爆炸喷涂,工件受热程度均不超过 250°C ,工件不会发生变形,工件的金相组织也不会改变。

6) 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。

7) 成本低,经济效益显著。

(2) 高速火焰喷涂 高速火焰喷涂是利用燃气(乙炔、丙烷或天然气等)及助燃气体(氧)混合燃烧作为热源,将喷涂材料加热到熔融或软化状态,然后依靠气体或火焰加速喷射到经预处理的基体表面上形成涂层的方法。火焰喷涂根据喷涂材料的不同,又可分为丝材火焰喷涂和粉末火焰喷涂两种。

(3) 等离子喷涂 等离子喷涂是以氮气(N_2)或惰性气体(如氩气 Ar)等作为工作介质,使其在专用的喷枪内发生电离形成热等离子,再以等离子弧作为热源,将粉末状涂层材料加热到熔融、雾化,并以高速喷射到经过预处理的工件表面而形成附着牢固的涂层的方法。由于整个工艺集熔化、雾化、快淬、固结等过程为一体,且所获涂层组织致密,结合牢固,故等离子喷涂的应用越来越广泛。但等离子喷涂也存在需高纯度气体且成本较高等缺点。目前,除常压下气稳式等离子喷涂工艺外,优点更为突出的低压等离子喷涂及水稳式等离子喷涂工艺也在逐步推广使用。

2. 模具的热喷涂技术应用实例

实例1 Cr12MoV 钢制带轮模具的等离子喷涂强化工艺。

Cr12MoV 钢制带轮模具用于 1.5mm 厚钢板的拉深成形,工作过程中需承受巨大压力,模具表面受磨粒磨损严重,一副模具只能生产 0.4~0.5 万个零件。为了提高模具的使用寿命,选用一种具有良好的自熔性的铁合金粉末(成分的质量分数为 0.8% C, 16% Cr, 4.5% Si, 3.5% B, 15% Fe, 其余为 Ni; 150 目)为热喷涂材料,对模具进行等离子喷涂处理,涂层厚度为 0.4~0.5mm。

(1) 喷涂工艺参数 电弧电压为 75~80 V,电弧电流为 350~380A,等离子气流量为 $1.5 \sim 1.7 \text{ m}^3/\text{h}$,选粉机供给量为 $0.3 \sim 0.4 \text{ m}^3/\text{h}$,选粉量为 40g/min。

(2) 喷涂效果 经等离子喷涂处理以后,模具表面硬度由原来的 650~670HV 提高到了 780~820HV,耐磨性也有了很大提高,不但模具表面拉毛现象基本消除,而且生产 5 万件后仍未出现严重磨损,使用寿命提高了 10 倍以上。

实例 2 冷拔无缝钢管内模由于在工作时与钢管产生的强烈摩擦和挤压，故易发生严重的粘着磨损。内模原采用 45 钢渗碳后镀铬处理，使用寿命仅为 20 ~ 40 根。改为对内模表面采用氧乙炔焰喷涂镍基耐磨涂层后，可以拉拔无缝钢管 250 根，使用寿命提高了 6 倍以上。

实例 3 玻璃模具常用灰铸铁制作。因制造玻璃器皿时模具受到挤压、侵蚀和热疲劳等作用，而灰铸铁硬度较低，故模具的使用寿命也较低。如果采用火焰喷涂镍基自熔合金处理和修复玻璃模具，则可使其使用寿命提高 5 倍以上。

参考文献

- [1] 邵红红, 吴晶. 热处理检验与质量控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [2] 赵权, 虞传宝. 模具材料和热处理方法的选择 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1989.
- [3] 刘昌祺, 臧锁海, 范洪云. 模具的热处理和表面硬化技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [4] 雷廷权, 傅家琪. 热处理工艺方法 300 种 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [5] 蔡美良, 丁慧麟, 孟沪龙. 新编工模具钢金相热处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [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] 模具实用技术丛书编委会. 模具材料与使用寿命 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [8] 王德文. 新编模具实用技术 300 例 [M]. 北京: 科学出版社, 龙门书局, 1996.
- [9] 陈继民, 徐向阳, 肖荣诗. 激光现代化制造技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [10] 丁德刚. 火焰表面淬火 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [11] 胡家福, 李立均, 尤根华. 图解模具工入门 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [12] 徐进, 陈再枝, 林慧国, 等. 模具材料应用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [13] 康俊远, 李立明, 徐勇军. 模具材料与表面处理 [M]. 2 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2012.
- [14] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册 [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [15] 李泉华. 热处理技术 400 问解析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [16] 王忠诚, 李杨, 尚子民. 模具热处理实用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [17] 朱培瑜. 常见零件热处理变形与控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [18] 冯晓曾, 王家瑛, 何世禹. 提高模具寿命指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [19] 崔昆. 国内外模具用钢发展概况 [J]. 金属热处理, 2007, 32 (1): 1-11.
- [20] 于琳华, 殷秋菊, 林东玲. 表面强化技术在模具中的应用与发展 [J]. 热处理技术与装备, 2009, 30 (2): 6-8.
- [21] 李书常. 模具钢应用经验手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [22] 陆朝忠. 提高标准件模具寿命的途径 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [23] 冯晓曾, 李士玮, 武维扬, 等. 模具用钢和热处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [24] 金涤尘, 宋放之. 现代模具制造技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [25] 黄拿灿, 胡社军. 稀土表面改性及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [26] 李奇, 吴光辉, 张万宾, 等. 模具材料及热处理 [M]. 3 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2012.
- [27] 陈东, 褚作明, 金康, 等. 国内模具选材用材现状与发展 [J]. 金属热处理, 2009, 34 (11): 116.
- [28] 孙兴明, 高殿奎. 提高凸模寿命的途径 [J]. 金属热处理, 2005, 30 (4): 74-76.
- [29] 杨国正, 丁旗, 曹树昂. 提高 9SiCr 冷冲孔模使用寿命的等温淬火工艺研究 [J]. 机械工

- 人 (热加工), 2003 (10): 43-44.
- [30] 王金强, 初向光. 热挤压模的选材与复合热处理 [J]. 金属热处理, 2005, 30 (1): 84-85.
- [31] 廖茂. 摆辗成形模具失效分析及工艺优化 [J]. 金属加工 (热加工), 2011 (11): 54-55.
- [32] 薄鑫涛, 周珊珊. UCON E 型淬火介质在大模块工件上的应用 [J]. 金属热处理, 2006, 31 (9): 87-90.
- [33] 左传付, 李聚群, 杨晓红, 等. 循环超细化热处理提高精冲模具寿命的研究 [J]. 金属热处理, 2008, 33 (4): 47-49.
- [34] 李威, 李宏宇. 采用低温短时淬火法提高 CrWMn 模具使用寿命 [J]. 金属加工 (热加工), 2012 (7): 45-46.
- [35] 艾明平. 大型 5CrNiMo 钢锤锻模具工艺改进 [J]. 金属热处理, 2009, 34 (12): 87-89.
- [36] 唐明华, 刘志义, 厉春元, 等. Cr12MoV 钢滚丝轮等温淬火工艺 [J]. 金属热处理, 2009, 34 (3): 54-57.
- [37] 杨清泉. 汽车半轴锻造模具热处理工艺的改进 [J]. 金属加工 (热加工), 2008 (3): 43.
- [38] 魏兴钊, 朱伟恒, 朱繁康, 等. 4Cr5MoSiV1 钢制热作模具若干失效形式与对策探讨 [J]. 热处理技术与装备, 2009, 30 (3): 19-29.
- [39] 王长生, 杨蕴林, 罗美华. 耐火砖模具的稀土高浓度渗碳 [J]. 洛阳工学院学报, 2002, 23 (4): 44-46.
- [40] 刘英坤, 朱峰, 伍超群. 铜合金模具表面处理技术简介 [J]. 热处理技术与装备, 2011, 32 (3): 20-23.
- [41] 于波. 新型冷作模具钢的性能及热处理 [J]. 热处理技术与装备, 2011, 32 (5): 1-3.
- [42] 劳动部培训司. 物理金相实验工 [M]. 北京: 中国劳动出版社, 1995.
- [43] 《钢的热处理裂纹和变形》编写组. 钢的热处理裂纹和变形 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1978.

本书系统地介绍了模具热处理工艺技术和检验方法，对模具热处理生产中经常出现的缺陷及使用中常见的失效形式进行了分析，并提出了预防与改进措施。

本书主要包括：

- ◎模具材料概述
- ◎模具材料与热处理
- ◎模具热处理质量控制与检验
- ◎模具热处理常见缺陷分析与对策
- ◎模具的失效分析与对策
- ◎提高模具使用寿命的途径与方法

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 / 热处理、模具

ISBN 978-7-111-46915-5

策划编辑◎陈保华

ISBN 978-7-111-46915-5



9 787111 469155 >

定价：56.00元