

金属材料 物理性能手册

李立碑 孙玉福 主编



金属材料物理性能手册

主 编	李立碑	孙玉福				
副主编	苗晋琦	肖树龙				
参 编	徐丽娟	陈 永	向 嵩	赵 旭	李 莎	
	严咏志	李立凤	王铁骊	吴珊珊	张素红	
	李怀武	宋月鹏	高见峰	孙华为	高 玉	
	翟 震	潘继民	丛康丽	夏 静	陈 伟	
	赵 丹	张冠宇	王志刚	隋方飞	李立里	
	魏晓龙	李 浩	侯晓丽	张兵权	负东海	
	邓 晶	张靓颖	颜新奇	杨 娟	李二兴	
主 审	刘胜新					



机 械 工 业 出 版 社

本书全面系统地介绍了金属材料各种物理性能的测试方法,并归纳出了常用金属材料的物理性能数据。全书内容包括金属材料的物理性能及相关知识、金属材料的密度、金属材料的比热容、金属材料的热膨胀系数、金属材料的热导率、金属材料的电阻性能参数、金属材料的热电效应特征参数、金属材料的磁性参数、金属材料的弹性参数、金属材料的声学性能特征参数、物理性能分析方法的综合评述、常用钢铁材料的物理性能、常用有色金属材料的物理性能以及其他金属材料的物理性能。本书内容系统全面,叙述详尽清晰,数据齐全可靠,查阅方便快捷,具有一定的实用性、综合性、先进性和可靠性。

本书可供从事工程设计、材料研究、质量检测、材料营销等工作的技术人员参考,也可作为高等院校及职业培训学校相关专业的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料物理性能手册/李立碑,孙玉福主编. —北京:机械工业出版社, 2011.5

ISBN 978-7-111-33830-7

I. ①金… II. ①李… ②孙… III. ①金属材料-物理性能-手册 IV. ①TG14-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第046750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 崔滋恩

版式设计:霍永明 责任校对:刘秀丽 吴美英

封面设计:姚毅 责任印制:杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2011年5月第1版·第1次印刷

169mm×239mm·33印张·660千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-33830-7

定价:68.00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

策划编辑:(010)88379734

社服务中心:(010)88361066

网络服务

销售一部:(010)68326294

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前言

金属材料广泛应用于工业生产各领域，是现代科学技术发展和国民经济建设的重要支柱，是工业生产和生活中必不可少的物质基础。金属材料的物理性能是确保产品安全和使用寿命的最主要依据，在材料选择的合理性、材料应用的优化性等方面发挥着越来越大的作用。

金属材料物理性能的测试方法是工程技术人员必备的基础知识，常用金属材料的物理性能数据是工程技术人员经常查阅的技术数据。为了帮助读者掌握金属材料各种物理性能的测试方法，使读者能快速、准确地查阅常用金属材料的各种物理性能数据，进而为工程实践中的生产、设计、材料选用及选购提供科学的依据，我们编写了这本工具书。

本书首先全面系统地介绍了金属材料的各种物理性能的试验原理、试样的制备、试验仪器设备、试验步骤、操作技巧以及试验数据处理的方法，然后从各类标准中归纳出了常用金属材料的物理性能数据，主要内容包括金属材料的物理性能及相关知识、金属材料的密度、金属材料的比热容、金属材料的热膨胀系数、金属材料的热导率、金属材料的电阻性能参数、金属材料的热电效应特征参数、金属材料的磁性参数、金属材料的弹性参数、金属材料的声学性能特征参数、物理性能分析方法的综合评述、常用钢铁材料的物理性能、常用有色金属材料的物理性能以及其他金属材料的物理性能。本书内容系统全面，叙述详尽清晰，数据齐全可靠，查阅方便快捷，具有一定的实用性、综合性、先进性和可靠性。

本书可供从事工程设计、材料研究、质量检测、材料营销等工作的技术人员参考，也可作为高等院校及职业培训学校相关专业的参考书。

本书由李立碑、孙玉福任主编，苗晋琦、肖树龙任副主编，参加编写的有徐丽娟、陈永、向嵩、赵旭、李莎、严咏志、李立凤、王铁骊、吴珊珊、张素红、李怀武、宋月鹏、高见峰、孙华为、高玉、翟震、潘继民、丛康丽、夏静、陈伟、赵丹、张冠宇、王志刚、隋方飞、李立里、魏晓龙、李浩、侯晓丽、张兵权、负东海、邓晶、张靓颖、颜新奇、杨娟、李二兴，刘胜新教授对全书进行了详细审阅。

在本书的编写过程中，参考了国内外同行的大量文献资料，谨向有关人员表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，错误和纰漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编者

目 录

前言

第 1 章 金属材料的物理性能及相关知识	1
1.1 概述	1
1.2 物理性能测试在材料研究中的应用	1
1.3 术语及数值修约规则	3
1.3.1 术语和定义	3
1.3.2 数值修约规则	3
1.3.3 极限数值的表示和判定	5
1.4 试验数据的处理和误差分析	7
1.4.1 误差的定义和分类	7
1.4.2 直接测定量的误差表示法	10
第 2 章 金属材料的密度	12
2.1 密度的基本知识	12
2.1.1 常用密度术语	12
2.1.2 影响密度的因素	14
2.2 密度的测量方法	16
2.2.1 密度测定方法的分类	16
2.2.2 质量的测定	17
2.2.3 流体静力学法	19
2.2.4 密度瓶法	22
2.2.5 浮计法	24
2.2.6 X 射线衍射法	24
2.2.7 放射性同位素法	25
2.2.8 松装密度的测定	26
2.2.9 振实密度的测定	26
2.3 常用金属材料密度的测定	27
2.3.1 贵金属及其合金密度的测试方法	27
2.3.2 钨、钼条密度的测量方法	29
2.3.3 电工钢片和钢带密度的测定方法	31
2.3.4 铝、镁及其合金粉末松装密度测定	35
2.3.5 磁性氧化物粉末振实密度的测定	39
2.4 常用金属材料的密度	40
2.4.1 金属及半金属元素的密度	40

2.4.2 铁合金的密度及堆密度	41
2.4.3 常用钢铁材料的密度	42
2.4.4 常用有色金属材料的密度	42
第3章 金属材料的比热容	47
3.1 比热容的基本知识	47
3.2 比热容的测量方法	47
3.2.1 真空绝热法	47
3.2.2 铜卡计下落法	49
3.2.3 通电加热脉冲法	50
3.2.4 示差扫描量热法	51
3.3 典型元素的比热容	52
第4章 金属材料的热膨胀系数	56
4.1 热膨胀系数的基础知识	56
4.1.1 热膨胀系数的定义	56
4.1.2 影响热膨胀系数的因素	59
4.1.3 热膨胀系数与其他物理性能的关系	60
4.2 热膨胀系数的测量方法	63
4.2.1 推杆式膨胀仪测量法	64
4.2.2 光杠杆法	71
4.2.3 千分表法	75
4.2.4 差动变压器法	76
4.2.5 光干涉法	79
4.2.6 直接观测法	81
4.2.7 X射线法	82
4.3 常用金属材料的热膨胀系数	84
4.3.1 室温以下金属元素的瞬时线胀系数	84
4.3.2 高温下金属元素的瞬时线胀系数	85
4.3.3 常用金属及合金的线胀系数	87
第5章 金属材料的热导率	92
5.1 热导率的基本知识	92
5.1.1 热传导的基本定律及概念	92
5.1.2 热导率与电导率的关系	94
5.1.3 影响热导率的因素	95
5.2 热导率的测量方法	96
5.2.1 稳态纵向热流法	97
5.2.2 稳态径向热流法	100
5.2.3 稳态直接通电加热法	101
5.2.4 非稳态周期热流法	104

5.2.5 非稳态瞬态热流法	105
5.3 典型元素的热导率和热扩散率	106
第6章 金属材料的电阻性能参数	112
6.1 电阻性能的基本知识	112
6.1.1 基本概念	112
6.1.2 电阻性能的常用数据	115
6.2 电阻的测量方法	117
6.2.1 伏安法测量电阻	117
6.2.2 数字万用表法测量电阻	117
6.2.3 惠斯顿电桥法测量电阻	118
6.2.4 开尔文电桥法测量电阻	119
6.2.5 四探针法测量电阻	120
6.3 常用金属材料电阻参数的测量方法	121
6.3.1 金属材料电阻率的测量方法	121
6.3.2 纯金属电阻率与剩余电阻比的涡流衰减测量方法	126
6.3.3 贵金属及其合金材料质量电阻系数的测量方法	128
6.3.4 金属材料电阻温度特征参数的测量方法	130
6.3.5 电线电缆导体直流电阻的测量方法	133
6.3.6 电线电缆表面电阻率的测量方法	136
6.3.7 印制导线电阻的测量方法	138
6.3.8 烧结金属材料和硬质合金电阻率的测定	139
6.3.9 铆钉型触头用线材电阻率的测量	141
6.3.10 铝箔直流电阻的测定	142
6.3.11 金属材料电阻应变灵敏系数的测量方法	143
6.3.12 铋化钢单晶电阻率及霍尔系数的测量方法	144
6.3.13 铝合金电导率的涡流测量方法	160
第7章 金属材料的热电效应特征参数	165
7.1 金属材料的热电效应基础知识	165
7.2 热电位差	167
7.3 影响热电位的因素	169
7.4 热电位的测量	172
7.4.1 常用测量仪器	172
7.4.2 工业标准检测方法	173
7.4.3 总热电位的测量	175
7.4.4 贵金属热电偶丝热电势的测量	178
7.4.5 廉金属热电偶丝热电势的测量	181
7.4.6 贵金属合金对铂及对铜热电势的测量方法	183
7.4.7 铂铑热电偶细丝热电势的测量方法	186

7.4.8 精密电阻合金热电动势率的测试方法	189
7.5 热电偶的热电动势率	191
第8章 金属材料的磁性参数	194
8.1 金属材料磁性的基础知识	194
8.1.1 磁学特性和磁学术语	194
8.1.2 磁性材料的分类	200
8.1.3 影响金属材料磁性的因素	212
8.2 磁场的产生与测量	213
8.2.1 磁场的产生与测量方法概述	213
8.2.2 磁通法测量磁场	214
8.2.3 霍尔效应法测量磁场	214
8.3 静态磁性的测量方法	215
8.3.1 闭磁路试样的冲击测量法	216
8.3.2 开磁路试样的冲击测量法	217
8.3.3 振动样品磁强计法	218
8.3.4 磁秤法	219
8.4 动态磁性的测量方法	219
8.4.1 指示仪表测量法	219
8.4.2 示波器法	220
8.4.3 电桥法	221
8.5 本征磁性的测量方法	222
8.5.1 磁晶各向异性常数的测量	222
8.5.2 磁致伸缩系数的测量	223
8.5.3 居里温度的测量	225
8.6 常用金属材料磁性参数的测定	226
8.6.1 软磁材料直流磁性能的环形试样测量方法	226
8.6.2 软磁材料直流磁性能的磁导计测量方法	232
8.6.3 软磁材料交流磁性能的环形试样测量方法	238
8.6.4 软磁材料矫顽力的抛移测量方法	246
8.6.5 非晶纳米晶软磁合金交流磁性能的测量方法	249
8.6.6 矫顽力小于或等于 600kA/m 永磁材料的磁性能测量方法	252
8.6.7 矫顽力大于 600kA/m 永磁材料的磁性能测量方法	257
8.6.8 永磁材料磁性能温度系数测量方法	258
8.6.9 弱磁材料的磁导率测量方法	260
8.6.10 在开磁路中测量磁性材料矫顽力的方法	262
8.6.11 用单片测试仪测量电工钢片(带)磁性能的方法	263
8.6.12 用爱泼斯坦方圈测量电工钢片(带)磁性能的方法	267
8.7 常用金属材料的磁性能	273

第 9 章 金属材料的弹性参数	280
9.1 弹性的基础知识	280
9.1.1 金属材料弹性的术语	280
9.1.2 弹性与胡克常数	281
9.1.3 弹性与原子结构的关系	283
9.1.4 弹性的技术常数	284
9.1.5 弹性技术常数之间的相互关系	285
9.1.6 影响弹性技术常数的因素	286
9.2 弹性模量的测量方法	290
9.2.1 自由弯曲共振法	291
9.2.2 圆盘振子法	306
9.2.3 金属带材弹性性能的测定方法	311
9.2.4 烧结金属材料和硬质合金的弹性模量测定方法	328
9.3 黏弹性	328
9.3.1 滞弹性	329
9.3.2 内耗	329
9.3.3 弛豫谱	330
9.3.4 内耗的量度	333
9.3.5 内耗的测量方法	334
9.4 常用金属材料的弹性技术常数	335
第 10 章 金属材料的声学性能特征参数	337
10.1 声学性能概述	337
10.1.1 声学性能参数	337
10.1.2 固体中声波的波形	338
10.1.3 声速与材料弹性常数的关系	338
10.2 声速的测量方法	339
10.2.1 脉冲反射法	339
10.2.2 超声干涉法	340
10.2.3 谐波法	341
10.2.4 相位比较法	342
10.2.5 脉冲重叠法	343
10.2.6 声共振法	344
10.2.7 不依赖于厚度的超声速度计测量方法	345
10.2.8 脉冲回波双晶探头法	346
10.2.9 测量材料声速的其他替代方法	348
10.3 球墨铸铁声速的测定	349
10.3.1 所用仪器设备	349
10.3.2 脉冲反射法	350

10.3.3 穿透法	350
10.3.4 声速测量在铸铁上的应用	351
10.3.5 测量注意事项	351
10.4 工程材料中的声速	352
第 11 章 物理性能分析方法的综合评述	354
11.1 各种物理性能分析方法的特点及应用范围	354
11.2 物理性能分析方法的选用原则	355
第 12 章 常用钢铁材料的物理性能	356
12.1 铁合金的物理性能	356
12.1.1 粉末冶金用还原铁粉的物理性能	356
12.1.2 电焊条用还原铁粉的松装密度、流动性、粒度组成的要求	356
12.1.3 电磁纯铁的电磁性能	357
12.2 电工钢带的物理性能	357
12.2.1 中频用电工晶粒取向钢带的磁性	357
12.2.2 中频用电工无取向钢带的磁性	358
12.2.3 普通级取向电工钢带(片)的磁特性	359
12.2.4 高磁导率级取向电工钢带(片)的磁特性	359
12.2.5 无取向电工钢带(片)的磁特性	360
12.3 不锈钢和耐热钢的物理性能	361
12.4 精密合金的物理性能	368
12.4.1 发条用高弹性 3J9 合金的物理性能	368
12.4.2 正温度系数恒弹性合金 3J63 的物理性能	369
12.4.3 低膨胀铁镍及铁镍钴合金的物理性能	369
12.4.4 抗振耐磨轴尖用 3J40 合金的物理性能	370
12.4.5 定膨胀封接铁镍钴合金的物理性能	371
12.4.6 定膨胀封接铁镍铬及铁镍合金的物理性能	372
12.4.7 变形永磁钢的物理性能	372
12.4.8 变形铁铬钴永磁合金的物理性能	373
12.4.9 玻封铁铬 4J28 合金的物理性能	375
12.4.10 轴尖用 3J22 合金丝材的物理性能	375
12.4.11 烧结钕铁硼永磁材料的物理性能	376
12.4.12 热双金属带材的物理性能	377
12.4.13 铁钴钒永磁合金热处理后的磁性能	382
12.4.14 高电阻电热合金软态丝材的物理性能	382
12.4.15 高饱和、磁温度补偿、耐蚀、铁铝、恒磁导率软磁合金	391
12.4.16 高硬度、高电阻、高磁导合金带材	394
12.4.17 弹性元件用 3J1 和 3J53 合金的物理性能	397
12.4.18 弹性元件用 3J21 合金的物理性能	398

12.4.19	稀土钴永磁材料的物理性能	398
12.4.20	铽镨铁大磁致伸缩材料的物理性能	401
12.4.21	频率元件用恒弹性合金 3J53 和 3J58 的物理性能	404
12.4.22	频率元件用恒弹性合金 3J60 丝材的物理性能	405
12.4.23	磁滞合金的物理性能	405
12.4.24	镍铬电阻合金丝的物理性能	407
12.4.25	镍铬基精密电阻合金的物理性能	410
12.4.26	锰铜、康铜精密电阻合金线、片及带材的物理性能	413
12.4.27	热电偶用补偿导线合金丝的物理性能	417
12.4.28	非晶、纳米晶软磁合金带材的物理性能	423
12.4.29	变压器用恒弹性合金棒材的物理性能	425
12.4.30	弹性敏感元件用合金带材的物理性能	426
12.4.31	磁头用软磁合金冷轧带材的物理性能	426
12.4.32	无磁定膨胀瓷封镍基合金的物理性能	428
12.4.33	手表游丝用恒弹性合金 3J53Y 丝材的物理性能	429
12.4.34	新康铜电阻合金的物理性能	430
12.4.35	锰铜精密电阻合金的物理性能	433
12.4.36	粘结钕铁硼永磁材料的物理性能	435
12.4.37	快淬钕铁硼永磁粉的物理性能	436
12.4.38	铁-铜镍热电偶丝的物理性能	437
12.4.39	发热电阻合金的物理性能	438
12.4.40	玻封铁镍铜合金 4J41 的物理性能	440
12.4.41	线纹尺用定膨胀铁镍合金 4J58 的物理性能	440
12.4.42	无磁磁尺基体用铁锰合金 4J59 的物理性能	441
第 13 章 常用有色金属材料的物理性能		442
13.1	铝及铝合金的物理性能	442
13.1.1	电工用铝及铝合金扁线的电阻率	442
13.1.2	电工圆铝线的电性能	442
13.1.3	架空绞线用铝-镁-硅合金圆线的物理性能	442
13.1.4	一般工业用铝及铝合金锻件的电导率	443
13.1.5	电子陶瓷用氧化铝粉体材料的物理性能	443
13.1.6	电子陶瓷用氮化铝粉的物理性能	444
13.1.7	空气雾化铝粉的产品特性	444
13.1.8	球磨铝粉的产品特性	445
13.1.9	铝镁合金粉的牌号、粒度及用途	446
13.1.10	氮气雾化铝粉的牌号及粒度	446
13.1.11	铝中间合金锭的化学成分及物理特性	448
13.1.12	铝及铝合金导体的电导率	448

13.1.13	铝及铝合金箔的直流电阻	449
13.1.14	铝及铝合金花纹板的密度	449
13.1.15	铝及铝合金拉制圆线材的电阻率和电导率	449
13.1.16	漆包铝圆绕组线的物理性能	449
13.1.17	铝电解电容器用电极箔的物理性能	451
13.2	铜及铜合金的物理性能	451
13.2.1	引线框架用铜及铜合金的物理性能	451
13.2.2	无氧铜板和带材的电导率	452
13.2.3	电缆用铜带的电性能	452
13.2.4	导电用铜板和条的电性能	453
13.2.5	连铸结晶器用铜板的物理性能	453
13.2.6	铜及铜合金板材	453
13.2.7	电解铜箔的电性能	454
13.2.8	电缆用无缝铜管的电性能	454
13.2.9	导电用无缝圆形铜管的电性能	454
13.2.10	连铸圆坯结晶器铜管的镀层材料及其性能	455
13.2.11	电力牵引用铜及铜合金接触线的电阻率	455
13.2.12	电工用铜及铜合金母线的电性能	456
13.2.13	电工用铜线坯的电阻率	456
13.2.14	电工软铜绞线的物理性能	456
13.2.15	电工软铜天线的性能	460
13.2.16	电工软铜电刷线的性能	460
13.2.17	电工圆铜线的电阻率	462
13.2.18	电气化铁道用铜及铜合金接触线的电阻率	462
13.2.19	镀锡圆铜线的电阻率	462
13.2.20	镀镍圆铜线的电阻率	462
13.2.21	电解铜粉的产品特性	462
13.2.22	雾化铜粉的物理性能	463
13.2.23	雾化 CuSn10 青铜粉的物理性能	463
第 14 章	其他金属材料的物理性能	464
14.1	镁合金的物理性能	464
14.1.1	镁合金牺牲阳极的电化学性能	464
14.1.2	雾化镁粉的粒度及松装密度	464
14.1.3	纳米氢氧化镁的物理性能	465
14.1.4	工业活性轻质氧化镁的物理性能	465
14.2	锌、钛合金的物理性能	466
14.2.1	锌粉的粒度	466
14.2.2	烟花用钛粉的粒度要求	466

14.3 镍合金的物理性能	467
14.3.1 电池用泡沫镍的物理性能	467
14.3.2 电解镍粉的粒度	467
14.3.3 电解镍粉的松装密度	467
14.3.4 纳米镍粉的物理性能	467
14.3.5 羰基镍粉的物理性能	468
14.3.6 球形氢氧化镍的物理性能	468
14.3.7 球形氢氧化镍的放电平台率	468
14.3.8 镍基喷涂合金粉的粒度范围	469
14.3.9 镍基喷涂合金粉的流动性	469
14.4 铅合金的物理性能	469
14.4.1 圆形铅熔丝的安全电流及特性	469
14.4.2 扁形铅熔丝的安全电流及特性	470
14.4.3 锡铅钎料的物理性能	471
14.5 稀有金属及贵金属的物理性能	472
14.5.1 稀土抛光粉的牌号、化学成分及物理性能	472
14.5.2 灯用稀土三基色荧光粉	473
14.5.3 钨板的密度	475
14.5.4 钨粉的粒度范围及氧含量	475
14.5.5 碳化钨粉的物理性能	475
14.5.6 钼粉的产品特性	477
14.5.7 碳化钼粉的粒度	477
14.5.8 吸气用钼铝合金粉的型号、粒度范围及用途	477
14.5.9 区熔锗锭的电性能	478
14.5.10 还原锗锭的电性能	478
14.5.11 锗单晶的电阻率参数	478
14.5.12 钽基厚膜电阻浆料烧成后的电性能	478
14.5.13 超细水合二氧化钽粉的性能	479
14.5.14 超细金粉的性能	479
14.5.15 超细氧化钼粉的性能	479
14.5.16 银钯厚膜导体浆料的物理性能	480
14.5.17 银钯浆料烧成膜后的性能	480
14.5.18 超细铂粉的产品特性	480
14.5.19 铂电极浆料的固体含量、细度及粘度	480
14.5.20 电阻温度计用铂丝的物理性能	480
14.5.21 铂铑热电偶丝的物理性能	481
14.5.22 片状银粉的特性	487
14.5.23 银浆的物理性能	488

14.5.24 保险管用银铜合金丝的每米电阻	489
14.6 复合材料的物理性能	489
14.6.1 电力牵引用钢铝复合接触线的性能	489
14.6.2 电工用铝包钢线的物理常数	490
14.6.3 电工用铝包钢线的标称密度	490
14.6.4 铝包镍复合粉的物理性能	490
14.6.5 镍包氧化铝复合粉的物理性能	491
14.6.6 镍包铜复合粉的物理性能	491
14.6.7 镍包铝复合粉的物理性能	491
14.6.8 镍包铬复合粉的物理性能	492
附录	493
附录 A 常用物理量名称及符号	493
附录 B 常用法定计量单位及其换算	497
附录 C 化学元素常规物理性能	505
附录 D 常用金属材料物理性能相关标准	511
参考文献	513

第 1 章 金属材料的物理性能及相关知识

1.1 概述

物理性能通常包括力学、热学、电学、磁学、光学、声学 and 原子物理等方面的性能指标，是材料基本特性在这些方面量值化的表现，是衡量材料优劣的具体数据。

金属材料按使用要求分为结构材料和功能材料两类。

1) 结构材料是以强度为主要性能指标，以热膨胀系数、热导率及弹性模量等物理性能为辅助性能指标的材料。

2) 功能材料是指具有特定的光、电、磁、声、热、弹性等性能的各类材料。

无论哪种材料，物理性能都是确保产品安全和使用寿命的主要依据，并在产品质量的保证、材料选择的合理性、材料应用的优化性等方面发挥着巨大的作用。

1.2 物理性能测试在材料研究中的应用

根据物理性能的变化规律，可以研究材料的成分、组织、结构等的变化情况。

1. 研究金属密度与化学键的关系

不同的晶体结构有不同的点阵常数和单位晶胞原子数，因而密度也有所不同。金属熔化时体积的变化如表 1-1 所示，从中可以看出，在熔化时非过渡族金属的体积变化与结晶类型有关，具有最致密点阵的金属在熔化时表现出最大的体积增加。随着致密度的减小，熔化的体积效应也在减小。位于金属与非金属之间的元素 Sb、Bi、Ga 和 Si 在熔化时变得更为致密，液态金属的配位数增加，从占优势的共价键结合向金属键结合转变，其结果是体积收缩，密度增大。

表 1-1 金属熔化时体积的变化

金属	$\Delta V/V(\%)$	空间点阵类型	配位数	金属	$\Delta V/V(\%)$	空间点阵类型	配位数
Cu	+4.25	面心立方	12	Pb	+3.38	面心立方	12
Ag	+3.4	面心立方	12	Mg	+4.1	密排六方	6
Au	+5.03	面心立方	12	Zn	+4.7	密排六方	6
Al	+6.26	面心立方	12	Cd	+4.72	密排六方	6

(续)

金属	$\Delta V/V(\%)$	空间点阵类型	配位数	金属	$\Delta V/V(\%)$	空间点阵类型	配位数
Na	+2.5	体心立方	8	Ga	-3.24	斜方晶系	1
K	+2.5	体心立方	8	Sn	+2.6	正交晶系	3
Rb	+2.5	体心立方	8	Si	-10	金刚石型	4
Cs	+2.5	体心立方	8	AlSb	-1.5	金刚石型	4
Sb	-0.95	菱面晶系	3	MgSn	-2.2	萤石型	4
Bi	-3.3	菱面晶系	3	Mg ₂ Pb	-2.6	萤石型	4

2. 建立合金相图

热分析法是最基本的方法，将合金缓慢地加热或冷却，每经过相等的一段时间间隔测量一次温度。当合金发生相变（即熔化、凝固及固态相变等）时，合金的熔、比热容将明显发生变化，此时会发生吸热或放热反应，在加热或冷却曲线上出现折点或水平线段，根据这些特征数据可绘制出相图。

3. 研究有序-无序的转变

利用热分析方法，在热容-温度曲线上研究吸热或放热反应，研究有序-无序的转变。例如，当铜锌合金的组分在某定点时，可形成具有体心立方点阵的固溶体，它在低温时呈有序状态，随着温度的增高逐渐转变为无序状态，这种转变是吸热过程，可以在热容-温度曲线上明显地反映出来。

4. 研究合金时效

低温时效时，由于时效初期溶质原子在基体中发生聚集，从而形成不均匀固溶体，使电阻升高。高温时效时，由于从固溶体中析出其他相，电阻可能会降低。可以从电阻的变化阐明合金内部存在着的组织状态的变化。

5. 研究马氏体的回火

热电势的高低可以反映出马氏体中碳含量的多少，从热电势的变化可分析出马氏体在回火过程中的分解情况。

用电阻分析法也可研究回火过程中组织的变化。如 780℃ 淬火后的碳素钢，在 110℃ 回火时电阻开始急剧下降，因为这时马氏体已开始分解。在 230℃ 回火时电阻发生更急剧的降低，这是残留奥氏体分解的结果。在高于 300℃ 回火时，电阻则很少变化，说明固溶体分解已结束。

6. 研究等温转变

用热分析法、膨胀分析法和磁性法都可建立钢的等温转变曲线图和连续冷却曲线图，可以研究等温转变过程中的各种规律。

1.3 术语及数值修约规则

1.3.1 术语和定义

(1) 数值修约 通过省略原数值的最后若干位数字, 调整所保留的末位数字, 使最后得到的值最接近原数值的过程叫做数值修约。经数值修约后的数值称为(原数值的)修约值。

(2) 修约间隔 修约值的最小数值单位称为修约间隔。修约间隔的数值一经确定, 修约值即为该数值的整数倍。如指定修约间隔为 0.1, 修约值应在 0.1 的整数倍中选取, 相当于将数值修约到一位小数。如指定修约间隔为 100, 修约值应在 100 的整数倍中选取, 相当于将数值修约到“百”数位。

(3) 极限数值 标准(或技术规范)中规定考核的以数量形式给出且符合该标准(或技术规范)要求的指标数值范围的界限值即为极限数值。

1.3.2 数值修约规则

1. 确定修约间隔

- 1) 指定修约间隔为 10^{-n} (n 为正整数), 或指明将数值修约到 n 位小数。
- 2) 指定修约间隔为 1, 或指明将数值修约到“个”数位。
- 3) 指定修约间隔为 10^n (n 为正整数), 或指明将数值修约到 10^n 数位, 或指明将数值修约到十、百、千……数位。

2. 进舍规则

1) 拟舍弃数字的最左一位数字小于 5, 则舍去, 保留其余各位数字不变。例如, 将 12.1498 修约到个数位, 得 12; 将 12.1498 修约到一位小数, 得 12.1。

2) 拟舍弃数字的最左一位数字大于 5, 则进一, 即保留数字的末位数字加 1。例如, 将 1268 修约到百数位, 得 13×10^2 (特定场合可写为 1300)。

3) 拟舍弃数字的最左一位数字是 5, 且其后有非 0 数字时进一, 即保留数字的末位数字加 1。例如, 将 10.5002 修约到个数位, 得 11。

4) 拟舍弃数字的最左一位数字为 5, 且其后无数字或皆为 0 时, 若所保留的末位数字为奇数 (1、3、5、7、9) 则进一, 即保留数字的末位数字加 1; 若所保留的末位数字为偶数 (0、2、4、6、8), 则舍去。例如, 修约间隔为 0.1 时, 拟修约数值 1.050 修约为 1.0×10^{-1} 。

5) 负数修约时, 先将它的绝对值按 1) ~ 4) 的规定进行修约, 然后在所得值前面加上负号。例如, 将 -0.0365 修约到三位小数为 -36×10^{-3} 。

6) 不得多次连续修约。拟修约数字应在确定修约间隔或指定修约数位后一次

修约获得结果，不得多次连续修约。例如，修约 97.46，修约间隔为 1。正确的做法：97.46→97；不正确的做法：97.46→97.5→98。

3. 修约程序

在具体实施中，有时测试与计算部门先将获得数值按指定的修约数位多一位或几位报出，而后由其他部门判定。为避免产生连续修约的错误，应按下述步骤进行。

1) 报出数值最右的非零数字为 5 时，应在数值右上角加“+”或“-”，或不加符号，分别表明已进行过舍、进或未舍未进。例如：16.50⁺表示实际值大于 16.50，经修约舍弃后为 16.50；16.50⁻表示实际值小于 16.50，经修约进一为 16.50。

2) 如需对报出值进行修约，当拟舍弃数字的最左一位数字为 5，且其后无数字或皆为零时，数值右上角有“+”者进一，有“-”者舍去。数字修约到个数位示例如表 1-2 所示。

表 1-2 数字修约到个数位示例

实测值	报出值	修约值	实测值	报出值	修约值
15.4546	15.5 ⁻	15	-16.5203	-16.5 ⁺	-17
-15.4546	-15.5 ⁻	-15	17.5000	17.5	18
16.5203	16.5 ⁺	17			

4. 0.5 单位修约与 0.2 单位修约

(1) 0.5 单位修约（半个单位修约） 0.5 单位修约是指按指定修约间隔对拟修约的数值 0.5 单位进行的修约。0.5 单位修约的方法如下：将拟修约数值 X 乘以 2，按指定修约间隔对 $2X$ 进行修约，所得数值（小于 $2X$ 修约值）再除以 2。按 0.5 单位修约到个数位的示例如表 1-3 所示。

(2) 0.2 单位修约 0.2 单位修约是指按指定修约间隔对拟修约的数值 0.2 单位进行的修约。0.2 单位修约的方法如下：将拟修约数值 X 乘以 5，按指定修约间隔对 $5X$ 进行修约，所得数值（ $5X$ 修约值）再除以 5。按 0.2 单位修约到百数位的示例如表 1-4 所示。

表 1-3 按 0.5 单位修约到个数位的示例

拟修约数值 X	$2X$	$2X$ 修约值	X 修约值
60.25	120.50	120	60.0
60.38	120.76	121	60.5
60.28	120.56	121	60.5
-60.75	-121.50	-122	-61.0

表 1-4 按 0.2 单位修约到百数位的示例

拟修约数值 X	$5X$	$5X$ 修约值	X 修约值
830	4150	4200	840
842	4210	4200	840
832	4160	4200	840
-930	-4650	-4600	-920

1.3.3 极限数值的表示和判定

1. 书写极限数值的一般原则

1) 规定考核的以数量形式给出的指标或参数等，应当规定极限数值。极限数值表示符合要求数值范围的界限值，它通过给出最小极限值和（或）最大极限值，或给出基本数值与极限偏差等方式来表达。

2) 极限数值的表示形式及书写位数应适当，其有效数字应全部写出。书写位数表示的精确程度应能保证产品或其他对象的性能和质量。

2. 表示极限数值的用语

1) 表达极限数值的基本用语及符号如表 1-5 所示。

表 1-5 表达极限数值的基本用语及符号

基本用语	符号	特定情形下的基本用语			注
大于 A	$>A$	—	多于 A	高于 A	测定值或计算值恰好为 A 值时不符合要求
小于 A	$<A$	—	少于 A	低于 A	测定值或计算值恰好为 A 值时不符合要求
大于或等于 A	$\geq A$	不小于 A	不少于 A	不低于 A	测定值或计算值恰好为 A 值时符合要求
小于或等于 A	$\leq A$	不大于 A	不多于 A	不高于 A	测定值或计算值恰好为 A 值时符合要求

注：A 为极限数值。

2) 基本用语可以组合使用来表示极限值范围。对特定的考核指标 X，允许采用如表 1-6 所示的用语和符号，同一技术文件中一般只应使用一种符号表示。

表 1-6 特定的考核指标 X 允许采用的表达极限数值的组合用语及符号

组合基本用语	组合允许用语	符 号		
		表示方式 I	表示方式 II	表示方式 III
大于或等于 A 且小于或等于 B	从 A 到 B	$A \leq X \leq B$	$A \leq \cdot \leq B$	$A \sim B$
大于 A 且小于或等于 B	超过 A 到 B	$A < X \leq B$	$A < \cdot \leq B$	$>A \sim B$
大于或等于 A 且小于 B	至少 A 不足 B	$A \leq X < B$	$A \leq \cdot < B$	$A \sim < B$
大于 A 且小于 B	超过 A 不足 B	$A < X < B$	$A < \cdot < B$	—

3) 基本数值 A 带有绝对极限上偏差值 $+b_1$ 和绝对极限下偏差值 $-b_2$ ，指从 $A - b_2$ 到 $A + b_1$ 符合要求，记为 $A_{-b_2}^{+b_1}$ 。当 $b_1 = b_2 = b$ 时， $A_{-b_2}^{+b_1}$ 可简记为 $A \pm b$ 。

4) 基本数值 A 带有相对极限上偏差值 $+b_1\%$ 和相对极限下偏差值 $-b_2\%$ ，指实测值或其计算值 R 对于 A 的相对偏差值 $[(R - A)/A]$ 从 $-b_2\%$ 到 $+b_1\%$ 符合要求，记为 $A_{-b_2}^{+b_1}\%$ 。当 $b_1 = b_2 = b$ 时， $A_{-b_2}^{+b_1}\%$ 可记为 $A(1 \pm b\%)$ 。

5) 对基本数值 A，若极限上偏差值 $+b_1$ 和（或）极限下偏差值 $-b_2$ 使得 $A + b_1$ 和（或） $A - b_2$ 不符合要求，则应附加括号说明，写成 $A_{-b_2}^{+b_1}$ （不含 b_1 和 b_2 ）或

$A_{-b_2}^{+b_1}$ (不含 b_1) 或 $A_{-b_2}^{+b_1}$ (不含 b_2)。

3. 测定值或其计算值与规定的极限数值作比较的方法

在判定测定值或其计算值是否符合要求时, 应将测试所得的测定值或其计算值与规定的极限数值作比较, 比较的方法可采用全数值比较法或修约值比较法。

当有关文件中对极限数值 (包括带有极限偏差的数值) 无特殊规定时, 均应使用全数值比较法。如要求采用修约值比较法, 应加以说明。若规定了使用其中的某一种比较方法时, 一经确定, 不得改动。

(1) 全数值比较法 将测试所得的测定值或计算值不经修约处理 (或虽经修约处理, 但应标明它是经舍、进或未进未舍而得), 直接与规定的极限数值作比较, 只要超出极限数值规定的范围 (不考虑超出程度的大小), 都判定为不符合要求。其示例如表 1-7 所示。

(2) 修约值比较法 将测定值或其计算值进行修约, 修约数位应与规定的极限数值的数位一致。

1) 当测试或计算精度允许时, 应先将获得的数值按指定的修约数位多一位或几位报出, 然后按规定修约至规定的数位。

2) 将修约后的数值与规定的极限数值进行比较, 只要超出极限数值规定的范围 (不考虑超出程度的大小), 都判定为不符合要求。其示例如表 1-7 所示。

表 1-7 全数值比较法和修约值比较法的示例和比较

项 目	极限数值	测定值或其计算值	按全数值比较是否符合要求	修约值	按修约值比较是否符合要求
中碳钢抗拉强度/ (N/mm^2)	$\geq 14 \times 100$	1349	不符合	13×100	不符合
		1351	不符合	14×100	符合
		1400	符合	14×100	符合
		1402	符合	14×100	符合
NaOH 的质量分数 (%)	≥ 97.0	97.01	符合	97.0	符合
		97.00	符合	97.0	符合
		96.96	不符合	97.0	符合
		96.94	不符合	96.9	不符合
中碳钢硅的质量分数 (%)	≤ 0.5	0.452	符合	0.5	符合
		0.500	符合	0.5	符合
		0.549	不符合	0.5	符合
		0.551	不符合	0.6	不符合
中碳钢锰的质量分数 (%)	1.2 ~ 1.6	1.151	不符合	1.2	符合
		1.200	符合	1.2	符合
		1.649	不符合	1.6	符合
		1.651	不符合	1.7	不符合

(续)

项 目	极限数值	测定值或其计算值	按全数值比较是否符合要求	修约值	按修约值比较是否符合要求
盘条直径/ mm	10.0 ± 0.1	9.89	不符合	9.9	符合
		9.85	不符合	9.8	不符合
		10.10	符合	10.1	符合
		10.16	不符合	10.2	不符合
盘条直径/ mm	10.0 ± 0.1 (不含 0.1)	9.94	符合	9.9	不符合
		9.96	符合	10.0	符合
		10.06	符合	10.1	不符合
		10.05	符合	10.0	符合
盘条直径/ mm	10.0 ± 0.1 (不含 +0.1)	9.94	符合	9.9	符合
		9.86	不符合	9.9	符合
		10.06	符合	10.1	不符合
		10.05	符合	10.0	符合
盘条直径/ mm	10.0 ± 0.1 (不含 -0.1)	9.94	符合	9.9	不符合
		9.86	不符合	9.9	不符合
		10.06	符合	10.1	符合
		10.05	符合	10.0	符合

注：表中的示例并不表明这类极限数值都应采用全数值比较法或修约值比较法。

(3) 两种判定方法的比较 对测定值或其计算值与规定的极限数值在不同情形用全数值比较法和修约值比较法的比较结果示例如表 1-7 所示。对同样的极限数值，若它本身符合要求，则全数值比较法比修约值比较法相对较严格。

1.4 试验数据的处理和误差分析

1.4.1 误差的定义和分类

1. 误差的定义

一个物体的尺寸或质量，一种材料的抗拉强度或弹性模量都存在一个客观的值，称为真值。在对其进行测量时，得到的结果称为实测值。误差就定义为实测值与真值之差，表达式为

$$\varepsilon = x - x_0 \tag{1-1}$$

式中 ε ——误差；

x 、 x_0 ——实测值和真值。

1) 在测量中，如果 x_0 代表某一物体的真值， x 代表某一次的实测值，则 $\varepsilon = x$

$-x_0$ 就表示测量误差。由于真值 x_0 是未知的, 在经过多次测量后, 便可得到测量值的算术平均值 $\bar{x}$, 用 $\bar{x}$ 代替 x_0 , 便可得 $\nu = x - \bar{x}$, 称 ν 为测量的偏差 (或离差)。有时可用对偏差的分析来代替对误差的分析。

2) 在生产中, 产品的某项技术参数往往给定一个标称值, 这时将其作为真值 x_0 。误差 $\varepsilon = x - x_0$ 就表示某一实测值与标称值之差。

3) 在计算中, 某物体的运动速度为 $(100 \pm 0.1) \text{ m/s}$, 其中 100 m/s 代表真值 x_0 , 而 $\pm 0.1 \text{ m/s}$ 表示误差, 称它为计算误差。

2. 真值和平均值

由于测量仪器、测量方法、环境及人的观察能力等条件的限制, 真值往往是无法测得的。但当测量的次数不断增加时, 根据随机的正误差和负误差出现的概率相等并抵消的原理, 在没有系统误差的条件下, 平均值会趋近于真值。基于这种思想, 可用平均值 (即子样的平均值) 来估计和推断真值 (在一定的置信度下), 并在条件许可的情况下, 应尽量增加测量次数。

(1) 算术平均值 设一组观测值为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, n 是观测次数, 则算术平均值 $\bar{x}$ 定义为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-2)$$

假设观测值 x_i 服从正态分布, 则可证明, 在一组等精度的测量中算术平均值为最佳值。

(2) 均方根平均值 这种方法来源于分子平均动能的计算, 后推广用于误差的计算, 其定义为

$$\bar{x} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (1-3)$$

(3) 加权平均值 如果对同一物理量用不同的方法测定, 或由不同的人员测定, 则在计算平均值中常常对比较可靠的数据予以加权, 然后再平均, 称为加权平均, 其定义为

$$\bar{x} = \frac{w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_n x_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1-4)$$

式中 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ——一组观测值;

$w_1, w_2, \dots, w_n$ ——各观测值的加权数。

(4) 中位值 将一组观测值按从小到大 (或从大到小) 的次序排列, 则处在最中间位置的数就称为中位值。如果观测次数 n 为奇数, 则排列在中间的那个数就是中位值; 如果 n 为偶数, 则中位值就是位于中间两个数之间的平均值。中位值的最大优点是求法简单, 且与两端数据的变化无关, 在数理统计中应用很广。

(5) 几何平均值 一组 n 个观测值连乘, 然后再开 n 次方得到的值称为几何平均值, 其公式为

$$\bar{x} = \sqrt[n]{x_1 x_2 \cdots x_n} \quad (1-5)$$

式 (1-5) 两边取对数, 则

$$\lg \bar{x} = \frac{1}{n} [\lg x_1 + \lg x_2 + \cdots + \lg x_n] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i \quad (1-6)$$

式 (1-6) 说明, 一组观测值取对数后的算术平均值, 它的反对数就是这组观测值的几何平均值。

3. 误差的分类

在测量中, 无论所用的仪器多么精密, 方法多么完善, 试验者多么细心, 所得结果往往也不尽相同。在生产中, 尽管工艺和加工方法均一致, 最后产品的尺寸、质量或其他技术参数也会存在差异。在计算中, 计算工具的精度不同或计算方法不同也会带来不同的舍弃误差。

误差可按不同的方法进行分类。按误差的绝对值和相对值, 误差可分为绝对误差和相对误差; 按误差的性质及其产生原因, 可分为系统误差、偶然误差和过失误差, 这里只讨论前两种误差。

(1) 系统误差 系统误差是指在重复测量中, 其值恒定不变或遵循一定规律变化的一类误差, 又叫确定性误差或恒定误差。系统误差的来源主要有工具误差、装置误差、人身误差、外界误差和方法误差等。

1) 工具误差是指由测量工具、仪器等产生的误差, 又称为仪差。它是因测量工具或仪器的不完善而产生的, 如刻度不准、砝码未校正等。

2) 装置误差是指由于测量设备和仪器的电路、安装、布置和调整不恰当而产生的误差。

3) 人身误差 (个人误差或人差) 是指由于测量人员的感觉器官不完善而引起的, 如某人在读数时视线总是偏向一边, 从而造成读数误差, 这种误差往往因人而异。

4) 外界误差 (环境误差) 是指由于周围环境, 如温度、气压、湿度和电磁场等的影响而产生的误差。

5) 方法误差 (理论误差) 是指由于测量方法本身所依据的理论、模型不完善所带来的误差。

系统误差的出现是有规律的, 产生的原因是可知的和能够找到的。对试验中所用的测量工具、仪器的精度进行鉴定, 便可降低系统误差。对于不能消除的系统误差, 要设法估计出其数值的大小, 以便进行修正。

(2) 偶然误差 (随机误差) 在消除了系统误差或降低系统误差至一定范围 (如拉力机载荷精度控制在 $\pm 0.5\%$) 后, 对同一对象进行反复测量时, 结果也会

出现差异,这时产生的误差叫做偶然误差。偶然误差的特点是时大时小,时正时负,其产生原因是多方面的、不确知的,因而也是无法控制的。在同样条件下,对同一个物理量作重复测定,若测量次数足够多,则可发现偶然误差完全服从统计性规律。当测量次数无限增大时,偶然误差的算术平均值将趋近于零,因此多次测量结果的算术平均值将接近于真值。

1.4.2 直接测定量的误差表示法

通过测量能直接得到结果的量称为直接测量量,如人的高度和质量、拉伸试样的载荷和伸长量等。通过几个量的测量后要经过计算才能得到的量,叫做间接测量量,如物质的密度、材料的抗拉强度和断裂韧度等。

1. 误差的分布规律

在不致引起误会的情况下常把偶然误差简称为误差。误差的特点如下:

- 1) 绝对值相等的正误差和负误差,出现的概率相同。
- 2) 绝对值小的误差出现的概率大,而绝对值大的误差出现的概率小。
- 3) 绝对值很大的误差出现的概率接近于零,即误差有一定的极限。
- 4) 当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,误差的算术平均值趋近于零,这是由于正、负误差互相抵消的结果。

2. 误差的表示方法

(1) 范围误差 范围误差是指一组测量值中最大值与最小值之差,表示误差的变化范围。例如,对某钢材进行抗拉试验得到 10 个抗拉强度 R_m (单位为 N/mm^2) 的数据为 745、750、751、759、763、766、770、781、784、785,则其范围误差为 $(785 - 745) N/mm^2 = 40 N/mm^2$ 。范围误差的优点是直观、简便,缺点是只取决于一组测量值的两个极端值,而与测量次数无关,与中间数据的大小无关,这显然与偶然误差和测量次数有关这一事实相违背。

(2) 算术平均误差 算术平均误差是表示误差的较好方法,其定义为

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad (1-7)$$

式中 δ ——算术平均误差;

x_i ——第 i 个观测值;

$\bar{x}$ —— n 个观测值的算术平均值;

$|x_i - \bar{x}|$ ——偏差的绝对值。

因为偏差有正有负,所以取绝对值加以平均。以上面的 10 个 R_m 数据为例,其中 $\bar{x} = 765.4 N/mm^2$ 计算得到 $\delta = 11.8 N/mm^2$ 。算术平均误差的优点是比范围误差精细,考虑了每一个 $|x_i - \bar{x}|$,其缺点是无法鉴别两组测量值之间的偏差大小。例如,有两组测量值,尽管其 δ 相等,但其偏差 $(x_i - \bar{x})$ 可以很分散。

(3) 标准误差 标准误差也称为均方根误差，其计算式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-8)$$

在观测次数 n 较小时，标准误差常表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-9)$$

标准误差 σ 是各观测值 x_i 的函数，且对 x_i 的大小比较敏感，所以是表示精密度的一个较好的指标，已广泛用于误差分析之中。

第 2 章 金属材料的密度

2.1 密度的基本知识

2.1.1 常用密度术语

(1) 密度 单位体积的某种物质的质量,称为这种物质的密度。其定义公式为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-1)$$

式中 ρ ——物质的密度,单位为 kg/m^3 ;

m ——物质的质量,单位为 kg ;

V ——物质的体积,单位为 m^3 。

(2) 相对密度 在给定条件下,物质密度 ρ_1 与参考物质密度 ρ_2 之比,称为相对密度。其定义公式为

$$d = \rho_1 / \rho_2 \quad (2-2)$$

式中 ρ_1 ——某物质的密度,单位为 kg/m^3 ;

ρ_2 ——参考物质的密度,单位为 kg/m^3 。

参考物质通常采用纯水,在定义纯水密度时,不同学科中的参考温度有 4°C 、 15°C 、 15.56°C 、 17.5°C 、 20°C 、 23°C 和 27°C 等。但常用的是 15°C 、 15.56°C 、 17.5°C 和 20°C ,其对应的纯水密度值分别为 $999.127\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $999.042\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $998.715\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $998.234\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(3) 标准密度 在规定的标准条件下的物质密度,称为标准密度。例如,在标准温度 273.15K 和标准压力 101325Pa 下的气体密度;在标准温度 20°C 下的液体密度以及固体密度等。对于液体的标准温度条件通常为 20°C ,如 20°C 时石油产品的标准密度、 20°C 时酒精溶液的标准密度等。

(4) 表观密度 表观密度是指材料在自然状态下单位体积的质量,也称为假密度,是指多孔固体(粉末或颗粒状)材料质量与其表观体积(包括孔隙的体积)的比值。它多用于冶金、建筑、矿业和化工工业中,如焦炭的表观密度为 $1100 \sim 1450\text{kg}/\text{m}^3$,其实际密度为 $1800 \sim 2000\text{kg}/\text{m}^3$ 等。显然表观密度比实际密度小。通

过表观密度和实际密度的测定，可以确定固体材料的气孔率。气孔率一般用百分数表示，即

$$\text{气孔率}(\%) = \frac{\text{实际密度} - \text{表观密度}}{\text{实际密度}} \times 100\%$$

(5) 实际密度 实际密度是指多孔固体材料质量与其体积（不包括孔隙的体积）的比值。它是与表观密度相对应的量，也称为真密度。

(6) 堆密度 堆密度是指在特定条件下，在既定容积的容器内，疏松状（小块、颗粒、纤维）材料质量与其材料所占体积的比值。定义中的特定条件是指实际填充材料于既定容积的容器内的条件。例如，自然堆积、振动或敲击堆积、施加了一定压力的堆积，可相应称为松装密度、振实密度和压实密度。

(7) 松装密度 在规定条件下粉末自由填充的单位体积的质量。

(8) 振实密度 在规定条件下容器中的粉末经振实后所测得的单位体积的质量。

(9) 临界密度 临界密度指物质在临界点的密度。临界点亦称为临界状态，是物质的气、液两态平衡共存的一个边缘状态。在这种状态下，液体和它的饱和气的密度相同，故它们的分界面消失，这种状态只能在一定的温度及压力下实现。此时的温度和压力称为临界温度和临界压力，而一定量物质所占的体积叫做临界体积。

(10) 比容 比容是单位质量的物质所占的体积，符号为 V_s ，它是密度的倒数，其定义公式为

$$V_s = \frac{1}{\rho} \quad (2-3)$$

式中 V_s ——比容，单位为 m^3/kg ；

ρ ——物质的密度，单位为 kg/m^3 。

(11) 摩尔体积 摩尔体积是1摩尔物质所占的体积，等于摩尔质量（ M ）除以密度，符号为 V_A ，其定义公式为

$$V_A = \frac{M}{\rho} \quad (2-4)$$

式中 V_A ——摩尔体积，单位为 $10^{-3}\text{m}^3/\text{mol}$ ；

M ——摩尔质量，单位为 g/mol ；

ρ ——物质的密度，单位为 kg/m^3 。

(12) 粉尘真密度 单位体积无孔隙粉尘的质量称为粉尘真密度。

(13) 粉尘假密度 包括尘粒内部闭孔体积在内的单位体积粉尘的质量。

(14) 粉尘有效密度 粉尘的真密度和假密度通称为粉尘有效密度。

2.1.2 影响密度的因素

1. 合金组分的影响

在合金中对密度影响最大的因素是组分的性质和含量。当两种或两种以上的金属组成合金时，其密度将随各组分含量的不同而发生变化。通常组分的密度越大，合金的密度也越大，高密度的组分含量越大，合金密度也随之增大。某些二元合金的密度与组分的关系如图 2-1 所示。由图 2-1 可见，合金的密度随组分含量的变化具有单调函数的性质。大多数金属材料由固溶体组成，或以固溶体为基，其上分布一定的金属间化合物。固溶体保留有溶剂金属的晶格结构，但由于溶质原子的溶入，点阵常数要发生变化，其变化遵从费加定律。该定律假定固溶体的点阵常数随原子浓度呈线性变化。

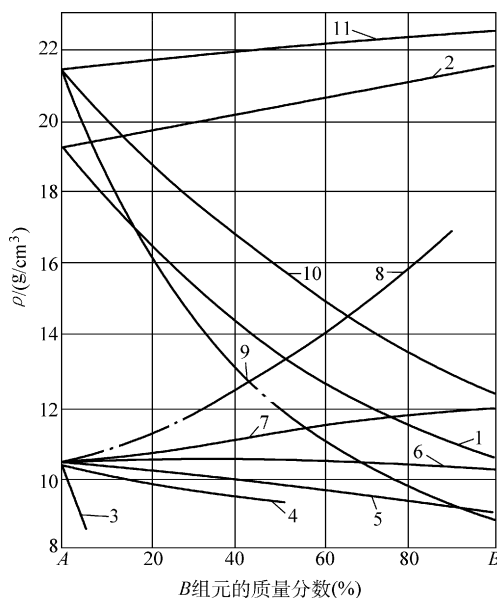


图 2-1 合金密度随成分的变化曲线

1—Au-Ag 2—Au-Pt 3—Ag-C (石墨) 4—Ag-Ni 5—Ag-Cu 6—Ag-Mo
7—Ag-Pd 8—Ag-W 9—Pt-Co 10—Pt-Rh 11—Pt-Ir

当金属元素之间的相互作用加强时，常形成金属间化合物或中间相。它们的密度与组分的相对原子质量、化合物的分子式以及结构有关。钢的密度在杂质（碳或其他元素）浓度比较小的情况下有如下线性关系：

$$\rho = \rho_0 + x\Delta\rho \quad (2-5)$$

式中 ρ ——钢的密度，单位为 kg/m^3 ；

ρ_0 ——纯铁的密度，单位为 kg/m^3 ；

x ——杂质的质量分数(%)；
 $\Delta\rho$ ——增加1% (质量分数) 的杂质对钢密度的影响值，单位为 g/cm^3 ，如表 2-1 所示。

表 2-1 每 1% (质量分数) 的杂质对钢密度的影响

元 素	$\Delta\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	x 的适用限度(%)	元 素	$\Delta\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	x 的适用限度(%)
C	-0.040	1.55	Mn	-0.016	1.5
P	-0.117	1.1	Ni	+0.004	5.0
S	-0.164	0.2	Cr	+0.001	1.2
Si	-0.073	4.0	W	+0.095	1.5
As	+0.100	0.15	Al	+0.120	2.0
Cu	+0.011	1.0			

2. 工艺过程的影响

金属材料在制备过程中，通常要进行冶炼、压力加工和热处理。这些工艺过程对金属材料密度的影响十分复杂。

1) 金属及合金的铸件经过冷加工或热加工后，密度往往会增加。这是由于铸件中的孔隙、气泡和缩孔等宏观缺陷在压力作用下产生固结所致。而致密金属在大的压缩比下冷加工时密度会减小，这是由于冷加工使空间点阵发生畸变，导致了金属内部的空位和位错密度增加，从而降低了密度。图 2-2 表示 $w(\text{C})$ 为 0.07% 的铁的密度与形变程度的关系，当对加工后的金属材料进行加热时，因回复和再结晶又可使其密度提高，并能恢复到原来的数值。

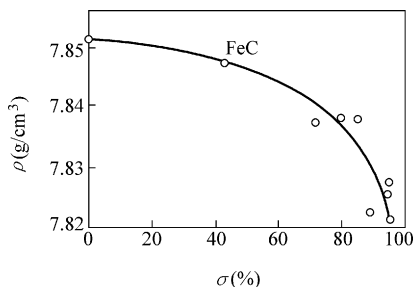


图 2-2 铁的密度与形变的关系

2) 金属材料经过不同的热处理后，可得到不同的显微组织。它的密度随显微组织的变化而变化。例如，钢在从奥氏体到马氏体的一系列多型转变时，密度逐步减小。在马氏体转变点密度的减小与钢的碳含量成比例。热处理造成的密度变化与金属内部发生的过程有关，如点阵参数变化、晶粒的取向排列、有序-无序转变、晶型转变、脱溶沉淀、溶解气体、氧化、位错和空位浓度变化等。

3) 在粉末冶金中，金属材料的密度与工艺过程的关系更为明显。影响粉末制品密度的主要因素是压制压力、烧结温度、烧结时间、保护介质等。压制时压坯的密度随着压力的增加而增大。在极端情况广，当压力很大时压坯的密度有可能接近致密金属的密度。由图 2-3 可以看出，在压制过程中压坯的密度变化速度开始很大，随后逐渐降低，直到停止。压坯在烧结过程中颗粒间的接触增加，因而密度变

大。这是因为烧结时压坯内发生各种各样的物理化学变化，如氧化物还原、扩散、蠕变、再结晶、气体解吸、杂质净化等。

3. 温度的影响

金属加热时会产生体积的变化，绝大多数金属和合金的体积随温度的增加而增大。这是由于温度的升高将引起金属内部原子振动的振幅增加，振动的非对称性造成了晶格点阵的热膨胀。在一级近似下，金属材料的密度可用式（2-6）计算：

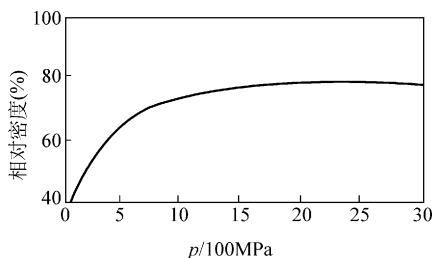


图 2-3 压力与相对密度的关系

$$\rho = \frac{\rho_0}{[1 + \bar{\alpha}_v(T - T_0)]} \quad (2-6)$$

式中 ρ —— $T \sim T_0$ 温度区间的平均密度，单位为 kg/m^3 ；

T ——终了温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ；

T_0 ——初始温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ；

ρ_0 —— T_0 时的密度，单位为 kg/m^3 ；

$\bar{\alpha}_v$ ——在 $T \sim T_0$ 温度区间的平均体胀系数，单位为 $1/^{\circ}\text{C}$ 。

大多数金属的体胀系数为 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 数量级。因此，即使温度变化 100°C ，对密度的影响也不会超过 1%，熔化时大多数金属的体积也只增加 3% 左右。在实际生产中，常常采用金属材料在不同温度区间密度随温度变化的经验公式，这些公式往往具有更简洁的形式和足够的准确度。表 2-2 给出了纯铁的密度在不同温度区间随温度变化的经验公式及偏差。

表 2-2 纯铁的密度随温度变化的经验公式及偏差

温度范围/K	相名称	经验公式	偏差
673 ~ 1183	α 、 β	$\rho = 7.968 - 3.335 \times 10^{-3}T$	± 0.013
1183 ~ 1673	γ	$\rho = 8.252 - 5.128 \times 10^{-3}T$	± 0.013
1673 ~ 1812	δ	$\rho = 8.063 - 4.242 \times 10^{-3}T$	± 0.011
1812 ~ 1923	液相	$\rho = 8.586 - 0.567 \times 10^{-3}T$	± 0.016

2.2 密度的测量方法

2.2.1 密度测定方法的分类

密度测量方法的分类如表 2-3 所示。

表 2-3 密度测量方法的分类

类 别	名 称
直接测量法	流体静力学法
	密度瓶法
	浮计法
	悬浮法
	气体置换法
间接测量法	浮子法
	静压法
	声学法
	射线法

2.2.2 质量的测定

测量密度离不开质量的测量。最常用的质量测量工具是天平。常用天平的级别如表 2-4 所示，砝码的允许误差如表 2-5 所示。

表 2-4 天平的级别

精度等级	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
感量与最大称量值之比	1×10^{-7}	2×10^{-7}	5×10^{-7}	1×10^{-6}	2×10^{-6}	5×10^{-6}	1×10^{-5}	2×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-4}

表 2-5 砝码的允许误差

砝码名义质量	法定允差/mg							
	一等		二等		三等		四等	五等
	质量允差	检定精度	质量允差	检定精度	质量允差	检定精度	质量允差	质量允差
20kg	±45	±22	±100	±60	±400	±200	±1000	±5000
10kg	±25	±12	±60	±36	±200	±100	±500	±2500
5kg	±15	±5	±35	±15	±100	±50	±250	±1200
3kg	—	—	±25	±10	±70	±35	±150	±700
2kg	±8	±3	±15	±8	±50	±20	±100	±500
1kg	±4	±0.5	±5	±2	±20	±8	±50	±250
500g	±2	±0.4	±3	±1	±10	±4	±25	±120
300g	—	—	±2	±0.3	±6	±3	±15	±70
200g	±0.5	±0.2	±1.5	±0.5	±4	±2	±10	±50
100g	±0.4	0.1	1.0	0.3	2	1	5	25

(续)

砝码名义质量	法定允差/mg							
	一等		二等		三等		四等	五等
	质量允差	检定精度	质量允差	检定精度	质量允差	检定精度	质量允差	质量允差
50g	0.3	0.1	0.5	0.3	2	1	3	15
30g	—	—	0.4	0.2	1	0.6	2	10
20g	0.15	0.03	0.3	0.1	1	0.5	2	10
10g	0.10	0.02	0.2	0.06	0.8	0.4	2	10
5g	0.05	0.01	0.15	0.03	0.6	0.3	2	10
3g	—	—	0.15	0.03	0.5	0.3	2	10
2g	0.05	0.005	0.10	0.03	0.4	0.2	2	10
1g	0.05	0.005	0.10	0.03	0.4	0.2	2	10
500mg	±0.03	±0.004	±0.05	±0.02	±0.2	±0.1	±1	±5
300mg	—	—	±0.05	±0.02	±0.2	±0.1	±1	±5
200mg	0.03	0.04	±0.05	±0.02	±0.2	±0.1	±1	—
100mg	0.03	0.04	±0.05	±0.02	±0.2	±0.1	±1	—
50mg	0.02	0.04	±0.05	±0.02	±0.2	±0.1	±1	—
30mg	—	—	±0.05	±0.02	±0.2	±0.1	±1	—
20mg	0.02	0.04	±0.05	±0.02	±0.2	±0.1	±1	—
10mg	0.02	0.04	±0.05	±0.02	±0.2	±0.1	±1	—
5mg	0.01	0.04	±0.05	±0.02	±0.2	±0.1	—	—
3mg	—	—	±0.05	±0.02	±0.2	±0.1	—	—
2mg	0.01	0.04	±0.05	±0.02	±0.2	±0.1	—	—
1mg	0.01	0.04	±0.05	±0.02	±0.2	±0.1	—	—

用天平测量物体质量的注意事项：

1) 消除空气浮力的影响，用式 (2-7) 将在空气中称量的结果换算成真空中质量：

$$M = m \left[1 + \left(\frac{1}{\rho(\text{试})} - \frac{1}{\rho(\text{砝})} \right) \rho(\text{空}) \right] \quad (2-7)$$

式中 M ——试样在真空中的质量，单位为 g；

m ——试样在真空中的称量值，单位为 g；

$\rho(\text{试})$ ——试样的密度，单位为 g/cm^3 ；

$\rho(\text{空})$ ——空气的密度，单位为 g/cm^3 ；

$\rho(\text{砝})$ ——砝码的密度，单位为 g/cm^3 ，如表 2-6 所示。

表 2-6 砝码材料的密度

砝码材料	密度/(g/cm ³)
铂	21.5
铜合金	8.4
统一名义	8.0
不锈钢	7.8
铝	2.7

- 2) 保持环境温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，温度变化率不大于 $\pm 0.5^\circ\text{C/h}$ 。
- 3) 相对湿度保持在 50% ~ 60%。
- 4) 砝码镊子采用非磁性材料。
- 5) 天平应放在垫有橡胶板的稳固防振台上。
- 6) 操作者应穿棉质外衣。

2.2.3 流体静力学法

流体静力学法是密度测量中最基本的、最经典的方法，此法以阿基米德原理为基础，通过测量物体浸于液体中所受的浮力来确定物体的体积，进而求出其密度。流体静力学法适用范围很广，固体和液体均可。测定固体密度时，对试样几何形状的要求不严格，形状不规则者亦可。测定粉末材料的真实密度时，应对试验材料进行适当的处理。

1. 固体材料密度的测定

将已知密度的液体（一般用纯水）作为产生浮力的液体，将待测密度的固体试样在空气中称量，设其质量读数为 m ，再将试样完全浸没在液体中称量，设其质量读数为 m' ，根据阿基米德原理知：

$$(m - m')g = V\rho_w g$$

式中 m ——空气中固体物质的质量，单位为 g；

m' ——液体中固体物质的质量，单位为 g；

g ——重力加速度，单位为 cm/s^2 ；

V ——试样的体积，即浸没于液体时排开液体的体积，单位为 cm^3 ；

ρ_w ——水的密度，单位为 g/cm^3 。

可以得出

$$V = \frac{m - m'}{\rho_w} \quad (2-8)$$

固体材料的密度 ρ 可按式 (2-9) 计算：

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m\rho_w}{m - m'} \quad (2-9)$$

在高精度测量时要考虑到空气的浮力，此时密度由式（2-10）确定：

$$\rho = \frac{m}{m - m'}(\rho_w - \rho_0) + \rho_0 \tag{2-10}$$

式中 ρ_0 ——空气的密度，单位为 g/cm^3 ，常用干燥空气的密度如表 2-7 所示。

表 2-7 干燥空气的密度 (单位： $\mu\text{g}/\text{cm}^3$)

p/mmHg $t/^\circ\text{C}$	700	710	720	730	740	750	760	770	780
0	1191	1208	1225	1242	1259	1276	1293	1310	1327
1	1187	1204	1221	1238	1255	1272	1288	1305	1322
2	1182	1199	1216	1233	1250	1267	1284	1301	1318
3	1178	1195	1212	1229	1246	1262	1279	1296	1313
4	1174	1191	1207	1224	1241	1258	1274	1291	1308
5	1170	1186	1203	1220	1236	1253	1270	1287	1303
6	1165	1182	1199	1215	1232	1249	1265	1282	1299
7	1161	1178	1194	1211	1228	1244	1261	1277	1294
8	1157	1174	1190	1207	1223	1240	1256	1273	1289
9	1153	1169	1186	1202	1219	1235	1252	1268	1285
10	1149	1165	1182	1198	1215	1231	1247	1264	1280
11	1145	1161	1178	1194	1210	1227	1243	1259	1276
12	1141	1157	1173	1190	1208	1222	1239	1255	1271
13	1137	1153	1169	1186	1202	1218	1234	1251	1267
14	1133	1149	1165	1181	1198	1214	1230	1246	1262
15	1129	1145	1161	1177	1193	1210	1226	1242	1258
16	1125	1141	1157	1173	1189	1205	1221	1238	1254
17	1121	1137	1153	1169	1185	1201	1217	1233	1249
18	1117	1133	1149	1165	1181	1197	1213	1229	1245
19	1113	1129	1145	1161	1177	1193	1209	1225	1241
20	1110	1126	1141	1157	1173	1189	1205	1221	1236
21	1106	1122	1137	1153	1169	1185	1201	1216	1232
22	1102	1118	1134	1149	1165	1181	1197	1212	1228
23	1098	1114	1130	1145	1161	1177	1193	1208	1224
24	1095	1110	1126	1142	1157	1173	1189	1204	1220
25	1091	1107	1122	1138	1153	1169	1185	1200	1216
26	1087	1103	1118	1134	1149	1165	1181	1196	1212

(续)

$\begin{matrix} p/\text{mmHg} \\ t/^{\circ}\text{C} \end{matrix}$	700	710	720	730	740	750	760	770	780
27	1084	1099	1115	1130	1146	1161	1177	1192	1208
28	1080	1096	1111	1126	1142	1157	1173	1188	1204
29	1077	1092	1107	1123	1138	1153	1169	1184	1200
30	1073	1088	1104	1119	1134	1150	1165	1180	1196

注: 1mmHg = 133.3Pa。

2. 粉末材料密度的测定

采用流体静力学法测量粉末材料的真实密度时, 要对试样采取必要的措施, 通常采用压块法或介质填充法进行处理。

(1) 压块法 将粉末压制成一定孔隙度的压块 (如 20% ~ 30% 的孔隙度), 体积 $0.3 \sim 0.5\text{cm}^3$ 。然后按如下程序操作:

1) 在空气中称量, 设质量读数为 m 。

2) 在真空中减压抽出孔隙中的气体。把密度为 ρ_1 的液体注入并浸透压块。当压块充分浸透后, 升至大气压, 取出压块, 擦去表面液体, 称量试样, 设此时质量读数为 m_1 。则浸入其中液体的体积为 $(m_1 - m)/\rho_1$ 。

3) 测出压块在液体中的质量读数 m'_1 , 则粉末材料的真实密度 ρ 为

$$\rho = \frac{m}{\frac{m_1 - m'_1}{\rho_w} - \frac{m_1 - m}{\rho_1}} \quad (2-11)$$

式中 ρ ——粉末试样的真实密度, 单位为 g/cm^3 ;

m ——试样在空气中的质量, 单位为 g;

ρ_1 ——充入压块中液体的密度, 单位为 g/cm^3 ;

m_1 ——压块浸透密度为 ρ_1 的液体时在空气中的质量, 单位为 g;

m'_1 ——压块浸透密度为 ρ_1 的液体时在水中的质量, 单位为 g;

ρ_w ——水的密度, 单位为 g/cm^3 。

这种方法需要两种密度已知的液体, 互不反应, 也不溶解粉末。该方法只适合于能压制成块的粉末材料。

(2) 介质填充法 常以石蜡为填充介质, 按如下程序操作:

1) 在室温下将固体石蜡装入容器中并加热至熔化, 冷却后除去气泡, 置于工作液体中称量, 设质量读数为 m'' 。

2) 称量好质量为 m 的粉末, 将其加入到擦干后的上述容器中, 再次熔化石蜡。冷却后除去气泡, 置于工作液体中称量, 设质量读数为 m' , 则粉末密度 ρ 为

$$\rho = \frac{m\rho_w}{m - m' + m''} \quad (2-12)$$

式中 ρ ——粉末试样的真实密度, 单位为 g/cm^3 ;

m ——粉末试样的质量, 单位为 g ;

ρ_w ——水的密度, 单位为 g/cm^3 ;

m' ——容器中填充石蜡并充入粉末试样后在水中的质量, 单位为 g ;

m'' ——容器中填充石蜡在水中的质量, 单位为 g 。

3. 多孔材料密度的测定

采用流体静力学法测定多孔材料的体积密度时, 可采用浸泡介质法。此法按如下程序操作:

1) 用天平称量试样的质量。

2) 将试样浸没在工作液体中, 使液体浸入试样的开孔。

3) 将浸入液体的试样放入称量装置中称量, 或用细丝吊挂, 先在空气中称量, 后在水中称量, 如图 2-4 所示。

4) 试样密度 ρ 由式 (2-13) 计算:

$$\rho = \frac{m\rho_w}{m_1 - m_2} \quad (2-13)$$

式中 ρ ——试样的真实密度, 单位为 g/cm^3 ;

m ——试样在空气中的质量, 单位为 g ;

ρ_w ——水的密度, 单位为 g/cm^3 ;

m_1 ——已浸入液体的试样在空气中的质量, 单位为 g ;

m_2 ——已浸入液体的试样在水中的质量, 单位为 g 。

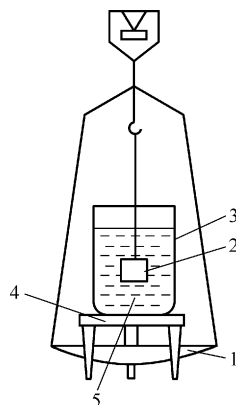


图 2-4 液体中称量试样的装置

1—天平盘 2—试样 3—盛液容器

4—托架 5—工作液体

2.2.4 密度瓶法

密度瓶法适用于片状、粒状、粉末、丝状等固体材料密度的测量。密度瓶一般由硬质玻璃或透明熔融石英制成, 其磨口瓶塞带有毛细管, 上面刻有标记容积的基线, 常用的是平底球形密度瓶, 如图 2-5 所示。

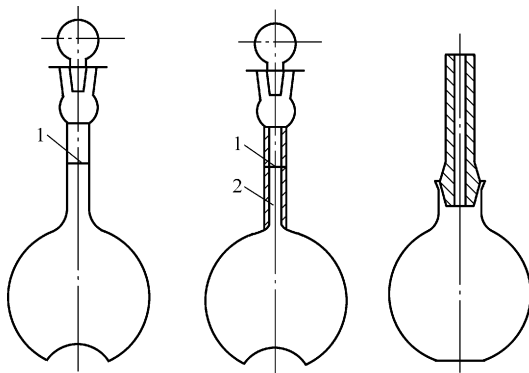


图 2-5 平底球形密度瓶

1—基线 2—毛细管

1. 固体材料密度的测定

1) 在空气中称量试样的质量 m 。

2) 密度瓶内注入已知密度为 ρ_0 的工作液体至基线, 用天平称出含液体的密度瓶质量 m_1 。

3) 试样置于密度瓶内 (约占密度瓶容积的 $1/3 \sim 2/3$), 装入工作液体填充其余的空间至基线处, 称出试样、液体、密度瓶三者共同的质量 m_2 。

4) 按下式计算试样的密度:

$$\rho = \frac{m\rho_0}{m_1 - (m_2 - m)} \quad (2-14)$$

式中 ρ ——试样的密度, 单位为 g/cm^3 ;

m ——试样的质量, 单位为 g ;

m_1 ——密度瓶中充入工作液体到基线时, 瓶与液体的总质量, 单位为 g ;

m_2 ——密度瓶中放入试样并充入工作液体到基线时, 瓶与液体的总质量, 单位为 g ;

ρ_0 ——工作液体的密度, 单位为 g/cm^3 。

2. 液体材料密度的测定

1) 用天平称量空密度瓶的质量 m_0 。

2) 确定密度瓶的容积; 密度瓶内装入纯水, 液面至基线。用天平称量含水的密度瓶质量 m_1 。

3) 将密度瓶内的水倒出后烘干。将待测液体装入瓶内, 液面至基线。用天平称量含待测液体的密度瓶质量 m_2 。则待测液体的密度按下式计算:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{m_1 - m_0} \rho_w \quad (2-15)$$

式中 ρ ——工作液体的密度, 单位为 g/cm^3 ;

m_0 ——空密度瓶的质量, 单位为 g ;

m_1 ——密度瓶中充入水后, 瓶与水的总质量, 单位为 g ;

m_2 ——密度瓶中充入被测液体后, 瓶与待测液体的总质量, 单位为 g ;

ρ_w ——水的密度, 单位为 g/cm^3 。

3. 注意事项

1) 必须清洗好密度瓶。

2) 使用专门的灌注器具或装置。

3) 灌注液体时速度要缓慢, 若存在气泡, 可用对密度瓶反复加热和冷却, 同时轻轻敲击密度瓶让气泡上升逸出的办法加以排除。

4) 为确定密度瓶灌满液体在规定标线处的容积, 必须将它放入恒温槽内进行恒温, 恒温槽温度波动为 $0.05 \sim 0.1^\circ\text{C}$, 环境温度变化小于 $\pm(1 \sim 2)^\circ\text{C}$ 。

5) 将密度瓶放到恒温槽中时应使密度瓶中全部液体处于恒温槽液面以下。

6) 为防止液体蒸发或从大气中吸收水分, 称量时一定要加瓶塞。

2.2.5 浮计法

浮计法常用的是一种固定质量的浮计。根据阿基米德原理，当浮计浸入被测液体时，受到浮力的作用。在平衡时，浮计浸没于液体的深度取决于液体的密度。依液体的密度大小制成分度表贴在浮计的干管部。被测液体的液面与分度表重合之处，即指出该液体的密度。浮计的结构如图 2-6 所示。它由躯体、压载室和干管三部分组成。躯体为圆柱形中空玻璃管，下端为装满重物自压载室，重物可装入小铅丸、金属屑等。重物上用隔板封紧，以使浮计重心下降，在液体中垂直漂浮、稳定平衡。干管为顶端封闭的细长圆管，它与躯体相接，内壁贴有密度刻度表。

浮计的使用很简单，只需把它置于被测液体中，待平衡时观测液面与干管重合的位置，记下读数即可。

一般的浮计由玻璃制成。当测定融熔金属液的密度时，应使用金属材料制成的浮计。

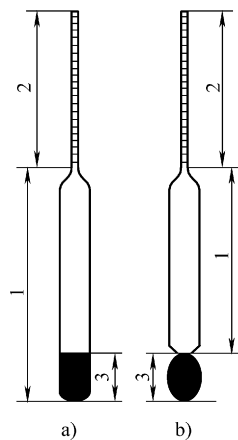


图 2-6 浮计的结构

a) 直通式 b) 圆头式

1—躯体 2—干管 3—压载室

2.2.6 X 射线衍射法

本方法适用于晶格结构已知的晶体的密度测量。由于计算过程是以理想晶体模型为基础的，所以该法测量所得的密度近乎理论密度，与实际的密度有少许差异。但该方法可用来测量极少量试样或合金中析出相的密度，这是其他方法所无法比拟的。

1. 试验原理

晶胞的密度可用下式表示：

$$\rho = \frac{1.66044 \sum_{i=1}^k n c_i A_i}{abc \sqrt{1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma + 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma}} \quad (2-16)$$

式中 ρ ——晶胞的密度，单位为 g/cm^3 ；

n ——单位晶胞内的原子总数；

c_i ——晶胞内原子的个数百分比；

A_i ——元素的相对原子质量；

a 、 b 、 c ——晶胞三个棱边的长度，单位为 10^{-10}m ；

α 、 β 、 γ ——晶胞棱边的夹角，单位为 $(^\circ)$ 。

利用式 (2-16) 计算出晶胞的密度，可代表该金属的密度。

在已知的七大晶系中,除三斜晶系有六个(a 、 b 、 c 、 α 、 β 、 γ)不同的晶格参数外,其他晶系都少于六个,因而计算晶胞密度公式的分母可以简化,如表2-8所示。

表2-8 晶胞的体积(密度计算式的分母)

晶 系	晶胞的体积/(10^{-30}m)	晶 系	晶胞的体积/(10^{-30}m)
立方晶系	a^3	三角晶系(菱方)	$a^3 \sqrt{1-3\cos^2\alpha+2\cos^3\alpha}$
四方晶系	a^2c	六角晶系(六方)	$a^2c\sin 120^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}a^2c$
正交晶系	abc	单斜晶系	$abcsin\beta$

2. 实例

1) 铝是面心立方晶格结构, n 为 4, 相对原子质量为 26.98, 室温下的晶格常数 $a = 4.0492 \times 10^{-10}\text{m}$ 。铝的密度 ρ 为

$$\rho = \frac{1.66044 \times 4 \times 26.98}{(4.0492)^3} = 2.699\text{g/cm}^3$$

2) 碳化物 Cr_3C_2 , 正交晶系, n 为 20, 铬和碳原子的个数百分比分别为 0.6 和 0.4, 晶格参数: $a = 5.5329 \times 10^{-10}\text{m}$ 、 $b = 2.829 \times 10^{-10}\text{m}$ 、 $c = 11.4719 \times 10^{-10}\text{m}$, 铬的相对原子质量为 51.996, 碳的相对原子质量为 12.011。其密度 ρ 为

$$\rho = \frac{1.66044 \times (20 \times 0.6 \times 51.996 + 20 \times 0.4 \times 12.011)}{5.5329 \times 2.829 \times 11.4719} = 6.66\text{g/cm}^3$$

2.2.7 放射性同位素法

放射性同位素是不稳定的物质,由于其原子核的自发衰变,会放射出某种粒子流或射线,如 α 射线、 β 射线、 γ 射线等。这些射线对物体都具有一定的穿透能力。虽然不同种类或不同强度的射线对物体的作用各不相同,但在穿过物体后出射强度都会发生衰减,物体的密度可按式(2-17)计算:

$$\rho = \frac{1}{\mu_m d} \ln \frac{I_0}{I} \quad (2-17)$$

式中 ρ ——物质的密度,单位为 g/cm^3 ;

μ_m ——质量吸收系数,单位为 cm^2/g ;

d ——穿透的物体厚度,单位为 cm ;

I_0 ——入射强度,单位为 lx ;

I ——出射强度,单位为 lx 。

2.2.8 松装密度的测定

1. 试验方法

常用漏斗法测定粉末材料的松装密度，试验装置如图 2-7 所示。该方法适用于自由通过直径为 2.5mm 小孔的金属粉末，也可用于难通过直径 2.5mm 的小孔却可自由通过直径为 5mm 小孔的粉末。

试验时，粉末从漏斗孔按一定高度自由落下充满杯子。在松装状态下，粉末材料的密度可按式 (2-18) 计算：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-18)$$

式中 ρ ——松装密度，单位为 g/cm^3 ；

m ——杯中粉末试样质量，单位为 g；

V ——杯子容积，单位为 cm^3 。

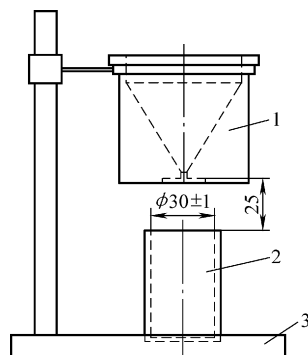


图 2-7 漏斗法试验装置
1—漏斗 2—量杯 3—无振底座

2. 注意事项

- 1) 粉末试样从漏斗中下落时，可用直径 1mm 的金属丝从上面通导。
- 2) 装满杯子后，用非磁性刮刀一次将粉末刮得和杯口一样平。
- 3) 刮平后轻轻敲打杯侧使粉末下沉，再称取质量。

2.2.9 振实密度的测定

1. 试验方法

常用漏斗法测定粉末材料的振实密度，试验装置如图 2-8 所示。

试验时将定质量的粉末装在振动容器中，在规定的条件下进行振动，直到粉末体积不再减小，测得粉末的振实体积，用式 (2-19) 计算粉末的振实密度：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-19)$$

式中 ρ ——振实密度，单位为 g/cm^3 ；

m ——杯中粉末试样质量，单位为 g；

V ——粉末的振实体积，单位为 cm^3 。

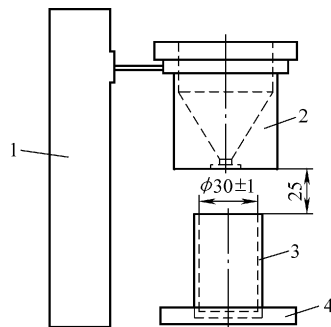


图 2-8 振动漏斗法试验装置
1—振动装置 2—漏斗
3—量杯 4—水平防振座

2. 注意事项

- 1) 机械振动的次数一般为 3000 次。
- 2) 振实完毕，如果粉末表面水平，可直接读

出体积，如果不平，则取最高点和最低点读数的平均值。

2.3 常用金属材料密度的测定

2.3.1 贵金属及其合金密度的测试方法

1. 测量原理

根据阿基米德原理，采用流体静力平衡法，在空气中用天平测定试样的质量。通过在液体（蒸馏水）中称量试样的质量测定其体积，根据定义计算出试样的密度。

2. 测量仪器及装置

(1) 天平 天平的称量范围及其对应的感量、吊丝直径如表 2-9 所示。

表 2-9 天平及吊丝的要求

称量范围/g	感量/mg	吊丝直径/mm	备 注
< 10	0.01	0.01 ~ 0.04	吊丝应选用不与水发生任何反应的材料制成
10 ~ 50	0.1	0.04 ~ 0.05	
> 50 ~ 100	0.5	0.05 ~ 0.1	
> 100 ~ 500	1.0	0.1 ~ 0.2	
> 500 ~ 5000	2.5	0.2 ~ 0.5	

(2) 温度计 采用最小分度值为 0.1℃，量程能满足测量要求的玻璃水银温度计。

(3) 蒸馏水制备装置 应能制出满足测量要求的蒸馏水。

(4) 机械抽气装置 应能对试样进行脱气处理。

(5) 吊具 适合于对不同质量或大小的试样进行水中称量，穿过水面的吊丝其直径应按表 2-9 的要求选择。

(6) 其他 适用于不同天平的支架和盛水杯、干燥器、电热盘等。

3. 取样

1) 试样可以是贵金属及其合金的各种型材、锭块、饰品。

2) 试样在测量前应清洗干净，试样的体积最少不得低于 0.1cm³，若单个试样的体积达不到要求，可用数个相同的试样组合。

4. 测定步骤

(1) 除气 对于体积较大、表面质量好且致密的压力加工试样，可在无水乙醇中浸泡润湿，然后用蒸馏水冲洗；对于体积较小、比表面积大、表面粗糙或微裂纹多的试样，在清洗润湿后应将其放入盛有测量用蒸馏水的杯中进行抽空除气，直

到试样表面无气泡或很少出现气泡为止。抽空除气后,水温会降低,要设法使其恢复到原来的温度。

(2) 水中称量 根据试样的质量和大小,选择合适的天平和吊具。先将试样放在吊具上进行水中称量,然后取下试样置于杯底,单独进行吊具的水中称量。当试样体积小于 0.3cm^3 时,水中称量应至少应进行两次。水中称量时,由于水的表面张力和阻尼作用,不仅会使天平的感量降低,而且天平的平衡位置也会受到影响,故必须按水中称量时的感量修正读数。可采用轻微扰动液面的方法,使其达到正确的平衡位置。

(3) 水温测定 水的温度可取水中称量前后两次测量温度的平均值。也可取两次水中称量之间的测量温度作为水的温度。

(4) 质量测定 将试样取出烘干,冷却后用同一天平测定其质量,测量精度应不低于 0.001% 。

5. 测定结果计算

试样的密度按式 (2-20) 计算:

$$\rho = m\rho_t / (m - m_1 - m_2) \quad (2-20)$$

式中 ρ ——试样在温度 t 下的密度,单位为 g/cm^3 ;

m ——试样在空气中的质量,单位为 g ;

m_1 ——试样放在吊具上的水中的称量值,单位为 g ;

m_2 ——吊具的水中的称量值,单位为 g ;

ρ_t ——水在温度 T 下的密度,单位为 g/cm^3 ,如表 2-10 所示。

表 2-10 不同温度下纯水的密度 (单位: g/cm^3)

温度 $t/^\circ\text{C}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	0.999868	0.999875	0.999881	0.999888	0.999894	0.999900	0.999905	0.999911	0.999916	0.999922
1	0.999927	0.999932	0.999936	0.999941	0.999945	0.999949	0.999953	0.999957	0.999961	0.999964
2	0.999968	0.999971	0.999974	0.999977	0.999980	0.999982	0.999984	0.999987	0.999989	0.999990
3	0.999992	0.999994	0.999995	0.999996	0.999997	0.999998	0.999999	0.999999	1.000000	1.000000
4	1.000000	1.000000	1.000000	0.999999	0.999999	0.999998	0.999997	0.999996	0.999995	0.999993
5	0.999992	0.999990	0.999988	0.999986	0.999984	0.999982	0.999980	0.999977	0.999974	0.999971
6	0.999968	0.999965	0.999962	0.999958	0.999954	0.999951	0.999947	0.999943	0.999938	0.999934
7	0.999930	0.999925	0.999920	0.999915	0.999910	0.999905	0.999899	0.999894	0.999888	0.999882
8	0.999876	0.999870	0.999864	0.999858	0.999851	0.999844	0.999838	0.999831	0.999824	0.999816
9	0.999809	0.999802	0.999794	0.999786	0.999778	0.999770	0.999762	0.999754	0.999746	0.999737
10	0.999728	0.999719	0.999710	0.999701	0.999692	0.999683	0.999673	0.999663	0.999653	0.999643
11	0.999633	0.999623	0.999612	0.999602	0.999591	0.999580	0.999570	0.999559	0.999547	0.999536

(续)

温度 $t/^{\circ}\text{C}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
12	0.999525	0.999513	0.999502	0.999490	0.999478	0.999466	0.999454	0.999442	0.999429	0.999417
13	0.999404	0.999391	0.999378	0.999365	0.999352	0.999339	0.999326	0.999312	0.999299	0.999285
14	0.999271	0.999257	0.999243	0.999229	0.999215	0.999200	0.999186	0.999171	0.999156	0.999142
15	0.999127	0.999111	0.999096	0.999081	0.999066	0.999050	0.999034	0.999018	0.999003	0.998986
16	0.998970	0.998954	0.998938	0.998921	0.998905	0.998888	0.998871	0.998854	0.998837	0.998820
17	0.998803	0.998786	0.998768	0.998750	0.998733	0.998715	0.998697	0.998679	0.998661	0.998643
18	0.998624	0.998606	0.998587	0.998569	0.998550	0.998531	0.998512	0.998493	0.998474	0.998454
19	0.998435	0.998415	0.998396	0.998376	0.998356	0.998336	0.998316	0.998296	0.998275	0.998255
20	0.998234	0.998214	0.998193	0.998172	0.998151	0.998130	0.998109	0.998088	0.998066	0.998045
21	0.998023	0.998002	0.997980	0.997958	0.997936	0.997914	0.997892	0.997869	0.997847	0.997824
22	0.997802	0.997779	0.997756	0.997743	0.997710	0.997687	0.997664	0.997641	0.997617	0.997594
23	0.997570	0.997547	0.997523	0.997499	0.997475	0.997451	0.997426	0.997402	0.997378	0.997353
24	0.997329	0.997304	0.997279	0.997254	0.997229	0.997204	0.997179	0.997154	0.997128	0.997103
25	0.997077	0.997051	0.997026	0.997000	0.996974	0.996948	0.996921	0.996895	0.996869	0.996942
26	0.996816	0.996789	0.996762	0.996736	0.996709	0.996682	0.996655	0.996627	0.996600	0.996573
27	0.996545	0.996518	0.996490	0.996462	0.996434	0.996406	0.996378	0.996350	0.996322	0.996294
28	0.996265	0.996237	0.996208	0.996179	0.996151	0.996122	0.996093	0.996064	0.996035	0.996005
29	0.995976	0.995947	0.995917	0.995888	0.995858	0.995828	0.995798	0.995768	0.995738	0.995708
30	0.995678	0.995648	0.995617	0.995587	0.995556	0.995526	0.995495	0.995464	0.995433	0.995402

2.3.2 钨、钼条密度的测量方法

1. 测定原理

钨、钼条的密度是指在一定温度下单位体积钨、钼条的质量，一般是通过测量试样的质量和体积来确定的。根据阿基米德原理，用排水法测定体积，用天平称得质量，即可根据定义计算出试样的密度。

2. 测定仪器及装置

- 1) 天平的最大称量为 1kg，感量为 10mg。
- 2) 吊架和活动储液槽。

仪器结构如图 2-9 所示。

3. 测试液体

测试液体用质量分数为 95% 的乙醇。

4. 取样

采取经预先检定无吸水现象的样品。

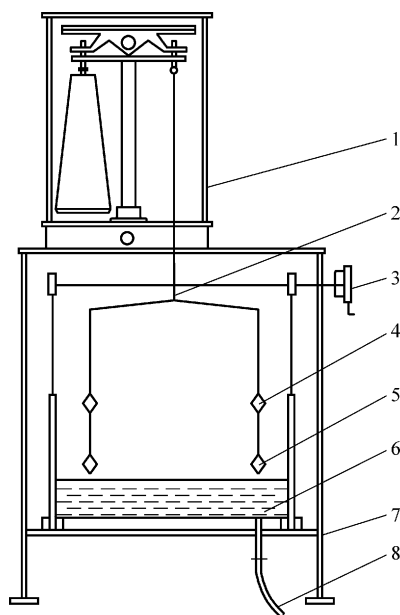


图 2-9 密度测定仪结构示意图

1—天平 2—吊架 3—转轮 4— W_1 吊环 5— W_2 吊环 6—储液槽 7—密封框架 8—液体流出管

5. 样品的制备

为了避免测量数据的误差，样品表面应先用砂纸磨去粒状物，使其表面光滑，并除去表面污垢后备用。

6. 测试步骤

1) 调整天平在空气中的零位（即 W_1 和 W_2 吊环同时在空气中的零位），然后调整细丝（即 W_2 吊环）在液体中的零位。

2) 记录室温，并测量液体的温度。

3) 将试样放入 W_1 吊环，称出试样在空气中的质量 m_1 （在称 m_1 质量时， W_2 吊环在液体中），如图 2-10 所示。

4) 将试样从 W_1 吊环取出放入 W_2 吊环，称出试样在液体中的质量 m_2 ，如图 2-11 所示。

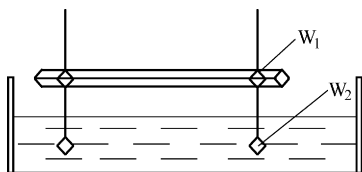


图 2-10 在空气中称量示意图

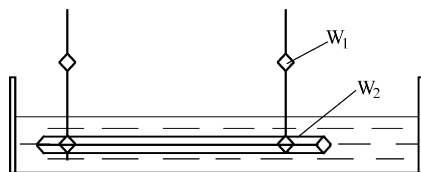


图 2-11 在液体中称量示意图

7. 测定结果计算

按式 (2-21) 计算钨、钼条的密度:

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \rho_0 \quad (2-21)$$

式中 ρ ——试样的密度, 单位为 g/cm^3 ;

m_1 ——试样在空气中的质量, 单位为 g ;

m_2 ——试样在液体中的质量, 单位为 g ;

ρ_0 ——乙醇在温度 T 下的密度, 单位为 g/cm^3 , 如表 2-11 所示。

表 2-11 不同温度下乙醇的密度

温度 $T/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	温度 $T/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$
5	0.80207	18	0.79114
6	0.80123	19	0.79029
7	0.80039	20	0.78945
8	0.79956	21	0.78860
9	0.79872	22	0.78775
10	0.79788	23	0.78691
11	0.79704	24	0.78606
12	0.79620	25	0.78522
13	0.79535	26	0.78437
14	0.79451	27	0.78352
15	0.79367	28	0.78267
16	0.79283	29	0.78182
17	0.79198	30	0.78097

2.3.3 电工钢片和钢带密度的测定方法

1. 适用范围

该密度测量方法仅适用于无取向电工钢片 (带), 并且其硅的质量分数不大于 4%, 杂质的总质量分数不大于 0.4%, 含铝质量分数范围为: $[0.17w(\text{Si}) - 0.28] \leq w(\text{Al}) \leq [0.17w(\text{Si}) + 0.28]$ 。

2. 测量原理

电工钢片和钢带的密度 ρ_m 与硅和铝的含量有关。实验表明, 密度 ρ_m 与容易测量的密度与电阻率 ρ 的乘积 $\rho_m \rho$ 几乎是简单的线性关系, 如图 2-12 所示。因此, 可以通过测量密度与电阻率的乘积 $\rho_m \rho$ 直接导出密度的测定值。

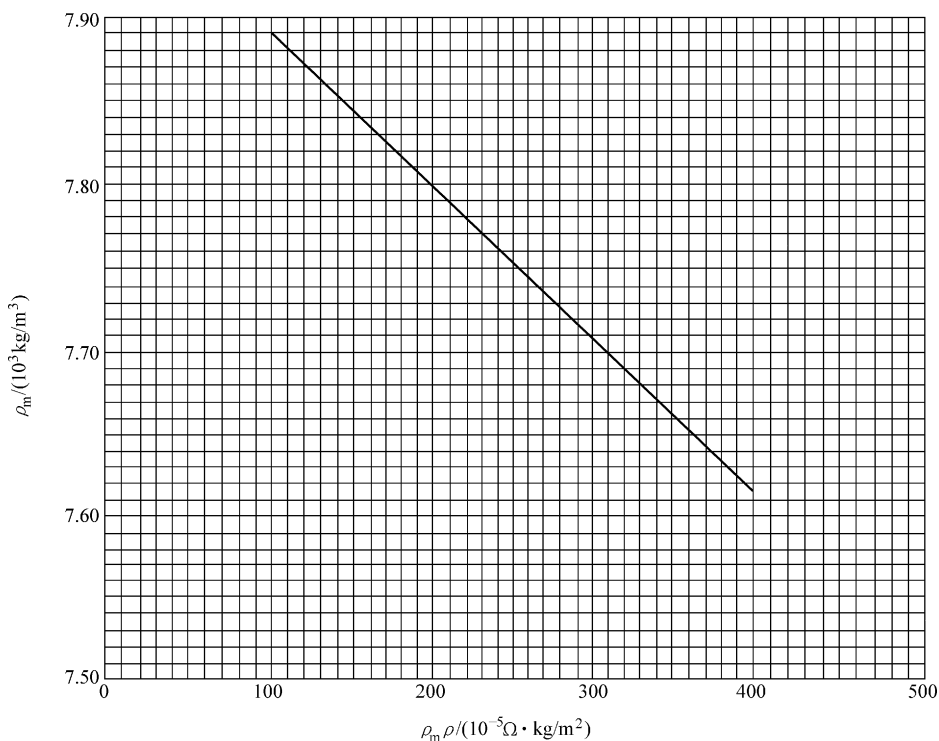


图 2-12 电工钢板的密度 ρ_m 和密度 ρ_m 与电阻率 ρ 的乘积 $\rho_m \rho$ 关系图

图 2-12 所示的线性关系是由实验数据的线性回归得出的，并符合式 (2-22) 的经验关系式：

$$\rho_m = \rho_0 - k_n \rho_m \rho \quad (2-22)$$

式中 ρ_m ——电工钢片或钢带的密度，单位为 kg/m^3 ；

ρ_0 ——常数，取 $7973 \text{ kg}/\text{m}^3$ ；

ρ ——电阻率，单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ ；

k_n ——常数，取 $89200 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ 。

3. 爱泼斯坦样测量方法

(1) 试样 爱泼斯坦样中使用的钢板试样符合下述尺寸：

- 1) 宽度 $b = (30 \pm 0.2) \text{ mm}$ ；
- 2) 长度满足： $280 \text{ mm} \leq l \leq 320 \text{ mm}$ 。
- 3) 剪切试样的长轴方向应和轧制方向平行。
- 4) 除了电接触的部位外，其他部位不必去除氧化物或其他绝缘涂层。

(2) 试验方法 若电流均匀流过检测试样，爱泼斯坦试样上长度方向两触点间的电阻 R 可容易地测量出来，并且有如下关系式成立：

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{\rho l_e}{bd} \\
 m &= lbd\rho_m \\
 \rho_m \rho &= \frac{Rm}{l_e l}
 \end{aligned}
 \quad (2-23)$$

式中 b ——试样宽度，单位为 m ；
 d ——试样厚度，单位为 m ；
 l ——试样长度，单位为 m ；
 l_e ——试样上两电触点的间距，单位为 m ；
 m ——试样质量，单位为 kg ；
 ρ_m ——无绝缘层试样的密度，单位为 kg/m^3 ；
 R ——电阻，单位为 Ω ；
 ρ ——电阻率，单位为 $\Omega \cdot m$ 。

(3) 根据关系式测定乘积 $\rho_m \rho$ 的值，然后由图 2-12 读出相应 ρ_m 的值。

4. 单片样测量方法

(1) 试样 单片样使用的钢板试样应符合下述尺寸要求：

1) 宽度， $b = 500mm$ 。

2) 长度， $l = 500mm$ 。

3) 符合 GB/T 13789—2008 的要求。但是，矩形单片试样的尺寸可在如下范围变化： $500mm \leq b \leq 600mm$ 和 $500mm \leq l \leq 600mm$ 。

(2) 试验方法 根据两维保形映射理论，对于一个均匀厚度和任意形状的物体有下述关系：

$$\rho_m \rho = \frac{\pi m}{lb \ln 2} \times \frac{R_{AB\ CD} + R_{BC\ AD}}{2}
 \quad (2-24)$$

式中 ρ ——电阻率，单位为 $\Omega \cdot m$ ；

l ——单片样的长度，单位为 m ；

b ——单片样的宽度，单位为 m ；

$R_{AB\ CD}$ ——电阻值，单位为 Ω ，其值由加在 C 和 D 触点上的电位差以及通过触点 A 和 B 的单位电流得出， A 、 B 、 C 、 D 触点应尽可能小并在试样的边缘随意分布，如图 2-13 所示；

$R_{BC\ AD}$ ——电阻值，单位为 Ω ，其值由加在 D 和 A 触点上的电位差以及通过触点 B 和 C 的单位电流得出， A 、 B 、 C 、 D 触点

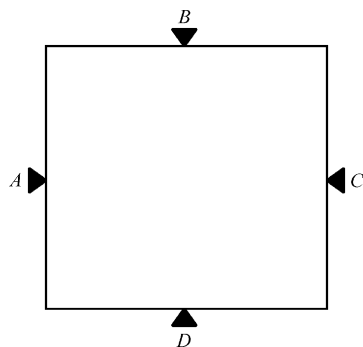


图 2-13 检测试样上的触点分布

应尽可能小并在试样的边缘随意分布,如图 2-13 所示。

(3) 根据关系式测定乘积 $\rho_m \rho$ 的值,然后由图 2-12 读出相应 ρ_m 的值。

5. 检测设备

(1) 共同要求 爱泼斯坦样测量方法和单片样测量方法的共同要求如下:

- 1) 一台准确度为 $\pm 0.1\text{g}$ 以内的天平,可测量试样的质量 m 。
- 2) 一台准确度为 $\pm 0.5\%$ 以内的长度测量装置,可测量试样的长度 l 和宽度 b 。
- 3) 一台稳定低压直流电源,可提供 $1 \sim 10\text{A}$ 的直流电流。
- 4) 一台准确度为 $\pm 1\%$ 以内的电阻测量装置,可测量试样的电阻。

5) 一台试样电测量接触装置,包括一个可实施接触的基座,一块在触点之间比试样略小的支撑平板,在对应触点的试样边缘每边有不超过 5mm (对单片样不超过 10mm) 的空间,支撑平板的厚度应使触点接触处于其上的试样。

(2) 爱泼斯坦样测量方法的要求 与爱泼斯坦样进行电接触的装置采用四个触点:两个装在可拆卸桥架上的电位触点(触针)和两个固定在基座上的电流触点。四个触点沿试样轴线排布,两个电位触点位于两个电流触点之间。电流触点包含两个簧片使得其能与试样在整个宽度上良好地接触。电位触点的间距应超过 200mm 。电位触点与电流触点的最小距离不小于试样宽度(电位触点的间距 l 按 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内的准确度至少测定一次)。除了电接触的部位外,其他部位不必去除氧化物或其他绝缘涂层。

(3) 单片样测量方法的要求 如图 2-14 所示,四个触点头部尖锐(如具有 1mm 的曲率半径),并装在基座的固定架上。这些触点按 $\pm 1\text{mm}$ 以内的准确度对称地安放在试样轴线上。安放于相对位置的触点对的间距可以在另一对触点构成的轴线的对称方向上变化,这样可适应不同的试样尺寸(此时支撑平板的尺寸也需要作相应的调整)。不同位置的定位孔或可调节沟槽使得触点支架可以固定在需要的位置。触头借助弹簧的弹性抵压在试样的边缘。触头的刃部同试样的边缘垂直。此机构可以用一个小的相对支架可动的触块,以及支架与压在试样边缘的触块间的一

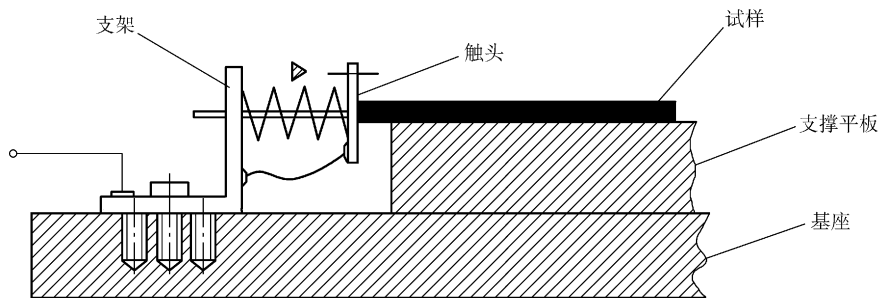


图 2-14 触点支架机构截面示意图

个弹簧组成。可动触块连在支架上，或插在支架上的插孔中，并通过一段焊接在两部分上的软导线相连。

6. 测定步骤

(1) 总则 称量试样的质量，并用长度测量器具测量试样的长度和宽度。测量在室温为 $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ 下进行，测量时室温应保持稳定。

(2) 爱泼斯坦样测量步骤 接通电路，并根据材料的厚度和性能选择 $1 \sim 5\text{A}$ 的电流加载到试样上。如使用相同准确度的四端欧姆表，也可以采用较低的电流。读出电压和电流值。将电流反接并设置到此前的相同值，再次读出电压值。电阻值 R 由两次电压值除以电流值后再计算平均值给出。

(3) 单片样测量步骤 按图 2-15 接通电路。在试样的 A 和 B 触点间加载 $2 \sim 10\text{A}$ 的电流，以给出具有特定准确度的电压值读数。如使用相同准确度的四端欧姆表，也可以采用较低的电流。读出电压和电流值。将电流反接并设置到此前的相同值，再次读出电压值。电阻值 $R_{AB\ CD}$ 由两次电压值除以电流值后再平均给出。交换电路连接方式，对调 A 和 C 等触点，电阻值 $R_{BC\ DA}$ 按同样的方法得出。

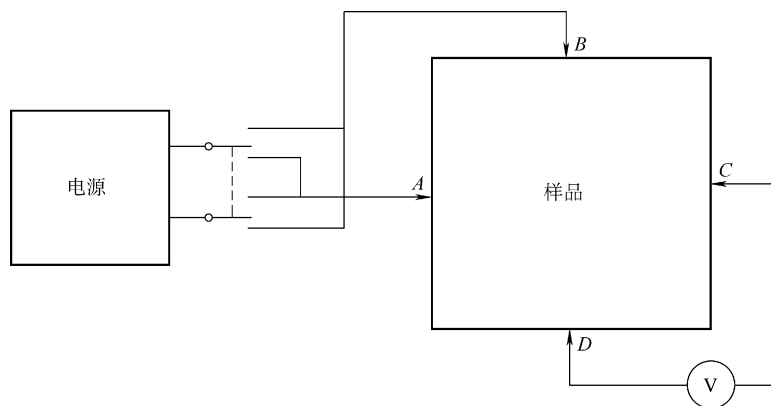


图 2-15 测量单片样电阻值 $R_{AB\ CD}$ 的电路

7. 注意事项

1) 考虑到生产的电工钢板卷边缘可能出现明显厚度变化，而此厚度变化可能对测量的准确度有一定影响，故制样时应尽量在板卷中间取样，避免边缘厚度变化的影响。

2) 测量在室温为 $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ 下进行。

2.3.4 铝、镁及其合金粉末松装密度测定

1. 测定方法原理

粉体试样以松散状态，均匀、连续地充满已知容积的量杯，称出量杯和粉体试

样的质量便可计算出粉体试样的松装密度。

2. 测定仪器及装置

1) 斯科特容量计如图 2-16 所示。

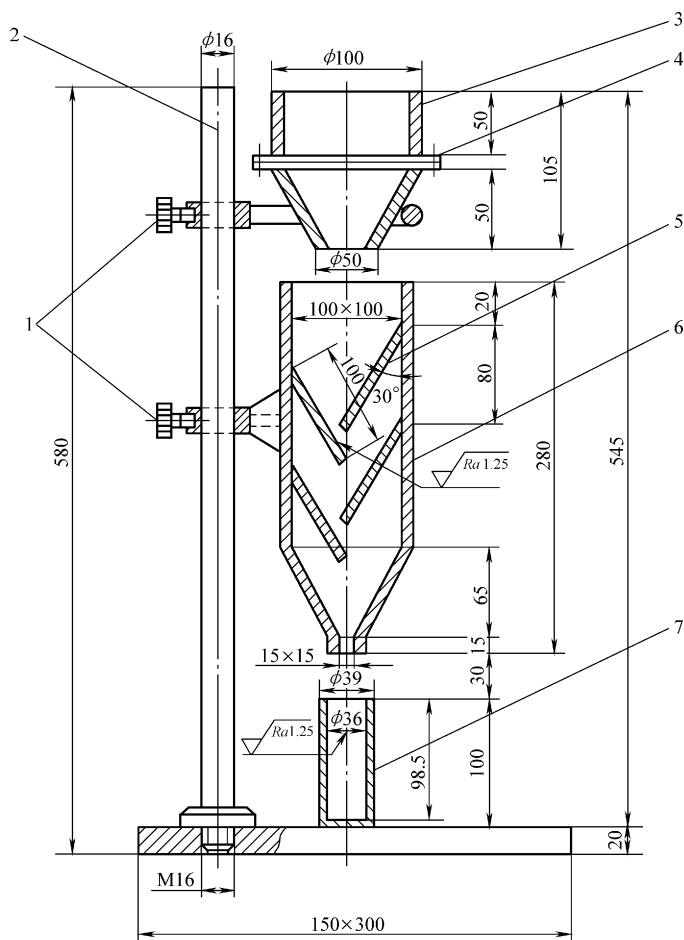


图 2-16 斯科特容量计

1—活动支架 2—固定支架 3—连体黄铜漏斗 4—黄铜筛网
5—布料箱滑板 6—布料箱体 7—黄铜量杯

2) 漏斗式密度计如图 2-17 所示。

3) 天平的最大称量值为 500g，感量为 0.01g。

4) 秒表、金属直尺。

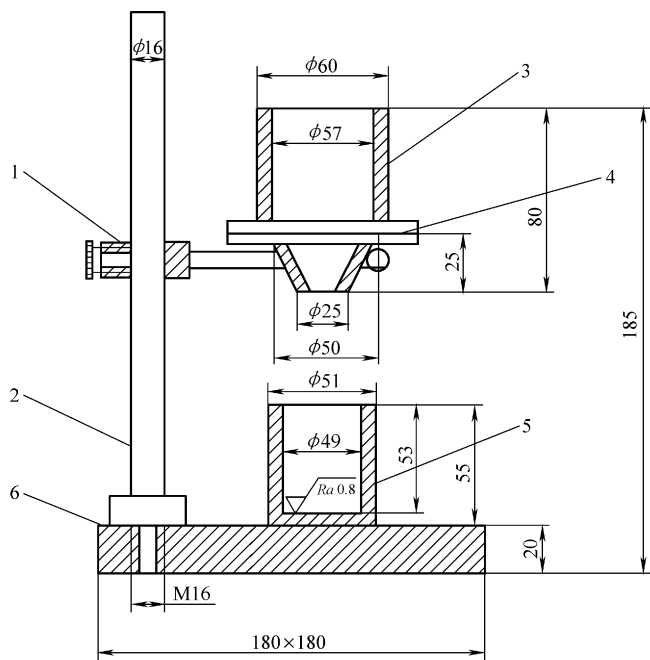


图 2-17 漏斗式密度计

1—活动支架 2—固定支架 3—连体漏斗 4—铜网 5—布料箱滑板 6—铁架台底座

3. 取样

可用不同形式的取样器。取样器的长度应使粉末能从容器的各个深度取出。取样器的结构取决于所取粉末的流动性。Ⅰ型取样器如图 2-18 所示，Ⅱ型取样器如图 2-19 所示。

Ⅰ型取样器适用于流动性好的松装粉末。它有一个内管和一个外管，底部封闭，在外管的适当位置开一个纵向斜的长形孔，内管开一个纵向直的、宽度与外管相同的长形孔，以便内、外管转动时能依次打开和关闭。为避免在转动时遇到大颗粒卡死，管子之间应有适当间隙。用该取样器取样时，先关闭长形孔，再缓慢插入到容器的底部。建议取样器应从粉末运输和储存时存放状态的垂直方向插入。当取样器到达底部后，打开长形孔，以使粉末由底到顶充满取样器。然后关闭长形孔，拔出取样器。取样器中的所有粉末应注入总样容器内。

Ⅱ型取样器由开口的单层管构成。该取样器适用于当其从粉末中拔出时能留在管内的各种粉末。这可通过选择合适的管径来实现。

取样器应慢慢地插入容器直到底部，取样器从粉末运输和储存时存放状态的垂直方向插入，到达底部后，拔出取样器，将取出的粉末注入总样的容器内。

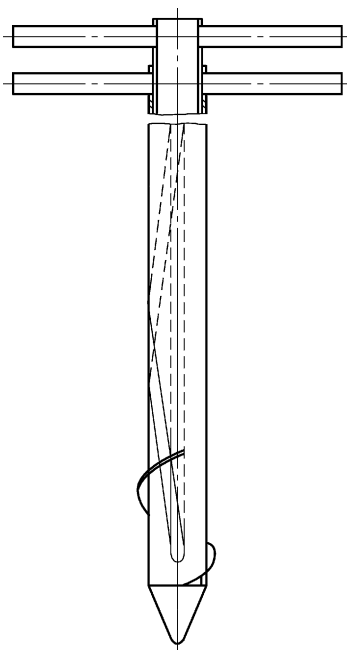


图 2-18 I 型取样器

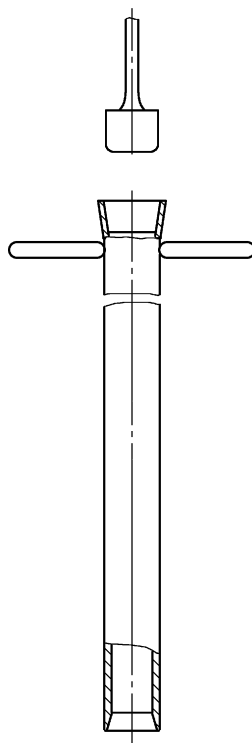


图 2-19 II 型取样器

4. 测定步骤

将约 150mL 待测粉体试样匀速、连续地撒入漏斗式密度计中，用软毛刷轻轻地拂拭漏斗式密度计筛网上的试样，在 40 ~ 120s 内使之均匀不断地通过筛网，并沿着漏斗松散地充满并溢出已知质量 m_0 的量杯。测定过程中不能移动、振动或碰撞量杯。用金属直尺轻轻地一次刮平量杯上部堆积的多余试样，在天平上称量试样与量杯的总质量 m_1 ，精确至 0.01g。

5. 测定结果计算

松装密度按式 (2-25) 计算：

$$\rho_b = \frac{m_1 - m_0}{V} \quad (2-25)$$

式中 ρ_b ——松装密度，单位为 g/cm^3 ；

m_1 ——试样与量杯的总质量，单位为 g；

m_0 ——量杯的质量，单位为 g；

V ——自由充填状态时粉体试样的体积，单位为 cm^3 。

6. 注意事项

1) 测定结果取三次平行测试的平均值, 试验之间的测定结果允许误差不大于 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ 。

2) 斯科特容量法适用于测定可以借助软毛刷手动通过 $2500\mu\text{m}$ 筛网的粒状粉体。漏斗法适用于测定含有微量润滑剂, 可以借助软毛刷手动通过 $500\mu\text{m}$ 筛网的片状粉体。

2.3.5 磁性氧化物粉末振实密度的测定

1. 测定仪器及装置

(1) 玻璃量筒 采用经校准后容积为 5cm^3 的具有刻度的量筒, 刻度部分的高度约为 60mm , 刻度以上部分的高度约为 90mm , 量筒最小刻度间的容积为 0.1cm^3 , 其测量精度为 $\pm 0.05\text{cm}^3$ 。

(2) 振动装置 装有一定粉末的量筒, 用夹持器固定在带导销的支座上, 借助凸轮的转动上下运动, 撞击砧子产生振动, 使粉末由松散状态逐渐振实。冲程为 $(3 \pm 0.2)\text{mm}$, 每分钟振动 $70 \sim 110$ 次。该装置如图 2-20 所示。

(3) 天平 应有足够的称量范围, 且称量的精度能达到 $\pm 0.05\text{g}$ 。

2. 取样

1) 试验粉末的质量应根据振实后最小体积为 $4 \sim 5\text{cm}^3$ 来称取, 每种样品取三份进行试验。

2) 粉末需要在分解温度以下烘干处理 2h 以上, 在干燥器中冷却至室温后使用。如果粉末易氧化, 应在真空或惰性气氛中进行烘干; 如果粉末中含有易挥发性物质, 则可不进行烘干。

3. 测定步骤

1) 玻璃量筒内壁要求清洗至不挂水珠, 并要彻底干燥。

2) 称量粉末应精确到 0.1g 。试验粉末量振实后的最小体积为 $4 \sim 5\text{cm}^3$ 。

3) 将一定数量的粉末装入 5cm^3 量筒内, 然后固定在带导销的支座上, 当凸轮转动时, 带导销的支座和夹持器产生上下移动, 撞击砧子产生振动, 使量筒内的粉末逐渐振实, 直至粉末的体积不再继续减小。

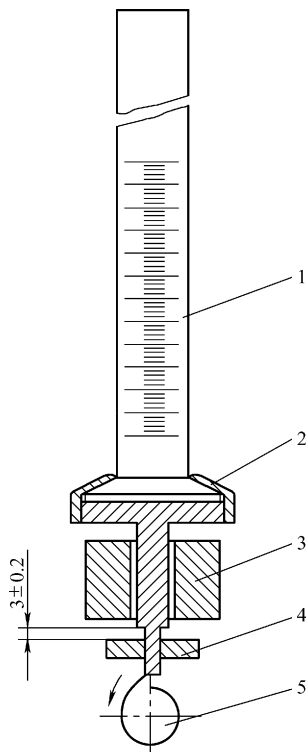


图 2-20 振实装置示意图

1—量筒 2—带导销的支座
3—导向支座 4—砧子 5—凸轮

4) 粉末经过振实后, 如果表面是水平面, 可直接读出体积值; 如果表面是倾斜面, 则应取最高和最低读数的平均值来确定振实体积。

4. 测定结果计算

粉末的振实密度由式 (2-26) 计算:

$$\rho_t = \frac{m}{V}$$
 (2-26)

式中 ρ_t ——粉末的振实密度, 单位为 g/cm^3 ;

m ——粉末的质量, 单位为 g ;

V ——粉末振实后的体积, 单位为 cm^3 。

5. 注意事项

1) 试验时可测硅粉末体积不发生继续减小的最小振实次数 N 。一般情况下, 量筒内粉末应受到 $2N$ 次的振动。

2) 取三次测量的算术平均值作为测试结果。其值小于或等于 $4\text{g}/\text{cm}^3$ 时, 修约到 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$; 其值大于 $4\text{g}/\text{cm}^3$ 时, 修约到 $0.2\text{g}/\text{cm}^3$ 。

2.4 常用金属材料的密度

2.4.1 金属及非金属元素的密度

金属及非金属元素的密度如表 2-12 所示。

表 2-12 金属及非金属元素的密度 (单位: g/cm^3)

族 周期	I A	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII			I B	II B	III A	IV A	V A
2	Li 0.53	Be 1.85													
3	Na 0.97	Mg 1.74											Al 2.70	Si 2.32 ~ 2.42	
4	K 0.87	Ca 1.54	Sc 3.01	Ti 4.53	V 6.0	Cr 7.19	Mn 7.43	Fe 7.87	Co 8.9	Ni 8.91	Cu 8.96	Zn 7.13	Ga 5.91	Ge 5.32 ~ 5.36	As 5.73
5	Rb 1.53	Sr 2.60	Y 4.47	Zr 6.5	Nb 8.57	Mo 10.2	Tc 11.46	Ru 12.45	Rh 12.41	Pd 12.02	Ag 10.50	Cd 8.65	In 7.31	Sn 7.3	Sb 6.69

(续)

族 周期	I A	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII			I B	II B	III A	IV A	V A
6	Cs 1. 90	Ba 3. 60	La 6. 16	Hf 13. 3	Ta 16. 6	W 19. 3	Re 21. 02	Os 22. 61	Ir 22. 65	Pt 21. 45	Au 19. 3	Hg 13. 55	Tl 11. 85	Pb 11. 34	Bi 9. 8
7	Fr —	Ra 5. 0	Ac 10. 07												
镧系 元素	Ce 6. 77	Pr 6. 77	Nd 7. 01	Sm 7. 54	Eu 5. 25	Gd 7. 87	Tb 8. 25	Dy 8. 57	Ho 8. 79	Er 9. 06	Tm 9. 32	Yb 6. 96	Lu 9. 85		

2.4.2 铁合金的密度及堆密度

铁合金的密度及堆密度如表 2-13 所示。

表 2-13 铁合金的密度及堆密度

铁合金名称	密度/(g/cm ³)	堆密度/(g/cm ³)	备 注
硅铁	3. 5	1. 4 ~ 1. 6	$w(\text{Si}) = 75\%$
	5. 15	2. 2 ~ 2. 9	$w(\text{Si}) = 45\%$
高碳锰铁	7. 10	3. 5 ~ 3. 7	$w(\text{Mn}) = 76\%$
中碳锰铁	7. 0	—	$w(\text{Mn}) = 92\%$
电解锰	7. 2	3. 5 ~ 3. 7	—
硅锰合金	6. 3	3 ~ 3. 5	$w(\text{Si}) = 20\%$, $w(\text{Mn}) = 65\%$
高碳铬铁	6. 94	3. 8 ~ 4. 0	$w(\text{Cr}) = 60\%$
中碳铬铁	7. 28	—	$w(\text{Cr}) = 60\%$
低碳铬铁	7. 29	2. 7 ~ 3. 0	$w(\text{Cr}) = 60\%$
金属铬	7. 19	3. 3(块重 15kg 以下)	—
硅钙	2. 55	—	$w(\text{Ca}) = 31\%$, $w(\text{Si}) = 59\%$
镍板	8. 7	2. 2	$w(\text{Ni}) = 99\%$
镍豆	—	3. 3 ~ 3. 9	$w(\text{Ni}) = 99. 7\%$
钒铁	7. 0	3. 4 ~ 3. 9	$w(\text{V}) = 40\%$
钼铁	9. 0	4. 7	$w(\text{Mo}) = 60\%$
铌铁	7. 4	3. 2	$w(\text{Nb}) = 50\%$
钨铁	16. 4	7. 2	$w(\text{W}) = 70\% \sim 80\%$
钛铁	6. 0	2. 7 ~ 3. 5	$w(\text{Ti}) = 20\%$
磷铁	6. 34	—	$w(\text{P}) = 25\%$

(续)

铁合金名称	密度/(g/cm ³)	堆密度/(g/cm ³)	备 注
硼铁	7.2	3.1	$w(\text{B}) = 15\%$
铝铁	4.9	—	$w(\text{Al}) = 50\%$
铝锭	—	1.5	—
钴	8.8	—	—
铜	8.89	—	—
铈镧稀土	—	—	—
硅铁稀土	4.57~4.8	—	—

2.4.3 常用钢铁材料的密度

常用钢铁材料的密度如表 2-14 所示。

表 2-14 常用钢铁材料的密度

材 料 名 称	密度/(g/cm ³)	材 料 名 称	密度/(g/cm ³)
灰铸铁 (≤HT200)	7.2	铸钢	7.8
灰铸铁 (≥HT350)	7.35	钢材	7.85
可锻铸铁	7.35	高速钢 [$w(\text{W}) = 18\%$]	8.7
球墨铸铁	7.0~7.4	高速钢 [$w(\text{W}) = 12\%$]	8.3~8.5
白口铸铁	7.4~7.7	高速钢 [$w(\text{W}) = 9\%$]	8.3
工业纯铁	7.87	高速钢 [$w(\text{W}) = 6\%$]	8.16~8.34

2.4.4 常用有色金属材料的密度

常用有色金属材料的密度如表 2-15 所示。

表 2-15 常用有色金属材料的密度

材料名称及牌号	密度 ρ /(g/cm ³)	材料名称及牌号	密度 ρ /(g/cm ³)
纯铜, 无氧铜	8.9	HPb63-3	8.5
磷脱氧铜	8.89	HPb63-0.1	8.5
加工黄铜		HPb62-0.8	8.5
H96、H90	8.8	HPb61-1	8.5
H85	8.75	HPb59-1	8.5
H80	8.5	HSn90-1	8.8
H68、H68A	8.5	HSn70-1	8.54
H65、H62、H59	8.5	HSn62-1	8.5

(续)

材料名称及牌号	密度 $\rho / (\text{g/cm}^3)$	材料名称及牌号	密度 $\rho / (\text{g/cm}^3)$
HSn60-1	8.5	QA15	8.2
HA177-2	8.6	QA17	7.8
HA167-2.5	8.5	QA19-2	7.6
HA166-6-2-3	8.5	QA19-4	7.5
HA160-1-1	8.5	QA110-3-1.5	7.5
HA159-3-2	8.4	QA110-4-4	7.7
HMn58-2	8.5	QSi3-1	8.4
HMn57-3-1	8.5	QSi1-3	8.6
HMn55-3-1	8.5	QMn1.5	8.8
HFe59-1-1	8.5	QMn5	8.6
HSi80-3	8.6	QZr0.2	8.9
HNi65-5	8.5	QZr0.4	8.9
铸造黄铜		QCu0.5	8.9
ZCuZn38	8.43	QCu0.5-0.2-0.1	8.9
ZCuZn25Al6Fe3Mn3	7.7	QCd1	8.9
ZCuZn26Al4Fe3Mn3	7.83	铸造青铜	
ZCuZn31Al2	8.5	ZCuSn3Zn8Pb6Ni1	8.8
ZCuZn35Al2Mn2Fe1	8.5	ZCuSn10P1	8.76
ZCuZn40Mn3Fe1	8.5	ZCuSn10Pb5	8.85
ZCuZn40Mn2	8.5	ZCuSn10Zn2	8.73
ZCuZn33Pb2	8.55	ZCuSn5Zn5Pb5	8.83
ZCuZn40Pb2	8.5	ZCuPb10Sn10	8.9
加工青铜		ZCuPb15Sn8	9.1
QSn4-3	8.8	ZCuPb17Sn4Zn4	9.2
QSn4-4-2.5	8.77	ZCuPb30	9.54
QSn4-4-4	8.9	ZCuAl8Mn13Fe3Ni2	7.5
QSn6.5-0.1	8.8	ZCuAl9Mn2	7.6
QSn6.5-0.4	8.8	ZCuAl9Fe4Ni4Mn2	7.64
QSn7-0.2	8.8	ZCuAl10Fe3	7.45
QSn8-0.3	8.8	ZCuAl10Fe3Mn2	7.5
QBe2	8.3	加工白铜	
QBe1.9	8.3	B0.6、B5、B10	8.9

(续)

材料名称及牌号	密度 $\rho / (\text{g/cm}^3)$	材料名称及牌号	密度 $\rho / (\text{g/cm}^3)$
B19、B30	8.9	2A06	2.76
BFe30-1-1	8.9	2B11	2.8
BMn3-12	8.4	2B12	2.78
BMn40-1.5	8.9	2A10	2.8
BZn15-20	8.6	2A11	2.8
BA113-3	8.5	2A12	2.78
BA16-1.5	8.7	2A16	2.84
加工镍及镍合金		2A17	2.84
N2、N4、N6	8.9	6A02	2.7
N8、DN	8.9	2A50	2.75
NY1 ~ NY3	8.85	2B50	2.75
NSi0.19	8.85	2A70	2.8
NCu40-2-1	8.85	2A80	2.77
NCu28-2.5-1.5	8.85	2A90	2.8
NMg0.1	8.8	2A14	2.8
NCr10	8.7	6061	2.7
加工铝及铝合金		6063	2.7
1070A ~ 8A06	2.71	7A03	2.85
7A01	2.72	7A04	2.85
1A50	2.72	7A09	2.85
5A02	2.68	4A01	2.68
5A03	2.67	5A41	2.64
5083	2.67	5A66	2.68
5A05	2.65	LQ1、LQ2	2.74
5056	2.64	铸造铝合金	
5A06	2.64	ZL101	2.68
5B0A	2.65	ZL101A	2.68
3A21	2.73	ZL102	2.65
5A43	2.68	ZL104	2.63
2A01	2.76	ZL105	2.71
2A02	2.75	ZL105A	2.71
2A04	2.76	ZL106	2.73

(续)

材料名称及牌号	密度 $\rho / (\text{g/cm}^3)$	材料名称及牌号	密度 $\rho / (\text{g/cm}^3)$
ZL107	2. 80	PbSb2	11. 25
ZL108	2. 68	PbSb4	11. 15
ZL109	2. 71	PbSb6	11. 06
ZL110	2. 89	PbSb8	10. 97
ZL114	2. 68	Sn1 ~ Sn3	7. 3
ZL116	2. 66	轴承合金	
ZL201	2. 78	ZSnSb12Pb10Cu4	7. 4
ZL201A	2. 83	ZSnSb11Cu6	7. 38
ZL203	2. 80	ZSnSb8Cu4	7. 3
ZL204A	2. 81	ZSnSb4Cu4	7. 34
ZL205A	2. 82	ZPbSb16Sn16Cu2	9. 29
ZL207	2. 8	ZPbSb15Sn5Cu3Cd2	9. 6
ZL301	2. 55	ZPbSb15Sn10	9. 6
ZL303	2. 6	ZPbSb15Sn5	10. 2
ZL401	2. 95	ZPbSb10Sn6	10. 5
ZL402	2. 81	ZCuSn15Pb5Zn5	8. 7
加工锌及锌合金		ZCuSn10P1	8. 76
Zn1、Zn2	7. 15	ZCuPb10Sn10	8. 9
电池锌板	7. 15	ZCuPb15Sn8	9. 1
照相制版用普通锌板和微晶 锌板	7. 15	ZCuPb20Sn5	9. 2
		ZCuPb30	9. 54
胶印锌板	7. 2	ZCuAl10Fe3	7. 5
ZnCu1. 5	7. 2	硬质合金	
铸造锌合金		YG3、YG3X	15. 0 ~ 15. 3
ZZnAl10-5	6. 3	YG4	14. 9 ~ 15. 2
ZZnAl9-1. 5	6. 2	YG6X、YG6A	14. 6 ~ 15. 0
ZZnAl4-1	6. 7	YG6	14. 6 ~ 15. 0
ZZnAl4-0. 5	6. 7	YG8N、YG8	14. 5 ~ 14. 9
ZZnAl4	6. 6	YG8C	14. 5 ~ 14. 9
加工铅、锡及其合金		YG10C	14. 3 ~ 14. 6
Pb1 ~ Pb3	11. 34	YG11C	14. 0 ~ 14. 4
PbSb0. 5	11. 32	YG15	13. 9 ~ 14. 2

(续)

材料名称及牌号	密度 $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	材料名称及牌号	密度 $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$
YG20、YG20C	13.4 ~ 13.7	YT14	11.2 ~ 12.0
YG25	12.9 ~ 13.2	YT15	11.0 ~ 11.7
YW1	12.6 ~ 13.5	YT30	9.3 ~ 9.7
YW2	12.4 ~ 13.5	YN05	≥ 5.9
YW3	12.7 ~ 13.5	YN10	≥ 6.3
YW4	12.0 ~ 12.5	YH1	14.2 ~ 14.4
YT05	12.5 ~ 12.9	YH2	13.9 ~ 14.1
YT5	12.5 ~ 13.2		

第3章 金属材料的比热容

3.1 比热容的基本知识

比热容又称为质量热容，代号为 c ，是单位质量物质的热容量，即单位质量的某种物质在温度升高 1°C 时吸收的热量或温度降低 1°C 时所放出的热量。

比热容的单位是复合单位 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。在国际单位制中，能量、功、热量的主单位统一为 J ，温度的主单位是 K ，因此比热容的主单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。注意， $^{\circ}\text{C}$ 和 K 仅在温标表示上有所区别，在表示温差的量值意义上等价，因此这些单位中的 $^{\circ}\text{C}$ 和 K 可以互相替换。例如 $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 和 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 是等价的。

3.2 比热容的测量方法

3.2.1 真空绝热法

1. 试验原理

将封闭在一个绝热环境中的试样直接通电加热，通过记录所加电能、试样温度增加量及试样的质量而计算材料微分比热容。

2. 试验方法

典型的直接加热法高温绝热量热计测定比热容的方法如图 3-1 所示，适用的温度范围为 $4.2 \sim 1900\text{K}$ 。

(1) 连续加热法 在全部试验过程中对试样一直进行电加热，并控制使热屏与试样的温度始终保持一致。计算公式如下：

$$c = \frac{W - q}{m \frac{dT}{dt}} - \frac{A}{m} \quad (3-1)$$

式中 c ——比热容，单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；

W ——量热计发热体的加热功率，单位为 W ；

q ——试样与环境的热交换率，单位为 J/s ；

m ——试样的质量，单位为 kg ；

$\frac{dT}{dt}$ ——温度变化速率, 单位为 K/s;

A ——量热计的热容量, 单位为 J/K。

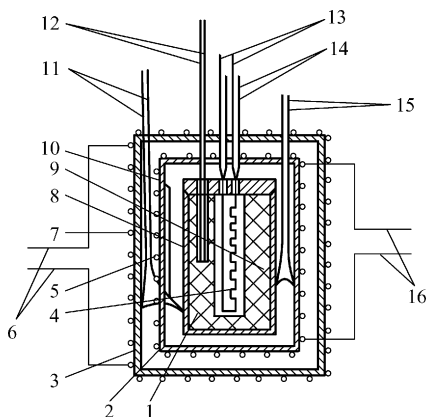


图 3-1 高温自动绝热量热计

- 1—样品 2—量热计控温热屏 3—炉子 4—量热计加热体 5—热屏加热体 6—炉子加热体电源引线
7—炉子加热体 8—测温元件 9—样品和热屏间示差热电偶 10—样品和炉子间和差热电偶
11—炉子加热体功率供给源的功率控制系统 12—热电偶引线 13—量热计加热体功率源引线
14—量热计加热体电压测量引线 15—屏加热体功率供给源的功率控制系统 16—屏加热体电源引线

(2) 周期加热法 在没有进行电加热时使样品与热屏温度处于平衡状态, 在限定时间内通电加热使试样有一很小的温升。计算公式如下:

$$c = \frac{Q - q\Delta\tau}{m\Delta T} - \frac{A}{m} \quad (3-2)$$

式中 c ——比热容, 单位为 J/(kg · K);

$\Delta\tau$ ——时间, 单位为 s;

Q ——在 $\Delta\tau$ 时间内加入的热量, 单位为 J;

q ——试样与环境的热交换率, 单位为 J/s;

m ——试样的质量, 单位为 kg;

ΔT ——由加热而引起的试样温升, 单位为 K;

A ——量热计的热容量, 单位为 J/K。

3. 试验注意事项

1) 准确测量比热容的关键是防止样品同周围环境发生热交换, 应采用系统内抽空除气和样品外围安置辐射屏壁的办法, 以防止试样与环境的对流、传导和辐射交换, 从而保证测量过程在绝热系统条件下进行。

2) 调节并控制热屏的温度跟踪试样的温度, 使两者的温度始终保持一致, 保证试样与周围环境没有热交换。

3) 在低温下试验可根据不同需要采用不同的恒温浴的介质, 如液氮、液氢、液氨、干冰和酒精等。

3.2.2 铜卡计下落法

1. 试验原理

下落法测量比热容是试样挂在高温炉中加热到待测温度并下落到量热计中以测量其比热容的方法。

2. 试验方法

等温套式铜卡计的高温平均比热容测试装置如图 3-2 所示。

下落机构 1 悬挂着试样 2 并将其置于高温炉中部的均温区部位。试验时将试样加热到所需温度 T_1 并保温一段时间使样品各部位温度均匀, 然后由下落机构控制落入铜卡计 5 中。铜卡计是由纯铜制成的圆柱体, 中间有一个接受样品的洞, 其中加一个内筒, 筒外绕有加热丝用以加热量热计, 用电加热法测量量热计的热值 Q 。为测量量热计的温度变化, 在量热计铜卡外侧靠近外表面处有一个深洞, 其内插入铂电阻温度计。铜卡用一个塑料支架支撑着坐入恒温套内。恒温套与高温炉相连, 其中间有阀门或炉门 4 以防止试验时炉子与铜卡计之间进行热交换。恒温套置于恒温水浴中。试验过程中铜卡计周围环境保持等温条件。试样未落入铜卡计之前, 铜卡计的温度为 T_0 , 这是试验的初始阶段; 当样品落入后, 铜卡计的温度迅速上升, 这是试验的主阶段; 当铜卡计内试样放热完毕, 铜卡计与试样共同达到温度 T_2 , 因高于环境温度, 温度开始有所下降, 这是试验的末阶段。试样的平均比热容由式(3-3)确定:

$$c = \frac{\Delta H}{m\Delta T} \quad (3-3)$$

式中 c ——比热容, 单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

m ——试样的质量, 单位为 kg ;

ΔH ——试样的热增量, 单位为 J ;

ΔT ——试样的温度变化量, 单位为 K 。

3. 试验注意事项

1) 试样由炉子下落到铜卡计的过程中, 试样的辐射热损随温度的增加而急剧

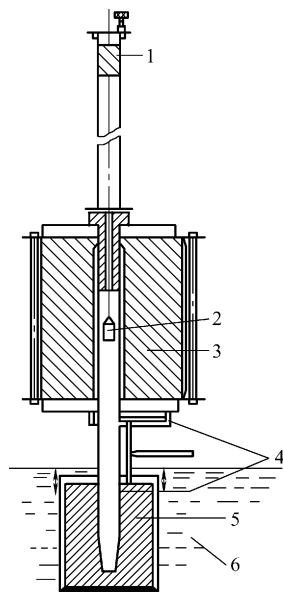


图 3-2 等温套式铜卡计的高温平均比热容测试装置

1—下落机构 2—试样 3—炉子
4—阀门 5—铜卡计 6—水浴

增加。因此，在高温试验中通常用试样的两次试验来消除辐射热损的影响。

2) 如果铜卡计的外套不是置于恒温水浴中，而是在外套上绕有电加热丝，在铜卡计与屏之间安置多个示差热电偶提供温差信号，由控制系统控制屏的加热而使铜卡计与屏的温度保持相同，即使在试样落入铜卡计时的试验主阶段也一直保持两者温度一致。

3) 量热计每升高 1K 所需要的热量必须精确标定。

4) 铜卡计的准确度和不确定度需采用质量分数大于 99.9% 的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 作为标准样品来标定。

5) 试验温度不得高于 3700K。

3.2.3 通电加热脉冲法

1. 试验原理

快速通电脉冲法测量比热容是对导体材料进行快速脉冲电加热并在高温状态下测试其比热容的方法。试验原理是将一根细小的试样在真空中快速加热，在试样中心部位安装两支探针，探针的间距为 L ，测量试样在两探针之间的电压降和电流，控制脉冲加热时间，测量通过试样的电流和探针间的电压降与时间的函数关系。该法直接对试样进行快速脉冲电加热，试验周期短，测试中由脉冲电加热所获得的热量还来不及散失，测试就已结束。电脉冲加热的能量几乎全被试样吸收，因而减少了高温下的辐射热损，测量精度较高。

2. 试验方法

将试样置于高温炉内加热，对棒状试样达到待测温度时再给试样一快速脉冲电加热。按式 (3-4) 计算出试样的比热容：

$$c = \frac{UI(\mathrm{d}\rho/\mathrm{d}T)}{m(\mathrm{d}\rho/\mathrm{d}t)} \quad (3-4)$$

式中 c ——比热容，单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；

U ——试样中心区域内电压探针测出的电压值，单位为 V ；

I ——脉冲电流，单位为 A ；

m ——试样中心区部分的质量，单位为 kg ；

$\mathrm{d}\rho/\mathrm{d}T$ ——温度 T 时试样电阻率的温度系数；

$\mathrm{d}\rho/\mathrm{d}t$ ——温度 T 时试样电阻率随时间 t 的变化速率。

3. 高速脉冲法测试系统

随着计算机的普及，出现了高速脉冲法计算机测试系统。该系统对试样瞬时通以脉冲大电流，在不到 1s 的短时间内，可将试样从室温快速加热到所需温度。它采用毫秒级灵敏度和分辨率的光电高温计和高速数据采集装置，能迅速测出通入试

样的电能和试样的温度变化等各项参数值,测量温度可高达试样的熔点。高速脉冲法计算机测试系统的原理如图 3-3 所示。

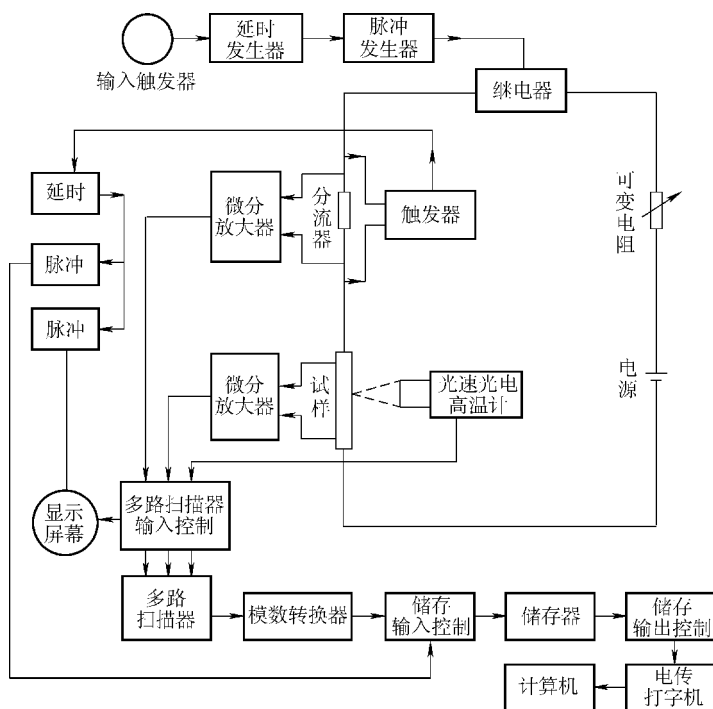


图 3-3 高速脉冲法计算机测试系统框图

3.2.4 示差扫描量热法

示差扫描量热技术简称 DSC, 其原理如图 3-4 所示。

将试样和参照物以一定的速度升(降)温,在保证两者的温差恒为零的条件下记录两者所需的功率差,根据功率差-时间(或温度)曲线及试样升(降)温过程中吸收(放出)的热量求出试样的比热容。试样的比热容可由式(3-5)计算:

$$c = \frac{dH/dt}{m dT/dt} \quad (3-5)$$

式中 c ——试样的比热容,单位为 $J/(kg \cdot K)$;

dH/dt ——进入试样的热流速率,单位为 J/s ;

dT/dt ——升温速率,单位为 K/s ;

m ——试样的质量,单位为 kg 。

采用示差扫描量热技术测量比热容时,由于热电偶的非线性,很难精确地标定 dH/dt 和 dT/dt 。为了提高测量的精度可用比较法,即用已知比热容的标准物质标定仪器。比较法的 DSC 曲线如图 3-5 所示。

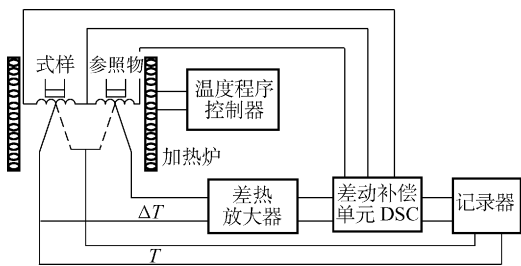


图 3-4 示差扫描量热技术原理

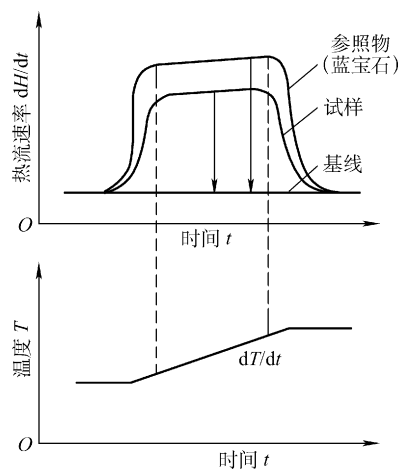


图 3-5 比较法的 DSC 曲线

3.3 典型元素的比热容

典型元素的比热容值如表 3-1 所示。

表 3-1 典型元素的比热容值

元素	温度 T/K	比热容/ $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	元素	温度 T/K	比热容/ $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
Ag	150	0.214	Au	600	0.142
	250	0.232		800	0.147
	300	0.237		1000	0.151
	600	0.248	Be	250	1.54
	800	0.258		300	1.83
	1000	0.272		800	2.82
Al	150	0.686	Bi	150	0.117
	200	0.801		250	0.122
	250	0.860		300	0.126
	300	0.905	Cd	150	0.214
	600	1.04		200	0.222
	800	1.14		250	0.227
Au	150	0.119		300	0.232
	250	0.126	Co	200	0.378
	300	0.129		300	0.420

(续)

元素	温度 T/K	比热容/ $[kJ/(kg \cdot K)]$	元素	温度 T/K	比热容/ $[kJ/(kg \cdot K)]$
Co	600	0.508	Ge	800	0.357
	800	0.545		1000	0.374
	1000	0.630		1200	0.395
Cr	150	0.314	Ir	150	0.112
	250	0.428		800	0.129
	300	0.446		1000	0.151
	600	0.529	K	150	0.665
	800	0.553		200	0.689
	1000	0.605		300	0.759
Cs	150	0.202	Li	150	2.65
	250	0.219		250	3.38
	300	0.234		300	3.59
Cu	150	0.322	Mg	150	0.839
	250	0.376		250	0.984
	300	0.386		300	1.02
	600	0.425		600	1.15
	800	0.447		800	1.28
	1000	0.471	Mn	100	0.268
	1200	0.492		200	0.419
Fe	150	0.366		300	0.479
	250	0.422		600	0.566
	300	0.442		800	0.618
	600	0.566	Mo	200	0.224
	800	0.686		300	0.248
	1000	1.03		600	0.267
	1200	0.600		800	0.276
Ga	150	0.325		1200	0.302
	200	0.351	Na	150	1.07
Ge	150	0.256		250	1.18
	250	0.310		300	1.23
	300	0.323	Nb	200	0.248
	600	0.348		300	0.270

(续)

元素	温度 T/K	比热容/ $[kJ/(kg \cdot K)]$	元素	温度 T/K	比热容/ $[kJ/(kg \cdot K)]$
Nb	800	0.289	Si	1200	0.946
Ni	150	0.329	Sn	150	0.198
	250	0.416		200	0.207
	300	0.447		250	0.215
	600	0.589		300	0.228
	800	0.523	Ta	200	0.130
	1000	0.548		300	0.138
	1200	0.577		1000	0.154
Pb	150	0.122	Th	200	0.112
	200	0.124		300	0.118
	250	0.128		600	0.132
	300	0.130		800	0.140
Pt	150	0.117		1200	0.165
	250	0.130	Ti	150	0.405
	300	0.133		250	0.499
	600	0.141		300	0.522
	800	0.146		600	0.610
	1000	0.152		800	0.674
	1200	0.157		1000	0.732
Sb	200	0.200		1200	0.700
	800	0.236	U	200	0.109
Se	150	0.275		300	0.117
	250	0.306		600	0.145
	300	0.320		800	0.174
Si	150	0.426	W	150	0.112
	250	0.648		250	0.129
	300	0.713		300	0.133
	600	0.852		600	0.140
	800	0.885		800	0.145
	1000	0.916		1000	0.150

(续)

元素	温度 T/K	比热容/ $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	元素	温度 T/K	比热容/ $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
W	1200	0. 155	Zn	600	0. 443
Zn	150	0. 346	Zr	200	0. 264
	200	0. 366		300	0. 285
	250	0. 379		1000	0. 359
	300	0. 389			

第 4 章 金属材料的热膨胀系数

热胀冷缩现象在自然界中普遍存在，对人类的生活和生产有广泛的影响。这种现象早已经被人们所熟知，并已被研究和利用。固体材料热膨胀的实质是因为原子的热振动，它属于一种非简谐振动，因而振动的结果使得原子的平均位移量不等于零。当平均位移量大于零时物体就膨胀，平均位移量小于零时物体收缩。利用热膨胀方法对材料进行测定和研究称为“膨胀分析”。它不仅用于膨胀系数的检测，亦是动态研究相变过程的有效手段。

4.1 热膨胀系数的基础知识

4.1.1 热膨胀系数的定义

1. 线胀系数

线胀系数是指与单位温度变化对应的试样单位长度的线膨胀量。当温度由 T_1 变到 T_2 时，试样的长度相应地从 L_1 变到 L_2 ，则材料在该温度区间的平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l$ 可用下式表示：

$$\bar{\alpha}_l = \frac{L_2 - L_1}{L_1(T_2 - T_1)} = \frac{\Delta L}{L_1 \Delta T} \quad (4-1)$$

式中 $\bar{\alpha}_l$ ——平均线胀系数，单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

L_1 ——试样的初始长度，单位为 mm；

L_2 ——试样受热膨胀后的长度，单位为 mm；

T_1 ——试样的初始温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ；

T_2 ——试样的末温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ；

ΔL ——试样长度变化量，单位为 mm；

ΔT ——试样温度变化量，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

2. 瞬间线胀系数

在温度 T 下，与单位温度变化相应的线性热膨胀值，称为瞬间线胀系数，也称为微分线胀系数，可用下式表示：

$$\alpha_l = \frac{1}{L_i} \lim_{T_2 \rightarrow T_1} \frac{L_2 - L_1}{T_2 - T_1} = \frac{dL}{L_i dT} \quad (T_1 < T_i < T_2) \quad (4-2)$$

式中 α_l ——瞬间线胀系数, 单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$;
 L_1 ——试样的初始长度, 单位为 mm;
 L_2 ——试样受热膨胀后的长度, 单位为 mm;
 T_1 ——试样的初始温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$;
 T_2 ——试样的末温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$;
 T_i ——试样在从 T_1 到 T_2 的温度区间的某一温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$;
 L_i ——试样在 T_i 时的长度, 单位为 mm。

3. 体胀系数

体胀系数是指与单位温度变化对应的试样单位体积的膨胀量。当温度由 T_1 变到 T_2 时, 试样的体积相应地从 V_1 变到 V_2 , 则材料在该温度区间的平均体胀系数 $\bar{\alpha}_v$ 可用下式表示:

$$\bar{\alpha}_v = \frac{V_2 - V_1}{V_1(T_2 - T_1)} = \frac{\Delta V}{V_1 \Delta T} \quad (4-3)$$

式中 $\bar{\alpha}_v$ ——平均体胀系数, 单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$;
 V_1 ——试样的初始体积, 单位为 mm^3 ;
 V_2 ——试样受热膨胀后的体积, 单位为 mm^3 ;
 T_1 ——试样的初始温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$;
 T_2 ——试样的末温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$;
 ΔV ——试样体积变化量, 单位为 mm^3 ;
 ΔT ——试样温度变化量, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

4. 瞬间体胀系数

当 Δt 趋近于零时, $\bar{\alpha}_v$ 的极限值 (在恒压下) 称为瞬间体胀系数, 也叫微分体胀系数, 可用下式表示:

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (4-4)$$

式中 α_v ——瞬间体胀系数, 单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$;
 V ——试样在某一指定温度下的体积, 单位为 mm^3 ;
 T ——某一指定温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

5. 体胀系数与线胀系数的关系

1) 对于各向同性的材料, 平均体胀系数 $\bar{\alpha}_v$ 与平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l$ 有如下关系:

$$\bar{\alpha}_v = 3\bar{\alpha}_l [1 + \bar{\alpha}_l (T_2 - T_1)] \quad (4-5)$$

式中 $\bar{\alpha}_v$ ——平均体胀系数, 单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$;
 $\bar{\alpha}_l$ ——平均线胀系数, 单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$;
 T_1 ——试样的初始温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$;

T_2 ——试样的末温度，单位为℃。

因为 $\bar{\alpha}_l(T_2 - T_1) \ll 1$ ，可进一步简化为：

$$\bar{\alpha}_V = 3\bar{\alpha}_l$$

2) 在材料热膨胀各向异性的情况下，体胀系数要由六个独立的膨胀系数分量来表征。其中三个互相垂直方向的膨胀系数分量 α_1 、 α_2 、 α_3 决定晶体的体膨胀量，而与切应变相联系的三个膨胀系数分量 α_4 、 α_5 、 α_6 只对热膨胀过程中晶型的变化起作用。对于立方、六方、四方、三方及正交晶系，热膨胀不会引起晶型的变化，体胀系数可近似地用三个互相垂直的晶轴方向上的线胀系数的和来表示，即

$$\bar{\alpha}_V = \alpha_{l1} + \alpha_{l2} + \alpha_{l3} \quad (4-6)$$

式中 α_{l1} 、 α_{l2} 、 α_{l3} ——三个晶轴方向上的主膨胀系数，单位为℃⁻¹。

对于单斜晶系，体胀系数可近似地用三个互相垂直的晶轴方向上的线胀系数和一个切应变线胀系数的和来表示，即：

$$\bar{\alpha}_V = \alpha_{l1} + \alpha_{l2} + \alpha_{l3} + \alpha_{l5} \quad (4-7)$$

式中 $\bar{\alpha}_V$ ——三个互相垂直的晶轴方向上的线胀系数和，单位为℃⁻¹；

α_{l1} 、 α_{l2} 、 α_{l3} ——三个晶轴方向上的主膨胀系数，单位为℃⁻¹；

α_{l5} ——切应变线胀系数，单位为℃⁻¹。

对于三斜晶系，体胀系数可近似地用三个互相垂直的晶轴方向上的线胀系数和三个切应变线胀系数的和来表示，即：

$$\bar{\alpha}_V = \alpha_{l1} + \alpha_{l2} + \alpha_{l3} + \alpha_{l4} + \alpha_{l5} + \alpha_{l6} \quad (4-8)$$

式中 α_{l1} 、 α_{l2} 、 α_{l3} ——分别为三个晶轴方向上的主膨胀系数，单位为℃⁻¹；

α_{l4} 、 α_{l5} 、 α_{l6} ——切应变线胀系数，单位为℃⁻¹。

6. 金属元素线胀系数的各向异性

固体金属中热膨胀的各向异性可以定性地从原子间结合力的强弱来说明。在非立方晶系中，平行于轴向和垂直于轴向的原子间结合力差别很大，如果在一个方向上的结合力比其他方向小，则晶体首先在该方向上受到热激发，使该方向上的热膨胀迅速增加，垂直该方向即发生收缩，出现线胀系数是负值的现象。

几种金属元素的线胀系数如表 4-1 所示。

表 4-1 几种金属元素的线胀系数 (单位: K⁻¹)

温度/K	Be		Mg		Sn		Zn		As		Sb		Bi	
	$\alpha_{l//}$	$\alpha_{l\perp}$	$\alpha_{l//}$	$\alpha_{l\perp}$	$\alpha_{l//}$	$\alpha_{l\perp}$	$\alpha_{l//}$	$\alpha_{l\perp}$	$\alpha_{l//}$	$\alpha_{l\perp}$	$\alpha_{l//}$	$\alpha_{l\perp}$	$\alpha_{l//}$	$\alpha_{l\perp}$
283	12.4	14.8	26.8	25.1	33.4	16.3	64.5	12.9	41.0	1.22	16.55	8.10	16.85	11.4
85	10.3	13.6	14.0	13.1	26.7	10.3	65.8	1.6	34.2	-1.48	14.86	5.10	16.63	9.30
75	—	—	—	—	—	—	—	—	33.2	-1.91	14.42	4.50	16.57	8.78
65	9.2	13.0	9.5	9.2	24.7	8.0	62.7	-1.5	31.4	-2.37	13.83	3.75	16.43	8.16

(续)

温度/K	Be		Mg		Sn		Zn		As		Sb		Bi	
	$\alpha_{l//}$	$\alpha_{l\perp}$	$\alpha_{l//}$	$\alpha_{l\perp}$	$\alpha_{l//}$	$\alpha_{l\perp}$	$\alpha_{l//}$	$\alpha_{l\perp}$	$\alpha_{l//}$	$\alpha_{l\perp}$	$\alpha_{l//}$	$\alpha_{l\perp}$	$\alpha_{l//}$	$\alpha_{l\perp}$
30	—	—	13.5	13.5	15.2	1.2	32.4	-4.6	14.7	-2.00	8.65	0.42	—	—
20	2.1	5.9	0.31	0.36	8.4	-0.037	12.9	-2.1	6.2	-0.90	4.30	0	9.33	1.26
10	0.70	1.25	0.03	0.05	1.6	-0.10	0.77	-0.063	0.75	-0.118	0.49	-0.020	2.07	0.20
4	0.03	0.075	—	—	0.075	-0.01	0.034	-0.002	0.064	-0.011	0.27	-0.002	0.12	0.017

注： $\alpha_{l//}$ 是平行于 c 轴方向的线胀系数， $\alpha_{l\perp}$ 是垂直于 c 轴方向的线胀系数。

4.1.2 影响热膨胀系数的因素

1. 合金成分和相变

组成合金的溶质元素及含量对合金热膨胀的影响极为明显。金属与合金中加入不同的元素，膨胀系数将发生变化，且这种变化极为复杂。

固溶体的膨胀系数一般都随着溶质元素含量的变化而变化。溶质元素的膨胀系数高于溶剂基体时，将增大膨胀系数；溶质元素的膨胀系数低于溶剂基体时，将减小膨胀系数。溶质元素的含量越高，影响越大。如在铝中加入铜、镍、铁、铍及硅时膨胀系数减小，在铜中加入铅、镍及金时亦是如此，因为这些溶质元素的膨胀系数小于溶剂的膨胀系数。反之，在铜中加入锌或锡则膨胀系数增大，因为锌或锡的膨胀系数比铜更大。但铜中加入铈例外，铈的膨胀系数虽然比铜小，但它却使铜的膨胀系数增大，表现了铈的半金属特性。

固溶体的膨胀系数如图 4-1 所示。

属于二级相变的有序-无序转变在其相变点处的膨胀系数曲线上的折点如图 4-2 所示，其中 Au-50% Cu 合金有序结构加热至 300℃ 时，有序结构开始破坏，450℃ 完全变为无序结构。在这段温度区间，膨胀系数增加很快。当冷却时合金发生有序转变，膨胀系数稍有降低，这是由于有序合金原子间结合力增强的结果。

多相合金若是多相的机械混合物，则膨胀系数介于这些相的膨胀系数之间，近似地符合直线规律，故可根据各相所占的体积分数按相加的方法粗略地估算多相合金的膨胀系数。

总的来说，多相合金中组织分布状况对合

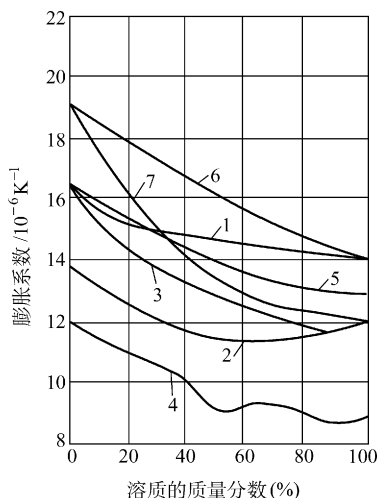


图 4-1 固溶体的膨胀系数

1—CuAu 2—AuPd 3—CuPd
4—CuPd (-140℃) 5—CuNi
6—AgAu 7—AgPd

金的膨胀系数影响不敏感。膨胀系数主要决定于组成相的性质及含量。

2. 铁磁性转变

大多数金属和合金的热膨胀系数随温度的变化规律为正常膨胀。但对于铁磁性金属及合金，如铁、钴、镍及其某些合金，膨胀系数随温度变化不符合上述规律，在正常的膨胀曲线上出现附加的膨胀峰，这些变化称为反常膨胀，如图 4-3 所示。

3. 化学成分

化学成分是决定金属材料膨胀系数的主要因素。当成分一定时，加工及热处理等工艺因素对热膨胀也有影响，但这种影响不稳定，采用一定的工艺处理后可以消除这种影响。图 4-4 为不同组成物对钢膨胀系数的影响。

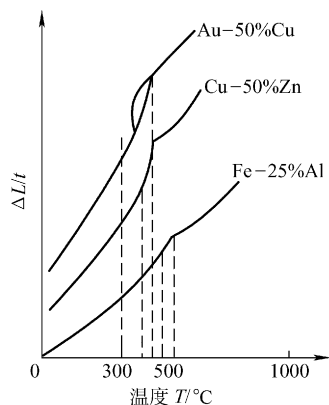


图 4-2 有序-无序转变膨胀曲线
注：元素前的百分数为合金中该元素的质量分数。

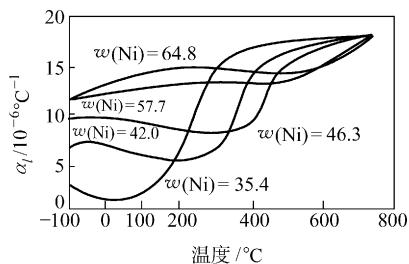


图 4-3 铁镍合金反常膨胀曲线

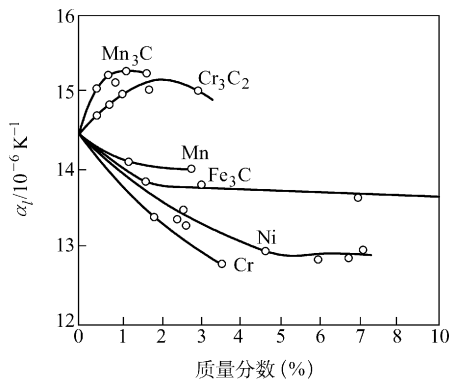


图 4-4 不同组成物对钢膨胀系数的影响

4. 加工工艺

一般情况下，工艺因素对钢的膨胀系数影响较小，对于精密合金则影响较大。图 4-5 表示不同的加工工艺对 36HX 合金膨胀系数的影响，36HX 合金中含质量分数 36% 的镍、质量分数 0.5% 的铬，余量为铁。

4.1.3 热膨胀系数与其他物理性能的关系

1. 体胀系数与热容的关系

体胀系数与定容热容成正比，它们有相似的温度依赖关系，在低温下随温度的升高急剧增大，而到高温则趋于平缓。这一过程符合下式：

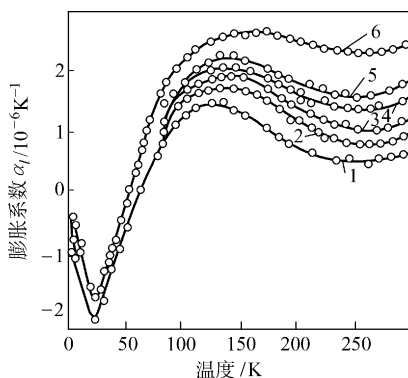


图 4-5 不同的加工工艺对 36HX 合金膨胀系数的影响

1—压缩率约 63% 冷轧 2—900℃ 水淬 3—900℃ 水淬后 315℃ 回火 1h
4—950℃ 空冷 5—500℃ 随炉冷 6—600℃ 退火 1h 冷至 100℃ 90h

$$\alpha_v = \frac{rC_v}{K_0 V} \quad (4-9)$$

$$\alpha_l = \frac{rC_v}{3K_0 V} \quad (4-10)$$

式中 α_v ——体胀系数，单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

α_l ——线胀系数，单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

C_v ——定容热容，单位为 $\text{J}/^{\circ}\text{C}$ ；

K_0 ——热力学温度零度时的体积弹性模量，单位 N/mm^2 ；

r ——格律乃森常数，一般取 1.5 ~ 2.5；

V ——体积，单位为 mm^3 。

2. 线胀系数与熔点的关系

线胀系数与熔点的关系可用下式表示：

$$T_m \alpha_{lm} = 0.022 \quad (4-11)$$

式中 T_m ——熔点，单位为 K；

α_{lm} ——从 0 至 T_m 的温度范围内的平均线胀系数，单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

3. 线胀系数与原子序数的关系

线胀系数随原子的原子序数变化呈明显的周期性变化，如图 4-6 所示。

4. 线胀系数与键能的关系

线胀系数与原子间的键结合能和键结合类型密切相关，可用以下经验公式描述：

$$\alpha_l = a/(E_m + b) \quad (4-12)$$

式中 α_l ——线胀系数, 单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$;
 E_m ——金属键能, 单位为 J/mol ;
 a 、 b ——由金属元素的晶格结构决定的常数, 如表 4-2 所示。

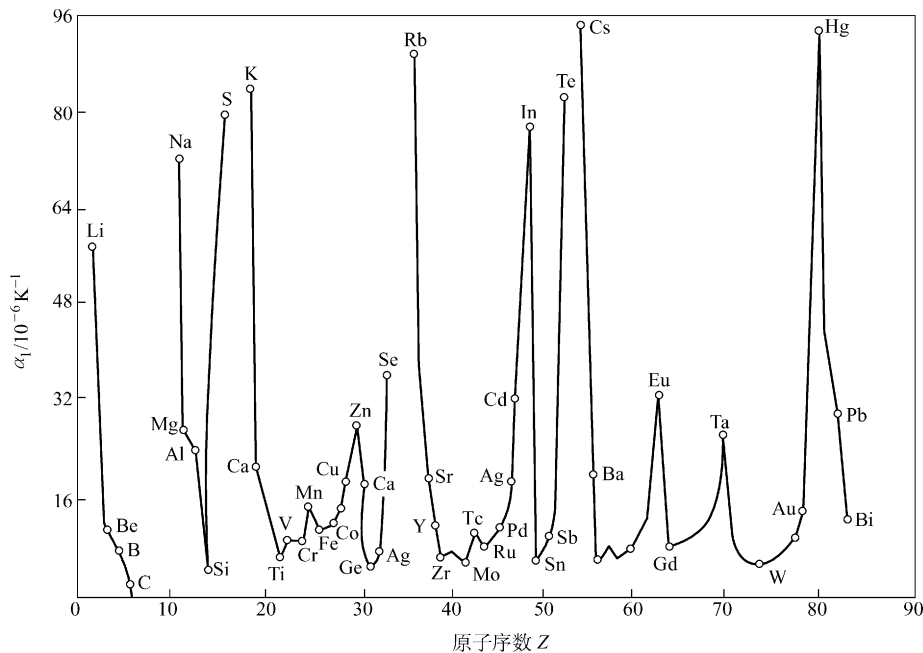


图 4-6 原子序数与线胀系数的周期变化关系 (300K)

表 4-2 金属元素晶格结构决定的常数 a 和 b 值

晶 格 类 型	体 心 立 方	面 心 立 方	密 堆 六 方
$a/[\text{J}/(\text{mol} \cdot ^{\circ}\text{C})]$	973	1270	885
$b/(\text{J}/\text{mol})$	-100	5	0

利用上面的方法计算出的线胀系数值与测量值相差很小, 如表 4-3 所示。

表 4-3 线胀系数计算值与测量值的比较

金属元素	E_m /(kJ/mol)	α_l (实验) /($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	α_l (计算) /($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	金属元素	E_m /(kJ/mol)	α_l (实验) /($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	α_l (计算) /($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
密堆六方晶格金属 $\alpha_l(\text{计算}) = 885/E_m$				Y	408.0	12.0	9.1
Be	321.4	11.5	11.5	La	425.9	10.4	8.7
Mg	147.6	25.7	25.1	Ti	469.0	8.4	7.9
Ca	176.0	22.4	20.0	Zr	609.0	5.8	6.1
Sc	334.8	10.0	11.0	Hf	608.2	6.0	6.1

(续)

金属元素	E_m /(kJ/mol)	α_l (实验) /($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	α_l (计算) /($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	金属元素	E_m /(kJ/mol)	α_l (实验) /($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	α_l (计算) /($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
Tc	635.4	8.1	5.8	Rh	555.9	8.4	9.2
Re	778.3	6.6	4.8	Pd	375.8	11.5	13.4
Ru	643.7	9.4	5.7	Ag	285.5	19.2	17.3
Os	782.5	4.7	4.7	Ir	664.2	6.6	7.8
Zn	129.6	29.7	28.6	Pt	563.5	9.0	9.1
Cd	112.0	30.6	33.0	Au	366.2	14.1	13.7
Tl	181.4	29.4	20.4	Pb	196.5	29.0	24.4
Nd	317.3	10.0	11.7	Pr	358.6	6.8	14.0
Gd	345.7	8.3	10.7	Yb	168.5	25.0	28.1
Tb	375.8	10.3	9.9	体心立方晶格金属 α_l (计算) = $973/(E_m - 10.0)$			
Dy	279.4	10.0	13.2	Li	159.7	45	34.5
Ho	294.7	10.7	12.6	Na	108.7	70.6	60.7
Er	295.5	12.3	12.5	K	90.7	83.0	83.2
Tm	243.7	13.3	15.2	Rb	84.4	88.1	95.4
Tu	413.0	8.1	9.0	Cs	80.3	97	105
面心立方晶格金属 α_l (计算) = $1270/(E_m + 5.0)$				Ba	178.9	18.8	29.7
Ca	176.0	22.4	26.9	V	510.0	8.3	
Sr	164.3	20	28.7	Nb	728.6	7.1	5.9
Al	321.4	23.1	15.5	Ta	780.4	6.6	5.5
La	425.9	10.4	11.0	Cr	395.0	8.4	11.5
Ac	434.7	14.9	11.6	Mo	656.7	5.0	6.6
Th	571.4	11.2	9.0	W	834.7	4.6	5.1
Co	425.1	12.4	11.9	Fe	415.5	11.7	10.9
Ni	427.6	12.7	11.8	Eu	177.2	33.1	30.0
Cu	337.7	16.7	14.8				

4.2 热膨胀系数的测量方法

热膨胀系数的测量方法很多，归纳起来可分为接触法和非接触法两类。接触法是将物体的膨胀量用一根传递杆以接触的方式传递出来，再配用不同的检测仪器测得。而非接触法则不采用任何传递机构。

接触法主要有千分表法、光杠杆法、机械杠杆法、电感法（差动变压器法）和电容法等。非接触法有光干涉法、X 射线法和直接观测法等。选用何种方法应根据测量的温度范围、试样的几何尺寸、膨胀系数的大小和所要求的测量精度等因素综合地来考虑。例如，棒状试样可采用顶杆式测量法；细丝、薄片试样适于采用直接观测法或某种特定的方法；线胀系数各向异性的试样适于采用 X 射线法；线胀系数较小或测量精度要求较高的试样应采用光干涉法等。

4.2.1 推杆式膨胀仪测量法

1. 方法综述

采用步进式变温方式或缓慢恒速变温方式对温度进行控制，利用推杆式熔融石英膨胀仪检测作为温度函数的固体材料试样相对于其载体的长度变化。

2. 测试装置及要求

1) 试样的载体与推杆或管均由退火的熔融石英构成，它们将试样长度上的变化传输至传感器，推杆的形状和尺寸应保证将载荷作用到试样上而又不致在需要的温度范围内在试样上产生压痕。试样载体与推杆及试样接触面的典型形状如图 4-7 所示，试样载体和推杆应由同牌号的透明石英制成，两者热膨胀系数间的差异应在 $\pm 1\%$ 以内。

2) 用于在试验温度范围内以受控速率均匀加热或冷却试样，低温可达 -180°C ，高温可达 900°C 。为保证试样温度的均匀性符合要求，放置试样的炉子或变温均匀区的长度应大于试样的长度。试样中的温度梯度与长度及直径的比值和炉子的热绝缘质量有关。调整炉子加热线圈的位置，使其由中心区移向试样端部，可使温度梯度减小。此外，对于高温下的试验，应使用重金属套管或辐射屏。温度控制要保证控温传感元件有与被测试样相同的温度（辐射加热炉），或使其很靠近加热元件（电阻加热炉）。

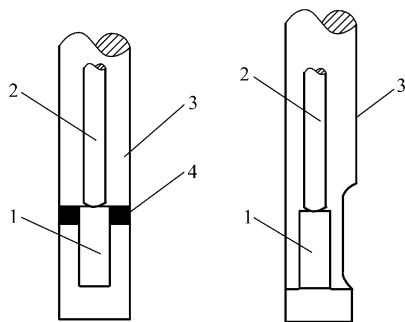


图 4-7 试样载体与推杆及试样接触面的典型形状

1—试样 2—透明石英推杆
3—透明石英外管 4—适宜的间隙

3) 膨胀位移测量系统是由位移传感器将试样与其载体间的膨胀位移的差值转换为适宜输入到数据处理-记录仪的电、光信号的装置，如数字编码器、差动的或指针式的转换器等，其精度应满足性能检测要求。例如，在 $20 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 温度间隔内，要保证对长度 25mm 、平均线胀系数 $1.0 \times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ 试样的检测精度要好于 $\pm 0.1 \times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，所用位移传感器的测量不确定度应好于 $\pm 85\text{nm}$ 。位移传感器应保证因试验所致传感器中温度的最大变化对其示值无可见影响。推杆的形状和尺寸

应保证将载荷作用到试样上而又不致在需要的温度范围内导致试样产生压痕。由位移传感器、数据处理-记录仪、试样载体和推杆组成的膨胀位移测量系统应有稳定的零位示值。在系统使用的温度范围内,对与试样载体同质的参照试样测得的表观平均线胀系数的绝对值应不大于 $0.3 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

4) 温度测量系统由校正了的温度传感器件或器件组与人工的、电子的或其他等效的读出装置构成,要求被检温度示值的不确定度优于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 或不大于整个温度范围的 $\pm 1\%$ 。依温度区间的不同,可使用不同类型的传感器件,一般采用 JJG 141—2000、JJG 351—1996 检定规程校正的丝状 ($\phi 0.5\text{mm}$ 或更细的丝)、箔状热电偶,以及 JJG 229—2010 规程校正的丝状电阻温度计。在 $190 \sim 350^{\circ}\text{C}$ 范围内应使用 E 型或 T 型热电偶,在 $350 \sim 900^{\circ}\text{C}$ 范围内应使用 K 型、S 型及 N 型热电偶。热电偶应定期进行校正检验,以保证在使用过程中不致受到污染或排除因接点处合金组元的迁移而产生的相变。当使用热电偶时,应借助冰水槽或不受周围环境温度变化影响的、等效的电子基准装置来保证其参照端为 0°C 。

5) 长度检测量具用来测定试样的原始与最终长度,一般用指针式千分尺或卡尺(或其他等效器件),保证测量的不确定度不大于 $\pm 25\mu\text{m}$ 。

3. 试样的制备

1) 被测试样具有刚性固体特征,即在试验温度和仪器所确定的应力下,试样的蠕变或弹性应变速率是可忽略的,或者说不会对长度变化的测量产生可见的影响。

2) 试样长度 L_0 应服从热膨胀 $\Delta L/L_0$ 检测精度的需要,试样的最小长度为 $(25 \pm 0.1)\text{mm}$,横向尺寸为 $3 \sim 10\text{mm}$ 。

3) 试样应轴向均匀,其端面(与载体、推杆间的接触面)的表面粗糙度值 R_a 应不大于 $10\mu\text{m}$,端面间的平行度误差应小于 $25\mu\text{m}$,试样与推杆端部如图 4-8 所示。不应采用具有尖端的试样,它在试验中易产生变形。

4) 增大试样的横截面积有助于防止升温时试样的非弹性蠕变。

5) 控制长试样中的温度梯度,保证试样上的温度不均匀性在 $\pm 2^{\circ}\text{C}/50\text{mm}$ 以内。

4. 装置的校正

(1) 检测前的准备 检测前,应确定测试装置的换算当量或校正常数。

(2) 位移传感器的校正 借助检测一组由精密螺旋测微器确定的位移、一组量块或其他等效的装置来完成位移传感器的校正;对于诸如数字编码器类绝对的传感器可省去此步骤。

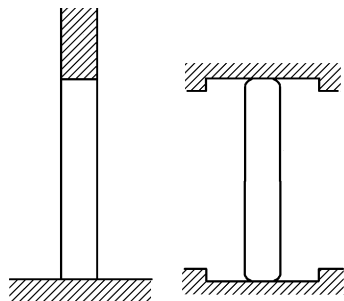


图 4-8 试样与推杆端部的示意图

(3) 温度测量系统的校正 按照 JJG 141—2000、JJG 229—2010 或 JJG 351—1996 规定的方法完成温度传感器的校正。对 TMA 的温度校正其误差应小于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，为此应将一种晶态材料以膨胀检测中所用的速率加热通过其熔点，通过观察施加规定负载的推杆产生压痕时的温度完成校正。可使用表 4-4 所示的材料（质量分数大于 99%）制作试样。

表 4-4 参照物及其熔点

参 照 物	In	Sn	Pb	Zn	Al
熔点/ $^{\circ}\text{C}$	156.6	232.0	327.5	419.6	660.4

(4) 热膨胀测试系统的校正 对于整个系统的校正，应至少测量其膨胀值已知且与被测试样材料尽可能接近的一种参照材料。

1) 校正用标准参照材料的热膨胀值如表 4-5 所示。

表 4-5 标准参照材料的热膨胀值

温度/ $^{\circ}\text{C}$	不 锈 钢		熔 融 石 英	
	线性热膨胀 $(\Delta L/L_0)/10^{-6}$	线胀系数 $\alpha_l/10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$	线性热膨胀 $(\Delta L/L_0)/10^{-6}$	线胀系数 $\alpha_l/10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$
-193	—	—	-1	-0.07
-173	—	—	-13	-0.53
-153	—	—	-22.5	-0.53
-133	—	—	-28.5	-0.38
-113	—	—	-32	-0.24
-93	—	—	-32.5	-0.10
-73	—	—	-31	0.13
-53	—	—	-27.5	0.23
-33	—	—	-22	0.32
-13	—	—	-14	0.39
7	—	—	-6	0.45
20	0	9.76	0	0.48
27	69	9.81	—	—
47	—	—	13.5	0.53
67	466	10.04	24.5	0.56
107	872	10.28	47.5	0.60
147	1288	10.52	72	0.62
187	1714	10.76	97	0.63

(续)

温度/℃	不 锈 钢		熔 融 石 英	
	线性热膨胀 ($\Delta L/L_0$)/10 ⁻⁶	线胀系数 $\alpha_l/10^{-6} \text{℃}^{-1}$	线性热膨胀 ($\Delta L/L_0$)/10 ⁻⁶	线胀系数 $\alpha_l/10^{-6} \text{℃}^{-1}$
227	2149	11.00	122	0.63
267	2593	11.23	—	—
287	—	—	159	0.61
307	3408	11.47	—	—
327	—	—	183	0.59
347	3511	11.71	—	—
367	—	—	206	0.56
387	3984	11.95	—	—
407	—	—	228	0.54
427	4467	12.19	—	—
447	—	—	249	0.51
467	4959	12.42	—	—
487	—	—	269	0.49
507	5461	12.66	—	—
527	—	—	288	0.47
567	—	—	307	0.44
607	—	—	324	0.42
647	—	—	340	0.40
687	—	—	356	0.38
727	—	—	371	0.37

2) 满足一般使用要求的、工业用参照材料的膨胀值如表 4-6 所示。其中，铂的数据可用至 1300℃；钨的数据，在空气中用至 300℃，在惰性气体中为 1500℃；铜的数据，在空气中用至 300℃，在惰性气体中为 800℃。

表 4-6 工业用参照材料线性热膨胀值

温度/℃	钨 ($\Delta L/L_0$)/10 ⁻⁶	铂 ($\Delta L/L_0$)/10 ⁻⁶	铜 ($\Delta L/L_0$)/10 ⁻⁶	铝 ($\Delta L/L_0$)/10 ⁻⁶
-233	(-875)	—	(-3235)	—
-213	(-850)	—	(-3158)	—
-195	—	-1756.66	—	—

(续)

温度/℃	钨 ($\Delta L/L_0$)/ 10^{-6}	铂 ($\Delta L/L_0$)/ 10^{-6}	铜 ($\Delta L/L_0$)/ 10^{-6}	铝 ($\Delta L/L_0$)/ 10^{-6}
-193	(-811)	—	(-3018)	—
-173	(-760)	—	(-2829)	—
-153	(-700)	—	(-2605)	—
-150	—	-1420.60	—	-3430
-133	(-633)	—	(-2353)	—
-113	(-560)	—	(-2080)	—
-100	—	-1024.09	—	-2550
-93	(-482)	—	(-1792)	—
-73	(-401)	—	(-1492)	—
-50	—	-607.96	—	-1550
-23	(-189)	—	(-707)	—
0	(-49)	-176.2	(-331)	-460
20	0	0 (0)	0	0
50	(134)	286.06 (266)	(500)	710
100	(359)	722.38 (720)	(1354)	1900
150	(814)	—	(2228)	—
200	—	1654.60 (1652)	(3121)	4450
250	(1045)	(2128)	(4033)	—
300	(1278)	2612.01 (2610)	(4961)	7130
350	(1515)	(3097)	(5907)	—
400	(1754)	3692.18 (3590)	(6870)	10050
450	(1996)	(4087)	(7852)	—
500	(2240)	4596.55 (4591)	(8853)	13230
600	(2733)	5628.65 (5617)	(10919)	16760
700	(3232)	6692.81 (6674)	(13072)	—
800	(3736)	7793.27 (7766)	(15323)	—
900	(4250)	(8896)	(17688)	—
1000	(4775)	(10063)	—	—
1100	(5311)	(11264)	—	—
1200	(5858)	(12500)	—	—
1300	(6415)	(13777)	—	—

(续)

温度/℃	钨 ($\Delta L/L_0$)/ 10^{-6}	铂 ($\Delta L/L_0$)/ 10^{-6}	铜 ($\Delta L/L_0$)/ 10^{-6}	铝 ($\Delta L/L_0$)/ 10^{-6}
1400	(6984)	(15111)	—	—
1500	(7571)	(16507)	—	—
1600	(8183)	—	—	—
1700	(8803)	—	—	—

注：与括号内数据相应的试样的化学纯度为 99.99%。

3) 应使用如下公式中的校正常数：

$$A = (\Delta L/L_0)_t - (\Delta L/L_0)_m \quad (4-13)$$

式中 A ——校正常数；

$(\Delta L/L_0)_t$ ——标准参照材料真实的或被证实的热膨胀；

$(\Delta L/L_0)_m$ ——由膨胀仪测得的标准参照材料的热膨胀。

在 20 ~ 700℃ 间，透明石英平均线胀系数 $\bar{\alpha}_t = (0.52 \pm 0.02) \times 10^{-6} \text{℃}^{-1}$ ，其他如表 4-7 所示。

表 4-7 透明石英的平均线胀系数

温度范围/℃	平均线胀系数/ 10^{-6}℃^{-1}	温度范围/℃	平均线胀系数/ 10^{-6}℃^{-1}
20 ~ 100	0.54	20 ~ 300	0.58
20 ~ 200	0.57	20 ~ 400	0.57

4) 校正膨胀仪使用的试验条件和程序应与检测试样时相同。例如，试样长度、温度历程、环境气氛等都应尽可能相同。

5) 显示试样与载体和推杆间热膨胀差值的观测值应予以修正。对于 TMA 仪，此值被作为基线值或基线变化值，它可由不装设试样的空运行过程获得，最好由装入与推杆同质试样的测量运行过程获得。

5. 测试步骤

(1) 测试前的清洗 在 500℃ 以上受热的熔融石英将会因遭受碱性化合物的污染而产生晶化。为防止此种现象的发生，在每次测试前，石英组件应在质量分数为 10% 的氢氟酸水溶液中浸泡 1min，然后用蒸馏水彻底漂洗。为防止再受碱性化合物的污染，在测量结束前不得用手触及清洗后的石英组件。

(2) 测试前的准备 包括以下内容：

1) 在室温下测量试样热膨胀检测方向上的原始长度 L_0 。

2) 在确认试样表面不受其他物质污染的前提下，将其置入膨胀仪，并保证其位置稳定。

3) 将温度传感器置于试样中部位置, 应使其尽可能逼近试样, 又不至于影响试样在载体中的运动。

4) 确保位移传感器、推杆、试样间有可靠的接触。

5) 将装配好的膨胀测量系统放入炉子、恒温器或它们的组合体中, 使试样温度与其环境温度相平衡。

6) 应将适当的微量载荷作用在推杆上, 以保证它与试样间的接触。这个力一般为 $0.1 \sim 1\text{N}$, 如果可能减小, 推荐取 $30 \sim 50\text{mN}$ 。为表示零负载, 应采用精密地逐渐增加载荷的操作方法。

7) 记录温度传感器的初始读数 T_0 和与 L_0 相应的位移传感器的初始读数。

(3) 自动测量 在整个需要的温度范围内测量试样的膨胀(收缩)值, 直至最高温度。可采用速率不大于 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的恒速加热或冷却的测录程序。在高精度的测试中, 这个速率的上限值应为 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 。变温测量时试样中的平均温度一般与测得的温度不同(加热时低些, 冷却时高些), 但如果系统已用参照材料正确地校正过, 测得的试样膨胀值仍是准确的。应连续记录温度和长度的变化值。

(4) 精密测量 采用阶梯式升温(或冷却)方式, 各点保温时间由位移传感器达到示值稳定的时间决定, 保温过程中的温度变化不得大于 $\pm 2^\circ\text{C}$, 试样内的温度梯度不得超过 $0.5^\circ\text{C}/\text{cm}$ 。这个保温时间是膨胀测试装置与试样总的热质量(热容)的函数, 并因温度的不同而变化, 在每个恒定的温度下, 读取并记录温度 T_i 和试样变化了的相应长度 L_i 。

(5) 热机械分析仪(TMA)的应用 采用TMA进行测试前, 在不装入试样的条件下, 据前述方式, 采用所选定的试验参数运行, 检测并记录测量仪器的基线, 特别是在低膨胀试样的检验中, 试样 ΔL 的测量值一般必经仪器基线修正。当用TMA完成低膨胀材料的检测时, 对一种材料一般应至少测试三个试样, 仅对标准参照试样可重复检验。

6. 计算

1) 计算试样线性热膨胀的公式如下:

$$\Delta L/L_0 = (\Delta L/L_0)_0 + A \quad (4-14)$$

式中 $\Delta L/L_0$ ——指定温度范围内试样的热膨胀;

$(\Delta L/L_0)_0$ ——指定温度范围内膨胀仪的热膨胀测量值;

A ——校正常数。

2) 线性热膨胀的计算值除以相应的温度差 $\Delta T = T_2 - T_1$ 得到平均线胀系数:

$$\bar{\alpha}_l = (\Delta L/L_0)/\Delta T$$

式中 $\bar{\alpha}_l$ ——平均线胀系数, 单位为 $^\circ\text{C}^{-1}$;

$\Delta L/L_0$ ——指定温度范围内试样的热膨胀;

ΔT ——温度差, 单位为 $^\circ\text{C}$ 。

7. 精度和偏差

1) 推杆式膨胀仪测量法属于比较法, 其测量精度低于属于绝对法中的光干涉法。它通常用于线胀系数不小于 $0.5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 材料的检测。如果传感器的精度及装置的稳定性满足要求, 也可用本方法检测低膨胀材料。

2) 热膨胀和平均线胀系数的测量精度和偏差, 与温度和长度相对应的测量同时性有关。

3) 测量不确定度一般由长度和温度重复测量中的精度和偏差构成, 但也可能涉及可干扰测量的其他因素, 如试样位置可重现性的变化、施加到传感器上的电压波动等。

4) 系统偏差较大并有多种来源, 这包括长度与温度测量的准确度、试样平均温度与温度传感器指示温度间的偏差、由位移传感器的非线性所致的偏差、试样载体与推杆间及其与试样间的温度差异、熔融石英膨胀的假定值与实测值间的偏差以及试样与推杆间附加的表面接触的影响等。对于选定的位移传感器和温度传感器, 可通过提高操作质量来减少随机因素的影响, 而系统偏差只能借助对各独立组元及对整个系统的认真校正来消除或减小。

5) 平均线胀系数检测精度的估算值可由下式计算:

$$\frac{\delta \bar{\alpha}_l}{\bar{\alpha}_l} = \left(\frac{\delta(\Delta L/L_0)}{\Delta L/L_0} + \frac{\delta T}{\Delta T} \right) \times 100 \quad (4-15)$$

式中 $\frac{\delta \bar{\alpha}_l}{\bar{\alpha}_l}$ ——测量温度范围内平均线胀系数检测精度 (%) ;

$\delta(\Delta L/L_0)$ ——热膨胀测量不确定度;

$\Delta L/L_0$ ——热膨胀值;

δT ——温度传感器检测不确定度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$;

ΔT ——测量温度范围, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

6) 采用符合规定并经仔细校正的熔融石英膨胀测试装置, 在 $25 \sim 400^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内对硼硅酸盐玻璃、铜、钨等线性热膨胀材料 95% 置信水平的检测精度可达 4% 。

7) 采用氧化铝或石墨为推杆和载体的高温膨胀仪, 在 2000°C 以下, 可获得相近的精度和偏差。

8) 要确定热膨胀测量值的精度, 必须用热膨胀值已知且可再现的参照材料对膨胀仪进行校正。

4.2.2 光杠杆法

1. 适用范围

光杠杆法适用于各种刚性固体材料, 包括金属与非金属, 测量的温度一般在

1000℃ 以下的中温区。

2. 测量原理

试样热膨胀的膨胀量通过一根传递杆引出，传递杆推动一个带小镜的光三角架（或其他光杠杆机构）转动，将试样的膨胀量转换成入射光点的位移量，借助感光记录纸（板）或经光电转换由电学量测量而得。

3. 检测方法

（1）经典光杠杆膨胀仪 这种仪器由膨胀计、记录仪、炉子及光源等部分组成，如图 4-9 所示。膨胀仪上有两个石英管 1 和 2，其中各放置标准样品 13 和被测试样 3，两样品的尺寸相同（直径 3.5 ~ 4mm，长 50mm），它们的一端各自顶在两个石英管的封闭端，另一端分别与石英杆 12 和 4 相接触。两者的伸长量通过石英杆 12 和 4 及金属杆 11 和 5 传递到光杠杆 7 的可动支点上。光杠杆为直角三角形，三角形中部装有一反射镜 8，直角三角形背面三个角的顶点上有突出的尖点 10（直角顶点）、9 和 6，点 10 固定，点 9 和点 6 分别与标准试样和试样的顶杆相接触。当标准试样或试样膨胀时，光杠杆在它们的推动下发生偏转；当标准试样或试样收缩时，则光杠杆在弹簧的反作用下作反方向偏转，反射镜 8 也随之转动。入射光投射到反射镜 8，光点经暗箱多次反射后落到感光板或映像纸上使之感光，即可得到光点移动的轨迹。标准试样伸缩时，光点沿 z 轴移动；试样伸缩时，光点沿 y 轴移动。

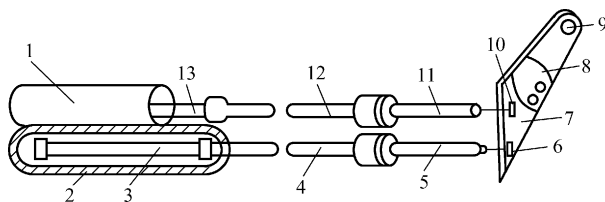


图 4-9 光杠杆膨胀计原理图

1、2—石英管 3—被测试样 4、12—石英杆 5、11—金属杆
6、9—尖点 7—光杠杆 8—反射镜 10—固定点 13—标准样品

标准试样的膨胀量经标定后可作为温度坐标。试样的平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l$ 按下式计算：

$$\bar{\alpha}_l = \frac{\Delta L_m}{KL_0(T - T_0)} \quad (4-16)$$

式中 ΔL_m ——感光纸上记录的试样膨胀量，单位为 mm；

K ——光杠杆的放大倍数；

L_0 ——试样原长，单位为 mm；

T_0 ——初始温度，单位为℃；

T ——试样膨胀 ΔL_m 时的温度，单位为℃。

标准试样用于指示待测试样的温度，在加热和冷却时，其位置应靠近待测试样。由于采用标准样品的膨胀量来表示待测试样的温度，故对照相记录膨胀曲线十分方便。对标准试样所用材料有如下要求。

- 1) 膨胀系数不随温度而变，且较大。
- 2) 在使用的温度范围内没有相变，不易氧化，与试样的热导率接近。
- 3) 在较低温度范围研究有色金属及合金时，常用纯铝和纯铜作标准试样。
- 4) 研究钢铁材料时，由于加热温度比较高，常用镍铬合金或皮洛斯合金作标准试样。

标准试样的形状和尺寸如图 4-10 所示，在标定标准试样膨胀量所对应的温度时，需将热电偶插入标准试样的小孔中。

待测试样的形状和尺寸最好与标准试样相同，但由于标准试样的形状复杂，加工较麻烦，故在实际测量时，在加热和冷却速度较慢的条件下，可采用简单的圆柱形试样，也能得到比较准确的测量结果。但在快速加热和冷却时，如试样与标准试样的形状相差大，吸热和散热情况就不同，待测试样和标准试样之间便会产生相当大的温差。

(2) 示差光杠杆膨胀仪 这种仪器所测量的膨胀量是标准试样与试样膨胀量的差。与经典光杠杆膨胀仪不同的是三角架的形状不是等腰直角三角形，而是一个具有 30° 角和 60° 角的直角三角形，如图 4-11 所示。

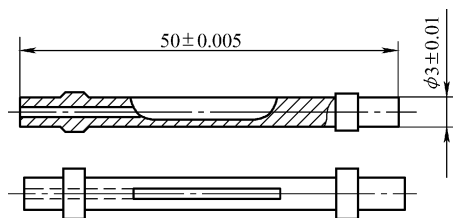


图 4-10 标准试样示意图

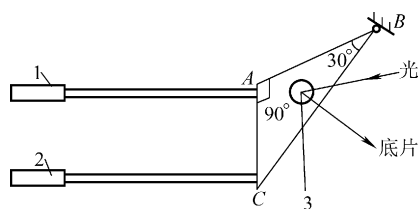


图 4-11 示差光杠杆膨胀计原理图

1—标准试样 2—待测试样 3—反射镜

按示差法工作时，标准试样的顶杆与光杠杆的直角三角形的直角顶点相触，试样的顶杆与光杠杆的一锐角顶点相触，另一锐角顶点固定。试样膨胀时光点仍按 y 轴方向移动，但标准试样膨胀时反射镜绕三角形的斜边转动，使光点与横坐标成 α 角（即 OA 方向）移动，如图 4-12 所示。

试样和标准试样两者同时膨胀时，光点沿 OC 方向移动。 OC 在坐标纵轴上的投影 CC' 即为标准试样与试样的膨胀量之差，其值为 $\Delta L_m = OB = OA \sin \alpha - CC'$ 。试样的平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l$ 为：

$$\bar{\alpha}_l = \bar{\alpha}_{ls} - \frac{\Delta L_m}{KL_0(T - T_0)} \quad (4-17)$$

式中 $\bar{\alpha}_l$ ——平均线胀系数，单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

$\bar{\alpha}_{ls}$ ——标准试样的平均线胀系数，单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

ΔL_m ——感光纸上记录的试样膨胀量，单位为 mm；

K ——光杠杆的放大倍数；

L_0 ——试样原长，单位为 mm；

T_0 ——初始温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ；

T ——试样膨胀 ΔL_m 时的温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

示差法的优点是便于展示在相变过程中试样膨胀量的变化，可从膨胀量的变化确定材料的相变点，因此多用于测量有相变的材料。另外，由于抵消了石英的膨胀，故测量的准

确度较高。同时，由于所测膨胀量为标准试样和待测试样的膨胀量的差值，当被测试样出现相变时反应更为灵敏，因此还可以用此法来测量相变点和相转变的速率。

(3) 高灵敏度光杠杆膨胀仪 高灵敏度光杠杆膨胀仪适用于在低温范围内的高精度测量。它的特点不仅仅在于灵敏度高，而且在光杠杆系统的外面有一个方便的调节机构，如图 4-13 所示。图 4-13 中一个小镜安置在两条弹性极好的铍青铜薄

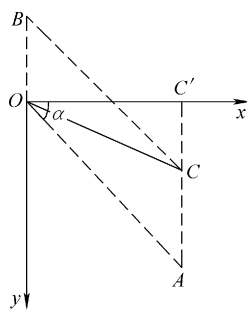
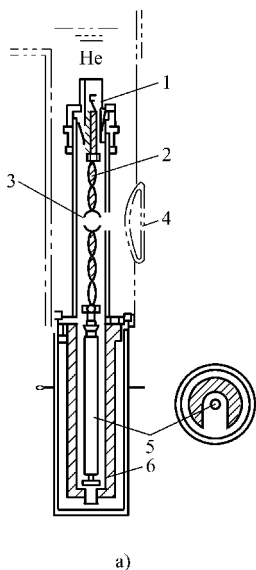
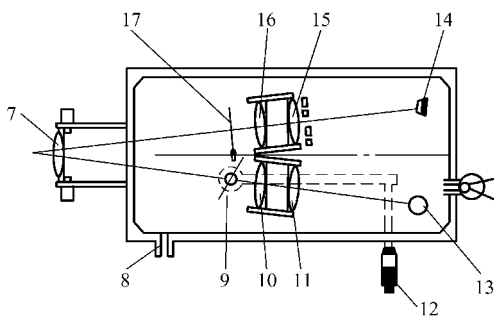


图 4-12 光杠杆示差法
测量记录图



a)



b)

图 4-13 高灵敏光杠杆膨胀仪

a) 膨胀计 b) 光杠杆

1—顶头 2—铍青铜带 3—小镜 4—窗口 5—试样 6—加热器 7、10、11—长焦距透镜

8—真空抽口 9、17—光栅 12—测微器 13—光源 14—光电池 15、16—透镜

带之间，薄带朝一个方向扭转数圈，然后一端固定在恒温器的底上，另一端与试样相接。加热丝直接绕在试样上。当试样受热膨胀时，扭转的铍青铜带向与原扭转相反的方向转动，因而小镜跟随转动，转动的角位移量反映出试样长度的变化。角位移量由一套光杠杆机构检测，该机构包括入射光源、透镜组、光栅、微调器和光电电池等。这种形式的光杠杆装置灵敏度极高，对于 10^{-8} rad 以上的角位移量均能检测。

(4) 标准试样的膨胀系数 定型生产的光杠杆膨胀仪一般均带有标准样品，有的用克罗林合金，其平均线胀系数如表 4-8 所示，有的用皮洛斯合金，其平均线胀系数如表 4-9 所示。

表 4-8 克罗林合金的平均线胀系数

$T/^{\circ}\text{C}$	20 ~ 250	> 250 ~ 500	> 500 ~ 738
$\bar{\alpha}_l/10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$	13.96	16.02	18.88

表 4-9 皮洛斯合金的平均线胀系数

$T/^{\circ}\text{C}$	25 ~ 100	> 100 ~ 200	> 200 ~ 300	> 300 ~ 400	> 400 ~ 500
$\bar{\alpha}_l/10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$	13.20	> 13.60	13.92	14.31	14.74
$T/^{\circ}\text{C}$	> 500 ~ 600	> 600 ~ 700	> 700 ~ 800	> 800 ~ 900	> 900 ~ 1000
$\bar{\alpha}_l/10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$	15.35	15.73	16.03	16.35	16.64

(5) 注意事项 使用光杠杆法测量膨胀系数时，为了减小误差，应注意以下事项：

1) 安装试样时，必须保证它与石英顶杆稳妥地接触，装完试样后轻轻振动膨胀计各部位，观察光点的位置是否发生变动。同时，试验过程中必须防止振动。

2) 要选用特别的感光纸或干板作记录，若采用普通照相纸记录，必须对其纵向和横向的收缩率分别进行标定。

3) 光点的大小和光线的强弱对测量精度均有影响，应尽量使光点细、圆，同时要有足够的强度，必要时使用氦氖激光器作光源。

4) 用热电偶测温时，热电偶的热端要插入试样中，但不得阻碍试样的自由膨胀。

5) 炉子的温度要稳定，升温速度不宜超过 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

4.2.3 千分表法

1. 适用范围

千分表法适用于测量有一定强度的棒状试样，长度约为 50mm。由于试样必须承受千分表及其顶杠的压力，其直径不能过小，一般以 5 ~ 8mm 为宜。该法可使用的温度范围很广，可低至液氮温区，高至 2500°C 左右。

2. 检测方法

试样的膨胀量通过一根与试样载管材质相同且膨胀系数很小的顶杆传递出来，由千分表直接检测，如图 4-14 所示。

千分表测出的膨胀量 ΔL_M 是膨胀计中几部分膨胀量的代数和，试样的膨胀量按下式计算：

$$\Delta L = \Delta L_M + \Delta L_S + \Delta L_N \pm K_T \quad (4-18)$$

式中 ΔL ——试样的膨胀量，单位为 mm；

ΔL_M ——千分表测量的示值，单位为 mm；

ΔL_S ——与试样等长的试样载管的膨胀量，单位为 mm；

ΔL_N ——支架的膨胀量，单位为 mm；

K_T ——不同温度下顶杆和载管膨胀量之差，单位为 mm。

ΔL_S 与 ΔL_N 为已知， K_T 由试验校正得出。对每一台仪器而言， K_T 的绝对值越小越好（表明顶杆和载管之间的温差小，炉子温度场均匀）。试样的平均线胀系数按下式计算：

$$\bar{\alpha}_l = \frac{\Delta L}{L_0 (T - T_0)} \quad (4-19)$$

式中 $\bar{\alpha}_l$ ——试样的平均线胀系数，单位为 K^{-1} ；

L_0 ——试样的初始长度，单位为 mm；

T_0 ——初始温度，单位为 K；

T ——试样膨胀 ΔL 时的温度，单位为 K。

这种设备的优点是结构简单，不需要其他放大机构，造价低廉，测量时不受电磁场的干扰。缺点是试样膨胀量的测量需经多种修正，因而准确度不是很高，且难以实现自动记录。

杠杆式千分表膨胀仪与上述类型的千分表膨胀仪相比有很大的改进，其顶杆热膨胀的方向与试样热膨胀的方向垂直，如图 4-15 所示，顶杆的膨胀量不会叠加到试样上，千分表上的读数即为试样的膨胀量。

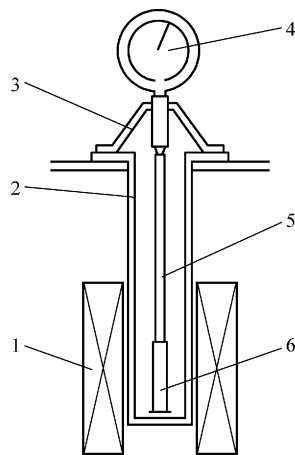


图 4-14 千分表膨胀仪示意图

1—加热炉 2—载管 3—支架
4—千分表 5—顶杆 6—试样

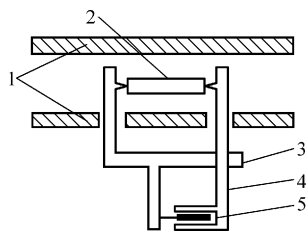


图 4-15 杠杆式千分表膨胀仪示意图

1—加热炉 2—试样 3—支板
4—顶杆 5—千分表

4.2.4 差动变压器法

1. 适用范围

差动变压器法适用于测量各种金属材料和非金属材料，该类型仪器测量的温度

范围较宽，试样的规格也允许有很大的变化范围。

2. 测量原理

差动变压器法将位移量的变化转换成电感量的变化，即应用互感型的传感器（差动变压器）测量试样热膨胀。差动变压器是由一个一次侧（励磁）线圈、两个绕制方向相反并互相串联的二次侧线圈和一个铁心组成。试样通过顶杆与铁心连接，置于线圈的中心。试样膨胀或收缩时，铁心相对于线圈移动，使一次侧和二次侧线圈之间的互感系数发生变化，因而输出电压也相应变化。在较小的位移范围内，位移量与电感量呈线性关系变化，因而膨胀或收缩量亦与电压成线性关系变化。

3. 检测方法

差动变压器式膨胀仪的结构如图 4-16 所示。

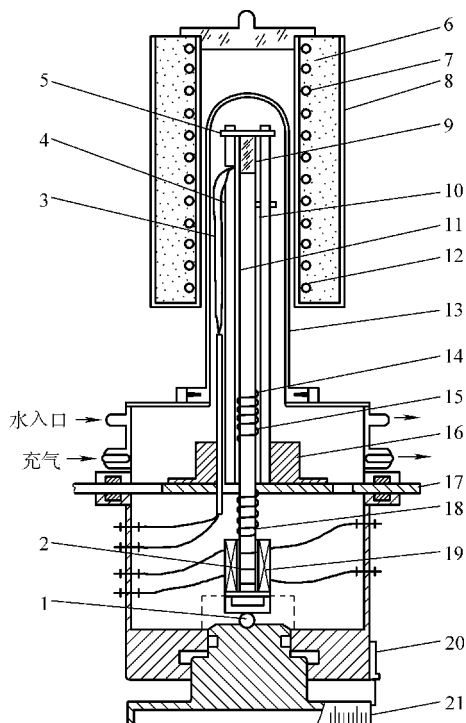


图 4-16 差动变压器式膨胀仪结构示意图

- 1—接触球 2—磁芯棒 3—热电偶 4—钼片导向环 5—钼顶板 6—保温层
7—电炉丝 8—炉壳 9—试样 10—钨支杆 11—钨顶杆 12—氧化铝炉管
13—氧化铝保护管 14、17—股钢连接杆 15—导向弹簧 16—支杆固定底座
18—导向弹簧 19—差动变压器线圈 20—微调指针 21—微调器

炉子用 Pt-Rh30（Rh 的质量分数为 30%）丝绕成，其电阻约为 4Ω 。炉子内管

为带螺纹的刚玉，外管由氧化铝中空球制成。炉子在空气气氛下工作，最高工作温度为 1450℃。保温层是用氧化铝中空球做成，套层厚度为 40mm。膨胀计由两根钨支杆和一根钨顶杆组成，两支杆的顶端用一钼片连接，并用钼螺钉固定。为了保证试样膨胀时顶杆和试样沿轴向做一维移动，在膨胀计的中部和下部分别装有导向弹簧，支杆底座上也装有定位套。钨顶杆和差动变压器的铁心之间用一段导热性能差的石英杆连接，以防止差动变压器受热而引起输出电信号漂移。试样为 $\phi 5 \sim \phi 6\text{mm}$ 、长 25mm 的圆棒，两端面抛光，其平行度误差不大于 2~3mm。测温用 Pt-Rh 热电偶。

膨胀仪的测量回路如图 4-17 所示。

图 4-17 中 5 为顶杆、6 为支杆，5 和 6 两者材料相同。 L' 为顶杆的一段，它与试样长度 L_0 相等。若顶杆和支杆的受热状态完全一致（即每一横截面上对应的温度完全相等），则测量出的膨胀量 ΔL_K 即为试样的膨胀量 ΔL_0 与支杆膨胀量 $\Delta L'$ 的代数和（ ΔL_0 与 $\Delta L'$ 方向相反）。但实际上，上述条件很难满足，因而顶杆和支杆之间的膨胀存在一个差值 K_T （ K_T 因温度而异，其值由试验得出），因此试样的实际膨胀量 $\Delta L_0 = \Delta L_K + \Delta L' + K_T$ ，试样的平均线胀系数按下式计算：

$$\bar{\alpha}_l = \frac{\Delta L_K + \Delta L' + K_T}{L_0 \Delta T} \quad (4-20)$$

式中 $\bar{\alpha}_l$ ——试样的平均线胀系数，单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

L_0 ——试样长度，单位为 mm；

ΔL_K ——膨胀量的测定值，单位为 mm；

$\Delta L'$ ——与试样等长的钨支杆的膨胀量，单位为 mm；

K_T ——校正量，单位为 mm；

ΔT ——初始温度与终止温度间的差值，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

近年来，人们开发出了数字式膨胀仪和用于热膨胀测量的 TMA（热机械分析）仪，其测量温度最低约为 -150°C ，最高可达 1500°C ，试样尺寸允许有很大的变化范围，长度上限约 20mm，直径为 2~15mm，对非圆柱形试样亦可测量。TMA 的传感器为线性可变差动变压器（LVDT），其最大线性范围为 2mm，最高灵敏度为 $0.04\mu\text{m}$ ，对于线胀系数从 $(1 \sim 200) \times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ 的材料均可测量。测量时试样上的

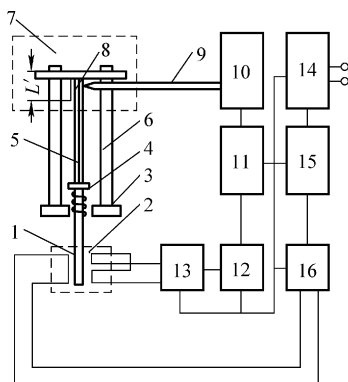


图 4-17 膨胀仪的测量回路

- 1—铁心 2—差动变压器 3—固定座
4—弹簧 5—顶杆 6—支杆 7—炉子
8—试样 9—热电偶 10—双笔记录仪
11—校正电路 12—检波器 13—前置
放大器 14—直流稳压器 15—10kHz 振
荡 16—功率放大器

接触压力可根据需要任意调节。TMA 除可测量固体材料的热膨胀系数、研究材料的相变过程并测定其相变点外，还可测量非晶体材料（陶瓷、玻璃、塑料、石蜡等）的软化温度，测定它们的成分变化等。

4.2.5 光干涉法

1. 方法综述

1) 通过观测与试样膨胀（收缩）相应的干涉条纹的变化，从而借助光的波长及亮度的变化来完成测量，属于绝对测量法。

2) 采用菲索光干涉法来完成测量：在柱形试样的顶部和底部分置两块光学平板称为“干涉片”，上、下干涉片间有一定的夹角，投射的激光束经它们反射后发生干涉，形成干涉条纹；试样的膨胀或收缩导致光程差的变化，造成条纹移动，检测条纹的变化还原成长度变化，即可完成测量。其工作原理如图 4-18 所示。

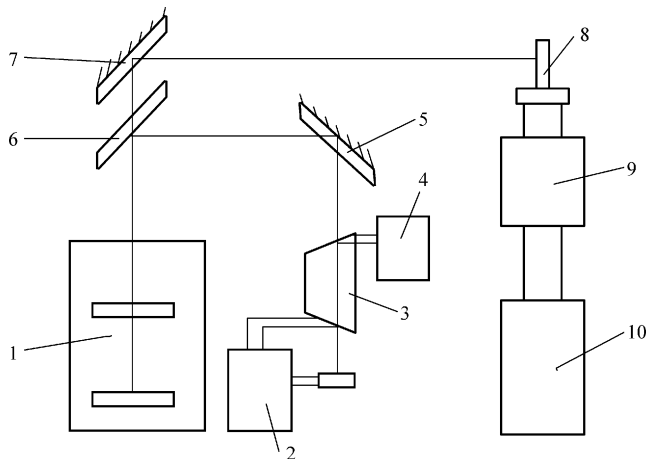


图 4-18 菲索光干涉法测试原理示意图

1—含有干涉具的恒温槽 2—激光稳频装置 3—氦氖激光器 4—激光电源
5、7—全反射镜 6—半反射镜 8—光电转换器 9—数据放大器 10—记录仪

2. 测试装置

(1) 长度测量装置 使用卧式测长仪或其他可满足要求的量具，测量环境温度 T_0 时的试样原始长度 L_0 ，其最小分度应不大于 0.01mm 。干涉仪的光学平板由具有光学品质的透明石英制成，平板应抛光到可见光的 $1/10$ 个波长，顶板与地板间应有 $15' \pm 5'$ 的夹角，顶板的下表面应经过研磨以消除反射，底板的上表面和顶板的下表面可涂敷反光材料以得到条纹的最佳能见度。使用波长已知的单色光源。推荐使用氦氖激光光源。可用游丝测微计或条纹记录器测量干涉条纹的移动，应读到 $1/20$ 个条纹间距。

(2) 温度测量装置 用铂电阻温度计测量试样的温度，其测温灵敏度应大于 0.03°C 。变温用恒温槽用电阻丝加热，用液氮或液氦制冷。在试样区内，横向温度的最大偏差应不大于 0.5°C ，纵向温度的最大偏差应不大于 0.5°C 。恒温槽的控温精度应不大于 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 膨胀仪 菲索干涉膨胀仪如图 4-19 所示，光源的频率应稳定，以保证测量条纹移动的偏差达到不大于 ± 0.05 个条纹的水平。

3. 试样的制备

1) 在严格的检测中，要求在被检材料的不同部位取样，加工成所需尺寸的试样。试样为棒状（或管状），以同一部位制取的三支试样为一组。在一般的检测中，对同一炉号只需一组试样。

2) 推荐试样长度为 50mm，过短则测量灵敏度降低，过长则试样轴向温度不均匀性加大。

3) 当试样长度取 50mm 时，直径应取 3~3.5mm。试样一端面为圆头，如图 4-20 所示。

4) 为获得可重现的测量结果，应消除与热膨胀行为无关的可导致长度附加变化的影响因素。为此，测试前要对样品进行稳定化处理：① Fe-Ni36 及 Fe-Ni32Co4Cu 合金的稳定化热处理是先将样品在空气中加热到

830℃保温 20min，淬水达到均匀化，然后将样品在空气中加热到 310℃回火 1h，最后再将样品加热到 95~100℃稳定化时效 48h；② Fe-Co54Cr9.5 合金的稳定化热处理是 900℃保温 1h 冷却至室温，在 450℃保温 5min；③ 含铜质量分数 99.97% 的无氧铜稳定化热处理工艺是在 530~540℃温度下退火。

4. 校正

- 1) 测试前必须对所使用的膨胀仪进行校正。
- 2) 校正用参照试样的物理特征参数应与待测试样尽可能接近。

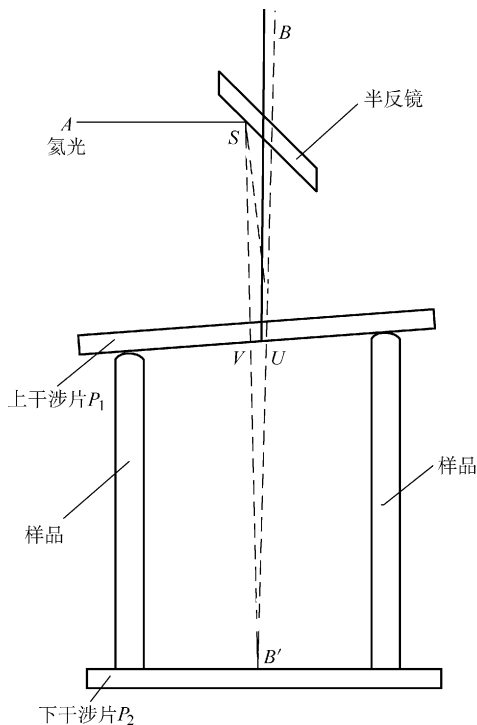


图 4-19 菲索干涉膨胀仪原理示意图

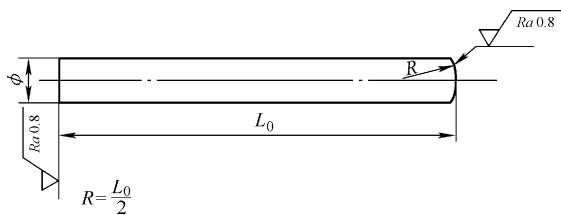


图 4-20 试样形状示意图

3) 膨胀仪的校准是将标准试样放入干涉具内的装样夹具中, 在需要的温度范围内将标准试样加热或冷却, 将测量得出的计算值与标准试样的标称值比较, 当测量的温度差为 50°C 时, 平均线胀系数的最大偏差应不大于 $6 \times 10^{-8}^{\circ}\text{C}^{-1}$, 否则应进行维修。

5. 测试步骤

1) 修磨同组接近等长的 3 支试样, 直至置入装样夹具后能产生最佳的干涉条纹为止。

2) 在基准温度 T_0 下测量 3 支试样的长度 L_0 , 安装好试样。

3) 抽真空, 使真空度好于 1.3Pa 。

4) 调整好光接收仪器。

5) 开始变温测量, 变温速率应不大于 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

6. 计算

1) 在非索干涉膨胀仪中, 热膨胀为:

$$\Delta L/L_0 = N\lambda/2L_0n_2 + (n_1 - n_2)/n_2 \quad (4-21)$$

式中 ΔL ——从起始温度 T_0 至所需温度 T 间观测至的长度变化, 单位为 mm ;

L_0 ——环境温度 T_0 下试样的原始长度, 单位为 mm ;

N ——温度由 T_1 变到 T_2 时, 通过参考点读到的或条纹记录器收到的干涉条纹数 (含小数部分);

λ ——产生条纹的光在真空中的波长 (要求 4 位有效数字以上), 单位为 mm ;

n_1 ——干涉具内气体在温度 T_1 下的折射率;

n_2 ——干涉具内气体在温度 T_2 下的折射率。

2) 用下式计算平均线胀系数:

$$\bar{\alpha}_l = (\Delta L/L_0)/\Delta T$$

式中 $\bar{\alpha}_l$ ——平均线胀系数, 单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

$\Delta L/L_0$ ——试样相对膨胀量;

ΔT ——温度的变化量, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

4.2.6 直接观测法

1. 适用范围

直接观测法应用范围很广, 不仅适用于各种刚性固体材料, 也适用于未经烧结的粉末压块。观测温度不限, 取决于热源和材料本身可达到的温度。

2. 测量原理

借助于某种精密测微器, 在试样加热过程中对其特定部位进行膨胀量的直接观测, 从而计算出材料的膨胀系数。这是一种最为直观而又非常简便的测量方法。

3. 检测方法

1) 直接观测法测量膨胀系数时, 可以用多种加热方式加热试样。一般温度下多采用电阻炉加热, 炉温应便于调节和控制; 在低温下如果对试样的均匀性要求很高时, 可以直接浸泡在制冷液中, 但观测的精度可能受到影响; 在较高的温度(1000℃以上)可使用电感应炉、辐射炉或直接通电加热试样等方式。

2) 该法对试样的形状不限, 但装放的方法大不相同。一般都是把试样水平装放在试样托上, 但也有悬挂在炉子中央的。一般使用长为10~50mm、直径为2~6mm的柱状试样或相等横截面的矩形或正方形试样。测量时在试样上做两个标记。两标记间标距的位移量即为试样的膨胀量。

3) 在1200℃以下的温度范围测量时, 在试样上点焊两根平直的刚性细丝作为标记。但在更高的温度, 标记的温度增高, 其亮度难以与试样区分开。为克服这一困难, 最简单的办法是将试样的两端加工成尖锐的形状, 再将观测仪器的焦点聚到尖端上, 测量出两尖端之间的位移量。

4. 升温速度

试样的升温速度应该适当地选择。最大的升温速度必须根据试样的热扩散率和试样的直径来确定。表4-10中列举了氧化锆和钨的热扩效率和直径在不同加热速率下的温度梯度。对于钨来说, 当升温速度为30℃/min时, 对于直径在10mm以下的试样所引起的温度梯度仍然可以忽略。但对于非金属材料, 则6℃/min的升温速度就能引起显著的温差。

表 4-10 在定速加热下圆柱棒内的温度梯度 (单位:℃)

直径/cm		升温速度/(℃/min)				
		1	3	6	12	30
氧化锆	1.0	1.0	3.1	6.3	12.5	31.2
	2.0	4.2	12.5	25.0	50.0	125.0
钨	1.0	0.03	0.08	0.15	0.3	0.8
	2.0	0.11	0.38	0.67	1.2	3.3

注: 氧化锆的热扩散率为 $0.004\text{cm}^2/\text{s}$, 钨的热扩散率为 $0.150\text{cm}^2/\text{s}$ 。

4.2.7 X 射线法

1. 适用范围

X射线法是一种微观测量方法, 用它测量膨胀系数时, 所测量的不是宏观尺寸的变化, 而是测量晶胞内晶格常数的变化。该法所需的试样特别小, 也不需其形状规则, 对于稀贵材料以及不能加工的材料测试最为适用。另外, X射线法直接测量的是试样点阵常数的变化, 它能真实地反映被测晶体的热膨胀, 不会因缺陷和夹杂物的存在而影响测量结果。可用于单晶或各向异性材料的热膨胀系数测量, 测量

温度范围很广，4.2~2500K 的温区均可适用。缺点是不能连续测量在温度变化过程中膨胀量的不连续变化。

2. 测量原理

该法不直接测量试样宏观尺寸的变化，而是通过测量晶体对特定波长的衍射角而求其点阵常数。对于特定辐射波长的入射线，其衍射角 2θ 所对应的面间距为：

$$\lambda = 2d_{(h,k,l)} \sin\theta$$

式中 $d_{(h,k,l)}$ ——晶面指数为 h 、 k 、 l 的点阵的面间距，单位为 nm；

λ ——所用 X 射线的特征辐射波长，单位为 nm；

θ ——衍射角，单位为 ($^{\circ}$)。

面间距 d 与晶胞参数有如下关系：

$$d^2 = [1 - \cos^2\alpha - \cos^2\beta - \cos^2\gamma + 2\cos\alpha\cos\beta\cos\gamma] /$$

$$\left[\left(\frac{h}{a} \right)^2 \sin^2\alpha + \left(\frac{k}{b} \right)^2 \sin^2\beta + \left(\frac{l}{c} \right)^2 \sin^2\gamma + \frac{2hk}{ab} (\cos\alpha\cos\beta - \cos\gamma) \right.$$

$$\left. + \frac{2hl}{ab} (\cos\alpha\cos\gamma - \cos\beta) + \frac{2kl}{bc} (\cos\beta\cos\gamma - \cos\alpha) \right]$$

式中 a 、 b 、 c ——点阵常数，单位为 nm；

α 、 β 、 γ ——晶轴间的夹角，单位为 ($^{\circ}$)；

h 、 k 、 l ——晶面指数。

对于立方晶系， $a = b = c$ ， $\alpha = \beta = \gamma = 90^{\circ}$ ，故点阵常数：

$$a = d \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$

点阵常数的测量主要有粉末照相法、衍射仪法和单晶法等。

3. 检测方法

对衍射图进行一系列的数学处理，计算出特定衍射角对应的面间距 d ，从而求出点阵常数 a 、 b 、 c 。试样的膨胀系数亦通过点阵常数的变化来计算。对于各向同性的材料，其平均线胀系数为：

$$\bar{\alpha}_l = \frac{\Delta a}{a \cdot \Delta T} = \frac{\Delta b}{b \cdot \Delta T} = \frac{\Delta c}{c \cdot \Delta T} \quad (4-22)$$

式中 $\bar{\alpha}_l$ ——平均线胀系数，单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

ΔT ——温度间隔，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ；

a 、 b 、 c ——点阵常数，单位为 nm；

Δa 、 Δb 、 Δc ——在 ΔT 内点阵常数的增量，单位为 nm。

用衍射仪测量膨胀系数时，被测试样一般为粉末状，用胶体（不产生附加衍射峰的粘性物质）粘成均匀的薄片（15mm×20mm），安置在特制的试样架上。粉末的粒度不宜过大，以 $\phi 40 \sim \phi 50 \mu\text{m}$ 为宜。试样安装时应特别注意将其严格对准测角器的中心，并使之与测角器轴线平行，防止试样偏离轴线。

4.3 常用金属材料的热膨胀系数

4.3.1 室温以下金属元素的瞬时线胀系数

室温以下金属元素的瞬时线胀系数如表 4-11 所示。

表 4-11 室温以下金属元素的瞬时线胀系数 (单位: $10^{-6}/K$)

元 素	温 度							
	25K	50K	75K	100K	150K	200K	250K	300K
铝	0.5	3.8	8.2	12.2	17.2	20.0	21.9	23.2
铋	—	—	8.2	9.2	10.1	10.5	10.8	11.0
铍	—	—	0.5	1.3	4.1	7.1	9.6	11.5
铷	—	8.9	10.9	12.0	12.8	13.2	13.4	13.5
镉	—	19.8	24.3	26.7	29.1	30.2	30.9	31.5
钙	—	—	14.0	16.7	19.0	20.3	21.4	22.3
铬	—	—	1.5	2.5	4.0	5.1	5.6	5.0
钴	—	—	—	—	—	—	—	13.7
铜	0.6	3.8	7.6	10.5	13.6	15.1	16.1	16.8
镓	—	—	—	—	2	8	9	9
铊	—	—	—	—	8.5	9.0	9.2	9.5
钎	—	—	—	—	6.5	6.5	3	4
镓	—	—	—	6	6.5	6.5	3	4
锗	—	—	0.9	2.3	4.1	4.9	5.3	5.7
金	—	7.9	10.4	11.5	12.8	13.4	13.8	14.1
铟	—	—	—	—	5.5	5.7	5.9	6.0
铟	—	18.2	22.0	23.8	26.3	28.1	29.8	31.9
铋	—	—	—	4.3	5.3	5.8	6.1	6.5
铁	—	1.6	—	5.6	8.3	10.0	11.0	11.7
钨	—	—	—	—	4.1	4.2	4.6	5.0
铅	1.45	2.16	23.8	25.0	26.5	27.5	28.3	28.1
锂	—	—	13.0	21.2	32.5	39.3	43.8	47.0
镁	0.8	5.7	11.2	15.2	20.2	23.0	24.6	25.6
锰	—	—	—	11.2	16.0	18.9	21.1	22.8
汞	—	—	33.8	36.9	41.2	47.2	—	—

(续)

元 素	温 度							
	25K	50K	75K	100K	150K	200K	250K	300K
钼	—	—	1.9	2.7	4.0	4.6	4.9	5.0
钽	—	—	—	—	7.2	7.2	7.2	7.2
镍	—	—	4.1	6.2	9.2	11.0	12.0	12.7
铌	—	2.4	3.8	4.7	6.8	6.4	6.8	7.1
钨	—	—	—	—	—	—	—	4.7
钇	—	—	—	8.0	9.9	10.8	11.3	11.8
铂	—	—	—	6.8	7.9	8.4	8.7	8.9
铀	—	—	29	30	48	53	56	57
钋	—	—	—	—	—	—	23	—
钾	—	—	—	—	—	—	—	83
铯	—	1.8	3.7	5.0	6.5	7.3	7.9	8.3
银	—	8.7	12.3	14.3	16.5	17.7	18.6	19.2
钽	—	—	—	5.2	5.9	6.3	6.5	6.3
铽	—	—	—	—	3	—	5	7.0
钿	—	—	7.9	8.7	9.5	10.1	10.6	11.1
锡(白)	—	—	13.8	15.5	17.4	18.7	19.9	21.2
钛	0.2	1.1	3.0	4.4	6.1	7.2	8.0	8.5
钨	—	—	—	2.7	3.6	4.1	4.4	4.5
铀	—	8.1	9.9	10.6	11.4	12.1	12.8	13.5
钒	—	—	2.4	4.0	6.3	7.4	7.7	7.8
锌	1.7	13.8	20.4	23.6	27.0	28.4	29.2	29.7
锆	—	—	2.7	3.9	4.7	5.3	5.4	5.7

4.3.2 高温下金属元素的瞬时线胀系数

高温下金属元素的瞬时线胀系数按下式计算：

$$\alpha_T = A + B(T - T_0) + C(T - T_0)^2 \tag{4-23}$$

式中 α_T ——温度为 T 时的瞬时线膨胀系数，单位为 K^{-1} ；

T ——温度，单位为 K；

T_0 ——初始温度，单位为 K；

$A、B、C$ ——常数，如表 4-12 所示。

表 4-12 高温下金属元素的瞬时线胀系数的计算用系数

元素	晶型	轴向	T_0/K	$A/10^{-6}\text{K}^{-1}$	$B/10^{-9}\text{K}^{-2}$	$C/10^{-11}\text{K}^{-3}$	温度范围	测量方法
铜	立方	—	273	16.872	1.773	11.64	323 ~ 623	石英膨胀计
铈	立方	—	273	7.22	-9.55	1.96	323 ~ 973	干涉法
铯	立方	—	—	285	—	—	301.4	—
金	立方	—	273	13.99	4.91	0	289 ~ 1151	X 射线法
锆	立方	—	273	6.05	3.60	-0.035	293 ~ 1085	X 射线法
铀	立方	—	273	6.13	2.56	0.070	303 ~ 1138	X 射线法
			273	6.473	1.438	0.1011	303 ~ 2494	顶杆法
铁(α)	立方	—	273	11.45	14.0	-1.089	272 ~ 970	—
铁(γ)	立方	—		19.54	0	0	> 1170	X 射线法
铅	立方	—	273	28.15	23.6	0	273 ~ 595	X 射线法
锂	立方	—	160	41.0	60	0	160 ~ 260	超声微波法
钼	立方	—	273	5.02	2.0	0	273 ~ 2273	—
镍	立方	—	273	12.87	7.64	0.036	320 ~ 1370	—
铌	立方	—	273	5.6	3.8	0	273 ~ 2273	—
钡	立方	—	273	11.57	0.750	0	273 ~ 1150	X 射线法
铯	立方	—	273	7.70	5.52	0.043	303 ~ 1138	X 射线法
铈	立方	—	273	3.70	1.74	0	293 ~ 2273	—
银	立方	—	273	18.84	4.07	0.55	323 ~ 653	—
钇	立方	—	273	33.77	15.16	3.59	323 ~ 1073	干涉法
铍	六方	—	293	5.86	9.64	-41.7	293 ~ 1270	—
铋	六方	c	—	12.4	—	—	283	三端电容法
		a	—	14.8	—	—	283	三端电容法
镉	六方	c	—	54.8	—	—	283	三端电容法
		a	—	19.3	—	—	283	三端电容法
镉	六方	—	273	8.5	10	-2	323 ~ 873	干涉法
铟	六方	—	273	10.51	-7.08	—	323 ~ 1023	干涉法
钇	六方	—	273	—	8.8	0.118	323 ~ 1073	干涉法

(续)

元素	晶型	轴向	T_0/K	$A/10^{-6}\text{K}^{-1}$	$B/10^{-9}\text{K}^{-2}$	$C/10^{-11}\text{K}^{-3}$	温度范围	测量方法
铪	六方	c	—	10.92	—	—	873	—
		a	—	0.32	—	—	873	—
钛	六方	c	—	1.8	—	—	300	—
		a	—	0.4	—	—	300	—
钽	四方	c	6	0.81	—	—	110 ~ 280	三端电容法
		a	8	1.20	191.7	—	110 ~ 280	三端电容法
铬	六方	c	—	11.7	—	—	298 ~ 813	X 射线法
		a	—	21.7	—	—	289 ~ 813	X 射线法
镁	六方	c	—	26.8	—	—	283	三端电容法
		a	—	25.1	—	—	283	三端电容法
钹	六方	—	273	6.96	-10	1.1	323 ~ 1073	干涉法
镨	六方	—	273	4.65	0.75	0.87	323 ~ 973	干涉法
镱	四方	—	—	9.9	—	—	290 ~ 970	X 射线法
铈	六方	c	300	4.8	0	0	300 ~ 633	X 射线法
		a	300	7.9	0	0	300 ~ 633	X 射线法
钪	六方	c	273	10.65	0	0	273 ~ 873	X 射线法
		a	273	9.55	0	0	273 ~ 873	X 射线法
		—	—	1.20	—	—	>1173	X 射线法
铽	六方	—	273	7.2	6.96	-0.04	323 ~ 1073	干涉法
锡(β)	四方	c	273	32.98	-211.2	63.85	273 ~ 493	X 射线法
		a	273	16.05	15.5	26.95	293 ~ 493	X 射线法
钇	六方	c	72	11.52	90.1	-27.2	100 ~ 250	干涉法
		a	72	2.22	30.1	-9.8	100 ~ 250	干涉法
铊	六方	c	37	25.5	56.6	-3.79	75 ~ 260	干涉法
		a	37	18.9	83.5	-25.7	100 ~ 260	干涉法
锌	六方	c	—	65.4	—	—	100 ~ 270	干涉法
		a	—	0.76	94.3	-22.05	80 ~ 270	干涉法
锆	六方	c	—	5.02	7.40	0.142	50 ~ 1130	X 射线法
		a	—	4.51	2.07	-0.153	50 ~ 1130	X 射线法

4.3.3 常用金属及合金的线胀系数

常用金属及合金的线胀系数如表 4-13 所示。

表 4-13 常用金属或合金的线胀系数

金属或合金	温度 $T/^{\circ}\text{C}$	线胀系数 α_l / $10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$	金属或合金	温度 $T/^{\circ}\text{C}$	线胀系数 α_l / $10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$
铝及铝合金			碳钢	20 ~ 100	10.6 ~ 12.2
1060	20 ~ 100	20 ~ 300		20 ~ 200	11.3 ~ 13.0
1100	20 ~ 100	20 ~ 400		20 ~ 300	12.1 ~ 13.5
2011	20 ~ 100	20 ~ 600		20 ~ 400	12.9 ~ 13.9
2014	20 ~ 100	23.0		20 ~ 600	13.5 ~ 14.3
2024	20 ~ 100	22.8		20 ~ 700	14.7 ~ 15.0
2218	20 ~ 100	22.3	铬钢	20 ~ 100	11.2
3003	20 ~ 100	23.2		20 ~ 200	11.8
4032	20 ~ 100	19.4		20 ~ 300	12.4
5005	20 ~ 100	23.8		20 ~ 400	13
5050	20 ~ 100	23.8		20 ~ 600	13.6
5052	20 ~ 100	23.8	铸铁	20 ~ 100	8.7 ~ 11.1
5056	20 ~ 100	24.1		20 ~ 200	8.5 ~ 11.6
5083	20 ~ 100	23.4		20 ~ 300	10.1 ~ 12.2
5086	60 ~ 100	23.9		20 ~ 400	11.5 ~ 12.7
5154	20 ~ 100	23.9		20 ~ 600	12.9 ~ 13.2
5456	20 ~ 100	23.9		20 ~ 1000	17.6
6061	20 ~ 100	23.4	10	20 ~ 100	11.53
6063	20 ~ 100	23.4		20 ~ 200	12.61
6101	20 ~ 100	23.0		20 ~ 300	13.0
7075	20 ~ 100	23.2		20 ~ 400	13.0
铜及铜合金				20 ~ 500	14.18
纯铜	20	16.5		20 ~ 600	14.6
磷脱氧铜	20 ~ 300	17.7	15	20 ~ 100	11.75
无氧铜	20 ~ 300	17.7		20 ~ 200	12.41
普通黄铜	20 ~ 300	20.3		20 ~ 300	13.45
低铅黄铜	20 ~ 300	20.2		20 ~ 400	13.60
中铅黄铜	20 ~ 300	20.3		20 ~ 500	13.85
高铅黄铜	20 ~ 300	20.3		20 ~ 600	13.90
超高铅黄铜	20 ~ 300	20.5	20	20 ~ 100	11.16
铝青铜	20 ~ 300	16.4		20 ~ 200	12.12
铍青铜	20 ~ 300	17.8			

(续)

金属或合金	温度 $T/^{\circ}\text{C}$	线胀系数 α_l $/10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$	金属或合金	温度 $T/^{\circ}\text{C}$	线胀系数 α_l $/10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$
20	20 ~ 300	12.78	65	20 ~ 100	11.8
	20 ~ 400	13.38		20 ~ 200	12.6
	20 ~ 500	13.93		20 ~ 400	13.3
	20 ~ 600	14.38		20 ~ 500	14.0
	20 ~ 700	14.81		20 ~ 600	14.0
25	20 ~ 100	11.18	20Cr	20 ~ 100	11.3
	20 ~ 200	12.66		20 ~ 200	11.6
	20 ~ 300	13.08		20 ~ 300	12.5
	20 ~ 400	13.47		20 ~ 400	13.2
	20 ~ 500	13.93		20 ~ 500	13.7
	20 ~ 600	14.41		20 ~ 600	14.2
	20 ~ 700	14.88	40Cr	20 ~ 100	11.0
35	20 ~ 100	11.7		20 ~ 200	12.0
	20 ~ 200	11.9		20 ~ 300	12.2
	20 ~ 300	12.7		20 ~ 400	12.9
	20 ~ 400	13.4		20 ~ 500	13.5
	20 ~ 500	14.02	12Cr2Ni3A ^①	20 ~ 100	11.8
	20 ~ 600	14.42		20 ~ 200	13.0
	20 ~ 700	14.88		20 ~ 400	14.7
45	20 ~ 100	11.59	12Cr2Ni4A	20 ~ 600	15.6
	20 ~ 200	12.32		20 ~ 100	11.8
	20 ~ 300	13.09		20 ~ 200	13.0
	20 ~ 400	13.71		20 ~ 400	14.7
	20 ~ 500	14.18		20 ~ 500	15.0
	20 ~ 600	14.67		20 ~ 600	15.6
	20 ~ 700	15.08	25CrNiWA ^①	20 ~ 100	11.0
50	20 ~ 100	12.0		20 ~ 300	13.0
	20 ~ 200	12.4		20 ~ 600	14.0
	20 ~ 400	13.3	37CrNi3A	20 ~ 100	11.6
	20 ~ 500	14.1		20 ~ 200	13.2
	20 ~ 600	14.1		20 ~ 400	13.4

(续)

金属或合金	温度 $T/^\circ\text{C}$	线胀系数 α_l $/10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$	金属或合金	温度 $T/^\circ\text{C}$	线胀系数 α_l $/10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$
37CrNi3A	20 ~ 600	13.5	40CrMnSiMoA ^①	20 ~ 300	13.3
40CrNiMoA	20 ~ 100	11.7	18CrMn2MoBA ^①	20 ~ 100	12.37
	20 ~ 300	12.7		20 ~ 200	12.73
35CrMoVA	20 ~ 100	11.8		20 ~ 300	13.17
	20 ~ 200	12.5		20 ~ 400	13.60
	20 ~ 300	12.7	12Cr13	20 ~ 100	11.2
	20 ~ 400	13.0		20 ~ 200	12.6
	20 ~ 500	13.4		20 ~ 400	14.1
	20 ~ 600	13.7		20 ~ 600	14.3
	20 ~ 700	14.0	20Cr13	20 ~ 100	10.5
38CrMoAlA	20 ~ 100	11.0		20 ~ 200	11.0
	20 ~ 200	13.1		20 ~ 300	11.5
	20 ~ 300	13.0		20 ~ 400	12.0
	20 ~ 400	13.5		20 ~ 500	12.0
	20 ~ 500	13.5	30Cr13	20 ~ 100	10.2
	20 ~ 600	14.5		20 ~ 200	11.1
30CrMnSiA	20 ~ 100	11.0		20 ~ 300	11.6
	20 ~ 200	11.72		20 ~ 400	11.9
	20 ~ 300	12.92		20 ~ 600	12.3
	20 ~ 400	13.13		20 ~ 700	12.8
	20 ~ 500	13.92	12Cr18Ni9	20 ~ 100	16.6
	20 ~ 600	14.23		20 ~ 200	17.0
	20 ~ 700	14.59		20 ~ 300	17.2
30CrMnSiNi2A ^①	20 ~ 100	11.37		20 ~ 400	17.5
	20 ~ 200	11.67		20 ~ 500	17.8
	20 ~ 300	12.68		20 ~ 600	18.2
	20 ~ 400	12.90		20 ~ 700	18.6
	20 ~ 500	13.53		20 ~ 900	19.3
	20 ~ 600	13.84	14Cr17Ni2	20 ~ 100	10.3
	20 ~ 700	13.97		20 ~ 200	10.3
40CrMnSiMoA ^①	20 ~ 100	12.5		20 ~ 300	11.2
	20 ~ 200	13.0		20 ~ 400	11.8
				20 ~ 500	12.4

(续)

金属或合金	温度 $T/^{\circ}\text{C}$	线胀系数 α_l $/10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$	金属或合金	温度 $T/^{\circ}\text{C}$	线胀系数 α_l $/10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$
17Cr18Ni9	20 ~ 100	16.0	12Cr18Mn9Ni5N	20 ~ 300	17.0
	20 ~ 500	18.5		20 ~ 400	17.5
13Cr11Ni2W2MoVA	20 ~ 100	9.3		20 ~ 500	18.8
	20 ~ 200	10.3	Cr12MoV	20 ~ 100	10.9
	20 ~ 300	10.8		20 ~ 400	11.4
	20 ~ 400	11.3		20 ~ 600	12.2
	20 ~ 500	11.7	6Cr4Mo3Ni2WV	20 ~ 100	11.1
	20 ~ 600	12.2		20 ~ 200	11.2
13Cr14Ni3W2VBA	20 ~ 100	10.0		20 ~ 300	11.9
	20 ~ 200	10.3		20 ~ 400	12.5
	20 ~ 300	10.6		20 ~ 500	13.1
	20 ~ 400	10.9		20 ~ 600	13.1
	20 ~ 500	11.1		20 ~ 700	13.3
	20 ~ 600	11.2	GCr9	20 ~ 100	13.0
40Cr10Si2Mo	20 ~ 100	10.0		20 ~ 200	13.9
45Cr14Ni14W2Mo	20 ~ 300	17.0		20 ~ 400	15.0
	20 ~ 500	18.0	GCr15	20 ~ 600	15.2
	20 ~ 700	18.0		20 ~ 100	14.0
	20 ~ 900	19.0		20 ~ 200	15.1
12Cr18Mn9Ni5N	20 ~ 100	15.5		20 ~ 400	15.6
	20 ~ 200	16.5		20 ~ 600	15.8

① 非标准牌号。

第 5 章 金属材料的热导率

5.1 热导率的基本知识

温度是度量物体冷热程度的物理量，它反映了物体内部热运动的激烈程度。物体内部各部分温度不同，所对应的内能也不相同，各部分间会发生能量的迁移，这种由于物体内部各部分温度的不同，从而以热量传递的方式导致能量迁移的方式称为热传导。

5.1.1 热传导的基本定律及概念

1. 傅立叶定律

当物体内部各个部分温度不一致时，将有热量从温度高的部分向温度低的部分传递。沿着热流传递的方向每单位长度的温度变化量称为温度梯度，用 $gradT$ 表示。温度梯度是一个矢量，它的正方向指向温度增加的方向，负方向指向温度降低的方向，与热流方向相同。傅立叶定律清晰地表述了热流同温度梯度之间成正比的关系。在稳定温度场（温度不随时间变化而改变的温度场）下，对于平壁一维导热的情况，傅立叶定律表述如下：

$$q = -\lambda gradT \quad (5-1)$$

式中 q ——热流密度，即单位时间内通过与热流垂直的单位面积的热量，单位为 W/m^2 ；

$gradT$ ——温度梯度，单位为 K/m ；

λ ——热导率，表征物体导热能力的物理量，单位为 $W/(m \cdot K)$ 。

负号表示热流密度矢量方向与温度梯度的方向相反。

将傅立叶定律进行变换，可得下式：

$$\lambda = -\frac{q}{gradT} = \frac{Q}{St\Delta T/\Delta L} \quad (5-2)$$

式中 Q ——流过与热流垂直的某一面元的热量，单位为 J ；

S ——热流通过面元的面积，单位为 m^2 ；

t ——热流通过的时间，单位为 s ；

$\Delta T/\Delta L$ ——温度降度，单位为 K/m ；

λ ——热导率，表示在单位温度梯度下单位时间内通过单位截面积的热量，单位为 $W/(m \cdot K)$ 。

2. 热扩散率

不稳定温度场的导热过程与物体的热焓有关系,而热焓的变化速率与材料的导热能力(即热导率 λ)成正比,与储热能力(比热容 c)成反比。因此,常采用与热导率相联系的一个参数 α 来表征物体传热过程中的导热速度,这个参数 α 称为热扩散率或导温系数,用下式表示:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (5-3)$$

式中 α ——热扩散率,单位 m^2/s ;

λ ——热导率,单位 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

ρ ——材料的密度,单位 kg/m^3 ;

c ——材料的比热容,单位 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

5.1.2 热导率与电导率的关系

洛伦兹发现比值 λ/σ 与温度 T 成正比,如下式:

$$L = \frac{\lambda}{\sigma T} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e} \right)^2 = 2.45 \times 10^{-8}$$

式中 λ ——热导率,单位 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

σ ——电导率,单位 $1/(\Omega \cdot \text{m})$;

L ——洛伦兹常数,单位 $\text{W} \cdot \Omega/\text{K}^2$;

k ——波尔兹曼常数,单位 J/K ;

e ——元电荷。

与电导率相比,直接测定热导率十分困难,并且很不精确。因此,就可以通过测定金属材料电导率来确定金属的热导率。在通常情况下,洛伦兹常数只有在 $T > 0^\circ\text{C}$ 的较高温度下才近似于常数 L 。不同金属材料的洛伦兹常数实验值如表5-1所示。

表 5-1 不同金属材料的洛伦兹常数实验值

金属	$L/10^{-8} (\text{W} \cdot \Omega/\text{K}^2)$		金属	$L/10^{-8} (\text{W} \cdot \Omega/\text{K}^2)$	
	0°C	100°C		0°C	100°C
Ag	2.31	2.37	Pb	2.47	2.56
Au	2.35	2.40	Pt	2.51	2.60
Cd	2.42	2.43	Sn	2.52	2.49
Cu	2.23	2.33	W	3.04	3.20
Ir	2.49	2.49	Zn	2.31	2.33
Mo	2.61	2.79			

如果计算出声子热导率 λ_l ，从总的热导率中减去声子导热的作用，则洛伦兹常数被修正为下式：

$$L' = \frac{\lambda - \lambda_l}{\sigma T} \approx 2.5 \times 10^{-8}$$

式中 L' ——洛伦兹常数修正值，单位 $\text{W} \cdot \Omega/\text{K}^2$ ；

λ ——总热导率值，单位 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；

λ_l ——声子热导率值，单位 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；

σ ——电导率，单位 $1/(\Omega \cdot \text{m})$ 。

5.1.3 影响热导率的因素

1. 原子结构对热导率的影响

在金属的热传导过程中，起主要作用的是自由电子导热，可将金属元素的热导率与原子结构和周期表相联系起来。而热导率又与电导率有一定的关系，通过找出金属原子导电性能随原子序数的变化关系就可以反映出金属元素热导率的变化关系。图 5-1 所示为温度为 300K 时周期表上各族元素的热导率图。由图 5-1 可见，含有一个价电子的金、银、铜的热导率最高，具有良好导电性能的铝、钨等元素的热导率也比较高。

2. 温度对金属热导率的影响

金属以电子导热为主，电子在运动过程中将会受到热运动原子和各种晶格缺陷的阻挡，形成热量传递的阻力。热阻是热导率的倒数，可以分解为晶格振动热阻和杂质缺陷热阻两种。当金属材料处于高温时，阻碍热传导的主要是晶格振动。当金属材料处于低温时，阻碍热传导的主要是杂质缺陷。当金属材料处于中间温度区间时，晶格振动和杂质缺陷都起作用。

合成后的热导率如下式：

$$\lambda = \frac{1}{\alpha T^2 + \beta/T} \quad (5-4)$$

式中 λ ——总热导率值，单位 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；

T ——金属材料的温度，单位为 K；

α 、 β ——常数。

通常情况下，纯金属由于温度升高而使平均自由程减小的作用更为显著，所以纯金属的热导率一般随温度的升高而降低。而在合金中，由于异类原子的存在使平均自由程受温度的影响较小，温度本身的作用较为明显，因而合金的热导率随温度的升高而升高。

3. 气孔率对金属材料热导率的影响

由于气体导热效果较差，因而材料内部存在着大量的气孔时，材料的热导率将

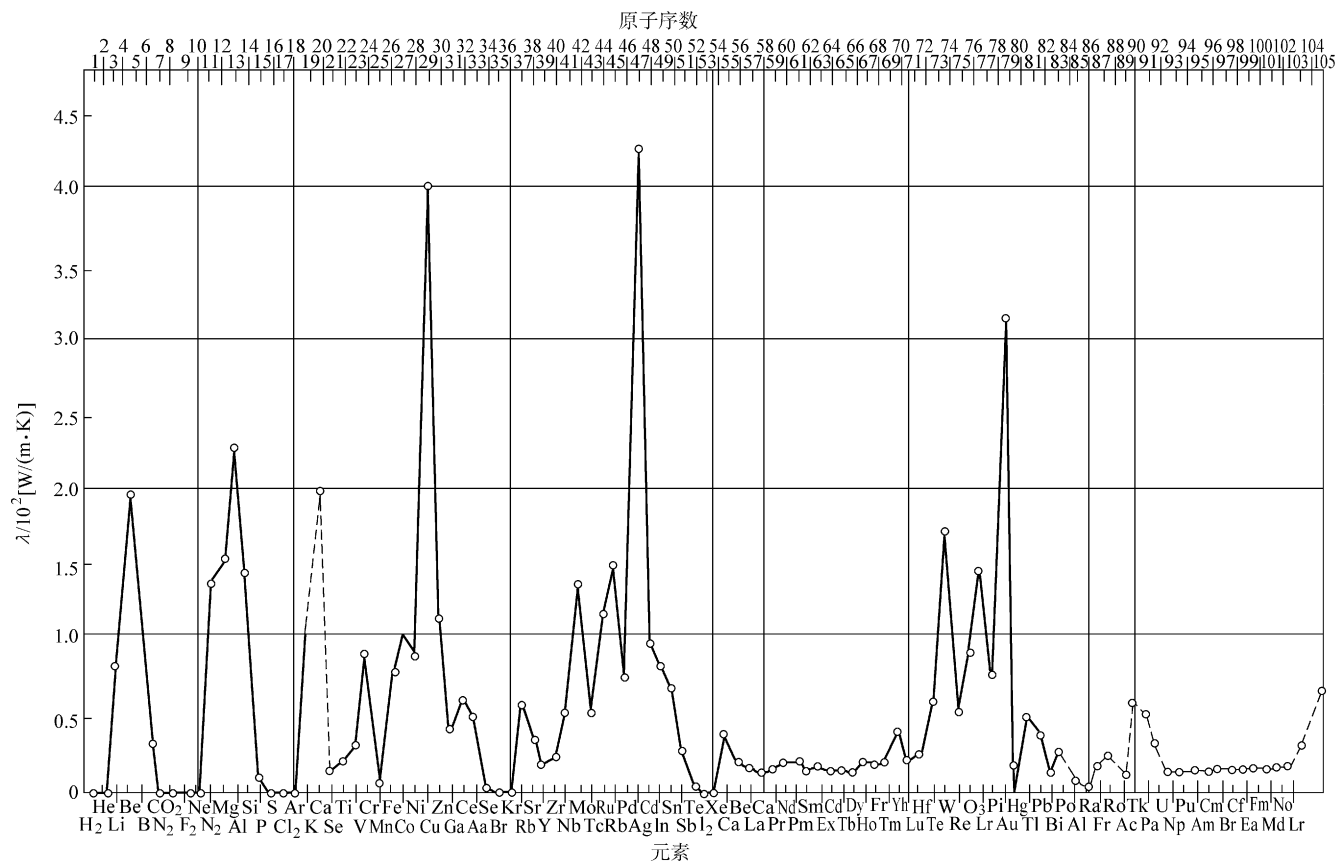


图 5-1 温度为 300K 时周期表上各族元素的热导率

受到较大的影响。对于金属烧结材料而言,当未进行烧结时,空气为基体相,金属粉末为弥散相。此时通过麦克斯韦关系可得下式:

$$\frac{\lambda_p}{\lambda_m} = \frac{\lambda_a}{\lambda_m} \left(\frac{3}{\varphi_a} - 2 \right) \quad (5-5)$$

式中 λ_p ——金属粉末的热导率,单位 $W/(m \cdot K)$;

λ_m ——金属的热导率,单位 $W/(m \cdot K)$;

λ_a ——空气的热导率,单位 $W/(m \cdot K)$;

φ_a ——气孔率(%)。

对于大多数金属材料而言,通常 $\lambda_a/\lambda_m = 0.001$,因而可以通过式(5-5)得出粉末相对热导率与气孔率的变化关系。

对于烧结后的多孔金属材料而言,空气为弥散相,金属为基体相,并且此时空气的热导率相对于金属的热导率可以忽略不计,由麦克斯韦关系可得下式:

$$\frac{\lambda_p}{\lambda_m} = \frac{1 - \varphi_a}{1 + \frac{1}{2} \varphi_a} \quad (5-6)$$

式中 λ_p ——金属粉末的热导率,单位 $W/(m \cdot K)$;

λ_m ——金属的热导率,单位 $W/(m \cdot K)$;

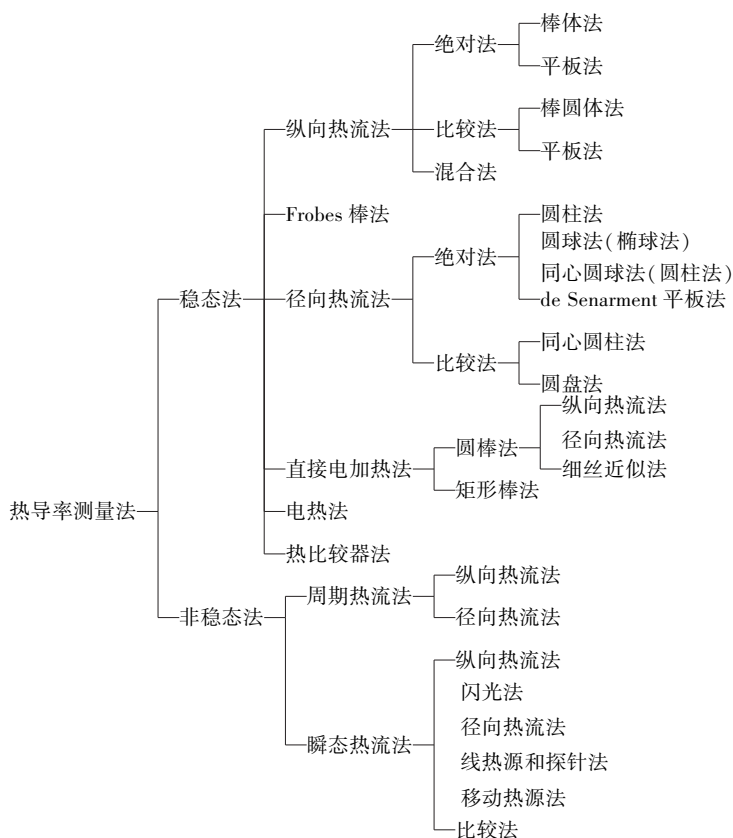
φ_a ——气孔率(%)。

通过式(5-6)可以得到金属粉末的相对热导率与气孔率的变化关系。

5.2 热导率的测量方法

测量金属材料热导率的方法很多。对于不同的温度范围和不同的热导率范围,通常需要采用不同的测量方法才能获得较为准确的热导率值。采用什么样的测试方法往往要从材料的热导率范围、待测试样可能做成的几何形状、数据所需的准确度和测量周期等一系列因素来综合考虑。

热导率的测量方法可分为两大类:稳态测量法和非稳态测量法。稳态测量法是指在测量过程中温度场分布不随时间改变而改变的方法。反之则称为非稳态测量法。用稳态测量法测量热导率时,需要测量出试样上单位面积的热流密度和温度梯度,然后再利用傅立叶定律计算出热导率。而对于非稳态测量方法,直接测量的是材料的热扩散率,需要知道材料的密度和比热容,然后计算出热导率。图 5-2 列出了常用的热导率测量方法分类。



5.2.1 稳态纵向热流法

1. 稳态纵向热流平板法

稳态纵向热流平板法是用方板状或圆盘形试样测量材料热导率的一种稳态纵向热流法。这种方法具有很多优点，如试样容易制备、测量准确度高和测量温度范围宽（ $-253 \sim 1500^{\circ}\text{C}$ ）等。但这种方法只适用于热导率在 $0.02 \sim 5.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 范围的低导热材料。

稳态纵向热流平板法的测量原理是平板试样内只存在纵向一维热流，在没有径向热损的边界条件下，由一维傅立叶热传导方程得到材料热导率有如下关系：

$$\lambda = \frac{Q\Delta L}{S(T_2 - T_1)} \quad (5-7)$$

式中 λ ——试样在 $T_1 \sim T_2$ 温度范围内的平均热导率，单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；

Q ——热流量，单位为 W ；

T_2 、 T_1 ——分别为试样热面和冷面温度，单位为 K ；

ΔL ——试样的厚度，单位为 m；

S ——试样测试区的面积，单位为 m^2 。

稳态纵向热流平板法按是否直接测量热流值分为绝对法和比较法两种。绝对法又可以分为直接测量主加热器电功率的电功率法和用流量计或沸腾卡计测量热流的卡计法两种。绝对法平板装置有单板和双板两种。单板系统只需用一块板状试样放在冷板和热板之间，如图 5-3 所示。双板系统则需要用两块相同的板状试样，分别夹在一块热板和两块冷板之间，如图 5-4 所示。在测量过程中，需要使整个系统满足纵向一维热流的边界条件，通常可用大直径薄试样来防止径向热损，也可以使用保护热环的办法来消除径向热损。

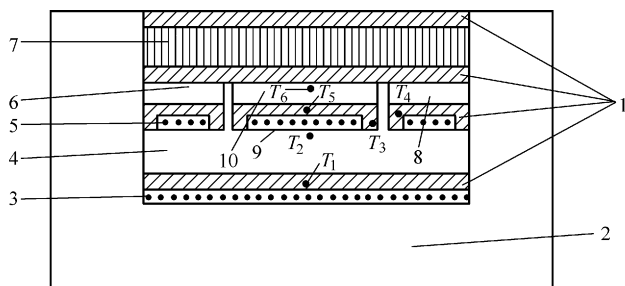


图 5-3 单板法示意图

1—均匀板 2—炉子隔热材料 3—底加热器 4—绝热粉末 5—边加热器
6、8—试样热保护环 7—隔热层 9—主加热器 10—待
测板状试样 T_1 、 T_2 、 $\dots$ 、 T_6 —测温点

比较法是同时将待测试样和参考试样放入测试装置中，测量时需要使通过两个试样的热流密度相同，然后通过式（5-8）计算出待测试样的热导率：

$$\lambda = \lambda_r \frac{S_r (\Delta T / \Delta L)}{S (\Delta T / \Delta L)} \quad (5-8)$$

式中 λ ——试样在 $T_1 \sim T_2$ 温度范围内的平均热导率，单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；

λ_r ——参考试样在 $T_1 \sim T_2$ 温度范围内的平均热导率，单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；

ΔT ——试样两表面的温度差，单位为 K；

ΔL ——试样的厚度，单位为 m；

S ——试样测试区的面积，单位

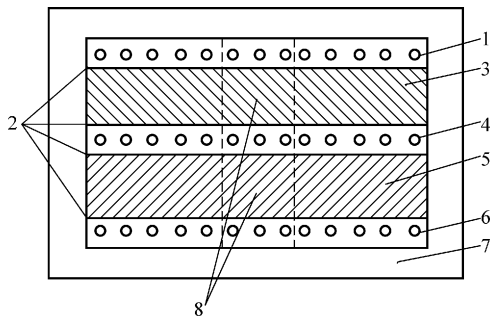


图 5-4 双平板示意图

1、6—外加热炉 2—均匀板 3、5—试样
4—中心加热炉 7—隔热材料 8—测试区

为 m^2 ;

S_r ——参考试样测试区的面积, 单位为 m^2 。

比较法比绝对法具有更多的优点, 如设备简单、操作方便等, 但同时也存在误差较大的缺点。稳态纵向热流平板法测量材料热导率的误差主要来自以下几方面:

1) 由于测试过程中需要满足纵向一维热流, 试样的厚度较薄, 接触热阻所占的比例较大, 对热导率测量值有较大的影响。

2) 对于多孔或透明试样, 传导热量正比于温差, 辐射热量与温度的三次方成正比, 对热导率测量值也有影响。

3) 侧向和底向热损同样会引起误差。

4) 测量中所使用的二次测量仪表也会对最终结果产生影响。

2. 稳态纵向热流圆棒法

稳态纵向热流圆棒法是一种用圆棒状试样测量材料热导率的一种稳态纵向热流法。这种方法几乎适用于测量所有金属在低温下的热导率, 可以测量热导率在 $0.1 \sim 5000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 范围内的导体。

稳态纵向热流圆棒法的测量原理是对于只存在纵向一维热流的圆棒试样, 在没有径向热损的边界条件下, 由一维傅立叶热传导方程得到材料热导率有如下关系:

$$\lambda = \frac{Q\Delta L}{S(T_2 - T_1)} \quad (5-9)$$

式中 λ ——试样在 $T_1 \sim T_2$ 温度范围内的平均热导率, 单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

Q ——热流量, 单位为 W ;

T_2 、 T_1 ——分别为两测温点的温度, 单位为 K ;

ΔL ——两测温点的距离, 单位为 m ;

S ——垂直于热流方向试样的截面积, 单位 m^2 。

稳态纵向热流圆棒法根据是否直接测量热流量可分为绝对法和比较法两种。绝对法又由于在测量时使用的温区不同, 有低温装置和高温装置两种类型。低温圆棒法测量装置如图 5-5 所示。

在低温测量时, 热量因辐射损

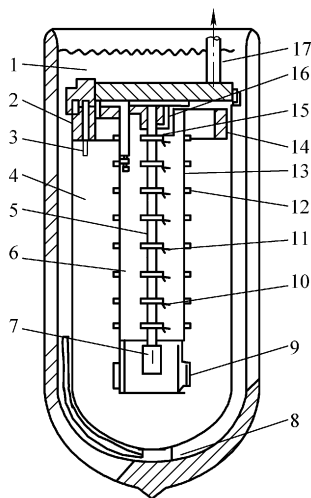


图 5-5 低温圆棒法测量装置

- 1—低温液体 2—可控温热汇加热器 3—铂电阻温度计
- 4—真空腔 5—待测试样 6—玻璃纤维 7—试样加热器
- 8—蒸发加热器 9—屏加热器 10—测温热电偶
- 11—热电偶夹持器 12—微调加热器 13—热补偿屏
- 14—温度参考环 15—碳电阻温度计
- 16—铜电阻温度计 17—真空接管

失并不严重,但系统需要保持高真空状态,以防止热量对流而造成大量的热损,同时待测试样周围应设置辐射屏以减小辐射热损。

在高温测量中,由于辐射传热逐步加强,试样的热量损失迅速增加,所以必须在试样周围填充低导热能力的绝热粉以抑制辐射热损。通常情况下,试样的热导率应比绝热粉的热导率高 1000 倍以上,并且在测量中炉子和试样之间还需要设置一个防护屏。防护屏由单独热源供热,屏上各点的温度须与试样上对应点的温度相等。高温圆棒法测量装置如图 5-6 所示。

比较法又称为分割式棒状法,通过将待测试样夹在参考试样中间,使待测试样和参考试样上流过相同的电流密度。此时,待测试样的热导率计算式如下:

$$\lambda = \lambda_r \frac{S_r (\Delta T / \Delta L)}{S (\Delta T / \Delta L)}$$

式中 λ ——试样在 $T_1 \sim T_2$ 温度范围内的平均热导率,单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

λ_r ——参考试样在 $T_1 \sim T_2$ 温度范围内的平均热导率,单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

ΔT ——试样两表面的温度差,单位为 K ;

ΔL ——试样的厚度,单位为 m ;

S ——试样测试区的面积,单位为 m^2 ;

S_r ——参考试样测试区的面积,单位为 m^2 。

5.2.2 稳态径向热流法

1. 稳态径向热流圆柱法

稳态径向热流圆柱法是一种采用一个具有同轴中心圆孔的圆柱体试样来测量材料热导率的稳态径向热流法。测量中,加热器放置在圆柱的轴线上。在稳态条件下,材料的热导率由下式给出:

$$\lambda = \frac{Q \ln(r_2/r_1)}{2\pi L(T_1 - T_2)} \quad (5-10)$$

式中 Q ——单位时间通过圆柱壁的热量,单位为 W ;

L ——试样测试区长度,单位为 m ;

r_1 、 r_2 ——试样的径向长度,单位为 m ;

T_1 、 T_2 ——试样径向 r_1 、 r_2 处的温度,单位为 K 。

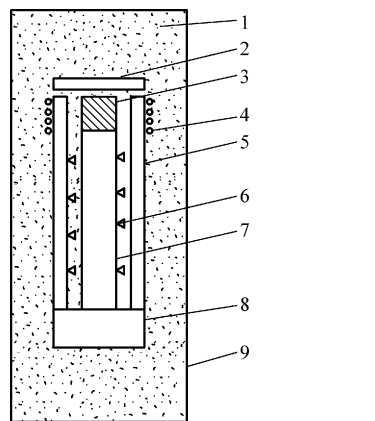


图 5-6 高温圆棒法测量装置

- 1—绝热粉 2—辐射屏 3—试样加热器
4—防护加热器 5—热防护柱 6—热电偶
7—试样 8—热汇 9—加热炉

在使用径向热流圆柱法测量时,为了满足只有径向热流的条件,待测试样总长度与直径之比应足够大,并且为了径向有足够的温差,试样直径不能太小。

2. 稳态径向热流圆球法

稳态径向热流圆球法是一种使用空心圆球体试样来测量材料热导率的方法。加热器放置在球体的中央,完全被试样包围,热流只能从径向向外流动。这种方法测得材料的热导率由下式计算:

$$\lambda = \frac{Q \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}{4\pi(T_1 - T_2)} \quad (5-11)$$

式中 Q ——单位时间通过空心圆球壁的热量,单位为 W;

r_1 、 r_2 ——试样的径向长度,单位为 m;

T_1 、 T_2 ——分别为试样径向 r_1 、 r_2 处的温度,单位为 K。

3. 稳态径向热流椭球法

稳态径向热流椭球法与稳态径向热流圆球法测量材料热导率的方法原理相同,是用中空的椭球试样代替中空的圆球试样。椭球试样的短轴平面应十分平滑,为温度的精确测量提供的方便。椭球法测量材料热导率由下式计算:

$$\lambda = \frac{Q}{8\pi a(T_1 - T_2)} \ln \left(\frac{\sqrt{a^2 + r_2^2} - a}{\sqrt{a^2 + r_2^2} + a} \times \frac{\sqrt{a^2 + r_1^2} + a}{\sqrt{a^2 + r_1^2} - a} \right) \quad (5-12)$$

式中 Q ——单位时间通过空心椭球壁的热量,单位为 W;

a ——椭球壁的半焦距,单位为 m;

r_1 、 r_2 ——试样径向长度,单位为 m;

T_1 、 T_2 ——试样径向 r_1 、 r_2 处的温度,单位为 K。

5.2.3 稳态直接通电加热法

稳态直接通电加热法是通过在短时间内直接通电加热一根质地均匀并且导电良好的棒状试样,测量材料热导率的方法。直接通电加热法与非通电加热法的优缺点比较如表 5-2 所示。

表 5-2 直接通电加热法与非通电加热法的优缺点比较

	直接通电加热法	非直接通电加热法
1	不需要高温炉	需要高温炉
2	短时间即可达到热平衡	长时间才能达到热平衡
3	数学计算比较复杂	数学计算比较简单
4	只能测导电材料	既能测导体,也能测非导体
5	比较容易达到边界条件	达到边界条件的要求相当困难
6	试样:细长棒、丝或带和粗的柱体	试样:大直径圆盘、圆柱
7	对垂直于热流和电流方向的裂纹十分敏感	对垂直于热流方向的裂纹敏感

在稳态无径向热流的条件下, 均匀固体材料的热传导微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{r \partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \rho \frac{I^2}{A^2} - \mu \frac{I \partial T}{A \partial x} = 0$$

式中 λ ——材料的热导率, 单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

ρ ——材料的电阻率, 单位为 $\Omega \cdot \text{m}$;

μ ——汤姆森系数;

A ——试样的横截面积, 单位为 m^2 ;

I ——加热电流, 单位为 A ;

r ——试样的径向长度, 单位为 m ;

x ——试样的纵向长度, 单位为 m ;

T ——金属材料的温度, 单位为 K 。

1. 径向热流法

用径向热流法测量材料导电系数时, 由于 $\partial T / \partial x = 0$, 试样纵向没有热量损失, 空心棒状试样的热导率由下式:

$$\lambda = \frac{VI}{4\pi L(T_2 - T_1)} \left(1 - \frac{2r_2^2}{r_1^2 - r_2^2} \ln \frac{r_1}{r_2} \right) \quad (5-13)$$

式中 λ ——材料的热导率, 单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

L ——试样纵向上均温段的长度, 单位为 m ;

V ——均温区段上的电压降, 单位为 V ;

I ——流过试样上的电流, 单位为 A ;

T_1 、 T_2 ——空心棒状试样内径 r_1 和 r_2 处的温度, 单位为 K 。

当空心试样的 r_2 无限趋近于 0 时, 就可以得到实心棒状试样的热导率计算公式:

$$\lambda = \frac{VI}{4\pi L(T_0 - T_r)} \quad (5-14)$$

式中 λ ——材料的热导率, 单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

L ——试样纵向上均温段的长度, 单位为 m ;

V ——均温区段上的电压降, 单位为 V ;

I ——流过试样上的电流, 单位为 A ;

T_0 、 T_r ——实心棒状试样中心温度和表面温度, 单位为 K 。

2. 纵向热流法

用纵向热流法测量材料导电系数时, 由于 $\partial T / \partial r = 0$, 试样径向没有热量损失。对于棒状金属试样, 其原理如图 5-7 所示。

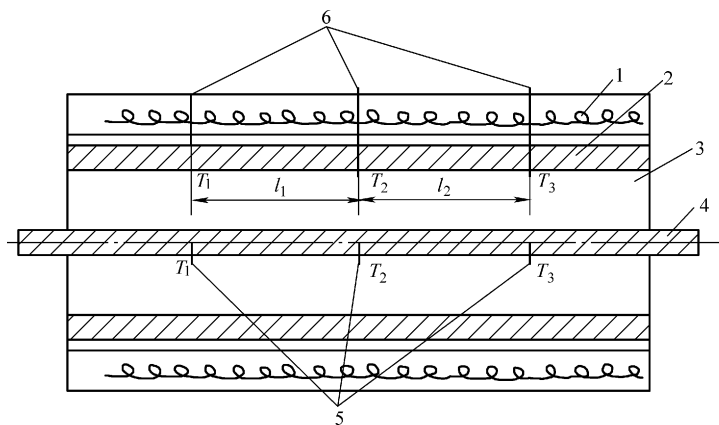


图 5-7 直流通电纵向加热法原理图

1—防护炉 2—均温管 3—绝热材料 4—试样
5—测量试样温度热电偶 6—测量环境温度热电偶

材料的热导率由下式给出：

$$\lambda = \frac{1}{8\rho} \frac{(V_1 - V_3)^2}{(T_2 - T_1)} \quad (5-15)$$

式中 λ ——材料的热导率，单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；

ρ ——材料的电阻率，单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ ；

V_1 、 V_3 ——边界条件处的电压，单位为 V ；

T_1 、 T_2 ——边界条件处的温度，单位为 K 。

实际条件下，试样侧面无热量损失是不可能的，经修正后材料的热导率计算公式如下：

$$\lambda = \frac{1.52IV}{d(\Delta T_1 - \varepsilon N)} \quad (5-16)$$

式中 λ ——材料的热导率，单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；

l ——试样工作区段的平均长度，单位为 m ；

I ——流过试样上的电流，单位为 A ；

V ——试样工作区段的平均电压降，单位为 V ；

d ——棒状试样的直径，单位为 m ；

ΔT_1 ——试样工作区段中点和端点的温度差，单位为 K ；

ε ——与试样侧向热量损失有关的系数；

N ——试样与侧向环境的温差函数。

式 (5-16) 中 ΔT_1 、 ε 和 N 可以通过下列各式确定：

$$\begin{aligned}\Delta T_1 &= T_2 - \frac{T_1 + T_3}{2} \\ \Delta T_2 &= T'_2 - \frac{T'_1 + T'_3}{2} \\ \Delta T_3 &= T_{02} - \frac{T_{01} + T_{03}}{2} \\ \Delta T_4 &= T'_{02} - \frac{T'_{01} + T'_{03}}{2} \\ N &= T'_2 - T_2 + \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{6} \\ N_0 &= T'_{02} - T_{02} + \frac{\Delta T_3 - \Delta T_4}{6} \\ \varepsilon &= \frac{T_3}{N_0}\end{aligned}$$

各式中 T_1 、 T_2 和 T_3 ——通电时试样端点、中点和另一端点的温度，单位为 K；

T'_1 、 T'_2 和 T'_3 ——通电时试样侧向环境端点、中点和另一端点的温度，单位为 K；

T_{01} 、 T_{02} 和 T_{03} ——不通电时试样端点、中点和另一端点的温度，单位为 K；

T'_{01} 、 T'_{02} 和 T'_{03} ——不通电时试样侧向环境端点、中点和另一端点的温度，单位为 K。

5.2.4 非稳态周期热流法

周期热流法是一种测量材料热导率的非稳态测量方法。它是在试样的一端施加一个温度呈周期变化的热源，导致试样上任何一点的温度都将和热源以相同的周期变化。当热流在试样内部传递时，试样上任意两点间存在着相位差，通过测量温度波的相位变化，就可以测出这种材料的热扩散率，再根据热扩散率和热导率之间的关系得到材料的热导率。

这种方法是采用一根细长棒作为待测试样，通过施加一个热源使其中间点做周期性的升温和降温。如果长细棒足够长，试样末端能够保持初始温度不变，通过测量试样上的温度波相位差就能够测出试样的热扩散率，计算公式如下：

$$\alpha = \frac{\pi L^2}{\tau \psi \lg m} \quad (5-17)$$

式中 α ——试样的热扩散率，单位为 m^2/s ；

L ——两观察点间的距离，单位为 m；

τ ——温度波的周期，单位为 s；

ψ ——两观察点间的相位差；

m ——两点温度的振幅比。

在传热分析中，热扩散率 α 是热导率与容积热容之比，因而可用下式得到热导率 λ 。

$$\lambda = \alpha \rho c_p \quad (5-18)$$

式中 λ ——热导率，单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；

ρc_p ——容积热容，单位为 $\text{J}/(\text{m}^3 \text{K})$ ；

ρ ——密度，单位为 $\text{kg}/(\text{m}^3)$ ；

c_p ——定容比热容，单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；

α ——试样的扩散率，单位是 m^2/s 。

5.2.5 非稳态瞬态热流法

非稳态瞬态热流法是指对试样施加一个能产生脉冲式或阶跃式热量的加热源，通过测量试样的温度变化来确定材料的热扩散率的方法。瞬态热流法中最常用的是闪光法。

闪光法是应用得最广的一种测量材料热扩散率的方法，它具有测量周期短、温度范围宽（ $-196 \sim 3000^\circ\text{C}$ ）和准确度高等优点。该方法所采用的试样是厚度远小于其直径的圆形薄片试样。测量时对试样的一面施加脉冲热流，然后根据试样另一面的温度变化情况确定材料的热扩散率，其实验原理图如图 5-8 所示。

根据傅立叶定律，不透明材料的热扩散率可以通过下式计算：

$$\alpha = \frac{0.139L^2}{t_{1/2}} \quad (5-19)$$

式中 α ——试样的热扩散率，单位为 m^2/s ；

L ——试样的厚度，单位为 m ；

$t_{1/2}$ ——试样的另一面温度达到最大温升一半时所需要的时间，单位为 s 。

用闪光法测量材料热扩散率时应满足如下条件：

1) 热传导方式为一维热传导，即试样内部只存在一维热流，不存在侧向的热量损失。

2) 圆形薄片试样应材质均匀、各向同性，并且材料的物理性能可以作为常量处理。

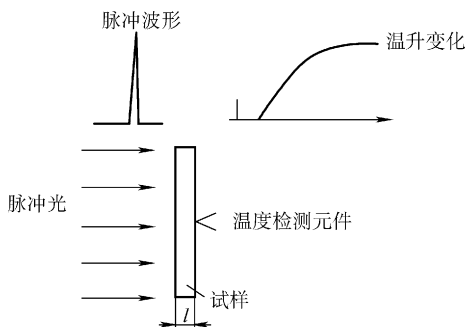


图 5-8 闪光法实验原理图

- 3) 试样在被施加脉冲热流时，均匀受光辐照，并在表面极薄层内被吸收。
- 4) 光辐照的加热时间远小于温度在试样变化的时间。

闪光法的测量误差主要来自测量误差和原理误差两个方面。测量误差是各测量值存在误差，原理误差是测量系统和测量条件未完全满足实验原理所需条件而造成的误差。因此，为了测量到材料准确的热扩散率值，常常都需要对结果作出分析和修正后才能得到准确值。

得到试样的扩散率后，再根据式（5-18）即可求出材料的热导率。

5.3 典型元素的热导率和热扩散率

- 1) 典型元素的热导率如表 5-3 所示。

表 5-3 典型元素的热导率

元素	温度 T/K	热导率 λ /[$W/(m \cdot K)$]	元素	温度 T/K	热导率 λ /[$W/(m \cdot K)$]
Ag	150	432	Be	250	236
	250	428		300	200
	300	427		800	107
	600	405	Bi	150	11.8
	800	389		250	8.57
	1000	374		300	7.86
	1200	358	Cd	150	101
Al	150	248		200	99.3
	200	237	Co	250	98.0
	250	235		300	96.8
	300	237		200	122
	600	232		300	99.2
	800	220	Cr	150	129
	250	320		250	99.2
Au	150	335		300	90.3
	300	315		600	80.5
	600	304		800	71.3
	800	292		1000	65.3
	1000	278		1200	62.4
	1200	262			

(续)

元素	温度 T/K	热导率 λ /[W/(m·K)]	元素	温度 T/K	热导率 λ /[W/(m·K)]
Cs	150	37.8	K	150	105
	250	36.3		200	104
	300	35.9		300	102
Cu	150	428	Li	150	97.7
	250	404		250	81.7
	300	398		300	76.8
	600	383	Mg	150	161
	800	371		250	157
	1000	357		300	156
	1200	342		600	149
				800	146
Fe	150	104	Mn	100	5.79
	250	86.5		200	7.17
	300	80.3		300	7.82
	600	54.7	Mo	200	143
	800	43.3		300	138
	1000	32.6		600	126
	1200	28.2		800	118
				1200	105
Ca	150	44.3	Na	150	133
	200	42.4		250	137
	300	40.6		300	132
Ge	150	132	Nb	200	52.6
	250	74.9		300	53.7
	300	59.9		800	61.3
	600	27.3			
Ir	800	19.8	Ni	150	121
	1000	17.4		250	97
	1200	17.4		300	90.5
	150	159		600	65.5
	300	147	Pb	800	67.4
	1000	126		1000	71.8

(续)

元素	温度 T/K	热导率 λ /[$W/(m \cdot K)$]	元素	温度 T/K	热导率 λ /[$W/(m \cdot K)$]
Pb	1200	76.1	Th	1000	60.2
	150	37.7		200	48.8
	200	36.6		300	49.1
	250	35.8		600	50.1
	300	35.2		800	50.8
Pt	150	74.0	Ti	150	27.0
	250	71.7		250	22.9
	300	71.4		300	21.9
	600	73.0		600	19.4
	800	75.5		800	19.7
	1000	78.6		1000	20.7
	1200	82.6		1200	22.0
Sb	200	30.2	U	200	25.1
	800	16.8		300	27.6
Se	150	7.62		600	34.0
	250	5.13		800	38.0
	300	4.52	W	150	210
Si	150	409		250	186
	250	191		300	178
	300	148		600	139
	600	61.9		800	128
	800	42.2		1000	121
	1000	31.2		1200	115
	1200	25.7	Zn	150	122
Sn	150	77.9		200	123
	200	73.3		250	122
	250	69.6		300	121
	300	66.6		600	105
Ta	200	57.5	Zr	200	25.2
	300	57.5		300	22.7
				1000	23.7

2) 典型元素的热扩散率如表 5-4 所示。

表 5-4 典型元素的热扩散率

元素	温度 T/K	热扩散率 $\alpha/$ (m^2/s)	元素	温度 T/K	热扩散率 $\alpha/$ (m^2/s)
Ag	150	192	Co	200	36.2
	250	176		300	26.3
	300	174		600	15.5
	600	161	Cr	150	56.4
	800	149		250	32.8
	1000	137		300	29.0
	1200	124		600	21.5
Al	150	132		800	18.2
	200	109		1000	15.3
	250	100		1200	13.0
	300	96.8	Cs	150	96.0
	600	83.7		250	87.8
	800	73.6		300	79.4
Au	150	140	Cu	150	147
	250	131		250	121
	300	128		300	117
	600	115		600	103
	800	107		800	96.8
	1000	99.1		1000	90.3
	1200	91.3		1200	83.8
Be	250	83.1	Fe	150	40.4
	300	59.0		250	26.0
	800	20.9		300	22.7
Bi	150	10.3		600	12.4
	250	7.14		800	8.18
	300	6.46		1000	4.25
Cd	150	53.7		1200	6.05
	200	51.5	Ga	150	23.5/8.71
	250	49.8		200	20.9/7.97
	300	48.6		300	18.6/7.24

(续)

元素	温度 T/K	热扩散率 $\alpha/$ (m^2/s)	元素	温度 T/K	热扩散率 $\alpha/$ (m^2/s)
Ge	150	97.2	Nb	200	24.6
	250	44.4		300	23.7
	300	34.6		800	25.0
	600	14.2	Ni	150	41.5
	800	10.1		250	26.3
	1000	8.51		300	22.9
K	800	12.0		600	12.6
	1000	9.52		800	14.7
	300	50.2		1000	15.0
	1000	37.7	Ir	1200	8.27
	150	178		150	63.0
	200	172		200	25.9
Li	300	157		250	25.0
	150	66.5		300	24.3
	250	49.8	Pt	150	29.1
Mg	300	45.4		250	25.7
	150	109		300	25.2
	250	91.1		600	24.4
	300	87.4		800	24.4
	600	75.6		1000	24.6
	800	68.9		1200	25.1
Mn	100	2.88	Sb	200	22.5
	200	2.28		300	17.5
	300	2.08		800	16.8
Mo	200	63.0	Se	150	5.71/1.63
	300	54.3		250	3.41/0.992
	600	45.1		300	2.93/0.838
	800	41.5	Si	150	410
	1200	33.9		250	126
Na	150	132		300	88.0
	250	125		600	30.7
	300	118			

(续)

元素	温度 T/K	热扩散率 $\alpha/$ (m^2/s)	元素	温度 T/K	热扩散率 $\alpha/$ (m^2/s)
Si	800	20.1	Ti	300	66.2
	1000	14.3		600	50.8
	1200	11.6		800	45.4
Sn	150	51.4		1000	41.6
	200	46.63		1200	38.8
	250	43.1	Zn	150	47.0
	300	40.2		200	44.3
Ta	200	26.0	U	800	34.1
	300	24.7		1200	31.0
	1000	24.2		200	12.1
Th	200	41.5		300	12.5
	300	39.2		600	12.5
	600	35.9		800	11.9
Pb	1200	15.4		1200	17.2
	150	27.1	W	150	87.3
Ti	150	14.75		200	70.3
	250	10.1		250	43.1
	300	9.25		300	41.6
	600	7.29		600	34.2
	800	6.99	Zr	200	14.9
	1000	6.91		300	12.7
	1200	7.85		1000	10.4

第 6 章 金属材料的电阻性能参数

6.1 电阻性能的基本知识

6.1.1 基本概念

1. 电阻

电阻不仅取决于导体的电性能，而且还与导体的几何形状有关。导体电阻的大小与导体的长度 l 成正比，与截面积 S 成反比，关系式如下：

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (6-1)$$

式中 R ——导体的电阻，单位为 Ω ；

ρ ——导体材料的电阻率，单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ ；

l ——导体长度，单位为 m ；

S ——导体的横截面积，单位为 m^2 。

2. 表面电阻

由表面导电所确定的绝缘电阻部分叫做表面电阻。表面电阻一般受环境的影响较大。电化（在接触绝缘电介质的两电极之间，施加电压的过程）时间以不确定的方式对表面电流施加剧烈影响。测量时，电化时间常取 1min 。

3. 单位长度电阻

导体在标准温度下单位长度的电阻值用下式表示：

$$R_1(T_0) = \frac{R(T_0)}{l_1(T_0)}$$

式中 $R_1(T_0)$ ——在标准温度 T_0 时单位长度的电阻，单位为 Ω/m ；

$R(T_0)$ ——在标准温度 T_0 时试样标长两端间的电阻，单位为 Ω ；

$l_1(T_0)$ ——在标准温度 T_0 时试样的标长，单位为 m 。

4. 体积电阻率

体积电阻率是单位长度、单位截面积导体的电阻，在标准温度下导体的体积电阻率用下式表示：

$$\rho_v(T_0) = \frac{A(T_0)}{l_1(T_0)} \cdot R(T_0)$$

式中 $\rho_v(T_0)$ ——在标准温度 T_0 时的体积电阻率, 单位为 $\Omega \cdot \text{m}$;

$A(T_0)$ ——在标准温度 T_0 时试样的截面积, 单位为 m^2 ;

$l_1(T_0)$ ——在标准温度 T_0 时试样的标长, 单位为 m ;

$R(T_0)$ ——在标准温度 T_0 时试样标长两端间的电阻, 单位为 Ω 。

5. 质量电阻率

质量电阻率是单位长度、单位质量导体的电阻, 在标准温度导体的质量电阻率用下式表示:

$$\rho_m(T_0) = \frac{m}{l_2(T_0)} \cdot \frac{R(T_0)}{l_1(T_0)}$$

式中 $\rho_m(T_0)$ ——在标准温 T_0 时的质量电阻率, 单位为 $\Omega \cdot \text{kg}/\text{m}^2$;

m ——试样质量, 单位为 kg ;

$l_2(T_0)$ ——在标准温度 T_0 时试样的总长, 单位为 m ;

$R(T_0)$ ——在标准温度 T_0 时试样标长两端间的电阻, 单位为 Ω ;

$l_1(T_0)$ ——在标准温度 t_0 时试样的标长, 单位为 m 。

6. 表面电阻率

表面电阻率是折算成单位面积时的表面电阻, 表面电阻率值受可能存在的电极极化的影响, 其数值与该单位面积的大小无关。

7. 电导率

电阻率的倒数称为电导率, 是导体材料传导电流能力的表征, 常用下式表示:

$$\sigma = 1/\rho \quad (6-2)$$

式中 ρ ——电阻率, 单位为 $\Omega \cdot \text{m}$;

σ ——电导率, 单位为 $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ 。

8. 国际退火铜标准电导率百分数

IEC 60028 把商业退火铜的电导率规定为 20°C 时标准退火铜电导率的百分数, 电导率是电阻率的倒数。它假定商业退火铜的密度与标准退火铜的密度相同, 从而不论电导率是质量电导率值还是体积电导率值, 都无关紧要。但是, 从 1925 年以来, 其他金属的电导率也普遍采用 IACS (国际退火铜标准) 表示。由于其他金属的密度和铜的密度可能不同, 在这些情况下不论是体积的还是质量的, 都需要规定电导率的基准。IACS 体积电导率百分数或者 IACS 质量电导率百分数, 定义为国际退火铜标准规定电阻率 (不论是体积的或者质量的) 对相同单位的试样电阻率之比乘以 100。与 IACS 相当电阻率数值如表 6-1 所示。

9. 电阻温度因数

电阻温度因数是指定温度 T 下的电阻值与基准温度 T_0 下的电阻值之比, 用下式表示:

$$\alpha_T = R_T/R_0 \quad (6-3)$$

式中 α_T ——电阻温度因数；

R_T ——指定温度 T 下的电阻值，单位为 Ω ；

R_0 ——基准温度 T_0 （通常以 20°C 为基准温度）下的电阻值，单位为 Ω 。

表 6-1 与 IACS 相当电阻率数值

20℃时的电导率/(% IACS)	100.00	
体积电阻率	$\Omega \cdot \text{m}$	1.7241×10^{-8}
	$\Omega \cdot \text{mm}^2/[\text{m}(\mu\Omega \cdot \text{m})]$	0.017241
质量电阻率	$\Omega \cdot \text{kg}/\text{m}^2$	1.5328×10^{-4}
	$\Omega \cdot \text{g}/\text{m}^2$	0.15328

注：电导率的单位是电阻率单位的倒数。

10. 平均电阻温度系数

温度 T_1 、 T_2 下，与温度变化 1°C 相应的电阻温度因数的平均变化值常用下式表示：

$$\bar{\alpha}_{T_1, T_2} = \frac{R_2 - R_1}{R_0(T_2 - T_1)}$$

式中 $\bar{\alpha}_{T_1, T_2}$ ——温度 T_1 、 T_2 下的平均电阻温度系数，单位为 $^\circ\text{C}^{-1}$ ；

R_1 ——起始温度 T_1 下的电阻值，单位为 Ω ；

R_2 ——终止温度 T_2 下的电阻值，单位为 Ω ；

R_0 ——基准温度 T_0 下的电阻值，单位为 Ω ；

T_1 ——起始温度，单位为 $^\circ\text{C}$ ；

T_2 ——终止温度，单位为 $^\circ\text{C}$ 。

11. 电阻温度常数

电阻温度关系接近抛物线形时，关系式中的一次项与二次项的系数，以 α 、 β 表示：

$$R_T = R_0[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2]$$

式中 R_T ——温度 T 下的电阻值，单位为 Ω ；

R_0 ——基准温度 T_0 下的电阻值，单位为 Ω ；

T ——试验测量温度，单位为 $^\circ\text{C}$ ；

T_0 ——基准温度，单位为 $^\circ\text{C}$ ；

α ——一次电阻温度常数，单位为 $^\circ\text{C}^{-1}$ ；

β ——二次电阻温度常数，单位为 $^\circ\text{C}^{-2}$ 。

12. 质量电阻系数

质量电阻系数是导体单位长度和单位质量的电阻，按下式计算：

$$\delta = \frac{mR}{L_1 L_2} \quad (6-4)$$

式中 δ ——质量电阻系数, 单位为 $\Omega \cdot \text{g}/\text{m}^2$;

R ——试样测量长度的电阻, 单位为 Ω ;

L_1 ——测量电阻的标距长度, 单位为 m ;

L_2 ——测量所取试样长度, 单位为 m ;

m ——试样质量, 单位为 g 。

6.1.2 电阻性能的常用数据

1) 元素的电阻温度因数如表 6-2 所示。

表 6-2 元素的电阻温度因数

元 素	He 氦	Li 锂	Be 铍	C 碳	Na 钠	Mg 镁	Al 铝	Si 硅	P 磷	K 钾	Ca 钙	Ti 钛	V 钒	Cr 铬
电阻温度系数(0℃) /(10 ⁻³ /℃ ¹)	10 ²¹ (20℃)	4.6	6.7	0.6 ~ 1.2	5.47	4.1	4.23	0.8 ~ 1.8	-0.456	5.4	3.33	3.97	2.8	2.5
元素	Mn 锰	Fe 铁	Co 钴	Ni 镍	Cu 铜	Zn 锌	Ga 镓	Ge 锗	As 砷	Se 硒	Kr 氪	Rb 铷	Sr 锶	Zr 锆
电阻温度系数(0℃) /(10 ⁻³ /℃ ¹)	1.7	6.0	6.6	5.0 ~ 6.0	4.3	4.2	3.9	1.4	3.9	4.45	-0.39	4.81	3.83	4.35
元素	Nb 铌	Mo 钼	Ru 钌	Rh 铑	Pd 钯	Ag 银	Cd 镉	In 铟	Sn 锡	Sb 锑	Cs 铯	La 镧	Ce 铈	Pr 镨
电阻温度系数(0℃) /(10 ⁻³ /℃ ¹)	3.95	4.71	4.49	4.35	3.79	4.29	4.24	4.9	4.4	5.1	4.96	2.18	0.87	1.71
元素	Nd 钕	Sm 钐	Eu 铕	Gd 钆	Dy 镝	Ho 钬	Er 铒	Tm 铥	Yb 镱	Lu 镥	Hf 铪	Ta 钽	W 钨	Re 铼
电阻温度系数(0℃) /(10 ⁻³ /℃ ¹)	1.64	1.48	4.30	1.76	1.19	1.71	2.01	1.95	1.30	2.40	4.43	3.85	4.82	1.73
元素	Os 锇	Ir 铱	Pt 铂	Au 金	Hg 汞	Tl 铊	Pb 铅	Bi 铋	Po 钋	Ac 锕	Th 钍	U 铀	Pu 钷	
电阻温度系数(0℃) /(10 ⁻³ /℃ ¹)	4.2	4.1	3.99	3.5	0.99	5.2	4.2	4.2	7.6(α) 7.0(β)	4.23	2.26	2.18 ~ 2.76	-0.21	

2) 不同温度下电解铁的电阻率如表 6-3 所示。

表 6-3 不同温度下电解铁的电阻率

T/K	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
$\rho/10^{-9}\Omega \cdot \text{m}$	3.87	3.87	3.85	3.85	3.85	3.87	3.89	3.90	3.90	3.92	3.99	4.10	4.26	4.50
T/K	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110	120
$\rho/10^{-9}\Omega \cdot \text{m}$	4.26	4.28	5.85	6.54	7.37	8.32	9.38	10.56	11.88	13.27	14.76	16.32	19.69	23.30
T/K	130	140	150	160	170	180	190	200	220	240	260	280	300	350
$\rho/10^{-9}\Omega \cdot \text{m}$	27.07	31.0	35.0	39.1	43.2	47.5	51.8	56.1	65.2	74.4	84.2	94.3	104	132
T/K	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	
$\rho/10^{-9}\Omega \cdot \text{m}$	164	200	240	284	333	387	445	508	576	649	728	811	901	

3) 元素的电阻率如表 6-4 所示。

表 6-4 元素的电阻率

元 素	Li 锂	Be 铍	B 硼	C 碳	Na 钠	Mg 镁	Al 铝	Si 硅	P 磷	S 硫	Cl 氯	K 钾	Ca 钙
电阻率 $\rho(0^{\circ}\text{C})$ $/10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}$	8.55	6.6	1.8×10^{12}	1375	4.27	4.47	2.655	10	1×10^{17}	2×10^{23} (20°C)	1×10^{10}	6.55	3.6
元 素	Sc 钪	Ti 钛	V 钒	Cr 铬	Mn 锰	Fe 铁	Co 钴	Ni 镍	Cu 铜	Zn 锌	Ga 镓	Ge 锗	As 砷
电阻率 $\rho(0^{\circ}\text{C})$ $/10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}$	61 (22°C)	42.1 ~ 47.8	24.8 ~ 26	12.9	185 (20°C)	9.7 (20°C)	5.06 (α)	6.84	1.67 ~ 1.68 (20°C)	5.75	13.7	0.86×10^6 ~ 52×10^6	35.0
元 素	Se 硒	Br 溴	Rb 铷	Sr 锶	Zr 锆	Nb 铌	Mo 钼	Ru 钌	Rh 铑	Pd 钯	Ag 银	Cd 镉	In 铟
电阻率 $\rho(0^{\circ}\text{C})$ $/10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}$	12	6.7 $\times10^7$	11	30.7	39.7 ~ 40.5	13.1 ~ 15.22	5.17	7.157	6.02	9.1	1.5	7.51	8.2
元 素	Sn 锡	Sb 锑	Te 碲	I 碘	Cs 铯	Ba 钡	La 镧	Ce 铈	Pr 镨	Nd 钕	Sm 钐	Eu 铕	Gd 钆
电阻率 $\rho(0^{\circ}\text{C})$ $/10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}$	11.5	39.0	1×10^5 ~ 2×10^5	1.3 $\times10^{15}$	19.0	50	56.8 (20°C)	75.3 (25°C)	68 (25°C)	64.3 (25°C)	88.0	81.3	134.5
元 素	Dy 镝	Ho 铥	Er 铒	Tm 铥	Yb 镱	Lu 镥	Hf 铪	Ta 钽	W 钨	Re 铼	Os 锇	Ir 铱	Pt 铂
电阻率 $\rho(0^{\circ}\text{C})$ $/10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}$	56.0	87.0	107	79.0	30.3	79.0	32.7 ~ 43.9	13.1	5.1	19.5	9.66	4.85	9.2 ~ 9.6
元 素	Au 金	Hg 汞	Tl 铊	Pb 铅	Bi 铋	Po 钋		Th 钍	U 铀	Np 镎	Pu 钚	Am 镅	
电阻率 $\rho(0^{\circ}\text{C})$ $/10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}$	2.065	94.07	15 ~ 18.1	18.8	106.8	$42\pm10(\alpha)$ $44\pm10(\beta)$		19.1	29.0	145 (20°C)	145 (28°C)	145	

6.2 电阻的测量方法

6.2.1 伏安法测量电阻

伏安法是利用电流计和电压表测量电阻的方法。常用的方法有直接读数法和指针欧姆计法。

(1) 直接读数法 直接读数法是指按电流表和电压表的读数直接测量电阻的方法。该法测量电阻因为电流计所量得电流并非全部通过试样，而是通过试样及电压表的电流和，所以当电压表的内阻比试样电阻大很多时，计算出的电阻才接近真值。

(2) 指针欧姆计法 指针欧姆计法是指用伏安计测电阻的方法，其原理电路如图 6-1 所示。

设计时已规定其电源电压 E 为定值，故可省去电压表，属于电流表内接电路。待测电阻 R_x 与其上电流 I_x 的关系（略去 E 的内阻）：

$$I_x = \frac{E}{R_i + R_x} \quad (6-5)$$

式中 I_x ——电流，单位为 A；

R_i ——欧姆计的内阻，单位为 Ω ，由表头内阻和串联在欧姆计内部的电阻组成；

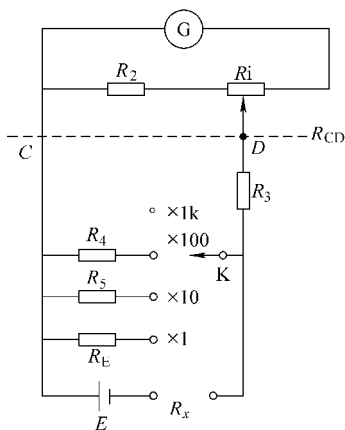
R_x ——待测电阻，单位为 Ω ；

E ——电源电压，单位为 V。

利用式 (6-5) 在 E 和 R_i 为定值的条件下，图 6-1 串联欧姆计的实际电路在表头的表盘上不同偏转 I_x 处刻出相应的 R_x (Ω 值)，即做成串联欧姆计。

6.2.2 数字万用表法测量电阻

数字万用表亦称为数字多用表 (DMM)，它是在直流数字电压表的基础上扩展而成。为了测量交直流电压、交直流电流和电阻，需要给数字万用表增加交流直流转换器，将被测电量转换成电压信号。数字万用表具有很高的灵敏度和精度，且显示直观，功能齐全，使用方便，读数快，可实现多参数、多路自动检测、打印记录和联机监控，目前已广泛使用数字表代替指针式仪表。数字万用表大致可分为：由单片 CMOS 双积分式 A/D 转换器构成的 $3\frac{1}{2}$ 位或 $4\frac{1}{2}$ 位数字万用表和 $5\frac{1}{2}$ ~ $8\frac{1}{2}$ 位



的智能数字万用表（带 USB 接口，可与计算机连接）。

8500A 型数字万用表的原理框图如图 6-2 所示。

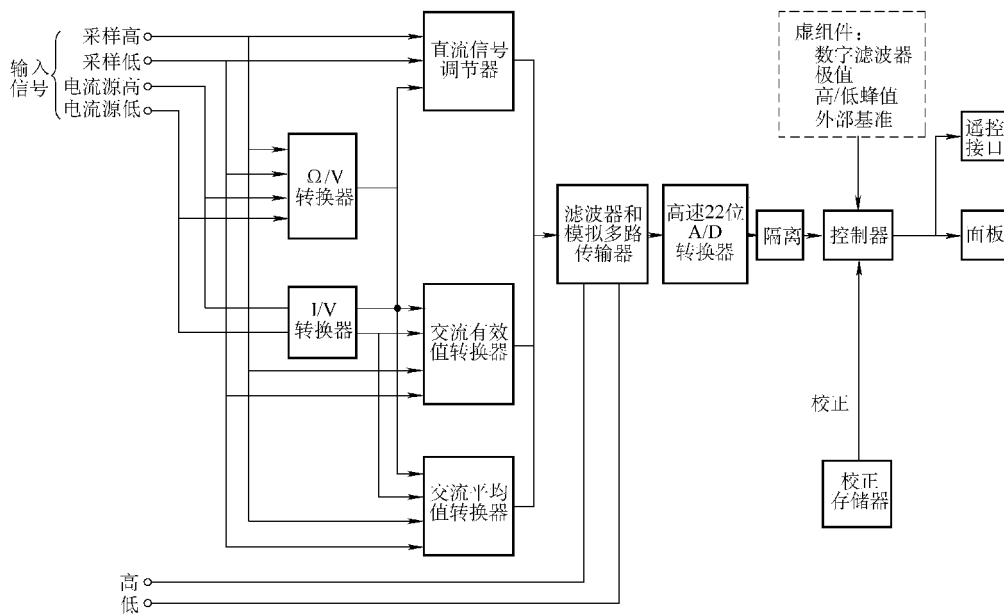


图 6-2 8500A 型数字万用表的原理框图

8500A 型数字万用表包括三种模拟功能组件、三种模拟转换组件、四种数字式组件以及带微处理器的控制器组件。每种组件都能执行一种功能，且组件（硬件）与具有智能的控制器配合，还可形成一种“虚组体”，使功能进一步扩展。虚组体的功能包括数字滤波、设定限值、高/低峰值检测和外部基准测量等。利用 Ω/V 转换器、I/V 转换器和交流有效值、平均值转换器，分别把被测电阻、电流和交流电压转换成直流电压。高速 22 位 A/D 转换器用来完成模拟量—数字量的转换。8500A 型数字万用表采用 8080A 微处理器，属于 8 位并行的 CPU。8080A 与程序存储器（只读存储器 ROM），读写存储器（随机存储器 RAM）配合使用。由于使用了微处理器，8500A 型数字万用表具有自动校准功能。

6.2.3 惠斯顿电桥法测量电阻

惠斯顿电桥法适用于测量中阻值范围的电阻（ $10^2 \sim 10^6 \Omega$ ），惠斯顿电桥的原理如图 6-3 所示。

这是一个经典的桥式测量电路，由连接成封闭环式的四个电阻组成了桥的四臂，两个对角线 ac 、 bd 支路分别为工作电源 U 支路 and 平衡指零仪（检流计 $\odot$ ）支路。其中 $R_x(R_3)$ 为未知的待测电阻（称未知臂）， $R_N(R_4)$ 为已知的标准电阻（称

比较臂)。 R_1 、 R_2 也是已知的可调电阻（分别称为测量臂和比例臂）。当调节这些已知电阻达某一值时，可使检流计⑥中的电流 $I_g = 0$ （此时称为电桥平衡状态），由此知 $V_b = V_d$ ， $I_1 = I_2$ ， $I_3 = I_4$ ，故有：

$$U_{ab} = I_3 R_x = U_{ad} = I_1 R_1$$

$$U_{bc} = I_4 R_N = U_{dc} = I_2 R_2$$

因等式两边的比值仍然相等，故可得：

$$\frac{R_x}{R_N} = \frac{R_1}{R_2} \text{ 或 } R_x = R_N \frac{R_1}{R_2} \quad (6-6)$$

由式 (6-6) 可知，当电桥平衡时，只要 R_N 、 R_1 及 R_2 是已知或可测知的，则待测电阻 R_x 便可求得。将上式两边取对数并微分可得：

$$\frac{dR_x}{R_x} = \frac{dR_N}{R_N} + \frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2}$$

可见，电桥测量的相对误差取决于各已知电阻的相对误差。为减小误差提高测量精度，通常在测量时应选择一个与待测电阻 R_x 有着同一数量级的标准电阻 R_N 。另外，桥路分析表明，当电桥的四个电阻接近相等时，桥路灵敏度将接近最大值。

必须指出的是单电桥测量的电阻中不但包括了待测电阻本身，还包括了连接导线的电阻和各接点的接触电阻等附加电阻。当待测电阻足够大（不小于 100Ω ）时，则连线电阻和接触电阻尚可忽略不计，测量还可相当精确。但当待测电阻较小时，尤其是当它的数量级接近于附加电阻时，将出现不允许的测量误差。所以，单电桥只适合于测量 $10^2 \sim 10^6 \Omega$ 的中值电阻，而对于小电阻的测量应采用能够克服或清除附加电阻影响的开尔文电桥法或直流电位差计法。

6.2.4 开尔文电桥法测量电阻

开尔文电桥测量原理如图 6-4 所示，图中 E 为直流电源，通常采用蓄电池组，它供给测量电路电流，电流表 A 用来测量电路中的工作电流， R 是用于调节电流的可变电阻，⑥是镜式检流计， K 是开关。假设 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 及 r 代表各段引线电阻； R_1 、 R_2 、 R_3 及 R_4 为可调电阻； R_N 为标准电阻， R_x 为待测电阻。

在电桥设计中，取 $R_1/R_2 = R_3/R_4$ ，并将这些电阻值设计得较大，而一方面将 r_1 、 r_2 、 r_3 及 r_4 设计得足够小，能得到电路近似

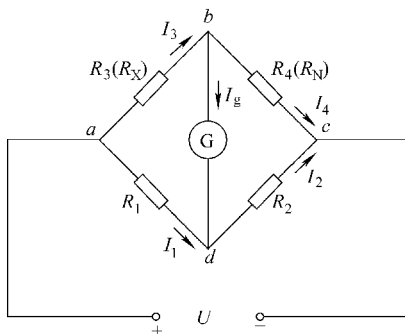


图 6-3 惠斯顿电桥电路原理

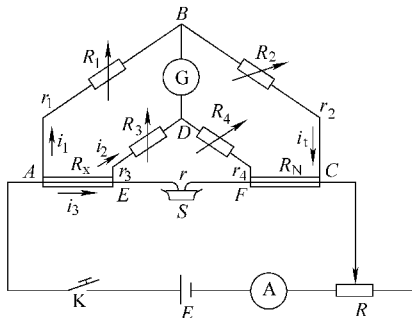


图 6-4 开尔文电桥测量原理图

式:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_N$$

式中 R_x ——待测电阻的阻值, 单位为 Ω ;

R_1 、 R_2 ——可调电阻的阻值, 单位为 Ω ;

R_N ——标准电阻的阻值, 单位为 Ω 。

当检流计Ⓒ指零时, 可从开尔文电桥上直接读出 R_1 及 R_2 , 而 R_N 为已知, 由上式可直接求出 R_x 值。这种方法测量电阻具有较高的精确度, 其精度与 R_N 的精度及 R_1/R_2 是否与 R_3/R_4 精确度相等有关, 也与检流计Ⓒ的灵敏度及电路中的电流大小有关。在一般情况下, 当采用灵敏度为 10^{-9} A 的检流计时, 开尔文电桥可测 $10^{-6} \sim 10^2 \Omega$ 的电阻, 能读出四位有效数, 测量精度为 0.05%。

开尔文电桥测量精度较高, 原因如下:

1) 检流计不直接与试样相连, 而是通过连接线和比接触电阻大得多的电阻与试样相连, 电桥平衡是利用四个较高的电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 及 R_4 来实现, 由于这些电阻阻值很高, 所以通过它们的电流就很小, 这样在 ABC 和 EDF 回路中的接线与接触电阻对 B 、 D 点电位的影响可忽略不计。

2) 标准电阻 R_N 和被测电阻 R_x 的值都很小, 当共组成一回路时, 通过的电流就很大, 因此 R_x 的微小变化都将显著地影响 B 、 D 点的电位, 即开尔文电桥对 R_x 的微小变化很敏感。

3) R_N 及 R_x 都采用合理的电位及电流接头, 在测量范围内不包括接触电阻, 因此接触电阻对 R_x 的值无影响, 这是惠斯顿电桥做不到的。

可以把惠斯顿电桥和开尔文电桥合二为一, 做成一个单、双臂两用电桥, 如国产的 QJ36 型单、双两用电桥, 通过不同的接法, 它既可以用作惠斯顿电桥测量 $10^2 \sim 10^6 \Omega$ 的中值电阻, 又可用作开尔文电桥测量 $10^{-6} \sim 10^2 \Omega$ 的低值电阻, 其精度可达 0.02 级。

6.2.5 四探针法测量电阻

四探针法是用四根金属探针与试样表面接触来测定电阻的方法, 原理如图 6-5 所示。

图 6-5 中 1、2、3、4 是四根金属探针 (一般用金属钨丝腐蚀而成), 排列在一条直线上, 要求四根探针同时与样品表面良好接触, 1、4 探针用来通电流, 当有电流通过时试样内部各点产生电位差。2、3 探针用来测量 2、3 点的电位差。根据 1、4 探针间的电流 I 和 2、3 探针间的电位差 U , 可直接用下式求出电阻率:

$$\rho = C \frac{U}{I}$$

式中 ρ ——电阻率, 单位为 $\Omega \cdot \text{m}$;

U ——2、3 探针间的电位差, 单位为 V;

I ——1、4 探针间的电流, 单位为 A;

C ——与被测试样的几何尺寸及探针间距有关的系数。

当试样几何尺寸比探针间距大许多倍时, 按下式计算电阻率:

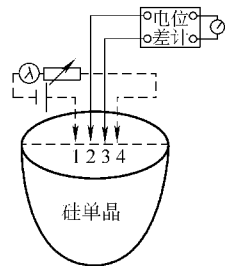
$$\rho = 2\pi S \frac{U}{I} \quad (6-7)$$

式中 ρ ——电阻率, 单位为 $\Omega \cdot \text{m}$;

U ——2、3 探针间的电位差, 单位为 V;

I ——1、4 探针间的电流, 单位为 A;

S ——等距离四探针的间距, 单位为 mm。



这种方法可测定导体、半导体试样的电阻率, 一般把导体视为半无限大物体。探针极尖, 而且间距足够小 (通常为 1mm), 以便保证导体的各个边界与探针的距离远大于探针间距。

图 6-5 四探针电阻测量方法原理图

用四探针法测量电阻率时, 适当选择电流也很重要。如果电流过大, 会使试样局部发热, 从而影响电阻测量结果。

6.3 常用金属材料电阻参数的测量方法

6.3.1 金属材料电阻率的测量方法

1. 试样的制备

1) 试样应无接头, 试样表面应无裂纹和缺陷。横向尺寸为 1mm 及以上的试样用肉眼检查, 小于 1mm 的试样用 20 倍放大镜检查。试样表面, 特别是在与电流和电位接头接触的表面上, 应基本无斑疤、灰尘和油污。必要时, 在测量试样尺寸之前应清洗干净。

2) 试样为截面大致均匀的任何形状的杆材、线材、带材、棒材或管材等, 其表面应光滑。沿试样标距长度以相等间距分 5 次或更多次测量横截面, 所测得的横截面积, 其相对标准偏差在基准试验时应不超过 1%, 常规试验时应不超过 2%。

3) 测定单位长度的质量时, 试样的两端应呈平面且垂直于纵轴, 试样表面应无毛刺、飞边和弧边 (锯齿状边)。

4) 从大块材料中截取的试样, 在制备试样时应注意防止材料性能发生明显的变化。塑性变形会使材料加工变硬, 电阻率增加; 加热会使材料退火, 电阻率减小。

5) 必要时, 基准试验用试样应按下述方法制备: 试样经酸洗并加工至标称直

径，2mm；去油污；在 500 ~ 550℃ 保护性气氛中退火 30min，然后在同一保护气氛中快速冷却或在空气中快速转移到水中冷却。

2. 试验要求

(1) 测量温度 整个测量应在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 下进行，并且在测定过程中保持温度稳定。生产检验允许在 10 ~ 35℃ 中进行。

(2) 测量误差 各项测量误差的极限值应符合表 6-5 的规定。

表 6-5 各项测量误差的极限值

参 数	仲裁检验(%)	生产检验(%)
长度	± 0.05	± 0.10
电阻	± 0.15	± 0.30
截面积	± 0.15	± 0.50
已知试样密度时		
空气中的质量	± 0.05	± 0.10
试样长度	± 0.05	± 0.20
试样密度	± 0.12	± 0.45
使用流体称重时		
空气中的质量	$\pm 0.04 \frac{d_L}{d_s}$	$\pm 0.30 \frac{d_L}{d_s}$
液体中的质量	$\pm 0.08 \frac{d_L}{d_s - d_L}$	$\pm 0.30 \frac{d_L}{d_s - d_L}$
液体密度	± 0.08	± 0.20
温度引起的总误差	± 0.06	± 0.25
温度控制	$\pm 0.04(0.1^\circ\text{C})$	$\pm 0.15(0.4^\circ\text{C})$
温度校准	± 0.04	± 0.15
总误差		
体积电阻率	± 0.25	± 0.65
质量电阻率	± 0.20	± 0.45
单位长度电阻	± 0.20	± 0.40

注：表中 d_L 是液体密度，单位为 kg/m^3 ； d_s 是试样密度，单位为 kg/m^3 。

(3) 电流的选择 在满足测量系统灵敏度要求的情况下，应尽量选择较小的测试电流，以免使试样发热，影响测量结果。当测试电流增加 40% 时，如果测出

的电阻平均增加 0.06%，则认为电流过大，测量无效，应选择更小的测试电流。

(4) 操作要求 闭合电流后，检流计上基本观察不到冲击，即达到平衡，方可读数。为了消除接触电势引起的测量误差，使电流正反换向一次，取两次读数的平均值。同一试样，应重复测量 5 次，取平均值作为最终结果。

3. 电阻的测量

1) 被测试样电阻为 10Ω 及以下（应不小于 $10\mu\Omega$ ）者应采用四点法；电阻大于 10Ω 者可采用两点法。

2) 电阻测量系统的总误差包括：标准电阻的校准误差、试样和标准电阻的比较误差、接触电势和热电势引起的误差、测量电流引起的试样发热误差。

3) 采用四点法测量（采用四端夹具）时，电位接触点应由相当锋利的刀刃构成，且刀刃要互相平行，均垂直于试样纵轴。接点也可以是锐利的针状接点。每个电位接点与相应的电流接点之间的距离应不小于试样横截面周长的 1.5 倍。

4) 采用四点法时，标准电阻和试样间的跨线电阻应明显地小于标准电阻和试样电阻，否则应采取适当的方法，如引线补偿等予以补偿使线圈和引线阻值比例达到足够的平衡，保证电桥的准确度符合规定的要求。

5) 应注意消除由于接触电势和热电势引起的测量误差。可采用电流换向法，读取一个正向读数和一个反向读数，取其算术平均值。也可以采用平衡点法（补偿法），检流计接入电路后，在电路不闭合的情况下调零。

4. 截面积的测量

(1) 计算法 简单截面的试样，其截面积可以合理地从线性截面尺寸计算得出。测定尺寸时应沿试样的计量长度以大约相等的间距至少测量五次，计算出算术平均值。平均值的标准偏差与平均值自身的比值应不超过 $\pm 15\%$ 。

1) 圆形截面试样，按下式计算截面积：

$$A(T) = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (6-8)$$

式中 $A(T)$ ——在试验温度 T 时试样的截面积，单位为 mm^2 ；

d ——试样直径平均值，单位为 mm 。

2) 扁线的截面试样，按下式计算截面积：

$$A(T) = \delta b - 0.858 r^2 \quad (6-9)$$

式中 $A(T)$ ——在试验温度 T 时试样的截面积，单位为 mm^2 ；

δ ——试样厚度平均值，单位为 mm ；

b ——试样宽度平均值，单位为 mm ；

r ——扁线圆角半径，单位为 mm 。

(2) 称重法 截面比较复杂的试样，当直接测量并计算出的截面积的误差不符合表 6-5 的规定时，截面积应采用称重法按下式确定：

$$A(T) = \frac{m}{l_2(T)\rho_s(T)} \times 10^3 \quad (6-10)$$

式中 $A(T)$ ——在试验温度 T 时试样的截面积, 单位为 mm^2 ;

m ——试样质量, 单位为 g ;

$l_2(T)$ ——试验温度 T 时的试样的总长, 单位为 m ;

$\rho_s(T)$ ——试验温度 T 时的试样密度, 单位为 kg/m^3 。

5. 质量的测量

应注意减小试样在空气中称重的误差, 校准后的实际质量可按下式计算:

$$m = \frac{m_A \rho_s (\rho_w - \rho_A)}{\rho_w (\rho_s - \rho_A)} \quad (6-11)$$

式中 m ——校准后的实际质量, 单位为 g ;

m_A ——在空气中测定的视在质量, 单位为 g ;

ρ_s ——试样密度, 单位为 kg/m^3 ;

ρ_w ——砝码密度, 单位为 kg/m^3 ;

ρ_A ——空气密度, 一般取 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 。

6. 密度的测量

1) 当不知试样密度或试样密度误差符合表 6-5 的规定时, 应在空气中和已知密度的液体中称重测定试样密度。可用试样直接测定, 也可用与试样密度相同的试件测定。所选择的空气和液体的试验温度应能使对流所引起的误差减小到最低限度。

2) 在液体中称重时, 液体温度的均匀性应保证液体密度的误差符合表 6-5 的规定。在液体中悬挂试样的挂线应尽可能地细, 称重时挂线的延长部分应浸入同一液体中, 以消除表面张力的影响。挂线直径超过 0.05mm 时, 应用直径为其两倍的挂线进行第二次称重, 两次称重的质量差应不超过试样在液体中视在质量的 $\pm 1\%$ 。用水作液体时, 应加入适量的浸润剂, 加入量按重量计应不超过 0.03% , 并注意在称重前基本去除试样表面的全部气泡。

3) 试样密度按下式计算:

$$\rho_s = \frac{m_A \rho_L(T) - m_L(T) \rho_A}{m_A - m_L(T)} \quad (6-12)$$

式中 ρ_s ——试样密度, 单位为 kg/m^3 ;

m_A ——在空气中测定的视在质量, 单位为 g ;

$\rho_L(T)$ ——试验温度 T 时的液体密度, 单位为 kg/m^3 ;

$m_L(T)$ ——在液体中测定的试样视在质量, 单位为 g ;

ρ_A ——空气密度, 一般取 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 。

7. 试验结果及计算

(1) 电阻计算 设试样的电阻与温度呈线性关系, 电阻按下式计算:

$$R_{20} = \frac{R(T)}{1 + \alpha_{20}(T - 20)} \quad (6-13)$$

式中 R_{20} ——20℃时试样的标长两端间的电阻, 单位为 Ω ;

$R(T)$ ——试验温度 T 时试样的标长两端间的电阻, 单位为 Ω ;

α_{20} ——20℃时试样的电阻温度因数。

(2) 单位长度电阻计算 标准温度 20℃时的单位长度电阻按下式计算:

$$R_{l20} = \frac{R_l(T)}{1 + (\alpha_{20} - \alpha_l)(T - 20)} \quad (6-14)$$

式中 R_{l20} ——20℃时单位长度电阻, 单位为 Ω/m ;

$R_l(T)$ ——试验温度 T 时试样单位长度电阻, 单位为 Ω/m ;

α_{20} ——20℃时试样的电阻温度因数;

T ——温度, 单位为℃;

α_l ——线胀系数, 单位为℃⁻¹。

(3) 体积电阻率计算 标准温度 20℃时的体积电阻率按下式计算:

$$\rho_{v20} = \frac{\rho_v(T)}{1 + (\alpha_{20} + \alpha_l)(T - 20)} \quad (6-15)$$

式中 ρ_{v20} ——20℃时试样的体积电阻率, 单位为 $\Omega \cdot \text{m}$;

$\rho_v(T)$ ——试验温度 T 时试样的体积电阻率, 单位为 $\Omega \cdot \text{m}$;

α_{20} ——20℃时试样的电阻温度因数;

T ——温度, 单位为℃;

α_l ——线胀系数, 单位为℃⁻¹。

(4) 质量电阻率计算 标准温度 20℃时的质量电阻率按下式计算:

$$\rho_{m20} = \frac{\rho_m(T)}{1 + (\alpha_{20} - 2\alpha_l)(T - 20)} \quad (6-16)$$

式中 ρ_{m20} ——20℃时试样的质量电阻率, 单位为 $\Omega \cdot \text{kg}/\text{m}^2$;

$\rho_m(T)$ ——试验温度 T 时试样的质量电阻率, 单位为 $\Omega \cdot \text{kg}/\text{m}^2$;

α_{20} ——20℃时试样的电阻温度因数;

T ——温度, 单位为℃;

α_l ——线胀系数, 单位为℃⁻¹。

(5) 线性尺寸和截面积计算 当测量试样总长度和截面积时的温度 T' 与测量电阻及标记试样长度时温度 T 不同时, 应按下面的公式进行换算。

$$\begin{aligned} l_2(T) &= l_2(T') [1 + \alpha_l(T - T')] \\ A(T) &= A(T') [1 + 2\alpha_l(T - T')] \end{aligned} \quad (6-17)$$

式中 $l_2(T)$ ——换算到温度 T 时的试样总长度, 单位为 m;

$A(T)$ ——换算到温度 T 时的试样截面积, 单位为 mm^2 ;

$l_2(T')$ ——试验温度 T' 时的试样总长度, 单位为 m;

$A(T')$ ——试验温度 T' 时的试样截面积, 单位为 mm^2 ;

α_l ——线胀系数, 单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

6.3.2 纯金属电阻率与剩余电阻比的涡流衰减测量方法

1. 测量原理

测量原理如图 6-6 所示。

试样处于初级线圈建立的磁场中, 当磁场撤除后, 试样内部感生涡流。涡流衰减的快慢取决于试样的几何尺寸及电阻率的大小。对圆柱状样品, 其涡流衰减时间常数与电阻率的关系为:

$$\rho = 2.17 \times 10^{-7} r^2 / \tau \quad (6-18)$$

式中 ρ ——试样电阻率, 单位为 Ω

· m;

r ——被测区域试样半径, 单位为 m;

τ ——试样涡流衰减时间常数, 单位为 s。

由记录的涡流衰减信号可确定试样的涡流衰减时间常数, 从而计算出试样的电阻率值。

2. 试样的制备

1) 试样制成圆柱状, 其直径的测量结果应具有不少于两位的有效数字。

2) 试样的长度与直径之比不小于 8。

3. 测量设备

(1) 探测系统 初级线圈产生的磁场应有足够的强度以保证测量信号具有较高的信噪比, 同时应避免试样的磁阻效应对测量结果的影响。对高纯无氧铜和高纯铝的测量, 初级线圈的磁场强度在 1.2K 时为 0.03T, 在 273.15K 时为 0.01T。探测线圈应根据待测试样的温度和电阻率范围选择适当的匝数。高纯无氧铜在 273.15K 附近测量时选 200 匝左右, 在液氦温区测量时选 1000 匝左右。对其他纯金属试样, 探测线圈的匝数应能保证输出的涡流衰减信号有足够的强度。探测线圈

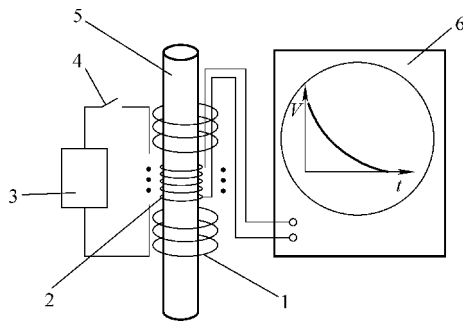


图 6-6 涡流衰减法测量试样电阻率原理图

1—初级线圈 2—探测线圈 3—电源 4—开关
5—试样 6—记录仪

系统无试样置入时,测得的衰减信号的衰减时间常数 τ_0 应比待测试样的涡流衰减时间常数 τ 至少小一个数量级。

(2) 测量系统 电源的直流输出能力应满足初级线圈产生最大磁场强度的要求。开关的断开时间应比待测试样的涡流衰减时间常数至少小一个数量级。放大器应有足够的放大倍数使记录仪输入端的信号强度与记录仪的分辨能力相匹配。放大器的频宽应为待测试样涡流衰减信号频宽的1~2倍。记录仪应有足够快的工作速度以适合于记录快速衰减的涡流信号。

4. 测量步骤

(1) 校准 根据待测试样电阻率的范围,选择两个具有相应标准值的标准样品进行校准。将一个标准样品作为待测试样进行测量,调节测试系统使测量结果与标准值的偏差在允许误差范围内,并尽可能与标准值一致。将另一个标准样品再作为待测试样进行测量,测量结果与标准值的偏差应在允许误差范围内。若标准样品的测量值与标准值的偏差超过允许误差范围,应检查探测系统的设置及测量系统的工作状况和测量步骤,找出原因后重做,直至偏差不超出误差允许范围为止。

(2) 操作步骤 按下述步骤进行测量:

1) 开机预热 30min。

2) 将试样置于探测线圈内,并使其处于所要求的温度环境中恒温 5min。测量过程中应避免试样温度波动。

3) 接通初级线圈回路开关建立磁场,稳定时间应大于 1s。

4) 断开初级线圈回路开关,记录仪记录下探测线圈两端输出的涡流衰减信号。

5) 消除系统零点漂移值:①每次测试前记录下放大器输出端的零点漂移值;②数据点值为涡流衰减信号的测量值减零点漂移值。

5. 测试结果的计算

1) 数据点不应在涡流衰减信号起始至 1τ 的时间范围内选取。

2) 数据点的取点时间范围应不大于 2τ ,取点数不得少于3个。

3) 计算试样低温电阻率及剩余电阻比时,试样直径大小应根据材料热膨胀系数对室温下的测量值进行修正。

4) 试样电阻率按下式计算:

$$\rho = 2.17 \times 10^{-7} \tau^2 / \bar{\tau}$$

式中 τ ——试样涡流衰减时间常数,单位为 s;

$\bar{\tau}$ ——由选取的数据点计算出的平均涡流衰减时间常数,单位为 s,按下式计算:

$$\bar{\tau} = \sum_{i=1}^n \tau_i / n$$

式中 n ——相邻数据点对的个数；

τ ——由一对相邻数据点 V_i 、 V_{i+1} 决定的涡流衰减信号的衰减时间常数，单位为 s；

τ_i ——瞬时涡流衰减信号的衰减时间常数，单位为 s，按下式计算：

$$\tau_i = \Delta t_i / (\ln V_i - \ln V_{i+1})$$

式中 Δt_i ——相邻数据点的时间间隔，单位为 s；

V_i 、 V_{i+1} ——衰减信号值，单位为 eV。

5) 试样的剩余电阻比按下式计算：

$$R \cdot R \cdot R = \rho_{273.15K} / \rho_{4.2K} \quad (6-19)$$

式中 $R \cdot R \cdot R$ ——剩余电阻比；

$\rho_{273.15K}$ ——试样冰点电阻率，单位为 $\Omega \cdot m$ ；

$\rho_{4.2K}$ ——试样液氦温度电阻率，单位为 $\Omega \cdot m$ 。

6.3.3 贵金属及其合金材料质量电阻系数的测量方法

1. 试样的制备

1) 试样可为线、棒、带、板材中的任何一种，其表面应光滑、平直，横截面应均匀，横截面积应不小于 $0.6mm^2$ 。

2) 试样测量长度一般不小于 200mm，其电阻不小于 $10\mu\Omega$ ，其他尺寸要与仪器的测量范围相适应。

3) 如果试样是从大块材料上切下来的，加工制备时应不改变其原始状态和性能。

4) 试样表面不应有肉眼（或 20 倍放大镜观察）可见的裂纹、毛刺及氧化层。

5) 测量部分不得有搭接或焊口。

2. 测量环境

环境温度应控制在 $15 \sim 25^\circ C$ 内，相对湿度应满足电学仪器要求。测量前试样应清洗干净，并放入测量室充分均温。

3. 电阻的测量

1) 根据试样估计电阻，选择合适的电桥或电位差计。对电阻小于 1Ω 的大截面试样推荐使用电位差计测量。参考基准电阻应和试样电阻具有相同的数量级。

2) 采用电桥测量时，其轭电阻（即参考基准电阻与试样之间连线的电阻）应远小于试样电阻，通常不得大于试样电阻的 0.1%。

3) 为消除或降低接触电势和热电势所引起的误差，应分别在正反电流方向下进行测量，取其读数的平均值。

4) 为使测量电流引起的试样温度升高不超过要求，要用试验的方法确定合适的测量电流。先预选一个初始电流来测量电阻，然后将该电流增加 40% 再次测量。

如果测量结果超过低电流测量时的 0.06%，则应降低电流重新测量。最终选定的测量电流应在其增加 40% 时，测得的试样电阻增量不超过 0.06%。

5) 电阻测量误差应在 $\pm 0.01\%$ 以内。

4. 质量电阻系数的计算

质量电阻系数按下式计算：

$$\delta = \frac{mR}{L_1 L_2} \quad (6-20)$$

式中 δ ——质量电阻系数，单位为 $\Omega \cdot \text{g}/\text{m}^2$ ；

R ——试样测量长度的电阻，单位为 Ω ；

L_1 ——测量电阻的标距长度，单位为 m ；

L_2 ——测量所取试样长度，单位为 m ；

m ——试样质量，单位为 g 。

5. 温度修正

若需要给出试样在 20℃ 时的质量电阻系数或单位长度电阻，则必须考虑电阻和试样尺寸随温度的变化。对于贵金属材料， $(T - 20)$ 与温度系数误差的乘积应小于 0.03%。

1) 当试样电阻随温度呈线性变化时，电阻按下式修正：

$$R_{20} = R_T / [1 + \alpha(T - 20)]$$

式中 R_T ——在温度 T 时测得的试样电阻，单位为 Ω ；

α ——试样在 20℃ 附近的平均电阻温度系数，单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

R_{20} ——试样在 20℃ 时的电阻，单位为 Ω 。

2) 长度和横截面积分别按下式修正：

$$L_{20} = L_T / [1 + \alpha_l(T - 20)]$$

$$A_{20} = A(T) [1 + 2\alpha_l(T - 20)]$$

式中 L_T ——在温度 T 时测得的试样长度，单位为 mm ；

α_l ——试样在 20℃ 附近的线胀系数，单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

L_{20} ——试样在 20℃ 时的长度，单位为 mm ；

A_{20} ——试样在 20℃ 时的横截面积，单位为 mm^2 。

3) 质量电阻系数按下式修正：

$$\delta_{20} = \delta_T / [1 + (\alpha - 2\alpha_l) \times (T - 20)]$$

式中 δ_{20} ——温度在 20℃ 时试样的质量电阻系数，单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

δ_T ——温度在 T 时试样的质量电阻系数；

α ——试样在 20℃ 附近的平均电阻温度系数，单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

α_l ——试样在 20℃ 附近的线胀系数，单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

6.3.4 金属材料电阻温度特征参数的测量方法

1. 测量原理

测量原理是用电阻测量仪器检测作为温度函数的导电材料电阻的阻值，方法包括单、双臂电桥法、补偿法、数字欧姆计及其他等效的电阻测量装置法。

2. 试样的制备

(1) 取样 从被测材料的每一根连续长度中制取一个试样。

(2) 试样的尺寸与形状 试样的尺寸应满足实现电阻精密测量的需求。对于有绝缘层的丝状精密电阻合金试样，应绕成直径不小于 50mm 的空心圈；对于片状精密电阻合金试样，如果试样阻值不小于 0.01Ω ，可将试样制成 U 形。对于没有绝缘层的丝状试样，应将其绕在一个绝缘骨架上，注意不应因此在温度改变时，使试样发生附加形变。在缠绕过程中所用的张力不应太大，只要能保证将绝缘线绕成平滑的圈，或可保证使绕在绝缘骨架上的裸线圈间彼此不致相互接触即可。对于由高电阻率合金制成的细丝，可使用直丝状试样；在制样过程中应避免产生应变。

(3) 试样的连接 对于可以忽略引线电阻的高电阻试样，可用钎焊、熔焊或夹持的方法将铜导线与试样连接；这个铜接线端的电阻值应小于试样电阻的 0.02%。如果试样电阻小于 10Ω ，应以电流端与电位端分开的办法测量电阻。此时借助铜焊、软钎焊或熔焊的方法将两条铜线与试样每端的两个端头连接。设定端头位置时，应注意保证测得的电位差不包括连结处附近的电压降。对于片（带）材试样，其每个电流端的内侧与相邻电位端的距离应不小于试样宽度的两倍，端头应位于试样宽度的中部，可在图 6-7 所示的由试样切出的耳子上用焊接的方法制成端头。对于电热合金丝材试样，试样每端以焊接法连接的电位引线应与相邻电流引线的距离应不小于由两电位端所确定的、试样长度的 $1/10$ 。切出的耳子的一般长度为 12.7mm，宽度为 3.2mm；耳子切成后，应清除切口处的碎屑。在冲切之前，在耳子与试样的连接处用锐利的钻头在试样上钻两个小孔。

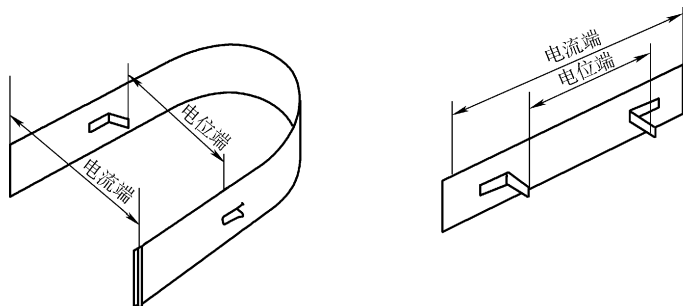


图 6-7 片材试样连接示意图

由细金属丝制成的线圈本身通常没有足够的刚性来支撑接线端,可用一段细玻璃杆或陶瓷杆穿入线圈,以作为线圈的支撑并固定试样连接端。当以惠斯顿电桥检测电热合金试样的电阻值时,要求所用引线由与试样同质的材料制成,其电阻值应不超过试样电阻值的1%。为避免因炉内、外温差造成的试样温度损失,无论采用何种电阻值测量方法,所用引线在炉子加热区内的长度均应不小于加热区最小横向尺寸的50倍。

(4) 试样的预处理 为得到稳定的电阻值,加工后的电阻合金试样须经稳定化处理;对于锰铜合金,机械加工之后应在 $(140 \pm 5)^\circ\text{C}$ 下连续保温48h,然后冷到室温。预处理后,将试样浸入硝酸溶液(质量分数为50%)蚀去铜膜,再在流动的水中彻底擦洗。

3. 试验用电流

1) 不要为使试样电阻或测量装置的示值产生可观的变化而选取过大的工作电流,以避免热效应的影响。

2) 对于丝状精密电阻合金试样,为确定合适的工作电流,将试样浸入其电阻值对温度变化相对敏感的液体槽内,保持选定的工作电流不变,直到试样的电阻值成为一常数;然后将此电流值增加40%并使其保持不变,直到试样电阻值再次成为一个常数;若上述两个电阻值的变化大于0.01%,则表明所选工作电流太大,应使其减小,直到经上述检验后电阻值的变化达到要求为止。

3) 对于片(带)状精密电阻合金试样,要求应能保证使其裸表面上的功率损失不超过 $0.003\text{W}/\text{cm}^2$ 。工作电流的确定方法与丝状试样相同,但限定前、后两个电阻值的变化不得大于0.001%。

4) 对于电热合金试样,采用上述试验检查方法时,电阻值变化的限定值为0.1%;对于镍-铬合金试样,应在 400°C 下进行试验。

5) 可用算法确定电热合金材料试验用电流:若流经试样的电流在试样的有效自由表面上的功率损失小于 $0.01\text{W}/\text{cm}^2$,则试验用电流大小对电阻测量的影响可以忽略。对于直条状试样以及相邻各圈间的距离大于试样截面最大横向尺寸5倍的圈绕或弯曲的试样,“自由表面”指的是试样两个电位端之间的表面面积。如果为了将试样置于炉中,而将试样绕成了相邻圈间的距离小于试样截面最大横向尺寸5倍的螺线、螺旋,或经前后弯折形成的折线状的拐折间距也具有上述特征时,“自由表面”指的是由绕、折试样形成的圆筒状或棱柱状的外轮廓表面。按下式完成测量电流功率损失的计算:

$$W = I^2 R_m$$

式中 W ——功率损失,单位为W;

I ——测量电流,单位为A;

R_m ——最高试验温度下的电阻值，单位为 Ω 。

4. 精密电阻合金电阻温度常数和平均电阻温度系数的检测

1) 将试样接到测量电路中，完全浸入恒温槽里；为检验试样电阻值的稳定性，先在基准温度（如 20°C 或 25°C ）下测量其初始值。将该恒温槽稍升温或将试样转移到另一个在所需的最高温度下进行保温的恒温槽中，待试样电阻值恒定后记下电阻测量仪读数和恒温槽的温度。

2) 借助冷却或转移恒温槽，使试样的温度下降到所需的下一个较低的温度，待试样电阻值恒定后，再次记录电阻值和温度。

3) 依此类推，在要求的温度范围内，在降温过程中，进行一系列电阻随温度变化的测定；所取测温间隔应约为整个温度范围的 10%。

4) 选取的温度测量点应有足够的数量；为得出电阻-温度关系式，应在 3 个温度下进行测量；如果试验未连续进行，则至少需要 5 个温度下的观测数据。

5) 连续测量过程中应经常注意电阻测量仪的温度。

5. 电热合金平均电阻温度系数的检测

将试样装入炉中，使炉温升至指定的最高温度，此后保温直至试样电阻值恒定为止。这里说的“恒定”不包括因氧化导致的电阻值变化。此后，以步进式降温程序将炉温降至室温，其步长应不大于 100°C 。在此过程中，应在每一“步”上对已稳定的温度和电阻值进行测量，记录每次读数的时间。要求每次读取的电阻值至少是由试验电流正、反向测得的一对电阻值的平均值。这种正反向测量可以有效地消除热电势的影响。

6. 电阻温度常数的计算

1) 电阻温度常数 α 、 β 及基准温度下的电阻值 R_0 由在 3 个有足够间隔的温度点上测得的 R_T 值确定；可将 3 组 R_T 及 T 值代入下式得到 3 个方程式，解此联立方程即可得到 R_0 、 α 和 β 值。

$$R_T = R_0 [1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2] \quad (6-21)$$

式中 R_T ——温度 T 下的电阻值，单位为 Ω ；

R_0 ——基准温度 T_0 下的电阻值，单位为 Ω ；

T ——试验测量温度，单位为 $^\circ\text{C}$ ；

T_0 ——基准温度，单位为 $^\circ\text{C}$ ；

α ——一次电阻温度常数，单位为 $^\circ\text{C}^{-1}$ ；

β ——二次电阻温度常数，单位为 $^\circ\text{C}^{-2}$ 。

2) 为简化计算，可从绘出的电阻和温度的关系曲线上直接读取 R_0 值，然后在曲线上选取两个附加点，其中的 T_1 应至少比基准温度 T_0 低 5°C ，第二个温度 T_2 应接近检测的最高温度，按下式计算电阻温度常数：

$$\begin{cases} \alpha = \frac{(R_2 - R_0) - K^2(R_1 - R_0)}{R_0 K(K+1)(\Delta T)^2} \\ \beta = \frac{K(R_1 - R_0) + (R_2 - R_0)}{R_0 K(K+1)(\Delta T)^2} \end{cases} \quad (6-22)$$

式中 α ——一次电阻温度常数, 单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

β ——二次电阻温度常数, 单位为 $^{\circ}\text{C}^{-2}$;

R_0 ——基准温度 T_0 下的电阻值, 单位为 Ω ;

R_1 ——温度 T_1 时的电阻值, 单位为 Ω ;

R_2 ——温度 T_2 时的电阻值, 单位为 Ω ;

K ——计算系数;

ΔT ——温度变化量, 单位为 $^{\circ}\text{C}$, 按下式计算:

$$K(T_0 - T_1) = T_2 - T_0 = K\Delta T$$

例如: 若取 T_1 比基准温度低 10°C , 为简化计算, T_2 的取值应依次比基准温度高 10°C 、 20°C 或 30°C , 此时则分别有 $K=1$ 、 2 或 3 。为计算方便, K 通常取整数。如 $K=1$, 则可简化为:

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{2R_0\Delta T}$$

$$\beta = \frac{R_1 + R_2 - 2R_0}{2R_0(\Delta T)^2}$$

7. 峰值温度或极限温度的计算

呈抛物线关系的电阻温度曲线的极大值 (峰值) 或极小值处对应的温度可按下式计算:

$$T_m = T_0 - \frac{\alpha}{2\beta}$$

式中 T_m ——峰值温度或极限温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$;

T_0 ——基准温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$;

α ——一次电阻温度常数, 单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

β ——二次电阻温度常数, 单位为 $^{\circ}\text{C}^{-2}$ 。

6.3.5 电线电缆导体直流电阻的测量方法

1. 试样

(1) 截取试样 从被测电线电缆上切取长度不小于 1m 的试样, 或以成盘 (圈) 的电线电缆作为试样。去除试样导体外表面绝缘护套或其他覆盖物, 也可以

只去除试样两端与测量系统相连接部位的覆盖物，露出导体。去除覆盖物时应小心进行，防止损伤导体。

(2) 拉直试样 如果需要将试样拉直，不应有任何导致试样导体横截面发生变化的扭曲，也不应导致试样导体伸长。

(3) 试样的表面处理 试样在接入测量系统前，应预先清洁其连接部位的导体表面，去除附着物、污秽和油垢。连接处表面的氧化层应尽可能除尽。如用试剂处理后，必须用水充分清洗以清除残留试剂。对于阻水型导体试样，应采用低熔点合金浇注。

(4) 大截面铝导体试样 试样导体截面积为 $95 \sim 185\text{mm}^2$ 时长为 3m；导体截面积为 $185 \sim 240\text{mm}^2$ 时长为 4m；导体截面积为 240mm^2 及以上时长为 5m。

(5) 电流端和电位端 铝绞线的电流引入端可采用铝压接头，并按常规压接方法压接，以使压接后的导体与接头融为一体。其电位电极可采用直径约 1.0mm 的软铜丝在绞线外紧密缠绕 1~2 圈后打结引出，以防松动。

2. 测量原理

1) 惠斯顿电桥的测量原理如图 6-8 所示。

2) 开尔文电桥的测量原理如图 6-9 所示。

3) 当被测电阻小于 1Ω 时，应采用专用的四端测量夹具进行接线。四端夹具的外侧为一对电流电极，内侧为一对电位电极。电位接触应由相当锋利的刀刃构成，且互相平行，均垂直于试样。每个电位接点与相应的电流接点之间的间距应不小于试样断面周长的 1.5 倍。

3. 试验步骤

1) 试样均温。试样应在温度为 $15 \sim 25^\circ\text{C}$ 和空气湿度不大于 85% 的试验环境中放置足够长的时间，在试样放置和试验过程中，环境温度的变化应不超过 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

2) 连接试样。采用惠斯顿电桥测量时，用两个专用夹头连接被测试样。采用开尔文电桥或其他电阻测试仪器测量时，用四端测量夹具或四个夹头连接被测试样。绞合导线的全部单线应可靠地与测量系统的电流夹头相连接。对于两芯及以上成品电线电缆试样，惠斯顿电桥两夹头或开尔文电桥的一对电位夹头应在长度测量的实际标线处与被测试样相连接。

3) 电阻测量误差。试验时电阻测量误差应不超过 $\pm 0.5\%$ 。

4) 测量试样长度。应在惠斯顿电桥的夹头或开尔文电桥的一对电位夹头之间的试样上测量试样长度，试验时长度测量误差应不超过 $\pm 0.15\%$ 。

5) 小电阻试样的电阻测量。当试样的电阻小于 0.1Ω 时，应注意消除由接触电势和热电势引起的测量误差。应采用电流换向法，读取一个正向读数和一个反向读数，取算术平均值；或采用平衡点法（补偿法），检流计接入电路后，在电路不闭合的情况下调零，直到闭合电路时检流计上基本观察不到冲击为止。

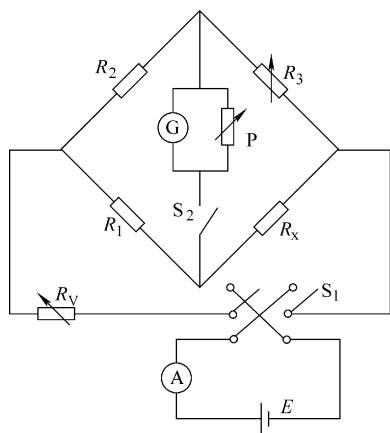


图 6-8 惠斯通电桥

Ⓐ—电流表 E—直流电源 Ⓔ—检流计
P—分流器 R_V —变阻器 R_1 、 R_2 、 R_3 —电
桥桥臂电阻 R_x —被测电阻 S_1 —开关
 S_2 —检流计开关

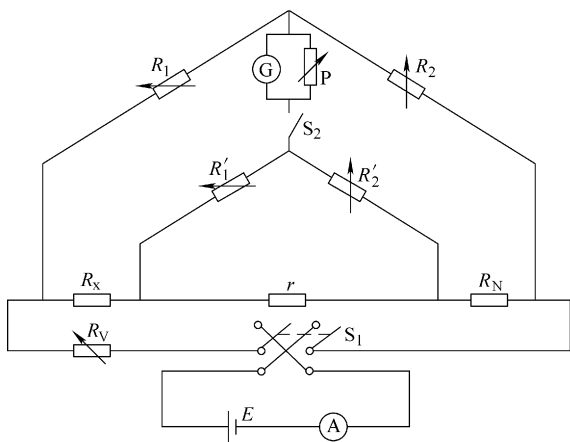


图 6-9 开尔文电桥

Ⓐ—电流表 E—直流电源 Ⓔ—检流计
P—分流器 R_N —标准电阻 R_V —变阻器
 R_1 、 R'_1 、 R_2 、 R'_2 —电桥桥臂电阻
 R_x —被测电阻 r —跨线电阻 S_1 —开关
 S_2 —检流计开关

6) 细微导体的电阻测量。对细微导体进行测量时，在满足试验系统灵敏度要求的情况下，应尽量选择最小的测试电流，以防止电流过大而引起导体升温。推荐采用电流密度，铝导体应不大于 0.5 A/mm^2 ，铜导体应不大于 1.0 A/mm^2 ，可用比例为 1:1.41 的两个测量电流分别测出试样的电阻值。如两者之差不超过 0.5%，则认为用比例为 1 的电流测量时，试样导体未发生温升变化。

4. 试验结果及计算

1) 型式试验时，温度为 20°C 的每千米长度电阻值按下式计算：

$$R_{20} = \frac{R_x}{1 + \alpha_{20}(T - 20)} \times \frac{1000}{L} \quad (6-23)$$

式中 R_{20} —— 20°C 时每千米长度电阻值，单位为 Ω/km ；

R_x ——温度为 T 时电缆实测电阻值，单位为 Ω ；

α_{20} ——导体在 20°C 附近时的平均电阻温度系数，单位为 $^\circ\text{C}^{-1}$ ；

T ——测量时导体的温度，单位为 $^\circ\text{C}$ ；

L ——试样的测量长度（成品电缆的长度），单位为 m 。

2) 例行试验时，温度为 20°C 的每千米长度电阻值应按下式计算：

$$R_{20} = R_x K_T \times \frac{1000}{L}$$

式中 K_T ——测量环境温度为 $T^\circ\text{C}$ 时的电阻温度校正系数，如表 6-6 所示。

表 6-6 在 $T^{\circ}\text{C}$ 时测量导体电阻校正到 20°C 时的温度校正系数 K_T

测量时环境温度 $T/^{\circ}\text{C}$	校正系数 K_T	测量时环境温度 $T/^{\circ}\text{C}$	校正系数 K_T
5	1.064	21	0.996
6	1.059	22	0.992
7	1.055	23	0.988
8	1.050	24	0.984
9	1.046	25	0.980
10	1.042	26	0.977
11	1.037	27	0.973
12	1.033	28	0.969
13	1.029	29	0.965
14	1.025	30	0.962
15	1.020	31	0.958
16	1.016	32	0.954
17	1.012	33	0.951
18	1.008	34	0.947
19	1.004	35	0.943
20	1.000		

6.3.6 电线电缆表面电阻率的测量方法

1. 试样

1) 从被测电线电缆上切取 3 根外观完整、表面无缺损的试样，试样的长度应不小于 250mm。

2) 用干净、不落屑、柔软、干燥、吸水的材料来回擦拭试样几次作清洁处理。对污染严重的试样，可用酒精擦拭，再做干燥处理。

3) 用直径不大于 0.05mm 的镀银圆铜线，在试样的中部以螺旋状缠绕两个电极，两电极的内侧相距 (50 ± 1) mm，每一电极的密绕圈数不得少于 10 圈。也可以采用宽度为 10mm 的清洁自粘性铜箔在试样上叠绕数圈，再用直径为 0.2 ~ 0.5mm 的圆铜线缠绕在铜箔上形成电极。

4) 用干净、不落屑、柔软、干燥、吸水的材料来回擦拭试样在电极之间的部分，作此清洁处理后试样在电极之间的部分应不再接触除环境空气以外的其他任何物质。

2. 测量设备

(1) 试验箱 表面电阻试验箱如图 6-10 所示，应为透明的玻璃或有机玻璃器

皿。箱体的尺寸应能保证试样不与箱体的任何一面相碰。箱盖和箱体应很好地密闭，以使空气的互换量最小。

引接线应采用高绝缘电阻电线（如聚四氟乙烯绝缘电线等）。无试样时，在规定的温度和相对湿度下，两引出线间的电阻至少比试样的表面电阻大 100 倍。试验箱在 20℃ 的环境中时箱内的相对湿度要保持在 $50\% \pm 5\%$ 。如试验箱同时放入几个试样，试样间的距离应不小于 25mm。试验箱内有一湿度计，可以从试验箱的外面测得箱内的相对湿度值。

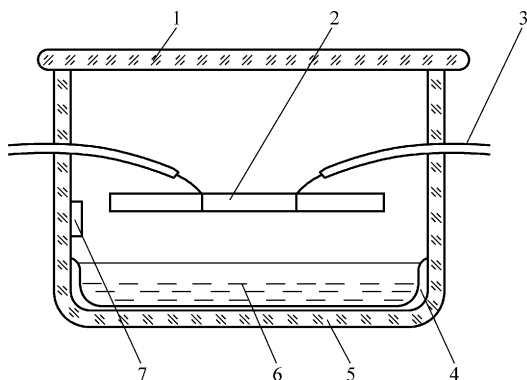


图 6-10 表面电阻试验箱示意图

1—箱盖 2—试样 3—引接线 4—搪瓷皿
5—箱体 6— $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 饱和水溶液 7—湿度计

(2) 测量系统 表面电阻的测试可以采用直流比较法或电压-电流

法，也可采用数字式测量仪器。无论采用何种方法，测试系统的测量误差应符合如下要求：

- 1) 被测试样绝缘电阻值小于等于 $1 \times 10^{10} \Omega$ 时，测量误差不超过 $\pm 10\%$ 。
- 2) 被测试样绝缘电阻值大于 $1 \times 10^{10} \Omega$ 时，测量误差不超过 $\pm 20\%$ 。

3. 试验步骤

- 1) 将试样放入试验箱中，试样的电极与引接线箱内一端相连。
- 2) 试验箱置于 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的环境下，箱内的相对湿度应为 $50\% \pm 5\%$ ，试样在此条件下至少放置 24h。

3) 将引接线的箱外一端与测量系统相接，测出试样电极中间部分的电阻值，测试用电压为 500V。为使表面电阻测量值基本稳定，充电时间应足够充分，不少于 1min，但不超过 5min。

4. 试验结果及计算

试样的表面电阻率按下式计算：

$$\rho_s = \frac{R\pi D^2}{4L} \quad (6-24)$$

式中 ρ_s ——表面电阻率，单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ ；

R ——表面电阻，单位为 Ω ；

D ——试样直径，单位为 mm；

L ——两电极内侧之间的距离，单位为 mm。

6.3.7 印制导线电阻的测量方法

1. 测量原理

采用四端法测电阻，直流稳流源输出一个足够小的恒定电流 I ，使电流经电流探针通过印制导线，从电压探针拾取电压 U ，根据欧姆定律，可获得导线电阻 R 。测试原理示意图如图 6-11 所示。

亦可采用供需双方认可的其他合适的测试方法，此时应注意避免由于测试夹具的接触电阻和测试电流使导线明显发热对测试准确度的影响。测试误差应不大于 5%。

2. 测试条件

测试应在下列正常试验大气条件下进行：

- 1) 温度为 15 ~ 35℃。
- 2) 相对湿度为 45% ~ 75%。
- 3) 大气压力为 86 ~ 106kPa。

3. 测试装置

- 1) 直流稳流源，量程为 1A，稳定度 $\leq \pm 0.01\%$ 。
- 2) 数字电压表，分辨力为 10 μ V，量程为 0 ~ 200mV，基本误差 $\leq 0.5\%$ 。

- 3) 直流电流表，量程 0 ~ 150mA，准确度 0.5 级。

4. 试样预处理

试样应是成品板，被指定的测试导线应尽可能地细长。如有必要，试样也可按生产工艺加工的试验板。当测试需要在按生产工艺加工的试验板上进行时，试验板应采用推荐的试验图形，其图形如图 6-12 所示。试样应不少于三个。测试前，试样应在正常试验大气条件下放置 24h 以上。

推荐的导线宽度如表 6-7 所示。

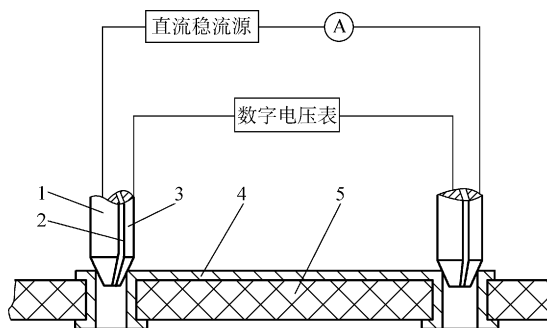


图 6-11 印制导线电阻测试原理示意图

1—电流探针 2—绝缘层 3—电压探针
4—印制导线 5—基材

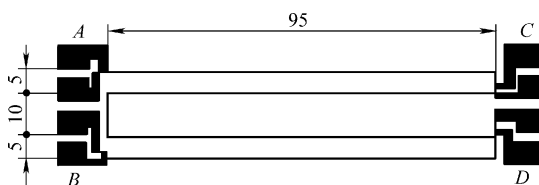


图 6-12 试验板推荐的试验图形

注：1. 图中的数字为被测导线中心线间的距离。

2. 图中包括一组长度不同的被测导线：A 与 C 或 B 与 D 两对电极间的被测导线长度均为 100mm；C 与 D 间为 200mm；A 与 D 或 B 与 C 间均为 300mm；A 与 B 间为 400mm。

表 6-7 推荐的导线宽度

宽度/mm	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00	1.20	1.50	2.00	2.50
-------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

测试示意图如图 6-13 所示。

5. 测试步骤

- 1) 校准数字电压表。
- 2) 连接测试电路。
- 3) 调节直流稳流源，至电流表读数不大于 0.1 A，记录电流值。

- 4) 测量并记录电压值。

6. 结果计算

根据公式 $R = \frac{V}{I}$ ，计算导线电阻值。

式中 R ——被测印制导线电阻，单位为 Ω ；

V ——探针拾取的电压，单位为 V；

I ——测试电流，单位为 A。



图 6-13 测试示意图

6.3.8 烧结金属材料和硬质合金电阻率的测定

烧结金属材料和硬质合金电阻率的测定方法有两种：一种是测量精度在 0.30% 以内的精确测量，适用于材料基本特性的精确测定；一种是测量精度较低的一般测量，适用于工业生产的质量控制。

1. 试样要求

- 1) 试样可以是棒、条或型材，要求试样截面均匀，截面积变化不超过 0.75%。

- 2) 试样测量长度内的电阻不小于 $10\mu\Omega$ 。

- 3) 对于精确测量，要求试样经无心研磨，其直径为 6.4mm，长度为 254mm。对于一般测量，要求试样电位触点间的距离不小于 12.70mm，且截面均匀。

- 4) 试样的直径、厚度、宽度或其他尺寸，应与选用仪器的测量范围相适应。

- 5) 试样表面没有裂纹或缺陷，并要除去表面的氧化皮、污物和油污。

- 6) 试样不允许存在搭接和焊口。

2. 测量仪器

- 1) 试样电阻小于 1Ω 时，用开尔文电桥或电位计。

- 2) 试样电阻大于等于 1Ω 时，用惠斯顿电桥。

3. 测量过程

1) 测量试样的所有尺寸及质量, 所用仪器的测量误差不大于 $\pm 0.05\%$ 。为了保证测量长度的测量精度, 电位接点应具有锐利的刀口; 与试样的电位触点接触时要加上适当的压力, 以保证接触稳定可靠。

2) 使用千分尺测量试样的截面积时, 每个尺寸要测量几次, 取其平均值, 尺寸变化不超过 0.10% 。如果尺寸小于 2.54mm , 测量精度达不到规定的精度要求, 这时试样的截面积通过测量试样的质量、密度和长度来确定。

3) 试样的密度未知时, 可按照 GB/T 3850—1983 《致密烧结金属材料与硬质合金密度测定方法》测定。

4) 使用开尔文电桥或电位计测量电阻时, 试样每个电位触点与相应的电流触点间的距离不小于试样截面周长的 1.5 倍。

5) 标准电阻与试样之间的接线电阻要显著小于标准电阻和试样电阻。

6) 测量电阻的精度为 $\pm 0.15\%$ 。为保证测量精度要求标准电阻和试样的温度与周围环境温度一致。因为在测量过程中, 测量电流使试样温度上升, 所以在不影响精度的情况下, 要求测量电流尽可能小, 并且在试样电阻未发生明显变化时尽快完成读数。

7) 为了消除接触电势的影响, 采用两次读数。测量电流正向和反向各读一次数。

4. 结果与计算

对于均匀截面的试样, 硬质合金的体积电阻率由下式确定:

$$\rho = RA/L \quad (6-25)$$

式中 ρ ——试样的体积电阻率, 单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$;

R ——试样测量长度内的电阻, 单位为 Ω ;

A ——试样的截面积, 单位为 cm^2 ;

L ——试样的测量长度, 单位为 cm 。

注: 试样的测量长度是指试样的两个电位触点间的距离。

5. 温度修正

测量电阻时往往与参考温度不一致, 这时电阻可用下式修正:

$$R_{T_0} = R_T / [1 + \alpha_{T_0} (T - T_0)] \quad (6-26)$$

式中 R_{T_0} ——参考温度 T_0 时试样电阻, 单位为 Ω ;

R_T ——温度为 T 时测得的试样电阻, 单位为 Ω ;

α_{T_0} ——参考温度 T_0 时试样的电阻温度系数, 单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

T ——进行电阻测量时的温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

试样的电阻温度系数未知时, 要求测量的环境温度为 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 。

6.3.9 铆钉型触头用线材电阻率的测量

1. 测量原理

其电阻率测量的基本原理是直流开尔文电桥原理。

2. 测量仪器

1) 测量仪器由准确度等级为0.2级以上的直流开尔文电桥及其附件或同等准确度等级的数字电阻测试仪组成。

2) 长度测量采用游标卡尺或直尺,其分度值应不大于0.5mm。

3) 线材直径测量采用千分尺,精度为0.01mm。

4) 测量线材电阻率的专用测量夹具如图6-14所示。两电位端之间的测量长度至少为300mm,电位端与其相邻的电流端之间的距离为50~100mm。

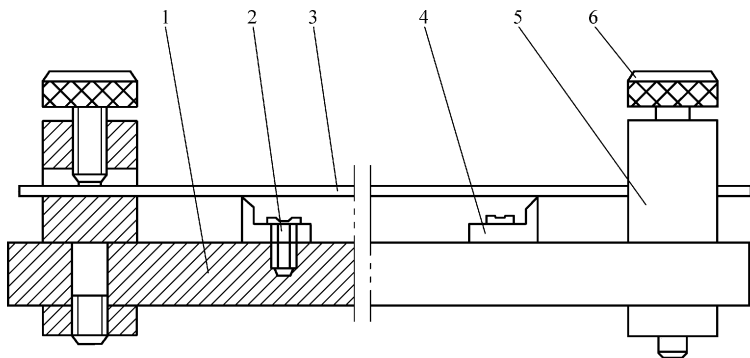


图 6-14 电阻率测量夹具示意图

1—底座 2—螺钉 3—试样 4—电位端子 5—电流端子 6—压紧螺钉

5) 参考基准电阻器与试样之间连接导线的电阻值应明显小于参考基准电阻器和试样的电阻值。

3. 试样要求

1) 线材的表面无裂纹或其他缺陷,光滑且无油污和氧化层。

2) 线材线径与其线径标称值之差最大值的绝对值与标称线径之比应不大于1%。

4. 测量方法

1) 测量时,线材线径测量采用千分尺测量,在试样的两端及中间处两相互垂直的方向上各测一次,取其算术平均值,再取三处测得横截面直径的平均值。

2) 仲裁测量时,试样的截面积由试样的质量、密度和长度来确定。密度测量按 JB/T 7780.1—2008《铆钉型触头用线材机械物理性能试验方法 第1部分:密度测量》进行。

3) 采用专用夹具测量试样长度时,要用游标卡尺反复校准夹具上相互平行的两电位端之间的距离。用直尺测量长度时,其测量误差应小于 0.2%。

4) 试样在夹具中固定后,应仔细检查测量电路是否准确无误,调整检流计零位后方可进行测量。

5) 测量时环境温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。

5. 结果与计算

体积电阻率由下式计算:

$$\rho = \frac{\pi d^2 R}{4L} \quad (6-27)$$

式中 ρ ——试样体积电阻率,单位为 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$;

R ——试样电阻值,单位为 $\mu\Omega$;

d ——线材直径,单位为 cm ;

L ——试样两电位端间的测量长度,单位为 cm 。

计算结果取三位有效数字。

6.3.10 铝箔直流电阻的测定

1. 方法原理

运用开尔文电桥测定室温电阻,通过计算给出铝箔 20°C 时的标准试样电阻值。

2. 试样要求

1) 测试试样长度为 250mm、宽为 25mm。应同时切取三条测试试样,并测量它们的实际宽度。每条测量次数不少于三次,取平均值 $\bar{X}$ 。

2) 根据电阻定律,标准试样的电阻应为测试试样电阻的 10 倍。

3. 测定步骤

1) 估计电阻值。依电阻定律估计测试试样的电阻值(如厚度 0.007mm 的纯铝箔,所取测试试样电阻值约为 0.04Ω)。

2) 测定室温电阻。将测试试样夹在夹具上,夹具两头固定,相距 0.25m,取比例桥臂为 10。记下开尔文电桥选择臂的示数(以测试试样的估计电阻值为参考进行微调) R_0 ,并记下当时的室温 T 。每条试样测量一次,取其平均值 $\bar{R}_0$ 。

4. 试验结果

1) 按下式计算测试试样 20°C 时的电阻:

$$R_x = \frac{R_N}{R_1} \times \bar{R}_0 \times X^* \times T^* \quad (6-28)$$

式中 R_x ——测试试样 20°C 时的电阻,单位为欧姆 (Ω);

R_N ——标准电阻值, $R_N = 0.001\Omega$;

R_1 ——比例桥臂电阻值, $R_1 = 10\Omega$;

$\bar{R}_0$ ——开尔文电桥选择臂的示数平均值, 单位为欧姆 (Ω);

X^* ——宽度修正系数, $X^* = \bar{X}/25$;

T^* ——温度修正系数, $T^* = 1 + \alpha(20 - T)$, 其中 α 为电阻温度系数, $\alpha = 0.004$ 。

2) 按下式计算标准试样 20℃ 时的电阻值:

$$\bar{R} = 10 \times R_x$$

式中 $\bar{R}$ ——标准试样 20℃ 时电阻值, 单位为 Ω ;

R_x ——测试试样 20℃ 时的电阻, 单位为 Ω 。

6.3.11 金属材料电阻应变灵敏系数的测量方法

1. 定义

电阻应变灵敏系数 K 是指在轴线方向拉伸应力作用下, 金属材料电阻的相对变化 $\frac{\Delta R}{R}$ 与应变 $\frac{\Delta L}{L}$ 的比值:

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad (6-29)$$

式中 L ——试样原始长度 (标距长度), 单位为 mm;

R ——试样的原始电阻, 单位为 Ω ;

ΔL ——试样长度的增量, 单位为 mm;

ΔR ——试样电阻的增量, 单位为 Ω 。

2. 方法原理

金属材料在拉伸时电阻值将发生改变。在弹性极限范围内电阻的相对变化随应变线性增加。因此, 精确测得电阻变化与应变, 即可求出电阻应变灵敏系数。

3. 试验仪器

应变-电阻测量装置如图 6-15 所示。用两个夹头夹持试样。一个夹头固定在钢结构架上。另一个夹头是可调的, 要装在限位槽导轨中, 顶端紧靠千分表。转动螺母即可拉伸试样, 并测量伸长。

(1) 应变测量装置 夹头由不锈钢或铜制成, 不得有油污和锈蚀, 且接触电阻小, 两夹头之间的标距不小于 200mm。应根据材料电阻率

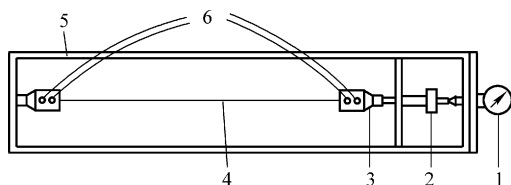


图 6-15 应变-电阻测量装置示意图

1—千分表 2—螺母 3—夹头 4—试样

5—框架 6—引线

来确定标距长度。在保证测量精度的前提下,也可用其他方法测量位移变化。

(2) 电阻测量仪器 两夹头端部分别焊接一对电流和电位引线。精度为 0.05 级的开尔文电桥,并附该电桥配套的仪器:①标准电阻一套,0.01 级;②旋转式精密电阻箱;③直流检流计;④稳压电源,稳定度不小于 $5 \times 10^{-6} \text{ V/h}$ 。

4. 试样要求

1) 在丝状、片状材料上,沿加工变形方向切取光滑、平整、无明显缺陷的样段。

2) 试样尺寸:丝材直径 0.03 ~ 0.30mm;片材的厚度为 0.02 ~ 0.30mm,宽度为 0.5 ~ 2.0mm。

3) 试样按预先给定的热处理制度进行处理。

5. 试验温度

试验温度为 10 ~ 30℃,对低电阻材料温度需保持恒定。

6. 试验步骤

1) 调整千分表零点。

2) 将试样平直地装在两夹头中,不得滑动,松弛。

3) 连接测试仪器。先通入一估计电流进行电阻测量,在原工作电流基础上增加 40%,观察其电阻变化,若其值小于测量所要求的精度,则原工作电流是合理的,否则应降低工作电流。

4) 将仪器预热一段时间后,测量试样的原始电阻值,要反复测量 3 次,取其算术平均值作为试样的原始电阻值。

5) 微微转动螺母拉伸试样,每间隔 0.05mm 或 0.10mm 拉伸 1 次。拉伸测量的时间间隔不宜过长,一般不超过 2min,从千分表上读出伸长的增量。

6) 调整电桥键盘,使电阻达到平衡,读出电阻值后即进行下次测量。

6.3.12 铈化钢单晶电阻率及霍尔系数的测量方法

本方法适用于长方体和薄片铈化钢单晶样品的电阻率和霍尔系数的测量。所采用的样品是从铈化钢单晶中切割制备的。该法在特定位置上施加电极接触,用直流方法测量样品的电阻率,适用于电阻率为 $10^{-3} \sim 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ 的铈化钢单晶样品。

1. 铈化钢单晶电阻率的测量原理

铈化钢单晶的电阻率可直接测量,它是在零磁场条件下测定的。电阻率的定义是材料中平行于电流的电位梯度与电流密度的比值。测量电阻率的原理电路如图 6-16 所示。

在长方体标准样品两端的电流电极 1、2 间加恒定的样品电流 I ,则样品侧面上的电极接触点 3、4 间产生电势电压 U_p ,若它们之间的连线平行于电流方向,那么电极接触所在处的电阻率为:

$$\rho = \frac{U_{\rho} b h}{I l} \quad (6-30)$$

式中 ρ ——样品电阻率, 单位为 $\Omega \cdot \text{m}$;
 U_{ρ} ——电导电压, 单位为 V;
 I ——样品电流, 单位为 A;
 b ——样品宽度, 单位为 m;
 h ——样品厚度, 单位为 m;
 l ——样品电极接触 3、4 间的距离, 单位为 m。

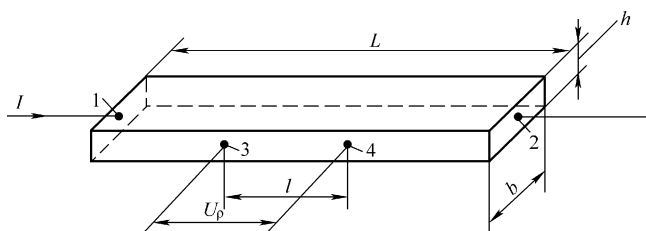


图 6-16 测量电阻率的原理

2. 铽化钢单晶霍尔系数的测量

铽化钢单晶材料的霍尔系数也是直接可测量的。当相互垂直的电场和磁场同时施加于长方体标准样品上时（见图 6-17），载流子向与电场和磁场均垂直的方向偏转，于是在样品两侧产生横向电位差，即霍尔电压，这种现象叫霍尔效应。霍尔系数的定义是横向霍尔电场的强度与样品电流的密度和磁通密度之积的比值。

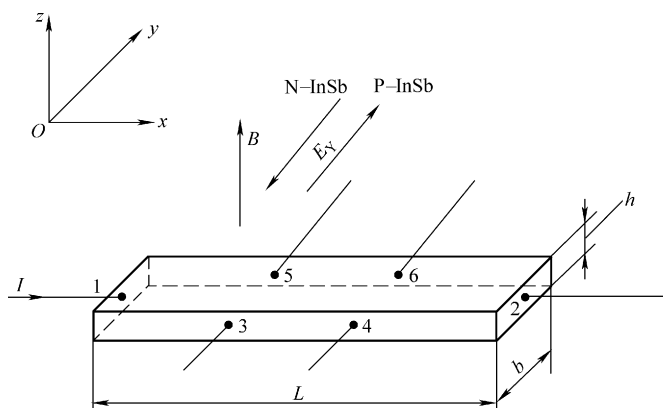


图 6-17 霍尔系数测量原理图

$$R_H = \frac{E_Y}{J_x \cdot B_x} \quad (6-31)$$

式中 R_H ——样品的霍尔系数, 单位为 m^3/C ;

E_Y ——霍尔电场的强度, 单位为 V/m ;

J_x ——样品电流的密度, 单位为 A/m^2 ;

B_x ——磁通密度, 单位为 T 。

对 N 型样品, 霍尔系数为负值; 对 P 型样品, 霍尔系数为正值。

已知样品电流 I (x 方向) 和磁通密度 B (z 方向), 若测出霍尔电位差 U_H (y 方向), 则可求出样品的霍尔系数 R_H :

$$R_H = \frac{U_H/b}{[I/(bh)]B} = \frac{U_H h}{IB} \quad (6-32)$$

式中 R_H ——样品的霍尔系数, 单位为 m^3/C ;

U_H ——霍尔电位差, 单位为 V ;

B ——磁通密度, 单位为 T ;

I ——样品电流, 单位为 A ;

b ——样品的霍尔电极间距, 即样品的宽度, 单位为 m ;

h ——样品的厚度, 单位为 m 。

3. 霍尔迁移率

霍尔系数的绝对值与电阻率的比值定义为霍尔迁移率:

$$\mu_H = \frac{|R_H|}{\rho} \quad (6-33)$$

式中 μ_H ——霍尔迁移率, 单位为 $\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$;

R_H ——样品的霍尔系数, 单位为 m^3/C ;

ρ ——样品的电阻率, 单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

4. 载流子浓度和载流子迁移率

锑化钢单晶在 77K 时具有单一载流子的非本征半导体, 霍尔因子为 1, 从测得的霍尔系数可计算样品的载流子浓度:

$$n = \frac{1}{R_H \cdot q} \quad (6-34)$$

式中 n ——样品的载流子浓度, 单位为 m^{-3} ;

R_H ——样品的霍尔系数, 单位为 m^3/C ;

q ——载流子电量, 单位为 C 。

载流子迁移率与霍尔迁移率相同:

$$\mu_n = \mu_H \quad (6-35)$$

式中 μ_n ——样品的载流子迁移率, 单位为 $\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$;

μ_H ——样品的霍尔迁移率, 单位为 $\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。

对 N 型锑化钢, 载流子为电子; 对 P 型锑化钢, 载流子为空穴。

5. 测量原理电路

1) 长方体标准样品的测试电路如图 6-18 所示。

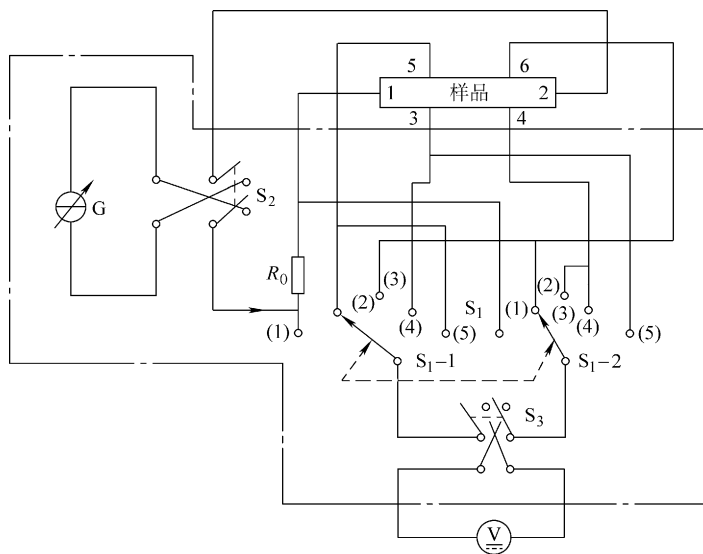


图 6-18 长方体标准样品的测试电路

S_1 —电极接触选择开关 S_2 —电流换向开关 S_3 —电压换向开关

R_0 —标准电阻 G —恒流源 V —电位差计检流计系统或者数字电压表

2) 薄片样品的测试电路如图 6-19 所示。

6. 测量仪器

(1) 磁铁 一个经过标定的磁铁, 磁通方向可反转, 并保证被测样品所在区域磁通密度的均匀性优于 $\pm 1\%$, 磁场的稳定性为 $\pm 1\%$ 。

(2) 测量磁通密度的仪器 要求测量磁通密度的仪器分辨率不低于 0.0001T , 测量误差小于 $\pm 1\%$ 。

(3) 恒流源 要求在测量过程中, 为样品提供稳定度优于 $\pm 0.5\%$ 的稳定电流。

(4) 标准电阻 具有和待测样品电阻同一数量级的标准电阻, 其精度为 $\pm 0.1\%$ 。

(5) 电压测量仪器 推荐使用高精度和高输入阻抗的数字电压表, 灵敏度为 $1\mu\text{V}$, 精度优于 $\pm 0.5\%$ 。

(6) 杜瓦瓶和样品架 要求杜瓦瓶和样品架均由非铁磁性物质制成, 不能因为它们的存在使样品所在位置磁通密度的变化超过 $\pm 0.1\%$ 。

(7) 霍尔效应测试仪 要求能实现有关仪表、样品和电极接触的转换, 控制样品电流、磁通密度的大小以及方向, 按一定程序测量各有关电压。

(8) 样品几何尺寸测量设备 样品的几何尺寸可用千分尺、外径千分尺和测距显微镜等测量, 精度不低于 $\pm 1\%$ 。

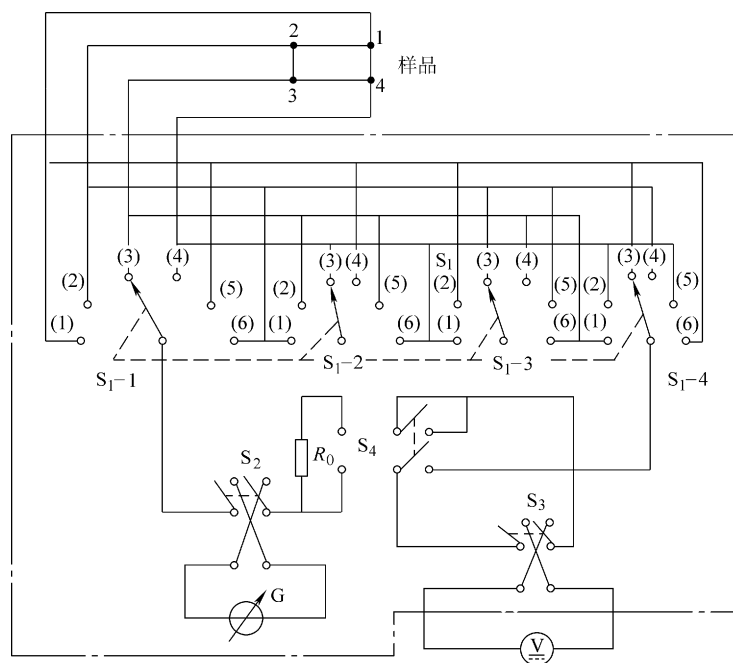


图 6-19 薄片样品的测试电路

S_1 —电极接触选择开关 S_2 —电流换向开关 S_3 —电压换向开关

S_4 —电压选择开关 R_0 —标准电阻 G —恒流源

V —电位差计检流计系统或者数字电压表

7. 测量条件

(1) 测量环境 测量环境没有强电磁场干扰, 保证测量系统能正常运行。

(2) 测试样品的几何形状 测试样品为六接触长方体标准样品 (见图 6-20) 或正方形薄片样品 (见图 6-21)。样品自锑化钢单晶锭切下, 经仔细研磨、去油, 并用去离子水冲洗。样品应形状规则, 表面平整, 无划痕, 无孔洞。

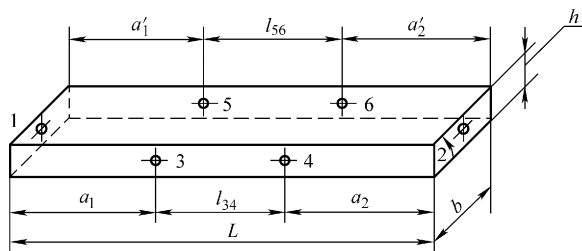


图 6-20 六接触长方体标准样品

注：1. $0\text{cm} \leq L \leq 1.5\text{cm}$ 且 $L \geq 5b$ ， $a_1, a_2 \geq 2b$ ， $a_1 \approx a_2$ ， $a_1 = a_1' \pm 0.005\text{cm}$ ， $a_2 = a_2' \pm 0.005\text{cm}$ ， $l_{34} = l_{56} \pm 0.005\text{cm}$ ， $h \leq 0.1\text{cm}$ 。1 和 2 为电流电极接触，3、4、5 和 6 为霍尔电极接触。要求样品相互垂直面的角度误差小于 $\pm 0.5^\circ$ ，平行边的长度与它们平均值之差小于 $\pm 1\%$ 。

(3) 样品的电极接触 所有的电极接触都应该是欧姆接触，一般用钢做电极接触。六接触长方体标准样品的两个端面为样品电流电极接触，应用金属钢涂满整个端面，而后焊接上电极引线，其余的电极接触应为宽度不大于 0.02cm 的条状钢电极，或者是直径小于 0.02cm 小钢球电极。对正方形薄片样品，电极接触应对称地分布在棱上，如果必须将电极接触做到相距厚度为 t 的两个平面之中的一个平面上，则应使电极接触尽量小且靠近样品边缘，通常分布在四个角上。

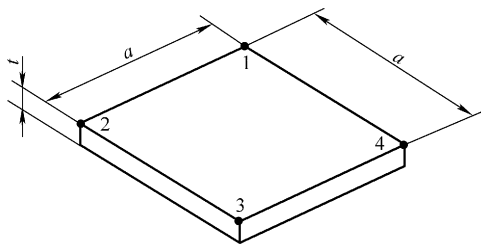


图 6-21 正方形薄片样品

注：样品的周长 $L(4a) \leq 1.5\text{cm}$ ，样品的厚度 $t \leq 0.1\text{cm}$

(4) 样品电流 要保证在测量过程中避免少数载流子的注入，在样品中产生的电场要小于 $1\text{V}/\text{cm}$ ，保证欧姆定律成立。

(5) 磁场 磁通密度的大小，应满足磁场条件：

$$\mu B \ll 10^4$$

式中 μ ——载流子迁移率，单位为 $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ；

B ——磁通密度，单位为 T 。

(6) 注意事项 为了避免光电导和光生伏特效应对电阻率测量的影响，对被测样品要加以光屏蔽。为了消除艾廷豪森效应以外的副效应的影响，可采用样品电流和磁场换向测量，对所测霍尔电压适当平均，而艾廷豪森效应引入的误差较小，特别是试样与它的周围有良好的热接触时更可忽略不计。测量时有时产生虚假的电

动势，如热电动势等，要仔细检查排除。

8. 样品安装

将待测样品焊接到样品架上，而后将样品架置于放有液氮的杜瓦瓶内，接入测试电路。选择合适的标准电阻，接通电路，调整好样品电流。

9. 电阻率的测量

1) 测量在零磁场和恒温条件下进行。

2) 六接触长方体标准样品的测量。在正向样品电流情况下，测量电极接触 3、4 间和 5、6 间的电压 $U_{34}(+I)$ 、 $U_{56}(+I)$ ，并测量标准电阻上的电压 $U_0(+I)$ 。

将样品电流反向，测量相应的电压 $U_{34}(-I)$ 、 $U_{56}(-I)$ 和 $U_0(-I)$ 。

3) 正方形薄片样品的测量。当电极接触 1 和 2 间、2 和 3 间、3 和 4 间及 4 和 1 间分别通以正向样品电流时，分别测量电极接触 4 和 3、1 和 4、2 和 1、3 和 2 以及标准电阻上的电压 $U_{43}(+I)$ 、 $U_{14}(+I)$ 、 $U_{21}(+I)$ 、 $U_{32}(+I)$ 和 $U_0(+I)$ 。

将样品电流反向，测出相应电压 $U_{43}(-I)$ 、 $U_{14}(-I)$ 、 $U_{21}(-I)$ 、 $U_{32}(-I)$ 和 $U_0(-I)$ 。

10. 霍尔系数的测量

1) 将处于液氮温度的样品置于稳定而均匀的磁场中，使样品表面与磁场方向垂直。

2) 六接触长方体标准样品的测量。改变样品电流和磁场的方向，分别测量霍尔电极接触 3、5 间和标准电阻上的电压：

$$U_{35}(+B, +I)、U_0(+B, +I); U_{35}(+B, -I)、U_0(+B, -I); U_{35}(-B, -I)、U_0(-B, -I); U_{35}(-B, +I)、U_0(-B, +I)。$$

同样，测量霍尔电极接触 4、6 间和标准电阻上的电压：

$$U_{46}(+B, +I)、U_0(+B, +I); U_{46}(+B, -I)、U_0(+B, -I); U_{46}(-B, -I)、U_0(-B, -I); U_{46}(-B, +I)、U_0(-B, +I)。$$

3) 正方形薄片样品的测量。电极接触 1、3 间加样品电流，测量电极接触 4、2 间及标准电阻上的电压：

$$U_{42}(+B, +I)、U_0(+B, +I); U_{42}(+B, -I)、U_0(+B, -I); U_{42}(-B, -I)、U_0(-B, -I); U_{42}(-B, +I)、U_0(-B, +I)。$$

电极接触 2、4 间加样品电流，测量电极接触 1、3 间和标准电阻上的电压：

$$U_{13}(+B, +I)、U_0(+B, +I); U_{13}(+B, -I)、U_0(+B, -I); U_{13}(-B, -I)、U_0(-B, -I); U_{13}(-B, +I)、U_0(-B, +I)。$$

11. 结果与计算

1) 六接触长方体标准样品电阻率按下式计算：

$$\begin{cases} \rho_{34} = \frac{1}{2} \left[\frac{U_{34}(+I)}{U_0(+I)} + \frac{U_{34}(-I)}{U_0(-I)} \right] \frac{R_0 b h}{l_{34}} \\ \rho_{56} = \frac{1}{2} \left[\frac{U_{56}(+I)}{U_0(+I)} + \frac{U_{56}(-I)}{U_0(-I)} \right] \frac{R_0 b h}{l_{56}} \end{cases} \quad (6-36)$$

式中

ρ_{34} ——电导电极接触3、4之间的电阻率，单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$ ；

ρ_{56} ——电导电极接触5、6之间的电阻率，单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$ ；

R_0 ——标准电阻，单位为 Ω ；

b ——样品的宽度，单位为 cm ；

h ——样品的厚度，单位为 cm ；

l_{34} ——电极接触3、4的间距，单位为 cm ；

l_{56} ——电极接触5、6的间距，单位为 cm ；

$U_{34}(+I)$ 、 $U_{34}(-I)$ ——电极接触3、4间的电导电压，单位为 μV ；

$U_{56}(+I)$ 、 $U_{56}(-I)$ ——电极接触5、6间的电导电压，单位为 μV ；

$U_0(+I)$ 、 $U_0(-I)$ ——标准电阻上的电压，单位为 μV 。

如果电阻率 ρ_{34} 和 ρ_{56} 之差与其平均值之比小于 $\pm 10\%$ ，则认为该样品均匀，可求出它的平均电阻率：

$$\rho = \frac{1}{2}(\rho_{34} + \rho_{56}) \quad (6-37)$$

式中 ρ ——样品的平均电阻率，单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$ ；

ρ_{34} 、 ρ_{56} ——计算的两个电阻率，单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$ 。

若电阻率 ρ_{34} 和 ρ_{56} 之差与其平均值之比超过 $\pm 10\%$ ，则认为该样品不均匀。

2) 六接触长方体标准样品霍尔系数的计算

$$\begin{cases} R_{\text{H}}^{35} = 2.50 \times 10^3 \left[\frac{U_{35}(+B, +I)}{U_0(+B, +I)} - \frac{U_{35}(+B, -I)}{U_0(+B, -I)} + \frac{U_{35}(-B, -I)}{U_0(-B, -I)} - \frac{U_{35}(-B, +I)}{U_0(-B, +I)} \right] \frac{R_0 h}{B} \\ R_{\text{H}}^{46} = 2.50 \times 10^3 \left[\frac{U_{46}(+B, +I)}{U_0(+B, +I)} - \frac{U_{46}(+B, -I)}{U_0(+B, -I)} + \frac{U_{46}(-B, -I)}{U_0(-B, -I)} - \frac{U_{46}(-B, +I)}{U_0(-B, +I)} \right] \frac{R_0 h}{B} \end{cases} \quad (6-38)$$

式中 R_{H}^{35} 、 R_{H}^{46} ——电极接触3、5间和电极接触4、6间的霍尔系数，单位为 cm^3/C ；

R_0 ——标准电阻，单位为 Ω ；

h ——样品厚度，单位为 cm ；

B ——磁通密度，单位为 T ；

$U_{35}(+B, +I)$ 、 $U_{35}(+B, -I)$ 、 $U_{35}(-B, -I)$ 、 $U_{35}(-B, +I)$ 、——电极接触3、

5 间的霍尔电压, 单位为 μV ;

$U_{46}(+B, +I)$ 、 $U_{46}(+B, -I)$ 、 $U_{46}(-B, -I)$ 、 $U_{46}(-B, +I)$ ——电极接触 4、6 间的霍尔电压, 单位为 μV ;

$U_0(+B, +I)$ 、 $U_0(+B, -I)$ 、 $U_0(-B, -I)$ 、 $U_0(-B, +I)$ ——标准电阻上的电压, 单位为 μV 。

若 R_{H}^{35} 与 R_{H}^{46} 之差与其平均值之比小于 $\pm 10\%$, 则认为样品均匀, 可求出样品的平均霍尔系数:

$$R_{\text{H}} = \frac{1}{2}(R_{\text{H}}^{35} + R_{\text{H}}^{46}) \quad (6-39)$$

式中 R_{H} ——样品的平均霍尔系数, 单位为 cm^3/C ;

R_{H}^{35} 、 R_{H}^{46} ——计算得到的两个霍尔系数, 单位为 cm^3/C 。

若 R_{H}^{35} 与 R_{H}^{46} 之差与其平均值之比超过 $\pm 10\%$, 则认为该样品不均匀。

3) 正方形薄片样品电阻率的计算:

$$\begin{cases} \rho_{\text{A}} = 1.1331 \times \left[\frac{U_{43}(+I) + U_{14}(+I)}{U_0(+I)} + \frac{U_{43}(-I) + U_{14}(-I)}{U_0(-I)} \right] R_0 f(Q_{\text{A}}) \\ \rho_{\text{B}} = 1.1331 \times \left[\frac{U_{21}(+I) + U_{32}(+I)}{U_0(+I)} + \frac{U_{21}(-I) + U_{32}(-I)}{U_0(-I)} \right] R_0 f(Q_{\text{B}}) \end{cases} \quad (6-40)$$

式中 ρ_{A} 、 ρ_{B} ——所测得的两个电阻率, 单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$;

R_0 ——标准电阻, 单位为 Ω ;

t ——样品厚度, 单位为 cm ;

$U_{43}(+I)$ 、 $U_{14}(+I)$ 、 $U_{43}(-I)$ 、 $U_{14}(-I)$ 、 $U_{21}(+I)$ 、 $U_{32}(+I)$ 、 $U_{21}(-I)$ 、 $U_{32}(-I)$ ——所测得的电导电压, 单位为 μV ;

$U_0(+I)$ 、 $U_0(-I)$ ——标准电阻上的电压, 单位为 μV ;

$f(Q_{\text{A}})$ 、 $f(Q_{\text{B}})$ —— Q_{A} 、 Q_{B} 的相关函数, 即范得堡修正函数。

$$\begin{cases} Q_{\text{A}} = \left[\frac{U_{43}(+I)}{U_0(+I)} + \frac{U_{43}(-I)}{U_0(-I)} \right] \div \left[\frac{U_{14}(+I)}{U_0(+I)} + \frac{U_{14}(-I)}{U_0(-I)} \right] \\ Q_{\text{B}} = \left[\frac{U_{21}(+I)}{U_0(+I)} + \frac{U_{21}(-I)}{U_0(-I)} \right] \div \left[\frac{U_{32}(+I)}{U_0(+I)} + \frac{U_{32}(-I)}{U_0(-I)} \right] \end{cases}$$

$f(Q)$ 与 Q 的关系是:

$$\frac{Q-1}{Q+1} = \frac{f(Q)}{0.693} \operatorname{arccosh} \left\{ \frac{1}{2} \exp \frac{0.693}{f(Q)} \right\}$$

图 6-22 为 $f(Q)$ 与 Q 的关系曲线，如果上式得到的 Q 值小于 1，则取它的倒数。

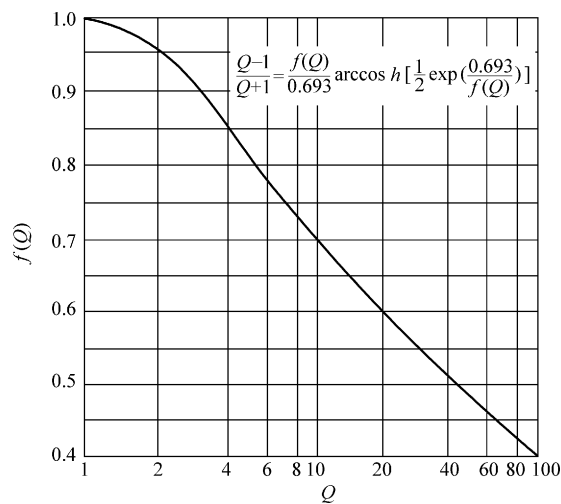


图 6-22 修正函数 $f(Q)$ 与 Q 的关系

范得堡修正函数表如表 6-8 所示。

表 6-8 范得堡修正函数表

Q	$f(Q)$	Q	$f(Q)$	Q	$f(Q)$
1.010	1.000	1.350	0.992	1.654	0.978
1.053	1.000	1.373	0.991	1.672	0.977
1.075	0.999	1.395	0.990	1.698	0.976
1.092	0.999	1.417	0.989	1.715	0.975
1.120	0.999	1.438	0.989	1.732	0.974
1.143	0.998	1.458	0.988	1.758	0.973
1.164	0.998	1.478	0.987	1.775	0.972
1.200	0.997	1.498	0.986	1.791	0.971
1.217	0.996	1.517	0.985	1.816	0.970
1.232	0.996	1.536	0.984	1.833	0.969
1.247	0.996	1.555	0.983	1.858	0.968
1.275	0.995	1.573	0.982	1.874	0.967
1.288	0.994	1.592	0.981	1.899	0.966
1.314	0.993	1.619	0.980	1.915	0.965
1.338	0.992	1.637	0.979	1.940	0.963

(续)

Q	$f(Q)$	Q	$f(Q)$	Q	$f(Q)$
1.956	0.962	2.594	0.928	3.232	0.895
1.972	0.962	2.619	0.926	3.260	0.894
1.996	0.960	2.635	0.925	3.278	0.893
2.012	0.959	2.660	0.924	3.296	0.892
2.037	0.958	2.677	0.923	3.315	0.891
2.053	0.957	2.694	0.922	3.333	0.890
2.077	0.956	2.719	0.921	3.361	0.889
2.098	0.955	2.736	0.920	3.379	0.888
2.117	0.954	2.761	0.919	3.398	0.887
2.133	0.953	2.778	0.918	3.417	0.886
2.157	0.951	2.795	0.917	3.436	0.885
2.173	0.951	2.820	0.916	3.454	0.884
2.197	0.949	2.837	0.915	3.473	0.883
2.213	0.948	2.854	0.914	3.492	0.883
2.237	0.947	2.880	0.913	3.521	0.881
2.253	0.946	2.897	0.912	3.540	0.880
2.277	0.945	2.914	0.911	3.559	0.880
2.293	0.944	2.940	0.910	3.579	0.879
2.318	0.943	2.957	0.909	3.598	0.878
2.334	0.942	2.975	0.908	3.617	0.877
2.358	0.940	2.992	0.907	3.637	0.876
2.374	0.940	3.018	0.906	3.656	0.875
2.398	0.938	3.036	0.905	3.676	0.874
2.414	0.937	3.053	0.904	3.696	0.873
2.439	0.936	3.071	0.903	3.715	0.872
2.455	0.935	3.098	0.902	3.735	0.872
2.479	0.934	3.115	0.901	3.755	0.871
2.496	0.933	3.133	0.900	3.775	0.870
2.520	0.932	3.160	0.898	3.795	0.869
2.537	0.931	3.178	0.898	3.815	0.868
2.561	0.929	3.196	0.897	3.836	0.867
2.578	0.929	3.214	0.896	3.856	0.866

(续)

Q	$f(Q)$	Q	$f(Q)$	Q	$f(Q)$
3.876	0.865	4.514	0.839	5.158	0.816
3.897	0.865	4.537	0.838	5.171	0.816
3.917	0.864	4.560	0.838	5.197	0.815
3.938	0.863	4.572	0.837	5.210	0.814
3.958	0.862	4.595	0.836	5.236	0.813
3.979	0.861	4.619	0.835	5.249	0.813
4.000	0.860	4.630	0.835	5.276	0.812
4.021	0.859	4.654	0.834	5.289	0.812
4.031	0.859	4.677	0.833	5.315	0.811
4.053	0.858	4.701	0.832	5.342	0.810
4.074	0.857	4.713	0.832	5.355	0.809
4.095	0.856	4.737	0.831	5.368	0.809
4.116	0.855	4.761	0.830	5.395	0.808
4.137	0.854	4.773	0.830	5.408	0.808
4.159	0.853	4.797	0.829	5.435	0.807
4.180	0.853	4.821	0.828	5.449	0.806
4.191	0.852	4.833	0.827	5.476	0.805
4.213	0.851	4.857	0.827	5.490	0.805
4.235	0.850	4.882	0.826	5.517	0.804
4.257	0.850	4.894	0.825	5.531	0.804
4.278	0.849	4.919	0.824	5.558	0.803
4.301	0.848	4.931	0.824	5.572	0.802
4.312	0.847	4.956	0.823	5.600	0.801
4.334	0.846	4.968	0.823	5.614	0.801
4.356	0.846	4.993	0.822	5.642	0.800
4.378	0.845	5.019	0.821	5.656	0.800
4.389	0.844	5.031	0.820	5.670	0.799
4.412	0.843	5.056	0.820	5.698	0.798
4.435	0.842	5.069	0.819	5.712	0.798
4.457	0.842	5.094	0.818	5.740	0.797
4.480	0.841	5.120	0.817	5.755	0.797
4.491	0.840	5.133	0.817	5.769	0.796

(续)

Q	$f(Q)$	Q	$f(Q)$	Q	$f(Q)$
5.798	0.795	6.433	0.777	7.067	0.760
5.812	0.795	6.448	0.776	7.085	0.759
5.841	0.794	6.464	0.776	7.120	0.759
5.855	0.793	6.496	0.775	7.138	0.758
5.870	0.793	6.513	0.774	7.155	0.758
5.899	0.792	6.529	0.774	7.173	0.757
5.914	0.792	6.545	0.774	7.191	0.757
5.928	0.791	6.577	0.773	7.209	0.756
5.958	0.790	6.594	0.772	7.227	0.756
5.972	0.790	6.610	0.772	7.245	0.756
5.987	0.789	6.626	0.771	7.281	0.755
6.017	0.789	6.659	0.771	7.299	0.754
6.032	0.788	6.676	0.770	7.317	0.754
6.062	0.787	6.692	0.770	7.335	0.753
6.077	0.787	6.709	0.769	7.354	0.753
6.092	0.786	6.742	0.768	7.372	0.752
6.107	0.786	6.759	0.768	7.390	0.752
6.137	0.785	6.776	0.767	7.409	0.752
6.152	0.785	6.792	0.767	7.427	0.751
6.168	0.784	6.809	0.767	7.446	0.751
6.198	0.783	6.826	0.766	7.464	0.750
6.214	0.783	6.860	0.765	7.502	0.749
6.229	0.782	6.877	0.765	7.520	0.749
6.260	0.782	6.894	0.764	7.539	0.748
6.275	0.781	6.911	0.764	7.558	0.748
6.291	0.781	6.928	0.763	7.577	0.748
6.322	0.780	6.946	0.763	7.595	0.747
6.338	0.779	6.980	0.762	7.614	0.747
6.353	0.779	6.997	0.762	7.633	0.746
6.369	0.778	7.015	0.761	7.652	0.746
6.401	0.778	7.032	0.761	7.672	0.745
6.417	0.777	7.050	0.760	7.691	0.745

(续)

Q	$f(Q)$	Q	$f(Q)$	Q	$f(Q)$
7.710	0.744	8.395	0.729	9.079	0.716
7.729	0.744	8.416	0.729	9.090	0.716
7.749	0.744	8.437	0.729	9.112	0.715
7.768	0.743	8.459	0.728	9.125	0.715
7.787	0.743	8.469	0.728	9.148	0.714
7.807	0.742	8.480	0.728	9.172	0.714
7.826	0.742	8.512	0.727	9.195	0.714
7.846	0.741	8.523	0.727	9.218	0.713
7.865	0.741	8.544	0.726	9.230	0.713
7.885	0.741	8.566	0.726	9.242	0.713
7.905	0.740	8.598	0.725	9.265	0.712
7.945	0.739	8.609	0.725	9.289	0.712
7.954	0.739	8.631	0.725	9.313	0.711
7.964	0.739	8.653	0.724	9.336	0.711
7.984	0.738	8.675	0.724	9.348	0.711
8.004	0.738	8.696	0.723	9.360	0.711
8.034	0.737	8.718	0.723	9.384	0.710
8.045	0.737	8.729	0.723	9.408	0.710
8.065	0.737	8.741	0.722	9.432	0.709
8.085	0.736	8.763	0.722	9.456	0.709
8.105	0.736	8.785	0.722	9.480	0.708
8.126	0.735	8.807	0.721	9.480	0.708
8.146	0.735	8.829	0.721	9.505	0.708
8.166	0.734	8.852	0.720	9.529	0.707
8.187	0.734	8.874	0.720	9.553	0.707
8.207	0.733	8.897	0.719	9.578	0.707
8.228	0.733	8.919	0.719	9.602	0.706
8.249	0.733	8.942	0.718	9.602	0.706
8.269	0.732	8.953	0.718	9.627	0.706
8.290	0.732	8.964	0.718	9.652	0.705
8.311	0.731	8.987	0.718	9.676	0.705
8.332	0.731	9.010	0.717	9.701	0.704
8.353	0.730	9.033	0.717	9.726	0.704
8.374	0.730	9.056	0.716	9.726	0.704

(续)

Q	$f(Q)$	Q	$f(Q)$	Q	$f(Q)$
9.751	0.703	51.926	0.467	299.069	0.324
9.776	0.703	53.879	0.463	319.668	0.320
9.789	0.703	55.932	0.459	339.577	0.317
9.801	0.703	57.846	0.456	358.367	0.314
9.839	0.702	59.849	0.452	381.542	0.310
9.852	0.702	61.946	0.449	400.229	0.308
9.877	0.701	63.861	0.446	420.140	0.305
9.890	0.701	65.858	0.443	441.362	0.302
9.902	0.701	67.938	0.440	460.145	0.300
9.928	0.700	69.793	0.437	479.965	0.298
9.953	0.700	72.043	0.434	500.937	0.296
9.966	0.700	74.049	0.431	518.567	0.294
9.979	0.699	76.132	0.429	541.754	0.292
10.005	0.699	77.927	0.426	561.310	0.290
10.240	0.695	79.780	0.424	576.591	0.289
13.978	0.643	82.083	0.421	597.785	0.287
15.984	0.622	84.070	0.419	620.046	0.285
17.990	0.604	85.706	0.417	637.386	0.284
19.960	0.589	87.813	0.415	661.579	0.282
22.010	0.575	89.989	0.413	680.493	0.281
23.956	0.563	91.783	0.411	700.095	0.279
25.962	0.552	93.624	0.410	720.455	0.278
28.005	0.541	95.996	0.407	741.606	0.277
29.956	0.533	97.953	0.406	756.138	0.276
31.979	0.524	99.963	0.404	778.629	0.274
33.944	0.517	120.155	0.388	801.998	0.273
35.942	0.510	139.626	0.376	818.093	0.272
37.960	0.503	159.680	0.366	834.605	0.271
39.981	0.492	179.244	0.358	860.199	0.270
41.982	0.491	199.549	0.350	877.807	0.269
43.960	0.486	220.080	0.344	895.873	0.268
46.059	0.481	240.201	0.338	923.949	0.267
47.912	0.476	259.173	0.333	943.255	0.266
49.865	0.472	280.169	0.328	963.104	0.265
				983.513	0.264
				993.833	0.264

如果电阻率 ρ_A 与 ρ_B 之差与其平均值之比小于 $\pm 10\%$ ，则认为样品均匀，可求出该样品的平均电阻率：

$$\rho = \frac{1}{2}(\rho_A + \rho_B) \quad (6-41)$$

式中 ρ ——样品的平均电阻率，单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$ ；

ρ_A 、 ρ_B ——计算得到的两个电阻率，单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$ 。

若 ρ_A 与 ρ_B 之差与其平均值之比超过 $\pm 10\%$ ，则认为该样品不均匀。

4) 正方形薄片样品霍尔系数的计算：

$$\begin{cases} R_H^C = 2.50 \times 10^3 \left[\frac{U_{42}(+B, +I)}{U_0(+B, +I)} - \frac{U_{42}(+B, -I)}{U_0(+B, -I)} + \frac{U_{42}(-B, -I)}{U_0(-B, -I)} - \frac{U_{42}(-B, +I)}{U_0(-B, +I)} \right] \cdot \frac{R_0 \cdot t}{B} \\ R_H^D = 2.50 \times 10^3 \left[\frac{U_{13}(+B, +I)}{U_0(+B, +I)} - \frac{U_{13}(+B, -I)}{U_0(+B, -I)} + \frac{U_{13}(-B, -I)}{U_0(-B, -I)} - \frac{U_{13}(-B, +I)}{U_0(-B, +I)} \right] \cdot \frac{R_0 \cdot t}{B} \end{cases} \quad (6-42)$$

式中 R_H^C 、 R_H^D ——样品的两个霍尔系数，单位为 cm^3/C ；

R_0 ——标准电阻，单位为 Ω ；

t ——样品厚度，单位为 cm ；

B ——磁通密度，单位为 T ；

$U_{42}(+B, +I)$ 、 $U_{42}(+B, -I)$ 、 $U_{42}(-B, -I)$ 、 $U_{42}(-B, +I)$ 以及 $U_{13}(+B, +I)$ 、 $U_{13}(+B, -I)$ 、 $U_{13}(-B, -I)$ 、 $U_{13}(-B, +I)$ ——霍尔电压，单位为 μV ；

$U_0(+B, +I)$ 、 $U_0(+B, -I)$ 、 $U_0(-B, -I)$ 、 $U_0(-B, +I)$ ——标准电阻上的电压，单位为 μV 。

若 R_H^C 与 R_H^D 之差与其平均值之比小于 $\pm 10\%$ ，则认为样品均匀，可求出该样品的平均霍尔系数：

$$R_H = \frac{1}{2}(R_H^C + R_H^D) \quad (6-43)$$

式中 R_H ——样品的平均霍尔系数，单位为 cm^3/C ；

R_H^C 、 R_H^D ——计算得到的两个霍尔系数，单位为 cm^3/C 。

若 R_H^C 与 R_H^D 之差与其平均值之比超过 $\pm 10\%$ ，则认为该样品不均匀。

5) 当求出样品的平均霍尔系数和平均电阻率之后，可计算样品的平均霍尔迁移率：

$$\mu_H = \frac{|R_H|}{\rho} \quad (6-44)$$

式中 μ_H ——样品的平均霍尔迁移率，单位为 $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ；

R_H ——样品的平均霍尔系数，单位为 cm^3/C ；

ρ ——样品的平均电阻率, 单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$ 。

6) 铈化钢单晶在 77K 的载流子 (对 N 型铈化钢为电子, 对 P 型铈化钢为空穴) 浓度和载流子迁移率为:

$$\begin{cases} n = \frac{6.25}{|R_H|} \times 10^{18} \\ \mu = \mu_H \end{cases} \quad (6-45)$$

式中 n ——载流子浓度, 单位为 cm^{-3} ;

μ ——载流子迁移率, 单位为 $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$;

R_H ——霍尔系数, 单位为 cm^3/C ;

μ_H ——霍尔迁移率, 单位为 $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。

6.3.13 铝合金电导率的涡流测量方法

1. 术语

1) 涡流是指由于外磁场在时间或空间上的变化而在导体表面及近表面产生的感应电流。

2) 有效透入深度是指在涡流检测中与选用的频率相对应的能测出厚度方向质量信息的最大深度。

3) 标准透入深度是指在涡流检测中, 涡流密度降至试件表面涡流密度的 $1/e$ (约 37%) 时的深度。按下式计算:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \pi f \sigma}} \quad (6-46)$$

式中 δ ——标准透入深度, 单位为 m ;

σ ——试件的电导率, 单位为 S/m ;

μ_0 ——真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H}/\text{m}$;

μ_r ——相对磁导率, 对于铝合金 μ_r 值近似为 1;

f ——测试频率, 单位为 Hz 。

4) 提离效应是指涡流检测线圈与被检试件之间的距离改变时, 其阻抗矢量产生变化的效应。

5) 边缘效应是指在涡流检测中, 由于试件几何形状的突变而产生的磁场和涡流的变化。

6) 测量精度是指给定条件下涡流电导仪测试电导率标准试块获得的测量值与标准试块电导率值之间的差异。

7) 仪器灵敏度是指给定方法和仪器所能检测出的材料或产品电导率的最小差值或变化。

8) 仪器稳定性是指仪器测量指示值在一定时间间隔内的变化情况。

9) 提离抑制性是指仪器消除或减小探头与试样间微小间隙影响的能力。

10) 直接测量是指由于被检测对象的尺寸、形状及表面状态对电导率的准确测量不存在影响而可获得电导率的真实值的测量。

11) 修正测量是指由于被检测对象的尺寸、形状及表面状态对电导率的准确测量存在影响而需要对获得的电导率视在值加以修正补偿的测量。

12) 修正系数是指将修正测量获得的电导率值转化为被检测对象的真实电导率值所引入的补偿值或换算系数。

2. 方法原理

当载有确定频率和振幅交流电的线圈接近导电体表面时, 线圈中交流电产生的交变磁场在导电体表面和近表面感应产生涡流, 感应涡流的磁场反作用于线圈, 这种反作用的大小与导电体表面和近表面的导电率有关。通过以电导率单位标定的仪器可直接测出电导体的电导率。

注: 涡流法则测试电导率受许多因素的影响, 如试件的几何形状尺寸与表面状态、探头与试件表面的间隙、环境温度波动、铁磁性金属和强磁场、探头交变磁场的“趋肤效应”等。

3. 标准试块与仪器

1) 标准试块(简称标块)的尺寸应不小于 $25\text{mm} \times 25\text{mm}$, 厚度不小于 5mm , 表面粗糙度值 Ra 不大于 $3.2\mu\text{m}$ 。

2) 标块至少配备三块(必要时, 可根据需要增加): 低值标块、中值标块和高值标块, 其标块标称值应覆盖被测试件电导率测试值, 两相邻标块标称值之差应在 $5 \sim 15\text{MS/m}$ ($9\% \sim 26\% \text{ IACS}$)。

3) 标块每 12 个月应送计量部门或计量归口单位检定或校准一次。

4) 标块在投入使用前, 或出现故障修复后, 应送计量部门或计量归口单位重新进行检定或校准。

5) 标块应有检定或校准证书, 应贴有检定或校准状态标志, 其中应包括有检定或校准日期、检定或校准有效期和标称值等信息。

6) 对于同一标块, 各次检定或校准的结果并不完全相同, 这种标块量值在规定范围内变化的情况是正常的。标块的电导率值在 20°C 下的不确定度应优于 $\pm 0.2\text{MS/m}$ ($0.35\% \text{ IACS}$)。如果标块量值的变化量超出规定范围, 应予以修复或报废。

7) 电导仪测试频率一般在 $50 \sim 100\text{kHz}$, 优选测试频率为 60kHz 。对于薄规格板材或试件可选用更高的测试频率。

8) 电导仪的测试范围应不小于 $9 \sim 36\text{MS/m}$ ($15\% \sim 62\% \text{ IACS}$), 电导仪的工作温度应为 $0 \sim 40^\circ\text{C}$ 。

9) 电导仪灵敏度应能够响应不大于 $\pm 0.2\text{MS/m}$ ($\pm 0.35\% \text{ IACS}$) 的电导率差异。

10) 电导仪在电导率值约为 20MS/m (35% IACS) 标块上的测量精度应优于 $\pm 0.2\text{MS/m}$ ($\pm 0.35\%$ IACS)。

11) 在电导率值约为 20MS/m (35% IACS) 标块上, 电导仪测试的稳定性在 30min 内应优于 $\pm 0.2\text{MS/m}$ ($\pm 0.35\%$ IACS)。

12) 电导仪的提离抑制性在 $0 \sim 75\mu\text{m}$ 范围内应优于 $\pm 0.3\text{MS/m}$ ($\pm 0.5\%$ IACS)。

13) 电导仪每 12 个月应送计量部门或计量归口单位检定或校准一次。

14) 电导仪在投入使用前, 或出现故障检修后, 应送计量部门或计量归口单位重新进行检定或校准。

15) 电导仪应有检定或校准证书, 应贴有检定或校准状态标志, 其中应包括有检定或校准日期、检定或校准有效期等信息。

16) 按电导仪说明书要求对仪器进行预热及调试操作。选择约为 20MS/m (35% IACS) 的电导率标块为中值标块, 再分别选择低于和高于中值标块的电导率标块作为低值标块、高值标块, 分别用低值、中值、高值三个标块对电导仪进行校准, 校准时将探头平稳地置于标块中心部位上, 校准完成后对中值标块进行测量以校验仪器的测量精度, 其测量精度应优于 $\pm 0.2\text{MS/m}$ ($\pm 0.35\%$ IACS)。

17) 用非金属夹具将探头平稳地固定于电导率值约为 20MS/m (35% IACS) 的标块上, 在 30min 时间内每隔 5min 读取一次电导仪的指示值或显示值, 各次读取的数值之间的最大差值应优于 $\pm 0.2\text{MS/m}$ ($\pm 0.35\%$ IACS)。

18) 将探头平稳地置于电导率值约为 20MS/m (35% IACS) 标块上, 标块与探头之间分别放置 $25\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $75\mu\text{m}$ 厚的非导电薄膜, 读取每次测量值, 各次测量值与标块电导率标称值的差值应优于 $\pm 0.3\text{MS/m}$ ($\pm 0.5\%$ IACS)。

19) 电导仪每六个月应按要求进行一次自检, 当电导仪性能不满足要求时应送计量部门或计量归口单位重新检定或校准。

4. 试件与试样

1) 直接测量的试件表面测试部位表面粗糙度值 R_a 不大于 $6.3\mu\text{m}$, 试件表面测试部位应无包铝层、电镀层、腐蚀斑、灰尘、油脂及划伤等。测试部位厚度应不小于涡流有效透入深度。涡流的有效透入深度约为标准透入深度的 3 倍, 若测试频率取 60kHz , 当被测试件电导率值为 10MS/m (17% IACS) 时, 测试部位厚度一般应不小于 2.0mm , 当被测试件电导率值为 36MS/m (62% IACS) 时, 测试部位厚度应不小于 1.0mm 。测试部位宽度应不小于探头直径的 1.5 倍。曲面试件的凹面曲率半径应不小于 250mm , 凸面曲率半径应不小于 75mm 。试件表面的非导电覆盖层 (如阳极氧化膜、油漆层等) 厚度一般应不大于 $75\mu\text{m}$ 。测试面的机械加工应在热处理前进行。自然时效试件的电导率测试应在自然时效 48h 后进行, 若不合格, 继续时效到总计 96h 后进行测试。被测试件在热处理淬火后也要经过足够时效时间

的时效处理方可进行测量。

2) 比较测量的试件与试样不符合规定的试件应采用比较测量法。使用牌号和状态与试件相同的试样确定电导率的修正系数。用于确定电导率修正系数的试样,其真实电导率应为已知或可以测知,试样的电导率应具有良好的稳定性。测试面的机械加工应在热处理前进行。试件和试样表面测试部位的表面粗糙度值 Ra 不大于 $6.3\mu\text{m}$, 并应符合要求。

5. 测试条件

电导仪、标块应在无腐蚀、无电磁场干扰的环境中保存和使用,且避免存放在太热或温度变化大的地方。标块、探头表面应保持清洁,如有油污、灰尘等污物,应使用棉布或软纸蘸不会产生化学腐蚀的液体擦拭干净。仪器、探头要防止受振动和碰撞,标块表面切忌划伤。测试尽可能在 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 的室温下进行。探头、仪器、标块及被测试件之间的温度差不大于 3°C 。测试时应远离热源,避免阳光直射。

6. 校准仪器

1) 开启仪器,按电导仪说明书要求对仪器进行预热,按电导仪说明书要求的操作方法对仪器进行校准。

2) 选择低值、中值、高值三个标块,其标块标称值应覆盖被测试件电导率值。

3) 分别用低值、中值、高值标块对电导仪进行校准,校准时将探头平稳地置于标块中心部位上。

4) 校准完成后对中值标块进行校验以验证校准的准确性,其测试精度应不大于 $\pm 0.2\text{MS/m}$ (0.35% IACS)。

7. 测试电导率

1) 根据试件大小、形状及测试面(应平行于金属流线方向)的状态,至少选择3个以上的测试点进行测量。

2) 测试点随被测试件的增大而增多,测试点应在测试面上均匀分布,并在每个测试点附近测2~3次,读取各部位的电导率测试值。

3) 对于厚度不一致的试件(锻件、挤压件等),其最薄及最厚处为必测点;对于板材,应在中心处和接近边角处等有代表性部位进行测试;对于棒材、管材类试件,应在其表面轴向不同周向位置按适当间距分布进行测试;对于型材,应在不同型面上按间距分布选择测试点。

4) 测试时探头应平稳地置于试件表面的测试部位上,探头与测试面应紧密接触。测试时手持探头时间尽可能短,切忌用手触摸探头端部、标块和被检试件的测试部位。对于小尺寸试件,探头应置于平整区域中心部位进行测量,以避免产生边缘效应。

5) 曲率半径不大于 75mm 的凸面零件和曲率半径不大于 250mm 的凹面零件, 应采用修正测量方法进行电导率的测试。应根据不同型号、不同测试频率的电导仪制作不同规格曲率半径试件的曲率修正系数。

6) 对于厚度小于涡流有效透入深度但不小于 1.5 倍标准透入深度的无包铝层或无覆盖层的试件, 可采用同牌号、同状态、同厚度的三个试件叠加并互换位置的修正测量方法进行电导率的测试。叠加测量时, 相邻试件应紧密接触。

7) 包铝层较薄的板材或试件可采用比较测量法, 应根据不同型号、不同工作频率的电导仪建立与不同牌号、不同状态、不同厚度规格包铝板材或试件相对应的电导率修正系数。当包铝层超过规定厚度而影响测试结果判定, 或测量结果无比较意义(各处测量值差异较大)时, 需局部清除包铝层后进行测量。

8) 对于表面粗糙度值 Ra 大于 $6.3\mu\text{m}$ 试件, 可采用修正测量方法进行电导率的测试。应根据不同型号、不同工作频率的电导仪建立与试样不同的表面粗糙度状态相对应的修正系数。

9) 试件表面非导电层厚度大于 $75\mu\text{m}$ 而导致测试值与不带非导电层试件的电导率值之间差异大于 $\pm 0.3\text{MS/m}$ (0.5% IACS) 时, 根据所使用电导仪的型号和工作频率建立与试件表面不同非导电层厚度相对应的修正系数后进行测试。

10) 对于厚度大于有效透入深度而宽度小于探头直径 1.5 倍的窄条试件, 应根据所使用电导仪的型号和工作频率建立与试样不同宽度尺寸相对应的修正系数后进行测试。

11) 修正方法或修正系数的建立和使用应经过相关技术部门的技术主管的审批。

12) 连续使用电导仪过程中, 应每隔约 30min 重新校验电导仪。若校验值不符合要求, 应重新校准仪器, 并对上一次校准后测试的所有试件重新测试。

13) 当电导率测试值超出规定范围时, 应重新校验仪器, 以保证测试结果的准确。当确定测试点的电导率值不合格时, 应在附近增加测试点数。

14) 对测试值超出验收范围的不合格点要进行标识。

15) 在没有特殊说明的情况下, 试件应 100% 进行电导率测试。

第 7 章 金属材料的热电效应特征参数

7.1 金属材料的热电效应基础知识

热电效应是许多工程材料中的自由电子在外界电、热作用下可逆运动过程的反映，是材料的基本物理现象之一，其特征参数与材料的电导率和热导率相关。

所谓热电效应，是指当受热物体中的电子（空穴），随着温度梯度由高温区往低温区移动时，产生电流或电荷堆积的一种现象，如图 7-1 所示。

通过对热电位的测量，人们研制出温度及能量转换器、具有稳定高热电位的材料，以及在精密仪表行业中应用的，用来降低热电位的材料。此外，由于这种效应的高度敏感性，它被作为热电分析方法广泛用在材料研究中。

1. 塞贝克效应

在两种不同金属构成的回路中，如果两种金属的结点处温度不同，该回路中就会产生一个温差电动势，这就是塞贝克效应。塞贝克效应产生的原因是金属在温度梯度存在的条件下，内部产生电动势，不同的金属产生电动势的能力不同，当两种不同金属连接在一起时，由于冷热测量结点产生的电位不同，导致回路中产生电流，如图 7-2 所示。

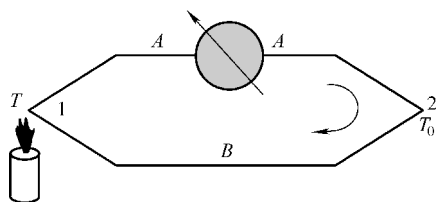


图 7-1 热电效应示意图 ($T > T_0$)

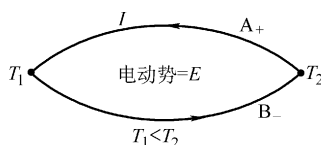


图 7-2 塞贝克效应示意图

如果两种材料 A 和 B 完全均匀，则回路中热电位 E_{AB} 的大小除与材料有关外，还与两个接触点的温度 T_1 和 T_2 有关。由于两种金属中电子密度和逸出功不同，电子从一种金属越过界面向另一种金属迁移，故在接点处形成与温度有关的接触电位。倘若回路的两接触点温度不同，两接触电位的代数和不等于零，接触电位差就是热电位。当两接点的温差不大时，所产生的热电位与温差成正比，即：

$$E_{AB} = S_{AB} \Delta T \quad (7-1)$$

式中 E_{AB} ——A、B 两种材料所产生的热电动势，单位为 V；

S_{AB} ——A、B 两种材料的相对热电势率；

ΔT ——两接点的温度差，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

与塞贝克效应相关的基本规律如下：

1) 要确定塞贝克热电势的大小必须保证 A、B 两种材料的化学成分和物理状态完全均匀，否则将要附加一个难以确定的附加电位，这一规律称为均质导体定律。

2) 如果在回路中引入第三种金属导体，那么只要第三种金属接入的两端温度相同，就不会影响原回路所产生的热电势，如图 7-3 所示。这个规律称为中间导体定律。

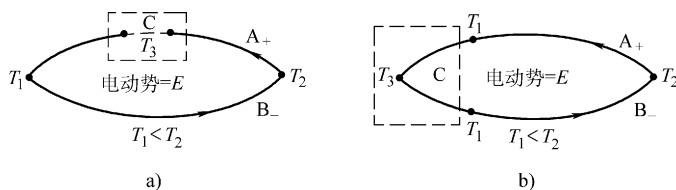


图 7-3 出现中间导体和中间温度时的情形

a) 中间导体 b) 中间温度

3) 只要两种材料均质，两端温度恒定，即使回路中某一部分处于任何其他温度，原回路产生的热电势不变，这一规律称为中间温度定律。由于不同的金属材料所具有的自由电子密度不同，当两种不同的金属导体接触时，在接触面上会发生电子扩散。电子的扩散速率与两导体的电子密度有关并和接触区的温度成正比。金属中温差电动势率为 $0 \sim 10 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ，所以金属中的塞贝克效应主要用于温差电偶（用作温度计），即热电偶。

2. 帕尔帖效应

帕尔帖发现了这样一种现象：用两块不同的导体连接成电偶，并接上直流电源，当电偶上通过电流时，会发生能量转移现象，一个接头处放出热量变热，另一个接头处吸收热量变冷。人们把这种现象称作帕尔帖效应。帕尔帖效应直到近代随着半导体的发展才有了实际的应用，也就是“致冷器”的发明。1837 年，俄国物理学家楞次发现，电流的方向决定了吸收还是产生热量，发热（制冷）量的多少与电流的大小成正比，比例系数称为“帕尔帖系数”。对帕尔帖效应的物理解释是：电荷载体在导体中运动形成电流，由于电荷载体在不同的材料中处于不同的能级，当它从高能级向低能级运动时，便释放出多余的能量；相反，从低能级向高能级运动时，从外界吸收能量。能量在两种材料的交界面处以热的形式吸收或放出。

3. 汤姆逊效应

1854 年汤姆逊用热力学分析上述两种温差电效应时指出，还应有第三种温差电现象存在。当在存在温度梯度的均匀导体中通有电流时，导体中除了产生不可逆

的焦耳热外，还要吸收或放出一定的热量，热量流入或流出的方向视电流的方向和温度梯度的方向而定。这一热电现象被定名为汤姆逊效应，即当温度梯度或电流的方向倒转时，导体从一个汤姆逊热吸收器变成一个汤姆逊热发生器，在单位时间内吸收或放出的能量与电流和温度梯度成正比，即：

$$Q_T = \tau I \frac{dT}{dx} \quad (7-2)$$

式中 Q_T ——汤姆逊热，单位为 J；

τ ——汤姆逊系数，它与材料的性质有关；

I ——电流，单位为 A；

$\frac{dT}{dx}$ ——导体中的温度梯度。

7.2 热电位差

1. 接触电位差

当两种金属接触在一起时，由于不同导体的自由电子密度不同，在结点处就会发生电子迁移扩散，失去自由电子的金属呈正电位，得到自由电子的金属呈负电位。当扩散达到平衡时，在两种金属的接触处形成电位差，称为接触电位差，其大小除与两种金属的性质有关外，还与结点温度有关。

2. 温差电位差

对于单一金属，如果两端的温度不同，则温度高端的自由电子向低端迁移，使单一金属两端产生不同的电位，形成电位差，称为温差电位差。温差电位差的大小与金属材料的性质和两端的温差有关。以下两种情形将不产生温差电位差。

1) 如果热电偶两电极的材料相同，虽然两端温度不同，但闭合回路的总热电位差仍为零。因此，热电偶必须用两种不同材料作热电极。

2) 如果热电偶两电极材料不同，而热电偶两端的温度相同，闭合回路中也不产生热电位差。

金属导体的电子浓度高，温度变化对电子速度的影响很小，因此热电位差很小。过渡金属的热电位差平均要大一些。半导体中载流子数较少，服从经典统计规律，平均热运动速度与温度成比例，热电位差要大。超导电性材料在超导态时电阻消失，试样上的电位差无法维持，热电位差为零。

3. 热电位率

假定热电位与温度呈线性关系，则把每 1°C 的温度差所产生的热电位称为热电位率。

1) 低于室温时的纯过渡金属的绝对热电位率如表 7-1 所示。

表 7-1 低于室温时的纯过渡金属的绝对热电位率 （单位：μV/K）

族	元素	10K	20K	50K	80K	100K	150K	200K	250K	273K
Ⅲ _B 族	Sc	-1.6	-3.0	-8.0	-12.7	-14.0	-15.6	-16.3	-16.5	-16.2
	Y	-0.3	-0.4	-3.3	-4.5	-4.4	-3.1	-1.9	-0.9	-0.7
	La	-0.5	-0.4	-2.8	-4.5	-4.9	-4.6	-3.2	-1.4	-0.5
Ⅳ _B 族	Ti	—	—	-3.0	-3.0	-2.6	0	2.0	4.0	4.5
	Zr	—	—	0	3.0	4.5	7.5	8.5	9.5	9.5
	Hf	—	—	—	0	0	2.5	3.7	4.7	5.3
Ⅴ _B 族	V	0.19	0.76	2.45	2.91	2.65	1.52	0.72	0.26	0.13
	Nb	0.31	0.98	2.73	3.09	3.13	1.42	0.65	-0.04	-0.20
	Ta	0.36	1.03	1.41	0.78	0	-0.8	-1.5	-2.0	-2.2
Ⅵ _B 族	Cr	3.1	6.7	8.2	5.0	5.0	7.0	11.8	17.5	18.8
	Mo	-0.02	-0.11	-0.48	-0.2	0.1	0.94	2.50	4.08	4.57
	W	0.05	-0.28	-2.78	-3.70	-4.04	-2.45	-1.41	-0.10	0.56
Ⅶ _B 族	Mn	—	12.5	15.5	6.0	-2.5	-7.0	-8.5	-9.7	-10.0
	Tc	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Re	0.61	1.32	1.18	0.08	-0.66	-2.21	-3.51	-4.63	-5.03
Ⅷ _a 族	Fe	1.0	2.5	8.0	12.0	13.0	16.0	17.0	15.5	15.0
	Ru	—	—	—	0.2	0	-1.1	-1.5	-1.5	-1.5
	Os	—	—	—	-2.2	-3.2	-3.8	-4.0	-4.0	-4.0
Ⅷ _b 族	Co	—	-0.5	-1.0	-3.0	-4.0	-9.0	-12.0	-18.0	-19.0
	Rh	-0.19	-0.33	-0.11	0.54	0.78	0.92	0.75	0.58	0.48
	Ir	—	-0.11	0.13	0.57	0.73	0.77	0.64	0.46	0.35
Ⅷ _c 族	Ni	-2.0	-4.7	-7.2	-8.1	-8.4	-11.0	-13.5	-17.0	-18.0
	Pd	0.4	1.6	4.3	3.7	2.00	-16.3	-4.85	-7.42	-9.00
	Pt	0.6	2.3	5.8	5.5	4.29	1.32	-1.27	-3.28	-4.45

2) 稀磁合金的热电位率如表 7-2 所示。

表 7-2 稀磁合金的热电位率

基体金属元素	杂质金属元素	峰值热电位率/(μV/K)
Mg	Mn	3.6
Al	Mn	<1
	Cr	0.2
	Fe	16
	Co	≈15
	Ni	>15

(续)

基体金属元素	杂质金属元素	峰值热电位率/($\mu\text{V}/\text{K}$)
Zn	Mn	5
Ag	Fe	7
Au	V	5
	Cr	>2
	Fe	14
	Co	40
	Ni	16

7.3 影响热电位的因素

1. 压力的影响

压力对金属热电位率的影响首先是由于原子大小及其间距在电压下发生了变化,提高了费米面,改变了能带结构,从而影响扩散热电位率。其次,高压改变了声速、声子极化情况以及电子与声子的交互作用,从而影响声子热电位率。

2. 磁场的影响

当温度下降到液氮温度以下时,磁场对金属热电位的影响相当明显。金属材料在强磁场中不仅产生与温度有关的热电位,还会产生与磁场有关的磁电位。当加强磁场时,磁场中的金属被磁化为磁化金属,这时的磁化金属将与磁场外的金属组成金属-磁化金属热电偶,只要存在温差就可以产生磁(热)电位。强磁场对金属热电位的影响可以用磁场改变了与费米能级有关的能态密度,从而引起电导率和热电位率的变化来解释。

3. 相变的影响

有序化相变对金属热电位的影响十分明显。Ni-Mn 合金有序化引起热电位率的降低,如“Cu-Ni₃Mn”热电偶中 Ni₃Mn 的有序度越高热电位变化就越大。如果合金形成了化合物,则其热电位会发生突变。当形成半导体性质的化合物时,由于共价键的加强导致热电位显著增加,从而显著提高它们的热电位率。碳含量和热处理对铁和钢成偶热电位的影响如表 7-3 所示。

表 7-3 碳含量和热处理对铁和钢成偶热电位的影响

不同处理方法的热电势	$w(\text{C})(\%)$							
	0.04	0.30	0.35	0.41	0.57	0.76	0.95	1.05
$E_0^{100}/\mu\text{V}(900^\circ\text{C}\text{ 淬火态})$	74	310	575	615	707	950	1170	1308
$E_0^{100}/\mu\text{V}(800^\circ\text{C}\text{ 淬火态})$	29	100	413	420	417	393	378	473

注: E_0^{100} 表示对铁和钢成偶进行测量时,热端温度为 100℃,冷端温度为 0℃。

4. 温度的影响

因为热电势与两接点处的温差成正比，所以如果保持冷端温度不变，则热电势应与热端温度成正比。而实际上，热电势还受其他一些因素的影响，使这种正比关系只能近似成立。实际应用中常用经验公式表示热电势 E 与温度的关系，即

$$E = aT + bT^2 + cT^3 \quad (7-3)$$

式中 E ——热电势，单位为 V；

T ——温度，单位为 K；

a 、 b 、 c ——表征金属本质的常数。

5. 合金化的影响

当今对合金热电势的研究认为，在形成连续固溶体时热电势随浓度呈悬链式变化。但过渡族元素往往不符合这种规律。当合金的某一成分形成化合物时，其热电势会发生突变（增高或降低）。若化合物具有半导体性质，则由于共价结合的加强，其热电势显著增加。多相合金的热电势处于组成相的热电势之间，如两相的电导率相近，则热电势与体积浓度几乎呈直线关系。

6. 碳含量对钢热电势的影响

钢的碳含量和其组织状态对其热电势有显著影响。纯铁和钢组成热电偶时，铁的热电势为正，钢的热电势为负，且钢中的碳含量越高热电势越负，铁与钢组成的热电偶的热电势就越大；含碳量相同时，淬火态比退火态的热电势要高。这表明碳在 α -Fe 中固溶所引起的热电势的变化要比形成碳化物时强烈得多。

7. 杂质的影响

杂质对金属及合金的热电势率有较大的影响。杂质对铂热电势的影响如图 7-4 和表 7-4 所示。杂质对金属热电势率的影响如表 7-5 所示。

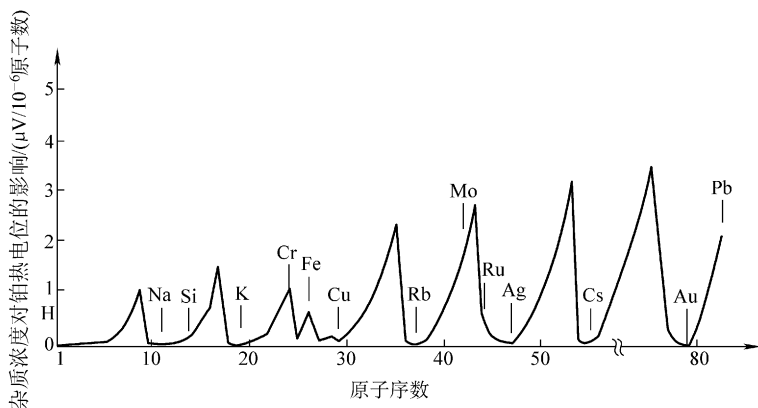


图 7-4 杂质对铂热电势的影响

表 7-4 杂质对铂热电位的影响

杂质元素	对热电位的影响/($\mu\text{V}/10^{-6}$) ^①		杂质元素	对热电位的影响/($\mu\text{V}/10^{-6}$) ^①	
	按质量计	按原子数计		按质量计	按原子数计
Ir	0.350	0.344	Au	-0.070	-0.071
Pd	0.069	0.038	Ru	1.099	0.570
Rh	0.200	0.106	Si	1.173	1.169
Ag	0.025	0.014	Co	0.161	0.049
Cu	0.115	0.037	Os	1.955	1.906
Fe	2.300	0.658	Ta	0.920	0.853
Ni	0.499	0.159	Re	3.680	3.513
Cr	4.041	1.077	W	2.645	2.493
Mn	0.322	0.091	Mo	3.680	1.810
Pb	2.999	3.178			

① 参考端温度为 0℃，试验端温度为 1200℃。

表 7-5 杂质对金属热电位率的影响

基体金属	Mg	Cu									Ag			
杂质元素	Al	Al	Fe	Co	Ni	Au	Zn	Sn	Ag	Pd	Cu	Au	Pd	Al
对热电位率的影响 ^①	-	-	--	--	--	-e	-	-	-e	-	-e	-e	-	-
周期表中的相对位置 ^②	-	-	-	-	-	o	-	-	o	-	o	o	-	-
基体金属	Au										Zn			Cd
杂质元素	Ag	Pd	Cu	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Co	Cu	Cd	Sn	Zn	
对热电位率的影响 ^①	-e	-	-e	--	--	--	--	--	--	+	-e	-	-e	
周期表中的相对位置 ^②	o	-	o	-	-	-	-	-	-	+	o	-	o	
基体金属	Al											Sn		Co
杂质元素	Ag	Cu	Mg	Zn	Sn	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Pd	Zn	Cu
对热电位率的影响 ^①	+	+	+	+	-	-	++	-	--	--	-	o	+e	++
周期表中的相对位置 ^②	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	o	+	+
基体金属	Fe									Ni				
杂质元素	(C)	Mn	Ni	Cr	W	Mo	Si	Al	Cu	Cr	V	Mo	W	
对热电位率的影响 ^①	--	--	--	+	+e	+e	--	-	-	++	++	++	++	
周期表中的相对位置 ^②	is	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
基体金属	Ni			Pd						Pt				
杂质元素	Mn	Al	Au	Ag	Cu	Pt	Ir	Rh	Pd					
对热电位率的影响 ^①	-	--	-	-	-	+e	+	++	+e					
周期表中的相对位置 ^②	+	+	+	+	+	o	+	+	o					

① + 表示增加；- 表示减少；++ 表示剧烈增加；-- 表示剧烈减少；+e 表示稍增；-e 表示稍减。

② + 表示杂质元素在基体金属之前；- 表示杂质元素在基体金属之后；o 表示同族元素。

7.4 热电位的测量

7.4.1 常用测量仪器

1. 温度计

常用温度计的适用范围如表 7-6 所示。

表 7-6 常用温度计的适用范围

温度计	适用温度范围/K	温度计	适用温度范围/K
锗电阻	0.5 ~ 30	玻璃(水银)	243 ~ 773
碳电阻	0.5 ~ 100	铜-康铜热电偶	4.2 ~ 573
铈铁稀合金电阻	0.5 ~ 300	铂 10 铈-铂热电偶	573 ~ 1673
铂电阻	13 ~ 903	铂 30 铈-铂 6 铈偶	1073 ~ 1973
PN 结二极管	1 ~ 300	光学高温计	> 1337
金铁-镍铬热电偶	2 ~ 300	光电自动高温计	> 1073

2. 电位差计

常用的电位差计的准确度应在 0.005% ~ 0.01% 内。

3. 常用热源

常用热源及其温度范围如表 7-7 所示。

表 7-7 常用热源及其温度范围

热源	温度范围/℃
液氮深低温恒温槽	- 276 ~ - 193
液氮低温恒温槽	- 203 ~ 0
酒精搅拌低温槽(以液氮或干冰冷却)	- 100 ~ 室温
搅拌水槽	室温 ~ 100
搅拌油槽	100 ~ 300
流动氧化铝粉末颗粒槽(以压缩空气搅拌)	室温 ~ 980
卧式或卧式管状电炉(通常以镍铬丝作发热体,也可用镍铬管直接通电加热)	300 ~ 1100
高温管状炉(以铂铈合金丝作发热体)	800 ~ 1700
卧式高频感应加热炉	1000 ~ 2100
真空钨管黑体炉	1000 ~ 2800
Zn、Sb、Ag、Au、Cu 等坩埚定点炉	419. 58、630. 75、961. 93、 1064. 43、1084. 88
Pd、Pt 熔丝定点炉	1554、1769

7.4.2 工业标准检测方法

热电位的测量是将待测材料和热电位已知的参考材料连接成对用以测试待测材料热电位的方法，常用的有积分法和微分法两种。由温差产生的电位差为：

$$\Delta V = V_b - V_a = \int_{T_1}^{T_2} (S_B - S_A) dT \quad (7-4)$$

其微分形式为：

$$\frac{d(\Delta V)}{dT} = S_{AB}(T) = S_B(T) - S_A(T) \quad (7-5)$$

式中 V_b ——B 点电位，单位为 μV ；

V_a ——A 点电位，单位为 μV ；

S_A 、 S_B ——分别为待测材料和参考材料的热电位率，单位为 $\mu V/^\circ C$ ；

S_{AB} ——热电对的相对热电位率，单位为 $\mu V/^\circ C$ 。

用积分法测量时，待测材料和参考材料的一个结点温度固定，设为 T_1 ，改变另一个结点的温度 T_2 ，同时测量电压差 ΔV 作为 T_2 的函数，对温度作微分后可得到 $S_{AB}(T)$ 。当参考材料的热电位值 $S_B(T)$ 已知时，可算出 $S_A(T)$ 。积分法装置较简单，其中温度固定的结点可浸在液氮或液氮中。由于温差大，相应的电压差 ΔV 也大，电压易于达到要求精度。此法适于测量尺度长的线状试样，缺点是热电位变化的细节常常容易忽略，除非测量足够多的温度点。另外，不同的数据处理方法有时会得出不同结果，判断结果的可靠性需要有一定的经验。

而用微分法测量时，待测材料和参考材料的两个结点间温差小，这时 $S_{AB} = \Delta V / \Delta T$ 。改变样品的平均温度，可得到不同温度下的 S_{AB} 。同样，在扣除参考材料的 $S_B(T)$ 后，可得到 $S_A(T)$ 。 ΔT 取值一方面要足够小，保证在这个小的温度范围内，无论 S_A 或 S_B 都是没有明显的变化；另一方面又不能太小，要达到产生的 ΔV 有适当的大小，能被测量到所需的精度。

在 293K 以下，常用的标准材料是高纯铅，其热电位率曾被仔细测量过。纯铅的绝对热电位率如表 7-8 所示。但是从实用的观点来看，高纯铅并不方便，实际工作中常采用仔细标定过的纯金属丝为参考材料，其绝对热电位率如表 7-9 所示。超导材料处在超导态时热电位值为零，是相当好的参考材料，如在 18K 以下可用 Nb_3Sn 超导带材作为参考材料。目前新发现的高温超导材料，超导转变温度已高达 125K。

表 7-8 纯铅的绝对热电位率

T/K	$S/(\mu V/K)$	T/K	$S/(\mu V/K)$	T/K	$S/(\mu V/K)$
0	0	18	-0.7845	133.2	-0.96
5	0	20	-0.784	153.2	-1.02
7.5	-0.221	30	-0.774	173.2	-1.06
8	-0.257	40	-0.764	193.2	-1.105
8.5	-0.297	50	-0.774	213.2	-1.15
9	-0.343	60	-0.779	233.2	-1.18
10	-0.434	70	-0.784	253.2	-1.21
11	-0.516	80	-0.794	273.2	-1.25
12	-0.593	90	-0.824	293.2	-1.275
14	-0.706	100	-0.865		
16	-0.776	113.2	-0.91		

表 7-9 纯金属的绝对热电位率 (单位: $\mu V/K$)

T/K	Cu	Ag	Au	Pt	Pd	W	Mo
100	1.19	0.73	0.82	4.29	2.00	—	—
150	1.12	0.85	1.02	1.32	-1.63	—	—
200	1.29	1.05	1.34	-1.27	-4.85	—	—
273	1.70	1.38	1.79	-4.45	-9.06	0.13	4.71
300	1.83	1.51	1.94	-5.28	-9.99	1.07	5.57
400	2.34	2.08	2.46	-7.83	-13.00	4.44	8.52
500	2.83	2.82	2.86	-9.89	-16.03	7.53	11.12
600	3.33	3.72	3.18	-11.66	-19.06	10.29	13.27
700	3.83	4.72	3.43	-13.31	-22.09	12.66	14.94
800	4.34	5.71	3.63	-14.88	-25.12	14.65	16.13
900	4.85	6.85	3.77	-16.39	-28.15	16.28	16.86
1000	5.36	7.95	3.85	-17.86	-31.18	17.57	17.16
1100	5.88	9.06	3.88	-19.29	-34.21	18.53	17.08
1200	6.40	10.15	3.86	-20.69	-37.24	19.18	16.65
1300	6.91	—	3.78	-22.06	-40.27	19.53	15.92
1400	—	—	—	-23.41	-43.30	19.60	14.94
1600	—	—	—	-26.06	-49.36	18.97	12.42
1800	—	—	—	-28.66	-55.42	17.41	9.52
2000	—	—	—	-31.23	-61.48	15.05	6.67
2200	—	—	—	—	—	12.01	4.30
2400	—	—	—	—	—	8.39	2.87

在 293K 以上通常使用铂丝, 在热电位测量中需要仔细消除杂散电位。所以在用微分法进行测量时, 可扣除试样等温时的背景信号。而用积分法测量时, 则只有在杂散电位为常数或是随温度变化很缓慢时对结果才无影响。

7.4.3 总热电位的测量

为了测量某一温区内材料的平均热电位率, 将待测试样与某一参考电极组成回路, 得到总热电位 E 后, 除以两端的温差 ΔT , 即可得到该温差范围内的平均热电位率。用来测量总热电位的方法通常有定点法、比较法、示差法等。

1. 定点法

(1) 试验原理及定点材料 利用某些高纯物质具有稳定的物态、转变温度和热力学温度所定义的固定温度作为热电位测量的温度点, 而无须使用温度计来确定试样所处的温度。测定试样与参考材料之间的平均相对热电位率, 可作为定点的物质和转变温度, 在热力学温度中都有规定。通常作为热电测量的固定点有: 液氮的沸点 (4.2K)、液氧的沸点 (-182.962°C)、干冰的升华温度 (-78.476°C)、水的三相点 (0.01°C)、水的冰点 (0°C)、水的沸点 (100°C)、锌的凝固点 (419.58°C)、铈的凝固点 (630.755°C)、银的凝固点 (961.93°C)、金的凝固点 (1064.43°C) 和铜的凝固点 (1084.88°C) 等。

(2) 试样 定点试验的试样选用直径 1mm 以下的细丝, 其长约 1.2m, 一端与参考电极 (如铂丝) 的一端焊接成为测量端, 另一端均与铜引线相连作为参考端, 插入冰点器小试管的水银中。试样及参考电极的其余部分必须相互绝缘, 通常在靠近测量端的高温段穿以单孔或双孔的石英或氧化铝绝缘管, 在温度较低的部分套以细塑料软管, 直至水银面。连接铜线只能在水银面下才能与试样及参考电极有电接触。绝缘铜线与测量仪器相连。测量仪器通常用 0.01 级直流电位差计。定点法测量示意如图 7-5 所示。

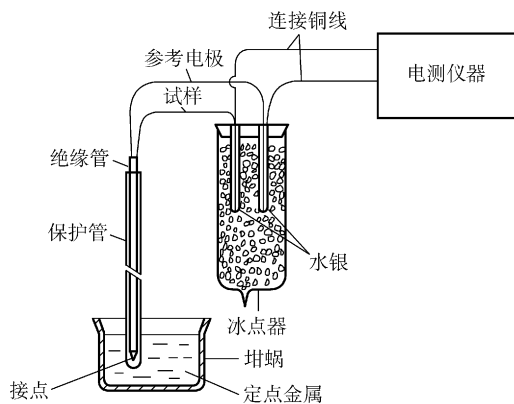


图 7-5 定点法测量示意图

(3) 测量步骤 将试样的测量端插入内径与其相近的石英试管，并把石英试管插入坩埚中，坩埚内有高纯的定点金属（质量分数大于 99.999%）。当坩埚中的纯金属熔化时温度变化很小，继续升温直到其全部熔化，可发现温度随之迅速升高。此时把处于坩埚底部的石英保护管提升 10 ~ 15mm 并固定牢固，大约在高于熔点 10 ~ 15℃ 保温 10min 左右开始降温，当到达凝固点时，出现温度迅速下降而又很快回升的过冷区（各种金属的过冷度是不一样的），然后出现凝固平台，这时即可进行热电位测量了。通常凝固平台可维持 15min 左右，若每隔 30s 读取一个数据即可得到 30 个数据，取其变化不大于 $1\mu\text{V}$ 的连续 8 个读数的平均值，即可得该纯金属凝固温度时试样相对于参考电极的热电位值 E 。当试验完后，必须重新升温使金属熔化，取出石英保护管，然后切断电源，否则在金属冷却时易把石英管挤破。

在定点法测量热电位时，一定要注意保持定点金属不被外界杂质所污染，因此所有与之接触的坩埚、石英保护管等必须要预先清洗处理后才能使用。同时，为了防止高纯金属的氧化，通常在其表面覆盖一层光谱纯石墨粉，如果充以惰性气体进行保护效果更佳。

2. 比较法

使用各种足够精度的温度计测量热端温度，并同步记录试样和参考电极配对的热电位。把待测试样与已知热电特性的标准参考电极（如铂丝）的一端焊接在一起，组成热电偶的测量端，按要求的测试温度置于相应热源中，参考端置于冰点槽内进行测量。由于使用的热源温度在其使用的范围内可以连续改变，因此可以测定各种温度下试样对标准参考电极的热电位。用比较法测定热电位值可以选用 0.02 级直流电位差计或相应等级的数字电压表，其测量回路如图 7-6 所示。为了消除炉温变化的影响，精确测量时常用两台电位差计同时测定待测试样对参考电极的热电位和热电偶的热电位，如图 7-7 所示。

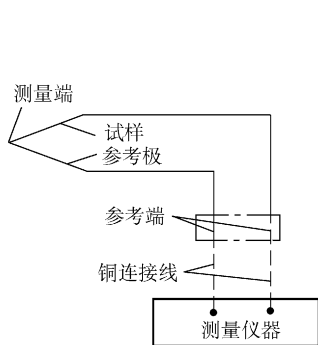


图 7-6 比较法测量热电位示意图

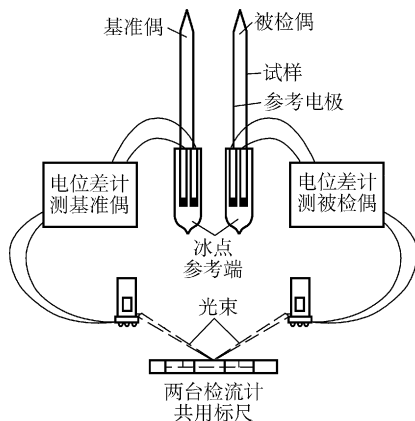


图 7-7 双电位差计测量热电位示意图

若参考电极选用与试样有相似热电特性的次级参考基准,则它与试样组成热电偶所产生的热电势十分微小,且对温度的变化不很敏感,此时无需精确地控制及测定热源的温度就可测定其热电势差值 ΔE ,若要换算到试样与原来标准参考电极之间的热电势值 E ,则必须要预先精确测定次级参考基准与基准参考电极之间在同一温度的热电势值 E_1 ,则有:

$$E = E_1 + \Delta E \quad (7-6)$$

式中 E ——试样与基准参考电极之间的热电势值,单位为 μV ;

E_1 ——基准参考电极与次级参考基准之间的热电势值,单位为 μV ;

ΔE ——次级参考基准与试样之间的热电势差值,单位为 μV 。

应该注意,所使用的次级参考基准,其热电特性也应是比较稳定的,且材质均匀,不能在高于其适用温度以上使用。比较法通常可以同时测定几个试样对同一基准参考电极(或对与试样有相似的热电特性、且经过检定的次级参考基准)的热电势值。此时可用一台无寄生热电势的转换开关,依次将被测试样与参考电极的热电势信号输入到测量仪器。为了减少温度波动的影响,缩短测量时间,可采用数字电压表显示所测量的电动势值。对于多个试样的测量一般必须经过一到两次循环。若有四个试样,则一个循环的次序为:温度计测温→试样₁→试样₂→试样₃→试样₄→试样₄→试样₃→试样₂→试样₁→温度计测温。

3. 示差法

示差法是一种在材料研究和热电分析中广泛应用的热电势测量方法,其原理如图 7-8 所示。将待测试样 B 与参考电极 A 构成两对 A-B 热电偶,并在 O 点反串为示差热电偶。测量时使参考电极的参考端保持恒定温度(如 0°C),而不论 O 点处于什么温度。对于示差热电偶而言,只要 $T_1 \neq T_2$,就会产生热电势。该热电势值就是在稳定热源温度(如 T_2)下温差为 $\Delta T = T_2 - T_1$ 时,试样 B 相对于参考电极 A 的热电势值。作示差测量也必须有稳定的热源,且试样还要处于一定的温差 ΔT 之中,可附加一个小的热源产生 ΔT 。

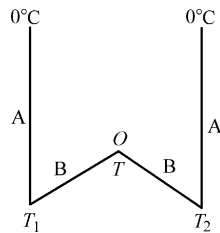


图 7-8 示差法测量热电势的原理

T_1 和 T_2 通常是用两支相同类型且经过单支检定的细支热电偶来确定,热电偶的丝径尽量细,以不扰乱试样的温度场为准。两支测温热电偶可以分别和参考电极一起焊在试样的不同点上。为了得到高的分辨率,可以采用光电放大检流计。测温热电偶的参考端(冷端)应处于保持 0°C 的冰点器中,参考电极的参考端通常也处于冰点器中,以保持温度恒定,如图 7-9 所示。图 7-9 中的转换开关用来切换两支热电偶和两参考电极间的热电势信号,以便依次提供电位差计测量,反向开关则用来确定试样对参考电极的极性。

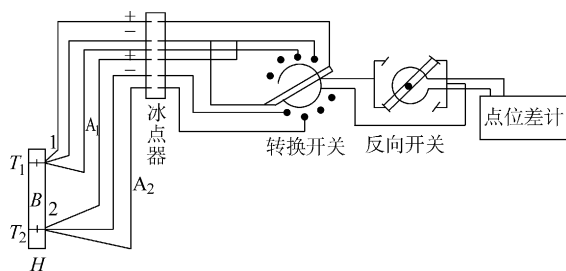


图 7-9 示差法测量热电势示意图

具体测量过程：

- 1) 通过转换开关先用热电偶 1 和 2 测量该处温度 T_1 和 T_2 。
- 2) 测量两参考电极 A_1 、 A_2 间的热电势 E ，即待测材料 B 处于温度 T_2 时，相对于参考电极 A 和温度差 $\Delta T = T_2 - T_1$ 的热电势值。测量时温度由所用的稳定热源确定，可以通过调整小热源来改变，以得到不同温度的热电势值。
- 3) 将所得到的热电势 E 除以 ΔT 即可得到接点两端温差范围内的平均热电势率。

7.4.4 贵金属热电偶丝热电动势的测量

适用于分度号为 S、R 和 B 的热电偶丝在 300 ~ 1700℃ 各段温度范围内的热电动势测量。

1. 试验原理

采用同名极比较法，试验连接电路如图 7-10 所示。

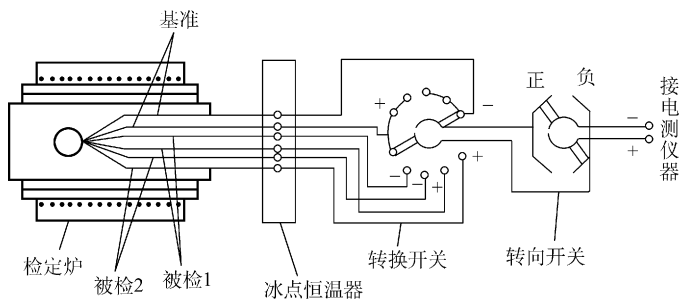


图 7-10 同名极比较法试验连接电路

2. 检验温度点

使用 S、R 和 B 型的热电偶丝，其检验温度点如表 7-10 所示。

表 7-10 检验温度点

热电偶分度号	允差等级	检验温度点/℃
S	I、II	419.527 630.63 1084.62
R	I、II	419.527 630.63 961.78 或(1000) 1084.62
B	II、III	1100 或(1084.64) 1200 1400 1600 或(1553.50)

注：括号内为推荐温度。

3. 试验设备

(1) 标准器 标准器的选择应不低于表 7-11 规定。

表 7-11 标准器检验热电偶丝等级要求

热电偶分度号	检验热电偶丝等级要求		
	I 级允差	II 级允差	III 级允差
S	一等标准铂铑 10-铂热电偶	二等标准铂铑-10 铂热电偶	—
R	一等标准铂铑 10-铂热电偶 或一等标准铂铑 13-铂热电偶	二等标准铂铑 10-铂热电偶 或二等标准铂铑 13-铂热电偶	—
B	—	一等标准铂铑 30-铂铑 6 热电偶	二等标准铂铑 30-铂铑 6 热电偶

(2) 电测仪器 准确度不低于 0.02 级的低电位直流电位差计及其相应的配套装置，或相当于同级准确度的其他电测仪器。

(3) 多点转换开关 其寄生电位应小于 0.5μV。

(4) 参考端恒温器 一般用冰点器来实现，0℃ 恒温器深度应不低于 200mm，工作区域温度变化不大于 0.1℃。

(5) 检定炉 包括管形检定炉高温管形检定炉。

1) 管形检定炉的炉长约 600mm，常用最高温度为 1100℃，温度最高区域偏离炉中心不得超过 20mm，并有 20mm 左右的均匀温度场，其温度差不大于 1℃。

2) 高温管形检定炉的炉长约 500mm，常用最高温度为 1600℃，温度最高区域偏离炉中心不得超过 20mm，并有 20mm 左右的均匀温度场，其温度差不大于 1℃。

(6) 退火炉 炉长约 1000mm，常用最高温度为 1100℃ 时应有 ±20℃ 的均匀温度场，均匀温度场的长度应大于 400mm，均匀温度场一端与炉口距离应小于 100mm。

4. 试样及其制备

(1) 试样要求 试样长度为 800 ~ 1200mm。

(2) 清洗 将试样放入 30% ~ 50%（体积分数）的盐酸或硝酸溶液中煮沸 15min 或浸泡 1h，取出后再用蒸馏水煮沸数次，直至全部清除试样上的酸液为止。

(3) 退火 包括通电退火和稳定化退火。

1) 通电退火。将偶丝悬挂在退火架上通电退火, 铂铱 10 合金丝及铂铱 13 合金丝退火温度为 1400°C (直径为 0.5mm 的偶丝通入电流为 11.5A , 亮度温度为 1250°C), 退火时间为 2h 。铂丝退火温度为 1100°C (直径为 0.5mm 的偶丝通入电流为 10.5A , 亮度温度为 1000°C), 退火时间为 3h 。铂铱 30 合金丝退火温度为 1450°C (直径为 0.5mm 的偶丝通入电流为 12A , 亮度温度为 1250°C), 退火时间为 1.5h 。铂铱 6 合金丝退火温度为 1250°C (直径为 0.5mm 的偶丝, 通入电流为 11A , 亮度温度为 1170°C), 退火时间为 1.5h 。

2) 稳定化退火。S 型、R 型 I 级允许误差偶丝套上清洁绝缘瓷管, 焊接成热电偶后放进退火炉中, 试样从测量端起其 400mm 长的一段应处在 $(1100 \pm 20)^{\circ}\text{C}$ 均匀温度场内, 退火时间为 4h 。

(4) 焊接 先将正、负极偶丝用清洁的双孔高温绝缘瓷管套好, 然后将一端的两极焊成球形的测量端。测量端应表层光洁、牢固、无划痕, 直径为偶丝的 $2 \sim 3$ 倍。

(5) 捆扎 先将被检热电偶与基准热电偶用直径为 $0.3 \sim 0.5\text{mm}$ 铂铱合金丝或铂丝捆扎成束, 捆扎时每束热电偶的总数 (包括基准热电偶) 不应超过 5 支。然后再用直径 $0.2 \sim 0.3\text{mm}$ 清洁铂铱丝或铂丝将其测量端捆扎在一起, 捆扎时被检热电偶与基准热电偶的测量端应在同一垂直平面上。

5. 试验步骤

(1) 装炉 将捆扎好的热电偶束置于管形检定炉中, 使测量端处于炉轴心最高温区, S 型和 R 型热电偶插入深度约为 300mm , B 型热电偶插入深度约为 250mm 。

(2) 热电偶参考端连接导线要求及其连接 将被检热电偶与基准热电偶的参考端插入同一个 0°C 恒温器中, 各参考端之间的温差不超过 0.1°C 。检验时参考端不准使用补偿导线连接, 应直接用同一卷单股铜导线连接。铜导线在 20°C 时的电阻率小于 $0.018\ \mu\Omega \cdot \text{m}$ 。

(3) 参考端与导线连接 先将铜导线两端各剥去约 20mm 绝缘层, 一端连接转换开关, 另一端与热电偶参考端一起插入外径约 7mm 的玻璃管中, 玻璃管内装有约 10mm 左右深的化学纯水银, 使铜导线及热电偶参考端置于水银中, 玻璃管埋入冰水混合物的深度约为 $100 \sim 120\text{mm}$ 。

(4) 测量 同名极比较法测量仅适用于标准热电偶与被检热电偶为同种材料的热电偶。在电路中应使被检的热电极与电测仪器的“+”端相接。当换向开关处在“正”位置时, 测得的组合热电动势值为正, 换向开关处在“负”位置时, 测得的组合热电动势值为负。测量时炉温应控制在检验温度点的 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内, 测量每组热电极的组合热电动势值对于 S 型、R 型热电偶的一级允许误差和 B 型热电偶

的二级允许误差应不少于四次。S 型、R 型热电偶的二级允许误差和 B 型热电偶的三级允许误差应不少于两次，整个测量过程炉内温度变化不得超过 10℃。S 型、R 型热电偶的一级允许误差和 B 型热电偶的二级允许误差，按规定的检验温度点测量完成后测得的数值作为第一次测量数值，然后从炉内取出再按上面的规定重新捆扎测量端，放进检定炉中再按前述相同的测试方法进行第二次测量，测得的数值作为第二次测量数值。其两次测量之差，S、R、B 型热电偶在各检验温度点上应分别小于 5μV、6 μV、8μV，并以两次测量的算术平均值作为检测数值。若两次测量的差值大于上述规定，应重复再检测一次，作为第三次测量数值。在三组数值中选择两组不大于规定的数值的平均值作为检测数值。

6. 数据处理

被检热电偶在各检定点上的热电动势值由下式计算：

$$E_T(\text{被}) = E_T(\text{标}) + E_{TP} - E_{TN} \tag{7-7}$$

式中 $E_T(\text{被})$ ——被检热电偶在温度 T 时的热电动势，单位为 mV；

$E_T(\text{标})$ ——标准热电偶在检定证书上检定点 T 时的热电动势值，单位为 mV；

E_{TP} ——被检热电偶正极与标准热电偶正极在检验温度点 T 时进行比较所测得的热电动势，单位为 mV；

E_{TN} ——被检热电偶负极与标准热电偶正极在检验温度点 T 时进行比较所测得的热电动势，单位为 mV。

7.4.5 廉金属热电偶丝热电动势的测量

1. 检验温度点

廉金属热电偶丝热电动势的检验温度点如表 7-12 所示。

表 7-12 廉金属热电偶丝热电动势的检验温度点

分度号	偶丝直径/mm	试验温度/℃
K 或 N	0.3、0.5	- 79、- 196
	0.3	400、600、700
	0.5、0.8、1.0	400、600、800
	1.2、1.6、2.0、2.5	400、600、800、1000
	3.2	400、600、800、1000、(1200)
E	0.3、0.5	- 79、- 196
	0.3、0.5	100、200、250
	0.8、1.0、1.2	100、300、400
	1.6、2.0、2.5	(100)、300、400、600
	3.2	400、600、700

(续)

分度号	偶丝直径/mm	试验温度/℃
J	0.3、0.5	100、200、250
	0.8、1.0、1.2	100、200、400
	1.6、2.0	(100)、300、400、500
	2.5、3.2	(100)、300、400、600
T	0.2、0.3、0.5	-79、-196
	0.2、0.3、0.5、0.8	100、200
	1.0、1.2、1.6、2.0	100、200、250

注：括号内检验温度根据具体要求进行测量。

2. 试样

(1) 试样要求 试样长度为 800 ~ 1100 mm。

(2) 校直、清洗、穿绝缘瓷珠 将试样校直，用砂纸清除试样两端约 20mm 长的表面氧化层。再用清洁的双孔（或单孔）瓷珠穿成约 500mm 长的一段，其测量端露出 40mm 左右，尾部穿塑料套管并使其端部露出 20mm 左右，以连接参考端引线。

(3) 焊接 针对双极比较法测量和单极比较法测量有两种不同的焊接方式。

1) 双极比较法测量。将同种规格的正、负极偶丝焊接成热电偶，焊点表面应光洁、牢固、无划痕。

2) 单极比较法测量。将被检热电偶丝与参考铂丝焊在一起，焊接时直径为 3.2mm 的偶丝其总数不应超过 7 根（包括参考铂丝），直径小于 2.5 mm（含 2.5mm）的偶丝其总数不应超过 9 根（包括参考铂丝）。焊点表面应光洁、牢固、无划痕。

(4) 退火 对于一级公差和二级公差的偶丝应进行退火（三级公差不退火），将已焊接成的热电偶或热电偶束放进热电偶退火炉或检定炉内退火 2h。退火温度为被检热电偶最高检验点的温度。

(5) 捆扎 300℃ 以下各点的检验中试样的捆扎由水槽、油槽及低温槽的结构确定。300℃ 以上各点的检验按下述规定：

1) 双极比较法。选择基准铂铑 10-铂热电偶后，将基准热电偶套上高铝保护管，与已退火的被检热电偶用细镍铬丝或偶丝捆扎成束。捆扎时，应将被检热电偶的测量端围绕基准热电偶的测量端均匀分布一周，并处于同一垂直平面上。捆扎成束的热电偶总数，包括基准在内不应超过 5 支。

2) 单极比较法。选择标准铂铑 10-铂热电偶后，用细镍铬丝或偶丝将已退火的被检热电偶束与基准热电偶捆扎在一起，且测量端均处于同一垂直平面上。

3. 试验步骤

(1) 装炉 0℃以下各点的检验在液氮槽、干冰槽或低温槽中与基准器进行比较,插入深度应不小于200 mm。300℃以下各点的检验在水槽或油槽中与基准器进行比较,插入深度应不小于200mm。300℃以上各点的检验在管形检定炉中与基准铂铑10-铂热电偶进行比较,插入深度约300mm。调整好插入方向,炉口处沿热电偶束周围用绝热材料封堵。

(2) 热电偶参考端连接导线要求及其连接 将被检热电偶与基准热电偶的参考端插入同一个冰点恒温器中,各参考端之间的温差不得超过0.1℃。检验时参考端不准使用补偿导线连接,应直接用同一卷单股铜导线连接。铜导线在20℃时的电阻率应小于 $0.018\mu\Omega \cdot m$ 。参考端与导线的连接;先将铜导线一端各剥去约20mm的绝缘层,一端连接转换开关,另一端与热电偶参考端连接,连接时接触要良好,然后将被检热电偶和标准热电偶的参考端置于装有变压器油的玻璃试管中(或塑料管)再插入冰点恒温器内,插入深度应不小于200mm。

4. 数据处理

不论是双极比较法还是单极比较法测量,都要采用下式将热电偶的热电势进行修正,以得到各检验点的热电势:

$$E_T(\text{被}) = E'_T(\text{被}) + \frac{E_T(\text{标}) - E'_T(\text{标})}{S_T(\text{标})} \times S_T(\text{被}) \quad (7-8)$$

式中 $E_T(\text{被})$ ——修正到检验温度点 $T^\circ\text{C}$ 时的热电动势值,单位为 mV;

$E'_T(\text{被})$ ——被检热电偶在检验温度点 $T^\circ\text{C}$ 时测得的热电动势值,单位为 mV;

$E_T(\text{标})$ ——标准热电偶证书上检定温度点 $T^\circ\text{C}$ 时的热电动势值,单位为 mV;

$E'_T(\text{标})$ ——标准热电偶在检验温度点 $T^\circ\text{C}$ 时测得的热电动势值,单位为 mV;

$S_T(\text{标})$ ——标准热电偶在检验温度点 $T^\circ\text{C}$ 时的热电势率,单位为 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$;

$S_T(\text{被})$ ——被检热电偶在检验温度点 $T^\circ\text{C}$ 时的热电率,单位为 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

7.4.6 贵金属合金对铂及对铜热电动势的测量方法

本节所介绍的方法适用于贵金属及其合金材料在0~300℃温度范围内对铂热电动势的测量,也适合于贵金属及其合金材料在0~200℃温度范围内对铜热电动势的测量。

1. 试验原理

任一材料与充分退火的纯铂丝或纯铜丝配成热电偶,以纯铂丝或纯铜丝为比较电极,在温度($T \sim T_0$)区间每度所具有的热电动势,称为此材料对铂的平均热电

动势 $e_{\text{Pt}(T, T_0)}$ 或对铜平均热电动势 $e_{\text{Cu}(T, T_0)}$ 。

$$e_{\text{Pt}(T, T_0)} = \frac{E_{\text{Pt}(T, T_0)}}{T - T_0}$$

$$e_{\text{Cu}(T, T_0)} = \frac{E_{\text{Cu}(T, T_0)}}{T - T_0}$$

式中 $e_{\text{Pt}(T, T_0)}$ ——被测材料在 $(T \sim T_0)$ 温度区间的对铂热电动势, 单位为 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$;

$e_{\text{Cu}(T, T_0)}$ ——被测材料在 $(T \sim T_0)$ 温度区间的对铜热电动势, 单位为 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$;

$E_{\text{Pt}(T, T_0)}$ ——被测材料在 $(T \sim T_0)$ 温度区间与铂配对的积分热电动势, 单位为 μV ;

$E_{\text{Cu}(T, T_0)}$ ——被测材料在 $(T \sim T_0)$ 温度区间与铜配对的积分热电动势, 单位为 μV ;

T ——热端温度, 单位为 $^\circ\text{C}$;

T_0 ——冷端温度, 单位为 $^\circ\text{C}$, 一般为 0°C 。

2. 材料

(1) 基准电极 采用的铂丝直径为 $0.2 \sim 1\text{mm}$, 长度为 $800 \sim 1000\text{mm}$, 其纯度标志量电阻比 $W(100^\circ\text{C}) \geq 1.3920$, $W(100^\circ\text{C})$ 的测量按照 GB/T 5977—1999 《电阻温度计用铂丝》进行。纯铂丝先用质量分数为 30% 的盐酸溶液煮沸 15min, 取出后用蒸馏水煮沸数次, 直至溶液呈中性为止。将清洗干净的铂丝悬挂在通电退火装置中进行退火, 铂丝退火时表面温度不得低于 1100°C , 时间不得少于 2h。

(2) 铜丝 采用的纯铜丝直径为 $0.2 \sim 1\text{mm}$, 长度为 $800 \sim 1000\text{mm}$, 铜丝纯度不得低于 99.99% (质量分数)。纯铜丝先用无水酒精或丙酮反复擦拭, 擦去表面的污物, 将清洗干净的铜丝放入氢气炉中, 于 $400 \sim 450^\circ\text{C}$ 退火 20 ~ 30min。

3. 试样

(1) 取样 试样为线材时, 其直径在 2mm 以下; 试样为带材或片材时, 将试样剪切成窄条, 其宽度应小于 3mm , 长度为 $800 \sim 1000\text{mm}$ 。

(2) 试样的清洗 试样用无水酒精或丙酮除去表面的污物, 或根据样品需要, 采取适当的方式清洗。

(3) 试样的退火 试样可根据材料的性质和要求, 采用不同的条件进行稳定化热处理。

(4) 试样的制备 把试样一端与纯铂丝 (或纯铜丝) 焊接组成热电偶, 焊点应呈球形, 其大小视材料横断面积而定, 然后套上干净的绝缘套管放入玻璃 (或石英) 保护套管中。

4. 仪器及设备

(1) 电测仪器 电测仪器为准确度不低于0.01级、分辨率不低于 $0.1\mu\text{V}$ 的低电位直流电位差计及其配套装置,或具有同等准确度的相应电测仪器。

(2) 精密恒温槽 恒温槽的控温精度不低于 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,液面有效深度大于300mm。在工作区域内,其纵向和横向温差不大于 0.05°C 。

(3) 二等水银温度计 其测量范围为 $0\sim 200^\circ\text{C}$ 。

(4) 测量端焊接装置 焊接装置应保证焊接时对电极无污染。

(5) 冰点恒温器 用冰块经粉碎加水混合而成,恒温器有效深度应大于300mm。

(6) 退火装置 退火装置包括铂电极通电退火装置和氮气退火炉。

5. 测量步骤

1) 将试样置于精密水银恒温槽中,浸入深度不小于200mm。将试样及纯铂丝(或纯铜丝)的另一端(参考端)与测量导线用水银或类似材料进行可靠连接后插入冰点恒温器内,插入深度约为 $100\sim 200\text{mm}$ 。测量导线的另一端与电位差计连接。测量系统如图7-11所示。

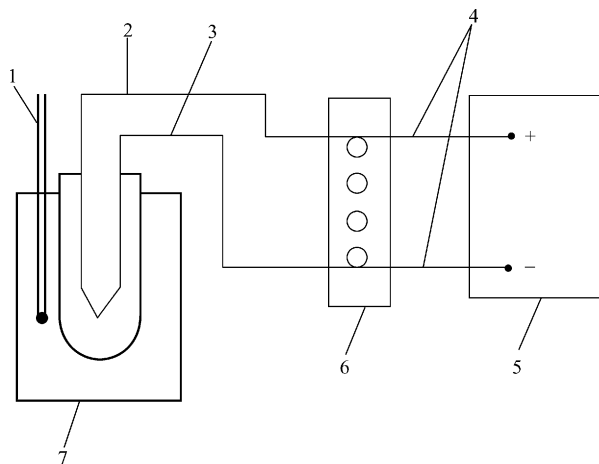


图 7-11 测量装置与试样连接示意图

1—水银温度计 2—被测试样 3—标准电极
4—铜导线 5—电位差计 6—冰点器 7—恒温槽

2) 加热恒温槽中的液态介质,使其逐渐升温到所需要的试样温度,温度值用水银温度计测量。

3) 连接好测量电路,启动电测装置对各设备进行预热。待恒温槽温度稳定及试样处于热平衡状态后开始测量。

4) 每个试样进行测量时必须在电位差计的正、反两个方向进行读数,取其算术平均值作为一次测量值,测量不得少于4次。

6. 结果表述

将测量结果取其平均值作为被测材料在 $T \sim T_0$ 温度区间对铂或对铜的积分热电动势 $e_{\text{Pt}(T, T_0)}$ 和 $e_{\text{Cu}(T, T_0)}$ ，运用公式进行计算，结果保留两位小数。在测量时，纯铂丝或者纯铜丝为负极，被测材料为正极。当所测得的热电动势为正时，说明该材料对铂或铜具有正的热电动势，反之为负。

7. 4. 7 铂铑热电偶细丝热电动势的测量方法

1. 试验方法

(1) 熔丝法 根据纯金属熔化时温度不变和热电偶的中间金属法则，用少量的纯金丝或钼丝缠绕在被测热电偶的测量端上，升温到金丝或钼丝熔化出现平台，测量出被测热电偶的热电动势值，取平台读数的平均值作为测量结果。

(2) 比较法 将基准热电偶和被测热电偶捆扎在一起，在金点（1064.18℃）或钼点（1554.8℃）温度附近进行比较，测量其热电动势值，计算出结果。

2. 材料

(1) 熔丝 金、钼熔丝，纯度不小于 99.99%（质量分数），直径为 0.3mm，清洗干净，退火处理为软态。

(2) 支撑线 铂丝，纯度不小于 99.95%（质量分数），直径为 0.4 ~ 0.5mm，清洗干净。

(3) 捆扎丝 铂丝或铂铑合金丝，直径约为 0.15mm 和 0.25mm。

(4) 热电偶屏蔽保护管 高纯氧化铝管，绕有屏蔽导线。

(5) 热电偶绝缘管 高纯氧化铝毛细管，充分清洗干净。

(6) 清洗试剂 浓盐酸（质量分数为 37%）与水的体积比为 3:7 的盐酸溶液，质量浓度 50 ~ 80g/L 的氢氧化钠溶液。

3. 试样

(1) 取样 在每根被测偶丝的两端各截取 1000 ~ 1200mm 作为测试样品。

(2) 试样清洗 将试样先用氢氧化钠溶液煮沸 5 ~ 10min，用清水冲洗干净，再用盐酸溶液在常温下浸渍 1h 或煮沸 10 ~ 15min，然后再用蒸馏水煮沸充分清洗。

(3) 试样退火 将清洗干净的试样悬挂在通电退火装置中进行通电退火，偶丝在通电退火时应防止空气对流。各种直径偶丝的退火时间及退火电流如表 7-13 所示。

表 7-13 各种直径偶丝的退火时间及退火电流

偶丝直径 /mm	Pt		PtRh10		PtRh13		PtRh6		PtRh30	
	电流 /A	时间 /min	电流 /A	时间 /min	电流 /A	时间 /min	电流 /A	时间 /min	电流 /A	时间 /min
0.5	10.5	180	11.6	120	11.5	120	11.0	120	12.0	9.0

(续)

偶丝直径 /mm	Pt		PtRh10		PtRh13		PtRh6		PtRh30	
	电流 /A	时间 /min	电流 /A	时间 /min	电流 /A	时间 /min	电流 /A	时间 /min	电流 /A	时间 /min
0.10	1.40	90	1.50	60	1.50	60	1.15	90	1.60	60
0.08	1.05	50	1.15	30	1.16	30	1.10	40	1.20	30
0.07	0.90	40	1.00	30	1.00	30	0.95	40	1.05	30
0.06	0.75	30	0.85	20	0.85	20	0.80	30	0.90	20
0.05	0.60	20	0.70	10	0.70	10	0.66	20	0.80	10

(4) 套绝缘管 将退火后的试样和支撑线套上刚玉管，并配对构成热电偶试样。

(5) 熔丝法试样的制备 用直径 0.25mm 铂丝将热电偶试样和支撑线捆扎在一起，并使热电偶试样的测量端靠近支撑线的热端。如果热电偶试样的直径为 0.5mm，制样时可不用支撑线，将金或钯熔丝缠绕在测量端上（缠 4 ~ 6 圈）；套入屏蔽保护管，将热电偶试样的参考端与测量导线进行可靠连接，并插入冰点恒温器内，插入深度约 100 ~ 120mm；测量导线的另一端与电位计连接。

(6) 比较法试样的制备 用直径 0.25mm 的铂丝将基准热电偶、被测热电偶试样和支撑线三者捆扎在一起；用直径 0.15mm 的铂丝将热电偶试样的测量端捆扎在支撑线上，使被测热电偶试样的电极丝整齐地排列在支撑线的周围，并用热电偶焊接装置把捆扎丝、被测热电偶试样和支撑线三者焊接在一起构成测量端，焊点应圆而光滑（焊点直径约为 0.8 ~ 1.2mm）；用直径 0.15mm 的清洁铂丝将标准热电偶和被测热电偶试样的测量端捆扎在一起；将参考端与测量导线进行可靠连接后插入冰点恒温器内，插入深度约 100 ~ 120mm；测量导线的另一端与电位计连接。

4. 试验设备

(1) 低电位直流电位计 准确度不低于 0.01 级及其相应的配套装置或相当于同级准确度的其他电测设备。

(2) 高温炉 高温炉及温度自动调控系统，炉体长度约 500mm，使用温度可达 1600℃。炉的最高温区偏离中心位置不应超过 20mm，其均温区长度应不小于 10mm，温差应在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 之内。

(3) 偶丝通电退火装置 装置应备有稳压电源、准确度不低于 0.05 级的交流电表、电流调控器等。

(4) 热电偶测量端焊接装置（比较法用） 焊接时对热电偶无污染。

(5) 铂铬 30-铂锇 6 基准热电偶（比较法用） 用熔丝法在金点（1064.18℃）和钯点（1554.8℃）温度进行分度，分度值误差应小于 0.5℃。

5. 测量步骤

(1) 测量准备 接通高温炉的电源加热升温, 并控制升温速度, 待炉温升到离测量点温度约 50°C 时, 将制备好的热电偶试样的测量端缓慢地置于炉内最高温区。

(2) 熔丝法测量热电动势 熔丝法测量系统如图 7-12 所示。

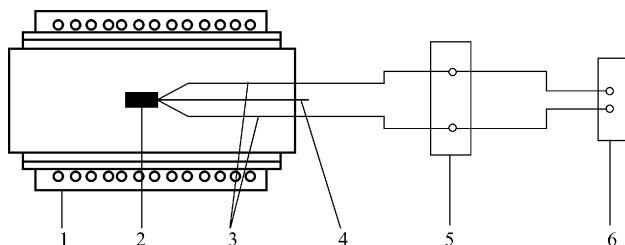


图 7-12 熔丝法测量系统示意图

1—高温炉 2—熔丝 3—被检热电偶试样 4—支撑线 5—冰点恒温器 6—测量仪器

1) 接通电位计测量系统, 测量第一次缠绕在试样测量端上的金或钯丝熔化时的热电动势值, 等炉温升至金或钯熔丝熔化温度前 $5 \sim 10^{\circ}\text{C}$ 时, 升温速度应控制在 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。当温度升到熔丝熔化前 $2 \sim 3^{\circ}\text{C}$ 时, 每隔 15s 测一次, 直到熔丝充分熔完为止。在熔丝整个熔化过程中至少测得 $5 \sim 9$ 个数据, 并记录其读数。

2) 测完第一次熔丝熔化时的热电动势后, 降低炉温取出试样, 剪去一段测量端, 重新缠绕上熔丝构成新的测量端, 重复上述方法测量其热电动势值并记录。

(3) 比较法测量热电动势 比较法测量系统如图 7-13 所示。

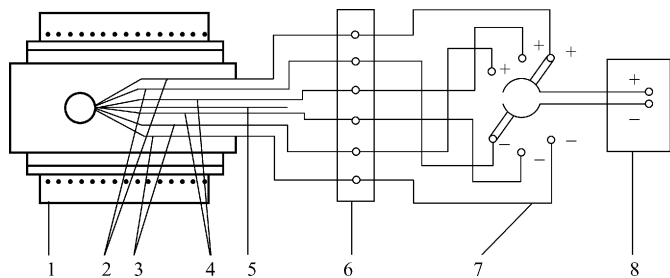


图 7-13 比较法测量系统示意图

1—高温炉 2—标准热电偶 3—被检 2 4—被检 1
5—支撑线 6—冰点恒温器 7—转换开关 8—测量仪器

1) 试样的热电动势在金点 (1064.18°C)、钯点 (1554.8°C) 温度附近测定, 测量时炉温偏离测量点温度不得超过 $\pm 10^{\circ}\text{C}$, 试样在炉内的停留时间不得超过 30min 。

2) 接通电位计测量系统,用电位计分别测量基准热电偶和被测热电偶的热电动势值并记录,测量时炉内温度的变化,每分钟不得超过 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,连续测 3~5 组数据。测量顺序为基→被 1→被 2→被 3→被 4→被 4→被 3→被 2→被 1→基。

3) 测完第一批数据处理后,取出试样,重新焊接测量端,重复上述测量方法,测取第二批数据并记录。

6. 结果表述

(1) 熔丝法测量热电动势读数的舍取 分别在每次熔丝充分熔化时所测得的数据中,取其相邻变差为 $0 \sim 1\mu\text{V}$ 或 $1 \sim 2\mu\text{V}$ (视被测偶丝构成的热电偶微分热电动势的大小而定) 的 4~5 个数据的算术平均值,作为每次的测量结果。取其两次熔丝测量结果的算术平均值,作为被测偶丝构成的热电偶在该分度点的热电动势值的测量结果。

(2) 双极比较法测量结果的计算 被测试样的热电动势用下式表示:

$$E(\text{试})(T) = \bar{E}(\text{试})(T) + \frac{E(\text{基证})(T) - \bar{E}(\text{基})(T)}{S(\text{基})(T)} \times S(\text{试})(T) \quad (7-9)$$

式中 $E(\text{试})(T)$ ——被测试样的热电动势,单位为 mV ;

$E(\text{基证})(T)$ ——基准热电偶检定证书上给出的在检定点 ($T^{\circ}\text{C}$) 时的热电动势值,单位为 mV ;

$\bar{E}(\text{基})(T)$ 、 $\bar{E}(\text{试})(T)$ ——分别为基准和被测试样在金或钯点温度 ($T^{\circ}\text{C}$) 附近测得的热电动势的算术平均值,单位为 mV ;

$S(\text{基})(T)$ 、 $S(\text{试})(T)$ ——分别为基准和被测试样在金或钯点温度 ($T^{\circ}\text{C}$) 时的微分热电动势值,单位为 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 。

金点和钯点热电偶的热电动势值及热电势率如表 7-14 所示。

表 7-14 金点和钯点热电偶的热电动势值及热电势率

温度/ $^{\circ}\text{C}$	热电偶类型					
	铂铑 10-铂		铂铑 13-铂		铂铑 3-铂铑 6	
	$E/\mu\text{V}$	$S/(\mu\text{V}/^{\circ}\text{C})$	$E/\mu\text{V}$	$S/(\mu\text{V}/^{\circ}\text{C})$	$E/\mu\text{V}$	$S/(\mu\text{V}/^{\circ}\text{C})$
金点(1064.18)	10334	11.74	11364	13.5	3434	9.55
钯点(1554.8)	16239	11.95	18219	13.98	10735	11.65

7.4.8 精密电阻合金热电动势率的测试方法

本节所介绍的测试方法适用于精密电阻合金在 $-65 \sim 250^{\circ}\text{C}$ 范围内对铜热电动势率的测量,也适用于其他金属材料在此温度范围内对铜热电动势率的测量。

1. 试样

1) 试样表面应洁净,不允许有裂纹、分层和折叠等缺陷。

2) 试样为线材时, 其直径应小于 4mm。试样为带(片)材时, 其宽度应小于 5mm。

3) 试样长度应能使测量端和参考端容易保持在各自规定的温度之中, 一般取 1200mm。

4) 试样表面如有氧化膜或绝缘层覆盖时, 必须将试样两端氧化物或绝缘层除去。必要时, 可对试样进行退火处理, 以消除加工时产生的应力。

5) 把试样一端与相应丝径的标准电极组成热电偶, 其各自的另一端直接与取材于同一卷的单股铜导线连接在一起。可采用锡焊、铜锌焊、熔焊及捆扎等方法使铜导线、试样及标准电极电接触良好。铜导线在 20℃ 时的电阻率应小于 $0.018 \mu\Omega \cdot m$ 。

2. 基准电极

1) 基准电极可选用基准铂丝或标准铜线。仲裁试验时, 基准电极应选用标准铂丝。

2) 基准电极为基准铂丝时, 在 100℃ 时的电阻 R_{100} 与在 0℃ 时的电阻 R_0 的比值应不小于 1.3920。

3) 基准电极为基准铜线时, 基准铜线与基准铂丝配对组成热电偶, 参考端温度为 0℃, 测量温度为 100℃ 时, 其热电动势应为 $(773 \pm 12) \mu V$ 。

3. 测量装置

1) 测试装置主要由测试仪器、恒温槽、冰点恒温器等组成, 它与试样的连接如图 7-14 所示。

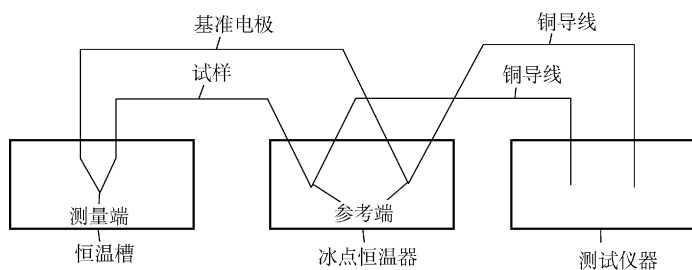


图 7-14 测试装置与试样的连接示意图

2) 热电动势测试仪由不低于 0.5 级低电位直流电位差计及其配套用检流计、标准电池、直流电源和开关等组成。

3) 温度测量仪可用最小分度值为 0.1℃ 二等水银温度计或同等精度的其他温度测量仪。

4) 恒温槽应具有搅拌和自动控温装置。槽内加入足够的液态介质, 在加热或

冷却的同时应充分搅拌，使试样和温度测量仪的测量端所处温区的温度均匀一致。试验温度、温度均匀度、温度波动度及所用介质应符合表 7-15 的要求。

表 7-15 试验温度、介质、温度均匀度和温度波动度

试验温度/℃	介质	温度均匀度/℃	温度波动度/℃
-65 ~ 0	酒精	≤0.2	≤ ±0.2
>0 ~ 100	中性变压器油或硅油	≤0.2	≤ ±0.2
>100 ~ 250	植物油或硅油	≤0.5	≤ ±0.5

5) 冰点恒温器内温度应能保持在 $(0 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 之内。

4. 测量步骤

1) 为了保证测量回路中不含有寄生电位，可预先使试样的测量端和参考端处于同一温度，并在此温度下对热电动势测试仪进行必要的调整，使其显示值为零。

2) 将被测试样与基准电极组成的测量端与温度计插入恒温槽中，使其测温端处于同一水平面。试样插入液体介质中的深度应不小于 200mm。

3) 将被测试样与基准电极组成的参考端及另一根温度计插入冰点恒温器中，插入深度应不小于 200mm。

4) 加热或冷却恒温槽中的液态介质到需要的试验温度，待其稳定后保温 10min，测量顺序为：温度计→试样 1→试样 2→试样 3→试样 4→试样 5→试样 6→试样 6→试样 5→试样 4→试样 3→试样 2→试样 1→温度计。

5. 数据处理

对于每个测试试样，取其测量结果的平均值作为在该试验温度下的热电动势值。如基准电极采用标准铂丝，热电动势值应按照 GB/T 2903—1998 中《铜-铜镍（康铜）热电偶丝》附录 A 的要求换算成该试验温度下的对铜热电动势值。用下式计算出对铜热电动势率：

$$Q = \frac{E_T}{T - T_0} \quad (7-10)$$

式中 Q ——对铜热电动势率，单位为 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ；

E_T ——对铜热电动势，单位为 μV ；

T ——测量端温度，单位为 $^\circ\text{C}$ ；

T_0 ——参考端温度，单位为 $^\circ\text{C}$ ，一般取 0°C 。

7.5 热电偶的热电动势率

1) 热电偶的热电动势率如表 7-16 所示。

表 7-16 热电偶的热电动势率 (单位: $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$)

温度 / $^{\circ}\text{C}$	S 型	K 型			N 型			E 型			J 型			T 型		
	铂铑 10-铂	镍铬 -镍硅	镍铬 -铂	铂- 镍铬	镍铬硅 -镍硅	镍铬硅 -铂	铂- 镍硅	镍铬- 铜镍	镍铬 -铂	铂- 铜镍	铁- 铜镍	铁- 铂	铂- 铜镍	铜- 铜镍	铜- 铂	铜- 铜镍
-196	—	16.00	5.57	10.43	10.64	-1.00	11.46	26.13	5.57	20.56	—	—	—	16.30	-4.26	20.56
-100	—	30.49	18.00	12.49	20.92	8.47	12.45	45.18	18.00	27.18	—	—	—	28.39	1.21	27.18
-79	—	32.92	20.01	12.91	22.55	10.21	12.34	48.46	20.02	28.44	—	—	—	30.77	2.32	28.45
0	—	39.48	25.84	13.64	26.15	15.44	10.71	58.70	25.84	32.86	50.37	17.91	32.46	38.74	5.88	32.86
100	7.33	41.37	30.12	11.25	29.63	19.96	9.67	67.51	30.12	37.39	54.35	17.18	37.17	46.77	9.38	37.39
200	8.46	39.95	32.76	7.19	32.99	22.99	10.00	74.02	32.76	41.26	55.50	14.57	40.93	53.15	11.89	41.26
300	9.14	41.46	34.12	7.34	35.43	24.99	10.44	77.91	34.13	43.78	55.36	11.69	43.67	58.08	14.30	43.78
400	9.57	42.22	34.55	7.67	37.11	26.33	10.78	80.04	34.55	45.49	55.14	9.72	45.42	61.79	16.30	45.49
500	9.89	42.61	34.33	8.28	38.25	27.28	10.97	80.89	34.33	46.56	55.96	9.57	46.39	—	—	—
600	10.19	42.53	33.73	8.80	38.97	28.02	10.95	80.68	33.73	46.95	58.50	11.67	46.83	—	—	—
700	10.54	41.93	32.96	8.97	39.29	28.65	10.64	79.75	32.96	46.79	62.24	11.36	46.88	—	—	—
800	11.87	41.00	32.16	8.84	39.26	29.22	10.04	78.43	32.16	46.27	—	—	—	—	—	—
900	11.20	39.96	31.43	8.53	38.98	29.73	9.25	76.70	31.42	45.28	—	—	—	—	—	—
1000	11.53	38.93	30.75	8.18	38.55	30.17	8.38	74.93	30.75	44.18	—	—	—	—	—	—
1100	11.83	37.84	30.06	7.78	37.98	30.50	7.48	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1200	12.02	36.50	29.18	7.32	37.17	30.71	6.46	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1300	12.12	34.88	27.81	7.07	36.15	30.78	5.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—

2) 热电偶的传递误差如表 7-17 所示。

表 7-17 热电偶的传递误差

热电偶 类型	温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	测量点/ $^{\circ}\text{C}$	准 确 度	
			测量点/ $^{\circ}\text{C}$	内插点/ $^{\circ}\text{C}$
E 型	0 ~ 870	每 100	0.5	1
	0 ~ 870	300、600 及 870	0.5	2
	0 ~ 350	每 100	0.1	0.5
	-160 ~ 0	每 50	0.1	0.5
J 型	0 ~ 760	100、300、500 及 750	0.5	1
	0 ~ 350	每 100	0.1	0.5

(续)

热电偶 类型	温度范围/℃	测量点/℃	准 确 度	
			测量点/℃	内插点/℃
K 型	0 ~ 1250	每 100	0.5	1
	0 ~ 1250	300、600、900 及 1200	0.5	2
	0 ~ 350	每 100	0.1	0.5
	- 160 ~ 0	每 50	0.1	0.5
R 型和 S 型	0 ~ 1450	每 100	0.3	0.5 ~ 1100 及 2 ~ 1450
	0 ~ 1450	600 及 1200	0.3	1 ~ 1100 及 3 ~ 1450
B 型	0 ~ 1700	每 100	0.3	0.5 ~ 1100 及 2 ~ 1700
	0 ~ 1700	600 及 1200	0.3	1 ~ 1100 及 3 ~ 1700
T 型	0 ~ 370	每 100	0.1	0.2
	0 ~ 100	50 及 100	0.05	0.1
	- 160 ~ 0	每 60	0.1	0.2

3) 标准型热电偶的使用范围及允许偏差如表 7-18 所示。

表 7-18 标准型热电偶的使用范围及允许偏差

类型	等 级		
	1	2	3
T 型	(- 40 ~ + 350)℃ ± 0.4% T	(- 40 ~ + 350)℃ ± 0.75% T	(- 200 ~ + 40)℃ ± 1.5% T
K 型	(- 40 ~ + 1000)℃ ± 0.4% T	(- 40 ~ + 1200)℃ ± 0.75% T	(- 200 ~ + 40)℃ ± 1.5% T
R 型与 S 型	(0 ~ + 1600)℃ ± [1 + (T - 1100) × 0.003]℃	(0 ~ + 1600)℃ ± 0.25% T	—

第 8 章 金属材料的磁性参数

磁性是物质的一种固有属性，是一切物质的基本属性之一，它的存在范围很广，小至微观粒子，大至宇宙天体，几乎都存在着磁现象。磁性不只是一个宏观的物理量，而且与物质的微观结构密切相关，它不仅取决于物质的原子结构，还取决于原子之间的键合状况和晶体结构等。因此，研究物质的磁学性能和磁性参数是非常重要的。同时，研究物质的磁学性能也是研究物质内部微观结构的重要方法之一。随着现代科学技术和工业技术的发展，磁性材料的应用越来越广泛，特别是电子技术的发展，对磁性材料提出了新的要求。因此，有关磁性的理论研究，发现新型的磁性材料是材料科学的一个重要方向。

8.1 金属材料磁性的基础知识

8.1.1 磁学特性和磁学术语

1. 一般术语

(1) 磁矩 $m^\ominus$ 表征磁偶极子磁性强弱与力方向的一个轴矢量，其值等于与磁偶极子等效的平面回路的电流 i 与回路面积 S 的乘积，其方向垂直于回路的平面，并且从这个方向观察时电流是顺时针的。

$$m = iS \quad (8-1)$$

式中 m ——磁矩，单位为 $A \cdot m^2$ ；

i ——电流，单位为 A ；

S ——回路面积，单位为 m^2 。

注：

1. 对于非平面回路，可将回路面积投影到各个坐标平面上，于是就得到相应于各个投影面的磁矩分量，这些分量的矢量和 Σm 就是总磁矩。
2. 任意一个由宏观电流回路和磁性材料组成的系统的磁矩，例如一个铁心螺线管的磁矩，是宏观电流回路所产生的磁矩与磁性材料内由带电粒子的轨道运动或自旋所形成的原子磁矩的矢量和；永磁体的磁矩则完全由其本身的原子磁矩产生。
3. 置于磁场中的电流回路所受到的转矩 T 等于这个回路的磁矩 m 与该磁场的磁通密度 B 的矢积， $T = m \times B$ 。

⊖ 由于本书的公式基本都只是研究数量关系，所以对矢量未用黑体区分。

(2) 玻尔磁子 μ_B 常作为原子磁矩的计量单位, 其值等于电子自旋磁矩, 即 $(9.27408 \pm 0.0004) \times 10^{-24} \text{ J/T}$ 。

(3) 磁性常数 μ_0 真空中磁通密度 B 与磁场强度 H 的比值, 又称真空磁导率, 其值等于 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

(4) 磁偶极子 磁偶极子是一个可以用无限小的电流回路来代表的磁性实体。磁性实体可以是任何电流回路、带电粒子的轨道运动或它们的任意组合, 如一个磁化的物体等。

(5) 磁偶极矩 j 磁性常数 μ_0 与磁矩 m 的乘积, 单位为 $\text{Wb} \cdot \text{m}$ 。

(6) 磁极化强度 J 是一个与所取材料的体积相关的矢量, 其值等于材料体积内的总磁偶极矩 $\sum j$ 与相应体积 V 之比, 单位为 Wb/m^2 。

(7) 磁动势 F_m 磁动势又称磁通势, 是磁场强度 H 沿一闭合曲线 l 的线积分, 单位为 A 。

(8) 磁阻 R_m 磁动势 (磁通势) F_m 与对应的磁通量 Φ 之比, 单位为 H^{-1} 。

(9) 磁导 A 磁阻的倒数, 单位为 H 。

(10) 磁阻率 $1/\mu$ 磁导率的倒数。

(11) 磁致伸缩 磁致伸缩是指磁性材料或磁性物体由于磁化状态的改变所引起的弹性形变现象。

(12) 纵向磁致伸缩系数 λ_l 当磁化场从零增加到指定值 (通常到饱和值) 时, 铁磁体沿磁场方向长度的相对变化由下式给出:

$$\lambda_l = \frac{\Delta l_l}{l_l} \quad (8-2)$$

式中 Δl_l ——铁磁体沿磁场方向长度的改变量, 单位为 m ;

l_l ——铁磁体沿磁场方向的长度, 单位为 m 。

(13) 横向磁致伸缩系数 λ_T 当磁化场从零增加到指定值 (通常到饱和值) 时, 铁磁体沿垂直磁化方向长度的相对变化由下式给出:

$$\lambda_T = \frac{\Delta l_T}{l_T} \quad (8-3)$$

式中 Δl_T ——铁磁体沿垂直磁场方向长度的改变量, 单位为 m ;

l_T ——铁磁体沿垂直磁场方向的长度, 单位为 m 。

(14) 抗磁性 在外磁场作用下, 原子系统获得或倾向于获得与磁场方向相反的磁矩的现象。

(15) 顺磁性 在原子尺度上磁矩受到热扰动的影响, 以致在没有外加磁场时这些磁矩是无规则分布的, 当加上外磁场时这种磁矩就获得或趋向于获得与外磁场相同方向排列的现象。

(16) 铁磁性 由于邻近原子的相互作用, 原子磁矩近似地沿相同方向排列的

现象。

(17) 亚铁磁性 在无外磁场作用时, 邻近原子或离子因相互作用使磁矩处于部分抵消的排列状态, 而具有合磁矩的现象。

(18) 反铁磁性 在无外磁场时, 邻近的同种原子或离子因相互作用, 其磁矩处于抵消的排列状态, 使合磁矩为零的现象。

(19) 超顺磁性 铁磁性或亚铁磁性微粒尺寸小于一定值时, 在一定温度下由于热扰动的影响, 微粒的行为类似于顺磁性, 这些微粒的集合体将呈现无磁滞的现象。

(20) 居里温度 T_c 居里温度又称居里点, 指铁磁性或亚铁磁性材料与顺磁性之间的转变温度, 当低于此温度时, 材料是铁磁性或亚铁磁性的, 而高于此温度时是顺磁性的。

(21) 抵消温度 T_c 抵消温度又称抵消点, 某些亚铁磁性材料在居里温度以下时, 各原子磁矩互相抵消使自发磁化强度为零的温度。

(22) 奈耳温度 T_N 奈耳温度又称奈耳点, 指反铁磁性材料与顺磁性之间的转变温度, 当低于此温度时材料是反铁磁性的, 而高于此温度是顺磁性的。

(23) 磁各向异性 相对于物体中一个给定的参考系, 在不同方向上物体具有不同磁性的现象。

(24) 磁晶各向异性 磁晶各向异性又称晶体磁各向异性, 是指磁性单晶体由于晶体结构上的各向异性所产生的磁各向异性。

(25) 应力磁各向异性 应力磁各向异性又称磁应力各向异性, 是指应力通过磁致伸缩效应在磁体中产生的磁各向异性。

(26) 形状磁各向异性 磁性体的形状为非球形对称时, 由于各方向的自退磁不同而产生的磁各向异性。

(27) 感生磁各向异性 是指由于外部原因所引起的一种永久性或暂时性的磁各向异性。

(28) 单轴磁各向异性 是指只有一个易磁化轴(方向)的磁各向异性。

(29) 磁各向异性能 E_a 无应力的球形磁性体沿某一方向由磁中性状态磁化到饱和时, 单位体积所需要的能量, 称该方向的磁各向异性能, 单位为 J/m^3 。

(30) 磁各向异性常数 K 表示磁性体磁各向异性强弱的参数, 它与磁性体难磁化方向(轴)的磁各向异性能成正比, 单位为 J/m^3 。

(31) 磁织构 多晶磁性材料中一种形成磁各向异性的结构有序排列。

(32) 磁通密度 B 磁通密度又称磁感应强度, 是一种无散轴矢量, 空间任意一点上磁场的大小和方向由该点的磁通密度决定。它是描述磁场强弱和方向的基本物理量, 磁场中某点的磁感应强度, 等于放在该点与磁场方向垂直的通电导线所受的磁场作用力 F 与导线中的电流 I 和导线长度 L 乘积的比。该点的磁场方向就是磁

感应强度的方向。对均匀磁场，磁感应强度也可以用单位面积上的磁通量来表示。磁通密度按下式计算：

$$B = F/IL \quad \text{或} \quad B = \Phi/S \quad (8-4)$$

式中 B ——磁感应强度，单位为 T；

F ——磁场作用力，单位为 N；

I ——导线中的电流，单位为 A；

L ——导线长度，单位为 m；

Φ ——磁通量，单位为 Wb；

S ——截面积，单位为 m^2 。

(33) 磁通量 Φ 磁通量是磁通密度的面积分，单位为 Wb。

(34) 磁化强度 M 磁化强度是一个与所取材料体积相关的矢量，其值等于材料体积内的总磁矩 $\sum m$ 与相应体积 V 的比值，单位为 A/m。如果对整个体积求和，就可得到整个物体的磁矩，物体各处的磁化强度一般是不相同的，因此任何位置上的磁化强度可以通过对该处的小体积求和而得。

(35) 饱和磁化强度 M_s 在给定温度下，给定材料所能达到的磁化强度的最大值。在某些情况下饱和磁化强度随外部磁化场的增大而增加，其极限值即为该材料的自发磁化强度，单位为 A/m。

(36) 比饱和磁化强度 σ_s 比饱和磁化强度是饱和磁化强度与材料密度的比值，单位为 $\text{A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 。

(37) 磁场强度 H 磁场强度是与磁场中任意点的磁通密度相关联的一个轴矢量，单位为 A/m，按下式计算：

$$H = \frac{B}{\mu_0} - M \quad (8-5)$$

式中 B ——磁感应强度，单位为 T；

μ_0 ——磁性常数，其值为 $4\pi \times 10^{-7}$ ，单位为 H/m；

M ——磁化强度，单位为 A/m。

(38) 比磁化强度 σ 比磁化强度是在给定磁场强度下磁化强度与材料密度的比值，单位为 $\text{A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 。

(39) 磁结构 磁结构又称序磁性，是指磁性物质由于邻近原子或离子的相互作用，相邻原子磁矩呈一定的有序规则的排列。

(40) 变磁性 变磁性是指磁性物质由于磁场或温度的变化所引起的磁结构的改变。

(41) 混磁性 混磁性是指较多的原子磁矩冻结的磁性原子团无规则地分布在非磁性原子基体中呈现的磁结构。

(42) 磁共振 磁共振是指磁矩不为零的原子核，在外磁场作用下自旋能级发

生蔡曼分裂，共振吸收某一频率的射频射的物理过程。

(43) 磁电阻效应 磁电阻效应是由一外加磁场而引起电阻变化的效应。

(44) ΔE 效应 材料受磁化场强度或磁化强度的改变而引起的弹性模量的变化。

2. 磁化状态

(1) 磁滞 磁通密度（磁化强度）随磁场强度的变化而发生的不可逆变化的现象，这种现象的呈现与变化速度无关。

(2) 磁中性状态 磁性材料或磁性体在比磁畴尺寸大得多的任何区域内总磁通密度和磁场强度均等于零的一种状态。

(3) 无磁滞状态 无磁滞状态是在静磁场上叠加一消磁交变场后而获得的一种状态，该消磁交变场的振幅开始时能使材料达到饱和然后逐渐下降到零。

(4) 磁化曲线 材料中磁通密度、磁极化强度或磁化强度随磁场强度的变化而变化的一条曲线。当需要说明磁通密度 B 、磁极化强度 J 或磁化强度 M 随磁场强度 H 的变化各曲线之间的区别时，可用 $B-H$ 曲线、 $J-H$ 曲线或 $M-H$ 曲线表示。

(5) 磁饱和 磁性材料受到足够强的外磁场作用，磁极化强度或磁化强度基本上不再随外磁场的增加而继续增加的状态。

(6) 饱和磁通密度 B_s 磁性材料磁化到饱和时的磁通密度，单位为 T。

(7) 剩余磁通密度 B'_r 磁性材料中当外加磁场强度（包括自退磁场强度）为零时的磁通密度，单位为 T。

(8) 顽磁 B_r 用单调变化的磁场从材料的饱和状态出发而得到的剩余磁通密度值，单位为 T。

(9) 循环顽磁 B_{rc} 对应于动态饱和回线上的剩余磁通密度值，单位为 T。

(10) 剩磁比 R'_r 剩磁比是指在指定的磁场强度下剩余磁通密度 B'_r 与该磁场下最大磁通密度 B_m 之比。

(11) 矫顽场强度 H'_{cb} 矫顽场强度是磁通密度 B 为零时的磁场强度，单位为 A/m。

(12) 矫顽力 H_{cb} 矫顽力是用单调变化的磁场从材料磁饱和状态出发而得到的矫顽场强度，单位为 A/m。

(13) 磁畴 磁畴是指磁性材料内自发磁化区域，在该区域内自发磁化强度在大小与方向上基本是均匀的。

(14) 热剩余磁化强度 热剩余磁化强度是指物体在磁场中冷却而得到的剩余磁化强度，单位为 A/m。

(15) 温度系数 α 温度系数是指由于温度变化而引起被测参量的相对变化与温度变化之比，包括磁导率的温度系数 α_μ 、有效磁导率的温度系数 $\alpha_{\mu e}$ 和电感的温度系数 α_L 。

3. 磁导率与损耗

(1) 磁化率 χ 磁化率是与磁场强度 H 相乘等于磁化强度 M 的一个量。

(2) 起始磁化率 χ_i 起始磁化率是当磁场强度和磁化强度均为无限小时磁化率的极限值。

(3) 比磁化率 χ_m 比磁化率是与磁场强度 H 相乘等于比磁化强度 σ 的一个量, 单位为 m^3/kg 。

(4) 绝对磁导率 μ 绝对磁导率是物质的磁通密度 B 与磁场强度 H 的比值, 单位为 H/m 。

(5) 相对磁导率 μ_r 相对磁导率是物质的绝对磁导率 μ 与磁性常数 μ_0 的比值。

(6) 微分磁导率 μ_d 微分磁导率是与 B - H 曲线上某一点的斜率相对应的磁导率, 单位为 H/m , 按下式计算:

$$\mu_d = \frac{dB}{dH} \quad (8-6)$$

(7) 最大磁导率 μ_m 最大磁导率是对应基本磁化曲线上各点磁导率的最大值, 单位为 H/m 。

(8) 电感磁导率 μ_L 对于在对称反复磁化条件下励磁的材料, 其电感磁导率是由代表磁性试样的电路中测得电感分量而计算得出的。这里假设此电路是由线性电感元件与电阻元件并联组成的, 单位为 H/m 。

(9) 磁性材料的总损耗 P_t 磁性材料的总损耗是磁性材料从随时间变化的电磁场中吸收的并以热的形式耗散的功率, 单位为 W 。

(10) 总损耗密度 P 在均匀磁化的材料中, 总损耗与物体的质量之比称为总损耗密度, 单位为 W/kg 。

(11) 涡流损耗 P_E 由于涡流而被材料耗损的功率称为涡流损耗, 单位为 W 。

(12) 磁滞损耗 P_H 由于磁滞而被材料耗损的功率称为磁滞损耗, 单位为 W 。

(13) 比磁滞损耗 P_h 在均匀磁化材料中, 磁滞损耗与材料的质量之比称为比磁滞损耗, 单位为 W/kg 。

(14) 剩余损耗 P_R 总损耗减去涡流损耗和磁滞损耗后所剩余的损耗, 单位为 W 。

(15) 损耗角 δ 磁通密度和磁场强度基波分量之间的相位差称为损耗角, 单位为 $(^\circ)$ 。

(16) 品质因数 Q 品质因数是损耗角正切值的倒数。

(17) 有效品质因数 Q_e 有效品质因素是含有磁心的线圈的损耗角正切值的倒数。

(18) 材料磁滞常数 η_B 磁性材料在瑞利区域内由磁滞引起的损耗因数与磁通密度峰值之比称为材料磁滞常数, 单位为 T^{-1} 。

4. 磁性体

(1) 磁阻系数 α_{RH} 永磁体的磁动势与工作气隙中磁位降之比称为磁阻系数，磁位降是指沿工作气隙磁路中磁场强度的线积分。

(2) 漏磁通 φ_L 漏磁通是指没有经过主磁路的那部分磁通，单位为 Wb。

(3) 漏磁系数 α_ϕ 总磁通与有用磁通之比称为漏磁系数。

(4) 磁能积 在永磁体退磁曲线的任意点上的磁通密度 B 与对应的磁场强度 H 的乘积称为磁能积。它是表征永磁材料单位体积对外产生的磁场中总储存能量的一个参数。在退磁曲线上得到的最大值称最大磁能积 $(BH)_{\max}$ ，单位为 kJ/m^3 。

(5) 磁能积曲线 以永磁体退磁曲线上各点的 BH 积值为横坐标，以对应点的磁通密度 B 为纵坐标而作出的曲线称为磁能积曲线。若用图表示通常将退磁曲线画在纵轴的左边（第二象限），而将 BH 积曲线画在纵轴的右边（第一象限）。

8.1.2 磁性材料的分类

以矫顽力大小作为分类依据，磁性材料主要分为两类：软磁材料（矫顽力不大于 1kA/m ）和永磁（硬磁）材料（矫顽力大于 1kA/m ），其具体分类及代号如表 8-1 和表 8-2 所示。

表 8-1 软磁材料的分类及代号

代号	大类	小代号	小类	细分类代号	细分类
A	铁	—	—	—	—
B	低碳软钢	B. 1	整体材料	—	—
		B. 2	扁平材料	—	—
C	硅钢材料	C. 1	整体材料	—	—
		C. 2	扁平材料	C. 21	在工频下使用的各向同性钢
				C. 22	在工频下使用的各向异性钢
				C. 23	薄硅钢片
				C. 24	具有规定力学性能和规定比总损耗的钢
				C. 25	$w(\text{Si})$ 为 6.5% 的硅钢
D	其他钢	D. 1	整体材料	D. 11	铸造整体钢
				D. 12	锻造整体钢
		D. 2	扁平材料	—	—
		D. 3	不锈钢	—	—

(续)

代号	大类	小代号	小类	细分类代号	细分类
E	铁镍合金	E. 1	$w(\text{Ni})$ 为 72% ~ 83% 的铁镍合金	—	—
		E. 2	$w(\text{Ni})$ 为 54% ~ 68% 的铁镍合金	—	—
		E. 3	$w(\text{Ni})$ 为 45% ~ 50% 的铁镍合金	—	—
		E. 4	$w(\text{Ni})$ 为 35% ~ 40% 的铁镍合金	—	—
		E. 5	$w(\text{Ni})$ 为 29% ~ 33% 的铁镍合金	—	—
F	铁钴合金	F. 1	$w(\text{Co})$ 为 47% ~ 50% 的铁钴合金	—	—
		F. 2	$w(\text{Co})$ 为 35% 的铁钴合金	—	—
		F. 3	$w(\text{Co})$ 为 23% ~ 27% 的铁钴合金	—	—
G	其他合金	G. 1	铁铝合金	—	—
		G. 2	铁铝硅合金	—	—
H	以粉末冶金工艺生产的软磁合金	H. 1	软磁铁氧化物	—	—
		H. 2	烧结软磁材料	—	—
		H. 3	粉末成型材料	—	—
I	非晶软磁材料	I. 1	铁基合金	—	—
		I. 2	钴基合金	—	—
		I. 3	镍基合金	—	—

表 8-2 永磁材料的分类及代号

代号	大类	小代号	小类
Q	磁致伸缩合金	Q. 1	稀土铁合金
R	永磁合金	R. 1	铝镍铁钴钛合金
		R. 3	铁钴钕铬合金
		R. 5	稀土钴合金
		R. 6	铁铬钴合金
		R. 7	稀土铁硼合金

(续)

代号	大类	小代号	小类
S	永磁陶瓷	S. 1	永磁铁氧体
T	其他永磁材料	T. 1	马氏体钢
U	粘结硬磁材料	U. 1	粘结铝镍钴铁钛磁体
		U. 2	粘结稀土钴磁体
		U. 3	粘结钕铁硼磁体
		U. 4	粘结永磁铁氧化

1) A 类软磁材料磁性能规定值如表 8-3 所示。

表 8-3 A 类软磁材料磁性能规定值

最大矫顽力 /(A/m)	H 为下列各值时的最低磁极化强度/T			最低饱和 磁极化强度 ^①
	300A/m	500A/m	4kA/m	
12 ~ 240	1.30 ~ 1.15	1.40 ~ 1.30	1.6	2.10 ~ 2.15

① 此值不是规定值而是典型值。

2) B. 1 类软磁材料磁性能和力学性能的典型值如表 8-4 所示。

表 8-4 B. 1 类软磁材料磁性能和力学性能的典型值

屈服强度 /(N/mm ²)	伸长率 (%)	矫顽力 /(A/m)	H 为下列各值时的磁极化强度/T		
			2500A/m	5000A/m	10000A/m
100 ~ 180	25 ~ 45	40 ~ 400	1.55 ~ 1.65	1.65 ~ 1.75	1.75 ~ 1.85

3) B. 2 类软磁材料最大比总损耗规定值如表 8-5 所示。

表 8-5 B. 2 类软磁材料最大比总损耗规定值

公称厚度/mm	频率/Hz	J = 1.5T 时的比总损耗范围/(W/kg)
0.50	50	6.6 ~ 10.5
0.65	50	8.0 ~ 12.0
0.50	60	8.4 ~ 13.4
0.65	60	10.2 ~ 15.3

4) C. 1 类软磁材料磁性能和电性能规定值如表 8-6 所示。

表 8-6 C. 1 类软磁材料磁性能和电性能规定值

硅含量 ^① (质量分数,%)	电阻率 ^① /(μΩ·m)	矫顽力 /(A/m)	H 为下列各值时的最低饱和磁极化强度/T			
			100A/m	300A/m	500A/m	4000A/m
2 ~ 4.5	0.35 ~ 0.60	12 ~ 48	0.6 ~ 1.2	1.1 ~ 1.3	1.2 ~ 1.35	1.5

① 所列不是规定值而是典型值。

5) C. 21 类软磁材料最大比总损耗规定值如表 8-7 所示。

表 8-7 C. 21 类软磁材料最大比总损耗规定值

公称厚度/mm	频率/Hz	$J = 1.5\text{T}$ 时的比总损耗/(W/kg)
0.35	50	2.3 ~ 3.6
0.50	50	2.5 ~ 10
0.65	50	3.1 ~ 10
1.00	50	6.0 ~ 13
0.35	60	2.9 ~ 4.6
0.50	60	3.2 ~ 11.9
0.65	60	4.1 ~ 12.8
1.00	60	8.1 ~ 17.3

6) C. 22 类软磁材料最大比总损耗规定值如表 8-8 所示。

表 8-8 C. 22 类软磁材料最大比总损耗规定值

公称厚度 /mm	常规材料		高磁导率材料	
	最大比总损耗/(W/kg)			
	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz
	J = 1. 7T		J = 1. 7T	
0. 23	1. 20 ~ 1. 27	1. 57 ~ 1. 65	0. 90 ~ 1. 00	1. 21 ~ 1. 32
0. 27	1. 30 ~ 1. 40	1. 68 ~ 1. 85	1. 03 ~ 1. 10	1. 35 ~ 1. 45
0. 30	1. 40 ~ 1. 50	1. 83 ~ 1. 98	1. 05 ~ 1. 17	1. 38 ~ 1. 54
0. 35	1. 50 ~ 1. 65	1. 98 ~ 2. 18	1. 25 ~ 1. 35	1. 64 ~ 1. 77

7) C. 23 类软磁材料最大比总损耗规定值如表 8-9 所示。

表 8-9 C. 23 类软磁材料最大比总损耗规定值

类型	公称厚度/mm	J 为下列各值时的最大比总损耗/(W/kg)		频率/Hz
		1T	1.5T	
晶粒取向	0.05	24	—	1000
	0.1	—	15	400
	0.15	—	16	400
无取向	0.05	45	—	1000
	0.1	13	—	400
	0.15	14	—	400
	0.2	15	—	400

8) C. 24 类软磁材料厚度为 0.5mm 时的力学性能和磁性能的典型值如表 8-10 所示。

表 8-10 C. 24 类软磁材料厚度为 0.5mm 时的力学性能和磁性能的典型值

屈服强度 (L)/(N/mm ²)	$J=1.5\text{T}$ 和 $f=50\text{Hz}$ 时的比总损耗 ($L+C$)/(W/kg)	$H=5\text{kA/m}$ 时的磁极化强度 ($L+C$)/T	叠装系数 (%)
470	4.6	1.69	98.0
620	6.7	1.63	98.0

注: L 为平行于轧制方向; C 为垂直于轧制方向。

9) C. 25 类软磁材料磁性能典型值如表 8-11 所示。

表 8-11 C. 25 类软磁材料磁性能典型值

公称厚度 /mm	$J=1.0\text{T}$ 时的最大比总损耗 /(W/kg)	相应的频率 /Hz	在 1.0T 和 400Hz 时的磁致伸缩 (峰-峰值)/10 ⁻⁷
0.05	20.0	1000	1.2
0.10	6.0	400	1.2
0.20	8.0	400	1.2
0.30	10.0	400	1.2

10) D. 11 类软磁材料磁性能和力学性能的典型值如表 8-12 所示。

表 8-12 D. 11 类软磁材料磁性能和力学性能的典型值

屈服强度 /(N/mm ²)	抗拉强度 /(N/mm ²)	伸长率 (%) $L_0=5.65\sqrt{S_0}$	冲击吸收功 /J	当 H 为下列各值时的磁极化强度/T		
				2500A/m	5000A/m	10000A/m
200~500	350~700	12~25	20~50	1.30~1.50	1.50~1.65	1.65~1.80

11) D. 12 类软磁材料力学性能的典型值如表 8-13 所示。

表 8-13 D. 12 类软磁材料力学性能的典型值

屈服强度 /(N/mm ²)	抗拉强度 /(N/mm ²)	伸长率 (%)	冲击吸收能量/J V 型缺口试验
200~800	300~1000	12~20	16~136

12) D. 2 类软磁材料热轧产品的力学性能和磁性能的规定值如表 8-14 所示。

表 8-14 D. 2 类软磁材料热轧产品的力学性能和磁性能的规定值

$\sigma_{0.2}$ /(N/mm ²)	抗拉强度 /(N/mm ²)	断裂后最低伸长率 (%) $L_0=80\text{mm}$	H 为下列各值时的最低磁极化强度/T	
			5000A/m	15000A/m
250~700	350~800	10~22	1.46~1.60	1.78~1.80

13) D. 2 类软磁材料冷轧产品的力学性能和磁特性的规定值如表 8-15 所示。

表 8-15 D. 2 类软磁材料冷轧产品的力学性能和磁性能的规定值

$\sigma_{0.2}$ /(N/mm ²)	抗拉强度 /(N/mm ²)	断裂后最低伸长率(%) $L_0=80\text{mm}$	H 为下列各值时的最低磁极化强度/T	
			5000A/m	15000A/m
250 ~ 400	325 ~ 450	10 ~ 16	1.46 ~ 1.60	1.80 ~ 1.83

14) D. 3 类软磁材料磁性能和力学性能的典型值如表 8-16 所示。

表 8-16 D. 3 类软磁材料磁性能和力学性能的典型值

牌号	电阻率 ($\mu\Omega \cdot \text{m}$)	最大相对 磁导率	矫顽力 /(A/m)	当 H 为下列各值时的磁极化强度/T			
				300A/m	500A/m	1000A/m	8000A/m
D31-01	0.55	2000	200	1.2	1.3	1.35	1.6
D31-02	0.55	2000	200	1.2	1.3	1.35	1.6
D31-03	0.75	2000	200	0.95	1.1	1.2	1.45
D31-04	0.75	2000	200	0.95	1.1	1.2	1.45
D31-05	0.75	1300	240	0.5	0.6	0.8	1.1
D31-06	0.75	1300	240	0.5	0.6	0.8	1.1

15) E. 1 类具有圆形磁滞回线软磁材料的规定磁性能如表 8-17 所示。

表 8-17 E. 1 类具有圆形磁滞回线软磁材料的规定磁性能

牌号 ^①	最大矫顽力 ^② /(A/m)	当 $H=0.4\text{A/m}$ 时的最小 振幅相对磁导率 ^③ /10 ³	当 H 为下列各值时的磁极化强度/T				
			20A/m	50A/m	100A/m	500A/m	4A/m
E11	1 ~ 4	10 ~ 30	0.50	0.65	0.70	0.73	0.75

① 可获得在 $H=0.4\text{A/m}$ 时，最小振幅磁导率达到 250000 的改进牌号。

② 仅适合于厚度 $t>0.4\text{mm}$ 的材料。

③ 仅适合于厚度 $0.4\text{mm}\leq t\leq 1.5\text{mm}$ 的材料。

16) E. 1 类具有狭长形磁滞回线软磁材料的典型磁性能如表 8-18 所示。

表 8-18 E. 1 类具有狭长形磁滞回线软磁材料的典型磁性能

饱和磁极化强度 /T	剩余磁极化强度 /T	测量点的磁场强度 的振幅/(A/m)	磁极化强度的振幅 /T	$f=50\text{Hz}$ 时磁极化强度的 静态偏移范围/T
0.74	0.2	1.5	0.22	0.18
0.74	0.15	5	0.44	0.35
0.74	0.1	10	0.44	0.38

17) E. 1 类具有矩形磁滞回线软磁材料的典型磁性能如表 8-19 所示。

表 8-19 E. 1 类具有矩形磁滞回线软磁材料的典型磁性能

饱和磁极化强度/T	矫顽力/(A/m)	剩余磁极化强度/T	最大振幅相对磁导率
0.8	0.8	0.73	250000

18) E. 2 类具有圆形磁滞回线软磁材料的典型磁性能如表 8-20 所示。

表 8-20 E. 2 类具有圆形磁滞回线软磁材料的典型磁性能

牌号	矫顽力/(A/m)	$H=0.4\text{A/m}$ 时的振幅相对磁导率	最大振幅相对磁导率
E21	1.2	50000	110000

19) E. 2 类具有狭长形磁滞回线软磁材料的典型磁性能如表 8-21 所示。

表 8-21 E. 2 类具有狭长形磁滞回线软磁材料的典型磁性能

矫顽力/(A/m)	饱和磁极化强度/T	磁极化强度的静态偏移/T	剩余磁极化强度/T
5~7	1.25~1.5	0.8	0.1~0.2

20) E. 3 类具有圆形磁滞回线软磁材料的规定磁性能如表 8-22 所示。

表 8-22 E. 3 类具有圆形磁滞回线软磁材料的规定磁性能^①

牌号	最大矫顽力 /(A/m)	当 $H=0.4\text{A/m}$ 时的最小 振幅相对磁导率 ^②	当 H 为下列各值时的磁极化强度/T				
			20A/m	50A/m	100A/m	500A/m	4A/m
E31	6~12	4000~10000	0.5	0.9	1.1	1.35	1.45

① 仅适合于厚度 $t>0.4\text{mm}$ 的材料。

② 仅适合于厚度 $0.4\text{mm}\leq t\leq 1.5\text{mm}$ 的材料。

21) E. 3 类具有狭长形磁滞回线软磁材料的典型磁性能如表 8-23 所示。

表 8-23 E. 3 类具有狭长形磁滞回线软磁材料的典型磁性能

矫顽力/(A/m)	饱和磁极化强度/T	磁极化强度的静态偏移/T	剩余磁极化强度/T
7	1.52	1.1	0.08~0.23

22) E. 3 类具有矩形磁滞回线软磁材料的典型磁性能如表 8-24 所示。

表 8-24 E. 3 类具有矩形磁滞回线软磁材料的典型磁性能

饱和磁极化强度/T	矫顽力/(A/m)	剩余磁极化强度/T	最大振幅相对磁导率
1.15~1.60	8~12	1.5~1.57	50000~70000

23) E. 4 类全工艺状态下软磁材料的规定磁性能如表 8-25 所示。

表 8-25 E. 4 类全工艺状态下软磁材料的规定磁性能

牌号 ^③	最大矫顽力 ^② /(A/m)	当 $H=0.4\text{A/m}$ 时的最小 振幅相对磁导率 ^①	当 H 为下列各值时的磁极化强度/T				
			20A/m	50A/m	100A/m	500A/m	4kA/m
E31-02	—	2200	—	—	—	—	—
E31-03	24	2900	0.20	0.45	0.70	1.00	1.18

① 仅适合于厚度 $0.4\text{mm} \leq t \leq 1.5\text{mm}$ 的材料。

② 仅适合于厚度 $t > 0.4\text{mm}$ 的材料。

③ 可获得在 $H=0.4\text{A/m}$ 时的最小振幅相对磁导率达到 9000 的改进牌号。

24) E. 5 类软磁材料典型磁性能如表 8-26 所示。

表 8-26 E. 5 类软磁材料典型磁性能

居里温度/℃	在 0°C 和 $H=10\text{kA/m}$ 时的磁极化强度/T	$H=10\text{kA/m}$ 时的 $\Delta B/\Delta T/(^\circ\text{C/K})$
30 ~ 120	0.15 ~ 0.7	-0.005 ~ -0.007

25) F. 1 类具有圆形磁滞回线软磁材料的规定磁性能如表 8-27 所示。

表 8-27 F. 1 类具有圆形磁滞回线软磁材料的规定磁性能

牌 号	最大矫顽力 /(A/m)	当 H 为下列各值时的磁极化强度/T				
		300A/m	800A/m	1600A/m	4000A/m	8000A/m
F11	60 ~ 240	1.4 ~ 1.8	1.7 ~ 2.1	1.9 ~ 2.2	2.05 ~ 2.25	2.15 ~ 2.25

26) F. 1 类具有矩形磁滞回线软磁材料的典型磁性能如表 8-28 所示。

表 8-28 F. 1 类具有矩形磁滞回线软磁材料的典型磁性能

牌 号	矫顽力/(A/m)	剩余磁通密度/T
F12	20 ~ 40	1.90 ~ 2.10

27) F. 2 类软磁材料规定的磁性能如表 8-29 所示。

表 8-29 F. 2 类软磁材料规定的磁性能

牌 号		最大矫顽力 /(A/m)	当 H 为下列各值时的最小磁极化强度/T			
			4000A/m		8000A/m	
F21	整体材料	300	1.2	1.3	—	—
	带材或片材		1.5	1.6	2.0	2.2

28) F. 3 类软磁材料规定的磁性能如表 8-30 所示。

表 8-30 F.3 类软磁材料规定的磁性能

牌 号		最大矫顽力 /(A/m)	当 H 为下列各值时的最小磁极化强度/T	
			4000A/m	8000A/m
F31	整体材料	300	1.1	1.75
	带材或片材		1.85	2.0

29) H.1 类锰锌铁氧体软磁材料典型性能如表 8-31 所示。

表 8-31 H.1 类锰锌铁氧体软磁材料典型性能

起始相对 磁导率	$f=50\text{kHz}$ 时 相对损耗系数 / 10^{-6}	磁滞材料 系数 /(T^{-1})	磁导率温度 系数 ^① / ($10^{-6}/\text{K}$)	40℃时磁导 率降落系数/ (10^{-6})	$H=1000\text{A/m}$ 时的磁极化 强度/mT	居里温度 /K	电阻率 /($\Omega\cdot\text{m}$)
700 ~ 10000	1 ~ 20	0.8 ~ 2	0 ~ 8	2 ~ 10	300 ~ 480	390 ~ 470	0.05 ~ 5

① 20 ~ 55℃。

30) H.1 类镍锌铁氧体软磁材料典型性能如表 8-32 所示。

表 8-32 H.1 类镍锌铁氧体软磁材料典型性能

起始相对 磁导率	$f=10\text{kHz}$ 时 相对损耗系数 / 10^{-6}	磁滞材料 系数 /(T^{-1})	磁导率温度 系数 ^① / ($10^{-6}/\text{K}$)	40℃时磁导 率降落系数/ (10^{-6})	$H=3000\text{A/m}$ 时的磁极化 强度/mT	居里温度 /K	电阻率 /($\Omega\cdot\text{m}$)
10 ~ 250	100 ~ 400	10 ~ 40	0 ~ 30	< 60	50 ~ 400	520 ~ 770	$10^3 \sim 10^7$

① 20 ~ 55℃。

31) H.2 类软磁材料规定的性能如表 8-33 所示。

表 8-33 H.2 类软磁材料规定的性能

材料	最小密度/(kg/m^3)	最大矫顽力/(A/m)
Fe	6400 ~ 7300	150 ~ 175 ^①
FeP	6800 ~ 7300	110 ~ 150 ^①
FeNi	7600 ~ 8300	8 ~ 20
FeCo	7700	100 ~ 200
FeSi	7200 ~ 7400	50 ~ 80

① 采取特殊的保护措施可获得较低的矫顽力。

32) H.2 类软磁材料典型物理性能和磁性能如表 8-34 所示。

表 8-34 H.2 类软磁材料典型物理性能和磁性能

材料	孔隙度(%)	$H=500\text{A/m}$ 时 的磁极化强度/T	$H=80\text{kA/m}$ 时 的磁极化强度/T	最大相对磁 导率的范围	维氏硬度 /HV5	电阻率 /($\mu\Omega\cdot\text{m}$)
Fe	6 ~ 16	0.7 ~ 1.3	1.55 ~ 1.85	2000 ~ 5500	50 ~ 70	0.12 ~ 0.15

(续)

材料	孔隙度 (%)	$H = 500 \text{ A/m}$ 时的磁极化强度/T	$H = 80 \text{ kA/m}$ 时的磁极化强度/T	最大相对磁导率的范围	维氏硬度 /HV5	电阻率 /($\mu\Omega \cdot \text{m}$)
FeP	5 ~ 10	1.05 ~ 1.35	1.65 ~ 1.85	3400 ~ 6900	95 ~ 105	0.18 ~ 0.20
FeNi	3 ~ 7	0.75 ~ 1.30	0.80 ~ 1.55	20000 ~ 74500	70 ~ 95	0.45 ~ 0.60
FeCo	3	1.50 ~ 1.55	2.15 ~ 2.20	2000 ~ 3900	190 ~ 240	0.10 ~ 0.35
FeSi	2 ~ 4	1.35 ~ 1.40	1.85 ~ 1.95	8000 ~ 9500	170 ~ 180	0.45

33) H. 3 类软磁材料典型物理性能和磁性能如表 8-35 所示。

表 8-35 H. 3 类软磁材料典型物理性能和磁性能

材料	起始相对磁导率	饱和磁极化强度/T	$J = 0.1 \text{ T}$ 和 $f = 1 \text{ kHz}$ 时的总损耗密度/(W/m^3)	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)
Fe 基	10 ~ 90	0.5 ~ 2.0	10 ~ 35	$1 \sim 10^6$
FeNi 基	10 ~ 500	0.5 ~ 1.5	3 ~ 15	$1 \sim 10^4$

34) I. 1 类软磁材料典型物理性能和磁性能如表 8-36 所示。

表 8-36 I. 1 类软磁材料典型物理性能和磁性能

材料	$J = 1.4 \text{ T}$ 和 $f = 50 \text{ Hz}$ 时的比总损耗/(W/kg)	$J = 1.4 \text{ T}$ 和 $f = 50 \text{ Hz}$ 时的比视在功率/(VA/kg)	矫顽力/(A/m)	$H = 800 \text{ A/m}$ 时的磁极化强度/T	结晶温度 / $^{\circ}\text{C}$	电阻率/($\text{M}\Omega \cdot \text{m}$)	密度/(kg/m^3)	叠装系数 (%)
Fe92Si5B3	0.2	1.0	3	1.55	550	1.2	7200	80 ~ 85

35) Q 类永磁材料典型物理性能如表 8-37 所示。

表 8-37 Q 类永磁材料典型物理性能

H 为下列各值 时的弹性模量 $\diagup (10^4 \text{ N/mm}^2)$		H 为下列 各值时的 声速 (km/s)		抗拉 强度/ (N/mm^2)	抗压 强度/ (N/mm^2)	在饱和状态 下的磁致 伸缩应变 (%)	耦合 系数	居里 温度 /K	$H = 80 \text{ kA/m}$ 时 的相对磁导率	
									试样	
O	$H_o^{\text{①}}$	O	$H_o^{\text{①}}$						自由态	固定态
2.65	5.50	1.69	2.45	28	700	0.15 ~ 0.20	0.72	660	9.3	4.5

① H_o 是试验时的磁场强度, 通常 $H_o < 240 \text{ kA/m}$ 。

36) R. 1 类永磁材料规定的磁性能如表 8-38 所示。

表 8-38 R. 1 类永磁材料规定的磁性能

类 别		最大磁能积 (BH) _{max} /(kJ/m ³)	剩余磁通密度 B'_r /mT	矫顽力	
				H_{cB} /(kA/m)	H_{cJ} /(kA/m)
各向同性合金		9 ~ 17	550 ~ 630	44 ~ 80	47 ~ 86
各向异性合金	铸造	36 ~ 72	700 ~ 1300	48 ~ 140	49 ~ 148
	烧结	26 ~ 34	650 ~ 1120	47 ~ 136	48 ~ 150

37) R. 3 类永磁材料磁性能规定值如表 8-39 所示。

表 8-39 R. 3 类永磁材料磁性能规定值

最大磁能积 (BH) _{max} /(kJ/m ³)	剩余磁通密度 B'_r /mT	矫顽力 H /(kA/m)
4 ~ 11	800 ~ 1400	3.6 ~ 24

38) R. 5 类永磁烧结材料规定的磁性能和密度如表 8-40 所示。

表 8-40 R. 5 类永磁烧结材料规定的磁性能和密度

材 料	最大磁能积 (BH) _{max} /(kJ/m ³)	剩余磁通密度 B'_r /mT	矫顽力		密度/(kg/m ³)
			H_{cB} /(kA/m)	H_{cJ} /(kA/m)	
RECo ₅	140 ~ 170	860 ~ 930	600 ~ 660	700 ~ 1200	8200
RE ₂ Co ₁₇	140 ~ 220	900 ~ 1100	600 ~ 700	700 ~ 1600	8300

39) R. 6 类永磁材料规定的磁性能如表 8-41 所示。

表 8-41 R. 6 类永磁材料规定的磁性能

材 料	最大磁能积 (BH) _{max} /(kJ/m ³)	剩余磁通密度 B'_r /mT	矫顽力	
			H_{cB} /(kA/m)	H_{cJ} /(kA/m)
各向同性	10 ~ 12	800 ~ 850	27 ~ 40	29 ~ 42
各向异性	28 ~ 44	1000 ~ 1300	40 ~ 50	41 ~ 51

40) R. 7 类永磁材料各向异性 RE-FeB 合金规定的磁性能和密度如表 8-42 所示。

表 8-42 R. 7 类永磁材料各向异性 RE-FeB 合金规定的磁性能和密度

最大磁能积 (BH) _{max} /(kJ/m ³)	剩余磁通密度 B'_r /mT	矫顽力		密度 ^① /(kg/m ³)
		H_{cB} /(kA/m)	H_{cJ} /(kA/m)	
170 ~ 360	980 ~ 1350	700 ~ 920	800 ~ 2400	7500

① 不是规定值而是典型值。

41) S 类永磁材料磁性能规定值如表 8-43 所示。

表 8-43 S 类永磁材料磁性能规定值

材 料	最大磁能积 (BH) _{max} /(kJ/m ³)	剩余磁通密度 B_r /mT	矫顽力	
			H_{cB} /(kA/m)	H_{cJ} /(kA/m)
各向同性 S1-0	6.5	190	125	210
各向异性 S1-1	20 ~ 35	420 ~ 430	130 ~ 295	135 ~ 380

42) T 类永磁材料磁性能规定值如表 8-44 所示。

表 8-44 T 类永磁材料磁性能规定值

w (Co) (%)	最大磁能积 (BH) _{max} /(kJ/m ³)	剩余磁通密度 B_r /mT	矫顽力	
			H_{cB} /(kA/m)	H_{cJ} /(kA/m)
9 ~ 40	3.3 ~ 8.2	750 ~ 1000	10 ~ 19	11 ~ 21

43) U. 1 类永磁材料磁性能规定值如表 8-45 所示。

表 8-45 U. 1 类永磁材料磁性能规定值

最大磁能积 (BH) _{max} /(kJ/m ³)	剩余磁通密度 B_r /mT	矫顽力	
		H_{cB} /(kA/m)	H_{cJ} /(kA/m)
3.1 ~ 7.0	280 ~ 340	37 ~ 72	46 ~ 84

44) U. 2 类永磁材料磁性能规定值如表 8-46 所示。

表 8-46 U. 2 类永磁材料磁性能规定值

材 料	最大磁能积 (BH) _{max} /(kJ/m ³)	剩余磁通密度 B_r /mT	矫顽力	
			H_{cB} /(kA/m)	H_{cJ} /(kA/m)
各向异性 RE-Co	48	500	360	600

45) U. 3 类永磁材料磁性能规定值如表 8-47 所示。

表 8-47 U. 3 类永磁材料磁性能规定值

材 料	最大磁能积 (BH) _{max} /(kJ/m ³)	剩余磁通密度 B_r /mT	矫顽力		密度/ (kg/m ³)
			H_{cB} /(kA/m)	H_{cJ} /(kA/m)	
各向异性 NdFeB 磁体	28 ~ 82	430 ~ 700	270 ~ 500	560 ~ 950	4200 ~ 6200

46) U. 4 类永磁材料磁性能规定值如表 8-48 所示。

表 8-48 U. 4 类永磁材料磁性能规定值

材 料	最大磁能积 (BH) _{max} /(kJ/m ³)	剩余磁通密度 B_r /mT	矫顽力	
			H_{cB} /(kA/m)	H_{cJ} /(kA/m)
各向同性	0.8 ~ 3.5	63 ~ 145	50 ~ 110	160 ~ 215
各向异性	6.5 ~ 15	180 ~ 280	110 ~ 190	170 ~ 240

8.1.3 影响金属材料磁性的因素

影响金属材料磁性的因素很多，如原子结构、温度、范性变形、合金组织结构等。

1. 原子结构的影响

在铁磁性材料中，当原子相互接近时，它们的电子将发生相互交换，由于电子互相交换而产生一定的交换能。由于电子的交换作用，电子自旋反向平行排列比同向平行排列的能量高，即交换能为正值，金属未被抵消的自旋磁矩自发地排向同一方向，即为磁畴。也就是说，交换能为正值时可形成磁畴。交换能的正负取决于原子的距离和未填满壳层的直径，只有当原子间距 σ 和 $3d$ 层半径 r 的比值大于 3 时，交换能才是正值。经计算，Fe、Co、Ni 都具有较大的正交换能，因此都是强磁性物质。稀土元素的交换能也是正值，因此也具有铁磁性。

2. 温度的影响

在较低的温度范围内，随着温度的升高会发生应力松弛现象，此种现象有利于磁化使磁导率增加。当温度接近居里温度点，磁导率急剧下降。随着温度的升高，饱和磁感应强度下降，同时矫顽力也下降。

3. 范性变形的影响

固体受外力作用而使各点间的相对位置改变，当外力去除后，固体不能恢复原状，这种变形称为范性变形。范性变形使晶体中产生大量的缺陷和内应力。例如，位错密度增高到 $10^{12}/\text{cm}^2$ ，它们将使磁导率显著下降，而且变形量越大，下降得越多；矫顽力则相反，它随着变形量的增大而增大。加工硬化后进行再结晶退火，则使磁导率提高，矫顽力降低，在完全再结晶情况下可恢复到加工前的状态。

4. 晶粒尺寸的影响

晶粒越小，晶界越多，磁化阻力越大，因而磁导率越小，矫顽力越大。

5. 合金成分及组织的影响

合金形成置换固溶体时，磁化强度随着原子浓度的增加而降低。溶质原子的化合价越高，则磁化强度下降得越多；铁磁金属中溶入顺磁性金属时，少量的溶质能使磁化强度增高，但溶质浓度增加过多时，反而使磁化强度下降。两个铁磁性金属组成固溶体时，随着溶质浓度的增加，磁化强度下降，而固溶体有序化时，将使磁化强度上升。形成间隙固溶体时，矫顽力随溶质原子浓度的增加而增加。当合金组成化合物时，铁磁体与顺磁体或抗磁体组成的中间相都是顺磁的；铁磁体与非金属组成的化合物，如 FeSi_2 等都是铁磁性的。至于多相合金，其磁化则与相的形状、大小、分布以及结构和应力状态有关。

8.2 磁场的产生与测量

8.2.1 磁场的产生与测量方法概述

一个满足要求的磁场是磁性测量的必要条件。产生磁场的方法包括永久磁体、电流线圈、电磁铁、超导磁体和脉冲磁场等几类。

1) 永久磁体是一种利用永磁材料的剩磁产生磁场的磁化装置。它的结构是多种多样的,有的是直接浇注或加压成型的具有开缝磁路的永磁体,有的是用软铁将几块永磁材料连接起来构成的。

2) 电流线圈是根据电流的磁场效应设计的磁化装置,如采用亥姆霍兹线圈、螺线管、螺绕环等。

3) 电磁铁是磁性测量中常用的一种能产生较强磁场的磁化装置。从原理上讲,它相当于一个带有空气隙的软铁线圈,当线圈中通过电流时,铁心被磁化,气隙中就产生了磁场。

4) 超导磁体是强磁场的一个发展方向。它是用线状超导材料(如 Nb_3Sn 等)绕成螺线管,用液氮使其冷却到材料的超导转变温度以下。这时,只要给它一个很小的驱动电压,就可以在超导线中产生很大的电流,从而在螺线管内腔中获得强磁场。

5) 脉冲磁场是大电流在短时间内通过螺线管而产生的。其特点是磁场强、功耗小,但持续时间短。在磁性测量中,脉冲磁场主要用来测量和磁化永磁材料(即充磁)。

在不同领域、不同场合下,被测磁场的范围和类型差异很大。按磁场的变化频率可分为恒磁场、高频磁场和脉冲磁场等。被测磁场的磁感应强度范围可以为 $10^{-15} \sim 10^3 \text{T}$ 。因此,测量磁场的方法也是多种多样的。各种磁场的测量方法及其测量范围如表 8-49 所示。

表 8-49 各种磁场的测量方法及其测量范围

测量方法	磁场类型	磁感应强度测量范围/T
冲击法	恒磁场	$> 10^{-3}$
磁通计	恒磁场	$> 10^{-6}$
电子积分器	恒磁场、交变磁场	$> 10^{-12}$
转动线圈磁强计	恒磁场	$> 10^{-10}$
振动线圈磁强计	恒磁场	$> 10^{-8}$
磁通门磁强计	恒磁场	$> 10^{-11} \sim 10^{-2}$

(续)

测量方法	磁场类型	磁感应强度测量范围/T
霍尔效应测场仪	恒磁场、交变磁场	$10^{-1} \sim 10$
核磁共振磁强计	恒磁场	$10^{-2} \sim 10$
电子顺磁共振磁强计	恒磁场	$10^{-2} \sim 10$
核子进动磁强计	恒磁场	$10^{-13} \sim 10^{-10}$
超导量子干涉器作磁强计	磁场随时间变化	$> 10^{-15}$

8.2.2 磁通法测量磁场

磁通测量法以法拉第电磁感应定律为基础，用于测定材料的磁场、磁感强度、磁化曲线及磁滞回线，是宏观磁性测量中较为通用的方法。具体方法是将一个圈数为 N 、截面积为 S 的探测线圈置于磁场 B 中，线圈轴线与磁场夹角为 φ ，如图 8-1 所示。

当磁场 B 改变或夹角 φ 变化时，线圈中的磁通量 Φ 发生变化：

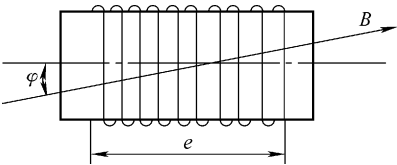


图 8-1 探测线圈

$$\Delta\Phi = \Delta(NB \cdot S) = \int edt \tag{8-7}$$

式中 $\Delta\Phi$ ——磁通量的改变量，单位为 Wb；

N ——线圈的匝数；

B ——磁通密度，单位为 T；

S ——线圈面积，单位为 m^2 ；

e ——感应电动势，单位为 V；

t ——时间，单位为 s。

只要测出感应电动势对时间的积分，便可测出空间磁场或磁感应强度。感应电动势对时间的积分可以利用积分器进行测量。

8.2.3 霍尔效应法测量磁场

霍尔效应测场仪是利用金属或半导体的霍尔效应测量恒磁场或交变磁场的仪器。它是将一块金属或半导体放在磁感应强度为 B 的磁场中，在垂直于磁场的方向通过电流 i ，则在与此二者相垂直的方向上产生的电动势 V_H 称为霍尔电动势：

$$V_H = R_H \frac{iB}{d} \tag{8-8}$$

式中 R_H ——材料的霍尔系数，由材料的性质决定；

d ——磁场方向上试样的厚度，单位为 mm；

i ——垂直于磁场方向的电流，单位为 A；

B ——磁感应强度，单位为 T。

该方法不仅可以测量恒磁场（用直流或交流供电），也可以测量交变磁场（用直流供电）。若采用薄膜霍尔元件（如铽化钢薄膜霍尔元件，膜厚 $0.5\mu\text{m}$ ，面积为 $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ ），则可以测量磁带表面及磁头缝隙中的磁场。霍尔效应测场仪还可用来测量永磁体的表面磁场，用作永磁材料生产线上的检测仪表。霍尔效应测场仪测量磁场的精度一般为 $1\% \sim 5\%$ 。

（1）影响因素 影响霍尔效应法测量精度的主要因素如下：

- 1) 霍尔系数的温度系数较大。
- 2) 霍尔系数在不同的磁场范围内不是常数。
- 3) 引线的电极位置不当所引起的附加电势（不等位电势）的影响。

（2）提高精度的措施 提高其测量精度的措施如下：

- 1) 选用霍尔系数温度稳定性及磁场稳定性好的霍尔元件。
- 2) 采用恒流源供电，用补偿电路消除不等位电势等。

经过改进设计，可将测量精度提高到 $0.05\% \sim 0.1\%$ 。

8.3 静态磁性的测量方法

静态磁性为磁性材料在恒磁场中的磁性，包括恒磁场中的磁化曲线、磁滞回线及曲线上的一些特征参数，如饱和磁化强度、磁导率（或磁化率）、剩余磁感应强度、矫顽力、最大磁能积等，以及这些参数对温度的依赖关系。由于磁性材料种类很多，磁性差别很大，测量条件也不同，因此静态磁性测量的方法和仪器很多。表 8-50 列出了主要的测量方法及其各自的特点。

表 8-50 静态磁性参数的主要测量方法及其特点

测量方法	特 点
冲击法	测量过程繁杂,大试样
磁通计法	灵敏度低,大试样
电子积分器法	便于实现测量自动化,大试样
提拉式磁强计	自动测量,小试样
振动样品磁强计	自动测量,小试样
超导量子干涉器件磁强计	灵敏度高,小试样
磁秤	只能测量饱和磁化强度,小试样
转矩磁强计	只能测量饱和磁化强度及剩余磁化强度

8.3.1 闭磁路试样的冲击测量法

1. 试样

试样的标准形状为圆环形，如图 8-2 所示。当沿圆环的轴线磁化时，由于磁路是闭合的，故没有退磁磁场，同时由于漏磁通极小，因此测试精度较高（为减小由于环形试样径向磁化的不均匀性，应使环形试样的内外径尽量接近）。图中 W_1 为给试样提供磁化场的磁化线圈， W_2 为测量线圈，产生的感应电动势由冲击式检流计 $\textcircled{G}$ 显示。

2. 试验原理

闭磁路样品冲击法的测量原理如图 8-3 所示。

冲击法测量闭磁路试样的静态磁性，实际上是测定不同磁化电流所对应的试样的磁通密度 B 。测量时 W_1 经变阻器 R_1 由直流电源供电。在测量基本磁化曲线时，利用 K_1 来改变磁化电流的方向，利用 K_3 接通而使 R_2 短路去除辅助电路。而在测量磁滞回线时，则利用 K_3 的断开使变阻器 R_2 辅助电路工作来调节磁化电流。 $\textcircled{A}_1$ 和 $\textcircled{A}_2$ 两电流表用来测量磁化电流。双刀双掷开关 K_2 用来接通 W_1 的电源，如需要对冲击检流计进行分度时，接通互感器 T 的初级线圈。测量时，为使试样从退磁状态 $H=0$ 、 $B=0$ 开始测量，通常采用交流退磁法，即在试样上加一低频交变磁场，磁场强度由不小于材料矫顽力 H_c 10 倍的值均匀地减小至零。

测量基本磁化曲线时，为使磁化电流从小到大依次变化， R_1 应从最大值开始逐渐减小。为保证试样磁状态的稳定，必须用每一个选定的磁化电流对试样进行磁锻炼，即用 K_1 换向数次。磁通密度按下式计算：

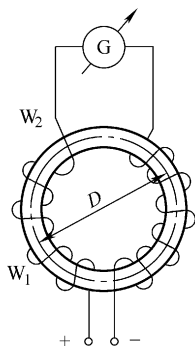


图 8-2 闭磁路试样

W_1 —磁化线圈 W_2 —测量线圈

D —试样截面的平均直径 $\textcircled{G}$ —冲击式检流计

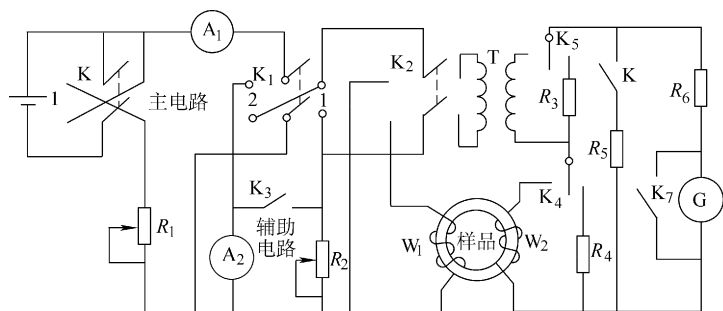


图 8-3 冲击法测量原理

$$B = \frac{C_b R}{2N_2 s} \alpha \quad (8-9)$$

式中 B ——磁通密度, 单位为 T;

C_b ——冲击常数;

R ——回路中总电阻, 单位为 Ω ;

s ——试样截面积, 单位为 mm^2 ;

N_2 ——测量线圈的匝数;

α ——检流计光点的最大偏移量, 单位为 mm。

当电源通过磁化线圈 W_1 施加一个脉冲电流 i 时, 根据安培环路定律, 在螺线环中产生的磁场按下式计算:

$$H = \frac{N_1 i}{\pi D} \quad (8-10)$$

式中 H ——磁场强度, 单位为 A/mm;

N_1 ——磁化线圈的匝数;

D ——试样截面的平均直径, 单位为 mm;

i ——脉冲电流, 单位为 A。

根据测量和计算出的 H_i 、 B_i , 即可绘出如图 8-4 所示的基本磁化曲线。

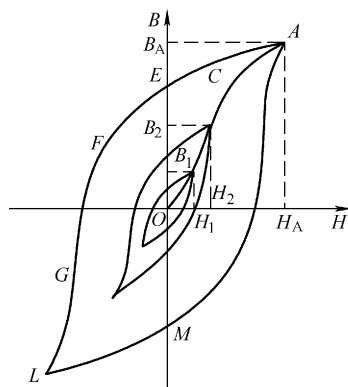


图 8-4 冲击法测得的基本磁化曲线

8.3.2 开磁路试样的冲击测量法

闭磁路试样存在一些缺点: 仅靠螺绕环不能产生强磁场, 不能使永磁材料达到磁饱和状态, 而且环形闭磁路试样更换不便, 螺绕繁杂。因此, 在磁性测量中广泛采用开磁路试样, 如圆柱形、方条形、长条形等形状的试样, 其优点是易于制备和更换, 且能放入适合测量要求的任何磁化装置中。但开磁路试样 (除椭球外) 即使在均匀磁场中磁化, 其内部磁场也是不均匀的, 这是因为试样内部存在着非均匀的退磁磁场。因此, 开磁路试样的磁性测量必须解决好两个问题: 一个是如何减小试样非均匀磁化的影响, 另一个是如何测量材料的内部磁场。

图 8-5 所示为开磁路试样冲击法测量的原理, 图中开关 K_4 在“校正”位时, 将互感器 T 的次级线圈与冲击式检流计接通。在“测量”位时, 将测量 B (绕在试样上的单层线圈) 或测量 H 的线圈与检流计接通。 K_5 就是用来对测 B 或测 H 线圈进行选择的开关。

开磁路试样的测量一般用于永磁材料, 而永磁材料主要是通过测其反磁化曲线来得到剩余磁通密度 B'_r 、矫顽力 H_c 和最大磁能面积 $(BH)_{\max}$ 等磁性参数的。

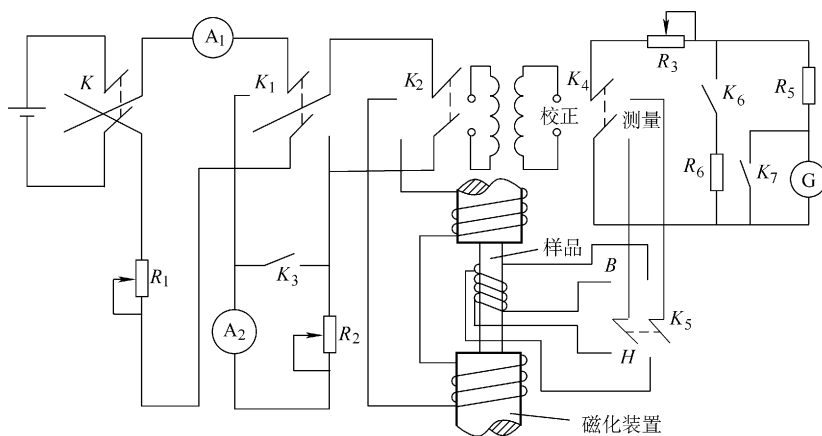


图 8-5 开磁路试样冲击法测量原理

8.3.3 振动样品磁强计法

振动样品磁强计是用于测量小试样静态磁性的仪器，其磁矩分辨率可达 $10^{-8} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ ，测量精度为 1% 左右。配合电磁铁或超导磁体，高、低温控温系统，还可以测量静态磁性对磁场及温度的依赖关系，其测量原理如图 8-6 所示。

磁矩为 m 的被测试样在驱动器（电动机、扬声器、压电元件）的作用下在均匀的磁场中以频率 ω 在 z 方向作振幅为 α 的小振动，则在试样周围的固定线圈组中产生感应电动势 e 。当试样体积足够小，以至于它和线圈间的距离相比可以等效为磁偶极子时，可以证明试样振动引起的感应电动势含振动基波 ω 及其各次谐波分量。基波及各谐波分量均与试样的磁矩 m 成正比。当然，它们还与线圈的结构有关。

因此，用锁相放大器测量 e 的基波或任一次谐波信号，均可作为试样磁矩的测量度。只要用已知磁矩的标准样品对输出电压进行定标，即可获得被测磁矩。探测线圈具有多种结构，它的设计及质量与仪器的灵敏度及精度密切相关。振动样品磁强计已被选定为某些磁性材料（如微波铁氧体等）静态磁性的标准测量方法。

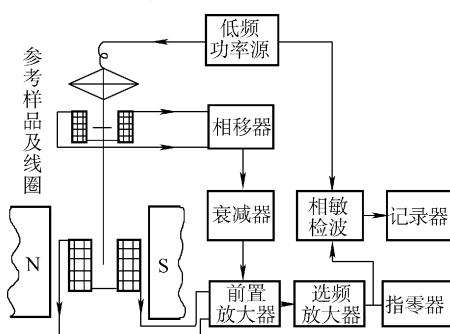


图 8-6 振动样品磁强计的原理

8.3.4 磁秤法

1. 基本原理

磁秤是通过测量小试样在非均匀磁场中所受的力来确定其磁矩，从而得到该试样的饱和磁化强度或磁化率的仪器。如果配备加热器和杜瓦瓶在不同温度下进行测量，可以确定饱和磁化强度及磁化率对温度的依赖关系，从而确定磁相变温度（如居里温度、奈尔温度等）。

测量试样在非均匀磁场中受力的方法很多，最直接的方法是利用分析天平进行测量。为了提高测量的灵敏度及精准度，实际的磁秤多采用各种形式的变换器，将试样受力转变为其他物理量进行间接测量。

实际中常用的磁秤有：电磁秤（或称电子秤）、萨克斯密斯环秤、振簧式磁秤和古依磁秤。

2. 磁秤的结构

磁秤主要由非均匀磁场装置和测量试样受力的装置两部分构成，如图 8-7 所示。

在电磁铁极之间产生非均匀磁场有两种方法：一种是利用特殊形状的磁极头，另一种是利用各种附加电流线圈产生的非均匀磁场叠加到均匀磁场上得到。在螺线管磁场中产生非均匀磁场采用附加电流线圈的方法。

用磁秤测量试样的饱和磁化强度或磁化率时，通常不必测量其磁场梯度，而是用已知饱和磁化强度或磁化率的基准样品来校准磁秤，即将基准样品与待测试样在同一条件下测量受力，并相互比较，从而消去磁场梯度得到正确的结果。

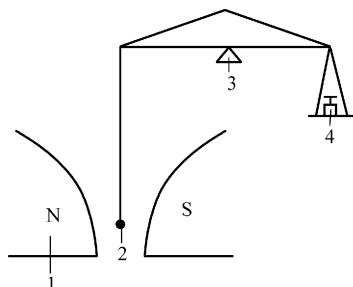


图 8-7 磁秤结构示意图

1—磁场装置 2—样品
3—天平支点 4—砝码

8.4 动态磁性的测量方法

动态磁性是软磁材料在交变磁场中的磁性。在低频范围内，主要测量交流磁化曲线、磁滞回线、损耗等；在射频范围内，主要测量复数磁导率。其主要测量方法有指示仪表测量法、示波器法和电桥法。

8.4.1 指示仪表测量法

图 8-8 所示为指示仪表测量动态磁化曲线的原理图。该装置是通过测量线圈中

的感应电动势来测定交变磁通的。在不同磁场 H_m (峰值) 下测算出相应的 B_m , 即得到交流磁化曲线。根据 B_m - H_m 曲线可以求出振幅磁导率等动态磁参数。

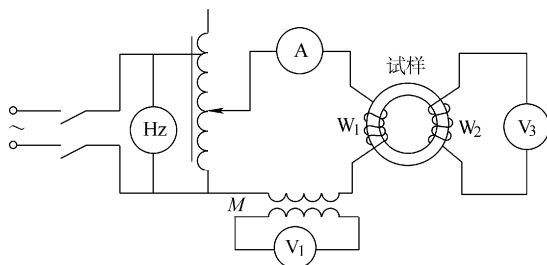


图 8-8 指示仪表测量动态磁化曲线的原理图

由图 8-8 可知, 在被测的闭路试样上绕有两组线圈, 采用自耦调压器来调节磁化电流的大小。由测得的磁化电流的峰值 I_m 可算出交变磁场峰值 H_m 。若磁化电流为正弦变化, 则磁化电流的峰值 I_m 可直接从有效值(A)表的读数求得。此时, 磁场的峰值可用下式计算:

$$H_m = \frac{\sqrt{2}N_1 I_m}{L} \quad (8-11)$$

式中 H_m ——交变磁场峰值, 单位为 H/mm;
 N_1 ——磁化线圈的匝数;
 L ——试样的平均磁路长度, 单位为 mm;
 I_m ——磁化电流的峰值读数, 单位为 A。

8.4.2 示波器法

用示波器可以在较宽的频率范围内直接观察材料的磁滞回线。在已知灵敏度时, 还可根据磁滞回线确定材料的有关磁性参数。示波器法既适用于闭路试样, 也适用于开路试样, 测定的基本磁化曲线和磁滞回线的误差约为 7% ~ 10%, 其原理如图 8-9 所示。

环试样初级的磁化电流在 R_s 上的压降经放大器 A_x 放大后送示波器的 X 轴, 因而电子束在 X 方向上的偏转正比于磁场强度 H 。环试样次级的感应电势 e_2 经 RC 积分电路和放大器 A_y 积分、放大后, 接入示波器的 Y 轴, 因而电子束在 Y 方向上的偏转正比与磁感应强度 B 。于是在示波器上可观察到动态磁滞回线。积分电容上的电压按下式计算:

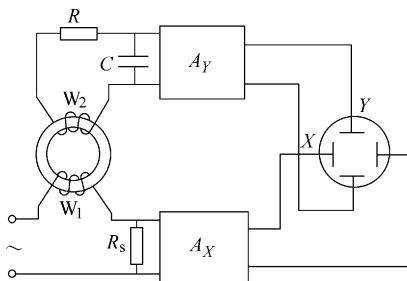


图 8-9 示波器法电路原理

$$u_c = -\frac{N_2 S}{RC} B \quad (8-12)$$

式中 u_c ——积分电容上的电压，单位为 V；

N_2 ——次级绕组匝数；

S ——试样截面积，单位为 mm^2 ；

RC ——积分电路的时间常数；

B ——磁感应强度，单位为 T。

8.4.3 电桥法

软磁材料在很宽的频率范围内被用作各种电感元件，在这些场合下材料的工作磁通密度很低（对金属软磁材料磁化场小于 0.08A/m ，对铁氧体磁化场小于 1A/m ），标志材料磁性的参数主要是复数磁导率两个分量 μ' 和 μ'' 。

交流电桥法是测量软磁材料复数磁导率的有效方法。一个带有被测软磁试样的线圈，可等效成一个纯电感 L_x 和一个纯电阻 R_x 的组合电路，而 L_x 和 R_x 分别与 μ' 和 μ'' 分量有直接联系。若串联，则有

$$\begin{cases} L_x = \frac{N^2 S}{\pi d} \mu' \mu_0 \\ R_x = \omega \frac{N^2 S}{\pi d} \mu'' \mu_0 + R_{x0} \end{cases} \quad (8-13)$$

式中 L_x ——纯电感，单位为 H；

N ——线圈匝数；

S ——试样截面积，单位为 mm^2 ；

d ——试样平均直径，单位为 mm；

μ_0 ——磁性常数 $4\pi \times 10^{-7}$ ，单位为 H/m ；

μ' ——相对弹性磁导率；

R_x ——线圈电阻，单位为 Ω ；

ω ——电源角频率，单位为 Hz；

μ'' ——相对粘性磁导率；

R_{x0} ——线圈电阻，单位为 Ω 。

只要用交流电桥测出 L_x 和 R_x ，就可以得到复数磁导率，并按下式计算出该频率下的损耗角正切值：

$$\tan\varphi = \frac{\mu''}{\mu'} = \frac{R_x - R_{x0}}{\omega L_x} \quad (8-14)$$

电桥法还可测量试样在各种频率和不同磁通密度下的磁化曲线。因为电感的定义是单位电流变化所引起的磁通变化量，所以凡是能测电感的电桥，只要附加测量

电流的仪表，都可用来测量磁通。同时，由测得的电流值按下式计算出对应的磁场强度和磁感应强度：

$$\begin{cases} H_m = \frac{N\sqrt{2}I}{\pi d} \\ B_m = \frac{\sqrt{2}IL_x}{NS} \end{cases} \quad (8-15)$$

式中 H_m ——磁场强度，单位为 A/m；

N ——线圈匝数；

I ——线圈电流有效值，单位为 A；

$\bar{d}$ ——试样平均直径，单位为 mm；

B_m ——磁感应强度，单位 T；

L_x ——电桥测得的有效电感，单位为 H；

S ——试样截面积，单位为 mm^2 。

8.5 本征磁性的测量方法

8.5.1 磁晶各向异性常数的测量

转矩磁强计是测量材料磁各向异性的重要仪器，它通过测量具有宏观磁各向异性的试样（磁性单晶体或具有感生磁各向异性的多晶体）在均匀磁场中所受的力矩来测定磁晶各向异性常数或感生磁各向异性常数，还可以测定材料的饱和磁化强度及晶体的织构度。

将具有宏观磁各向异性的试样悬挂在足以使试样在各方向均能饱和磁化的均匀磁场中，如图 8-10 所示。该磁场可在与悬挂轴垂直的平面内旋转 360° 。

测量具有磁各向异性的试样在磁场中所受转矩的方法主要有扭力式转矩磁强计法和电磁式转矩磁强计法。

1. 扭力式转矩磁强计法

试样由一弹性丝（钨丝或石英丝）悬挂在均匀磁场中，试样在磁场中所受的转矩与悬丝的扭力矩平衡。固定在试样支持杆上的小镜的偏转角 ψ 与扭力矩 L 成正比：

$$L = D\phi \quad (8-16)$$

式中 L ——扭力矩，单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$ ；

D ——悬丝的扭力系数；

ϕ ——偏转角，单位为 $(^\circ)$ 。

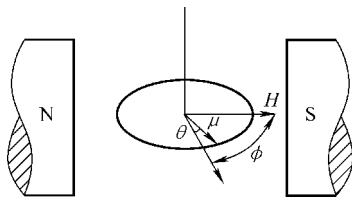


图 8-10 转矩磁强计结构示意图

2. 电磁式转矩磁强计法

电磁式转矩磁强计采用了电流计系统,用电磁力矩来平衡试样在磁场中所受到的转矩,而且这个平衡是通过负反馈自动实现的。通过电流计的电流与待测转矩成正比。这种自动平衡式转矩磁强计易于进行自动测量,若与数据处理系统相连接进行傅氏分析,可快速得到结果。若配备低温恒温器及加热控温系统,还可测量磁(晶)各向异性常数及饱和磁化强度的温度特性等。

8.5.2 磁致伸缩系数的测量

当铁磁体或亚铁磁体的磁化状态改变时会伴随有尺寸变化,这种现象称为磁致伸缩现象。其中尺寸变化比较大的是线性磁致伸缩。线性磁致伸缩系数 λ 代表磁体的相对线度变化量 $\Delta l/l$,伸长时 $\lambda > 0$,缩短时 $\lambda < 0$,单晶体的 λ 是各向异性的,而多晶体的 λ 是各向同性的。测量线性磁致伸缩的方法主要有电容法、光干涉法和应变电阻法。

1. 电容法

平行板电容器的一个极板是固定的,另一个可移动的极板与试样一端连接。试样的另一端固定。当试样在磁场中磁化产生磁致伸缩时,平行板电容器的电容大小随之变化,用精密交流电桥测量出该电容的变化,根据平行板电容器的参数可推算出试样的磁致伸缩系数。也可以将该平行板电容器与电感线圈并联构成一个振荡器的振荡回路,当试样发生磁致伸缩时,由于电容的变化,引起振荡器振荡频率的变化,用频率计测出频率变化,可以推算出试样的磁致伸缩系数,其灵敏度为 10^{-7} 。

2. 光干涉法

从一个点光源发出的两束光在空间某点发生的干涉与这两束光的光程差有关,如光程差是由于铁磁试样的磁致伸缩产生的,则可以利用光的干涉现象来确定磁致伸缩系数。最简单的光干涉仪器为迈克尔逊干涉仪,结构如图 8-11 所示。

G_1 、 G_2 为两块相同的玻璃片, G_1 上镀有一层半透膜。 M_1 、 M_2 为平面镜, M_1 固定, M_2 贴在一端固定的被测试样的自由端上。 S 为光源,其光波波长为 λ_0 。 V 为目镜。光束①、②的光程差 Δl 使目镜中的干涉条纹移动,用下式计算光程差:

$$\Delta l = n\lambda_0/2$$

式中 Δl ——光程差,单位为 mm;

n ——干涉条纹移动的数目;

λ_0 ——光波波长,单位为 mm。

如果 Δl 是由试样磁致伸缩引起的,则磁致伸缩系

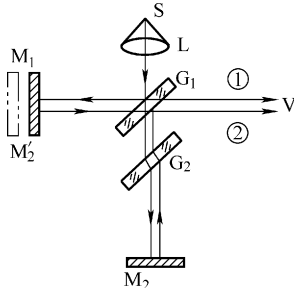


图 8-11 迈克尔逊干涉仪

数 λ 为:

$$\lambda = \Delta l / l = n \lambda_0 / 2l \quad (8-17)$$

式中 l ——试样的长度, 单位为 mm。

3. 应变电阻法

应变电阻是将长度变化转换为电阻变化的敏感元件, 通过测量电阻变化而测定 λ 。线型应变电阻是由对形变和成分敏感的康铜线 (直径为 0.03 ~ 0.05 mm) 盘成, 并粘在两层绝缘性能很好的纸片之间制成的, 形状如图 8-12 所示。

应变电阻 R 的相对变化与长度 l 的相对变化成正比, 表达式为:

$$\frac{\Delta R}{R} = S \frac{\Delta l}{l} \quad (8-18)$$

式中 R ——应变电阻的阻值, 单位为 Ω ;

ΔR ——应变电阻阻值的变化量, 单位为 Ω ;

S ——应变电阻的灵敏系数, 一般在 2.0 左右;

l ——应变电阻的长度, 单位为 mm;

Δl ——应变电阻的长度变化量, 单位为 mm。

磁致伸缩系数的数量级为 $10^{-7} \sim 10^{-5}$, 因此 $\frac{\Delta R}{R}$ 也是这个数量级。测量电阻通常用惠斯顿电桥, 其原理比较简单, 但要求有较高的灵敏度及稳定性。电桥的结构如图 8-13 所示。

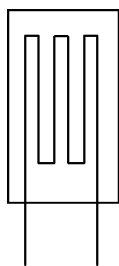


图 8-12 应变电阻

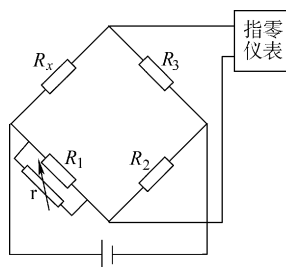


图 8-13 惠斯顿电桥

R_x 为贴在样品上的张力计, R_1 、 R_2 、 R_3 为同样的张力计, 贴在与样品热膨胀系数相近的非磁性材料上, 与样品一起置于磁场中。其目的是消除由于温度变化产生的附加电阻、附加热电动势及磁电阻效应的影响。 r 是并联在 R_1 上调节电桥平衡的精密电阻箱。电桥用直流电源供电, 指零仪表可用光电放大式的检流计或采用调制型放大器。根据电桥的平衡条件, 可以得到由于磁致伸缩而引起的张力计的电

阻变化为:

$$\frac{\Delta R_x}{R_{x0}} = \frac{R_1}{R_1 + r} \cdot \frac{\Delta r}{r_0} \quad (8-19)$$

式中 ΔR_x ——样品上张力计的电阻变化量, 单位为 Ω ;

R_{x0} ——未加磁场时样品上张力计的电阻, 单位为 Ω ;

R_1 ——贴在与样品热膨胀系数相近的非磁性材料上张力计的电阻, 单位为 Ω ;

r ——施加磁场电桥平衡时精密电阻箱的阻值, 单位为 Ω ;

Δr ——精密电阻箱阻值的变化量, 单位为 Ω ;

r_0 ——未加磁场电桥平衡时精密电阻箱的阻值, 单位为 Ω 。

8.5.3 居里温度的测量

1. 磁化强度-温度曲线法

磁化强度-温度曲线法采用具有温度控制系统的磁秤、振动样品磁强计或其他静态磁性测量仪器, 测量磁化强度 M_s 与温度 T 的关系, 如图 8-14 所示。

作 M_s - T 直线, 外延至温度轴, 交点为 T_c , 即为铁磁居里温度。测量中, 由于磁场对 T_c 有影响, 故应尽量在小磁场中测量。

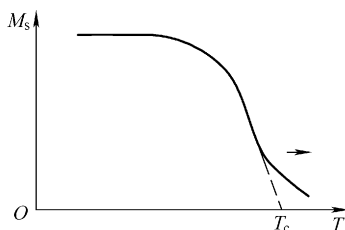


图 8-14 磁化强度-温度曲线

2. 阿诺特图法

在居里温度附近铁磁体的状态方程为

$$\left(\frac{H}{M}\right)^{1/\gamma} = a(T - T_c) + bM^{1/\beta} \quad (8-20)$$

式中 M ——样品的磁化强度, 单位为 T;

H ——样品的磁场强度, 单位为 A/mm;

T_c ——居里温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$;

γ 、 β ——临界指数;

a 、 b ——常数。

铁磁体临界指数的理论值为: $\beta = 0.365$, $\gamma = 1.39$ 。测量居里温度附近不同温度下的磁化曲线, 拟合状态方程, 作 $M^{1/\beta} - (H/M)^{1/\gamma}$ 曲线, 如图 8-15 所示。此组直线中, 通过原点所对应的温度即居里温度 T_c 。在拟合状态方程时, 可能发现临界指数偏离理论值。一般选择直线性最好的情况所对应的数值为临界指数。

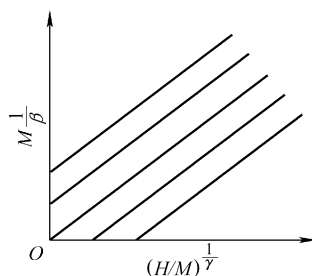


图 8-15 $M^{1/\beta} - (H/M)^{1/\gamma}$ 曲线

8.6 常用金属材料磁性参数的测定

8.6.1 软磁材料直流磁性能的环形试样测量方法

1. 试样

1) 试样是横截面为矩形或圆形的未经焊接的均质圆环。环样的横截面积由产品尺寸、磁性能的均匀性、所用设备的灵敏度以及测试线圈所需要的空间确定。通常横截面积为 $100 \sim 500 \text{mm}^2$ 。

2) 制备试样时应防止材料的加工硬化和受热，避免影响其磁性能。整体实心环样可通过车削加工制备，并最终研磨抛光。加工时要充分冷却以防止试样发热。环样的棱边应去除毛刺。

3) 为减小磁场强度径向变化的影响，环样尺寸应满足下式：

$$D \leq 1.1d$$

式中 D ——试样的外径，单位为 m ；

d ——试样的内径，单位为 m 。

4) 试样的平均磁路长度由下式计算：

$$L = \frac{\pi(D+d)}{2} \quad (8-21)$$

式中 L ——试样的平均磁路长度，单位为 m 。

2. 绕组

1) 绕线前可先从铁心上引出一条导线，供各绕组绝缘性的后续检查，然后可在试样表面直接安放一个温度传感器，再在环样上覆上一层薄的绝缘材料。

2) 在铁心上均匀紧密地用绝缘铜线绕制次级绕组，测定次级绕组的尺寸并计算其平均横截面积 A 。

3) 在铁心上均匀紧密地绕一层或多层绝缘铜线，制成磁化绕组。磁化绕组应能负荷额定的最大磁化电流，其绕线匝数应足以产生出所需要的最大磁场强度。磁化绕组可由以下方式构成：①单条导线均匀紧密地沿整个环样绕很多匝；②多股芯线均匀紧密地沿整个环样相对少绕一些匝数，各股芯线的两端相互连接成多层绕组的效果；③用刚性或半刚半柔的装置，相应的导线可按接插的方式打开，并可安放带次级绕组和绝缘层的环样，闭合后的导线形成一个沿环样均匀绕线的磁化绕组。

4) 如有必要，将已绕线的环样浸入油槽或以鼓风机吹风冷却。

3. 温度

应注意防止试样过热。测量应在 $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的环境温度下进行。试样的温度应不超过 50°C ，该温度可由传感器监测。

4. 设备连接

设备的电路连接如图 8-16 所示。

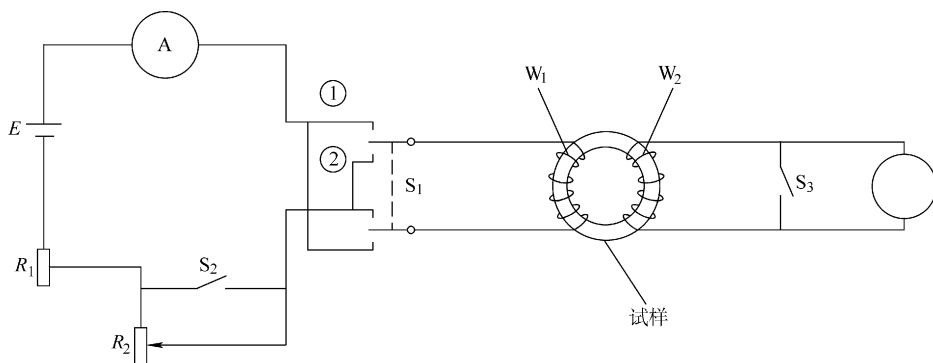


图 8-16 设备连接图

E —直流电源 R_1 、 R_2 —电阻器 S_1 —转换开关

S_2 —开关 W_1 —初级绕组 W_2 —次级绕组

直流电源 E （一个波动量小于 0.1% 的直流稳定电源，或者一个电池）的一端通过电流测量装置①和转换开关 S_1 连接到环样上的磁化绕组 W_1 。如果使用双极电流源，则不需要转换开关 S_1 ，当开关 S_2 闭合时，磁化电路中的电流由电阻器 R_1 控制。如果使用输出连续可调的稳定电源，则不需要电阻器 R_1 。此磁化电路用于测定正常磁化曲线和磁滞回线的顶点。在测定完整磁滞回线的电路中，应使用开关 S_2 和相连的电阻器 R_2 。次级电路由磁通积分器及与其连接的次级绕组 W_2 （B 线圈）构成。

5. 磁通积分器的校准方法

(1) 互感法 将已知互感器的初级绕组与环形磁心的初级绕组或磁导计的磁化绕组连接。互感器的次级绕组与以下元件串联：

- 1) 测量磁通密度时，环形磁心或 B 线圈的次级绕组。
- 2) 测量磁场强度时，H 线圈。

校准时，将互感器初级绕组的电流适当变化 ΔI ，记录磁通积分器的示值 a_c 。磁通积分器的校准常数由下式计算：

$$K = \frac{M \cdot \Delta I}{a_c} \quad (8-22)$$

式中 K ——磁通积分器的校准常数，单位为 $V \cdot s$ ；

M ——互感系数，单位为 H ；

ΔI ——初级电流的变化，单位为 A ；

a_c ——磁通积分器的示值。

在磁通密度和磁场强度的后续测量中, 应将互感器的次级绕组短路。如果用一个电阻器与积分器串联, 应调节这个电阻器。如果不使用任何串联电阻器, 则应按下式对磁通积分器校准常数进行修正:

$$K_c = K \frac{R_F + R}{R_F + R + R_T} \quad (8-23)$$

式中 K_c ——修正后的磁通积分器的校准常数, 单位为 $V \cdot s$;

R ——感应线圈的内部电阻, 单位为 Ω ;

R_F ——磁通积分器的输入电阻, 单位为 Ω ;

R_T ——互感器次级绕组的电阻, 单位为 Ω 。

(2) 电容器放电法 用电容器放电法校准磁通积分器的电路原理如图 8-17 所示。

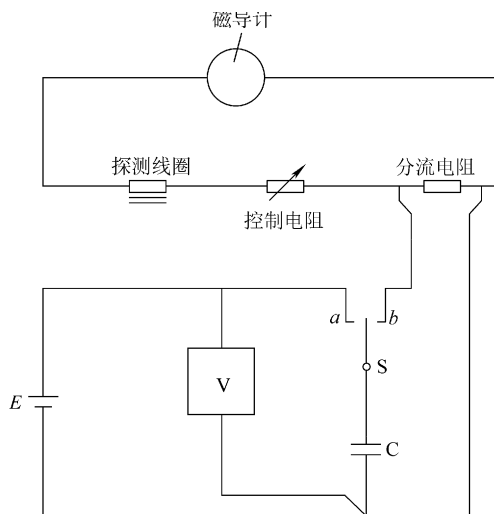


图 8-17 电容器放电法校准磁通积分器的电路原理

磁通积分器的校准按以下步骤进行:

1) 用校准过的电压表测量电压 U , 该电压由校准过的电容器 C 充电后提供, 换向开关在位置 a 。

2) 开关换到位置 b , 使电容放电, 数值为 Q 的电荷流经整个回路, 仅有电荷 q 流经磁通积分器, 产生一个偏移 δ 。磁通积分器校准常数 K 按下式计算:

$$K = \frac{QR_s}{\delta} = \frac{CUR_s}{\delta} \quad (8-24)$$

式中 C ——电容器的电容, 单位为 F ;

U ——由电容器提供的电位差, 单位为 V ;

R_s ——分路电阻的阻值, 单位为 Ω ;

δ ——磁通积分器的示值。

(3) 参考磁体法 用磁共振探头对参考磁体进行校准, 参考磁体用 AlNiCo 永磁材料制成。连接校准过的探测线圈与磁通积分器的输入端。将该线圈引入参考磁体的均匀磁通密度的区域, 记录磁通积分器的示值。磁通积分器的校准常数 K 可由下式计算:

$$K = \frac{B(NA)}{\delta} \quad (8-25)$$

式中 K ——磁通积分器的校准常数, 单位为 $V \cdot s$;

B ——参考磁体间隙中的磁通密度, 单位为 T ;

δ ——磁通积分器的示值;

(NA) ——探测线圈的有效面积与匝数的乘积, 单位为 m^2 。

6. 磁场强度的测量

磁化电流的测量不确定度应在 $\pm 0.5\%$ 范围内。磁场强度按下式计算:

$$H = \frac{N_1 I}{L} \quad (8-26)$$

式中 H ——磁场强度, 单位为 A/m ;

I ——磁化电流, 单位为 A ;

L ——环样平均磁路长度, 单位为 m ;

N_1 ——磁化绕组的匝数。

7. 磁通密度的测量

次级绕组 W_2 (B 线圈) 与磁通积分器 (电子积分器, 冲击检流计或磁通计) 连接, 按规定方法校准磁通积分器, 相关的测量不确定度应在 $\pm 1\%$ 范围内。磁通密度的变化按下式计算:

$$\Delta B = \frac{K_B a_B}{N_2 A} \quad (8-27)$$

式中 A ——环样的横截面积, 单位为 m^2 ;

N_2 ——次级绕组的匝数;

K_B ——磁通积分器校准常数, 单位为 $V \cdot s$;

ΔB ——测得的磁通密度的变化, 单位为 T ;

a_B ——磁通积分器的示值。

8. 正常磁化曲线的测定

试样应仔细退磁, 从磁场强度不小于 $5kA/m$ 开始, 反复换向, 并逐渐降低退磁场。测试前经受过较高磁场强度的试样 (如使用磁性夹具加工试样的情况), 应从高于该磁场强度开始退磁。为了使磁场完全穿过试样, 对于横截面为 $10mm \times$

10mm 的试样, 每次换向之后的停留时间应大于 2s, 而横截面为 20mm × 20mm 的试样, 停留时间应大于 10s。用任一方法校准磁通积分器后闭合 S_2 , 用连续记录法或逐点记录法测定正常磁化曲线。

(1) 连续记录法 连接磁通积分器的输出端与 X - Y 记录仪、绘图仪或计算机接口的 Y 轴端口。与磁化绕组串联一只带有两个电流接线端和两个电压接线端的经校准的低值电阻器。该电阻器的电压接线端应与 X - Y 记录仪、绘图仪或计算机接口的 X 轴端口连接。可对整个系统进行校准, 并直接在记录仪、绘图仪或计算机界面给出磁通密度和磁场强度的数值。磁化电流应从零开始稳定增大, 直至达到产生所需要的最大磁场强度的电流值。然后在 X - Y 记录仪、绘图仪或计算机界面上绘制出磁化曲线。

(2) 逐点记录法 在磁化绕组 W_1 中按式 (8-26) 接一个对应低磁场强度的小电流。该电流应通过转换开关 S_1 反复换向 10 次, 使材料进入稳定循环状态。在此操作过程中 (设备连接见图 8-16), 应保持开关 S_3 闭合, 使磁通积分器示值为零。断开开关 S_3 , 记录对应磁场换向的磁通积分器示值, 并计算相应的磁通密度。持续增加电流, 重复上述操作, 即可得到一组磁场强度和磁通密度的对应值, 并以此绘制出正常磁化曲线。

9. 完整磁滞回线的测定

将试样退磁, 在磁化绕组 W_1 中通以足够产生所需要的最大磁场强度的电流, 磁滞回线的顶点由磁场强度和相应的磁通密度的测量值来确定。

在开关 S_1 合至位置 1 和开关 S_2 断开的状态下, 测定磁滞回线的 PQ 部分 (如图 8-18 所示), 并测量相应的磁场强度以及磁通密度的变化。通过调节电阻器 R_2 , 可获得 PQ 曲线上的若干点。闭合开关 S_2 测得 Q 点, 此时断开开关 S_1 , 测量磁通密度的变化。每个点的磁场强度值由测得的相应电流值按式 (8-26) 计算。每个点的磁通密度值按下式计算:

$$B_{p'} = B_p - \Delta B \quad (8-28)$$

式中 $B_{p'}$ —— PQ 曲线上 P' 点处的磁通密度, 单位为 T;

B_p ——磁滞回线顶点的磁通密度, 单位为 T;

ΔB ——开关 S_1 闭合到位置 1 和开关 S_2 断开时测得的磁通密度的变化, 单位为 T。

在开关 S_1 闭合和开关 S_2 断开的状态下, 测定磁滞回线的 QS 部分。从开关 S_1 断开位置开始, 将其闭合至位置 2, 测量磁场强度和磁通密度的变化。每个点的磁场强度值由开关 S_1 闭合至位置 2 时测得的电流值按式 (8-26) 计算。每个点的磁通密度值由下式计算:

$$B_{Q'} = B_Q - \Delta B \quad (8-29)$$

式中 $B_{Q'}$ —— QS 曲线上 Q' 点的磁通密度, 单位为 T;

B_0 —— Q 点的磁通密度, 单位为 T;

ΔB ——开关 S_1 闭合到位置 2 和开关 S_2 断开时测得的磁通密度的变化, 单位为 T。

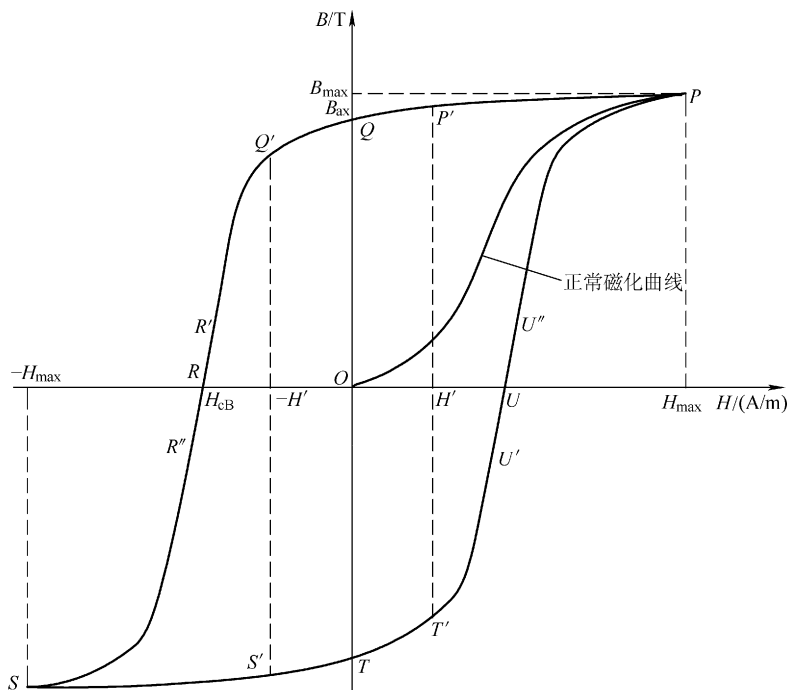


图 8-18 磁滞回线

为获得完整的磁滞回线，开关的闭合顺序应按表 8-51 排列，以使试样保持在稳定循环的状态。

表 8-51 使试样保持在稳定循环状态的开关闭合顺序

顺序	开关 S_1	开关 S_2	回线上的点
1	闭合(1)	闭合	P
2	闭合(1)	断开	P'
3	断开	断开	Q
4	闭合(2)	断开	Q'
5	闭合(2)	闭合	S
6	闭合(2)	断开	S'
7	断开	断开	T
8	闭合(1)	断开	T'
9	闭合(1)	闭合	P

10. 剩余磁通密度的测定

对给定的磁滞回线, 材料的剩余磁通密度是当磁场强度为零时的磁通密度值, 单位为 T, 应由磁滞回线上的 Q 点位置或对称的 T 点位置确定。

11. 矫顽场强度的测定

对给定的磁滞回线, 材料的矫顽场强度是当磁通密度为零时的磁场强度值, 单位为 A/m, 应由磁滞回线上的 R 点位置或对称的 U 点位置确定。

8.6.2 软磁材料直流磁性能的磁导计测量方法

1. 试样

用于 A 类磁导计的试样的最小长度为 250mm, 用于 B 类磁导计的试样的最小长度为 100mm, 其最小横截面积为 10mm^2 , 最大横截面积为 500mm^2 。试样的横截面积应由试样长度方向均匀分布的各相关尺寸点的多次测量结果确定。横向尺寸应采用千分尺沿试样长度方向按约 10mm 的间隔进行测量。由这些测量结果计算平均横截面积, 相关的测量不确定度应在 $\pm 0.5\%$ 的范围内。最大和最小横截面积之间的极差应不超过平均横截面积的 0.5%。

1) 圆形、正方形、矩形或六角形的均匀横截面的棒状试样。试验需要时, 应对试样进行机械加工, 使得试样与磁极靴的间隙减到最小, 对与磁极靴接触的试样表面进行车削或研磨加工时应充分冷却, 避免材料受热。

2) 对于板材或带材, 应分别在平行于和垂直于轧制方向剪取两个宽度为 30mm 的条形试样, 用于后续测量。

2. 磁导计

磁导计的配置如图 8-19 和图 8-20 所示。试样夹在两块钢制的磁轭中间, 这两块磁轭为试样提供闭合磁路。对于圆形或方形条状试样的测试, 需要两对用低碳钢或软铁制成的磁极靴, 每一对都应尽可能加工成与试样密合的形状。磁极靴的磁导率要足够高, 以便为试样与磁轭之间的磁通提供低磁阻通路。

3. 试验装置

装置的连接如图 8-21 所示。

直流电源 E (一个波动量小于 0.1% 的直流稳定电源, 或者一个电池) 通过转换开关 S_1 与磁化绕组 W_1 相连, 如果使用两极电流源, 则不需要转换开关 S_1 。当开关 S_2 闭合时, 磁化回路中的电流由电阻器 R_1 控制。

如果使用的稳定电源能对输出电流进行控制, 则不需要电阻器 R_1 。由此可按连续记录的方式测定正常磁化曲线和磁滞回线。对于逐点记录的方式, 则要使用开关 S_2 和电阻器 R_2 测量磁滞回线。次级回路由围绕试样的探测线圈及与之连接的磁通积分器构成。

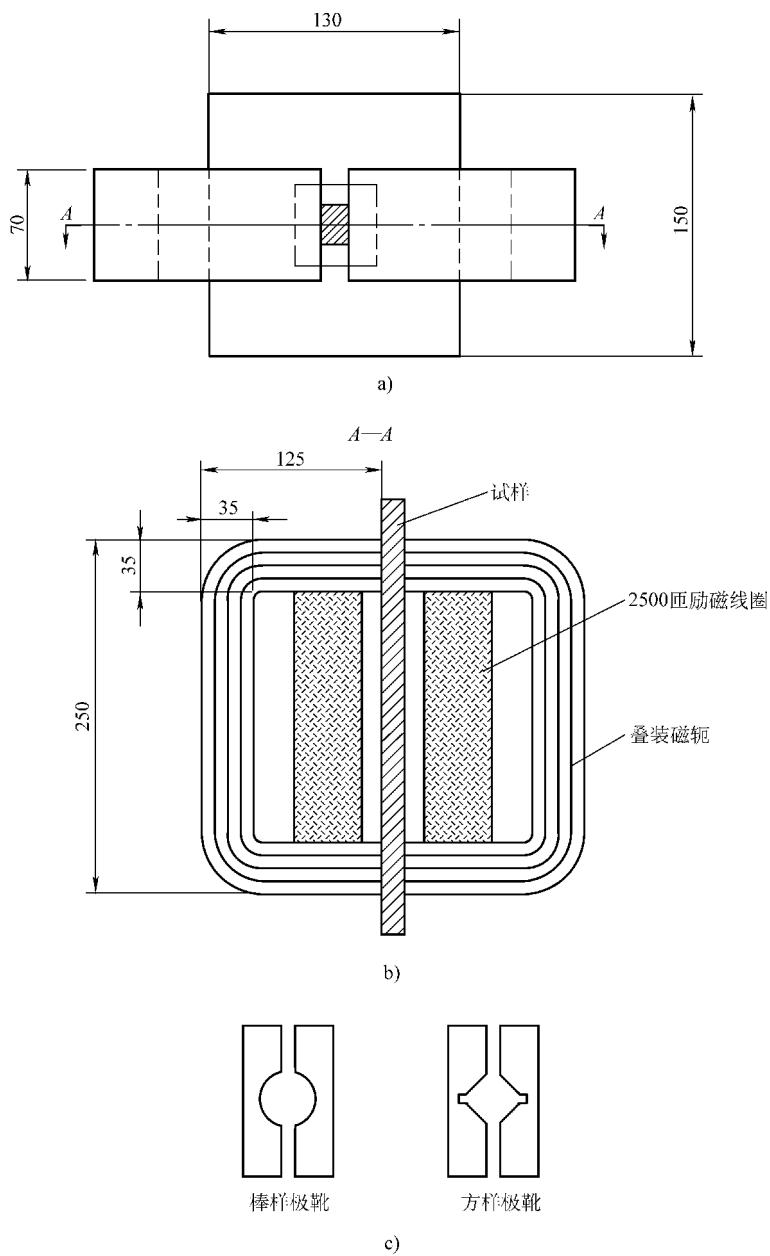
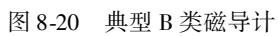


图 8-19 典型 A 类磁导计

a) 典型 A 类磁导计侧视图 b) 典型 A 类磁导计 A—A 剖视图

c) 典型 A 类磁导计磁极靴示意图



a) 典型 B 类磁导计侧视图 b) 典型 B 类磁导计俯视图
c) 典型 B 类磁导计的磁极靴示意图

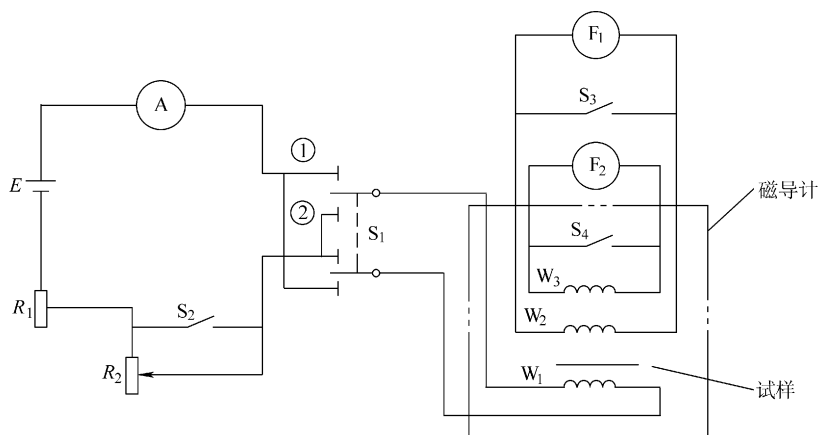


图 8-21 双磁轭磁导计测定试样的正常磁化曲线和磁滞回线的电路原理图

4. 用 A 类磁导计测定磁场强度

把长约 10 ~ 50mm 的探测线圈与磁通积分器相连接。磁通积分器应按规定的方
法进行校准。

探测线圈通常包括两个线圈，
分别安装在试样相对的两边，并正
向串联，如图 8-22a 所示；或者两个
线圈与试样同轴绕制，并反向串联，
如图 8-22b 所示。线圈应绕在无磁性
和不导电的骨架上。由磁通积分器
的示数读出其磁场强度。

5. 用 B 类磁导计测定磁场强度的变化

连接磁通积分器与空心线圈，
如图 8-23 所示。

磁场强度的变化由下式计算：

$$\Delta H = \frac{K_H a_H}{\mu_0 (NA)} \quad (8-30)$$

式中 ΔH ——磁场强度的变化，单
位为 A/m；

K_H ——磁通积分器 H 的校准

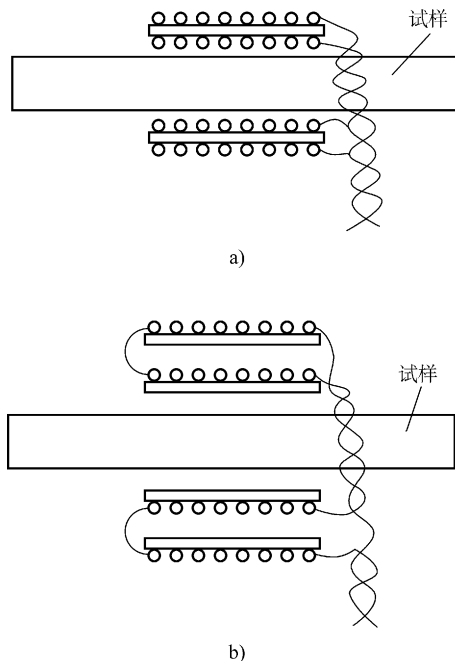


图 8-22 同心型磁场强度探测 H 线圈

a) 上下两线圈正向串联 b) 内外两线圈反向串联

常数, 单位为 $V \cdot s$;

(NA)—— H 线圈的有效面积与匝数的乘积, 单位为 m^2 ;

a_H ——磁通积分器 H 的示值;

μ_0 ——磁性常数, 其值为 $4\pi \times 10^{-7}$, 单位为 H/m 。

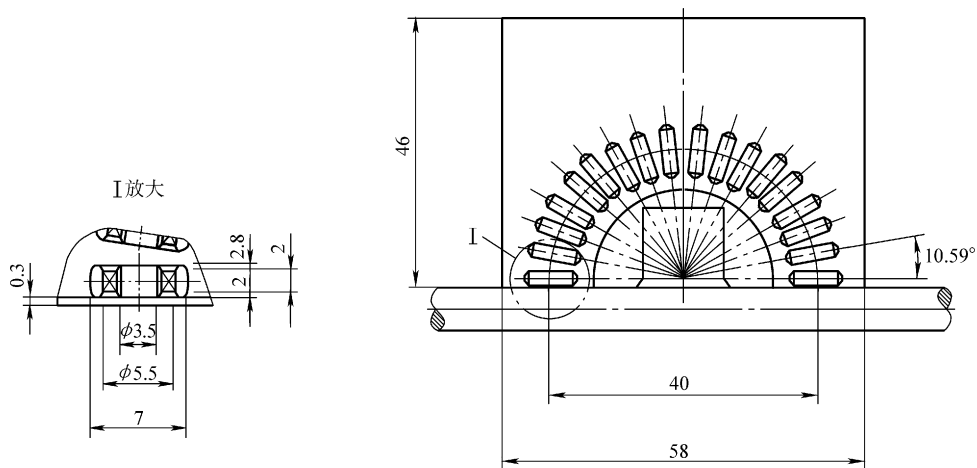


图 8-23 磁场强度测定的空心线圈系统示意图

6. 磁通密度的测量

将一个长度为 $10 \sim 50mm$ 的磁通感应线圈 (B 线圈) (见图 8-24) 与磁通积分器连接。磁通积分器应按规定的方法校准。由于线圈的空气磁通的存在, 应当对磁通密度值进行修正, 其修正量的大小取决于磁场强度的高低以及试样与磁通感应线圈的相对横截面积。

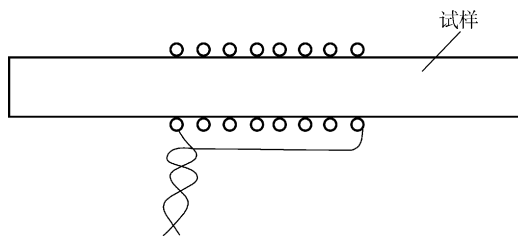


图 8-24 围绕试样的磁通感应线圈 (B 线圈) 示意图

磁通密度的修正值 B_c 由下式得出:

$$B_c = B - \mu_0 H \frac{A_c - A}{A} \quad (8-31)$$

式中 A ——试样的横截面积, 单位为 m^2 ;

B ——测得的磁通密度, 单位为 T;

H ——磁场强度, 单位为 A/m;

A_c ——磁通感应 B 线圈的横截面积, 单位为 m^2 ;

μ_0 ——磁性常数, 其值为 $4\pi \times 10^{-7}$, 单位为 H/m。

也可以采用另一种方式进行补偿, 即将一个补偿线圈与磁通感应线圈串联反接, 补偿线圈的有效面积和磁通感应线圈与试样之间的空气间隙面积相等。

磁通密度的变化 ΔB 由下式计算:

$$\Delta B = \frac{K_B a_B}{N_2 A} \quad (8-32)$$

式中 ΔB ——磁通密度的变化, 单位为 T;

A ——试样的横截面积, 单位为 m^2 ;

N_2 ——磁通感应线圈的匝数;

K_B ——磁通积分器 B 的校准常数, 单位为 $V \cdot s$;

a_B ——磁通积分器 B 的示值。

还可以测量磁极化强度, 并用测量值和磁场强度计算磁通密度, 计算公式如下:

$$B = \mu_0 H + J \quad (8-33)$$

式中 B ——磁通密度, 单位为 T;

H ——磁场强度, 单位为 A/m;

J ——测得的磁极化强度, 单位为 T;

μ_0 ——磁性常数, 其值为 $4\pi \times 10^{-7}$, 单位为 H/m。

7. 正常磁化曲线的测定

(1) 连续记录方法 连续记录点方法与软磁材料直流磁性能的环样测量方法相同。

(2) 逐点记录方法 在磁化绕组 W_1 中通以小电流, 并通过转换开关 S_1 反复换向约 10 次, 以使试样的材料处于稳定的循环状态。在此操作过程中, 应闭合开关 S_3 和 S_4 以保持磁通积分器在零位。打开开关 S_3 和 S_4 , 磁场强度和磁通密度或磁极化强度的值由对应的磁通积分器示值给出。通过持续增加电流并重复这一步骤, 可绘制出正常磁化曲线。在测量过程中, 磁化电流不应出现减小, 否则试样应再次退磁, 并重新进行测量。

8. 完整磁滞回线的测定

先将磁通积分器调零, 然后在磁化绕组 W_1 中通过足以产生预定最大磁场强度的电流。慢慢减小该电流至零, 变向, 再增大至其最大负值, 回调至零, 再变向并增大至其最大正值。为了使试样的磁化能跟随外加磁场变化, 应有足够的时间完成这个循环, 通常时间为 30 ~ 60s (有的材料, 如纯铁, 可能需要更长一些的时间), 但也要避免随着时间延长探测部件的零点产生明显的漂移。

9. 剩余磁通密度的测定

对给定的磁滞回线, 材料的剩余磁通密度是当磁场强度为零时的磁通密度, 单位为 T, 应由磁滞回线上的 Q 点位置或对称的 T 点位置确定。

10. 矫顽场强度的测定

对给定的磁滞回线, 材料的矫顽场强度是当磁通密度为零时的磁场强度值, 单位为 A/m, 应由磁滞回线上的 R 点位置或对称的 U 点位置确定。

8.6.3 软磁材料交流磁性能的环形试样测量方法

1. 试样

试样应采用以下不同方式制成横截面为矩形的环形试样: ①用薄带或线材绕成时钟弹簧形的铁心; ②采用冲压、激光切割或光化学蚀刻成环样的叠片; ③粉末压制并烧结、金属注射成型或铸造。

对于所有类型的试样, 在热处理之前都应去除毛刺和锐边。对于软磁合金, 应将环形试样装在可拆分成两部分的环形盒子内; 对于无绝缘层的试样, 在叠装试样时应采用适当的绝缘措施; 对于高磁导率材料, 最好也将环形试样装在可拆分成两部分的环形盒子内。盒子的尺寸应与试样精密配合, 避免在材料中产生应力。

试样尺寸的外径与内径之比应不大于 1.4, 最好小于 1.25。

对于厚度小于 0.15mm 的带材, 应沿轧制方向取宽度为 10mm 的条形, 经涂绝缘层后卷绕成环样。

对于固体和粉末压制材料, 试样的尺寸, 即环形试样的外径、内径以及高度, 应采用合适的并经过校准的量具测量。量具的准确度应为 $\pm 0.02\text{mm}$ 。相关尺寸应在试样的不同位置测量, 并计算出平均值。试样的横截面积应按下式计算:

$$A = \frac{(D-d)}{2}h \quad (8-34)$$

式中 A ——试样的横截面积, 单位为 m^2 ;

D ——试样的外径, 单位为 m;

d ——试样的内径, 单位为 m;

h ——试样的高度, 单位为 m。

对叠片或绕制铁心环样, 试样横截面积应由质量、密度和环样内外径的值计算。质量应采用合适的并经过校准的仪器称量, 称量准确度应为 $\pm 0.1\%$ 或更好。横截面积应按下式计算:

$$A = \frac{2m}{\pi\rho(D+d)} \quad (8-35)$$

式中 m ——试样的质量, 单位为 kg;

ρ ——材料的密度, 单位为 kg/m^3 。

对于计算磁场强度所需的试样平均磁路长度按下式确定：

$$l_m = \frac{\pi(D+d)}{2} \quad (8-36)$$

式中 l_m ——试样的平均磁路长度，单位为 m。

2. 绕组

绕组数量和匝数取决于所使用的测量设备和方法。对于比总损耗的测量，通常要求有一个初级绕组和一个次级绕组。此时，次级绕组应尽可能紧密地绕在试样上以减小绕组下空气间隙的影响。所有绕组应均匀地绕在试样的整个周长上。

对于频率高于 50Hz（工频）的磁性能测量，应注意避免电容和其他相关效应的影响。

应注意确保在绕线过程中不损坏电线的绝缘层，并采用合适的交流绝缘电阻测量仪进行电气检查，避免绕线与试样短路。

3. 温度测量

当对试样的表面温度有要求时，应在试样上粘附一个经过校准的非磁性热电偶（如 T 型热电偶）进行测量。如果试样是封装好的，应在封套上制一个孔，注意不要损伤试样，并使热电偶与磁心材料牢固接触。如果这点不可能做到，则应将热电偶粘附在封套上并在测试报告中说明。热电偶应与合适的经过校准的数字电压表连接，以测量其输出电压，通过热电偶对照表得出相应的温度。

如果磁化后发现试样的温度随时间变化，磁性能的测量应在达到规定的温度或时间后进行。如果要在高温下测量，应将试样置入烤箱，并在要求的温度下进行。

4. 伏安法测定磁导率和磁化曲线

环样测量磁导率和磁化曲线的方法通常在 20 ~ 20000Hz 的频率范围使用，更高的使用频率将受限于所用仪器的性能。如果有合适的经过校准的仪器，频率上限可延伸到 1MHz。

(1) 设备连接 环样应绕上一初级绕组 W_1 和一次级绕组 W_2 。设备应按图 8-25 所示的电路进行连接。

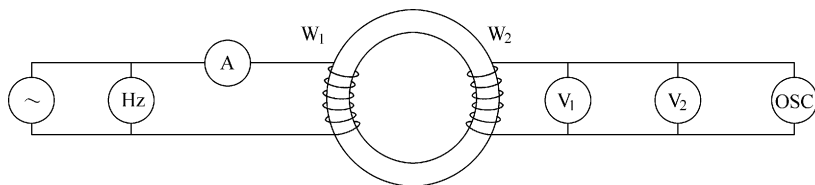


图 8-25 环样方法的电路示意图

⊗—电源（通常是一个振动信号发生器和功率放大器） ⊗—频率计

⊗—示波器 W_1 —初级绕组 W_2 —次级绕组 V_1 —平均值电压表 V_2 —有效值电压表

⊗—测量磁化电流的有效值或峰值的电流表（或和一个精密电阻器配接的有效值或峰值电压表）

在测量过程中,交流电源的输出端电压和频率的各自偏差不应超过设定值的 $\pm 0.2\%$,频率计准确度为 $\pm 0.1\%$ 。交流电源应与一个在测量频率范围内准确度为 $\pm 0.2\%$ 或更好的无感精密电阻器及环样的初级绕组 W_1 串联。电阻器两端连接一只高输入阻抗(通常大于 $1M\Omega$)准确度为 $\pm 1.0\%$ 或更好的有效值或峰值电压表,以测量磁化电流。

次级电路包括两个与次级绕组 W_2 并联的电压表。其中一个电压表(V_2)测量有效值,另一个电压表(V_1)测量整流后的平均值。应使用阻抗(通常大于 $1M\Omega$)准确度为 $\pm 1.0\%$ 或更好的电压表。

次级电压的波形应使用示波器确认,保证只含有基波成分。

(2) 次级电压或磁化电流的波形 为了获得可比较的测量值,测量前应明确是保持次级电压还是保持磁化电流为正弦波,即波形系数为 $1.111 \times (1 \pm 1\%)$ 。对后一种情况,需要在磁化电路中串联一个无感电阻器。无感电阻器的时间常数要低,以确保波形在规定的范围内。无感电阻器可以是用于测量磁化电流的同一电阻器。正弦波形的控制可以通过数字方式实现。在 $20 \sim 20000\text{Hz}$ 的频率范围内,次级电压的波形系数可通过与次级绕组连接的两个具有高阻抗的电压表来测定。其中一个电压表测量电压的有效值,另一个测量次级电压整流后的平均值。波形系数由有效值与平均值的比率确定。

(3) 磁场强度的测定 测量所需的磁场强度由下式计算:

$$H = \frac{N_1 I}{l_m} \quad (8-37)$$

式中 H ——磁场强度,单位为 A/m ;

N_1 ——试样上初级绕组的匝数;

I ——磁化电流,单位为 A ;

l_m ——试样的平均磁路长度,单位为 m 。

通常,磁场强度的幅值由测量出的有效磁化电流再乘以 $\sqrt{2}$ 求出。对于正弦磁化电流,求出的是峰值磁场强度的修正值。对于正弦磁通,求出的是等效的峰值磁场强度,比给定的磁化电流的数值小。测定峰值磁场强度的另一种方法是使用峰值电流表或峰值电压表和精密电阻器。

测量前应对试样进行退磁,从一个不小于矫顽力10倍的磁场强度值开始,缓慢减小磁化电流的值至零。退磁电流的频率应不大于将使用的测量频率。

(4) 磁通密度的测定 次级电压应采用平均值电压表 $\textcircled{V}$ 测量,磁通密度由下式计算:

$$|\bar{U}_2| = 4fAB_p N_2 \quad (8-38)$$

式中 $|\bar{U}_2|$ ——次级电压整流后的平均值,单位为 V ;

f ——频率, 单位为 Hz;

A ——试样的横截面积, 单位为 m^2 ;

B_p ——磁通密度的峰值, 单位为 T;

N_2 ——次级绕组的匝数。

由于试样和次级绕组之间有空气间隙, 可能需要对磁通密度进行修正, 其大小取决于磁场强度的高低和试样与次级绕组横截面积的比值。磁通密度峰值的修正值 B_p 由下式得出:

$$B_p = B'_p - \mu_0 H_p \frac{(A' - A)}{A} \quad (8-39)$$

式中 B'_p ——磁通密度峰值的测量值, 单位为 T;

μ_0 ——磁性常数, 其值 $4\pi \times 10^{-7}$, 单位为 H/m;

H_p ——磁场强度的峰值, 单位为 A/m;

A' ——次级绕组的横截面积, 单位为 m^2 ;

A ——试样的横截面积, 单位为 m^2 。

(5) 有效幅值磁导率和相对幅值磁导率的测定 对于磁场强度和磁通密度的相应值, 有效幅值磁导率应由下式计算:

$$\mu_{aa} = \frac{B_p}{\mu_0 \sqrt{2} H_e} \quad (8-40)$$

而相对幅值磁导率则由下式计算:

$$\mu_{ra} = \frac{B_p}{\mu_0 H_p}$$

式中 μ_{aa} ——有效幅值磁导率 (用于正弦磁通密度);

μ_{ra} ——相对幅值磁导率 (用于正弦磁场强度);

μ_0 ——磁性常数, 其值为 $4\pi \times 10^{-7}$, 单位为 H/m;

B_p ——磁通密度的峰值, 单位为 T;

H_e ——磁场强度的有效值, 单位为 A/m;

H_p ——磁场强度的峰值, 单位为 A/m。

(6) 磁化曲线的测定 先对试样进行退磁, 然后逐步增大磁化电流, 即可获得磁场强度和磁通密度的相应值, 并绘制出磁化曲线。

5. 用功率表测定比总损耗

(1) 测量原理 比总损耗的测量应在正弦磁通密度的条件下进行, 对一些试样可能需要通过模拟或数字技术的方法控制磁化电流的波形, 以确保维持正弦的磁通密度。装置与试样绕组应按图 8-26 所示的电路进行连接。

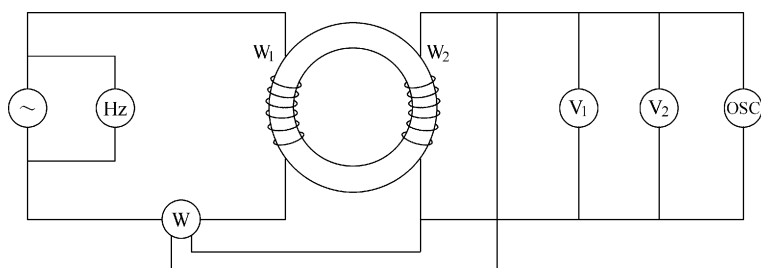


图 8-26 功率表方法的电路示意图

(⊗) — 电源 (通常是一个振动信号发生器和功率放大器) (Hz) — 频率计 W_1 — 初级绕组
 W_2 — 次级绕组 (OSC) — 示波器 (W) — 功率表 V_1 — 平均值电压表 V_2 — 有效值电压表

(2) 比总损耗的测量 试样应退磁, 然后增大初级绕组 W_1 的电流, 直到电压表 V_1 (显示整流后的平均电压) 的电压值与计算得出的磁通密度相对应。记录两个电压表 V_1 和 V_2 的测量值, 计算并确认次级波形的波形系数, 然后记录功率表的测量值。

(3) 比总损耗的确定 功率表测得的功率 P_m 包含了次级回路中仪表消耗的功率, 由于次级电压基本上是正弦的, 其一次近似值等于 $(1.111 |\bar{U}_2|)^2 / R_i$ 。所以试样的总损耗 P_c 应按下式计算:

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{(1.111 |\bar{U}_2|)^2}{R_i} \quad (8-41)$$

式中 P_c —— 计算得到的试样总损耗, 单位为 W/kg;

P_m —— 功率表测得的功率, 单位为 W;

N_1 —— 初级绕组的匝数;

N_2 —— 次级绕组的匝数;

$|\bar{U}_2|$ —— 次级电压整流后的平均值, 单位为 V;

R_i —— 与次级绕组连接的仪表总的等效电阻, 单位为 Ω 。

比总损耗 P_s 由 P_c 除试样的质量得出, 即:

$$P_s = \frac{N_1 P_m}{N_2 m} - \frac{(1.111 |\bar{U}_2|)^2}{R_i m} \quad (8-42)$$

式中 P_s —— 试样的比总损耗, 单位为 W/kg;

m —— 试样的质量, 单位为 kg。

6. 用数字阻抗电桥测量磁性能

(1) 测量原理 数字阻抗电桥 (又称为阻抗分析仪和 LCR 表) 可用于测量磁性部件的电感和其他技术特性。在一定的限制条件下, 这类仪表可用于测定交流感应的磁导率和比总损耗等磁性能。这一方法假定环形试样在电学上等同于一个电感

和电阻的并联组合。交流感应的磁导率由电感计算得出, 而比总损耗则由电阻计算得出。在磁通密度随时间呈正弦变化且平均值为零的条件下, 磁性试样由一个电阻分量和一个电感分量并联来表示, 此时交流感应的磁导率是由测得的电路阻抗的感应分量确定的磁导率。按照此方法进行的测试应限于磁化曲线初始段的线性区域, 此时磁通密度和磁场强度服从正弦条件。

(2) 测量装置 测量装置及所包括的部件如图 8-27 所示。

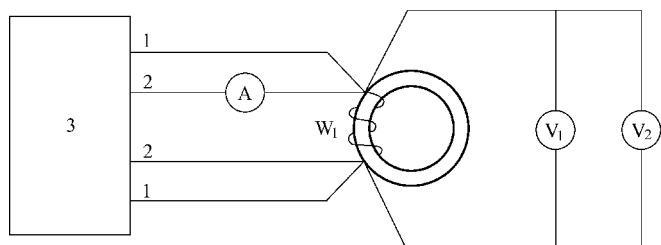


图 8-27 数字阻抗电桥方法的电路示意图

1—电压连接线 2—电流连接线 3—LCR 表 W_1 —绕组

V_1 —平均值电压表 V_2 —有效值电压表 A —用于测量磁化电流的有效值电流表

1) 应采用经校准的四线开尔文式结构的数字阻抗电桥, 也可采用修正的海氏电桥测量比总损耗。为测量并联电感 L_p 和并联电阻 R_p , 在测量频率范围内电桥测量电容的准确度为 $\pm 1.0\%$ 或更好, 测量电阻的准确度 $\pm 0.1\%$ 或更好。信号源输出阻抗应足够低, 以确保在测试的磁心中获得正弦的磁通密度。电桥应具有清零功能, 可补偿仪器和试样间导线的阻抗。

2) 应采用准确度为 $\pm 1.0\%$ 或更好的有效值电流表测量磁化电流。磁化电流也可以用准确度为 $\pm 1.0\%$ 或更好的有效值电压表, 通过测量一只与初级绕组串联的, 在测量频率范围内准确度为 $\pm 0.2\%$ 或更好的, 无感精密电阻两端的电压来测定。如果数字阻抗计有内置电流表, 或者信号源的设置准确度已用其他方式确认, 则不再需要另接一只电流表。

3) 次级电压整流后的平均值应使用具有高输入阻抗的 (通常大于 $1\text{M}\Omega$) 准确度为 $\pm 1.0\%$ 或更好的平均值电压表测量。

4) 应采用具有高输入阻抗的 (通常大于 $1\text{M}\Omega$) 准确度为 $\pm 1.0\%$ 或更好的有效值电压表。

(3) 步骤 测量前应按照测量装置的功能调零, 以补偿测试导线的阻抗。在高频下测试时, 最理想的情况是消除绕组引起的阻抗。这一点可通过把测量装置和一个与试样有相同尺寸及绕组匝数的无磁性磁心连接来实现。连接试样与测量装置, 再使用测量装置的信号源或一个外部信号源对试样退磁。测试应在增加磁化电流 (磁场强度) 值或增加磁通密度值的情况下进行。

(4) 交流相对磁导率的测定 试样的交流相对磁导率由下式计算得出:

$$\mu_p = \frac{L_p l_m}{N_1^2 A \mu_0} \quad (8.43)$$

式中 μ_p ——交流相对磁导率;

L_p ——测得的并联电感, 单位为 H;

l_m ——试样的平均磁路长度, 单位为 m;

N_1 ——绕组的匝数;

A ——试样的横截面积, 单位为 m^2 ;

μ_0 ——磁性常数, 其值为 $4\pi \times 10^{-7}$, 单位为 H/m。

(5) 比总损耗的测定 比总损耗可以由并联电阻按下式计算得出:

$$P_s = \frac{(1.111 |\bar{U}_2|)^2}{m} \left[\frac{1}{R_p} - \frac{1}{R_w} \right]$$

式中 P_s ——试样的比总损耗, 单位为 W/kg;

$|\bar{U}_2|$ ——感应电压整流后的平均值, 单位为 V;

m ——试样的质量, 单位为 kg;

R_p ——并联电阻, 单位为 Ω ;

R_w ——绕组的电阻, 单位为 Ω 。

7. 用数字方法测量磁性能

以环样方法进行测量, 上限频率受制于电压测量装置的性能和用于测量磁化电流与初级绕组串联的无感精密电阻器的频率特性。

(1) 装置和连接 环样的绕组应按图 8-28 进行连接。

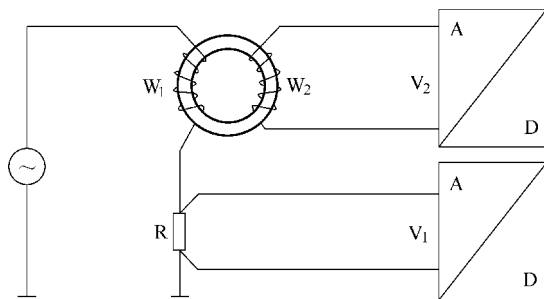


图 8-28 数字方法的电路示意图

W_1 —初级绕组 W_2 —次级绕组 R —用于测量磁化电流与初级绕组串接的无感精密电阻器

V_1 —用于测量磁化电流的电压模数转换器 V_2 —用于测量次级电压的电压模数转换器

测量过程中交流电源输出端的电压和频率的各自偏差不应超过设定值的 $\pm 0.2\%$ 。交流电源应与环样上的初级绕组 W_1 及一个在测量频率范围内准确度为 $\pm 0.2\%$ 或更好的无感精密电阻串联, 精密电阻器两端连接准确度与电压表相当的

($\pm 1.0\%$ 或更好) 电压 (A/D) 模数转换器 V_1 。

次级回路包含次级绕组 W_2 及与其连接的准确度与电压表相当的 ($\pm 1.0\%$ 或更好) 电压 (A/D) 模数转换器 V_2 。

(2) 磁化电流波形 为了获得可比较的测量值, 测量前应明确是保持次级电压还是保持磁化电流为正弦波, 即波形系数为 $1.111 \times (1 \pm 1\%)$ 。为了使次级电压或磁化电流有一个好波形, 可能需要优化初级绕组的匝数, 使其与电源的输出阻抗相匹配。

(3) 磁场强度的测定 测量所需的磁场强度由下式计算:

$$H(t) = \frac{N_1}{Rl_m} U_1(t) \quad (8-44)$$

式中 $H(t)$ ——对应时间 t 的磁场强度, 单位为 A/m;

N_1 ——初级绕组的匝数;

$U_1(t)$ ——对应时间 t 用于确定磁化电流的无感精密电阻器两端的电压, 单位为 V;

l_m ——试样的平均磁路长度, 单位为 m;

R ——与初级绕组串联的用于确定磁化电流的无感精密电阻器的电阻值, 单位为 Ω 。

如果电压 U_1 的值是离散的, 则磁场强度按下式计算:

$$H_i = \frac{N_1}{Rl_m} U_1 \quad (8-45)$$

式中 H_i ——磁场强度的离散值, 单位为 A/m;

U_1 ——用于确定磁化电流的无感精密电阻器两端电压的离散值, 单位为 V。

(4) 磁通密度的测定 次级电压应采用经校准的电压模数转换器进行测量, 磁通密度按下式计算:

$$B(t) = -\frac{1}{N_2 A} \int_0^t U_2(t) dt + K \quad (8-46)$$

式中 $B(t)$ ——对应时间 t 的磁通密度, 单位为 T;

N_2 ——次级绕组的匝数;

$U_2(t)$ ——对应时间 t 的次级电压, 单位为 V;

A ——试样的横截面积, 单位为 m^2 ;

K ——使 $B(t)$ 对时间的平均值为零的一个值。

(5) 交流相对磁导率的测定 对于磁场强度和磁通密度相对应的值, 相对交流磁导率应按下式计算:

$$\mu_a = \frac{B_p}{\mu_0 H_p} \quad (8-47)$$

式中 μ_a ——交流相对磁导率；

μ_0 ——磁性常数 $4\pi \times 10^{-7}$ ，单位为 H/m；

B_p ——磁通密度的峰值，单位为 T；

H_p ——磁场强度的峰值，单位为 A/m。

(6) 交流磁化曲线的测定

测试前试样应先退磁。然后逐步增大磁化电流，即可获得磁场强度和磁通密度的相应值，并绘制出磁化曲线。

(7) 比总损耗的测定 比总损耗 P_s 与由 B 和 H 值构成的磁滞回线的面积相对应。试样的比总损耗 P_s 应按下式计算：

$$P_s = \frac{fN_1}{N_2mR} \int_0^T U_1(t) U_2(t) dt \quad (8-48)$$

式中 P_s ——试样的比总损耗，单位为 W/kg；

f ——频率，单位为 Hz；

N_1 ——初级绕组的匝数；

N_2 ——次级绕组的匝数；

m ——试样的质量，单位为 kg；

R ——用于测定磁化电流与初级绕组串联的无感精密电阻器的电阻，单位为 Ω ；

T ——周期，单位为 s；

$U_1(t)$ —— t 时刻用于测定磁化电流的无感精密电阻器两端的电压，单位 V；

$U_2(t)$ —— t 时刻的次级电压，单位为 V。

8.6.4 软磁材料矫顽力的抛移测量方法

从试样的稳定饱和磁化状态，沿饱和磁滞回线单调地改变磁场，使磁极化强度沿饱和磁滞回线减小到零时的磁场强度称为矫顽力，用 H_c 表示，单位为 A/m。矫顽力是对应于磁极化强度为零的情况的。

1. 试样

试样应为长条形，长宽（或直径）比不小于 10。薄板试样尺寸，长为 (200 ± 0.3) mm，宽为 (20 ± 0.2) mm，厚为 1 ~ 4 mm。棒形试样长为 (200 ± 0.2) mm，直径为 (10 ± 0.2) mm。

试样应平直，且截面积均匀，不得有明显的孔洞、毛刺和锈蚀等缺陷。

2. 测量原理

测量电路原理如图 8-29 所示，图 8-29 中箭头方向表示试样或测量线圈的抛移方向。

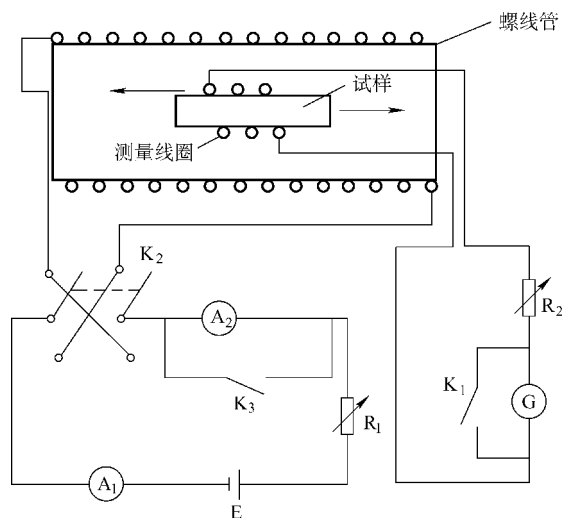


图 8-29 测量电路原理

E—直流电源 A_1 —电流（安培）表 A_2 —电流（毫安）表
 K_1 —检流计阻尼开关 K_2 —电流换向开关 K_3 —电流（毫安）表分流开关
 R_1 —电流调节器 R_2 —检流计串联电阻 G —冲击式检流计

为避地磁场及周围外杂散磁场的影响，螺线管轴线应垂直于地磁场方向，且周围距离 1m 的范围内没有铁磁物质。

3. 测量设备

(1) 螺线管 其产生的最大磁化场不小于 $2.5 \times 10^4 \text{ A/m}$ ，在中心 $\pm 150 \text{ mm}$ 范围内磁场不均匀度不大于 0.4%，校准磁场常数误差不大于 0.2%。为提高测试精度，也可在该螺线管内，同轴紧密绕制一螺线管，以产生一较小的同向叠加磁化场，并与该螺线管联用实现退磁场的精密控制。

(2) 直流电源 直流源应根据所需最大磁化场选择，可用内阻很低的蓄电池，或具有稳定性优于 $0.1\%/10 \text{ min}$ 的直流稳压电源，并能在冲击状态下工作，负载时输出的纹波电压不大于 10^7 mV 。

(3) 电流调节器 电流调节器一般为滑线电阻，要求能连续调节电流，使磁化场在测量范围内平地地改变。

(4) 电流表 电流表为 0.5 级或者更好的直流电流（安培）表和 0.2 级或者更好的直流电流（毫安）表。

(5) 测量线圈 测量线圈的匝数应不小于 1000，应均匀绕在非磁性绝缘骨架上，线圈骨架内径与试样表面距离不大于 10mm，线圈长度不大于试样长度的 5%。

(6) 冲击式检流计 冲击式检流计的电量常数小于 $10^{-8} \text{ C}/(\text{mm} \cdot \text{m})$ ，固有

周期不小于 20s。也可用积分精度优于 0.3% 和每分钟零位漂移小于满量程 0.2% 的磁通积分器或其他电子式积分装置。

(7) 试验装置 试验装置应保证试样的轴线和几何中心与螺线管的轴线和几何中心重合, 对应的轴线交角小于 2° 。试样、螺线管和测量线圈的几何中心相互偏离不大于 5mm。可采用抛移测量线圈或抛移试样两种方式。无论哪种方式, 应保证操作时测量线圈与试样沿其两者和螺线管的轴线迅速平稳地相对抛移到预定的终点位置, 并保证在抛移过程中测量线圈和试样之间不发生触碰。试验装置应保证在上述测量过程中试样始终处于均匀磁场中。

4. 测量步骤

测量时先合上开关 K_1 、 K_2 、 K_3 接通电源, 调节 R_1 使试样磁化至饱和。通常, 饱和磁化场取 2×10^4 A/m, 并在饱和磁场下对试样进行稳磁 (一般需进行 5 ~ 10 次)。然后将电流从最大值缓慢、平稳地降至最小值 (其持续时间不小于 30s), 断开电流时的磁场不大于 8 A/m。断开 K_3 , K_2 换向, 调节 R_1 平稳地增加电流, 使试样退磁。随后断开 K_1 , 抛移操作使测量线圈与试样从两者中心重合位置迅速抛移至测量线圈处于试样端头外 (35 ± 5) mm 的位置, 观察检流计偏转, 取检流计无偏转时的电流值为 I_c , 并计算矫顽力。

测量过程中, 试样不得受到振动和撞击, 除稳定饱和时的电流换向外, 只允许单方向连续地改变电流, 否则应重新测试。抛移操作的全部时间不大于检流计固有周期的 1/20。测量过程中磁极化强度为零时的矫顽力值附近的检流计反冲格数可以不计。

5. 数据处理

按下式计算矫顽力:

$$H_c = KI_c \quad (8-49)$$

式中 H_c ——矫顽力, 单位为 A/m;

K ——螺线管常数, 单位为 m^{-1} ;

I_c ——检流计偏转为零时的电流, 单位为 A。

实际测试中, 允许使用内插法求取 H_c 值, 即在充分靠近 H_c 处取两个电流值, 满足 $I_1 < I_c < I_2$, 其中 I_1 和 I_2 对应的偏转示值为 a_1 和 a_2 (a_1 和 a_2 在测量电路的最大灵敏度下不大于 10mm), 矫顽力用下式计算:

$$H_c = K \left[I_1 + (I_2 - I_1) \frac{a_1}{a_1 + a_2} \right] \quad (8-50)$$

式中 H_c ——矫顽力, 单位为 A/m;

K ——螺线管常数, 单位为 m^{-1} ;

I_1 、 I_2 ——磁化电流, 单位为 A;

a_1 、 a_2 ——检流计的偏转示值, 单位为 mm。

为消除地磁场以及外杂散磁场的影响，用正反两个磁化方向测得的矫顽力值作为试样的平均矫顽力。

8.6.5 非晶纳米晶软磁合金交流磁性能的测量方法

1. 试样

非晶纳米晶软磁合金交流磁性能的测量使用环形试样。试样内径一般为 10 ~ 20mm，外径一般为 14 ~ 30mm。允许采用其他尺寸的环形试样，但试样的平均直径（外径与内径差的 1/2）与试样叠片厚度之比应大于 8。试样应平整，无毛刺、变形等缺陷。试样在测量前应装入非铁磁性绝缘材料保护盒中，或者采取其他措施，防止试样在绕线和测试过程中受力。试样在测量前应按照 GB/T 3658—2008《软磁材料交流磁性能环形试样的测量方法》中的方法予以充分退磁。

2. 伏安法交流磁性测量原理

当软磁材料在交变磁场中磁化时，材料内部的磁感应强度也随之变化。由于材料性质的不同，磁感应强度的大小和相位差也不同。按照图 8-30 所示的测量原理图，如果测得与被测样品初级线圈串联的取样电阻 R 上的电压降 U_1 、次级线圈的感应电压 E_2 以及它们的相位关系，由图 8-31 所示的矢量关系图，通过计算可得到该软磁材料的相对弹性磁导率、相对粘性磁导率、相对幅值磁导率、相对电感磁导率、比铁损、励磁功率和品质因数等交流磁特性。

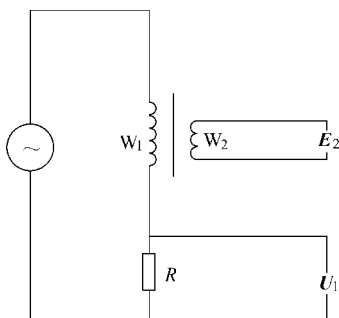


图 8-30 伏安法基本原理图

W_1 —被测样品的初级线圈

W_2 —被测样品的次级线圈

E_2 —次级线圈的感应电压

R —与初级线圈串联的取样电阻

U_1 —取样电阻两端的电压

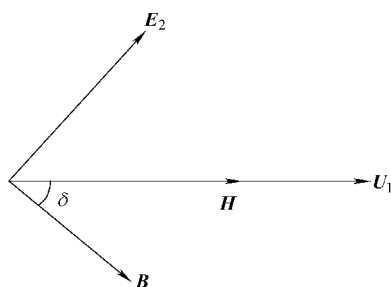


图 8-31 伏安法矢量关系图

E_2 —次级线圈的感应电压

δ — H 与 B 的夹角

H —磁化场矢量

U_1 —取样电阻两端的电压

B —磁感应强度矢量

1) 相对弹性磁导率按下式计算：

$$\mu' = \frac{B_m \cos \delta}{\mu_0 H_m} \quad (8-51)$$

式中 μ' ——相对弹性磁导率；

B_m ——磁感应强度幅值，单位为 T；

δ —— H 与 B 的夹角，单位为 (°)；

μ_0 ——磁性常数，其值为 $4\pi \times 10^{-7}$ ，单位为 H/m；

H_m ——磁场强度幅值，单位为 A/m。

2) 相对粘性磁导率按下式计算：

$$\mu'' = \frac{B_m \sin \delta}{\mu_0 H_m} \quad (8-52)$$

式中 μ'' ——相对粘性磁导率；

B_m ——磁感应强度幅值，单位为 T；

δ —— H 与 B 的夹角，单位为 (°)；

μ_0 ——磁性常数，其值为 $4\pi \times 10^{-7}$ ，单位为 H/m；

H_m ——磁场强度幅值，单位为 A/m。

3) 相对幅值磁导率按下式计算：

$$|\mu| = \sqrt{\mu'^2 + \mu''^2} \quad (8-53)$$

式中 $|\mu|$ ——相对幅值磁导率；

μ' ——相对弹性磁导率；

μ'' ——相对粘性磁导率。

4) 相对电感磁导率按下式计算：

$$\mu_L = \frac{|\mu|^2}{\mu'} \quad (8-54)$$

式中 μ_L ——相对电感磁导率；

$|\mu|$ ——相对幅值磁导率；

μ' ——相对弹性磁导率。

5) 比铁损按下式计算：

$$P = \frac{I_0 U_0 \sin \delta}{m} = I_0 \frac{N_1}{N_2 m} E_2 \sin \delta \quad (8-55)$$

式中 P ——比铁损，单位为 W/kg；

I_0 ——级线圈电流有效值，单位为 A；

U_0 ——初级线圈电压有效值，单位为 V；

δ —— H 与 B 的夹角，单位为 (°)；

m ——试样质量，单位为 kg；

N_1 ——初级线圈的匝数；

N_2 ——次级线圈的匝数；

E_2 ——次级线圈电压有效值，单位为 V。

6) 励磁功率按下式计算：

$$P_e = \frac{I_0 U_0}{m} = I_0 \frac{N_1}{N_2 m} E_2 \quad (8-56)$$

式中 P_e ——励磁功率，单位为 W/kg；

U_0 ——初级线圈电压有效值，单位为 V；

I_0 ——初级线圈电流有效值，单位为 A；

m ——试样质量，单位为 kg；

N_1 ——初级线圈的匝数；

N_2 ——次级线圈的匝数；

E_2 ——次级线圈电压有效值，单位为 V。

7) 品质因数按下式计算：

$$Q = \frac{\mu'}{\mu''} \quad (8-57)$$

式中 Q ——品质因数；

μ' ——相对弹性磁导率；

μ'' ——相对粘性磁导率。

3. 测量方法

(1) 伏安相量法 伏安相量法的测量原理如图 8-32 和图 8-33 所示。被测样品初级线圈中的电流用取样电阻 R 上的电压降 U_1 来监测，次级线圈上的感应电压为 E_2 ，二者的矢量和为 E_3 。通过 U_1 、 E_2 和 E_3 组成的矢量三角形可以计算出相对弹性磁导率、相对粘性磁导率、相对幅值磁导率、相对磁导率、比铁损、励磁功率和品质因数等交流磁性参数。

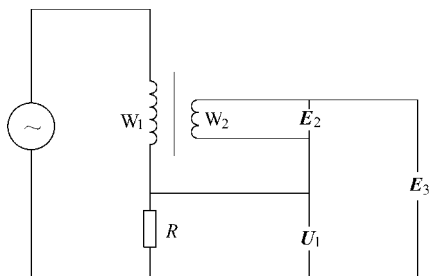


图 8-32 伏安相量法基本原理图

W_1 —被测样品的初级线圈 W_2 —被测样品的次级线圈 E_2 —次级线圈的感应电压

E_3 — U_1 和 E_2 的矢量和 R —与初级线圈串联的取样电阻 U_1 —取样电阻两端的电压

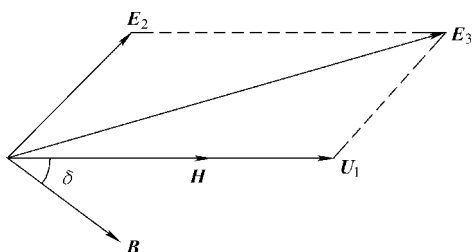


图 8-33 伏安相量法矢量关系图

E_2 —一次级线圈的感应电压 E_3 — U_1 和 E_2 的相量和 δ — H 与 B 的夹角

H —磁化场矢量 U_1 —取样电阻两端的电压 B —磁感应强度矢量

(2) 计算机波形采样法 原理如图 8-34 所示。由示波器分别显示与被测样品初级线圈串联的取样电阻 R 两端的电压和次级线圈的感应电压波形，并由计算机进行波形采样。计算机根据所采电压波形及其相位差计算出各个磁性参数。

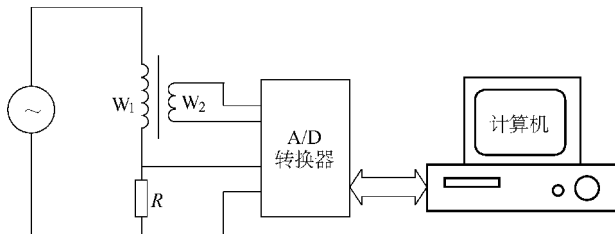


图 8-34 计算机采样法基本原理图

W_1 —被测样品的初级线圈 W_2 —被测样品的次级线圈 R —与初级线圈串联的取样电阻

8.6.6 矫顽力小于或等于 600kA/m 永磁材料的磁性能测量方法

1. 试样

- 1) 试样取矩形或圆形截面的柱体。为了使试样均匀磁化,试样长度应大于 5mm。
- 2) 试样两端面应磨削到互相平行,平行度误差不超过 9 级公差,端面垂直于轴线,垂直度误差不超过 9 级公差,表面粗糙度 Ra 值为 $3.2\mu\text{m}$ 。
- 3) 试样横截面积沿整个长度方向应保持一致,其偏差不超过自身最小横截面积的 1%,试样尺寸的测量误差不得超过 0.2%。
- 4) 试样不应有缺口、掉边、裂纹、砂眼和气孔等缺陷。
- 5) 对于各向异性的永磁材料,在测量其磁性时,试样的磁化方向应与材料的易磁化方向一致。
- 6) 对于温度系数较大的材料,如铁氧体永磁材料等,在测量时试样温度变化不应超过 $\pm 3^\circ\text{C}$ 。
- 7) 试样放置于磁化装置两极面间的磁场均匀区内。试样的欲磁化方向应与磁场方向一致。

2. 磁化装置

1) 磁化装置由磁轭、极头和磁化绕组组成。磁轭、极头和试样构成闭合磁路，如图 8-35 所示。

2) 磁轭和极头应由矫顽力不大于 100 A/m 的软磁材料制成，其结构应对称。为了减小因磁通迅速变化而产生的涡流，磁轭用叠片铁心制成，极间距离在一定范围内连续可调。极面应为平面，表面粗糙度 Ra 值为 $3.2 \mu\text{m}$ ，两极面应平行并与磁场方向垂直。

3) 磁化绕组的位置应尽量靠近试样并互相对称，其轴线与极头轴线一致。

4) 磁化电源应具有足够的容量，在测量时磁化电源调节器应能在整个测量范围内连续而平稳地改变磁场。磁化电流的不稳定度不超过 $0.1\%/\text{min}$ 。

5) 磁化装置应能产生使试样磁化到饱和的磁化场，其值随永磁材料的种类而变化，并与晶粒的取向有关。饱和磁化场强度 $H_{\max}$ 的选择通常与矫顽力有关。即：

$$H_{\max} = KH_{\text{cJ}} \quad (8-58)$$

式中 $H_{\max}$ ——饱和磁化场强度，单位为 A/m ；

H_{cJ} ——矫顽力，单位为 A/m ；

K ——磁化系数，根据永磁材料的种类而变化，一般取 $3 \sim 5$ 。

部分永磁材料的饱和磁化场强度如表 8-52 所示。

表 8-52 部分永磁材料的饱和磁化场强度

材料牌号或种类	$H_{\max}/(\text{kA/m})$	说 明	材料牌号或种类	$H_{\max}/(\text{kA/m})$	说 明
LN10	200	—	LNGT72	400	—
LN8	240	—	铁氧体永磁	1100	—
LNG13	240	—	FeCrCo	240	—
LNG20	240	—	SmCo5	3200	初始饱和场
LNG32	240	—	Sm2Co17	3200	初始饱和场
LNG40	240	—	PrSmCo5	2400	初始饱和场
LNG52	340	—	Ce (CoCuFe)5	1600	初始饱和场
LNGT32	400	—	Sm2 (CoCuFeZr) 17	1600	初始饱和场
LNGT56	400	—	Nd-Fe-B	3000	初始饱和场

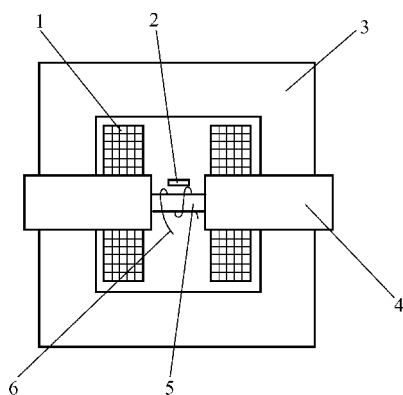


图 8-35 磁化装置

1—磁化绕组 2—磁场探测器 3—磁轭
4—极头 5—试样 6— B （或 J ）测量线圈

3. 磁通密度的测量

磁通密度的变化量由一个测量线圈连接感应电压时间积分器来测量。感应电压时间积分器可以是冲击式检流计、磁通计、电子积分器或其他自动装置。磁通密度的变化量可由下式计算：

$$\Delta B = B_2 - B_1 = \frac{1}{NS} \int_{t_1}^{t_2} U dt \quad (8-59)$$

式中 B_2 —— t_2 时刻的磁通密度，单位为 T；

B_1 —— t_1 时刻的磁通密度，单位为 T；

S ——试样的横截面积，单位为 m^2 ；

N ——测量线圈的匝数；

U ——感应电压，单位为 V。

考虑到测量线圈中包括空气磁通，这个磁通密度变化量应该修正，修正后的磁通密度变化量 ΔB_c 为：

$$\Delta B_c = \frac{1}{NS} \int_{t_1}^{t_2} U dt - \mu_0 \Delta H \frac{(S_t - S)}{S} \quad (8-60)$$

式中 ΔH ——引起磁通密度变化 ΔB 的磁场强度变化量，单位为 A/m；

S_t ——测量线圈的有效横截面积，单位为 m^2 。

4. 磁场强度的测量

磁场强度用磁场探测器配合相应的仪器测量，即通过测量线圈连接感应电压时间积分器或霍尔探头配合电测仪器测量。磁场探测器的常数应预先校准，其引出线绞合在一起。

为减小由气隙 δ 引起的测量磁场的误差应将试样夹紧，如图 8-36 所示。

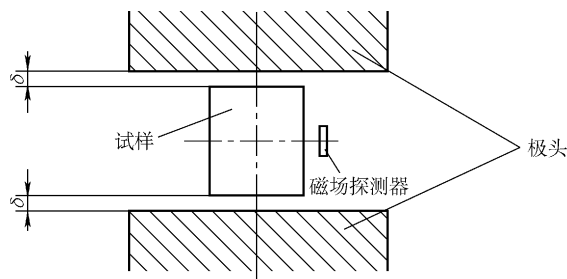


图 8-36 空气间隙

5. 退磁曲线的测量

(1) 用冲击检流计测量 对于具有叠片磁轭的磁化装置，磁化到饱和磁状态，并进行磁锻炼以保证试样磁状态稳定。然后切断磁化电流，便可测得磁通密度的变化量 ΔB ，如图 8-37 所示。

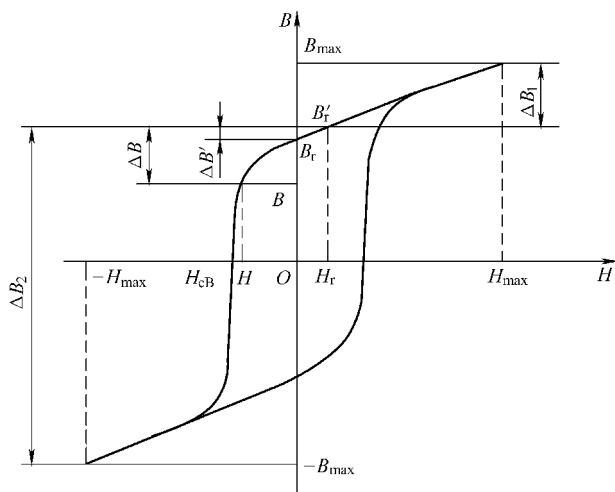


图 8-37 饱和磁滞回线

从图 8-37 中可以看出: $\Delta B_1 = B_{\max} - B_r'$, 但由于磁轭和极头产生的剩余磁场强度 H_r 不等于零, 因而 B_r' 不等于 B_r , 再将磁化场跃变到 $-H_{\max}$ 测得 ΔB_2 :

$$\Delta B_2 = B_r' + B_{\max} \quad (8-61)$$

$$B_r' = 1/2(\Delta B_2 - \Delta B_1)$$

当 H_r 等于 0 时, B_r' 等于 B_r , 当 H_r 不等于 0 时, B_r 可以由退磁曲线上求得。

测量退磁曲线上任一点的 B 和 H 时, 试样均应磁化到饱和点 $(B_{\max}, H_{\max})$, 并进行磁锻炼。切断磁化电流, 磁状态处于 (B_r', H_r) 点, 然后使磁化场跃变到测量点的磁化场强 $-H$, 同时测得磁通密度变化量 ΔB , 该点的 B 为:

$$B = B_r' - \Delta B \quad (8-62)$$

重复上述过程, 测出各点的 B 和 H 值, 退磁曲线便可描绘出来。

对于具有非叠片磁轭的磁化装置, 为了减小由于涡流和电感引起的非瞬时误差, 应采用如下测量步骤: 通过产生 $H_{\max}$ 的最大磁化电流换向来测得 $B_{\max}$, 如图 8-38 所示。

$B_{\max}$ 按下式计算:

$$B_{\max} = \frac{1}{2}(\Delta B_3)$$

退磁曲线上任一点的 B 和 H 的测量时, 先将试样在 $H_{\max}$ 下磁锻炼, 然后测得其磁场强度 H , 再使磁化电流跃变到它的最大值, 同时测得磁通密度变化量 ΔB , 该点的磁通密度按下式计算:

$$B = \Delta B - B_{\max}$$

依次测出各点的 B 和 H , 退磁曲线便可描绘出来。

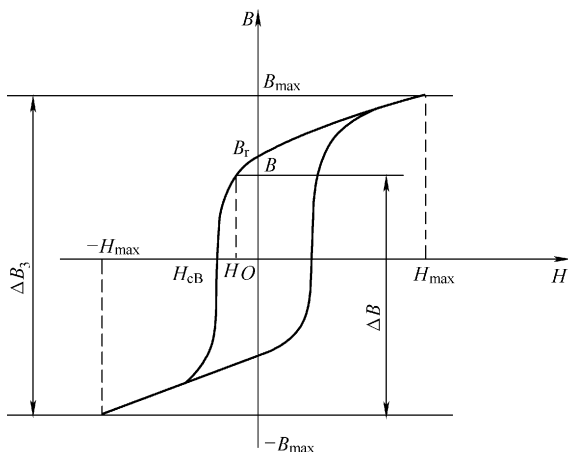


图 8-38 饱和磁滞回线

(2) 用电子积分器测量 用电子积分器描述的退磁曲线及回复线如图 8-39 所示。

把空的测量 B 线圈和磁场探测器置于杂散磁场小于 0.1kA/m 的空间，仔细调整电子积分器和磁场探测仪到零位，此时 X-Y 记录仪落笔在坐标原点，然后把试样放入测量 B 线圈夹紧，同时磁场探测器置于两极面之间。

将试样退磁，使磁化电流单调减小到零，改变磁化电流方向，慢慢增加磁化电流至退磁曲线 H_{cB} 或 H_{cJ} 点。这时，X-Y 记录仪记录下退磁曲线上各点的磁通密度值和相应的磁场强度值。

描绘出退磁曲线后，取退磁曲线与 B 轴交点的磁通密度值可确定剩磁 B_r 。退磁曲线与 $B=0$ 直线的磁场强度值为矫顽力 H_{cB} ，与 $B=\mu_0 H$ 直线交点的磁场强度为 H_{cJ} 。

6. 最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 的确定

最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 由退磁曲线上相应的 B 和 H 乘积的最大值确定，或者用退磁曲线与等磁能相切的方法确定。

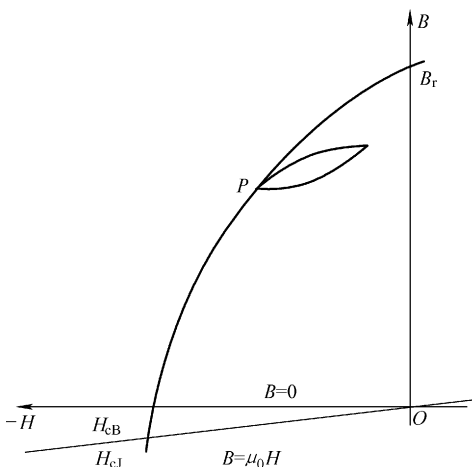


图 8-39 用电子积分器描述的退磁曲线及回复线

8.6.7 矫顽力大于 600kA/m 永磁材料的磁性能测量方法

1. 磁化场

对于矫顽力大于 600kA/m 的稀土永磁试样，从原始磁状态用 $H_1 \approx 1 \sim 1.5 H_{cj}$ 的磁场就可以磁化到接近饱和。要测量退磁曲线，得到第二象限的数据并再磁化到最初的极性，则需要 $H_2 \approx 1.5 \sim 3 H_{cj}$ 的磁场值。要完整地表征真正对称的磁化状态，则需要更高的 $H_3 \approx 3 \sim 5 H_{cj}$ 的磁场值。

2. J 线圈

J 线圈采用绝缘良好的细软铜线均匀地在无磁的线圈骨架上绕制而成。磁通测量线圈和磁场补偿线圈应串联反接，根据电磁铁极面的大小和试样尺寸，可以采用同心形或双心形，如图 8-40 所示。

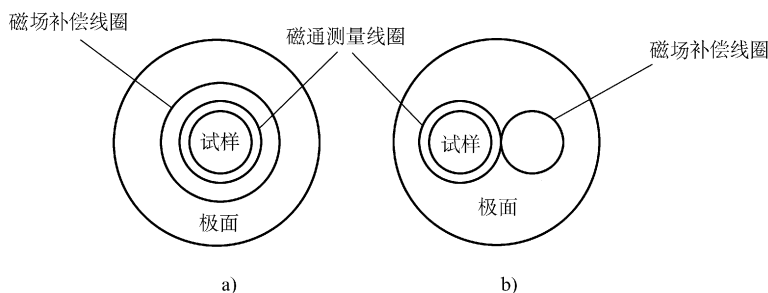


图 8-40 J 测量线圈

a) 同心形 b) 双心形

磁通测量线圈和磁场补偿线圈应满足如下关系：

$$N_1 A_1 = N_2 A_2 \quad (8-63)$$

式中 N_1 ——磁通测量线圈的匝数；

A_1 ——磁通测量线圈的横截面积，单位为 m^2 ；

N_2 ——磁场补偿线圈的匝数；

A_2 ——磁场补偿线圈的横截面积，单位为 m^2 。

3. 测量方法

1) 测量前用脉冲磁化器或超导螺线管磁化试样，最大磁化场强度至少为该材料矫顽力 H_{cj} 的 3~5 倍。测量用的磁化装置，其极头应有锁紧机构，以防止在高磁场下产生的机械力挤碎试样。

2) 把空的测量 J 线圈和磁场探测器置于杂散磁场小于 0.1kA/m 的空间，仔细调整测量装置的零点漂移，待测量装置稳定后，放下 X-Y 记录仪的笔，定出 $J(H)$ 曲线的坐标原点 (0, 0) 然后把试样放入测量 J 线圈中。

3) 退磁曲线的测量顺序如图 8-41 所示, 已充磁试样的磁状态设为 R 点, 将试样装入两极头间, 夹紧后的磁状态设为 Q 点, 然后按通磁化电源, 磁化试样, 其磁化状态达到 A 点, 此点即作为开始记录的起点。通常 A 点的磁场强度在 200A/m 以上。

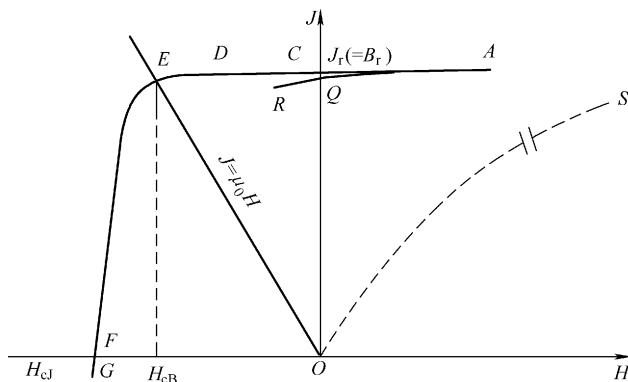


图 8-41 退磁曲线的测量顺序

4) 按照 $ACDFG$ 的顺序单调改变磁场, $X-Y$ 记录仪便描绘出退磁曲线。描绘完退磁曲线后, 抬起 $X-Y$ 记录仪的笔, 调节磁化电源, 使磁场回到零, 从测量 J 线圈中取出试样。

4. 磁参数的确定

描绘出退磁曲线后, 退磁曲线与 J 坐标轴交点的磁极化强度值为剩磁 J_r (B_r), 退磁曲线与 H 坐标轴交点的磁场强度值为 H_{cj} , 退磁曲线与 $J = -\mu_0 H$ 直线交点的磁场强度值为矫顽力 H_{cB} 。

8.6.8 永磁材料磁性能温度系数测量方法

1. 试样

与矫顽力 H_{cj} 小于或等于 600kA/m 永磁材料磁性能测量时使用的试样完全相同。

2. 测量装置

(1) 闭合磁路测量装置 在闭合磁路中测量剩磁 B_r 和矫顽力 H_{cj} 的测量装置如图 8-42 所示。

(2) 磁化装置及磁通积分器 磁化装置 (包括用于磁化试样的电磁铁或磁导计) 及磁通积分器应符合 GB/T 3217—1992 《永磁 (硬磁) 材料磁性试验方法》的规定。

(3) 加热及测温装置 加热装置如图 8-43 所示, 采用热电偶测量温度, 温度

测量精度不低于 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

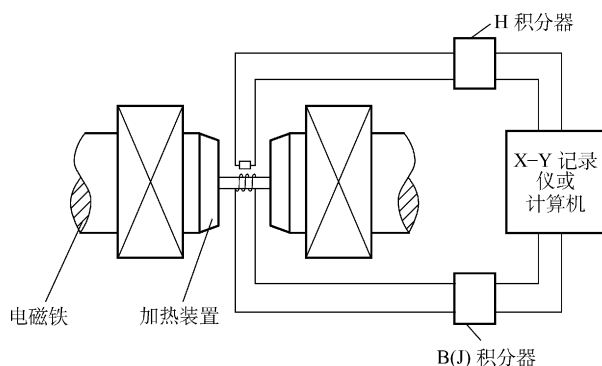


图 8-42 闭合磁路中测量剩磁 B_r 和矫顽力 H_{cj} 的测量装置

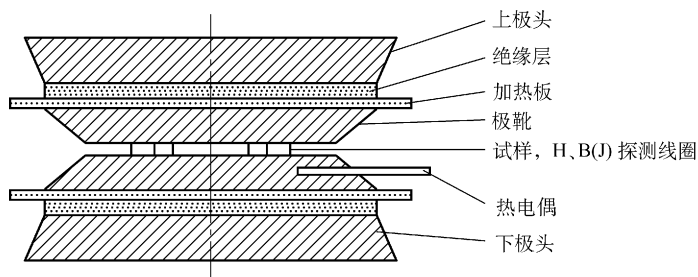


图 8-43 在闭合回路中测量温度系数的加热装置

3. 测量方法

- 1) 温度系数的温度测量范围为 $273 \sim 373\text{K}$ 。
- 2) 测试前应将试样磁化至饱和，最低饱和磁化场的选择按表 8-52 进行。
- 3) 测试前应对试样进行温度循环处理，即试样从基础温度 T_1 加热至高出温度变化上限 $T_2 20^\circ\text{C}$ 后自然冷却至室温，这种循环至少进行一次。
- 4) 分别测量出 T_1 和 T_2 时的剩磁 B_r 和矫顽力 H_{cj} 。

4. 数据处理

- 1) 剩磁温度系数按下式计算：

$$\alpha(B_r) = \frac{B_r(T_2) - B_r(T_1)}{B_r(T_1) \cdot (T_2 - T_1)} \quad (8-64)$$

式中 $\alpha(B_r)$ ——剩磁温度系数, 单位为 %/K;

T_1 ——基础温度, 单位为 K;

T_2 ——温度变化上限的温度, 单位为 K;

$B_r(T_1)$ ——温度 T_1 的剩余磁通密度, 单位为 T;

$B_r(T_2)$ ——温度 T_2 的剩余磁通密度, 单位为 T。

2) 矫顽力温度系数按下式计算:

$$\alpha(H_{cj}) = \frac{H_{cj}(T_2) - H_{cj}(T_1)}{H_{cj}(T_1) \cdot (T_2 - T_1)} \quad (8-65)$$

式中 $\alpha(H_{cj})$ ——矫顽力系数, 单位为 %/K;

T_1 ——基础温度, 单位为 K;

T_2 ——温度变化上限的温度, 单位为 K;

$H_{cj}(T_1)$ ——温度 T_1 的矫顽力, 单位为 A/m;

$H_{cj}(T_2)$ ——温度 T_2 的矫顽力, 单位为 A/m。

8.6.9 弱磁材料的磁导率测量方法

在开磁路下用补偿空气磁通冲击法测量弱磁材料磁导率的方法, 适用于测量相对磁导率 μ_r 为 1.0 ~ 4.0 的弱磁材料。

1. 试样

1) 试样应为具有均匀截面的直圆棒或条形, 其横截面积不小于 20mm², 长度不小于 100mm, 并且试样长度和直径 (或等效直径) 之比符合表 8-53 的规定。

表 8-53 试样的长度和直径 (或等效直径) 之比

相对磁导率 μ_r	<1.1	1.1 ~ 2.0	>2.0 ~ 4.0
试样长度与直径之比 λ	≥ 10	≥ 20	≥ 30

注: 等效直径是指具有与试样截面积相等面积的圆的直径。

2) 试样应平直, 表面粗糙度 Ra 不大于 1.6 μ m, 不应有肉眼所见毛刺、裂纹、孔洞及氧化皮等。

3) 试样横截面面积的测量误差不大于 $\pm 0.2\%$ 。

2. 测量原理及电路

弱磁材料磁导率的测量方法通常采用单螺线管补偿空气磁通冲击法, 其原理为: 在磁化螺线管均匀磁场中部固定一个测量线圈, 并与置于磁化场中的补偿线圈反向串接。为完全补偿测量线圈的空气磁通, 再与补偿线圈正向串接一个低值可调的互感器次级线圈, 然后接入检流计。测量时试样放入测量线圈 SW_1 之前要进行补偿, 使之达到精确平衡。然后再将试样放入测量线圈中所要求的位置, 磁化电流

换向时, 测量线圈中磁通发生变化, 其大小取决于试样的磁性。测量原理电路如图 8-44 所示。

3. 测量步骤

1) 在试样放入测量线圈之前, 为了消除测量线圈中的空气磁通, 磁化螺线管应通以测量时的最大磁化电流, 并调低值可调互感器。当磁化电流换向时, 检流计偏转 α_1 应尽可能小, 视为达到精确平衡。

2) 将预先退磁的试样放进测量线圈 SW_1 中, 使试样轴向中点与测量线圈轴向中点重合。通以指定磁化电流, 然后稳磁 3 ~ 5 次。磁化电流换向时, 冲击检流计偏转 α_2 。

3) 冲击常数 K_B 标定。接通标准互感器, 再给标准互感器初级线圈通入适当的电流 I_k , 当电流换向时, 冲击检流计偏转 a_k , 冲击常数按下面公式计算:

$$K_B = \frac{2MI_k}{a_k} \quad (8-66)$$

式中 K_B ——冲击常数, 单位为 Wb/mm ;

M ——标准互感值, 单位为 H ;

I_k ——校正电流, 单位为 A ;

a_k ——冲击检流计偏转, 单位为 mm 。

4) 相对磁导率 μ_r 按下式计算:

$$\mu_r = 1 + \frac{K_B(a_2 - a_1)}{2\mu_0 K I N A} \quad (8-67)$$

式中 K_B ——冲击常数, 单位为 Wb/mm ;

a_1 ——磁通补偿存有残差引起检流计偏转, 单位为 mm ;

a_2 ——测量线圈放入试样时检流计的偏转, 单位为 mm ;

μ_0 ——磁性常数 $4\pi \times 10^{-7}$, 单位为 H/m ;

K ——磁化螺线管常数, 单位为 m^{-1} ;

I ——磁化电流, 单位为 A ;

N ——测量线圈匝数;

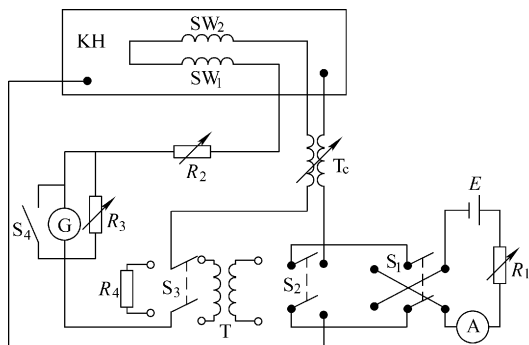


图 8-44 弱磁材料磁导率的测量原理电路

KH—磁化螺线管 SW_1 —测量线圈 SW_2 —补偿线圈

T_c —低值可调互感器 T —标准互感器 G —冲击检流计

A —直流电流表 R_1 —电流调节电阻

R_2 、 R_3 —冲击检流计灵敏度调节电阻

R_4 —标准互感器次级线圈的等效无感电阻

S_1 —电流换向开关 E —直流电源 S_2 、 S_3 —校正、

测量转换开关 S_4 —检流计短路开关

A ——试样截面积, 单位为 m^2 。

8.6.10 在开磁路中测量磁性材料矫顽力的方法

1. 试样

在满足如下要求的前提下, 其形状和尺寸不做严格要求:

- 1) 试样可被置于螺线管内, 其长轴应与螺线管的轴线平行。
- 2) 试样应具有长直的形状, 以使自退磁场不致影响其磁化至饱和, 并且形状效应不会使矫顽力的测量产生显著误差 (在圆柱形试样的情况下, 推荐长径比大于 5:1)。

2. 测量原理

当把一个磁性材料的试样, 放入非常均匀的磁场时, 只要试样的磁极化强度不为零, 叠加在原来的磁场上便会使这个磁场发生畸变。如果在试样上施加一个退磁场, 使试样的磁极化强度变为零, 试样处于完全退磁状态, 则磁场的畸变消失, 此退磁磁场的大小等于矫顽力。

利用磁通探测器可检测磁场畸变消失的情况, 从而给出测定内禀矫顽力的方法。

本方法首先把试样磁化到饱和, 然后施加一个退磁场, 直到由试样引起的磁场畸变消失为止。测量此时的退磁场强度, 并将其定义为试样的矫顽力。

测量时, 试样放在螺线管中部, 处于开磁路状态。磁通探测器可放在图 8-45 中的两种位置。

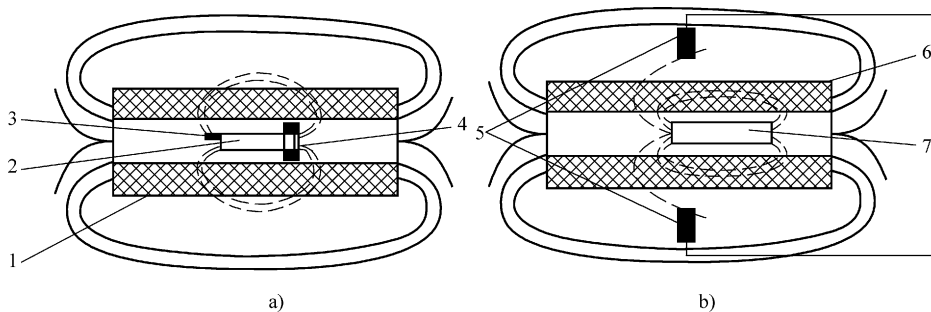


图 8-45 磁通探测器放置位置

a) 靠近试样一端 b) 在螺线管外部

1、6—螺线管 2、7—试样 3—离开轴线安装的磁通感应探头 (如霍尔探头或磁通门探头)

4—振动的探测线圈 5—差分探头 (如霍尔探头或磁通门探头)

3. 磁化方法

把试样磁化到饱和, 可采用以下两种方法:

- 1) 采用矫顽力测量装置的螺线管。
- 2) 采用一个独立的装置, 如一个带有永磁体、电磁铁或脉冲线圈的磁化装置等。

当磁化场强度增加 50%, 矫顽力的增加小于 1% 时, 即可认为试样达到饱和。对于具有低矫顽力和高电导率的磁性材料, 应该平缓不间断地施加磁化场。饱和磁化场的持续时间应足够长, 以保证完全穿透材料 (这个持续时间取决于材料的磁导率、电导率和厚度, 一般为 2 ~ 20s)。

4. 矫顽力的测定

调节与螺线管相接的直流电源, 连续缓慢地增加通过螺线管的退磁电流, 直到测出试样的磁极化强度为零。

退磁电流应该用一只准确度不低于 0.5 级的电流表来测量, 或者在给出相同准确度的条件下, 采用数字电压表并联在一标准电阻两端的方法进行测量, 如图 8-46 所示。

螺线管中试样体积范围内的磁场强度变化应不大于 $\pm 0.5\%$ 。对于螺线管退磁磁场的两个方向, 都应测量退磁电流。

5. 数据处理

矫顽力按下式计算:

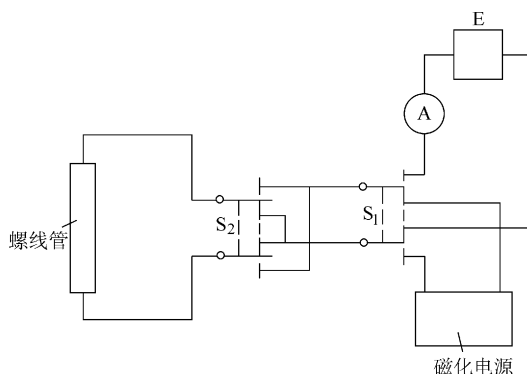


图 8-46 磁化和退磁电路

E—可变的直流电源 A—电流测量装置

S₁—转换开关 S₂—反向开关

$$H_{cj} = KI \quad (8-68)$$

式中 H_{cj} ——矫顽力, 单位为 A/m;

I ——极性相反的两个电流的平均值, 单位为 A;

K ——螺线管常数, 单位为 m^{-1} 。

8.6.11 用单片测试仪测量电工钢片 (带) 磁性能的方法

1. 试验原理

将一块电工钢片试样放入两个线圈内, 外部线圈是初级绕组 (磁化绕组), 内部线圈是次级绕组 (感应电压绕组)。两个相同磁轭是闭合磁路的组成部分, 磁轭的横截面积比试样的横截面积大得多, 如图 8-47 所示。

为了使上部磁轭在试样上的压力对测量的影响减至最小应配备悬挂装置, 以平衡该磁轭的部分质量。环境温度的变化应保持在一定的范围内, 防止因热胀冷缩在试样中产生应力。

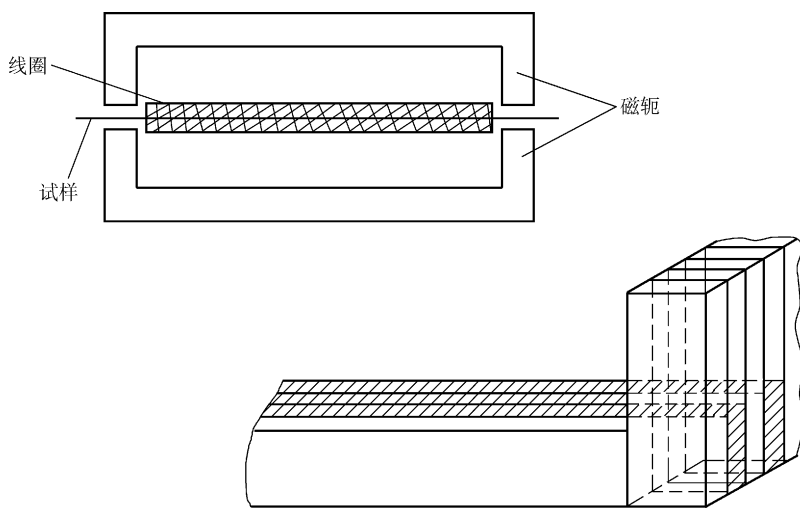


图 8-47 试验装置示意图

2. 磁导计

(1) 磁轭 每个 U 形磁轭都由多片绝缘的取向硅钢或镍铁合金制成，它应有低的磁阻，并且在磁极化强度为 1.5T 和频率为 50Hz 的情况下其比总损耗不大于 1.0W/kg。为了减小涡流的影响，并使磁通在磁轭内的分布均匀，磁轭应由一对 C 形磁心或粘结的叠积式磁心构成，拐角处应按交叠方式对接。磁轭的磁极面宽度应为 (25 ± 1) mm。每个磁轭的两个磁极面应是共面的，其平面度误差要在 0.5mm 以内。两磁轭的相对极面之间在任意点的间隙不得超过 0.005mm，并且为了避免在试样中引起机械应力，两个磁轭都应该是刚性的。每个磁轭的高度都应该在 90 ~ 150mm 之间，每个磁轭的宽度应为 (500 ± 5) mm，内侧长度为 (450 ± 1) mm，如图 8-48 所示。

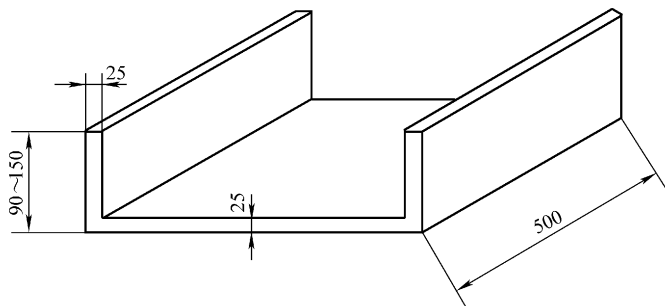


图 8-48 磁轭尺寸图

在磁轭竖直臂之间应有放置试样的非导电无磁性的支撑物。该支撑物应放在与

磁极共面的中心位置，以使试样直接与极面接触并且中间无任何间隙。上部磁轭应能向上移动以便插入试样。插入试样后上部磁轭应与下部磁轭准确地闭合。上部磁轭的悬吊应平衡其部分质量，并使试样受到的力为 100 ~ 200N。对于无取向的材料，为了只测量一个试样，可选择方形的磁轭。将试样转向 90° 就可以测定水平轧制方向和垂直轧制方向的特性。

(2) 绕组 初级和次级绕组长至少应为 440mm，并绕制在不导电的非磁性矩形框架上。框架的长度为 (445 ± 2) mm，内部宽度为 (510 ± 1) mm，内部高度为 3 ~ 5mm，高度不大于 15mm。初级绕组可以由 5 个或 5 个以上相同尺寸和相同匝数的线圈并联，并在整个长度上缠绕，如图 8-49 所示。

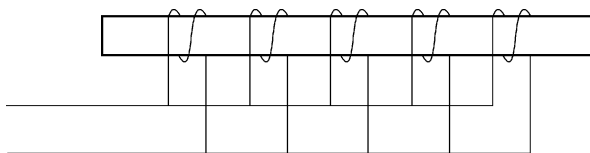


图 8-49 初级绕组的 5 个线圈示意图

(3) 空气磁通补偿 对空气磁通的影响应进行补偿，这可以通过互感线圈来实现。互感线圈的初级绕组与磁导计的初级绕组串联，而互感线圈的次级绕组与磁导计的次级绕组反向串联。互感值的调整方法为：当测试装置中无试样时，在初级绕组中通一交流电，使在次级绕组非公共端间测量的电压不大于磁导计次级绕组本身电压的 0.1%。这样，在串联的次级绕组中感应电压整流后的平均值与试样中磁极化强度的峰值成正比。

(4) 试样 试样的长度不小于 500mm。虽然位于磁极面外的试样部分对测量的影响可以忽略，但此部分的长度取决于试样放入和取出是否方便，试样的长度不宜过长。试样的宽度应尽可能的大，最大可以等于磁轭的宽度。为尽量保证测量的准确，试样的最小宽度不应小于磁轭宽度的 60%。剪切好的试样不能有明显的毛刺或机械变形。试样应平直。在剪切时，以剪切好的试样的边缘作为基准方向。基准方向与轧制方向之间的夹角允许有下述误差：对于晶粒取向钢片为 $\pm 1^\circ$ ；对于无取向的钢片为 $\pm 5^\circ$ ；对于无取向的钢片，应取两个试样，一个平行于轧制方向，而另一个垂直于轧制方向。若试样是正方形的，则仅需要取一个试样。

(5) 电源 电源应具有低内阻和高度稳定的电压和频率。在测量时，电压和频率应保持恒定在 $\pm 0.2\%$ 之内。此外，次级感应电压的波形应尽可能保持正弦，最好保持次级电压的波形因数在 $1.111 \times (1 \pm 1\%)$ 之内。

3. 比总损耗的测量

(1) 测量方法 带有试样的单片测试仪相当于一个空载变压器，其比总损耗用图 8-50 所示的电路测量。

(2) 测量步骤 包括测量准备、电源调整等。

1) 测量试样长度的误差在 $\pm 0.1\%$ 以内, 测量试样质量的误差在 $\pm 0.1\%$ 以内。装入试样并使其处在测试线圈纵横轴的中心, 放下被部分平衡的上部磁轭。测量前试样应通过慢慢减小交变磁场的方法进行退磁, 这个退磁的磁场强度要比被测量值高。

2) 调整电源, 使次级整流电压的平均值为:

$$|\overline{U_2}| = 4fN_2 \frac{R_t}{R_i + R_t} A J_p$$

(8-69)

式中 $|\overline{U_2}|$ ——次级整流电压的平均值, 单位为 V;

A ——试样的横截面积, 单位为 m^2 ;

N_2 ——磁导计的次级绕组的匝数;

R_i ——次级回路中仪器的总电阻, 单位为 Ω ;

R_t ——磁导计的次级绕组和互感线圈的次级绕组的串联电阻, 单位为 Ω ;

f ——频率, 单位为 Hz;

J_p ——磁极化强度的峰值, 单位为 T。

横截面积 A 由下式给出:

$$A = \frac{m}{\rho_m l} \quad (8-70)$$

式中 m ——试样的质量, 单位为 kg;

l ——试样的长度, 单位为 m;

ρ_m ——试样材料密度的约定值, 单位为 kg/m^3 。

3) 确认初级回路电流表的数值 (如果有电流表的话), 以保证功率表的电流不过载; 将电流表短路并重新调整次级电压; 确认次级电压的波形, 并读取功率表的示值。

(3) 数据处理 比总功率损耗按下式计算:

$$P(\text{总}) = \left[P \frac{N_1}{N_2} - \frac{(1.111 |\overline{U_2}|)^2}{R_i} \right] \frac{l}{m l_m} \quad (8-71)$$

式中 $P(\text{总})$ ——试样的比总功率损耗, 单位为 W/kg ;

P ——功率表测量的功率, 单位为 W;

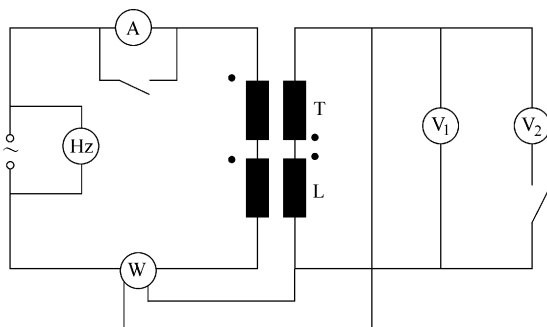


图 8-50 比总损耗的测定电路图

①——平均整流电压测量表 ②——有效值电压测量表 T—互感线圈 L—试样框架

- N_1 ——初级绕组的匝数；
 N_2 ——次级绕组的匝数；
 R_i ——次级回路中仪表的总电阻，单位为 Ω ；
 $\overline{U_2}$ ——次级整流电压的平均值，单位为 V；
 m ——试样的质量，单位为 kg；
 l ——试样的长度，单位为 m；
 l_m ——约定的磁路长度，单位为 m。

8.6.12 用爱泼斯坦方圈测量电工钢片（带）磁性能的方法

1. 试样

试样的样片用双搭接接头方式装成一个方框，并形成长度和横截面积都相等的四束，如图 8-51 所示。

1) 样片应使用不产生明显边缘毛刺的方法剪切，如果有要求，应根据相关的产品标准进行热处理。样片宽度 b 为 (30 ± 0.2) mm，长度 l 为 $280\text{mm} \leq l \leq 320\text{mm}$ ，长度公差为 $\pm 0.5\text{mm}$ 。

2) 当要沿轧制方向或垂直该方向剪切样片时，应以母板的轧制方向为参考。

3) 对于规定方向和实际剪切方向之间的角度，晶粒有取向电工钢片为 $\pm 1^\circ$ ；晶粒无取向电工钢片为 $\pm 5^\circ$ 。

4) 样片应平直。测量应在无附加绝缘的情况下进行。

5) 组成试样的样片数应是 4 的倍数，对于长度为 280mm 的试样，试样的有效质量至少为 240g。

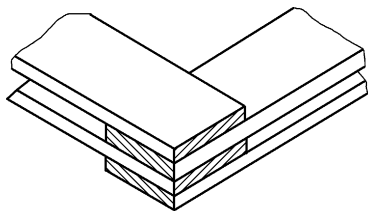


图 8-51 双搭接方式

2. 25cm 爱泼斯坦方圈

25cm 爱泼斯坦方圈由 4 个线圈组成，构成试样的样片插入其中，如图 8-52 所示。

爱泼斯坦方圈应包含一个用于空气磁通补偿的互感线圈。支撑线圈的绕组骨架由硬的绝缘材料制成，如酚醛树脂纸板等。绕组骨架具有矩形横截面，其内部宽度为 32mm，高度约为 10mm。线圈安装在一个绝缘的无磁性的底板上，形成一个方框。由样片的内缘形成的正方形边长为 220^{+1}_{-1}mm 。

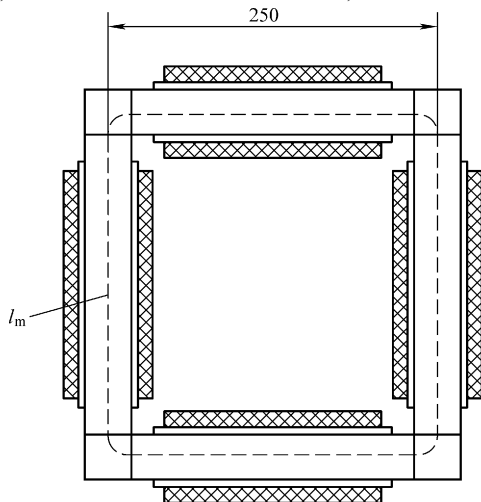


图 8-52 标准 25cm 爱泼斯坦方圈 ($l_m = 940\text{mm}$)

4 个线圈中的每一个都应有 2 个绕组：①初级绕组，外层（磁化绕组）；②次级绕组，内层（感应电压绕组）。在这些绕组之间可以加一层静电屏蔽。绕组应该均匀分布在至少 190mm 的长度上，每个线圈的匝数应为总线圈匝数的 1/4。4 个线圈的各初级绕组应串联，各次级绕组也应串联。初级和次级线圈的匝数应与电源、测量仪器和频率的特定条件匹配。常规使用的线圈总匝数为 700 匝或 1000 匝。

为了尽可能降低绕组阻抗的影响，方圈的结构应满足以下要求：

$$\begin{aligned}\frac{R_1}{N_1^2} &\leq 1.25 \times 10^{-6} \Omega \\ \frac{L_1}{N_1^2} &\leq 2.5 \times 10^{-9} \text{H} \\ \frac{R_2}{N_2^2} &\leq 5 \times 10^{-6} \Omega \\ \frac{L_2}{N_2^2} &\leq 2.5 \times 10^{-9} \text{H}\end{aligned}\quad (8-72)$$

式中 R_1 ——初级线圈的电阻，单位为 Ω ；

R_2 ——次级线圈的电阻，单位为 Ω ；

L_1 ——初级线圈的电感，单位为 H；

L_2 ——次级线圈的电感，单位为 H；

N_1 ——初级线圈的匝数；

N_2 ——次级线圈的匝数。

例如，有下列特性的绕组就满足上述条件：

1) 总匝数： $N_1 = 700$ 匝， $N_2 = 700$ 匝。

2) 初级绕组（外层）：4 个线圈各用标称截面积约为 1.8mm^2 的双股铜线并排密绕 3 层，计 175 匝。

3) 次级绕组（内层）：4 个线圈各用标称截面积为 0.8mm^2 的单股铜线绕 1 层，计 175 匝。

磁回路有效磁路长度 l_m ，按约定取 0.94m 。因此，有效质量 m_a ，即待测试样的磁性有效质量按下式计算：

$$m_a = \frac{ml_m}{4l} \quad (8-73)$$

式中 m_a ——试样的有效质量，单位为 kg；

m ——试样的总体质量，单位为 kg；

l ——试样条片长度，单位为 m；

l_m ——约定的有效磁路长度，单位为 m ($l_m = 0.94\text{m}$)。

3. 空气磁通补偿

空气磁通补偿的互感线圈放置在 4 个线圈所围空间的中心，其轴线垂直于 4 个

线圈轴线构成的平面。互感线圈的初级绕组与爱泼斯坦方圈的初级绕组串联，互感线圈的次级绕组反方向串联，如图 8-53 所示。

当爱泼斯坦方圈中无试样时，在初级绕组中通一交流电流，使在次级绕组非公共端测量的电压不大于爱泼斯坦方圈次级绕组本身电压的 0.1%。这样，在串联次级绕组中感应电压整流后的平均值正比于试样中磁极化强度的峰值。

4. 电源

电源应具有低内阻并能提供高度稳定的电压和频率。在测量时，电压和频率应保持恒定，波动在 $\pm 0.2\%$ 之内。

对于比总损耗、比视在功率和磁场强度的有效值测量，次级电压的波形因数应该为 $1.11 \times (1 \pm 1\%)$ 。

5. 比总损耗的测量步骤

(1) 测量的准备 称量试样质量的误差在 $\pm 0.1\%$ 以内。称量后样片应在拐角处以双搭接方式叠放在爱泼斯坦方圈中，在方圈的每一分支中样片的数目相同，使所形成的内缘正方形边长为 (220 ± 1) mm。当样片按半数平行于轧制方向和半数垂直于轧制方向剪切时，轧制方向剪切的条片应插入方圈的两个相对的分支里，而垂直于轧制方向剪切的样片插入另外两个分支里。应注意确保在搭接部分片与片之间的空气间隙尽可能小。允许在每个搭接角处垂直于样片的搭接面施加一个约 1N 的力。待测试样应在一个初始磁场高于先前测试磁场的退磁场下，逐渐降低交流磁场进行退磁。

(2) 电源的调节 电源的输出应缓慢增加，同时观察初级回路的电流表，确保功率表电流回路不过载，直到爱泼斯坦方圈次级电压整流后的平均值 $|\bar{U}_2|$ 达到预定值。 $|\bar{U}_2|$ 预定值由所要求的磁极化强度值按下式计算：

$$|\bar{U}_2| = 4fN_2 \frac{R_i}{R_i + R_t} AJ_p \quad (8-74)$$

式中 $|\bar{U}_2|$ ——次级线圈感应电压的平均值，单位为 V；

f ——频率，单位为 Hz；

N_2 ——次级线圈的匝数；

R_i ——次级回路仪表的总电阻值，单位为 Ω ；

R_t ——次级绕组和互感的串联电阻，单位为 Ω ；

A ——试样的横截面积，单位为 m^2 ；

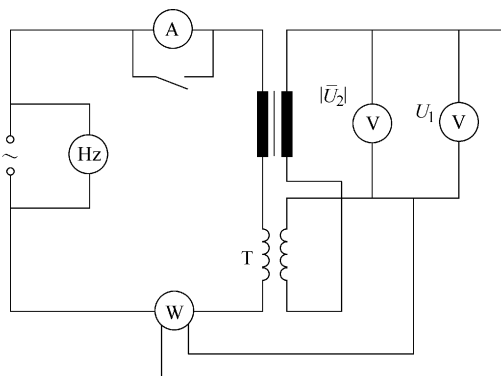


图 8-53 功率表法的电路原理图

T—空气磁通补偿的互感线圈

J_p ——磁极化强度的峰值, 单位为 T。

试样的横截面积应按下式计算:

$$A = \frac{m}{4l\rho_m} \quad (8-75)$$

式中 A ——试样的横截面积, 单位为 m^2 ;

m ——试样的总质量, 单位为 kg;

l ——试样的样片长度, 单位为 m;

ρ_m ——试样材料密度的约定值, 单位为 kg/m^3 。

(3) 功率的测量 初级回路的电流表应短路, 必要时重新调节次级电压。

(4) 比总损耗的计算 功率表测量的功率 P_m 包含了次级回路中仪表的损耗。

因此, 试样的总损耗功率 P_c 应按下式计算:

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{(1.111|\bar{U}_2|)^2}{R_i} \quad (8-76)$$

式中 P_c ——计算出的试样损耗功率, 单位为 W;

N_1 ——初级线圈的匝数;

N_2 ——次级线圈的匝数;

P_m ——功率表测量的功率, 单位为 W;

$|\bar{U}_2|$ ——次级整流电压的平均值, 单位为 V;

R_i ——次级回路仪表的总电阻, 单位为 Ω 。

测量的比总损耗 P_s 按下式计算:

$$P_s = \frac{P_c}{m_a} = \frac{P_c 4l}{ml_m} \quad (8-77)$$

式中 P_s ——试样的比总损耗, 单位为 W/kg ;

P_c ——计算出的试样总损耗, 单位为 W;

m_a ——试样的有效质量, 单位为 kg;

l ——试样的样片长度, 单位为 m;

m ——试样的总质量, 单位为 kg;

l_m ——约定的有效磁路长度, 单位为 m。

6. 磁极化强度峰值、磁场强度有效值、磁场强度峰值和比视在功率的测定

(1) 磁极化强度的峰值 磁极化强度的峰值应以测量的次级电压整流后的平均值按公式计算得到。

(2) 磁场强度的有效值 磁场强度的有效值应由图 8-54 回路中的有效值电流表测量的电流有效值计算得出。

磁场强度的有效值应按下式计算得出:

$$H_a = \frac{N_1}{l_m} I_{pl} \quad (8-78)$$

式中 H_a ——磁场强度的有效值, 单位为 A/m;

N_1 ——初级线圈的匝数;

I_{p1} ——励磁电流的峰值, 单位为 A;

l_m ——有效磁路长度, 单位为 m (标准 25cm 爱泼斯坦方圈的 $l_m = 0.94\text{m}$)。

(3) 磁场强度的峰值 磁场强度的峰值应由励磁电流的峰值 I_{p1} 得出, 它是用图 8-55 所示的峰值电压表, 通过测量一个准确度为 0.1% 的已知阻值的精密电阻 R 上的电压降计算得到的。对于这个测量, 次级电压的波形因数允许超过规定值。

M—空气磁通补偿的互感线圈

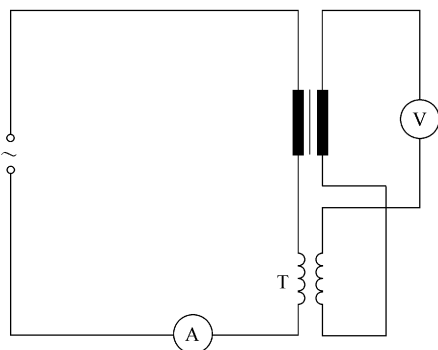


图 8-54 测量磁化电流有

效值的电路原理图

T—空气磁通补偿的互感线圈

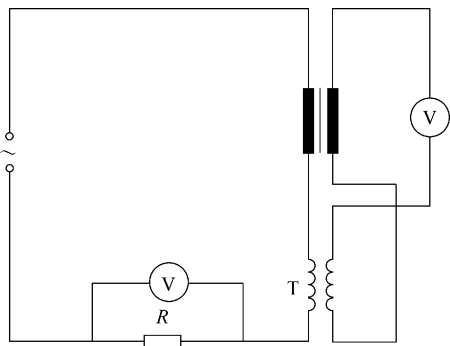


图 8-55 用峰值电压表测量

磁场强度峰值的电路原理图

T—空气磁通补偿的互感线圈

磁场强度的峰值应按下式计算:

$$H_p = \frac{N_1}{l_m} I_{p1} \quad (8-79)$$

式中 H_p ——磁场强度的峰值, 单位为 A/m;

N_1 ——初级线圈的匝数;

I_{p1} ——励磁电流的峰值, 单位为 A;

l_m ——有效磁路长度, 单位为 m (标准 25cm 爱泼斯坦方圈的 $l_m = 0.94\text{m}$)。

(4) 比视在功率 对于设定的磁极化强度和频率值, 测量相应的励磁电流和爱泼斯坦方圈次级电压的有效值, 其比视在功率按下式计算:

$$S_s = I_{a1} U_{a2} \frac{N_1}{m_a N_2} = I_{a1} U_{a2} \frac{N_1 4l}{m l_m N_2} \quad (8-80)$$

式中 S_s ——比视在功率, 单位为 W/kg;

N_1 ——初级线圈的匝数;

N_2 ——次级线圈的匝数;

I_{a1} ——励磁电流的有效值, 单位为 A;

U_{a2} ——次级线圈电压的有效值, 单位为 V;

l ——试样的样片长度, 单位为 m;

m ——试样的总质量, 单位为 kg;

l_m ——有效磁路长度, 单位为 m ($l_m = 0.94m$)。

7. 直流法测量磁极化强度

(1) 测量的准备 爱泼斯坦方圈和测量设备应按图 8-56 连接。

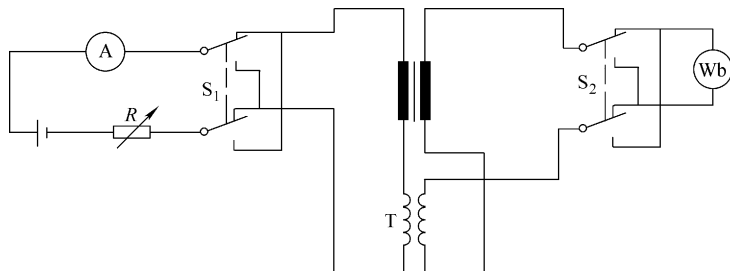


图 8-56 不连续记录法的直流测试电路原理图

T—空气磁通补偿的互感线圈 Wb—磁通积分器

试样应进行退磁, 即在不断降低的交流磁场下退磁, 或在爱泼斯坦方圈的初级线圈中通一逐渐减小并换向的直流电流进行退磁, 换向的频率约为每秒钟两次。退磁电流产生的磁场强度的初始值应比先前测量所用的磁场强度大。

(2) 磁极化强度的测量 非连续的磁极化强度值可以在相应的磁场强度下测得, 或通过一系列非连续值得到磁化曲线。也可以采用连续测量的方法, 如图 8-57 所示, 将一个校准的四端电阻与爱泼斯坦方圈的磁化线圈串联, 电压的接线端与 X-Y 记录仪的 X 输入端相接, 磁通积分器的输出端与 X-Y 记录仪的 Y 输入端相接。也可用绘图仪或计算机接口替代 X-Y 记录仪。

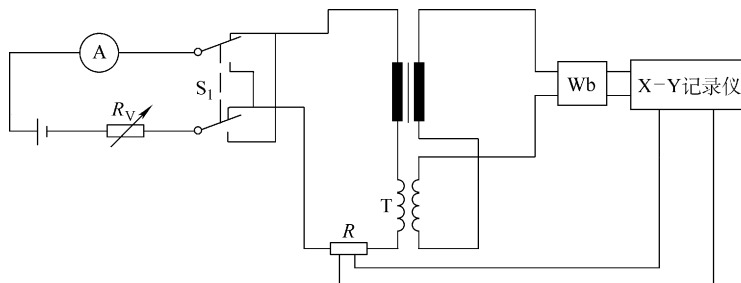


图 8-57 连续记录法的直流测试电路原理图

T—空气磁通补偿的互感线圈 Wb—磁通积分器

磁场强度应通过测量爱泼斯坦方圈初级线圈的磁化电流, 并按下式计算:

$$H = \frac{N_1 I}{l_m} \quad (8-81)$$

式中 H ——磁场强度, 单位为 A/m ;
 N_1 ——爱泼斯坦方圈初级绕组的匝数;
 I ——磁化电流, 单位为 A ;
 l_m ——规定的有效磁路长度, 单位为 m 。

8.7 常用金属材料的磁性能

1) 铝镍钴硬磁材料的磁特性、居里温度、使用温度和密度如表 8-54 所示。

表 8-54 铝镍钴硬磁材料的磁特性、居里温度、使用温度和密度

材 料			生产 方法	磁 特 性							最高 使用 温度 /℃	密度 ρ/ (kg/ dm ³)		
牌 号	①	代号		最大磁 能积 (BH) _{max} / (kJ/m ³)	剩余磁 通密度 B _r /mT	矫顽力 H _{cB} / (kA/m)	矫顽力 H _{cJ} / (kA/m)	相对 回复 磁导率 μ _{rec}	α (B _r) ^② /(%) /℃)	α (H _{cJ}) ^② /(%) /℃)			居里 温度 /℃	
AlNiCo				规定的最低值					典型值					
AlNiCo9/5	i	R1-0-1	铸造 或 烧结	9	550	44	47	7	-0.02	-0.03 ~ -0.07	750	800 ~ 850	550	6.8
AlNiCo10/4	i	R1-0-2		10	600	40	43	7						6.8
AlNiCo12/6	i	R1-0-3		11.6	630	52	55	7.5						7.0
AlNiCo17/9	i	R1-0-4		17	580	80	86	7.5						7.1
AlNiCo37/5	a	R1-1-1	铸造	37	1180	48	49	4			7.3			
AlNiCo38/11	a	R1-1-2		38	800	110	112	2			7.3			
AlNiCo44/5	a	R1-1-3		44	1200	52	53	3			7.3			
AlNiCo60/11	a	R1-1-4		60	900	110	112	2			7.3			
AlNiCo36/15	a	R1-1-5		36	700	140	148	2			7.3			
AlNiCo52/6	a	R1-1-6		52	1300	56	57	3			7.3			
AlNiCo60/6	a	R1-1-7		60	1320	56	57	3			7.3			
AlNiCo72/12	a	R1-1-8		72	1050	118	120	2			7.3			
AlNiCo34/5	a	R1-1-10	烧结	34	1120	47	48	4			7.3			
AlNiCo26/6	a	R1-1-11		26	900	56	58	4.5			7.1			
AlNiCo31/11	a	R1-1-12		31	760	107	111	3			7.1			
AlNiCo33/15	a	R1-1-13		33	650	135	150	2			7.1			

① i 表示各向同性; a 表示各向异性。

② 从 20℃ 至 100℃。

2) 铬铁钴及铁钴钕铬硬磁材料的磁特性、居里温度、使用温度和密度如表 8-55 所示。

表 8-55 铬铁钴及铁钴钒铬硬磁材料的磁特性、居里温度、使用温度和密度

材 料			生产 方法	磁 特 性								最高 使用 温度 /℃	密度 ρ / (kg dm ³)
牌 号	①	代号		最大磁 能积 (BH) _{max} / (kJ/m ³)	剩余磁 通密度 B_r /mT	矫顽力 H_{cB} / (kA/m)	矫顽力 H_{cJ} / (kA/m)	相对 回复 磁导率 μ_{rec}	α (B_r) ^② /(% /℃)	α (H_{cJ}) ^② /(% /℃)	居里 温度 /℃		
CrFeCo/FeCoVCr				规定的最低值				典型值					
CrFeCo12/4	i	R6-0-1	铸造 或 烧结	12	800	40	42	6	-0.05	-0.03	620 ~ 640	500	7.6
CrFeCo10/3	i	R6-0-2		10	850	27	29	6					7.6
CrFeCo28/5	a	R6-1-1		28	1000	45	46	3.5					7.6
CrFeCo30/4	a	R6-1-2		30	1150	40	41	3.5					7.6
CrFeCo35/5	a	R6-1-3		35	1050	50	51	3.5					7.6
CrFeCo44/5	a	R6-1-4		44	1300	44	45	2.5					7.7
CrFeCo52/5	a	R6-1-5		52	1350	48	49	2.5					7.7
FeCoVCr11/2	a	R3-1-1	铸造	11	800	24	24	5	-0.01	0	720	500	8.1

① i 表示各向同性；a 表示各向异性。

② 从 20℃ 至 100℃。

3) 稀土钴硬磁材料的磁特性、居里温度、使用温度和密度如表 8-56 所示。

表 8-56 稀土钴硬磁材料的磁特性、居里温度、使用温度和密度

材 料			生产 方法	磁 特 性							最高 使用 温度 /℃	密度 ρ/ (kg/ dm ³)	
牌 号	①	代号		最大磁 能积 (BH) _{max} / (kJ/m ³)	剩余磁 通密度 B _r /mT	矫顽力 H _{cb} / (kA/m)	矫顽力 H _{cj} / (kA/m)	相对 回复 磁导率 μ _{rec}	α (B _r) ^② /(% /℃)	α (H _{cj}) ^② /(% /℃)			居里 温度 /℃
RECo				规定的最低值				典型值					
RECo ₅ 140/120	a	R5-1-1	烧结	140	860	600	1200	1.05	-0.04	-0.3	720	250	8.3 ~ 8.5
RECo ₅ 160/120	a	R5-1-2		160	920	660	1200	1.05					
RECo ₅ 150/70	a	R5-1-3		150	900	600	700	1.05					
RECo ₅ 170/70	a	R5-1-4		170	930	600	700	1.05					
RECo ₅ 120/160	a	R5-1-5		120	800	620	1600	1.05					

(续)

材 料				生产 方法	磁 特 性							最高 使用 温度 /℃	密度 ρ / (kg/ dm ³)	
种 类 ^③	牌 号	① 代 号	最大磁 能 积 (BH) _{max} / (kJ/m ³)		剩余磁 通密度 B_r /mT	矫顽力 H_{cB} / (kA/m)	矫顽力 H_{cJ} / (kA/m)	相对 回 复 磁导率 μ_{rec}	α (B_r) ^② /(%) /℃	α (H_{cJ}) ^② /(%) /℃	居里 温度 /℃			
			规定的最低值							典型值				
REFeB														
UH	REFeB240/200	a	R7-1-10	烧结	240	1160	840	2000	1.05	-0.1 ~ -0.12	-0.45 ~ -0.6	310	不 超 过 200	7.5 ~ 7.7
H	REFeB310/130	a	R7-1-11		310	1300	900	1300						
EH	REFeB250/240	a	R7-1-12		250	1200	830	2400						
UH	REFeB260/200	a	R7-1-13		260	1210	840	2000						
H	REFeB340/130	a	R7-1-14		340	1330	920	1300						
N	REFeB360/90	a	R7-1-15		360	1350	800	900						
N	REFeB380/100	a	R7-1-16		380	1420	990	1000						

- ① a 表示各向异性。
② 从 20℃ 至 100℃。
③ N、M、H、UH 和 EH 分别表示低矫顽力、中等矫顽力、高矫顽力、超高矫顽力和极高矫顽力。

5) 硬磁铁氧体的磁特性、居里温度、使用温度和密度如表 8-58 所示。

表 8-58 硬磁铁氧体的磁特性、居里温度、使用温度和密度

材 料			生产 方法	磁 特 性							最高 使用 温度 /℃	密度 ρ/ (kg/ dm ³)	
牌 号	①	代号		最大磁 能积 (BH) _{max} / (kJ/m ³)	剩余磁 通密度 B _r /mT	矫顽力 H _{cb} / (kA/m)	矫顽力 H _{cl} / (kA/m)	相对 回复 磁导率 μ _{rec}	α (B _r) ^② /(% /℃)	α (H _{cl}) ^② /(% /℃)			居里 温度 /℃
Hard ferrite				规定的最低值				典型值					
Hard ferrite7/21	i	S1-0-1	烧结	6.5	190	125	210	1.2	-0.2	0.25 ~ 0.4	450	250	4.9
Hard ferrite7/25	i	S1-0-2		6.5	190	120	250	1.2					4.9
Hard ferrite20/19	a	S1-1-1		20	320	170	190	1.1					4.8
Hard ferrite24/23	a	S1-1-2		24	350	215	230	1.1					4.8
Hard ferrite25/14	a	S1-1-3		25	380	130	135	1.1					5.0
Hard ferrite26/18	a	S1-1-4		26	370	175	180	1.1					5.0
Hard ferrite22/30	a	S1-1-5		22	350	255	295	1.1					4.6

(续)

材 料			生产 方法	磁 特 性							最高 使用 温度 /℃	密度 ρ / (kg/ dm ³)	
牌 号	①	代号		最大磁 能积 (BH) _{max} / (kJ/m ³)	剩余磁 通密度 B_r /mT	矫顽力 H_{cb} / (kA/m)	矫顽力 H_{cj} / (kA/m)	相对 回复 磁导率 μ_{rec}	α (B_r) ^② /(% /℃)	α (H_{cj}) ^② /(% /℃)			居里 温度 /℃
Hard ferrite				规定的最低值				典型值					
Hard ferrite26/26	a	S1-1-6	烧结	26	370	230	260	1.1	-0.2	0.25 ~ 0.4	450	250	4.7
Hard ferrite29/22	a	S1-1-7		29	390	210	220	1.1					4.8
Hard ferrite32/17	a	S1-1-8		32	410	160	165	1.1					4.9
Hard ferrite32/25	a	S1-1-9		32	410	240	250	1.1					4.9
Hard ferrite24/35	a	S1-1-10		24	360	260	350	1.1					4.8
Hard ferrite29/15	a	S1-1-11		29	400	145	150	1.1					5.0
Hard ferrite25/38	a	S1-1-12		25	380	275	380	1.1					4.95
Hard ferrite31/30	a	S1-1-13		31	410	295	300	1.1					4.95
Hard ferrite35/25	a	S1-1-14		35	430	245	250	1.1					4.95
Hard ferrite38/27	a	S1-1-15		38	450	260	270	1.1					5.0
Hard ferrite36/34	a	S1-1-16		36	440	320	340	1.1					5.0
Hard ferrite33/38	a	S1-1-17		33	420	300	380	1.1					5.0

① i 表示各向同性；a 表示各向异性。

② 从 20℃ 至 100℃。

6) 粘结各向同性铝镍钴硬磁材料的磁特性、居里温度、使用温度和密度如表 8-59 所示。

表 8-59 粘结各向同性铝镍钴硬磁材料的磁特性、居里温度、使用温度和密度

材 料			生产 方法	磁 特 性							最高 使用 温度 /℃	密度 ρ/ (kg/ dm ³)	
牌 号	①	代号		最大磁 能积 (BH) _{max} / (kJ/m ³)	剩余磁 通密度 B _r /mT	矫顽力 H _{cB} / (kA/m)	矫顽力 H _{cJ} / (kA/m)	相对 回复 磁导率 μ _{rec}	α (B _r) /(% /℃)	α (H _{cJ}) /(% /℃)			居里 温度 /℃
AlNiCop				规定的最低值					典型值				
AlNiCo3/5p	i	U1-0-1	压模	3.1	280	37	46	2.5	-0.02	-0.03	750	视粘	5.3
AlNiCo5/6p	i	U1-0-2		5.2	320	46	56	2.5		~	~	结剂	5.4
AlNiCo7/8p	i	U1-0-3		7.0	340	72	84	2.5		-0.07	800	而定	5.5

① i 表示各向同性。

7) 粘结稀土钴硬磁材料的磁特性、居里温度、使用温度和密度如表 8-60 所示。

表 8-60 粘结稀土钴硬磁材料的磁特性、居里温度、使用温度和密度

材 料			生产 方法	磁 特 性								最高 使用 温度 /℃	密度 ρ/ (kg/ dm ³)
牌 号	①	代号 ^②		最大磁 能积 (BH) _{max} / (kJ/m ³)	剩余磁 通密度 B _r /mT	矫顽力 H _{cb} / (kA/m)	矫顽力 H _{cj} / (kA/m)	相对 回复 磁导率 μ _{rec}	α (B _r) /(%) /℃	α (H _{cj}) /(%) /℃	居里 温度 /℃		
RECoP				规定的最低值				典型值					
RECo20/60p	i	U2-0-20	注射	20	350	200	600	1.15	-0.04	-0.03	720	视粘 结剂 而定	5.6
RECo30/80p	i	U2-0-30	压模	30	430	300	800	1.15					6.8
RECo40/60p	a	U2-1-20	注射	40	480	300	600	1.05					5.3
RECo65/70p	a	U2-1-21		65	610	360	700	1.05					5.5
RECo75/55p	a	U2-1-22		75	650	440	550	1.05					5.7
RECo110/75p	a	U2-1-30		压模	110	780	480	750					1.05

- ① i 表示各向同性；a 表示各向异性。
- ② 对压延和挤压法最后一个数 $x = [10 + n]$ ，对注射法最后一个数 $x = [20 + n]$ ，对压模法最后一个数 $x = [30 + n]$ ， $n = 0, 1, 2, \dots, 9$ 。

8) 粘结各向同性 REFeB 硬磁材料的磁特性、居里温度、使用温度和密度如表 8-61 所示。

表 8-61 粘结各向同性 REFeB 硬磁材料的磁特性、居里温度、使用温度和密度

材 料			生产 方法	磁 特 性								最高 使用 温度 /℃	密度 ρ/ (kg/ dm ³)
牌 号	①	代号②		最大磁 能积 (BH) _{max} / (kJ/m ³)	剩余磁 通密度 B _r /mT	矫顽力 H _{cb} / (kA/m)	矫顽力 H _{cl} / (kA/m)	相对 回复 磁导率 μ _{rec}	α (B _r) /(%) /℃	α (H _{cl}) /(%) /℃	居里 温度 /℃		
REFeBp				规定的最低值					典型值				
REFeB28/56p	i	U3-0-20	注射	28	430	270	560	1.25	-0.1 ~ -0.15	-0.4	310	120	4.2
REFeB33/56p	i	U3-0-21		33	470	290	560	1.25					4.6
REFeB26/90p	i	U3-0-22		26	400	270	900	1.15					4.2
REFeB30/90p	i	U3-0-23		30	440	280	900	1.15					4.6
REFeB40/70p	i	U3-0-24		40	470	320	700	1.25					5.0
REFeB45/70p	i	U3-0-25		45	510	350	700	1.25					5.7
REFeB50/70p	i	U3-0-26		50	550	380	700	1.25					5.7

(续)

材 料			生产 方法	磁 特 性							最高 使用 温度 /℃	密度 ρ/ (kg/ dm ³)	
牌 号	①	代号 ^②		最大磁 能积 (BH) _{max} / (kJ/m ³)	剩余磁 通密度 B _r /mT	矫顽力 H _{cb} / (kA/m)	矫顽力 H _{cl} / (kA/m)	相对 回复 磁导率 μ _{rec}	α (B _r) /(%) /℃	α (H _{cl}) /(%) /℃			居里 温度 /℃
REFeBp				规定的最低值				典型值					
REFeB72/64p	i	U3-0-27	注射	72	650	370	640	1.25	-0.1	-0.4	310	120	6.0
REFeB40/100p	i	U3-0-28		40	480	330	1000	1.15					5.3
REFeB63/64p	i	U3-0-30	压模	63	630	360	640	1.25	-0.15				5.8
REFeB53/95p	i	U3-0-31		53	560	350	950	1.15					5.8
REFeB82/68p	i	U3-0-32		82	700	500	680	1.25					6.2

- ① i 表示各向同性。
- ② 对压延和挤压法最后一个数 $x = [10 + n]$ ，对注射法最后一个数 $x = [20 + n]$ ，对压模法最后一个数 $x = [30 + n]$ ， $n = 0, 1, 2, \dots, 9$ 。

9) 粘结各向同性和各向异性硬磁铁氧体的磁特性、居里温度、使用温度和密度如表 8-62 所示。

表 8-62 粘结各向同性和各向异性硬磁铁氧体的磁特性、居里温度、使用温度和密度

材 料			生产 方法	磁 特 性								最高 使用 温度 /℃	密度 ρ/ (kg/ dm ³)
牌 号	①	代号②		最大磁 能积 (BH) _{max} / (kJ/m ³)	剩余磁 通密度 B _r /mT	矫顽力 H _{cB} / (kA/m)	矫顽力 H _{cJ} / (kA/m)	相对 回复 磁导率 μ _{rec}	α (B _r) /(%) /℃	α (H _{cJ}) /(%) /℃	居里 温度 /℃		
Hard ferrite p				规定的最低值				典型值					
Hard ferrite3/16p	i	U4-0-10	压延	3.2	130	85	160	1.15	-0.2	0.25 ~ 0.4	450	视粘 结剂 而定	3.8
Hard ferrite1/18p	i	U4-0-20	注射	0.8	70	50	175	1.1					2.3
Hard ferrite3/18p	i	U4-0-21		3.2	135	85	175	1.1					3.8
Hard ferrite4/22p	i	U4-0-22		3.5	145	110	215	1.1					3.8
Hard ferrite7/18p	a	U4-1-10	压延 或 挤压	6.5	185	110	175	1.1					3.6
Hard ferrite9/17p	a	U4-1-11		9	215	145	170	1.1					3.6
Hard ferrite11/24p	a	U4-1-12		11	240	170	240	1.1					3.7
Hard ferrite15/24p	a	U4-1-13		14.5	275	190	240	1.1					3.8
Hard ferrite8/19p	a	U4-1-20	注射	7.5	210	120	185	1.1					3.2
Hard ferrite12/23p	a	U4-1-21		12	250	170	230	1.1					3.5
Hard ferrite15/21p	a	U4-1-22		15	280	180	210	1.1					3.7

- ① i 表示各向同性；a 表示各向异性。
- ② 对压延和挤压法最后一个数 $x = [10 + n]$ ，对注射法最后一个数 $x = [20 + n]$ ，对压模法最后一个数 $x = [30 + n]$ ， $n = 0, 1, 2, \dots, 9$ 。

第 9 章 金属材料的弹性参数

弹性是一项重要的物理性能，如果没有弹性，任何物体都难以保持确定的形状。弹性是组织不敏感参量，是抵抗弹性变形能力大小的表征，取决于原子间结合力的强弱。弹性分析常用于研究与原子间结合力有关的问题，人们对物体弹性的了解与客观世界的认识早已紧密结合在一起。

弹性在工程的设计应用当中分为两种情况：一是保证结构的稳定性，在选择最佳结构形式的同时必须尽量采用弹性模量高的材料；二是保证塑性，就是为了提高弹性形变功，往往采用弹性模量低的材料。从宏观角度来说，弹性是衡量物体抵抗初始变形能力大小的尺度，弹性模量的单位与应力的单位相同；而从微观角度来说，弹性则是原子间结合力强弱的反映。

9.1 弹性的基础知识

9.1.1 金属材料弹性的术语

(1) 弯曲振动 杆或管振动的方向与其长度方向垂直且处于垂直面内。在两端自由的状态下，试样的基频振动如图 9-1 所示，其中 l 为总长度。

(2) 横振动 杆或管振动的方向与其长度方向垂直且处于水平面内。在两端自由的状态下，试样的基频振动如图 9-2 所示。在弯曲振动与横振动模式下，弹性模量与试样共振频率间的关系是相同的，通常不予区分。

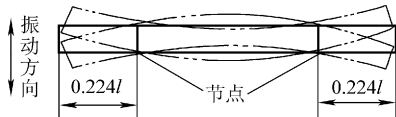


图 9-1 两端自由杆的
弯曲基频共振（侧视图）

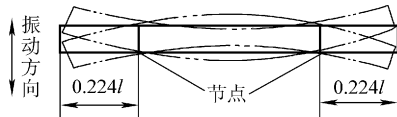


图 9-2 两端自由杆的
横向基频共振（顶视图）

(3) 扭转振动 杆或管中每一横截面均作绕其长度轴线的相对扭转振动，如图 9-3 所示。

(4) 节点 处于共振状态的杆中，位移恒为零的位置。

(5) 共振频率 f 导致试样产生共振的外加强迫力的振动频率。对于包括金属材料在内的滞弹性固体，可忽略共振频率与固有频率之间的差异。

(6) 动态弹性模量 E_d 弹性变形范围内测定的正应力与正应变的比值。

(7) 动态切变模量 G_d 动态切变模量亦称刚性模量, 是指在弹性变形范围内的切应力与相应切应变的比值。

(8) 动态泊松比 μ_d 由动态弹性模量和动态切变模量所确定的泊松比称为动态泊松比。对于各向异性的材料, 以此定义的数值称之为等效泊松比。

(9) 试样厚度 h 在弯曲(横)共振状态下, 平行振动方向上的试样尺寸, 如图9-4所示。

(10) 试样宽度 b 在弯曲(横)共振状态下, 垂直振动方向上的试样尺寸, 如图9-4所示。

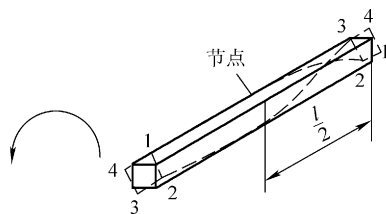


图9-3 杆的扭转基频共振

1、2、3、4—两端对应点

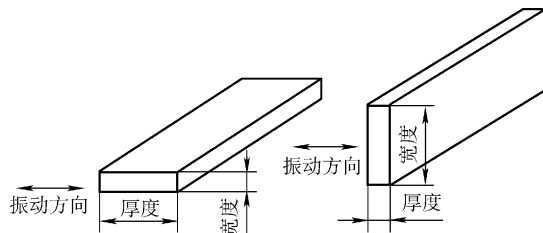


图9-4 弯振试样的厚度与宽度

9.1.2 弹性与胡克常数

弹性是物体在外力作用下改变其形状和大小而外力卸载后可回复原始形状和大小的性能。1678年胡克发现了弹性定律, 给弹性力学和弹性测量学打下了基础。胡克定律是力学基本定律之一, 是适用于一切固体材料的弹性定律, 其内容可简单表述为: 在弹性限度内, 物体的形变与引起形变的外力成正比。

胡克弹性定律也可表述为: 在应力低于比例极限的情况下, 固体中的应力 σ 与应变 ε 成正比, 即:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (9-1)$$

式中 σ ——应力, 单位为 N/mm^2 ;

E ——弹性模量, 单位为 N/mm^2 ;

ε ——应变。

把胡克定律推广应用于三向应力和应变状态, 则可得到广义胡克定律。分析物体受力情况时, 在所考察的那一点附近取一个足够小的立方体。一般用三个应力来描述周围力对小立方体的作用。其中, 方向与立方体表面垂直的称为正应力, 与表

面平行的称为切应力。应力的脚标中，第一个字母表示应力作用在哪个面上，第二个字母表示应力作用的方向。为了描写物体内某点处的应力状态，只需 σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 、 σ_{yz} 、 σ_{zx} 和 σ_{xy} 这六个独立的应力分量即可，而相对应有六个独立的应变 ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{zz} 、 ε_{yz} 、 ε_{zx} 和 ε_{xy} ，因此，物体中任意一点的六个应力分量中的每一个都是六个应变分量的线性函数；反过来，应变分量也是应力分量的线性函数。各向同性材料的广义胡克定律有两种常用的数学形式如下：

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = S_{11}\sigma_{xx} + S_{12}\sigma_{yy} + S_{13}\sigma_{zz} + S_{14}\sigma_{yz} + S_{15}\sigma_{zx} + S_{16}\sigma_{xy} \\ \varepsilon_{yy} = S_{21}\sigma_{xx} + S_{22}\sigma_{yy} + S_{23}\sigma_{zz} + S_{24}\sigma_{yz} + S_{25}\sigma_{zx} + S_{26}\sigma_{xy} \\ \vdots \\ \varepsilon_{xy} = S_{61}\sigma_{xx} + S_{62}\sigma_{yy} + S_{63}\sigma_{zz} + S_{64}\sigma_{yz} + S_{65}\sigma_{zx} + S_{66}\sigma_{xy} \end{cases} \quad (9-2)$$

应力与应变间的关系是：

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = C_{11}\varepsilon_{xx} + C_{12}\varepsilon_{yy} + C_{13}\varepsilon_{zz} + C_{14}\varepsilon_{yz} + C_{15}\varepsilon_{zx} + C_{16}\varepsilon_{xy} \\ \sigma_{yy} = C_{21}\varepsilon_{xx} + C_{22}\varepsilon_{yy} + C_{23}\varepsilon_{zz} + C_{24}\varepsilon_{yz} + C_{25}\varepsilon_{zx} + C_{26}\varepsilon_{xy} \\ \vdots \\ \sigma_{xy} = C_{61}\varepsilon_{xx} + C_{62}\varepsilon_{yy} + C_{63}\varepsilon_{zz} + C_{64}\varepsilon_{yz} + C_{65}\varepsilon_{zx} + C_{66}\varepsilon_{xy} \end{cases} \quad (9-3)$$

在公式 (9-3) 中形成的 6×6 矩阵的 36 个 C_{ij} 被称为弹性劲度系数，而公式 (9-2) 中的 36 个 S_{ij} 被称为弹性柔度系数，这两个矩阵之间是互为转置的。由于 S 矩阵与 C 矩阵具有对称性，独立的系数不是 36 个，而是 21 个。随着晶体对称性的提高，独立的弹性劲度系数 C_{ij} 或弹性柔度系数 S_{ij} 数目越来越少。对应晶系独立的劲度系数或柔度系数的个数如下表 9-1 所示。

表 9-1 对应晶系独立的劲度系数或柔度系数的个数

晶系	三斜晶系	正交晶系	六方晶系	单斜晶系	四方晶系	立方晶系	各向同性体
个数	12	9	5	13	6	3	2

对于多晶体构成的金属材料，一般具有各向同性的特征，此时胡克定律为：

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \mu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] \\ \varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \mu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] \\ \varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] \\ \varepsilon_{yz} = \sigma_{yz}/G \\ \varepsilon_{zx} = \sigma_{zx}/G \\ \varepsilon_{xy} = \sigma_{xy}/G \end{cases} \quad (9-4)$$

式中 ε_{ij} ——法向为 i 的面元 j 方向上的应变；

σ_{ij} ——法向为 i 的面元 j 方向上的应力，单位为 N/mm^2 ；

E ——物体弹性模量，单位为 N/mm^2 ；

G ——物体切变模量，单位为 N/mm^2 ；

μ ——泊松比。

9.1.3 弹性与原子结构的关系

弹性模量与原子间结合力有密切的联系，其值与原子的价电子数量和原子半径的大小有关。这种关系的表观之一是弹性模量随原子序数的增加而发生周期性的变化（不同周期之间）；表现之二是同族元素中，随着原子序数的增加（相应地随着原子半径的增大），弹性减小，上述关系如图 9-5 所示。

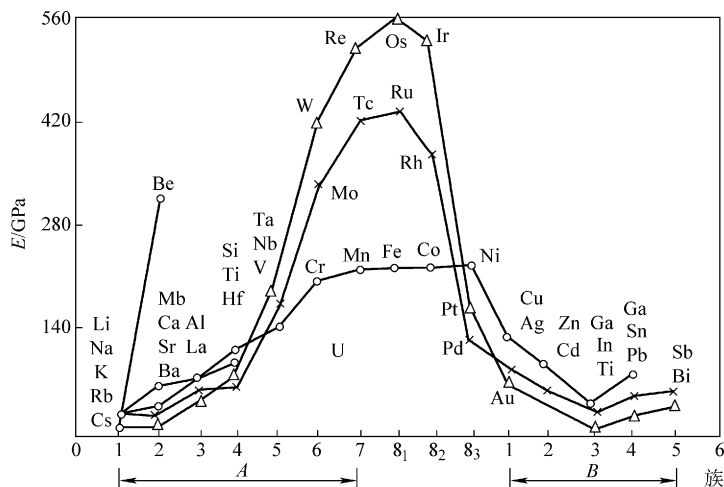


图 9-5 弹性模量周期变化示意图

A—主族元素 B—副族元素

从图 9-5 可以看到，第三周期中的 Na、Mg、Al、Si 等元素，随着原子序数的增加价电子数增多，弹性模量增高。同一族元素，如 Be、Mg、Ca、Sr 和 Ba，它们的价电子数相等，由于原子半径随着原子序数增加而增大，弹性模量减小。可以认为，弹性模量 E 与原子间的距离 a 成反比例关系。而过渡族金属有两个特征：一是弹性模量普遍比较大，二是弹性模量随原子半径的增大而增加。过渡族金属的这种特征与该类金属中 $3d$ 壳层的电子对原子间结合力的影响有关。

金属的弹性一方面取决于原子结构，另一方面还与金属的点阵结构密切相关。

同一种金属，点阵结构不同，弹性模量也不相同。例如，在同一温度下 γ -Fe 的点阵原子排列得比较致密，其弹性模量比 α -Fe 的高。金属单晶沿不同晶向原子间结合力不同，弹性模量也有明显的差异。多晶体没有各向异性，它的弹性模量约等于单晶体各晶向弹性模量的平均值。但是，多晶体金属中由于具有织构，弹性模量也表现出明显的各向异性。

9.1.4 弹性的技术常数

(1) 弹性模量 弹性模量是弹性变形范围内正应力与相应正应变之比值，表征在弹性限度内材料抗拉或抗压的物理量，其表达式为：

$$E = \sigma_p / \varepsilon_p \quad (9-5)$$

式中 E ——弹性模量，单位为 N/mm^2 ；

σ_p ——正向应力，单位为 N/mm^2 ；

ε_p ——正向应变。

模量的大小标志了材料的刚性，弹性模量越大越不容易发生形变，说明在压缩或拉伸材料时材料的形变小。弹性模量单位在 SI 单位制中为 Pa。但是通常在工程的使用中，因各材料弹性模量的量值均很大，所以常以百万帕斯卡（MPa，即 N/mm^2 ）或十亿帕斯卡（GPa）作为其单位。

弹性模量是选定机械零件材料的依据之一，是工程技术设计中常用的参数。弹性模量的测定对研究金属材料的力学性质有着重要意义，广泛用于质量评估、应力计算及器件设计等，还可用于机械零部件设计、生物力学、地质等领域。测量弹性模量的方法一般有拉伸法、梁弯曲法、振动法、内耗法等，近期还出现了利用光纤位移传感器、莫尔条纹、电涡流传感器和波动传递技术（微波或超声波）等试验技术和方法测量弹性模量。按测量时的应变速度也可将弹性模量分为静态和动态两种。

(2) 切变模量 切变模量是材料在切应力作用下，在弹性变形比例极限范围内，切应力与切应变的比值，也叫刚性模量，表达式为：

$$G = \sigma_{ij} / \varepsilon_{ij} \quad (9-6)$$

式中 G ——切变模量，单位为 N/mm^2 ；

σ_{ij} ——法向为 i 的面元上方向为 j 的切应力，单位为 N/mm^2 ；

ε_{ij} ——法向为 i 的面元上方向为 j 的切应变。

切变模量越大，则表示材料的刚性越强。切变模量的倒数称为剪切柔量，是单位切应力作用下发生切应变的量度，可表示材料剪切变形的难易程度。

切变模量的测量方法分为静态法和动态法两种，由前者测得的切变模量称为静态切变模量，由后者得的切变模量称为动态切变模量。静态模量 G_s 的测量常用扭转法：将圆截面试样置于扭摆或扭转试验机中，据测定的扭矩相应的扭转角来确定

G_s 。动态模量 G_d 的测量常用共振法。切变模量是工程结构材料的重要性能指标之一，其与成分、结构的关系同弹性模量。对于大多数金属材料，切变模量约为弹性模量的 $1/3$ 。

(3) 泊松比 泊松比是在材料的比例极限内，由均匀分布的纵向应力所引起的横向应变与相应的纵向应变之比的绝对值。比如，一杆受拉伸时，其轴向伸长伴随着横向收缩，而横向应变与轴向应变之比称为泊松比 μ 。空气的泊松比为 0，水的泊松比为 0.5。泊松比测量方法分为静态法（测得静态泊松比 μ_s ）和动态法（测得动态泊松比 μ_d ）两种。

(4) 体积模量 体积模量可描述均质各向同性固体的弹性，是在弹性变形范围内体应力与相应体应变之比的绝对值，表达式为：

$$K = -p/(\Delta V/V) \quad (9-7)$$

式中 K ——体积模量，单位为 N/mm^2 ；

p ——体应力或球状体所受各向均匀压力，单位为 N/mm^2 ；

$\Delta V/V$ ——体积的相对变化。

在弹性范围内，体积模量则专称为体积弹性模量。体积模量是一个比较稳定的材料常数。因为在各向均压下材料的体积总是变小的，故 K 值永为正值。体积模量的倒数称为体积柔量或是压缩量。体积模量 K 和弹性模量 E 、泊松比 μ 之间有如下关系：

$$E = 3K(1 - 2\mu)$$

(5) 弹性波的波速 弹性介质中物质粒子间有弹性相互作用，当某处物质粒子离开平衡位置，即发生应变时，该粒子在弹性力的作用下发生振动，同时又引起周围粒子的应变和振动，这样形成的振动在弹性介质中的传播过程称为“弹性波”。在液体和气体内部只能由压缩和膨胀而引起应力，所以液体和气体只能传递横波。而固体内部能产生切应力，所以固体既能传播横波也能传播纵波。弹性波的波速是弹性振动沿确定方向在单位时间内传播的距离。弹性振动在介质中传播时，其振动元可有不同的振动方向，相应的传播速度也不相同，故弹性波有不同的种类。在各向同性体中，当物体的横向尺寸大于振动波长时，其弹性波分为振动方向与传播方向相同的纵波和两个方向互相垂直的横波；当横向尺寸小于振动波长时弹性波是拉伸振动的拉伸波与扭转振动的扭转波。通过弹性波波速的测量可确定材料弹性系数的值，通过观测波传输过程中波幅的衰减可确定衰减系数，进而可进行内耗分析。

9.1.5 弹性技术常数之间的相互关系

常用的弹性技术常数之间如下的关系：

$$\begin{cases} G = \frac{E}{2(1+\mu)} \\ K = \frac{E}{3(1-2\mu)} = \left(\frac{EG}{9G-3E} \right) \\ \textcircled{H} = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} = \left(K + \frac{4}{3}G \right) \end{cases} \quad (9-8)$$

式中 K ——体积模量，单位为 N/mm^2 ；

E ——弹性模量，单位为 N/mm^2 ；

G ——切变模量，单位为 N/mm^2 ；

μ ——泊松比；

$\textcircled{H}$ ——拉密系数。

9.1.6 影响弹性技术常数的因素

1. 温度的影响

影响金属原子间结合力的因素都会对弹性模量造成影响。对于多数金属，随着温度的升高原子的热运动加剧，原子间的距离增大，导致原子间相互作用力减弱。所以，弹性模量随温度升高近似地呈直线降低，如图 9-6 所示。

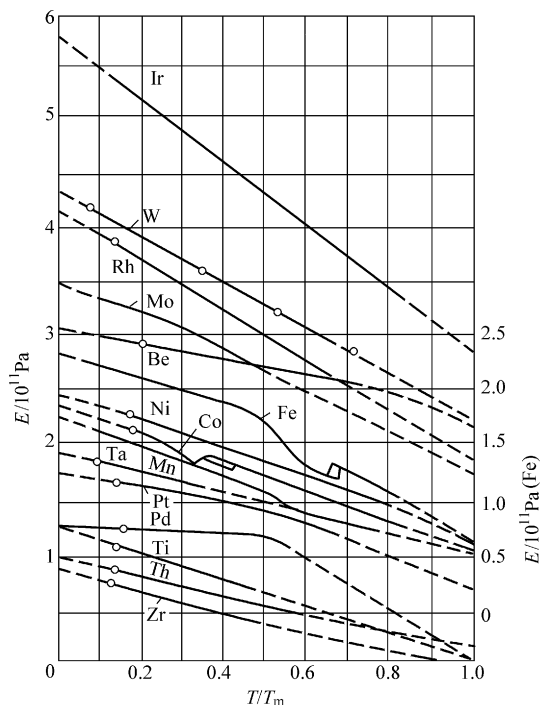


图 9-6 金属弹性模量与温度的关系 (T_m 为熔点)

2. 相变的影响

材料内部的相变（如多晶型转变、有序化转变、铁磁性转变以及超导态转变等）都会对弹性模量产生比较明显的影响，其中有些转变的影响在比较宽的温度范围里发生，而另一些转变则在比较窄的温度范围里引起弹性模量的突变，这是由于原子在晶体学上的重构和磁的重构所造成的。

当金属发生相变时，弹性模量与温度的关系则发生异常的变化。Fe、Co、Ni 的多晶型转变与铁磁转变对弹性模量的影响如图 9-7 所示。例如，随着温度的升高铁在 770℃ 时由铁磁性变为顺磁性，弹性模量降低；在 912℃ 时由体心 α 相变为面心 γ 相，点阵常数减小，弹性模量增加。钴也有类似的情况，当温度升高到 480℃

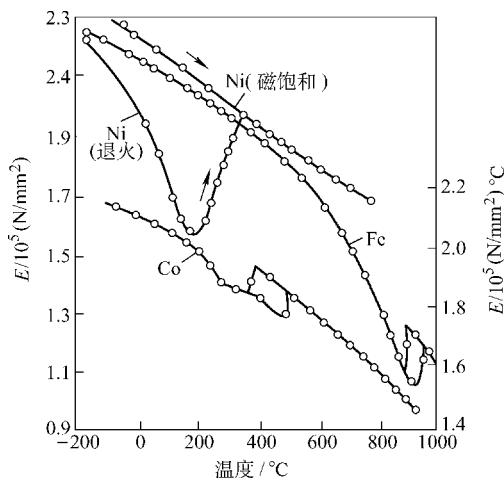


图 9-7 相变对弹性模量-温度曲线的影响

时从六方晶系转变为立方晶系，弹性模量增大。温度降低时，同样在 400℃ 左右观察到模量的跳跃。这种逆转变的温差是由于过冷所致。

在居里温度以下，镍的弹性模量与温度的关系和磁化状态有关；退火的镍在 190 ~ 200℃ 前随温度的升高弹性模量剧烈降低，以后随温度的升高而增加，经居里温度后又重新下降。而磁化到饱和状态的镍，此种现象并不明显。关于这种反常现象可作如下解释：铁磁性金属在测量弹性模量时，除产生正常的弹性伸长外，还由于应力的作用感生磁化，同时产生磁致伸缩效应，即产生补充伸长。因此，它们的弹性模量比正常的模量低。

3. 冷加工的影响

金属材料在冷加工后发生加工硬化。体心立方的铁在加工硬化的影响下弹性模量减小。而面心立方晶格结构的铝、镍、铜等金属的弹性模量值亦因加工硬化的影响而降低，但在强烈的冷加工后模量值反而增大，一般认为这是冷加工组织的影响所致。

人们对冷轧铜片的弹性模量进行了测定，所获得结果如图 9-8 所示。由于拉拔在铜丝中产生了 [111] 晶向的组织，它使得该方向上的弹性模量 E 增加，切变模量 G 减少。组织对体心立方金属弹性模量的

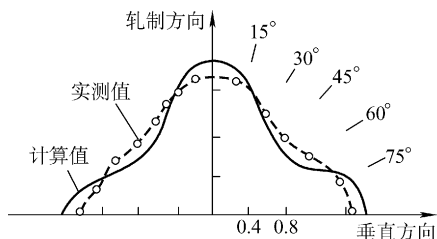


图 9-8 冷轧铜片弹性模量与轧向的关系

影响与面心立方金属大体相似。钢的横向收缩行为，因方向不同而差异极大，只有在特殊情况下才能制出各向同性的材料。形变织构通常不能通过退火处理来消除，而且退火时一般都要形成新的退火织构，也会引起弹性模量的显著变化。例如，退火后的银杆弹性模量将从退火前的 $7.13 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 增加到 $9.6 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ ，增加了 35%。

4. 择优取向的影响

金属材料大多是多晶体，在加工过程中由于织构的形成产生了晶体的择优取向，从而表现出弹性的各向异性。一些常见晶体结构的金属中所形成形变织构的晶向如表 9-2 所示。

表 9-2 晶体中的择优取向

结构类型	线织构(拉拔织构)	板织构(碾轧织构)
体心立方	[110]	(112) <110> 至 100 <011>
面心立方	[111]、[100]纤维织构	{110} <112> 至 {351} <112>
密排六方	[210]	{0001} <1000>

工业用纯金属的弹性常数与择优取向间关系如表 9-3 所示。

表 9-3 弹性常数与择优取向间的关系

晶系	金属名称	弹性模量 E				切变模量 G			
		晶向	$E_{\max}/\text{GPa}$	晶向	$E_{\max}/\text{GPa}$	晶向	$E_{\max}/\text{GPa}$	晶向	$E_{\max}/\text{GPa}$
立方系	铝	<111>	75.5	<100>	62.8	<100>	28.4	<111>	24.5
	金	<111>	111.8	<100>	41.2	<100>	40.2	<111>	17.7
	铜	<111>	190.2	<100>	66.7	<100>	75.5	<111>	30.4
	银	<111>	114.7	<100>	43.1	<100>	43.6	<111>	19.3
	钨	<111>	392.3	<100>	392.3	<100>	152.0	<111>	152.0
	铁	<111>	284.4	<100>	132.4	<100>	115.7	<111>	59.8
六方系	镉	90°	81.4	0°	28.2	90°	24.6	30°	18.0
	镁	0°	50.4	53.3°	42.9	44.5°	18.0	90°	16.8
	锌	70.2°	123.9	0°	34.9	90°	48.7	41.8°	27.3
四方系	锡	<001>	84.7	<110>	26.3	45.7°	17.8	<100>	10.4

金属及合金无择优取向时的弹性常数如表 9-4 所示。

表 9-4 金属及合金无择优取向时的弹性常数

元素或材料	E/GPa	G/GPa	μ	熔点 $T_m/^\circ\text{C}$
Sn(铸态)	41.6	16.7	0.33	231.9

(续)

元素或材料	E/GPa	G/GPa	μ	熔点 $T_m/^\circ\text{C}$
Pb	15.7	5.7	0.38	327
Mg	44.1	17.6	0.25	650
Ag	71.0	25.5	0.39	961.9
Cu	122.5	45.5	0.35	1083
Ni	200.4	76.9	0.30	1455
Fe	208.2	80.6	0.28	1538
Nb	103	37.5	0.38	2468
W	408	158	0.29	3410
碳素钢	214.6	83.3	0.29	≈ 1500
奥氏体不锈钢(1Cr18Ni9Ti)	180	74	0.22	—
3J1(Fe-Ni36CrTiAl)	191	74	0.29	—
3J22(Fe-Co40NiCrMo)	206	78	0.32	—
4J36(Invar;Fe-Ni36)	146	57	0.27	—
3J58(Fe-Ni43CrTi)	190	72	0.32	—
4J75(Mn75Ni15Co10)	126	50	0.26	—
Mg 合金(Mg-Zn-Zr-Y)	45	17	0.28	—
Al 合金	74	27	0.35	≈ 600
6J20(Ni80Cr20)	196	76.4	0.28	≈ 1400
石英	74.8	32.0	0.17	—
工业陶瓷	57.4	23.3	0.23	—

5. 合金成分与组织的影响

一般加入少量的合金元素和进行不同的热处理工艺对弹性模量的影响并不明显，但如果加入大量的合金元素则会使弹性模量产生明显的变化。

在有限互溶的情况下形成固溶体合金时，根据梅龙（Melean）的观点，溶质对合金弹性模量 E 的影响有以下三个方面：

- 1) 由于溶质原子的加入造成点阵畸变，从而引起合金弹性模量的降低。
- 2) 溶质原子可能阻碍位错弯曲和运动使弹性模量增大。

3) 当溶质和溶剂原子间结合力比溶剂原子间结合力大时，会引起合金弹性模量的增加，反之合金弹性模量降低。所以，合金元素可能使弹性模量 E 增大，也可能使 E 减小，视具体情况而定。

一般由点阵类型相同、价电子数和原子半径相近的两种金属组成无限固溶体

时,弹性模量和溶质浓度之间呈直线或近似于直线关系。但溶质是过渡族元素时,弹性模量与溶质原子浓度之间将明显偏离直线关系,而呈向上凸起的曲线关系。

两种金属组成有限固溶体时,若两个组元的原子价不相同,则溶质原子的溶入必然要引起电子浓度的变化,从而改变了参与键合的电子数目,导致弹性模量产生相应的变化。其弹性模量的变化可表示为:

$$\Delta E = \pm cr_s - ar_s(\Delta Z)^2 \quad (9-9)$$

式中 ΔE ——弹性模量的变化值,单位为 N/mm^2 ;

c 、 a ——常数,溶质原子半径大于溶剂时 c 为负;

r_s ——溶质原子的浓度 (%);

ΔZ ——溶质和溶剂金属的原子价差。

式 (9-9) 中第一项表示由于两组元原子半径不同所引起的变化;第二项是由于原子价不同所引起的变化。弹性模量的变化值 ΔE 与溶质原子的浓度成正比,并且其原子价差 ΔZ 越大, ΔE 的变化越剧烈。

6. 磁场的影响

对铁磁性材料来说,试样在退磁状态和磁化到饱和状态下的应力-应变曲线有很大的差别,这表明铁磁材料在零磁场下有较小的弹性模量,而在强磁场下有较大的弹性模量。

这是因为在拉应力作用下,磁畴壁将产生位移和转动,内磁场变化而引起了磁致伸缩使得在原有的拉应力直接产生的弹性延伸之外还产生了附加的应变,随着应力的增加,各磁畴均被迫取与拉应力相同的方向,使附加的应变达到饱和。在强磁作用下,所有磁畴已依外磁场方向排列整齐,施加应力后不再引发附加的磁畴运动,此时与外应力所对应的应变只有弹性延伸。一般以样品在退磁态下的弹性模量和磁饱和态下的弹性模量倒数的差值来衡量磁场作用下材料的弹性模量的大小。

7. 变形速度和弛豫过程的影响

应力或应变弛豫过程对弹性的影响随弛豫机制的不同而不同,但也与速度有关。若形变速度无穷大或样品振动的频率无限高时,弛豫来不及发生。反之,若速度或频率趋于零时,弛豫过程的进行就很充分。在静态测量中得到弹性模量接近于等温模量,而在动态法中测得的模量接近于绝热模量。

9.2 弹性模量的测量方法

所有弹性模量测量方法的基本关系均是依据胡克定律的应力-应变关系来确定的。根据测量过程中试样变形速度的不同,测量方法分静力学法(静态测量法)和动力学法(动态测量法)两类。静态测量法测得的模量称为“静态模量”,它从应力和应变曲线确定弹性模量,是一种经典的方法。这种方法的测量精度较低,其

载荷大小、加载速度等都影响测试结果，也不适合于用来对金属进行弹性分析；由于静态测量法所用试样的变形速度近似于零，故所测模量趋近等温模量。此外，对脆性材料静态测量法也将遇到极大的困难。动态测量法测得的模量称为“动态模量”，这种方法是在试样承受交变应力产生很小应变的条件下测量弹性模量。动态测量法的优点是测量设备简单，测量速度快，测量结果准确。因动态测量法测试时试样承受极小的交变应力，试样的相对变形甚小（ $10^{-7} \sim 10^{-5}$ ），故用动态法测定E、G对高温和交变复杂负荷条件下工作的金属零部件尤其重要，适合用于对金属进行弹性分析。动静态测量法所用的变形速度趋近于无穷大，所测模量趋近绝热模量。一段材料的等温模量与绝热模量的差异不大于1%。

根据对试样的加载或支撑方式的不同，静态测量法分为拉伸法、悬臂法、简支法和扭转法。前三种方法主要用于测定弹性模量，后一种方法用于测定切变模量。尽管这类测量方法对试样的加载和变形测量系统都提出了很高的要求，但仍难测知试样的初始模量值。测量结果虽具有模拟使用状态的意义，但难以适用于比例极限很低或脆性较大的材料。由于蠕变的影响，其高温下的测量结果常是不可靠的。基于上述原因动静态测量法成为测量试样弹性模量的准确方法，动静态测量法依据测量原理的不同分为共振法和相脉冲波法两种。

动态法测量弹性模量的原理是依据共振原理测定试样的机械共振频率，以便测定本部分一项或几项物理性能。通常采用悬丝耦合共振测定方法，其优点是试样的振幅较大，共振易于判别，支撑的影响易于排除，振动长度易于精确判定，且有较宽的温度使用范围。试样处于弯曲、纵向及扭转共振状态并测定其共振频率，可计算出动态弹性模量、动态切变模量及动态泊松比。检测高温下圆杆、圆管试样的扭转共振频率时，若共振信号微弱，可采用哑铃状试样或以销钉固定悬丝的办法进行扭共振频率的相对测量。

9.2.1 自由弯曲共振法

此方法适用于 $-150 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 下材质均匀的金属及合金、凝聚态材料、碳与石墨制品试件的弯曲共振频率及弹性模量值的测量。其测量是根据材料的动态弹性模量和试样共振频率间的固有关系完成的。

1. 试样

1) 试样的长度为 $120 \sim 180\text{mm}$ ，对于圆杆或圆管，直径为 $4 \sim 8\text{mm}$ ，长度为直径的30倍。

2) 矩形件的厚度为 $1 \sim 4\text{mm}$ ，宽度为 $5 \sim 10\text{mm}$ 。

3) 试样的质量不小于 5g 。

4) 横向尺寸的轴向不均匀性不大于0.7%，表面粗糙度 Ra 值不大于 $1.6\mu\text{m}$ ，相对表面的平行度误差不大于 0.02mm 。

5) 检测高温下圆杆、圆管试样的扭转共振频率时, 若共振信号微弱, 可采用哑铃状试样或以销钉固定悬丝的办法进行扭共振频率的相对测量。

2. 试验设备

(1) 量具 所有量具包括游标卡尺、千分尺、天平和测温装置。

1) 游标卡尺, 测量试样长度, 最小分度不大于 0.05mm。

2) 千分尺, 测量试样的直径或宽度、厚度, 最小分度不大于 0.002 mm。

3) 天平, 称量试样的质量, 感量不大于 0.001g。

4) 测温装置, 在不同温度下的试验中用来测量试样的环境温度, 用校准后的热电偶测量, 测温装置的准确度应达到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 其位置应接近试样的中部, 注意与试样的距离应不大于 5mm, 同时不要触及试样。

(2) 共振测量装置 共振测量装置是指可完成不同温度下性能检测的装置, 如图 9-9 所示。用数字频率计来完成导致试样共振的振荡器输出频率的精准测量。按功能的不同, 换能器分为激励器与拾振器两种; 以选频放大器内附的交流电压表检测共振信号。若需要以李沙育图形来判断虚假共振, 应将振荡器与放大器的输出分别供给示波器的水平与垂直偏转板。

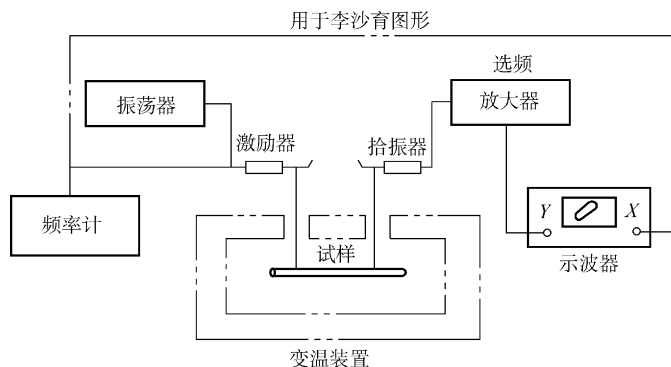


图 9-9 共振检测装置方框图

1) 声频振荡器, 在 100 ~ 30000Hz 范围内有连续可变的频率输出, 在一般测量中, 在任一确定位置上的频率漂移应低于 0.1Hz/min, 其输出功率应可保证所用激励换能器能够激发质量在规定范围内的任何试样。

2) 数字频率计, 可用于振动周期测量的计数式频率计, 测量误差不大于 0.01Hz。

3) 依耦合方式和被测试样的质量、共振频率的不同而选择不同类型的换能器, 在所检测的试样频率变化的范围内, 激励的输出功率损失应不大于 3dB, 拾振器应有尽可能好的频率响应。一般可用压电式换能器, 如盒式的压电陶瓷换能器等; 如果试样质量较小 (一般为 5 ~ 15g), 可用晶体探头。对于矩形杆, 亦可以动

圈式扬声器作为激励器，以耳塞机作为拾振器。

4) 选频放大器的输入阻抗应与拾振换能器的阻抗匹配，频率范围应可满足测试需要，对共振信号的测试灵敏度应不低于 $1\mu\text{V}$ 。推荐采用锁定放大器或配有带通滤波器的传声放大器。

5) 选用频响范围及灵敏度应能满足测试需要的通用示波器。

(3) 变温装置 变温装置包括加热炉和低温槽。

1) 所用加热炉的升、降温应是可控制的；在所测的温度范围内，均温区应大于试样长度，一般为 180mm ，均温区的均匀性应小于 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。

2) 所用低温槽的温度应可控制并可保证不结霜；在所检测的温度范围内，试样长度范围内的温度均匀性应小于 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。

3. 试验条件及操作要求

(1) 几何尺寸与质量的测量 将试样清洗后进行测量。长度取两次测量的均值。检测弹性模量时，试样的直径或厚度取沿长度方向 10 等分后分别测量的均值；检测切变模量时，横向尺寸取 5 等分后分别测量的均值。质量精确到 1mg 。

(2) 能量耦合方法 依测试需要，可采用机械、静电、电磁任一种能量耦合方法。无论采用哪一种耦合方法，都应该尽可能保证试样处于水平位置及其自由振动状态，以排除由支撑阻尼造成的试样共振频率可察觉的变化。

1) 悬丝耦合是机械耦合中常用的一种，耦合方法如图 9-10 所示。无论采用图 9-10 中哪一种悬吊方法，都需满足试样一次悬吊后进行弯曲共振频率相继测量的需要。对于圆杆、圆管状试样，采用图 9-10b 所示方法效果更好，若只检测试样的弯曲共振频率，应使两根悬线与试样的中轴线处于同一平面内。要求所用的悬丝柔软且有必要的强度，在 100°C 以下的检测中，采用棉线作为悬丝，以保证悬丝与试样表面间有较大的摩擦力。

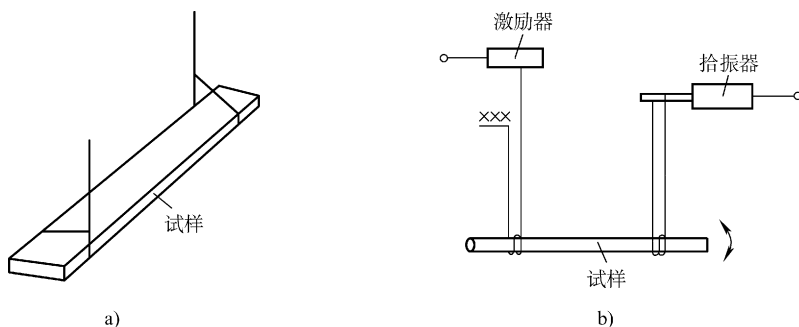


图 9-10 用于弯曲共振和扭曲共振的悬丝耦合方法

a) 条板式试样悬丝耦合方法 b) 管、杆式试样悬丝耦合方法

在高温测量中，应采用石英玻璃纤维，也可在炉子的内、外分别采用两种不同

材质的悬丝。在测量质量较大的试样时,可采用直径小于 0.15mm 的铜丝或镍铬丝,一般的悬吊位置为 $(0.200 \sim 0.215) l$ 或 $0.238l$, l 为试样的长度。由此引致的弯曲共振基频频率测量的系统偏差不大于 0.01%, 扭转共振基频频率的系统误差不大于 0.1%。若共振信号微弱,可将悬吊位置外移,但此时测量的精度相应降低。可采用变更悬吊点位置,将所得共振频率值外推到节点的办法来消除由偏离节点所导致的系统误差。在测量过程中,应注意防止由悬丝共振而产生的对试样共振测量的干扰。

2) 静电耦合方式可有效地排除系统共振的影响,易得到较高的测量精度,如图 9-11 所示。图 9-11a 适于弯曲共振基频频率的检测,图 9-11b 适于扭转共振基频频率的检测。在高温测量中,应注意排除由气体分子电离所致噪声的影响。

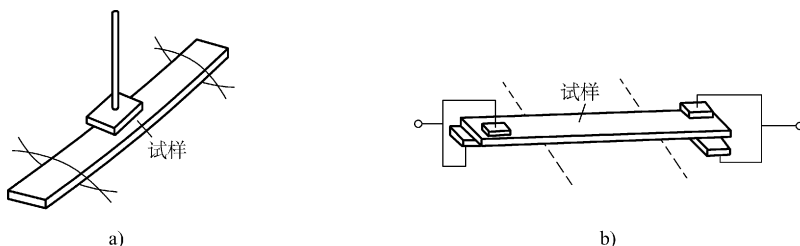


图 9-11 静电耦合方式

a) 弯曲共振静电耦合法 b) 扭转共振静电耦合法

3) 采用电磁耦合方式可获得较高的测量灵敏度,如图 9-12 所示。图 9-12a 适于弯曲共振基频频率的检测,图 9-12b 适于扭转共振基频频率的检测。这种测量可在铁磁性材料居里温度以下进行。在精确测量中,应对铁磁性材料 ΔE 效应的影响进行修正,对非铁磁性材料则应考虑到附加质量的影响。

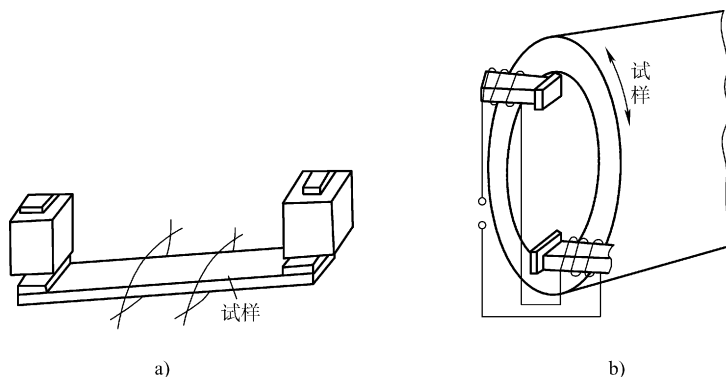


图 9-12 电磁耦合方式

a) 弯曲共振电磁耦合法 b) 扭转共振电磁耦合法

(3) 共振调谐 按被测试样模量的估计值和测得的静态参数, 完成共振频率的估算; 将试样安装好, 启动装置。将适于激励试样的、尽可能低的功率输入激励换能器。选择放大器的频率范围和增益, 使之足以检测试样的共振。调节示波器, 使在试样共振时能得到清晰的李沙育图形。在预定的频率范围内进行扫描, 得到稳定的共振显示。

(4) 鉴频方法 可用粉纹法和阻尼法分别完成对矩形杆和圆杆、圆管室温下振动模式和级次的鉴别。在利用粉纹图法时, 将硅胶粉末均匀地洒在试样的表面上, 在疑为试样共振的频率位置, 增加振荡器的输出功率, 试样共振时会看到这些粉末聚集到试样的节点(线)处。在利用阻尼法时, 沿着试样的长度方向轻轻触及不同部位, 试样共振时会发现共振示值有明显的不同反应: 在波节(节点)处无反应, 在波腹处有明显的衰减。两端自由杆弯曲共振与扭转共振节点的分布如图9-13所示。

	级次	节点位置(长度单位)
弯曲(横)共振	1	0.224
	2	0.132、0.500
	3	0.0944、0.3558
	4	0.0733、0.277、0.500
	5	0.0600、0.227、0.409
	6	0.0508、0.192、0.346、0.500
扭转共振	1	0.500
	2	0.250
	3	0.167、0.500
	4	0.125、0.375
	5	0.100、0.300、0.500

图9-13 节点位置分布示意图

频率比法也是常用的鉴频方法。若测定的共振频率 f_1 与相继测出的频率 f_2 之比符合表9-5, 则 f_1 即为弯曲共振基频频率, 表9-5中 r 是试样的回转半径, d 是试样直径, h 是试样的厚度, l 是试样的长度, μ 是泊松比。在测量圆杆、圆管扭转共振的基频频率时, 常在预定的频率观测位置附近看到3个共振峰, 其中两个是试样弯曲共振的同一振动级次下的共振峰。由于试样常有一定的圆度误差, 在频响曲线上看到对应着同一振动级次的两个弯曲共振峰。此时需用频率比法做进一步的鉴别: 求所测频率与试样弯振基频频率的比值, 如果该值与表9-6中的某一数值相近, 则所测频率就可能是弯振频率。此时也可检测扭共振一次谐波的频率。不同振动级次的圆杆、圆管扭振频率间成简单整数比。

变温测量中的鉴频可用频率比法, 区别虚假共振可用李沙育图形法; 在共振频率 f_r 的附近进行频率扫描时, f_r 两侧拾振信号的相位会有突然的变化, 因而导致李

沙育图形的摆动，据此可判别所确定的共振频率是否真实。

表 9-5 弯曲共振圆杆、圆管一次谐波与基频波的频率比 $K(1, 2)$

$\bar{r}/l$	μ						
	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
0.0000	2.7566	2.7566	2.7566	2.7566	2.7566	2.7566	2.7566
0.0025	2.7553	2.7553	2.7553	2.7553	2.7553	2.7552	2.7552
0.0050	2.7516	2.7515	2.7514	2.7513	2.7512	2.7511	2.7510
0.0075	2.7454	2.7452	2.7450	2.7448	2.7446	2.7444	2.7442
0.0100	2.7368	2.7364	2.7361	2.7358	2.7354	2.7351	2.7347
0.0125	2.7260	2.7254	2.7249	2.7244	2.7239	2.7233	2.7228
0.0150	2.7131	2.7123	2.7116	2.7108	2.7101	2.7093	2.7086
0.0175	2.6982	2.6972	2.6962	2.6952	2.6942	2.6933	2.6923
0.0200	2.6816	2.6803	2.6791	2.6778	2.6765	2.6754	2.5742
0.0225	2.6634	2.6619	2.6603	2.6588	2.6573	2.6558	2.6543
0.0250	2.6439	2.6420	2.6402	2.6384	2.6366	2.6348	2.6331
0.0275	2.6232	2.6210	2.6189	2.6168	2.6147	2.6127	2.6107
0.0300	2.6015	2.5990	2.5966	2.5942	2.5919	2.5896	2.5873
0.0325	2.5790	2.5763	2.5736	2.5709	2.5683	2.5657	2.5631
0.0350	2.5560	2.5529	2.5499	2.5470	3.5441	2.5412	2.5384
0.0375	2.5325	2.5292	2.5259	2.5227	2.5195	2.5164	2.5133
0.0400	2.5088	2.5052	2.5016	2.4982	2.4948	2.4914	2.4881
0.0425	2.4849	2.4810	2.4773	2.4736	2.4699	2.4663	2.4628
0.0450	2.4610	2.4569	2.4529	2.4490	2.4451	2.4413	2.4376
0.0475	2.4373	2.4330	2.4287	2.4246	2.4205	2.4165	2.4126
0.0500	2.4137	2.4092	2.4048	2.4005	2.3962	2.3920	2.3879

注：圆杆 $\bar{r} = \frac{1}{4}d$ ，圆管 $\bar{r} = \frac{1}{4}\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$ ，矩形杆 $\bar{r} = h\sqrt{12}$ 。

表 9-6 圆杆、圆管弯曲共振三次谐频 f_{4s} 四次谐频 f_{5s} 与基频 f_u 的比值

$\bar{r}/l$	$K(4,1)$			$K(5,1)$		
	泊松比 μ					
	0.20	0.30	0.40	0.20	0.30	0.40
0.0000	8.9330	8.9330	8.9330	13.3450	13.3450	13.3450
0.0025	8.9147	8.9140	8.9133	13.3026	13.3010	13.2995

(续)

$\bar{r}/l$	$K(4,1)$			$K(5,1)$		
	泊松比 μ					
	0.20	0.30	0.40	0.20	0.30	0.40
0.0050	8.8605	8.8579	8.8553	13.1782	13.1720	13.1659
0.0075	8.7728	8.7670	8.7613	12.9791	12.9658	12.9528
0.0100	8.6550	8.6451	8.6355	12.7165	12.6944	12.6728
0.0125	8.5113	8.4968	8.4826	12.4037	12.3719	12.3410
0.0150	8.3468	8.3272	8.3082	12.0544	12.0128	11.9724
0.0175	8.1662	8.1416	8.1177	11.6816	11.6307	11.5815
0.0200	7.9743	7.9448	7.9162	11.2969	11.2375	11.1803
0.0225	7.7755	7.7413	7.7083	10.9095	10.8429	10.7788
0.0250	7.5734	7.5351	7.4981	10.5269	10.4542	10.3845
0.0275	7.3713	7.3292	7.2888	10.1546	10.0769	10.0028
0.0300	7.1715	7.1263	7.0830	9.7961	9.7148	9.6372
0.0325	6.9762	6.9283	6.8825	9.4541	9.3699	9.2899
0.0350	6.7866	6.7366	6.6888	9.1298	9.0437	8.9620
0.0375	6.6040	6.5523	6.5029	8.8238	8.7366	8.6539
0.0400	6.4289	6.3758	6.3254	8.5361	8.4484	8.3653
0.0425	6.2617	6.2077	6.1564	8.2664	8.1786	8.0956
0.0450	6.1026	6.0480	5.9962	8.0140	7.9265	7.8440
0.0475	5.9516	5.8966	5.8445	7.7780	7.6912	7.6094
0.0500	5.8086	5.7535	5.7013	7.5576	7.4716	7.3908

注：圆杆 $\bar{r} = \frac{1}{4}d$ ；圆管 $\bar{r} = \frac{1}{4}\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$ 。

(5) 横向尺寸较小试样弯曲共振频率的检测 试样平行振动方向的横向尺寸的减小伴随着共振频率的降低，当基频共振频率低于 100Hz 时，检测发生困难。此时，对于矩形杆，可将试样沿其纵轴转 90°将原来的宽度作为厚度重新检测，即采用棱相悬挂方法；对圆杆、圆管可检测一次谐波的共振频率。如果条件许可，亦可采用缩短试样长度的方法来完成检测。

(6) 高温下的测量 完成室温下的全部测量后，将试样放进炉子，做好密封，同时做好换能器的热绝缘，测定试样在炉子腔体中的室温频率。以可控速率加热炉子，升温速率不得超过 150℃/h。在阶梯式升温中，以 20 ~ 25℃为测量间隔，保温时间以得到可重现的频率测量值来确定。亦可伴随炉温变化进行随炉测量，时间间

隔一般取 15min。当对随炉测量结果有争议时,以阶梯式测量结果为准。在试验过程中,应密切跟踪共振频率随温度的变化,以排除干扰,保证结果的可靠性。为防止高温下试样氧化增重、脱碳等不利因素,视需要可在真空或惰性气体中完成测量。在真空中测量,有利于共振的观测,但需注意修正温度滞后的影响。如有必要,也可进行冷却过程中的测量。在试验过程中,如果试样发生了严重翘曲,应及时中断测量。

(7) 低温下的测量 先在室温下测量试样在空气中的质量、几何尺寸和共振频率,随后置于低温槽中并做好密封,测量试样在低温槽中的室温共振频率。使试样降到所需要的最低温度,在该温度下保温 15min 以上。在降温过程中,应随时监视共振频率的变化。测量加热过程中的数据,加热速率应不超过 50℃/h,每隔 10min 或 15℃ 完成一次测量。根据需求和设备条件,也可在降温过程中完成测量,为防止低温槽溢出水蒸气沉积于试样上形成霜,应在制冷前用干燥的氮气冲刷低温槽。

4. 室温动态弹性模量的数据处理

(1) 圆杆的室温动态弹性模量 将测得的试样的质量 m 、长度 l 、平均直径 d 、反复检测的弯振基频共振频率均值 f_1 及修正系数 T_1 代入下式:

$$E_d = 1.6067 \times 10^{-9} \left(\frac{l}{d} \right)^3 \frac{m}{d} f_1^2 T_1 \quad (9-10)$$

式中 E_d ——动态弹性模量,单位为 N/mm^2 ;

l ——试样的长度,单位为 mm ;

d ——试样的平均直径,单位为 mm ;

m ——试样的质量,单位为 g ;

f_1 ——弯振基频共振频率均值,单位为 Hz ;

T_1 ——修正系数,如表 9-7 所示。

表 9-7 基频弯曲共振圆杆、圆管的修正系数

$\bar{r}/l$	泊松比 μ						
	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.0025	1.0005	1.0005	1.0005	1.0005	1.0005	1.0005	1.0005
0.0050	1.0020	1.0021	1.0021	1.0021	1.0021	1.0021	1.0022
0.0075	1.0046	1.0046	1.0047	1.0047	1.0048	1.0048	1.0049
0.0100	1.0081	1.0082	1.0083	1.0084	1.0085	1.0086	1.0087
0.0125	1.0127	1.0128	1.0130	1.0131	1.0133	1.0134	1.0136
0.0150	1.0183	1.0185	1.0187	1.0189	1.0191	1.0193	1.0195

(续)

$\bar{r}/l$	泊松比 μ						
	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
0.0175	1.0249	1.0252	1.0255	1.0257	1.0260	1.0263	1.0266
0.0200	1.0325	1.0329	1.0332	1.0336	1.0340	1.0344	1.0347
0.0225	1.0411	1.0416	1.0421	1.0426	1.0430	1.0435	1.0440
0.0250	1.0507	1.0513	1.0519	1.0525	1.0531	1.0537	1.0543
0.0275	1.0614	1.0621	1.0628	1.0636	1.0643	1.0650	1.0657
0.0300	1.0731	1.0739	1.0748	1.0756	1.0765	1.0773	1.0782
0.0325	1.0857	1.0868	1.0878	1.0888	1.0898	1.0908	1.0917
0.0350	1.0994	1.1006	1.1018	1.1030	1.1041	1.1053	1.1064
0.0375	1.1142	1.1155	1.1169	1.1182	1.1196	1.1208	1.1221
0.0400	1.1299	1.1314	1.1330	1.1345	1.1360	1.1375	1.1389
0.0425	1.1466	1.1484	1.1501	1.1518	1.1535	1.1552	1.1569
0.0450	1.1644	1.1664	1.1683	1.1702	1.1721	1.1740	1.1759
0.0475	1.1832	1.1854	1.1875	1.1896	1.1918	1.1939	1.1959
0.0500	1.2030	1.2054	1.2078	1.2101	1.2125	1.2148	1.2171

注：圆杆 $\bar{r} = \frac{1}{4}d$ ；圆管 $\bar{r} = \frac{1}{4}\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$ 。

当以试样的一次谐波的共振频率 f_1 进行计算时，应以 $[f_2/K(2,1)]$ 作为 f_1 代入式 (9-10)。

(2) 圆管的室温动态弹性模量 按下式计算动态弹性模量：

$$E_d = 1.6067 \times 10^{-9} \frac{l^3 m}{d_1^4 - d_2^4} f_1^2 T_1 \quad (9-11)$$

式中 E_d ——动态弹性模量，单位为 N/mm^2 ；

l ——试样的长度，单位为 mm ；

d_1 ——管试样的外径，单位为 mm ；

d_2 ——管试样的内径，单位为 mm ；

m ——试样的质量，单位为 g ；

f_1 ——弯振基频共振频率均值，单位为 Hz ；

T_1 ——修正系数，如表 9-7 所示。

(3) 矩形杆的室温动态弹性模量 按下式计算动态弹性模量：

$$E_d = 0.9465 \times 10^{-9} \left(\frac{l}{h} \right)^3 \frac{m}{b} f_1^2 T_1 \quad (9-12)$$

式中 E_d ——动态弹性模量, 单位为 N/mm^2 ;
 l ——试样的长度, 单位为 mm ;
 h ——试样的平均厚度, 单位为 mm ;
 b ——试样的平均宽度, 单位为 mm ;
 m ——试样的质量, 单位为 g ;
 f_1 ——弯振基频共振频率均值, 单位为 Hz ;
 T_1 ——修正系数, 如表 9-8 所示。

表 9-8 基频弯曲共振矩形杆的修正系数

h/l	泊松比 μ						
	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
0.00	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.01	1.0007	1.0007	1.0007	1.0007	1.0007	1.0008	1.0008
0.02	1.0027	1.0028	1.0028	1.0029	1.0030	1.0031	1.0032
0.03	1.0061	1.0062	1.0063	1.0065	1.0067	1.0069	1.0071
0.04	1.0108	1.0110	1.0112	1.0115	1.0118	1.0122	1.0126
0.05	1.0169	1.0172	1.0175	1.0180	1.0185	1.0190	1.0196
0.06	1.0243	1.0247	1.0252	1.0258	1.0265	1.0273	1.0282
0.07	1.0330	1.0336	1.0343	1.0351	1.0360	1.0371	1.0383
0.08	1.0430	1.0437	1.0446	1.0457	1.0470	1.0484	1.0500
0.09	1.0543	1.0552	1.0564	1.0577	1.0593	1.0611	1.0631
0.10	1.0669	1.0680	1.0694	1.0711	1.0730	1.0752	1.0776
0.11	1.0807	1.0821	1.0838	1.0858	1.0881	1.0907	1.0936
0.12	1.0957	1.0974	1.0994	1.1017	1.1045	1.1076	1.1111
0.13	1.1120	1.1139	1.1163	1.1190	1.1222	1.1258	1.1299
0.14	1.1295	1.1317	1.1344	1.1376	1.1412	1.1454	1.1501
0.15	1.1481	1.1506	1.1537	1.1573	1.1615	1.1663	1.1717
0.16	1.1679	1.1708	1.1742	1.1784	1.1831	1.1885	1.1946
0.17	1.1889	1.1921	1.1960	1.2006	1.2059	1.2120	1.2188
0.18	1.2110	1.2145	1.2188	1.2240	1.2299	1.2367	1.2442
0.19	1.2342	1.2381	1.2429	1.2485	1.2551	1.2626	1.2710
0.20	1.2584	1.2627	1.2680	1.2743	1.2815	1.2898	1.2990

5. 室温动态切弯模量的数据处理

(1) 圆杆的动态切变模量 按下式计算动态切变模量:

$$G_d = 4.000 \times 10^{-3} \rho l^2 f_1^2 \quad (9-13)$$

式中 G_d ——动态切变模量, 单位为 N/mm^2 ;

ρ ——试样的密度, 单位为 g/cm^3 ;

f_1 ——弯振基频共振频率均值, 单位为 Hz 。

(2) 圆管的动态切变模量 按下式计算圆管动态切变模量:

$$G_d = 5.093 \times 10^{-9} \frac{ml}{d_1^2 - d_2^2} f_1^2 \quad (9-14)$$

式中 G_d ——动态切变模量, 单位为 N/mm^2 ;

l ——试样的长度, 单位为 mm ;

d_1 ——管试样的外径, 单位为 mm ;

d_2 ——管试样的内径, 单位为 mm ;

m ——试样的质量, 单位为 g ;

f_1 ——弯振基频共振频率均值, 单位为 Hz 。

(3) 矩形杆的动态切变模量 当密度已知时, 可计算振动级次为 n 时的动态切变模量; 当密度未知时, 可计算基频下的动态切变模量。

1) 当密度已知时, 按下式计算动态切变模量:

$$G_d = 4.000 \times 10^{-12} \rho l^2 R_n (f_n/n)^2 \quad (9-15)$$

式中 G_d ——动态切变模量, 单位为 N/mm^2 ;

l ——试样的长度, 单位为 mm ;

ρ ——试样的密度, 单位为 g/cm^3 ;

f_n ——振动级次为 n 时共振频率, 单位为 Hz ;

n ——振动级次;

R_n ——矩形杆的形状因子, 可由下式计算:

$$R_n = \frac{1 + \left(\frac{b}{h}\right)^2}{4 - 2.521 \frac{h}{b} \left(1 - \frac{1.991}{e^{\frac{1.991}{(\pi b)/h + 1}}}\right)} \left(1 + \frac{0.00851 n^2 b^2}{l^2}\right) - 0.060 \left(\frac{nb}{h}\right)^2 \left(\frac{b}{h} - 1\right)^2$$

式中 l ——试样的长度, 单位为 mm ;

h ——试样的平均厚度, 单位为 mm ;

b ——试样的平均宽度, 单位为 mm ;

e ——自然对数的底, 取 2.71828;

n ——振动级次。

2) 当密度未知时, 对于基频, 按下式计算动态切变模量:

$$G_d = 4.000 \times 10^{-9} \frac{ml}{bh} R_1 f_1^2$$

(9-16)

式中 G_d ——动态切变模量，单位为 N/mm^2 ；

m ——试样的质量，单位为 g ；

l ——试样的长度，单位为 mm ；

h ——试样的平均厚度，单位为 mm ；

b ——试样的平均宽度，单位为 mm ；

f_1 ——基频共振频率均值，单位为 Hz ；

R_1 ——矩形杆的形状因子，如表 9-9 所示。

表 9-9 基频共振矩形杆的形状因子

b/h	b/l			b/h	b/l		
	0.025	0.055	0.085		0.025	0.055	0.085
1.00	1.1856	1.1856	1.1857	2.10	1.9299	1.9293	1.9285
1.05	1.1883	1.1883	1.1884	2.15	1.9863	1.9857	1.9848
1.10	1.1960	1.1960	1.1961	2.20	2.0442	2.0435	2.0425
1.15	1.2081	1.2081	1.2081	2.25	2.1036	2.1028	2.1018
1.20	1.2240	1.2240	1.2240	2.30	2.1645	2.1636	2.1625
1.25	1.2434	1.2434	1.2434	2.35	2.2268	2.2258	2.2246
1.30	1.2660	1.2660	1.2660	2.40	2.2905	2.2895	2.2882
1.35	1.2915	1.2915	1.2915	2.45	2.3557	2.3546	2.3532
1.40	1.3197	1.3197	1.3196	2.50	2.4223	2.4211	2.4196
1.45	1.3504	1.3503	1.3502	2.55	2.4903	2.4891	2.4874
1.50	1.3834	1.3833	1.3832	2.60	2.5597	2.5584	2.5566
1.55	1.4187	1.4186	1.4184	2.65	2.6304	2.6290	2.6272
1.60	1.4561	1.4559	1.4557	2.70	2.7026	2.7011	2.6991
1.65	1.4954	1.4952	1.4950	2.75	2.7761	2.7745	2.7724
1.70	1.5367	1.5365	1.5362	2.80	2.8509	2.8493	2.8470
1.75	1.5799	1.5797	1.5793	2.85	2.9271	2.9254	2.9230
1.80	1.6249	1.6246	1.6242	2.90	3.0047	3.0028	3.0004
1.85	1.6716	1.6713	1.6708	2.95	3.0836	3.0816	3.0790
1.90	1.7200	1.7196	1.7191	3.00	3.1638	3.1617	3.1590
1.95	1.7701	1.7697	1.7691	3.05	3.2454	3.2432	3.2403
2.00	1.8218	1.8213	1.8207	3.10	3.3283	3.3260	3.3229
2.05	1.8751	1.8745	1.8738	3.15	3.4125	3.4100	3.4069

(续)

b/h	b/l			b/h	b/l		
	0.025	0.055	0.085		0.025	0.055	0.085
3.20	3.4980	3.4954	3.4921	4.75	6.7885	6.7811	6.7713
3.25	3.5848	3.5821	3.5787	4.80	6.9150	6.9074	6.8974
3.30	3.6729	3.6702	3.6665	4.85	7.0428	7.0350	7.0247
3.35	3.7624	3.7595	3.7557	4.90	7.1719	7.1638	7.1532
3.40	3.8531	3.8501	3.8461	4.95	7.3022	7.2939	7.2831
3.45	3.9452	3.9420	3.9379	5.00	7.4337	7.4253	7.4142
3.50	4.0385	4.0352	4.0309	5.05	7.5666	7.5579	7.5465
3.55	4.1331	4.1297	4.1252	5.10	7.7007	7.6918	7.6801
3.60	4.2291	4.2255	4.2208	5.15	7.8360	7.8270	7.8150
3.65	4.3263	4.3226	4.3177	5.20	7.9727	7.9634	7.9511
3.70	4.4248	4.4210	4.4159	5.25	8.1106	8.1010	8.0884
3.75	4.5246	4.5206	4.5154	5.30	8.2497	8.2399	8.2271
3.80	4.6256	4.6215	4.6161	5.35	8.3901	8.3801	8.3669
3.85	4.7280	4.7237	4.7181	5.40	8.5318	8.5215	8.5080
3.90	4.8316	4.8272	4.8214	5.45	8.6747	8.6642	8.6504
3.95	4.9366	4.9320	4.9260	5.50	8.8189	8.8082	8.7940
4.00	5.0428	5.0380	5.0318	5.55	8.9643	8.9534	8.9389
4.05	5.1502	5.1454	5.1389	5.60	9.1110	9.0998	9.0851
4.10	5.2590	5.2539	5.2473	5.65	9.2589	9.2475	9.2324
4.15	5.3690	5.3638	5.3569	5.70	9.4081	9.3965	9.3811
4.20	5.4803	5.4749	5.4678	5.75	9.5586	9.5467	9.5310
4.25	5.5929	5.5874	5.5800	5.80	9.7103	9.6982	9.6821
4.30	5.7068	5.7010	5.6985	5.85	9.8633	9.8509	9.8345
4.35	5.8219	5.8160	5.8082	5.90	10.0176	10.0049	9.9881
4.40	5.9383	5.9322	5.9242	5.95	10.1731	10.1601	10.1430
4.45	6.0559	6.0497	6.0414	6.00	10.3298	10.3166	10.2991
4.50	6.1748	6.1684	6.1599	6.05	10.4878	10.4743	10.4565
4.55	6.2950	6.2884	6.2796	6.10	10.6471	10.6333	10.6152
4.60	6.4165	6.4097	6.4007	6.15	10.8076	10.7936	10.7751
4.65	6.5392	6.5322	6.5230	6.20	10.9694	10.9551	10.9362
4.70	6.6632	6.6560	6.6465	6.25	11.1324	11.1178	11.0986

(续)

b/h	b/l			b/h	b/l		
	0.025	0.055	0.085		0.025	0.055	0.085
6.30	11.2967	11.2818	11.2622	7.85	17.0112	16.9864	16.9536
6.35	11.4622	11.4471	11.4271	7.90	17.2156	17.1904	17.1571
6.40	11.6290	11.6136	11.5932	7.95	17.4213	17.3957	17.3619
6.45	11.7971	11.7814	11.7606	8.00	17.6281	17.6022	17.5679
6.50	11.9664	11.9504	11.9292	8.05	17.8363	17.8100	17.7752
6.55	12.1369	12.1206	12.0991	8.10	18.0457	18.0190	17.9837
6.60	12.3087	12.2921	12.2702	8.15	18.2563	18.2292	18.1934
6.65	12.4818	12.4649	12.4426	8.20	18.4682	18.4407	18.4044
6.70	12.6561	12.6389	12.6162	8.25	18.6813	18.6535	18.6167
6.75	12.8317	12.8142	12.7911	8.30	18.8957	18.8675	18.8302
6.80	13.0085	12.9907	12.9672	8.35	19.1114	19.0828	19.0449
6.85	13.1866	13.1685	13.1446	8.40	19.3283	19.2993	19.2609
6.90	13.3659	13.3475	13.3232	8.45	19.5464	19.5170	19.4782
6.95	13.5465	13.5278	13.5030	8.50	19.7658	19.7360	19.6966
7.00	13.7283	13.7093	13.6841	8.55	19.9865	19.9563	19.9163
7.05	13.9114	13.8921	13.8665	8.60	20.2084	20.1778	20.1373
7.10	14.0958	14.0761	14.0501	8.65	20.4315	20.4005	20.3595
7.15	14.2814	14.2614	14.2349	8.70	20.6559	20.6245	20.5830
7.20	14.4682	14.4479	14.4210	8.75	20.8816	20.8498	20.8077
7.25	14.6563	14.6357	14.6083	8.80	21.1085	21.0763	21.0336
7.30	14.8457	14.8247	14.7969	8.85	21.3366	21.3040	21.2608
7.35	15.0363	15.0150	14.9867	8.90	21.5660	21.5330	21.4893
7.40	15.2281	15.2065	15.1778	8.95	21.7967	21.7632	21.7189
7.45	15.4213	15.3992	15.3701	9.00	22.0286	21.9947	21.9499
7.50	15.6156	15.5933	15.5637	9.05	22.2618	22.2274	22.1820
7.55	15.8112	15.7885	15.7585	9.10	22.4962	22.4614	22.4154
7.60	16.0081	15.9851	15.9546	9.15	22.7318	22.6966	22.6501
7.65	16.2062	16.1828	16.1519	9.20	22.9687	22.9331	22.8860
7.70	16.4056	16.3819	16.3504	9.25	23.2069	23.1708	23.1231
7.75	16.6062	16.5821	16.5502	9.30	23.4463	23.4098	23.3615
7.80	16.8081	16.7836	16.7513	9.35	23.6870	23.6500	23.6012

(续)

b/h	b/l			b/h	b/l		
	0.025	0.055	0.085		0.025	0.055	0.085
9.40	23.9289	23.8915	23.8421	9.70	25.4066	25.3665	25.3135
9.45	24.1721	24.1342	24.0842	9.75	25.6573	25.6167	25.5631
9.50	24.4165	24.3782	24.3275	9.80	25.9092	25.8682	25.8139
9.55	24.6621	24.6234	24.5722	9.85	26.1624	26.1209	26.0659
9.60	24.9091	24.8699	24.8180	9.90	26.4168	26.3748	26.3193
9.65	25.1572	25.1176	25.0651	9.95	26.6725	26.6300	26.5739

6. 变温过程中的弹性模量的数据处理

变温过程中的弹性模量按下式计算：

$$M_T = M_0 (f_T/f_0)^2 [1/(1 + \bar{\alpha}_l \Delta T)] \quad (9-17)$$

式中 M_T ——温度 T 下的弹性模量，单位 N/mm^2 ；

M_0 ——室温下的弹性模量，单位 N/mm^2 ；

f_T ——温度 T 下试样在炉子或槽中的共振频率，单位为 Hz ；

f_0 ——室温下试样在炉子或槽中的共振频率，单位为 Hz ；

$\bar{\alpha}_l$ ——温度 T 与室温间试样的平均线胀系数，单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

ΔT ——温度 T 与室温间的温度差，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

7. 动态泊松比的数据处理

1) 任一温度下试样的动态泊松比由同一温度下的动态弹性模量、动态切变模量值确定，如下式：

$$\mu = \left(\frac{E_d}{2G_d} \right) - 1 \quad (9-18)$$

式中 μ ——动态泊松比；

E_d ——动态弹性模量，单位为 N/mm^2 ；

G_d ——动态切变模量，单位为 N/mm^2 。

2) 由测得的试样同一温度下的弯曲与扭转的共振频率直接求得该温度下的动态泊松比。对于圆杆按下式计算：

$$\mu = 0.15774 T_1 \left(\frac{l}{d} \right)^2 \left(\frac{f_{\text{tl}}}{f_{\text{sl}}} \right)^2 - 1 \quad (9-19)$$

式中 μ ——圆杆的动态泊松比；

T_1 ——基频弯曲共振时圆杆试样的室温修正系数；

l ——试样室温长度，单位为 mm ；

d ——试样室温直径, 单位为 mm;

f_{11} ——试样弯曲共振基频频率, 单位为 Hz;

f_{s1} ——试样扭转共振进频率, 单位为 Hz。

对于圆管, 按下式计算:

$$\mu = 0.15774 T_1 \frac{l^2}{d_1^2 + d_2^2} \left(\frac{f_{11}}{f_{s1}} \right)^2 - 1 \quad (9-20)$$

式中 μ ——圆管的动态泊松比;

T_1 ——基频弯曲共振时圆管试样的室温修正系数;

l ——试样室温长度, 单位为 mm;

d_1 ——管试样的外径, 单位为 mm;

d_2 ——管试样的内径, 单位为 mm;

f_{11} ——试样弯曲共振基频频率, 单位为 Hz;

f_{s1} ——试样扭转共振进频率, 单位为 Hz。

对于矩形杆, 按下式计算:

$$\mu = 0.11831 \left(\frac{T_1}{R_1} \right) \left(\frac{l}{h} \right)^2 \left(\frac{f_{11}}{f_{s1}} \right)^2 - 1 \quad (9-21)$$

式中 μ ——矩形杆的动态泊松比;

T_1 ——基频弯曲共振时矩形杆试样的室温修正系数;

l ——试样室温长度, 单位为 mm;

h ——室温下平行弯振方向的几何尺寸, 单位为 mm;

R_1 ——试样基频扭转共振时的室温形状因子;

f_{11} ——试样弯曲共振基频频率, 单位为 Hz;

f_{s1} ——试样扭转共振进频率, 单位为 Hz。

9.2.2 圆盘振子法

圆盘振子法适用于室温至 2000℃ 下材质均匀的金属材料圆盘状试样共振频率的测量, 由此可确定试样的动态弹性模量、动态切变模量及动态泊松比。也适用于玻璃、陶瓷等材质均匀、各向同性的其他固体材料的检测。

1. 试验术语

(1) 节圆 圆板在振动中位移为零的同心圆。

(2) 节径 圆板在振动中位移为零的直径。

(3) 共振频率 导致试样产生共振的强迫振动频率, 用符号 f_{mn} 表示, 单位为 Hz; 下标 m 为节圆数, n 为节径数。

(4) 挠曲振动 板基元振动方向与板的中性面垂直的振动称为“挠曲振动”, 与周边自由板挠曲振动基频频率 f_{02} 相应的节径分布如图 9-14a 所示, 与次低频率

f_{10} 相应的节圆分布与振形如图 9-14b 所示。

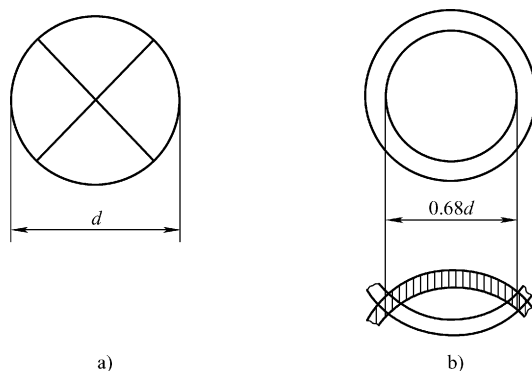


图 9-14 自由圆板基频与次低频的挠曲振动 (d 为试样直径)

a) f_{02} 相应的节径分布 b) f_{10} 相应的节圆分布与振形

2. 试验原理

试样的机械共振频率由材料的弹性模量、密度和试样的直径及其与厚度的比值来确定。因此，试样的几何尺寸、密度和机械共振频率被测定后，相应的动态弹性模量和泊松比即可求出。试样的切变模量可用弹性模量和泊松比值计算。

以强迫共振法测量试样的共振频率时，试样被激励产生的振动是由一个换能器提供的。该换能器将来自频率连续可变的振荡器的电信号转换成机械振动。用另一个换能器来拾取试样的机械振动，并将它转换成可在仪表上显示的电信号，根据电信号的特征来检测试样的共振频率。

圆板做挠曲共振时，其弹性模量与共振频率、密度和几何尺寸间如下关系：

$$E = 1.00 \times 10^{-12} \rho d^2 f_{mn}^2 / K_{mn}^2 \quad (9-22)$$

式中 E ——动态弹性模量，单位为 GPa；

ρ ——密度，单位为 g/cm^3 ；

d ——直径，单位为 mm；

f_{mn} ——节圆数为 m 、节径数为 n 时的共振频率，单位为 Hz；

K_{mn} ——与厚度直径比 h/d 、泊松比 μ 及 m 、 n 值有关的频率常数。

试样的动态切变模量用如下公式求出：

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$

式中 G ——动态切变模量，单位为 GPa；

μ ——泊松比。

试样的泊松比由次低频率 f_{10} 与基频频率 f_{02} 的比值 f_{10}/f_{02} 和厚度 h 与直径 d 的比

值 h/d 确定, 如表 9-10 所示。

表 9-10 泊松比 μ 与频率比 f_{10}/f_{02} 和厚度直径比 h/d 的关系

h/d	f_{10}/f_{02}									
	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	1.75	1.80	1.85	1.90
0.04	0.112	0.152	0.192	0.231	0.270	0.308	0.346	0.378	0.404	0.435
0.06	0.114	0.157	0.200	0.241	0.279	0.315	0.349	0.380	0.409	0.437
0.08	0.116	0.162	0.205	0.245	0.283	0.318	0.353	0.386	0.418	0.450
0.10	0.122	0.166	0.209	0.250	0.289	0.325	0.360	0.394	0.426	0.456
0.12	0.126	0.174	0.217	0.257	0.295	0.332	0.368	0.401	0.433	0.460
0.14	0.134	0.182	0.225	0.265	0.304	0.341	0.376	0.408	0.437	0.462
0.16	0.141	0.191	0.236	0.278	0.315	0.350	0.383	0.416	0.443	0.467
0.18	0.150	0.198	0.243	0.286	0.326	0.363	0.396	0.427	0.453	0.476
0.20	0.159	0.206	0.252	0.295	0.336	0.374	0.408	0.440	0.467	0.491
0.22	0.166	0.212	0.259	0.306	0.352	0.394	0.430	0.458	0.476	0.498

3. 试样

试样为圆盘状。试样的最小质量由拾振系统检测灵敏度决定。试样的直径基本上由加热炉允许的空间决定。一般情况下, 试样的直径为 18 ~ 24mm, 厚度 1.5 ~ 3mm, 试样直径间的差值应不大于 0.02mm, 上下两个表面的平行度误差小于 0.02mm, 表面粗糙度 Ra 值为 1.6 μ m。

4. 试验设备

(1) 量具 测量所用的量具包括游标卡尺、千分尺、天平和热电偶。

1) 游标卡尺用于测量试样的直径, 最小分度不大于 0.02mm。

2) 千分尺用于测量试样的厚度, 最小分度不大于 0.002mm。

3) 天平用于称量试样的质量, 感量不大于 0.001g。

4) 热电偶在变温试验中用来测量试样温度, 温度不高于 1200℃ 时, 测量误差应不大于 $\pm 2^\circ\text{C}$; 高于 1200℃, 测量误差应不大于 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。

(2) 测量装置 可在不同温度下完成弹性模量检测的共振测试装置如图 9-15 所示。

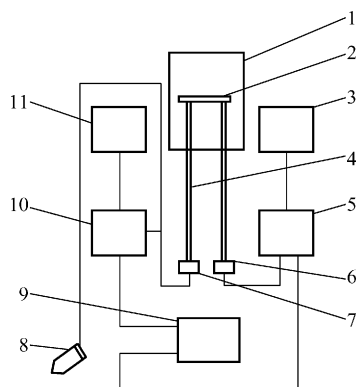


图 9-15 挠曲共振测试装置

- 1—加热炉 2—试样 3—频率计
4—耦合杆 5—振荡器 6—激励换能器
7—拾振换能器 8—探针 9—示波器
10—放大器 11—毫伏表

用数字频率计来完成导致试样共振的振荡器输出频率的精确测定。依功能的不同,换能器分为激励器与拾振器两种。以选频放大器内附的交流电压表检测共振信号。在变温测量中,需要以李沙育图形来判断虚假共振,此时应将振荡器与放大器的输出分别供给示波器的水平与垂直偏转板。

1) 振荡器在 20 ~ 100Hz 内有连续可变的频率输出,在任一确定位置上频率漂移应好于 0.1Hz/min;其输出功率应保证所用激励换能器能够激发几何尺寸在规定范围内的任何试样。

2) 数字频率计是可用于振动周期测量的计数式频率计,测量误差不大于 $\pm 0.1\text{Hz}$ 。

3) 换能器的要求有三:①在所检测的试样频率变化范围内,激励器的输出功率损失应不大于 3dB,拾振器应具有尽可能好的频率响应;②一般可用压电式换能器,常利用附有屏蔽罩的钛酸钡或锆钛酸铅压电陶瓷,压电陶瓷与耦合杆间充填锡等介质,以尽可能消除能量损耗;③室温下作为共振模式与级次鉴别用的探针可利用改装后的晶体唱头。

4) 耦合杆在测试温度范围内应有足够的刚性,支撑试样的耦合杆及支杆端部可具有叉形、圆形等形状。若将换能器及其耦合杆置于试样上方,应注意消除附加质量对试样共振的影响。

5) 放大器的输入阻抗应与拾振换能器的阻抗相匹配,频率响应范围应满足测试要求,对共振信号的测试灵敏度不低于 $1\mu\text{V}$,一般以锁定放大器来完成拾振信号的选频放大与测量。

6) 示波器应选用频率响应范围及灵敏度应满足测试要求的通用示波器。

7) 加热炉温度的升、降应是可控制的,在检测温度范围内均温区横、纵向尺寸应不小于 40mm,温度偏差应小于 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。

5. 测试条件与操作要求

(1) 几何尺寸的测量 几何尺寸应在试样清洗后进行测量,试样直径以均分角度取 5 次测量的平均值计,厚度沿板不同部位随机选取 5 点进行测量后取平均值。

(2) 密度的测量 密度的测量按 GB/T 1423—1996《贵金属及其合金密度的测试方法》的相关规定进行。

(3) 试样安装 将试样水平放置在两根耦合杆顶端上,使试样边缘与杆的 3 ~ 4 个接触点间距离相等。接触点与试样对称轴心的距离应尽可能接近 $0.68r$, r 为试样的半径。

(4) 共振调谐 首先借被测试样模量的估算值和测得的静态参数完成共振频率的估算。试样装设好后起动装置。将适于激励试样的、尽可能低的功率输入激励换能器。选择放大器的频率范围和增益,使之足以检测试样共振。调节示波器,使其在试样共振时能得到清晰的李沙育图形。在预定的频率范围内进行扫描得到稳定的共振显示。

(5) 鉴频方法 可用粉纹法、探针法或阻尼法分别完成对室温下振动模式和级次的鉴别。这种鉴别主要是据对振动节点位置的观测进行的。在利用粉纹法时,将硅胶粉末均匀地撒在试样的表面上,在疑为试样共振的频率位置,增加振荡器的输出功率,试样共振时会看到这些粉末聚集到试样的节点(线)处。在利用探针法或阻尼法时,沿着与试样中心等距的位置或其垂直方向移动探针,轻轻触及不同部位。试样共振时会发现共振示值有明显的不同反应:在波节处无反应,在波腹处有明显的响应或衰减。

(6) 共振频率的测量 在振荡器频率逐步增加的过程中,为防止试样氧化并减少其共振阻尼应将炉内空气抽出,当真空度达到预定指标后加热升温。温度升到指定温度时,需保温 10~20min 方可进行测量。在测量过程中应密切跟踪共振频率随温度的变化,并据拾振信号特征或李沙育图形进行判别,保证测量结果的可靠性。如果还有疑问,可根据 f_{02} 和 f_{10} 分别完成高温弹性模量的计算,据结果的一致性完成鉴别。

6. 数据处理

按下式计算动态弹性模量:

$$E = 1.00 \times 10^{-12} \rho d^2 f_{10}^2 / K_{10}^2 \quad (9-23)$$

式中 E ——动态弹性模量,单位为 GPa;

ρ ——密度,单位为 g/cm^3 ;

d ——直径,单位为 mm;

f_{10} ——圆盘状试样挠曲共振次低频频率,单位为 Hz;

K_{10} ——由试样厚度与直径比和泊松比决定的频率常数,如表 9-11 所示。

表 9-11 频率常数 K_{10} 与泊松比 μ 、厚度直径比 h/d 的关系

h/d	泊松比 μ						
	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
0.04	0.0644	0.0652	0.0678	0.0696	0.0713	0.0741	0.0774
0.06	0.0946	0.0968	0.0993	0.1019	0.1050	0.1085	0.1123
0.08	0.1242	0.1273	0.1303	0.1338	0.1377	0.1421	0.1462
0.10	0.1527	0.1563	0.1600	0.1640	0.1688	0.1743	0.1786
0.12	0.1796	0.1838	0.1881	0.1927	0.1978	0.2039	0.2101
0.14	0.2082	0.2126	0.2141	0.2194	0.2252	0.2320	0.2396
0.16	0.2284	0.2329	0.2379	0.2434	0.2497	0.2570	0.2654
0.18	0.2504	0.2555	0.2610	0.2663	0.2719	0.2786	0.2873
0.20	0.2709	0.2761	0.2818	0.2877	0.2947	0.3028	0.3123
0.22	0.2898	0.2953	0.3016	0.3076	0.3104	0.3142	0.3231

为了校核，可以基频频率 f_{02} 代替 f_{10} ，以频率常数 K_{02} 代替 K_{10} 后，据式（9-23）来完成 E 值的校核， K_{02} 值如表 9-12 所示。

表 9-12 频率常数 K_{02} 与泊松比 μ 、厚度直径比 h/d 的关系

h/d	泊松比 μ						
	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
0.04	0.0428	0.0421	0.0418	0.0410	0.0405	0.0403	0.0389
0.06	0.0634	0.0625	0.0616	0.0607	0.0599	0.0592	0.0584
0.08	0.0836	0.0824	0.0811	0.0800	0.0789	0.0779	0.0770
0.10	0.1031	0.1015	0.1000	0.0986	0.0973	0.0960	0.0948
0.12	0.1219	0.1200	0.1182	0.1165	0.1148	0.1133	0.1119
0.14	0.1421	0.1397	0.1354	0.1335	0.1316	0.1298	0.1281
0.16	0.1567	0.1542	0.1518	0.1496	0.1470	0.1444	0.1422
0.18	0.1728	0.1700	0.1674	0.1649	0.1617	0.1585	0.1559
0.20	0.1880	0.1849	0.1820	0.1793	0.1767	0.1742	0.1718
0.22	0.2022	0.1989	0.1958	0.1928	0.1884	0.1842	0.1811

9.2.3 金属带材弹性性能的测定方法

1. 试样

1) 试样从带材上沿轧制方向截取，尺寸符合表 9-13 的规定。

表 9-13 金属带材弹性性能试验用试样 (单位：mm)

范 围	厚 度	长 度	宽 度	
			宽度及偏差	平行度
A	>0.50 ~ 1.00	150 ± 2	10 ± 0.5	<0.2
	0.15 ~ 0.50	80 ± 2		
B	0.05 ~ 0.20	60 ± 2		

2) 厚度测量应在两支座间进行，读数精确到 0.001mm，宽度测量精确到 0.01mm。试样要求厚度均匀，同一片试样上厚度的偏差在范围 A 不得超过 0.5%，在范围 B 不得超过 0.002mm，试样的初始挠度不得超过 2mm。

3) 用于测量弹性模量和弹性极限的试样至少 6 片，用于测量弹性后效的试样至少 4 片。

4) 已测过弹性模量的试样可以用来测量弹性极限和弹性后效，而测量弹性极限和弹性后效的试样只准使用一次。

5) 试样应清洁, 无油污和氧化层, 不得有扭曲和毛刺, 不得进行可能改变其应力状态的校正。

2. 试验设备

(1) 支座 支座应具有 60° 的刀口, 刀刃弧度半径小于 0.03mm , 其一侧刀口为直线型且呈水平, 另一侧刀口呈弧形 (凸出高度为 1.50mm)。其间距必须与带材的加荷轴线对称, 并能在 $15 \sim 100\text{mm}$ 内连续改变, 调整精度可到 0.10mm 。

(2) 载荷凸轮 用于给试样加荷的凸轮两点接触试样, 两个受力点分别位于试样横轴的左边和右边, 且不得影响在试样中心测量挠度。

(3) 载荷砝码 测定弹性模量 E 必需的载荷砝码 (包括载荷凸轮) 的质量误差不得大于 1% 。对范围 A 砝码重为 100g , 对范围 B 砝码重为 10g 。

(4) 强制挠度的台阶 试样的强制挠度是通过按下载荷凸轮到某一台阶高度而产生的。每个台阶级次的大小为 0.667mm , 强制挠度的误差不大于 0.5% 。

(5) 挠度测量千分表 在支座之间的中心部位测量挠度值, 测量时不应有接触力, 测量误差不得超过 $\pm 0.002\text{mm}$, 测量挠度用千分表误差不得超过 0.001mm 。

3. 弹性模量测试方法

弹性模量测试方法如图 9-16 所示。

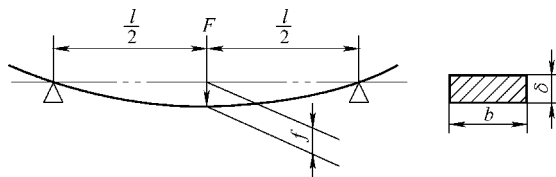


图 9-16 金属带材弹性性能试验方法

F —力 l —支点间距 b —带材宽度 δ —带材厚度 f —挠度值

用下式计算金属带材的弹性模量:

$$E = \frac{F}{4bf} \left(\frac{l}{\delta} \right)^3 \quad (9-24)$$

式中 E ——弹性模量, 单位为 N/mm^2 ;

F ——力, 单位为 kN ;

b ——带材宽度, 单位为 mm ;

l ——支点间距, 单位为 mm ;

δ ——带材厚度, 单位为 mm ;

f ——挠度值, 单位为 μm 。

试验中一般 F 取 0.980N , $l = 100\delta$, $b = 10\text{mm}$, 再根据 E - f 对照表 (见表 9-14), 得到弹性模量值。

表 9-14 E - f 对照表

f / μm	E / (N/mm^2)	f / μm	E / (N/mm^2)	f / μm	E / (N/mm^2)	f / μm	E / (N/mm^2)	f / μm	E / (N/mm^2)	f / μm	E / (N/mm^2)
111	221000	141	174000	171	143000	201	122000	231	106000	261	94000
112	219000	142	173000	172	142000	202	121000	232	106000	262	94000
113	217000	143	171000	173	142000	203	121000	233	105000	263	93000
114	215000	144	170000	174	141000	204	120000	234	105000	264	93000
115	213000	145	169000	175	140000	205	120000	235	104000	265	92000
116	211000	146	168000	176	139000	206	119000	236	104000	266	92000
117	209000	147	167000	177	138000	207	118000	237	103000	267	92000
118	208000	148	166000	178	138000	208	118000	238	103000	268	91000
119	206000	149	164000	179	137000	209	117000	239	103000	269	91000
120	204000	150	163000	180	136000	210	117000	240	102000	270	91000
121	202000	151	162000	181	135000	211	116000	241	102000	271	90000
122	201000	152	161000	182	135000	212	116000	242	101000	272	90000
123	199000	153	160000	183	134000	213	115000	243	101000	273	90000
124	198000	154	159000	184	133000	214	114000	244	100000	274	89000
125	196000	155	158000	185	132000	215	114000	245	100000	275	89000
126	194000	156	157000	186	132000	216	113000	246	100000	276	89000
127	193000	157	156000	187	131000	217	113000	247	99000	277	88000
128	191000	158	155000	188	130000	218	112000	248	99000	278	88000
129	190000	159	154000	189	130000	219	112000	249	98000	279	88000
130	188000	160	153000	190	129000	220	111000	250	98000	280	88000
131	187000	161	152000	191	128000	221	111000	251	98000	281	87000
132	186000	162	151000	192	128000	222	110000	252	97000	282	87000
133	184000	163	150000	193	127000	223	110000	253	97000	283	87000
134	183000	164	149000	194	126000	224	109000	254	96000	284	86000
135	181000	165	148000	195	126000	225	109000	255	96000	285	86000
136	180000	166	148000	196	125000	226	108000	256	96000	286	86000
137	179000	167	147000	197	124000	227	108000	257	95000	287	85000
138	178000	168	146000	198	124000	228	107000	258	95000	288	85000
139	176000	169	145000	199	123000	229	107000	259	95000	289	85000
140	175000	170	144000	200	123000	230	107000	260	94000	290	84000

4. 弯曲弹性极限测量方法

弯曲弹性极限是使材料弯曲产生一规定残余应变时的极限应力。本方法是以支座距离 $l = \sqrt{8000\delta}$, 厚度为 δ 的带材试样卸载后产生的残余挠度为 $50\mu\text{m}$ 时 (即产生 0.00375% 的残余应变时) 的应力定义为弯曲弹性极限, 记作 σ_{bc} 。

弯曲弹性极限可按下式计算:

$$\sigma_{bc} = \frac{6E\delta f_e}{l^2 \sqrt{l + 17(f_e/l)^{2.4}}} \quad (9-25)$$

式中 σ_{bc} ——弯曲弹性极限, 单位为 N/mm^2 ;

l ——支点间距, 单位为 mm ;

δ ——带材厚度, 单位为 mm ;

E ——弹性模量, 单位为 N/mm^2 ;

f_e ——在规定支座距离下, 产生残余挠度 $50\mu\text{m}$ 时的强制挠度值, 单位为 μm , 用线性插值法求得:

$$f_e = a + (b - a) \frac{50 - c}{d - c}$$

式中 f_e ——在规定支座距离下, 产生残余挠度 $50\mu\text{m}$ 时的强制挠度值, 单位为 μm ;

a ——倒数第二次载荷时的强制挠度, 单位为 μm ;

b ——最后一次载荷时的强制挠度, 单位为 μm ;

c ——倒数第二次载荷时的残余挠度, 单位为 μm ;

d ——最后一次载荷时的残余挠度, 单位为 μm 。

弯曲弹性极限 σ_{bc} 按下式求得:

$$\sigma_{bc} = \frac{E}{98000} \cdot \sigma'_{bc} \quad (9-26)$$

式中 E ——弹性模量, 单位为 N/mm^2 ;

σ'_{bc} ——弹性模量为 98000N/mm^2 时的弯曲弹性极限, 单位为 N/mm^2 , 如表 9-15 所示。

表 9-15 δ - f_e - σ'_{bc} 对照表 (单位: N/mm^2)

δ/mm	f_e/mm														
	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8
0.05	203	214	224	234	243	252	261	269	276	283	290	296	301	307	312
0.06	206	218	229	239	249	259	268	277	286	294	301	308	315	321	327
0.07	208	220	232	243	254	264	274	284	293	301	310	318	325	332	339
0.08	210	222	234	246	257	268	279	289	298	308	317	325	333	341	349

(续)

δ/mm	f_e/mm														
	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8
0.09	211	224	236	248	260	271	282	293	303	313	322	331	340	348	356
0.10	212	225	238	250	262	274	285	296	306	317	327	336	346	354	363
0.11	213	226	239	251	264	276	287	298	309	320	330	340	350	359	369
0.12	214	227	240	253	265	277	289	301	312	323	334	344	354	364	373
0.13	214	228	241	254	266	279	291	303	314	325	336	347	357	367	377
0.14	215	228	242	255	267	280	292	304	316	327	339	350	360	371	381
0.15	215	229	242	255	268	281	293	306	318	329	341	352	363	374	384
0.16	216	229	243	256	269	282	294	307	319	331	343	354	365	376	387
0.17	216	230	243	251	270	283	295	308	320	332	344	356	367	378	389
0.18	216	230	244	257	270	283	296	309	321	334	346	357	369	380	391
0.19	217	230	244	258	271	284	297	310	322	335	347	359	370	382	393
0.20	217	231	244	258	271	285	298	310	323	336	348	360	372	384	395
0.21	217	231	245	258	272	285	298	311	324	337	349	361	373	385	397
0.22	217	231	245	259	272	286	299	312	325	337	350	362	374	386	398
0.23	217	231	245	259	272	286	299	312	325	338	351	363	375	387	399
0.24	218	232	245	259	273	286	300	313	326	339	352	364	376	389	401
0.25	218	232	246	259	273	287	300	313	326	339	352	365	377	390	402
0.26	218	232	246	260	273	287	300	314	327	340	353	366	378	391	403
0.27	218	232	246	260	274	287	301	314	327	341	354	366	379	391	404
0.28	218	232	246	260	274	288	301	315	328	341	354	367	380	392	405
0.29	218	232	246	260	274	288	301	315	328	342	355	368	380	393	405
0.30	218	232	246	260	274	288	302	315	329	342	355	368	381	394	406
0.32	218	233	247	261	275	288	302	316	329	343	356	369	382	395	408
0.34	498	233	247	261	275	289	303	316	330	343	357	370	383	396	409
0.36	573	233	247	261	275	289	303	317	330	344	357	371	384	397	410
0.38	615	233	247	261	276	290	303	317	331	345	358	371	385	398	411
0.40	626	233	247	262	276	290	304	318	331	345	359	372	385	399	412
0.42	642	233	248	262	276	290	304	318	332	345	359	373	386	399	413
0.44	657	233	248	262	276	290	304	318	332	346	360	373	387	400	413
0.46	671	234	248	262	276	290	304	318	332	346	360	374	387	401	414
0.48	686	234	248	262	276	291	305	319	333	347	360	374	388	401	415

(续)

δ/mm	f_e/mm														
	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8
0.50	700	234	248	262	277	291	305	319	333	347	361	374	388	402	415
0.55	738	234	248	263	277	291	305	319	333	347	361	375	389	403	416
0.60	769	234	248	263	277	291	306	320	334	348	362	376	390	403	417
0.65	801	234	249	263	277	292	306	320	334	348	362	376	390	404	418
0.70	830	234	249	263	277	292	306	320	335	349	363	377	391	405	419
0.75	859	234	249	263	278	292	306	321	335	349	363	377	391	405	419
0.80	887	234	249	263	278	292	306	321	335	349	364	378	392	406	420
0.85	914	234	249	263	278	292	307	321	335	350	364	378	392	406	420
0.90	940	234	249	263	278	292	307	321	335	350	364	378	392	407	421
0.95	966	234	249	264	278	292	307	321	336	350	364	379	393	407	421
1.00	991	235	249	264	278	293	307	321	336	350	364	379	393	407	421

δ/mm	f_e/mm														
	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0	7.2	7.4	7.6	7.8	8.0	8.2	8.4	8.6	8.8
0.05	316	320	324	328	331	334	337	340	342	344	346	348	350	351	352
0.06	332	338	342	347	351	355	359	362	365	368	371	373	376	378	380
0.07	345	351	357	362	367	372	376	380	384	388	391	394	397	400	402
0.08	356	362	369	375	380	386	391	396	400	404	408	412	416	419	422
0.09	364	371	378	385	391	397	403	409	414	419	423	427	432	435	439
0.10	371	379	387	394	401	407	414	420	425	431	436	441	445	450	454
0.11	377	386	394	401	409	416	423	429	435	441	447	452	457	462	467
0.12	382	391	400	408	416	423	430	437	444	450	456	462	468	473	478
0.13	387	396	405	413	422	430	437	445	452	458	465	471	477	483	489
0.14	391	400	409	418	427	435	443	451	458	466	473	479	486	492	498
0.15	394	404	413	423	432	440	449	457	465	472	479	486	493	500	506
0.16	397	407	417	426	436	445	453	462	470	478	485	493	500	507	513
0.17	400	410	420	430	439	449	458	466	475	483	491	499	506	513	520
0.18	402	413	423	433	443	452	462	471	479	488	496	504	512	519	526
0.19	404	415	425	436	446	456	465	474	483	492	501	509	517	525	532
0.20	406	417	428	438	449	458	468	478	487	496	505	513	522	530	537
0.21	408	419	430	441	451	461	471	481	490	500	509	517	526	534	542
0.22	410	421	432	443	453	464	474	484	493	503	512	521	530	538	547

(续)

δ/mm	f_e/mm														
	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0	7.2	7.4	7.6	7.8	8.0	8.2	8.4	8.6	8.8
0.23	411	422	434	445	455	466	476	486	496	506	515	524	533	542	551
0.24	412	424	435	446	457	468	479	489	499	509	518	528	537	546	554
0.25	414	425	437	448	459	470	481	491	501	511	521	531	540	549	558
0.26	415	427	438	450	461	472	483	493	504	514	524	533	543	552	561
0.27	416	428	439	451	462	473	484	495	506	516	526	536	546	555	564
0.28	417	429	441	452	464	475	486	497	508	518	528	538	548	558	567
0.29	418	430	442	454	465	476	488	499	509	520	530	541	551	560	570
0.30	419	431	443	455	466	478	489	500	511	522	532	543	553	563	573
0.32	420	432	445	457	469	480	492	503	514	525	536	547	557	567	577
0.34	421	434	446	459	471	482	494	506	517	528	539	550	561	571	581
0.36	423	435	448	460	472	484	496	508	520	531	542	553	564	575	585
0.38	424	437	449	462	474	486	498	510	522	533	545	556	567	578	589
0.40	425	438	450	463	475	488	500	512	524	535	547	558	570	581	592
0.42	426	439	451	464	477	489	501	514	526	537	549	561	572	583	594
0.44	426	439	452	465	478	490	503	515	527	539	551	563	574	586	597
0.46	427	440	453	466	479	492	504	516	529	541	553	565	576	588	599
0.48	428	441	454	467	480	493	505	518	530	542	554	566	578	590	601
0.50	428	442	455	468	481	494	506	519	531	544	556	568	580	592	603
0.55	430	443	456	470	483	496	509	521	534	547	559	571	584	596	608
0.60	431	444	458	471	484	498	511	524	536	549	562	574	587	599	611
0.65	432	445	459	472	486	499	512	525	538	551	564	577	589	602	614
0.70	432	446	460	473	487	500	514	527	540	553	566	579	592	604	617
0.75	433	447	461	474	488	501	515	528	541	555	568	581	593	606	619
0.80	434	448	461	475	489	502	516	529	543	556	569	582	595	608	621
0.85	434	448	462	476	489	503	517	530	544	557	570	584	597	610	623
0.90	435	449	463	476	490	504	518	531	545	558	571	585	598	611	624
0.95	435	449	463	477	491	505	518	532	545	559	572	586	599	612	626
1.00	435	449	463	477	491	505	519	533	546	560	573	587	600	613	627
δ/mm	f_e/mm														
	9.0	9.2	9.4	9.6	9.8	10.0	10.2	10.4	10.6	10.8	11.0	11.2	11.4	11.6	11.8
0.05	354	355	356	356	357	358	358	359	359	360	360	360	360	360	360

(续)

δ/mm	f_e/mm														
	9.0	9.2	9.4	9.6	9.8	10.0	10.2	10.4	10.6	10.8	11.0	11.2	11.4	11.6	11.8
0.06	381	383	384	386	387	388	389	390	391	391	392	393	393	393	394
0.07	405	407	409	411	413	414	416	417	418	419	420	421	422	423	423
0.08	425	428	430	433	435	437	439	440	442	443	445	446	447	448	449
0.09	442	446	449	451	454	457	459	461	463	465	467	468	470	471	473
0.10	458	461	465	468	471	474	477	480	482	484	486	488	490	492	494
0.11	471	475	479	483	487	490	493	496	499	502	504	507	509	511	513
0.12	483	488	492	496	500	504	508	511	514	517	520	523	525	528	530
0.13	494	499	504	508	513	517	521	524	528	531	535	538	541	543	546
0.14	503	509	514	519	524	528	533	537	541	544	548	551	555	558	561
0.15	512	518	523	529	534	539	543	548	552	556	560	564	567	571	574
0.16	520	526	532	538	543	548	553	558	563	567	571	575	579	583	587
0.17	527	533	540	546	551	557	562	567	572	577	582	586	590	594	598
0.18	533	540	547	553	559	565	571	576	581	586	591	596	600	605	609
0.19	539	546	553	560	566	572	578	584	590	595	600	605	610	614	619
0.20	545	552	559	566	573	579	585	591	597	603	608	613	618	623	628
0.21	550	558	565	572	579	586	592	598	604	610	616	621	627	632	637
0.22	555	562	570	577	585	591	598	605	611	617	623	629	634	640	645
0.23	559	567	575	582	590	597	604	611	617	624	630	636	641	647	652
0.24	563	571	579	587	595	602	609	616	623	630	636	642	648	654	659
0.25	567	575	583	591	599	607	614	621	628	635	642	648	654	660	666
0.26	570	579	587	596	604	611	619	626	634	641	647	654	660	667	673
0.27	573	582	591	599	608	616	623	631	638	646	653	659	666	672	679
0.28	577	586	594	603	611	620	628	635	643	650	657	664	671	678	684
0.29	579	589	598	606	615	623	631	639	647	655	662	669	676	683	690
0.30	582	591	601	610	618	627	635	643	651	659	666	674	681	688	695
0.32	587	597	606	615	624	633	642	650	659	667	675	682	690	697	704
0.34	591	601	611	621	630	639	648	657	665	674	682	690	698	705	713
0.36	595	606	616	625	635	644	653	663	671	680	689	697	705	713	721
0.38	599	609	620	630	639	649	658	668	677	686	695	703	711	720	728
0.40	602	613	623	633	643	653	663	673	682	691	700	709	717	726	734
0.42	605	616	627	637	647	657	667	677	686	696	705	714	723	732	740

(续)

δ/mm	f_e/mm														
	9.0	9.2	9.4	9.6	9.8	10.0	10.2	10.4	10.6	10.8	11.0	11.2	11.4	11.6	11.8
0.44	608	619	630	640	651	661	671	681	691	700	710	719	728	737	746
0.46	610	621	632	643	654	664	674	685	695	704	714	723	733	742	751
0.48	613	624	635	646	657	667	678	688	698	708	718	728	737	746	756
0.50	615	626	637	648	659	670	681	691	701	712	722	731	741	751	760
0.55	619	631	643	654	665	676	687	698	709	719	730	740	750	760	770
0.60	623	635	647	659	670	681	693	704	715	726	736	747	757	768	778
0.65	626	639	651	662	674	686	697	709	720	731	742	753	764	775	785
0.70	629	642	654	666	678	690	701	713	725	736	747	758	769	780	791
0.75	632	644	656	669	681	693	705	717	729	740	752	763	774	785	796
0.80	634	646	659	671	684	696	708	720	732	744	755	767	779	790	801
0.85	636	648	661	674	686	698	711	723	735	747	759	771	782	794	805
0.90	637	650	663	676	688	701	713	725	738	750	762	774	786	797	809
0.95	639	652	664	677	690	703	715	728	740	752	765	777	789	801	812
1.00	640	653	666	679	692	705	717	730	742	755	767	779	791	803	815

δ/mm	f_e/mm										
	12.0	12.2	12.4	12.6	12.8	13.0	13.2	13.4	13.6	13.8	14.0
0.05	360	360	360	360	360	360	360	360	359	359	358
0.06	394	394	395	395	395	395	395	395	395	395	388
0.07	424	424	425	425	425	426	426	426	426	426	414
0.08	450	451	452	452	453	453	454	454	455	455	437
0.09	474	551	553	555	557	559	561	563	564	566	517
0.10	495	497	498	499	500	501	502	503	504	505	474
0.11	515	516	518	520	521	522	523	525	526	527	490
0.12	532	534	536	538	540	541	543	544	546	547	504
0.13	549	551	553	555	557	559	561	563	564	566	517
0.14	563	566	569	571	573	575	577	579	581	583	528
0.15	577	580	583	586	588	591	593	595	597	599	539
0.16	590	593	596	599	602	605	607	610	612	614	548
0.17	602	605	609	612	615	618	621	623	626	628	557
0.18	613	616	620	624	627	630	633	636	639	641	565
0.19	623	627	634	635	638	642	645	648	651	654	572

(续)

δ/mm	f_c/mm										
	12.0	12.2	12.4	12.6	12.8	13.0	13.2	13.4	13.6	13.8	14.0
0.20	632	637	641	645	649	652	656	659	663	666	579
0.21	641	646	650	654	659	662	666	670	673	677	586
0.22	650	654	659	664	668	672	676	680	684	687	591
0.23	658	663	667	672	677	681	685	689	693	697	597
0.24	665	670	675	680	685	690	694	698	702	706	602
0.25	672	677	683	688	693	698	702	707	711	715	607
0.26	678	684	690	695	700	705	710	715	719	724	611
0.27	685	691	696	702	707	712	717	722	727	732	616
0.28	691	697	703	708	714	719	724	730	734	739	620
0.29	696	702	709	714	720	726	731	742	742	746	623
0.30	701	708	714	720	726	732	738	743	748	753	627
0.32	711	718	725	731	737	743	749	755	761	766	633
0.34	720	727	734	741	748	754	760	766	772	778	639
0.36	728	736	743	750	757	764	770	777	783	789	644
0.38	736	743	751	758	765	772	779	786	793	799	649
0.40	742	750	758	766	773	781	788	795	801	808	653
0.42	749	757	765	773	780	788	795	803	810	817	657
0.44	754	763	771	779	787	795	803	810	817	825	661
0.46	760	768	777	785	793	801	809	817	825	832	664
0.48	765	773	782	791	799	807	815	823	831	839	667
0.50	769	778	787	796	805	813	821	829	837	845	670
0.55	779	789	798	807	816	825	834	843	851	859	676
0.60	788	798	808	817	827	836	845	854	863	872	681
0.65	795	806	816	826	835	845	855	864	873	882	686
0.70	802	812	823	833	843	853	863	873	882	892	690
0.75	807	818	829	839	850	860	870	880	890	900	693
0.80	812	823	834	845	856	866	877	887	897	907	696
0.85	817	828	839	850	861	872	882	893	903	913	698
0.90	821	832	843	854	866	876	887	898	909	919	701
0.95	824	836	847	858	870	881	892	903	914	924	703
1.00	827	839	851	862	874	885	896	907	918	929	705

注: $l = \sqrt{8000\delta}$ 。

在 B 尺寸范围和高弹性极限情况下, 弯曲弹性极限根据下式计算:

$$\sigma_{bc} = \frac{6E\delta f_e}{(l^2 + 4f_e^2) \sqrt{l + 17(f_e / \sqrt{l^2 + 4f_e^2})^{2.4}}} \quad (9-27)$$

式中 l ——支点间距, 单位为 mm, 取 $l = \sqrt{4000\delta}$;

f_e ——在规定支座距离下, 产生残余挠度 25 μm 时的强制挠度值, 单位为 μm 。

在 B 范围或高弹性情况下 ($l = \sqrt{4000\delta}$), 根据式 (9-27) 在弹性模量 E 为 98000N/mm² 时得到快速测量的 δ - f_e - σ'_{bc} , 从表 9-16 中查出 σ'_{bc} , 代入下式:

$$\sigma_{bc} = \frac{E}{98000} \cdot \sigma'_{bc}$$

即可求得弯曲弹性极限 σ_{bc} 。

表 9-16 B 尺寸范围和高弹性极限下的 δ - f_e - σ'_{bc} 对照表

(单位: N/mm²)

δ/mm	f_e/mm														
	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8
0.05	255	272	287	301	313	323	332	339	345	350	353	356	358	359	359
0.06	261	280	297	313	327	339	350	359	367	374	379	384	387	390	392
0.07	266	286	304	322	337	351	364	375	385	393	400	407	412	416	419
0.08	269	290	310	329	345	361	375	388	399	409	413	426	432	438	442
0.09	272	294	315	334	352	369	384	398	411	422	432	441	449	456	462
0.10	274	297	318	339	358	375	392	407	421	433	445	455	464	472	479
0.11	276	299	321	342	362	381	398	414	429	443	455	467	477	486	494
0.12	277	301	324	346	366	386	404	421	437	451	465	477	488	498	508
0.13	279	303	326	348	370	390	409	426	443	458	473	486	498	509	519
0.14	280	304	328	351	372	393	413	431	448	465	480	494	507	519	530
0.15	281	306	330	353	375	396	416	435	453	470	486	501	515	527	539
0.16	282	307	331	355	377	399	420	439	458	475	492	507	522	535	548
0.17	282	308	332	356	379	401	422	443	462	480	497	513	528	542	555
0.18	283	309	334	358	381	404	425	446	465	484	502	518	534	549	563
0.19	284	310	335	359	383	405	427	448	468	488	506	523	539	555	569
0.20	284	310	336	360	384	407	429	451	471	491	510	527	544	560	575
0.21	285	311	336	361	385	409	431	453	474	494	513	531	548	565	580
0.22	285	311	337	362	387	410	433	455	476	497	516	535	553	569	585
0.23	286	312	338	363	388	412	435	457	479	499	519	538	556	574	590

(续)

δ/mm	f_e/mm														
	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8
0.24	286	313	339	364	389	413	436	459	481	502	522	541	560	577	594
0.25	286	313	339	365	390	414	438	460	483	504	524	544	563	581	598
0.26	287	313	340	365	391	415	439	462	484	506	527	547	566	585	602
0.27	287	314	340	366	391	416	440	463	486	508	529	549	569	588	606
0.28	287	314	341	367	392	417	441	465	488	510	531	552	572	591	609
0.29	287	314	341	367	393	418	442	466	489	511	533	554	574	593	612
0.30	288	315	342	368	393	419	443	467	490	513	535	556	576	596	615
0.32	288	315	342	369	395	420	445	469	493	516	538	560	581	601	620
0.34	288	316	343	370	396	421	446	471	495	518	541	563	584	605	625
0.36	289	316	343	370	397	422	448	473	497	520	544	566	588	609	629
0.38	289	317	344	371	397	423	449	474	499	522	546	569	591	612	633
0.40	289	317	344	371	398	424	450	475	500	524	548	571	594	615	637
0.42	290	317	345	372	399	425	451	477	502	526	550	573	596	618	640
0.44	290	318	345	373	399	426	452	478	503	527	552	575	598	621	643
0.46	290	318	346	373	400	427	453	479	504	529	553	577	600	623	646
0.48	290	318	346	373	400	427	454	480	505	530	555	579	602	625	648
0.50	290	318	346	374	401	428	454	480	506	531	556	580	604	627	650
0.55	291	319	347	375	402	429	456	482	508	534	559	584	608	632	655
0.60	291	319	347	375	403	430	457	484	510	536	562	587	611	636	659
0.65	291	320	348	376	404	431	458	485	512	538	564	589	614	639	663
0.70	291	320	348	376	404	432	459	486	513	539	565	591	617	642	666
0.75	292	320	349	377	405	432	460	487	514	541	567	593	619	644	669
0.80	292	320	349	377	405	433	461	488	515	542	568	595	620	646	671
0.85	292	321	349	377	406	433	461	489	516	543	570	596	622	648	673
0.90	292	321	349	378	406	434	462	489	517	544	571	597	623	649	675
0.95	292	321	349	378	406	434	462	490	517	545	572	598	625	651	677
1.00	292	321	350	378	406	435	463	490	518	545	572	599	626	652	678

δ/mm	f_e/mm														
	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0	7.2	7.4	7.6	7.8
0.05	359	358	357	355	353	351	349	346	343	340	337	333	330	326	323
0.06	393	394	394	393	392	391	389	387	384	382	379	376	373	370	366

(续)

δ/mm	f_e/mm														
	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0	7.2	7.4	7.6	7.8
0.07	422	424	425	425	425	425	424	422	421	419	417	414	412	409	406
0.08	446	449	451	453	454	455	454	454	453	452	450	448	446	444	441
0.09	467	471	475	477	479	481	482	482	482	482	481	479	478	476	474
0.10	485	491	495	499	502	504	506	507	508	508	508	507	506	505	504
0.11	502	508	513	518	522	525	528	530	531	532	533	533	533	532	531
0.12	516	523	530	535	540	544	548	550	553	554	556	556	557	557	556
0.13	528	537	544	551	556	561	566	569	572	575	576	573	579	579	579
0.14	540	549	557	564	571	577	582	586	590	593	596	598	599	600	601
0.15	550	560	569	577	584	591	597	602	606	610	613	616	618	620	621
0.16	559	570	580	589	597	604	610	616	621	626	630	633	636	638	640
0.17	568	579	590	599	608	616	623	629	635	640	645	649	652	655	657
0.18	575	587	599	609	618	627	635	642	648	654	659	664	667	671	674
0.19	582	595	607	618	628	637	645	653	660	667	672	677	682	686	689
0.20	589	602	614	626	637	646	655	664	671	678	685	690	695	700	704
0.21	595	609	621	634	645	655	665	674	682	689	696	702	708	713	717
0.22	600	615	628	641	652	663	673	683	692	700	707	714	720	725	730
0.23	606	620	634	647	659	671	682	692	701	709	717	724	731	737	742
0.24	610	626	640	653	666	678	689	700	709	718	727	734	741	748	754
0.25	615	630	645	659	672	685	696	707	717	727	736	744	751	758	765
0.26	619	635	650	665	678	691	703	714	725	735	744	753	761	768	775
0.27	623	639	655	670	684	697	709	721	732	743	752	761	770	778	785
0.28	626	643	659	674	689	702	715	728	739	750	760	769	778	786	794
0.29	630	647	663	679	694	708	721	734	746	757	767	777	786	795	803
0.30	633	651	667	683	698	713	726	739	752	763	774	784	794	803	811
0.32	639	657	674	691	707	722	736	750	763	775	787	798	808	818	827
0.34	644	663	681	698	714	730	745	760	773	786	799	810	821	832	842
0.36	649	668	687	704	721	738	753	768	783	796	809	822	833	844	855
0.38	653	673	692	710	728	745	761	776	791	805	819	832	844	856	867
0.40	657	677	697	715	733	751	768	784	799	814	828	842	854	867	878
0.42	661	681	701	720	739	757	774	790	806	822	836	850	864	877	889
0.44	664	685	705	725	744	762	779	797	813	829	844	858	872	886	899

(续)

δ/mm	f_e/mm														
	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0	7.2	7.4	7.6	7.8
0.46	667	688	709	729	748	767	785	802	819	835	851	866	880	894	908
0.48	670	691	712	732	752	771	790	808	825	841	858	873	888	902	916
0.50	673	694	715	736	756	775	794	812	830	847	864	880	895	910	924
0.55	678	700	722	744	764	785	804	823	842	860	877	894	911	926	942
0.60	683	706	728	750	771	792	813	833	852	871	889	907	924	941	957
0.65	687	710	733	756	778	799	820	841	861	880	899	918	936	953	970
0.70	690	714	738	760	783	805	826	848	868	888	908	927	946	964	981
0.75	693	718	741	765	788	810	832	854	875	895	916	935	955	973	992
0.80	696	721	745	768	792	814	837	859	881	902	922	943	962	982	1001
0.85	698	723	748	772	795	818	841	864	886	907	928	949	969	989	1009
0.90	700	725	750	774	798	822	845	868	890	912	934	955	976	996	1016
0.95	702	728	752	777	801	825	849	872	894	917	939	960	981	1002	1023
1.00	704	729	755	779	804	828	852	875	898	921	943	965	987	1008	1025
δ/mm	f_e/mm														
	8.0	8.2	8.4	8.6	8.8	9.0	9.2	9.4	9.6	9.8	10.0	10.2	10.4	10.6	10.8
0.05	319	316	312	308	305	301	298	294	291	287	284	280	277	274	271
0.06	363	360	356	353	349	345	342	338	335	331	328	324	321	317	314
0.07	403	400	396	393	389	386	382	379	375	372	368	365	361	357	354
0.08	439	436	433	430	427	423	420	416	413	409	406	402	399	395	392
0.09	472	469	467	464	461	458	455	451	448	445	441	438	434	431	427
0.10	502	500	498	495	493	490	487	484	481	478	474	471	467	464	461
0.11	530	528	526	524	522	520	517	514	511	508	505	502	499	496	492
0.12	555	554	553	551	549	547	545	543	540	537	534	532	528	525	522
0.13	579	579	578	577	575	573	571	569	567	565	562	559	556	553	550
0.14	601	601	601	600	599	598	596	594	593	590	588	586	583	580	577
0.15	622	622	622	622	622	621	620	618	617	615	613	610	608	606	603
0.16	641	642	643	643	643	642	641	640	639	638	636	634	632	630	627
0.17	659	661	662	662	663	663	662	662	661	659	658	656	655	653	651
0.18	676	678	680	681	681	682	682	682	681	680	679	678	676	675	673
0.19	692	694	696	698	699	700	700	701	700	700	699	698	697	696	694
0.20	707	710	712	714	716	717	718	719	719	719	718	718	717	716	714

(续)

δ/mm	f_e/mm														
	8.0	8.2	8.4	8.6	8.8	9.0	9.2	9.4	9.6	9.8	10.0	10.2	10.4	10.6	10.8
0.21	721	724	727	730	732	734	735	736	736	736	736	736	735	735	734
0.22	734	738	742	745	747	749	751	752	753	753	754	754	753	753	752
0.23	747	751	755	758	761	764	766	768	769	770	770	771	771	770	770
0.24	759	764	768	772	775	778	780	782	784	785	786	787	787	787	787
0.25	770	775	780	784	788	791	794	796	799	800	801	802	803	803	804
0.26	781	787	792	796	800	804	807	810	812	814	816	817	818	819	819
0.27	791	797	803	808	812	816	820	823	826	828	830	832	833	834	835
0.28	801	807	813	819	824	828	832	835	839	841	843	845	847	848	849
0.29	810	817	823	829	834	839	843	847	851	854	856	859	861	862	863
0.30	819	826	833	839	845	850	855	859	863	866	869	871	874	875	877
0.32	836	844	851	858	864	870	875	880	885	889	892	895	898	901	903
0.34	851	860	868	875	882	889	895	900	905	910	914	918	921	924	927
0.36	865	874	883	891	899	906	912	919	924	930	934	939	943	946	950
0.38	878	888	897	906	914	922	929	936	942	948	953	958	963	967	971
0.40	890	900	910	919	928	937	944	952	959	965	971	976	982	986	991
0.42	901	912	922	932	942	950	959	967	974	981	988	994	999	1004	1009
0.44	911	922	933	944	954	963	972	981	989	996	1003	1010	1016	1022	1027
0.46	920	932	944	955	966	975	985	994	1002	1010	1018	1025	1031	1038	1043
0.48	929	942	954	965	976	987	997	1006	1015	1024	1032	1039	1046	1053	1059
0.50	938	951	963	975	987	998	1008	1018	1027	1036	1045	1053	1060	1067	1074
0.55	956	970	984	997	1010	1022	1033	1044	1055	1065	1074	1083	1092	1100	1108
0.60	972	987	1002	1016	1029	1042	1055	1067	1079	1090	1100	1110	1120	1129	1138
0.65	986	1002	1018	1033	1047	1061	1074	1087	1100	1112	1123	1134	1145	1155	1164
0.70	999	1015	1031	1047	1062	1077	1091	1105	1118	1131	1143	1155	1167	1178	1188
0.75	1009	1027	1044	1060	1076	1091	1106	1121	1135	1148	1162	1174	1186	1198	1210
0.80	1019	1037	1054	1072	1088	1104	1120	1135	1150	1164	1178	1191	1204	1217	1229
0.85	1028	1046	1064	1082	1099	1116	1132	1148	1163	1178	1193	1207	1220	1234	1246
0.90	1035	1054	1073	1091	1109	1126	1143	1159	1175	1191	1206	1221	1235	1249	1262
0.95	1042	1062	1081	1100	1118	1136	1153	1170	1187	1203	1218	1234	1248	1263	1277
1.00	1049	1069	1088	1107	1126	1144	1162	1180	1197	1213	1230	1245	1261	1276	1290

(续)

δ/mm	f_e/mm															
	11.0	11.2	11.4	11.6	11.8	12.0	12.2	12.4	12.6	12.8	13.0	13.2	13.4	13.6	13.8	14.0
0.05	267	264	261	258	255	252	249	246	244	241	238	235	233	230	228	225
0.06	310	307	303	300	297	294	291	287	284	281	278	275	272	270	267	264
0.07	350	347	343	340	336	333	330	326	323	320	317	313	310	307	304	301
0.08	388	384	381	377	374	370	367	363	360	356	353	350	347	343	340	337
0.09	423	420	416	413	409	406	402	398	395	391	388	385	381	378	374	371
0.10	457	453	450	446	443	439	436	432	428	425	421	418	414	411	407	404
0.11	489	485	482	478	475	471	467	464	460	457	453	450	446	442	439	435
0.12	519	515	512	509	505	502	498	494	491	487	484	480	476	473	469	466
0.13	547	544	541	537	534	531	527	524	520	516	513	509	506	502	499	495
0.14	574	571	568	565	562	558	555	552	548	545	541	537	534	530	527	523
0.15	600	597	594	591	588	585	582	578	575	571	568	565	561	557	554	550
0.16	625	622	619	616	613	610	607	604	601	597	594	591	587	584	580	577
0.17	648	646	643	640	638	635	632	629	625	622	619	616	612	609	605	602
0.18	671	668	666	664	661	658	655	652	649	646	643	640	637	633	630	626
0.19	692	690	688	686	683	681	678	675	672	669	666	663	660	657	653	650
0.20	713	711	709	707	705	702	700	697	694	692	689	686	683	679	676	673
0.21	732	731	729	727	725	723	721	718	716	713	710	707	705	702	698	695
0.22	751	750	748	747	745	743	741	739	736	734	731	729	726	723	720	717
0.23	769	768	767	766	764	762	760	758	756	754	751	749	746	743	741	738
0.24	787	786	785	784	783	781	779	777	775	773	771	769	766	763	761	758
0.25	803	803	802	801	800	799	797	796	794	792	790	788	785	783	780	778
0.26	819	819	819	818	817	816	815	814	812	810	808	806	804	802	799	797
0.27	835	835	835	835	834	833	832	831	829	828	826	824	822	820	818	815
0.28	850	850	850	850	850	849	848	847	846	845	843	842	840	838	836	833
0.29	864	865	865	865	865	865	864	864	863	861	860	858	857	855	853	851
0.30	878	879	880	880	880	880	880	879	878	877	876	875	873	872	870	868
0.32	905	906	907	908	909	909	909	909	909	908	907	906	905	904	902	901
0.34	929	931	933	934	935	936	937	937	937	937	937	936	935	934	933	932
0.36	952	955	957	959	960	962	963	964	964	964	964	964	964	963	962	961
0.38	974	977	980	982	984	986	987	989	989	990	990	991	991	990	990	989
0.40	994	998	1001	1004	1006	1009	1011	1012	1014	1015	1015	1016	1016	1016	1016	1016

(续)

δ/mm	f_e/mm															
	11.0	11.2	11.4	11.6	11.8	12.0	12.2	12.4	12.6	12.8	13.0	13.2	13.4	13.6	13.8	14.0
0.42	1014	1018	1021	1025	1028	1030	1033	1035	1036	1038	1039	1040	1041	1041	1041	1042
0.44	1032	1036	1040	1044	1048	1051	1053	1056	1058	1060	1062	1063	1064	1065	1065	1066
0.46	1049	1054	1058	1063	1066	1070	1073	1076	1079	1081	1083	1085	1086	1087	1088	1089
0.48	1065	1070	1075	1080	1084	1088	1092	1095	1098	1101	1103	1105	1107	1109	1110	1111
0.50	1080	1086	1092	1097	1101	1106	1110	1114	1117	1120	1123	1125	1128	1129	1131	1133
0.55	1115	1122	1129	1135	1141	1146	1151	1156	1160	1164	1168	1171	1174	1177	1180	1182
0.60	1146	1154	1162	1169	1175	1182	1188	1193	1199	1204	1208	1213	1217	1220	1224	1227
0.65	1174	1183	1191	1199	1207	1214	1221	1227	1233	1239	1245	1250	1255	1259	1263	1267
0.70	1198	1208	1217	1226	1235	1243	1251	1258	1265	1271	1278	1284	1289	1295	1299	1304
0.75	1220	1231	1241	1251	1260	1269	1277	1286	1293	1301	1308	1314	1321	1327	1333	1338
0.80	1241	1252	1263	1273	1283	1293	1302	1311	1319	1327	1335	1343	1350	1357	1363	1369
0.85	1259	1271	1282	1293	1304	1314	1324	1334	1343	1352	1360	1369	1376	1384	1391	1398
0.90	1275	1288	1300	1312	1323	1334	1345	1355	1365	1374	1384	1392	1401	1409	1417	1424
0.95	1291	1304	1317	1329	1341	1353	1364	1375	1385	1395	1405	1414	1423	1432	1441	1449
1.00	1304	1318	1332	1345	1357	1369	1381	1393	1404	1415	1425	1435	1445	1454	1463	1471

注: $l = \sqrt{4000\delta}$ 。

5. 弹性后效测量方法

试样在恒定应力作用下经过时间 t 卸载后, 在特定时间内不能恢复的残余形变率称为弹性后效, 记作 H_t (下标 t 表示时间, 单位为 min), 测试方法如图 9-17 所示。

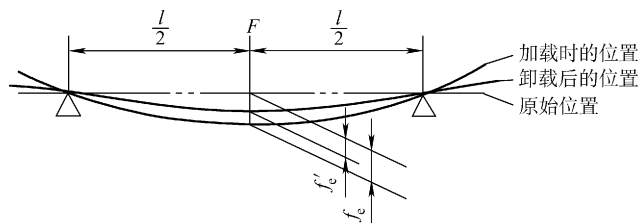


图 9-17 弯曲弹性极限测量方法

F —力 l —支点间距 f_e —恒定力作用下的挠度值

f'_e —恒定力作用下 10min 卸载后的挠度值

弹性后效 H_{10} (%) 按下式计算:

$$H_{10} = \frac{f'_e}{f_e} \quad (9-28)$$

式中 f_e ——恒定力作用下的挠度值，单位为 μm ；

f'_e ——恒定力作用下 10min 卸载后的挠度值，单位为 μm 。

9.2.4 烧结金属材料和硬质合金的弹性模量测定方法

1. 试样

1) 烧结金属材料的取样按 JB/T 7905—1999 《烧结金属材料（不包括硬质合金）抽样》进行。硬质合金的取样按 GB/T 5242—2006 《硬质合金制品检验规则与试验方法》进行。

2) 试样长度大于等于 60mm，可以是圆形截面或矩形截面。圆形试样的截面直径为 $(6 \pm 0.2) \text{ mm}$ ，矩形试样的截面为 $(6 \pm 0.2) \text{ mm} \times (8 \pm 0.2) \text{ mm}$ 。

3) 表面层应至少除去 0.1mm 的厚度，表面粗糙度 Ra 值为 $1.25 \mu\text{m}$ 。

4) 试样的两端端面磨光，平行度在 0.02mm 以内。

5) 试样没有表面裂纹和其他结构缺陷，试验前必须进行表面清洗。

2. 试验步骤

1) 按 GB/T 3850—1983 《致密烧结金属材料与硬质合金密度测定方法》测定试样的密度，精确到 0.01 g/cm^3 。

2) 测量试样的长度，精确到 0.1mm。

3) 将试样装到设备上，平稳地增加振荡器的频率。测定共振频率，精确到 50Hz。

3. 数据处理

弹性模量按下式计算：

$$E = 4 \times 10^{-9} \times L^2 \rho f^2 \quad (9-29)$$

式中 E ——弹性模量，单位为 N/mm^2 ；

L ——试样的长度，单位为 mm；

ρ ——试样的密度，单位为 g/cm^3 ；

f ——固有振动频率，单位为 Hz。

9.3 黏弹性

黏弹性是物体的应变除与应力有关外尚与时间或应变速度有关的弹性行为。

完全满足胡克定律的物体称为理想弹性体，其特征为受力后瞬时出现应力与应变间的一一对应关系，应力与应变呈线性关系，如图 9-18 所示。

严格说来,实际金属材料都不是理想弹性体,都不同程度地呈现黏弹性行为,都会产生蠕变、松弛、弹性后效及内耗等现象。黏弹性现象对工业生产和人类生活均有重大影响,是金属物理领域重要的研究科目之一。黏弹性分为滞弹性和内耗等类型。

9.3.1 滞弹性

对于一个实际固体材料来说,即使是在弹性范围内振动,也并非是完全弹性的,而是存在着明显的非弹性现象。例如,对一个金属棒,骤然加上一个一定大小的拉应力 σ_0 ,由此试棒将立即产生一个应变 ε_0 ,如图9-19所示。

ε_0 称为瞬时应变,它只是试棒产生的总应变中的一部分,还有一部分应变 ε_1 ($\varepsilon_1 = \varepsilon_\infty - \varepsilon_0$)则是在受力以后的一定时间内逐渐地产生的, ε_1 称为补充应变,这种现象称为弹性蠕变。同样,当去除应力后应变也并不立即消失,而是先消失一部分,另一部分逐渐地消失,这种现象叫弹性后效,亦称为恒应力下的应变弛豫。显然,弹性蠕变和弹性后效都是弹性范围内的非弹性现象,即滞弹性,亦称弛豫。从上述的例子可以看出,一个实际金属在弹性范围内受应力的作用所产生的总应变 $\varepsilon_\infty = \varepsilon_0 + \varepsilon_1$,并且应变的变化落后于应力。同样的道理,若突然加载后保持应变不变,则应力就要从瞬时值 σ_0 松弛到一个平衡值 σ_∞ ,称为恒应变下的应力弛豫,如图9-20所示。

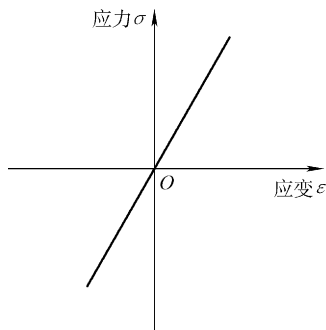


图 9-18 理想弹性体的应力与应变间的关系

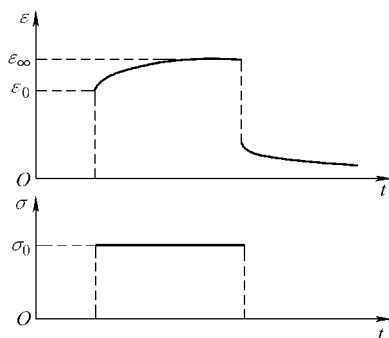


图 9-19 应变弛豫

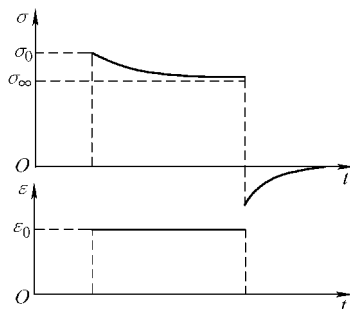


图 9-20 应力弛豫过程

9.3.2 内耗

内耗指机械振动体由于内在原因所发生的振动能量的损耗,也称内摩擦,以

Q^{-1} 表示, 内耗是物体振动时因其黏弹性而产生应变滞后于应力的结果, 以应变落后于应力的相位角 φ 或振动一周中能量的相对损耗 P 来量度, P 称为阻尼能力率, 三者之间的关系是:

$$Q^{-1} = \varphi = \frac{1}{2\pi}P$$

(9-30)

式中 Q^{-1} ——内耗;
 P ——阻尼能力率。

内耗的大小与物体内部结构及其变化特征密切相关。据其与振动频率的依赖关系, 内耗可分为两种, 一种与振动频率有关, 一种与振动频率无关, 亦称“静滞后”。

9.3.3 弛豫谱

一般将内耗与频率或温度关系的曲线称为弛豫谱, 在所研究的金属材料中, 内耗的来源都不是唯一的, 随着温度或频率的变化, 各种内耗源便会依次或同时出现, 表现为一个个内峰值, 从而构成了弛豫谱。各种内耗源的特征与机制如表 9-17 所示。

表 9-17 各种内耗源的特征与机制

内耗名称	温度与 频率范围	内耗 类型	依赖关系					内耗机制	借此种内 耗的帮助可 研究的物理 量
			与频率	与振幅	与激活能	与加工 硬化	与杂质		
位错弛豫	$T < 100\text{K}$ $10^3 \sim 10^6\text{Hz}$	弛豫 (滞弹性)	呈峰	无	$U(\tau) = 0.05 \sim 0.1\text{eV}$ (Cu)	形变百分之几后, 曲线通过最大值	弱	位错通过佩尔斯 (Peierls) 位垒的弛豫运动	佩尔斯位垒高度
位错 阻 尼	高温位错阻 $T > 300^\circ\text{C}$ $1 \sim 10^3\text{Hz}$	弛豫 (粘性)	$\approx \frac{1}{\omega}$	不确定 弱	$U = 0.8 \sim 2\text{eV}$	强烈, 亦引起激活能变化	未定	在内应力场中的位错弛豫	—
位错共振	$T \geq 0^\circ\text{C}$ $1 \sim 1000\text{MHz}$	共振 阻尼	$\approx \omega$	无	$U = 0.2 \sim 1\text{eV}$ (Ge)	很强烈	因杂质而下降	在平衡位置附近的位错共振	杂质原子与位错的结合能

(续)

内耗名称		温度与 频率范围	内耗 类型	依赖关系					内耗机制	借此种内 耗的帮助可 研究的物理 量
				与频率	与振幅	与激活能	与加工 硬化	与杂质		
位错阻尼	位错滞后	$T \geq 0^{\circ}\text{C}$ $10^3 \sim 10^6 \text{ Hz}$	静滞后	无	呈抛物型	$U = 0.1 \sim 0.4 \text{ eV}$ (Cu)	很强烈	因杂质而下降	位错因杂质原子而崩溃	杂质原子与位错结合能
	在加工硬化材料中的过渡内耗	$T \leq 200^{\circ}\text{C}$ $1 \sim 10^6 \text{ Hz}$	粘性	无	未定	$U = 0.5 \sim 1 \text{ eV}$ (退火 Fe)	强烈	未定	位错再分布	点缺陷的扩散
	变形滞后	$T \leq 100^{\circ}\text{C}$ 几赫兹	静滞后或粘性	未定	呈抛物型	$U = 0.1 \text{ eV}$, 退火后 $\approx 0.5 \text{ eV}$, 有第三种过程参与 (Fe)	强烈	因杂质而下降	位错滞后运动	点缺陷与位错的交互作用
不仅由位错造成的阻尼	滞弹性后效与显微蠕变	$T > 250^{\circ}\text{C}$ 或几赫兹或静态	粘性	随 ω 而减小	未定	$U = 1.5 \sim 2 \text{ eV}$ (Sn)	很弱	杂质将影响 U	位错对杂质原子或空位的吸引	杂质原子与位错或扩散的空位的交互作用
	热激活滞后	$T > 250^{\circ}\text{C}$, 所有频率	静滞后或粘性	无	未定	$U = 0.15 \sim 3.5 \text{ eV}$ (Cu)	无	未定	未定	未定
	晶界弛豫	$T > 250^{\circ}\text{C}$ 几个 Hz	滞弹性	很宽的峰	无	$U(\tau) = 1 \sim 2 \text{ eV}$ (Cu)	无	杂质影响	晶界滑移, 扩散	沿晶界的扩散
	由点缺陷造成的内耗	$T < \text{室温}$ $1 \sim 10^3 \text{ Hz}$	滞弹性	几个峰	无	$U(\tau) = 0.3 \sim 0.5 \text{ eV}$ (Cu)	仅在加工硬化之后	未定	在应力场中复合点位错的迁移	点缺陷扩散

(续)

内耗名称	温度与 频率范围	内耗 类型	依赖关系					内耗机制	借此种内 耗的帮助可 研究的物理 量
			与频率	与振幅	与激活能	与加工 硬化	与杂质		
在体心立方 间隙型合金中的 斯诺克 (Snock) 阻尼	室温, 几赫兹	滞弹性	呈峰	无	$U(\tau) = 1\text{eV}$ (Fe-C)	无	与 浓 度 正 比	在应力 场中的扩 散	扩散系数、 溶解度、脱溶
在面心立方 间隙型合金中的 斯诺克阻尼	<200℃ 几赫兹	滞弹性	呈峰	无	$U(\tau) = 1.5\text{eV}$ (Ni-C)	未定	呈 抛 物 型	在应力 场中的扩 散	缺陷和杂 质的相互作 用
应力场中替 代式固溶体合 金的有序化	~200℃ 几赫兹	滞弹 性型	很宽 的峰	无	$U(\tau) = 1\text{eV}$ (Ag-Zn)	弱	无	应力场 中的扩散	扩散, 柯肯 德尔 (Kirke- ndall) 效应
柯斯特 (Kö- ster) 阻尼	~200℃ 几赫兹	滞弹 性型	呈峰	无	$U(\tau) \sim 1.5\text{eV}$ (Fe)	强烈, $a\epsilon^{1/2}$	饱和	应力场 中的扩散	杂质原子 与位错和点 缺陷的交互 作用
由相变造成 的阻尼	相应温 度下, $1 \sim 10^3\text{Hz}$	通常 呈滞 弹性 型	宽的峰	弱	在很窄的 温度范围内 存在	强烈	各 种 各 样	在应力 场或弛豫 应力场中 的有序化	相变动力 学
热弹性阻尼	所有温度 $1 \sim 100\text{Hz}$	滞弹 性型	宽的峰	无	变化缓慢 (随温度)	弱	弱	热弹性 热流	—
磁弹性弛豫	居里温 度以下	滞弹性	呈峰 (宏观)	无	随温度变化	弱 (宏观)	适度	傅科电流	磁畴结构
	几千赫兹	粘性	$\approx \omega$ (微观)		缓慢	强烈 (微观)		磁致伸缩	磁化过程
铁磁滞后	居里温度以 下几赫兹	静滞后	无	最大	与温度关 系弱	弱	适度	不可逆 的畴界迁 移	畴结构, 磁 化过程

由溶质原子造成的阻尼

电热、磁或电的效应所造成的阻尼

(续)

内耗名称	温度与 频率范围	内耗 类型	依赖关系					内耗机制	借此种内 耗的帮助可 研究的物理 量
			与频率	与振幅	与激活能	与加工 硬化	与杂质		
电、热、磁或电的效应所造成的阻尼	电子的超声吸收	<10K >10MHz 粘性	$\approx \omega^2$	无	随温度下降而增加	未定	未定	费米面附近电子的再分布	费米面的形状
	磁声共振	<10K >10MHz 磁场下 共振	周期性的	未定	随温度下降而增加	未定	未定	轨道电子与超声波间的共振	

9.3.4 内耗的度量

1. 计算振幅对数减缩量法

可用下式表示内耗：

$$Q^{-1} = \frac{1}{\pi} \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad (9-31)$$

式中 A_n ——第 n 次振动的振幅，单位为 mm；

A_{n+1} ——第 $n+1$ 次振动的振幅，单位为 mm。

2. 建立共振曲线求内耗值

可用下式表示内耗：

$$Q^{-1} = (f_2 - f_1) / f_r \quad (9-32)$$

式中 f_r ——强迫共振体的共振频率，单位为 Hz；

f_1 、 f_2 ——共振峰两侧半功率点处的频率，单位为 Hz，如图 9-21 所示。

3. 超声脉冲传输法

可用下式表示内耗：

$$Q^{-1} = \frac{1}{\pi f t} \ln \frac{A_{t_0}}{A_{t_0+t}} \quad (9-33)$$

式中 f ——超声脉冲波的频率，单位为 Hz；

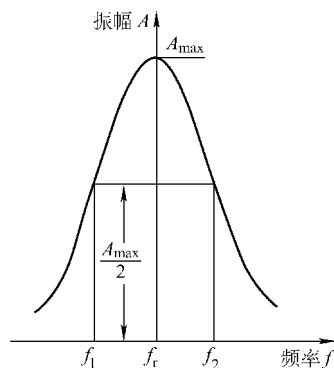


图 9-21 共振峰曲线

t ——时间, 单位为 s;

A_{t_0} —— t_0 时刻的振幅, 单位为 mm;

A_{t_0+t} —— $t_0 + t$ 时刻的振幅, 单位为 mm。

9.3.5 内耗的测量方法

常用的测量方法是自由振动衰减法。典型的测量仪器是葛摆仪, 如图 9-22 所示。

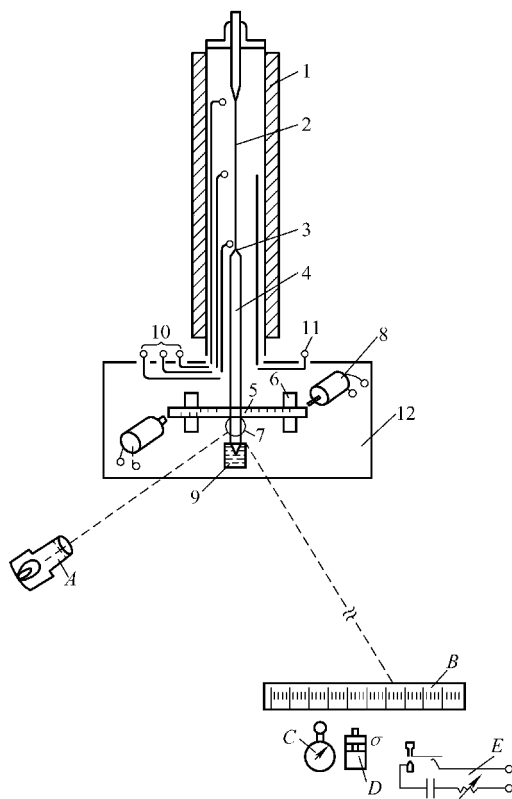


图 9-22 葛摆仪装置

A—平行光管 B—标尺 C—停表 D—手控计数器 E—电磁铁控制电路

1—无磁场管式炉 2—样品 3—夹头 4—不锈钢连杆 5—平衡杆

6—平衡锤 7—反射镜 8—电磁铁 9—阻尼油 10—接热电偶 11—接电源 12—基板

利用葛摆仪进行测量时, 由于振动能量在材料内部的消耗而使振幅减小, 从而可得到一条振幅随时间的衰减曲线, 如图 9-23 所示。

利用公式 (9-31) 即可计算出内耗值。

这种仪器结构的缺点是摆动部分有一定的质量，它使试样除受扭转应力外，还承受一定的轴向拉力。在低温测量时金属的强度较高，拉应力的影响不大，但对于高温测量拉应力的影响则不可忽视。为了减小轴向拉应力，现在多采用倒置扭摆结构，如图 9-24 所示。

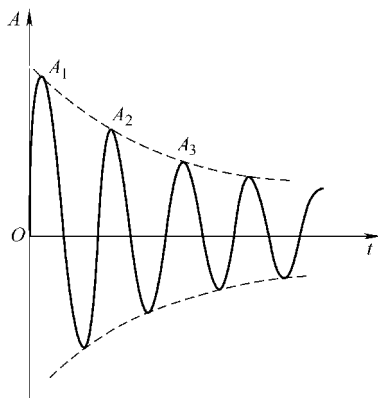


图 9-23 自由振动衰减曲线

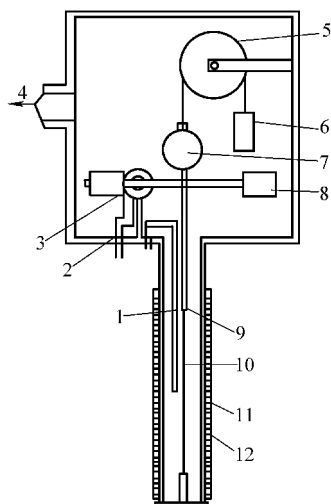


图 9-24 倒置扭摆仪

- 1—测量热电偶 2—导线抽头
3—电磁铁 4—真空系统
5—动滑轮 6—对重 7—反射镜
8—摆锤 9—夹头 10—试样
11—加热炉 12—炉壳

这种结构与正扭摆的不同之处是把摆动部分装在试样的上端，用对重把摆动部分的质量平衡掉。一般摆锤的质量可稍大一些，以保证摆动的平稳性。采用这种结构可以把轴向应力减小到 $7 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 。

内耗是一种组织敏感的性能，因此其测量对试样的制备过程要求很严格。对试样不能加工成细丝状的情况，可用线切割的方法制成 $1.5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 方形断面、长为 $150 \sim 200 \text{ mm}$ 的试样，用这种尺寸较大的试样在倒置扭摆仪上测量也能获得很好的结果。

9.4 常用金属材料的弹性技术常数

1) 常用钢铁材料的弹性模量与泊松比如表 9-18 所示。

表 9-18 常用钢铁材料的弹性模量与泊松比

名 称	弹性模量 E/GPa	切变模量 G/GPa	泊松比 μ
镍铬钢、合金钢	206	79.38	0.25 ~ 0.30
碳钢	196 ~ 206	79	0.24 ~ 0.28
铸钢	172 ~ 202	—	0.3
球墨铸铁	140 ~ 154	73 ~ 76	—
灰铸铁、白口铸铁	113 ~ 157	44	0.23 ~ 0.27
可锻铸铁	152	—	—

2) 常用有色金属材料的弹性模量与泊松比如表 9-19 所示。

表 9-19 常用有色金属材料的弹性模量与泊松比

名 称	弹性模量 E/GPa	切变模量 G/GPa	泊松比 μ
冷拔纯铜	127	48	—
轧制磷青铜	113	41	0.32 ~ 0.35
轧制纯铜	108	39	0.31 ~ 0.34
轧制锰青铜	108	39	0.35
铸铝青铜	103	41	—
冷拔青铜	89 ~ 97	34 ~ 36	0.32 ~ 0.42
轧制锌	82	31	0.27
硬铝合金	70	26	—
轧制铝	68	25 ~ 26	0.32 ~ 0.36
铅	17	7	0.42
拔制铝线	69	—	—

第 10 章 金属材料的声学性能特征参数

10.1 声学性能概述

10.1.1 声学性能参数

(1) 声速 c 声速是指声波在媒质中传播的速度。

(2) 声强 I 声场中某点处与质点速度方向垂直的单位面积上在单位时间内通过的声能称为瞬时声强，可由下式测得：

$$I(t) = p(t) \cdot u(t) \quad (10-1)$$

式中 $I(t)$ ——瞬时声强，单位为 W/m^2 ；

$p(t)$ ——瞬时声压，单位为 Pa ；

$u(t)$ ——瞬时质点速度，单位为 m/s 。

(3) 声功率 W 单位时间内通过某一面积的声能称为声功率。

1) 声波为纵波时，声功率用下式表示：

$$W = (1/T) \int_S dS \int_0^T p u_n dt \quad (10-2)$$

式中 W ——声功率，单位为 W ；

p ——瞬时声压，单位为 Pa ；

u_n ——瞬时质点速度在面积 S 法线方向 n 的分量，单位为 m/s ；

S ——面积，单位为 m^2 ；

t ——时间，单位为 s ；

T ——周期的整数倍，单位为 s 。

2) 在自由平面波或球面波上，通过面积 S 的平均声功率为：

$$W = p^2 \cdot S \cdot \cos\theta / \rho \cdot c \quad (10-3)$$

式中 W ——声功率，单位为 W ；

p^2 ——有效声压平方的时间平均，单位为 Pa^2 ；

S ——面积，单位为 m^2 ；

ρ ——媒质密度，单位为 kg/m^3 ；

c ——声速，单位为 m/s ；

θ ——面积 S 的法线与波法线所成的角度，单位为 $(^\circ)$ 。

(4) 声阻抗 Z 给定材料中某一点的声压与质点速度的比值称为声阻抗, 通常表达为声速与密度的乘积。

(5) 声反射因数 R 从一个分界面处反射回来的反射声能通量与入射声能通量的比值即为声反射因数。

(6) 声衰系数 α 声衰减系数指声波传播的单位距离上振幅的对数衰减率。

(7) 声波传输系数 T 在声媒质的一个界面上, 透射声能与入射声能的比值称为声波传输系数。

10.1.2 固体中声波的波形

固体中的声波实质上是作为弹性介质的固体中弹性应变的传播, 固体介质中的纵波、横波、细杆中的拉伸波及薄板中弯曲波所对应的质点位移和弹性形变特征如图 10-1 所示。

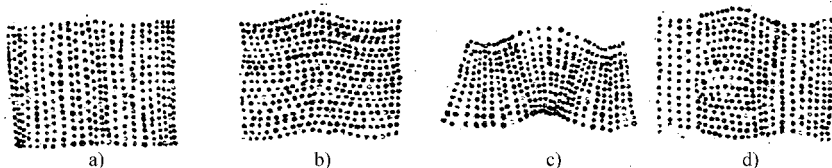


图 10-1 固体中声波的波形

a) 纵波 b) 横波 c) 弯曲波 d) 拉伸波

10.1.3 声速与材料弹性常数的关系

1) 动态弹性模量与声速的关系可按下式计算:

$$E_d = [\rho c_t^2 (3c_l^2 - 4c_t^2)] / (c_l^2 - c_t^2) \quad (10-4)$$

式中 E_d ——动态弹性模量, 单位为 Pa;

ρ ——物质的密度, 单位为 kg/m^3 ;

c_t ——物质横声波速度, 单位为 m/s;

c_l ——物质纵声波速度, 单位为 m/s。

2) 动态切变模量与声速的关系可按下式计算:

$$G_d = \rho c_t^2 \quad (10-5)$$

式中 G_d ——动态切变模量, 单位为 Pa;

ρ ——物质的密度, 单位为 kg/m^3 ;

c_t ——物质横声波速度, 单位为 m/s。

3) 动态体积模量与声速的关系可按下式计算:

$$K_d = \rho [c_l^2 - (4/3)c_t^2] \quad (10-6)$$

式中 K_d ——动态体积模量, 单位为 Pa;
 ρ ——物质的密度, 单位为 kg/m^3 ;
 c_t ——物质横声波速度, 单位为 m/s ;
 c_l ——物质纵声波速度, 单位为 m/s 。

4) 动态泊松比与声速的关系可按下式计算:

$$\mu_d = \frac{1 - 2(c_t/c_l)^2}{2[1 - (c_s/c_l)^2]} \quad (10-7)$$

式中 μ_d ——动态泊松比;
 c_t ——物质横声波速度, 单位为 m/s ;
 c_s ——物质扭转声波速度, 单位为 m/s ;
 c_l ——物质纵声波速度, 单位为 m/s 。

10.2 声速的测量方法

10.2.1 脉冲反射法

1) 通过比较波在被测试样与在已知声速的标准试块中的传播时间来测量波速。

2) 在每个试样上各选择两个平行表面, 测量其厚度, 厚度测量精度要高于 $\pm 0.02\text{mm}$ 或 0.1% 。

3) 在每个试样上用探头测得一个信号模式, 如图 10-2 所示, 在可清晰分辨的条件下, 尽可能使反射回波数多。两次测量的时基线 (扫描线控制) 必须设置相同。

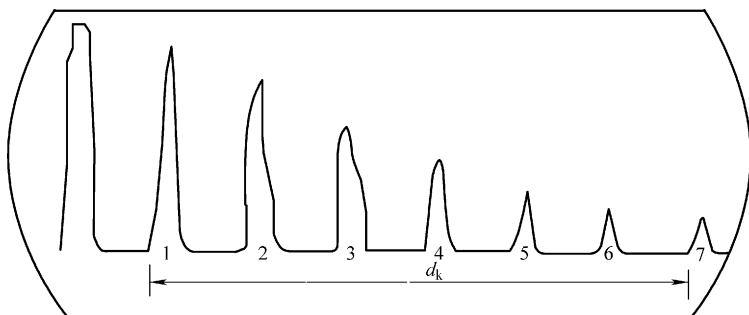


图 10-2 始波脉冲和 7 个反射回波

d_k —6 次完整路径

4) 用刻度尺或卡尺分别测量标准试块和被测试样上第一个反射回波前沿和最后一个可清晰识别的反射回波前沿之间的时基线距离。为了获得更高的精度,可在第一个反射回波的前沿位置固定之后,调节放大器使最后一个反射回波与第一个反射回波的高度一致。这样能测量到更精确的时间或距离。随后再确定最后一个反射回波前沿的位置。在任意两个反射回波之间,信号传播声程为二倍的试样厚度。信号传播通过试样并返回到入射点称为一次完整路径。在图 10-2 中回波 1 和回波 7 之间信号通过了 6 次完整路径。

5) 计算在两个试样上从第一个反射回波到最后一个反射回波之间通过的完整路径次数。这个数字比反射回波的数目少 1。注意每次测量到的试样厚度、完整路径次数和从第一个到最后一个回波之间的距离不必相同。

6) 按下式计算被测试样的波速值:

$$c_1 = (A_k n_1 t_1 c_k) / (A_1 n_k t_k) \quad (10-8)$$

式中 c_1 ——波速,单位为 m/s;

A_k ——沿 A 扫描显示的时基线测量到标准试块从第一个到第 N 个反射回波之间的距离,单位为 m;

n_1 ——被测试样中完整路径的次数,单位为次;

t_1 ——被测试样的厚度,单位为 m;

c_k ——标准试块中的声速,单位为 m/s;

A_1 ——沿 A 扫描显示的时基线测量到被测试样从第一个到第 N 个反射回波之间的距离,单位为 m;

n_k ——标准试块中完整路径的次数,单位为次;

t_k ——标准试块的厚度,单位为 m。

10.2.2 超声干涉法

超声干涉法是通过比较脉冲在被测试样和在标准试块中传播路径的传播时间计算声速的。通过此方法能以大约 0.1% 的精度确定声速。

1. 试验原理

将试样中的反射回波与路径和波速已知的干涉仪的回波相重叠,从而依据干涉仪测出超声波在试样中的传输时间,进而求出波速。

2. 试验方法

用夹子将一个常规探头(探头频率应满足试样的要求,衰减部分必须插入到干涉计探头和电缆之间)夹在一个开放式水槽中的一侧。它可不受其他测试条件的影响而改变干涉计的回波高度。一个反射器浸入到盛装液体的水槽中,并安装在一个可调节的装置上以使之不致倾斜。调节轴转动 360° 可使运动路径改变 1mm,轴杆上的一格细分刻度代表 0.01mm。

水槽中必须充满超声速度已知的液体。如在 20℃ 下，水的超声速度为 1483.1m/s，温度系数是 2.5m/(s·℃)。

按下式计算被测试样的声速：

$$c_s = \frac{c_w \times h_s}{l_w} \tag{10-9}$$

式中 c_s ——被测试样的声速，单位为 m/s；

c_w ——水的声速，单位为 m/s；

h_s ——被测试样的厚度，单位为 mm；

l_w ——探头到反射器的距离，单位为 mm。

此方法适合在室温附近对声速进行精确测量，蒸馏水的标准声速如表 10-1 所示。

表 10-1 蒸馏水的标准声速

温度/℃	声速/(m/s)	温度/℃	声速/(m/s)	温度/℃	声速/(m/s)
15.0	1470.6	18.4	1479.1	21.8	1487.6
15.2	1471.1	18.6	1479.6	22.0	1488.1
15.4	1471.6	18.8	1480.1	22.2	1488.6
15.6	1472.1	19.0	1480.6	22.4	1489.1
15.8	1472.6	19.2	1481.1	22.6	1489.6
16.0	1473.1	19.4	1481.6	22.8	1490.1
16.2	1473.6	19.6	1482.1	23.0	1490.6
16.4	1474.1	19.8	1482.6	23.2	1491.1
16.6	1474.6	20.0	1483.1	23.4	1491.6
16.8	1475.1	20.2	1483.6	23.6	1492.1
17.0	1475.6	20.4	1484.1	23.8	1492.6
17.2	1476.1	20.6	1484.6	24.0	1493.1
17.4	1476.6	20.8	1485.1	24.2	1493.6
17.6	1477.1	21.0	1485.6	24.4	1494.1
17.8	1477.6	21.2	1486.1	24.6	1494.6
18.0	1478.1	21.4	1486.6	24.8	1495.1
18.2	1478.6	21.6	1487.1	25.0	1495.6

10.2.3 谐波法

当只有几个回波能被利用时，用超声回波仪器测量壁厚将变得不准确，这是由于存在高吸收、腐蚀或不适宜的放射性几何结构造成的。在这些情况下，可以将壁厚测量仪调到回波频率的谐波上来提高测量结果的精度，即用谐波法进行测量。

此方法利用了从探头发射的经一长缓冲器杆后进入有几个波长厚的试样的发射

频率脉冲。缓冲器杆要足够长以便容纳整个脉冲，而脉冲也要足够长来占据试样中的三个循环行程。脉冲在试样里反射时会产生自干涉。当试样中的循环行程等于半波长的奇数倍时会产生一个特征回波模式，偶数倍时则产生另一个模式。当发射频率变化时这两种模式会交替转变。相位与以 MHz 为单位的周期频率相对应。一种特征模式重复一次时，相位变化一个周期，两种模式之间是 $1/2$ 相位周期。对应于频率的相位倒数是延迟时间，被测试样的声速可按下式计算：

$$c = \frac{2L}{t} \quad (10-10)$$

式中 c ——被测试样的声速，单位为 m/s；

L ——被测试样的厚度，单位为 mm；

t ——延迟时间，单位为 μs 。

10.2.4 相位比较法

试验装置如图 10-3 所示，用钛酸钡或锆钛酸铅等制成的压电陶瓷片（亦称为压电换能器）粘接在阶梯形的变幅杆 S_1 上，并与晶体管激发电路相连组成发射器（其频率为 $20 \sim 100\text{kHz}$ ），因变幅杆 S_1 的直径较大，当其振动时在空气中激发出超声波，在离变幅杆端面 S_1 稍远处的声波可看成是平面波。接收器也是由钛酸钡或锆钛酸铅制成的圆片 S_2 并与晶体管选频放大器、直流电源等相连接所组成。激发电路的信号输出端与双踪示波器的 Y_1 输入端相连接，接收器的信号输出端与示波器的 Y_2 输入端相连接。当 S_2 在支架上移动时，我们可以在示波器的荧光屏上看到两条曲线，一条对应于激发电路输入到 Y_1 的信号，而另一条对应于接收器接收到并经 Y_2 输入的信号。

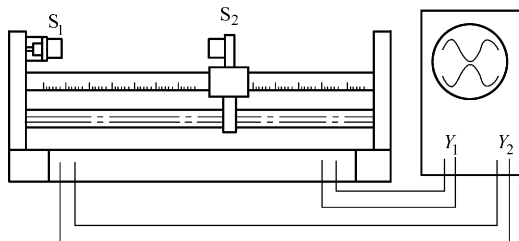


图 10-3 试验装置图

S_1 —变幅杆 S_2 —圆片 Y_1 、 Y_2 —示波器输入端

声波是振动状态在弹性媒质中的传播（或说成相位的传播），所以沿波的传播方向上各质点的振动相位是不同的。沿波的传播方向上任意两点的振动状态相同（或说成相位差时 $\Delta\varphi = 2n\pi$ ）时，这两点的距离 $L = n\lambda$ 。

当 S_2 在某一位置， S_1 与 S_2 间的距离等于波长的整数倍时，此时屏幕上看到的图形如图 10-4a 所示。这说明 S_2 接收的信号与激发电路（即声源）输出的信号同相。需要指出的是，用示波器测定相位时，接收器端面 S_2 处的声波，因换能器振动的传递和放大电路的相移，实际上与声源并不同相，而是有一个相位偏移，但对波长的测定并无影响。此时 S_2 的位置可在标尺中读出，记为 x_1 。 S_2 再远离 S_1 移动图形保持不

变，当 S_2 远离 S_1 的距离为 $\lambda/4$ 时，相位差也基本没有改变，说明 S_2 接收到的信号保持与图 10-4a 所示的相似相位。当 S_2 由图 10-4a 位置移动的距离将近 $\lambda/2$ 时 S_2 接收到的信号产生迅速改变。移动距离 = $\lambda/2$ 时的图形如图 10-4b 所示，与图 10-4a 反相，将此时 S_2 的位置记为 x_2 。 S_2 继续远离 S_1 图形不变，其间 S_2 远离 S_1 为 $3\lambda/2$ 时，其相位差没有改变，仍保持与图 10-4a 反相，直到远离 S_1 接近 λ 时，图形迅速改变成与图 10-4a 同相的图形，如图 10-4c 所示，将此时 S_2 的位置记为 x_3 。这样，依次记录反相、正相的位置并填写入表 10-2 中，计算出声波长。

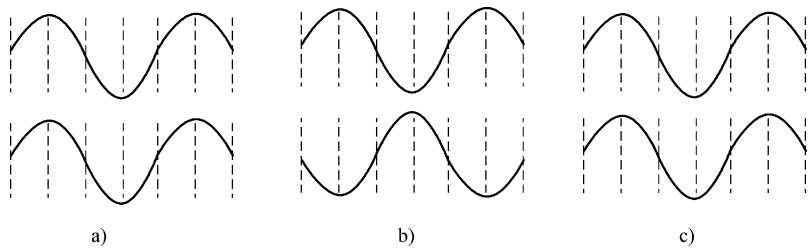


图 10-4 相位变化示意图

a)、c) 同相 b) 反相

表 10-2 比较相位法试验数据

(单位: mm)

反 相	同 相	反 相	同 相
15.262	20.018	24.075	28.394
32.355	36.428	40.485	44.235

试验中，产生相位急剧变化的范围约为 $\lambda/16 \sim \lambda/8$ ，由此证实了驻波的特点。在驻波的相邻两个波节间的所有质点具有相同的相位，而在一个波节两侧的两个点，具有相反的相位。

利用逐差法可以算出待测波的波长为 8.219mm，频率为 43.1kHz，从而得待测声速为 354.2m/s，与当天气温 18℃ 的理论值（342.2m/s）相比误差为 3%。

10.2.5 脉冲重叠法

脉冲重叠法的主要优点是可以评价出探头的耦合影响，从而使绝对速度不受耦合误差的影响，测量精度非常高。该方法可测量线性尺度小至 2mm 的小试样，并适用于在压力和温度变化的场合下进行测量。

1. 试验原理

通过调整射入试样的射频脉冲的时间间隔，使其与被测声波在试样中一次往返的时间相等，当得到由入射脉冲与反射脉冲重叠所致幅度的最大值时，根据已知的

时间间隔确定声波的传输时间,从而由距离与时间的比值完成声速的测量。

2. 试验方法

在换能器共振频率的 0.9 ~ 1.0 倍之间仔细调节射频脉冲的频率,在所得到的与最大脉冲振幅相应的系列间隔中,在相邻值差最小的那一组里选取较小者作为测量值,按下式计算声速:

$$c = \frac{2l}{t + r / (2\pi f)} \quad (10-11)$$

式中 c ——声速,单位为 m/s;

l ——声波传播方向上的试样长度,单位为 m;

r ——与换能器端部反射有关的相角,单位为 rad;

f ——射频波的频率,单位为 Hz。

为了观察刚好在最后一个应用脉冲后叠加的回波,需要周期性地忽略几个应用脉冲。当回波开始按信号之间的时间间隔进行相位调节时,脉冲出现最大振幅。理想条件下,这种方法的精度在 10^{-5} 之内,而相位比较法则在 10^{-4} 之内。按这种方法,可以向试样发送强信号,所以当衰减非常高时也能进行声速的测量。该方法的局限性除材料的多孔性外,还依赖于其他因素,如晶粒大小和晶粒边界状况等。

10.2.6 声共振法

该方法是以共振测量法检测固体弯曲的、横断的和扭转的共振频率,根据这些数值按表 10-3 中公式计算出声速。

表 10-3 各向同性物体中声速与弹性性能的关系

物体形状	波形	公 式	公式注释
尺寸 $\gg \lambda$	纵波	$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}$	c_l —物质纵声波速度 (m/s) E —动态弹性模量 (Pa) ρ —物质的密度 (kg/m^3) μ —泊松比
尺寸 $\gg \lambda$	横波	$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$	c_t —物质横声波速度 (m/s) G —动态切变模量 (Pa)
杆或管	扭转波	$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$	c_s —物质扭转声波速度 (m/s)
横向尺寸 $\ll \lambda$ 的细杆	拉伸波	$c_E = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$	c_E —物质拉伸声波速度 (m/s)
$H \ll \lambda$ 宽薄板	弯曲波	$c_{Bl} = \frac{\pi h}{\lambda \sqrt{3}} \sqrt{\frac{E}{(1-\mu^2)\rho}}$	c_{Bl} —物质弯曲声波速度 (m/s) h —板厚 (mm) λ —波长 (m)
尺寸 $\gg \lambda$	表面波	$c_{SR} = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{G}{\rho}}$	c_{SR} —物质表面声波速度 (m/s)

动态声共振法，是一种获得固体声速和弹性常量的标准方法。该方法的优点是在不丧失高精度的前提下使测量便捷简单，也可在高达 3000℃ 的温度下进行测量。缺点仅仅在于对被测试样的尺寸有限制。当长度小于 76mm 时，高弹性模量材料的扭转基本共振频率会超过 40kHz，这就要求采用特殊的仪器和试验技术才能获得精确的结果。而且所有三维（长度、宽度、厚度）在共振频率下的弹性模量在计算中都要严格引用。从实用的角度看，要制作具有一致横截面尺寸的小试样相当困难。另一个要考虑的问题是在方程式中与共振频率下弹性模量相关的形状修正因子。对于矩形试样，长度对横截面任一维度的比率应不小于 3:1。当要求精度值在 0.1% 以内时，这个比率应不小于 6:1。

10.2.7 不依赖于厚度的超声速度计测量方法

大多数超声速度计的测量方法都基于下列形式的方程式：

$$c = x/t \tag{10-12}$$

式中 c ——声速，单位为 m/s；
 x ——超声行程长度，透射传播时 x 为厚度，脉冲回波时 x 为两倍厚度，单位为 m；
 t ——传播时间，单位为 s。

1. 临界角反射率法

这种方法基于 Snell 法则。它涉及对几个临界角中一个临界角的测量，波型依赖于临界角。待测量的声速表示为 c_2 ，Snell 法则以在声速 c_1 已知的邻界介质（通常为水）中初始入射角 θ_{1c} 的形式给出 c_2 ，计算公式如下：

$$c_2 = c_1 / \sin \theta_{1c}$$

测量装置如图 10-5 所示，用钛酸钡晶体做换能器，入射脉冲的重复频率为 2.5MHz；两个换能器的转动同步进行，与示波器最大振幅对应的入射角即为全反射临界角 θ_{1c} 。

2. 二次测量法

采用通用数字式超声波无损检测仪，选取一对规格、前沿、折射角等参数相同的斜探头在标准试块上测量延时后，将两个探头延时平均值输入数字式超声波无损

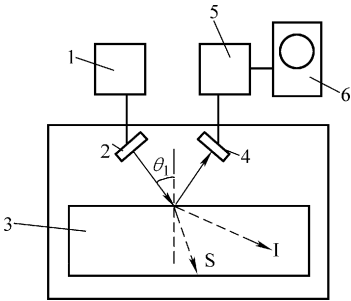


图 10-5 浸入式波速检测装置
1—脉冲发生器 2—发射换能器
3—试样 4—接收换能器
5—放大器 6—示波器
I—非全反射时折射的纵波
S—切变波 θ_1 —入射角

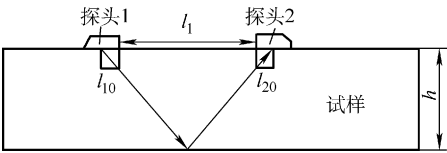


图 10-6 双探头二次测量法

检测仪，双探头以一发一收的方式相对置于试样表面，如图 10-6 所示。

得到底面一次反射回波后读取超声波在试样中传播的准确时间 t ，试样中的超声横波速度计算如下：

$$c = \frac{\sqrt{\left(\frac{l_1 + l_{10} + l_{20}}{2}\right)^2 + h^2}}{t_1} \quad (10-13)$$

式中 c ——试样中的横波声速，单位为 mm/s；

l_1 ——探头间的距离，单位为 mm；

l_{10} ——探头 1 的前沿长度，单位为 mm；

l_{20} ——探头 2 的前沿长度，单位为 mm；

t_1 ——超声横波在试样中传播的时间，单位为 s；

h ——试样厚度，单位为 mm。

再选取一对规格、前沿、折射角等参数相同（与上一对探头折射角相差较大）的斜探头重复上述测量，得到底面一次反射回波后读取超声波在试样中传播的准确时间，则试样中的超声横波速度计算如下：

$$c = \frac{\sqrt{\left(\frac{l_2 + l_{30} + l_{40}}{2}\right)^2 + h^2}}{t_2} \quad (10-14)$$

式中 c ——试样中的横波声速，单位为 mm/s；

l_2 ——探头间的距离，单位为 mm；

l_{30} ——探头 3 的前沿长度，单位为 mm；

l_{40} ——探头 4 的前沿长度，单位为 mm；

t_2 ——超声横波在试样中传播的时间，单位为 s；

h ——试样厚度，单位为 mm。

取两次测量的平均值即可得出 c 。

采用该方法可以较为准确地测量材料横波声速，但二次测量时需要两对折射角有较大差异的探头，推荐分别采用折射角为 45° 、 63° 的探头。采用更大角度探头时，会产生试样底面回波游动范围较大而难以准确读取底面最高回波位置的现象，需多次测量后取回波位置平均值。测量时每对探头需具有相同折射角，并使声速保持在同一轴线上，否则会导致测得的横波声速值偏小。

10.2.8 脉冲回波双晶探头法

脉冲回波双晶探头法的试验仪器应使用有标准化刻度的厚度测量仪，所用的单探头包含两部分：一部分作为发射器，另一部分作为接收器。大多数双晶探头厚度

测量仪都是利用第一个反射回波来进行读数的测量，因为第一个反射回波比后面任何一个反射回波都更具有深度或时间上的代表性。测试范围通常是固定的，不必产生几个反射回波来求取平均传播时间。

在一个已知声速的钢制阶梯标准试块上校准仪器和探头。通过调节扫描延迟和范围控制，确保两个或更多的厚度（高和低）读数出现在正确的距离上，如图 10-7 所示。

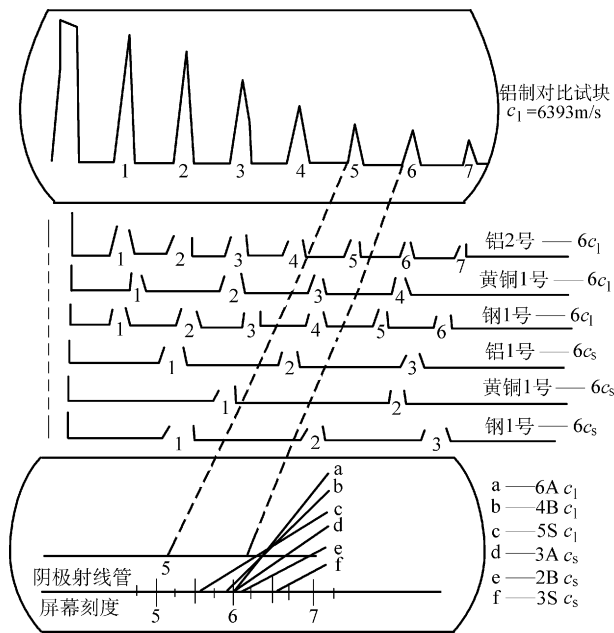


图 10-7 避免因视差引起误差所进行的仪器设置

不改变仪器的扫描和范围控制，测量被测试样的厚度。用卡尺或千分尺测量被检区域的实际厚度。按下式计算速度：

$$c(\text{测}) = c(\text{钢}) \times \frac{\text{实际厚度}}{\text{测量厚度}} \tag{10-15}$$

式中 $c(\text{测})$ ——待测声速，单位为 m/s ；
 $c(\text{钢})$ ——钢制标准试块中的声速，单位为 m/s 。

用双晶探头方法，脉冲回波的传播时间是试样厚度的非线性函数，当此方法应用于速度测量时可能引起误差。该误差可以用一个与被测试样声速和厚度相近的参考试块来消除。

10.2.9 测量材料声速的其他替代方法

1. 试验原理

速度是单位时间传播通过的距离，所以时间（作为水平位移显示在超声脉冲回波仪器的显示屏上）等于距离除以速度。用下式计算被测试样中的波速：

$$c_x = c_1 [nt / (NT + \text{读数})]$$

式中 c_x ——被测试样中的声速，单位为 m/s；

c_1 ——标准试块中的已知纵声波速度（直束纵波探头所用标准时间），单位为 m/s；

n ——被测试样发射回波的数目；

t ——被测试样的厚度，单位为 mm；

N ——在 n 个反射回波之前的标准反射回波数目；

T ——从第 N 个显示到第 n 个显示之间的以直接标准化距离单位表示的标准试块厚度，单位为 mm。

2. 试验方法

1) 用精度为 $\pm 0.0025\text{mm}$ 的千分尺或卡尺测量标准试块的厚度 T 和被测试样的厚度 t 。

2) 在有刻度的比例尺（如钢制直角比例尺）的小刻度（如 1mm 的分割线）上用铅笔芯摩擦一下。再用透明胶带从比例尺上把标准刻度提取出来。把复制的刻度带粘贴到仪器显示器屏幕的外罩上（使两个刻度重合起来，以消除因比例尺的刻度显示和眼睛未对准引起的读数误差）。

3) 把一直束探头连接到仪器上，探头的波模式决定了被测波速的种类（例如，一个 γ 切割的石英，它的主要运动是平行于接触表面的面移动，它将产生一个直束切变波）。用油或甘油将探头耦合到被测试样上。

4) 调节仪器控制使其产生最多数目的清晰反射回波。测量应在不少于两个反射回波上进行，但也不需多于 10 个反射回波。5 个反射回波就能为速度测量提供很高的精度。如果扫查被调节到如图 10-8 所示的屏幕上方，用油脂笔在第 n 个显示的左边把扫查线标记为黑色。

5) 读出始脉冲和油脂笔标记之间反射回波的数目 N 。将第 N 个反射回波延迟到使其左边在比例尺上第一个整数刻度标记的位置上。

6) 扫描控制将第 $N+1$ 个反射回波的左边调节到离第 N 个反射回波的距离等于标准试块厚度（ T ）的位置（延迟和扫描必须反复调节 2~3 次使第 N 个回波的位置在比例尺的第一个偶数刻度标记上且第 N 和 $N+1$ 个反射回波之间在比例尺上的间距等于 T ）。用油脂笔在屏幕上标记 N 和 $N+1$ 的振幅并用一条直线连接这两点。

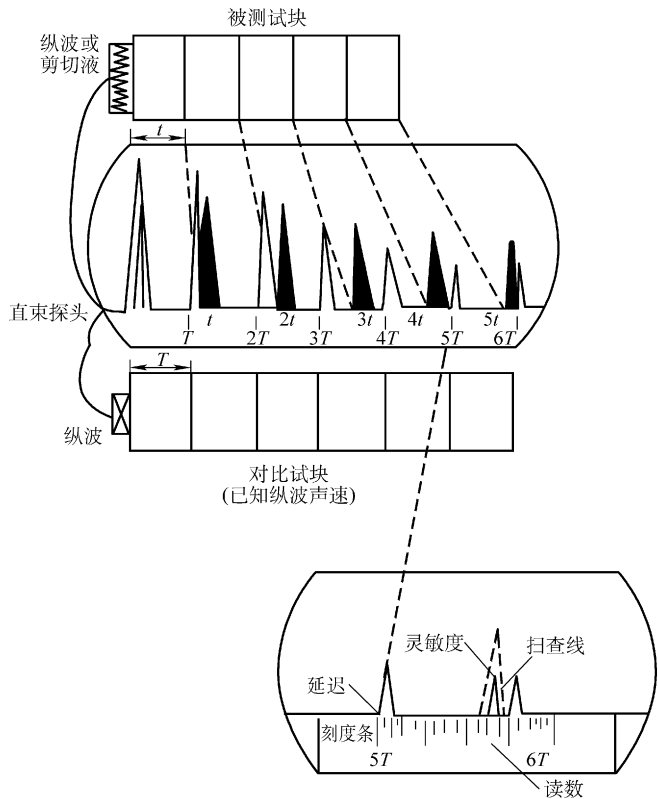


图 10-8 仪器读数设置

7) 将探头耦合到被测试样上。调节灵敏度将反射回波 n 的振幅设置到 N 和 $N + 1$ 振幅连线上。读出从第一个偶数刻度标记到位于 n 反射回波左边的扫描线点之间的距离。

10.3 球墨铸铁声速的测定

对于球墨铸铁件声速的测定，工程上主要采用脉冲反射法和穿透法，通过测量超声纵波在试样中的传播时间来确定声速。要求试样检测部位的厚度应能正确测定，检测表面平直，无影响测量结果的毛刺、氧化皮、粘砂及油漆等，探测部位两相对平面的平行度不大于 3° 。

10.3.1 所用仪器设备

根据具体情况，可采用超声声速测量仪、超声测厚仪以及由超声波无损检测仪

和测时装置连接使用的设备等, 但应满足下列要求:

- 1) 工作频率为 $1 \sim 5\text{MHz}$ 。
- 2) 测时的分辨力不低于 $0.01\mu\text{s}$, 或测厚的分辨力不低于 0.01mm 。
- 3) 仪器在室温工作的不稳定性低于 0.2% , 测量非线性不大于 0.2% 。

球墨铸铁声速的测量方法是基于被测试样的未知声速与钢制标准试块或水的已知声速相比较而得出的。因此, 每次测试前必须先用标准试块或水标定仪器, 在连续使用时应定时校核。标准试块采用压延或拉拔的中碳钢制造, 经热处理使其金属组织均匀, 晶粒度在 5 级以上, 表面粗糙度 Ra 应不大于 $2.5\mu\text{m}$, 长度取 50mm 或 100mm 。

用同步脉冲作为测时装置开门信号的仪器, 由于信号转换和传输在时间上的滞后将造成声时在仪器上示值与真实值之间的误差, 因而必须先行校零。

10.3.2 脉冲反射法

用单一探头兼起发射、接收超声波的作用, 用显示器显示超声波在材料中的往返传播时间。测出试样中相邻两个底面回波间的时间间隔, 在测得测量部位的厚度后, 按下式计算声速:

$$c_1 = \frac{2H}{t} \times 10^3 \quad (10-16)$$

式中 c_1 ——超声纵波速度, 单位为 m/s ;

H ——被测试样被测部位厚度, 单位为 mm ;

t ——相邻两底面回波间的时间间隔, 单位为 μs 。

用脉冲反射式超声测厚仪, 要根据仪器量程制备一套厚度成等差级数整数递增的标准试块。当测量试样时, 应先使用两块标准试块 (一块厚度小于被测试样测试部位的厚度、一块大于被测试样测试部位的厚度), 来校正仪器的线性。当仪器上厚度显示与两块标准试块的实际厚度均一致后, 再测得被测试样的显示厚度和实际厚度, 按下式计算声速:

$$c_1 = \frac{H}{H'} \times c_1'$$

式中 c_1 ——被测试样中的超声纵波速度, 单位为 m/s ;

c_1' ——标准试块的已知超声纵波速度, 单位为 m/s ;

H ——被测试样测量部位的实际厚度, 单位为 mm ;

H' ——仪器上显示的被测试样测量部位厚度, 单位为 mm 。

10.3.3 穿透法

分别将发射、接收超声波的两个探头置于被测试样测量部位两侧的平面上, 并

使两探头的轴线基本重合,测定超声波的穿透时间,实测两检测面之间的厚度后按下式计算声速:

$$c_1 = \frac{H}{t} \times 10^3 \quad (10-17)$$

式中 c_1 ——被测试样的超声纵波速度,单位为 m/s;
 H ——被测试样检测部位的厚度,单位为 mm;
 t ——声波穿透被测试样检测部位的时间,单位为 μs 。

10.3.4 声速测量在铸铁上的应用

铸铁是一种刚性材料,能传播超声波(纵波、横波、表面波),其中,纵波传播速度遵循在无限大固体介质中的表达式:

$$c_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}} \quad (10-18)$$

式中 c_1 ——超声纵波速度,单位为 m/s;
 E ——弹性模量,单位为 N/m^2 ;
 ρ ——材料密度,单位为 kg/m^3 ;
 σ ——泊松比(横向与纵向变形之比)。

可以根据球墨铸铁的声速进行弹性模量和泊松比的检测,还可以用声速法评价球墨铸铁的质量,如球化程度、力学性能等。

10.3.5 测量注意事项

- 1) 一般应用宽频带放大和窄脉冲探头的仪器,在不具备这种仪器时应尽可能用穿透法检测,但被测试样厚度小于 30mm 时,还得应用反射法检测。
- 2) 用穿透法检测时,应尽可能使接收的超声脉冲前沿饱和。
- 3) 脉冲反射法用于检测厚度小于 15 mm 的薄件时,可用多次反射法取在被测试样中超声波往返一次传播时间的算术平均值计算声速。
- 4) 由于声速值的误差取决于厚度和声时的测量误差,所以薄件应避免在毛坯面上检测。
- 5) 被测试样厚度测量应保证测厚相对误差小于 0.5%。
- 6) 在实体铸件上检测时,应选有代表性的部位定点检测。
- 7) 在没有示波管监视装置的仪器上用反射法检测时,如果发现显示值异常,要设法验证。
- 8) 检测时标准试块与被测试样的温度差不宜超过 30℃。

10.4 工程材料中的声速

工程材料中的声速如表 10-4 所示。

表 10-4 工程材料中的声速

材 料	密度/(kg/m ³)	纵波速度/(m/s)	横波速度/(m/s)
铝	2700	6300	3130
铍	1850	12400	8650
铋	9800	2180	1100
黄铜	8100	4370	2100
青铜	8860	3530	2230
镉	8600	2780	1500
铌	8580	4950	2180
铜	8900	4700	2260
金	19300	3240	1200
铪	11300	3860	2180
英康镍合金	8250	5720	3020
铁(电解)	7900	5960	3220
铁(铸)	7200	3500 ~ 5600	2200 ~ 3200
铅	11400	2160	700
铅铋合金	10900	2160	810
镁	1740	5740	3080
蒙乃尔铜镍合金	8830	6020	2720
镍	8800	5630	2960
塑胶(丙烯酸树脂)	1180	2670	1120
铂	21450	3960	1670
熔凝石英	2200	5930	3750
银	10500	3600	1590
银镍合金	8750	4620	2320
不锈钢(347)	7910	5790	3100
不锈钢(410)	7670	5900	3300

(续)

材 料	密度/(kg/m ³)	纵波速度/(m/s)	横波速度/(m/s)
钢	7700	5900	3230
锡	7300	3320	1670
钛	4540	6240	3215
钨	19100	5460	2620
铀	18700	3370	1930
锌	7100	4170	2410
铅	6490	4310	1960

第 11 章 物理性能分析方法的综合评述

11.1 各种物理性能分析方法的特点及应用范围

各种物理性能分析方法的特点及应用范围如表 11-1 所示。

表 11-1 各种物理性能分析方法的特点及应用范围

方法名称		物理参量	应用范围
电阻法		电阻率 ρ	用于研究合金的时效，测定固溶体的溶解度曲线，研究钢的回火及有序-无序转变 优点：灵敏度高，简单易行 缺点：影响因素多，作定量分析误差大，一般只用作定性分析
磁性法		饱和磁化强度 M_s	适于作定量相分析，如研究过冷奥氏体的分解、淬火钢的回火，以及测定残留奥氏体量等。测量精度与温度有关，较居里温度低得越多，测量精度越高
		居里温度 T_C	研究回火时碳化物的析出
		矫顽力 H_c	研究合金的时效，淬火钢的回火转变过程
		磁导率 μ	研究过冷奥氏体等温转变。与 H_c 类似，但 μ 除决定于材料性质外，还与磁场强度有关，从而增加了分析困难，实际应用中多采用 H_c
		磁化系数 χ	常用于弱磁性金属与合金的分析。例如，测奥氏体钢中马氏体的含量，研究 Al-Cu 合金的时效及饱和溶解度曲线等
热学性能分析方法	热焓与热容测量法	热焓 H ，温度 T	用于测定金属及合金加热和冷却过程中的相变和组织转变温度
	热容与热焓测量法	比定压热容 c_p	用于研究合金的时效、钢的回火及有序-无序转变等 缺点：试验条件较难保证，作定量分析误差大
	差热分析法 DTA	标准试样与试样温差 ΔT	适于测定固态相变的相变点，由于只测量温差，故可以采取高的放大倍数以提高灵敏度，且较比热容测量法简单，易行
	表示扫描量热法 DSC	试样与标准试样吸收的功率差 $\frac{dH}{dt}$	该法是 DTA 的改进，与差热分析法不同的是测量试样与标准试样吸收的功率差来代表试样的热焓变化，即 DSC 曲线下的面积就是转变的热效应，它直接测量热量，故是一种量热法

(续)

方法名称		物理参量	应用范围
热学性能分析方法	热重分析法 TGA	被测物质的质量、 时间、温度	在高聚物中，主要用于测定高聚物的物性、快速老化和分解反应动力学研究以及硫化胶中炭黑的定性分析等
	热膨胀法	膨胀量 Δl 或 $\Delta l/l$	适于测定相变点和相变动力学曲线。如研究钢加热及冷却过程中的转变点、奥氏体等温转变动力学及钢的回火转变等。方法简便，数据可靠。常与磁性法、金相法、穆斯堡尔谱分析或 X 射线衍射法等配合以测定钢的连续冷却转变图和等温冷却转变图
	热膨胀法	线胀系数 α_l	可用于测定相变点和相变动力学曲线，特别是用于二级相变的测定（一级相变则多用 $\Delta l/l$ 法，较少用 α_l 法）
	热电性法	热电势 $\frac{dE}{dT}$	用于研究合金的时效和淬火钢的回火过程，灵敏度高一般仅用作定性分析，定量分析用得少
弹性测量法		弹性模量 E 、 G	用于研究合金的高温强度

11.2 物理性能分析方法的选用原则

1. 适应性

- 1) 研究亚稳态过饱和固溶体的沉淀析出常用电阻法和热电性法。
- 2) 测量相变和组织转变的临界点，常用热分析方法。测量钢的组织转变点也可选用膨胀法。
- 3) 分析原子间结合力的变化常用弹性模量测量法。
- 4) 研究有序-无序转变规律常用电阻法和热分析方法。
- 5) 研究钢的回火常用电阻法、磁性法和膨胀法。
- 6) 研究钢在回火时的组织变化常用电阻法。
- 7) 研究过冷奥氏体等温转变动力学常用膨胀法、磁性法、电阻法和热分析法。

2. 可靠性

定量分析时一定要选用可靠性强的物理性能分析方法，排除受不确定因素影响大的分析方法。

3. 经济性

在满足要求的前提下，要选用最经济且简单易行的方法。

4. 可行性

要根据实际情况分析所选用试验方法的可行性，包括环境、仪器精度、设备配置、误差影响等因素。

第 12 章 常用钢铁材料的物理性能

12.1 铁合金的物理性能

12.1.1 粉末冶金用还原铁粉的物理性能（表 12-1）

表 12-1 粉末冶金用还原铁粉的物理性能（YB/T 5308—2006）

牌号	松装密度/ (g/cm ³)	流动性/ (s/50g) ≤	压缩性/ (g/cm ³) ≥	筛分析(%)				
				>250μm (+60目)	>180μm (+80目)	>150μm (+100目)	>75μm (+200目)	<45μm (-325目)
FHY 80·23	2.20~2.45	38	6.40	0	≤3	余量		5~25
FHY 80·25	2.45~2.70	35	6.45	0	≤3	余量		5~25
FHY 100·25	2.40~2.60	35	6.60	—	0	≤5	余量	5~30
FHY 100·27	2.60~2.80	30	6.70	—	0	≤5	余量	5~30
FHY 200	2.00~2.80	—	—	—	—	—	≤5	≥32

注：除 FHY200 牌号外，其余牌号铁粉小于 75μm（-200 目）的粉末应为 40%~60%。

12.1.2 电焊条用还原铁粉的松装密度、流动性、粒度组成的要求（表 12-2）

表 12-2 电焊条用还原铁粉的松装密度、流动性、粒度组成的要求（YB/T 5138—1993）

牌 号	级别	松装 密度/ (g/cm ³)	流动性/ (s/50g) ≤	粒 度 分 布 (%)				
				>425μm (+40目)	250~ 425μm (-40目 +60目)	180~ 250μm (-60目 +80目)	150~ 180μm (-80目 +100目)	106~ 150μm (-100目 +150目)
FHT 40·30	I	3.00 ±0.10	32	≤1	5~20	余量		
	II	3.00 ±0.10	32	≤1	5~20	余量		
FHT 40·37	—	3.70 ±0.10	30	≤1	5~30	余量		
FHT 100·25	—	2.50 ±0.10	36	—	—	—	≤5	10~35

(续)

牌 号	级别	松装 密度/ (g/cm ³)	流动性/ (s/50g) ≤	粒 度 分 布 (%)				
				< 106μm (-150 目)	75 ~ 106μm (-150 目 +200 目)	63 ~ 75μm (-200 目 +250 目)	45 ~ 63μm (-250 目 +320 目)	< 45μm (-320 目)
FHT 40 · 30	I	3. 00 ±0. 10	32	≤25	—	—	—	—
	II	3. 00 ±0. 10	32	≤25	—	—	—	—
FHT 40 · 37	—	3. 70 ±0. 10	30	≤20	—	—	—	—
FHT 100 · 25	—	2. 50 ±0. 10	36	—	余量			≤20

12.1.3 电磁纯铁的电磁性能（表 12-3）

表 12-3 电磁纯铁的电磁性能（GB/T 6983—2008）

磁性 等级	牌号	矫顽力 H_c / (A/m) ≤	矫顽力时 效增值 ΔH_c / (A/m) ≤	最大 磁导率 μ_m / (H/m) ≥	磁感应强度 B/T						
					B_{200}	B_{300}	B_{500}	B_{1000}	B_{2500}	B_{5000}	B_{10000}
普通级	DT4	96.0	9.6	0.0075	≥1.20	≥1.30	≥1.40	≥1.50	≥1.62	≥1.71	≥1.80
高级	DT4A	72.0	7.2	0.0088							
特级	DT4E	48.0	4.8	0.0113							
超级	DT4C	32.0	4.0	0.0151							

注： B_{200} 、 B_{300} 、 B_{500} 、…、 B_{10000} 分别表示磁场强度为 200A/m、300A/m、500A/m、…、10000A/m 时的磁感应强度。

12.2 电工钢带的物理性能

12.2.1 中频用电工晶粒取向钢带的磁性（表 12-4）

表 12-4 中频用电工晶粒取向钢带的磁性（YB/T 5224—2006）

牌 号	公称 厚度 /mm	最大比总损耗 $P/(W/kg)$				$H = 800A/m$ 最小磁感应强度		最小叠 装系数	最小弯 曲次数
		1.0T, 400Hz	1.5T, 400Hz	1.0T, 1000Hz	0.5T, 3000Hz	B/T	频率 /Hz		
3Q3000	0.03	—	—	—	30	1.70	3000	0.87	3

(续)

牌号	公称厚度 /mm	最大比总损耗 $P/(W/kg)$				$H = 800A/m$ 最小磁感应强度		最小叠装系数	最小弯曲次数
		1.0T, 400Hz	1.5T, 400Hz	1.0T, 1000Hz	0.5T, 3000Hz	B/T	频率 /Hz		
5Q1700	0.05	—	17.0	24.0	—	1.60	1000	0.88	3
5Q1600		—	16.0	22.0	—	1.64			
5Q1500		—	15.0	20.0	—	1.70			
5Q1450		—	14.5	19.0	—	1.70			
10Q1700	0.10	—	17.0	—	—	1.64	400	0.91	3
10Q1600		—	16.0	—	—	1.68			
10Q1500		—	15.0	—	—	1.73			
10Q1450		—	14.5	—	—	1.78			
15Q1800	0.15	—	18.0	—	—	1.73	400	0.92	3
15Q1700		—	17.0	—	—	1.73			
15Q1650		—	16.5	—	—	1.73			
15Q1600		—	16.0	—	—	1.70			
20Q1000	0.20	10.0	—	—	—	1.64	400	0.93	3
20Q900		9.0	—	—	—	1.68			
20Q820		8.2	—	—	—	1.72			
20Q760		7.6	17.8	—	—	1.73			

12.2.2 中频用电工无取向钢带的磁性（表 12-5）

表 12-5 中频用电工无取向钢带的磁性（YB/T 5224—2006）

牌号	公称厚度 /mm	最大比总损耗 $P/(W/kg)$		最小叠装系数	最小弯曲次数
		1.0T	频率/Hz		
5W4500	0.05	45	1000	0.88	2
10W1300	0.10	13	400	0.91	2
15W1400	0.15	14	400	0.92	2
20W1500	0.20	15 ^①	400	0.93	2
20W1700	0.20	17	400	0.93	2

① 在没有涂层的试样上检测。

12.2.3 普通级取向电工钢带（片）的磁特性（表 12-6）

表 12-6 普通级取向电工钢带（片）的磁特性（GB/T 2521—2008）

牌 号	公称厚度 /mm	最大比总损耗 $P/(W/kg)$				最小磁极化强度/T $H=800A/m$	最小叠装系数
		1. 5T, 50Hz	1. 5T, 60Hz	1. 7T, 50Hz	1. 7T, 60Hz	50Hz	
23Q110	0. 23	0. 73	0. 96	1. 10	1. 45	1. 78	0. 950
23Q120	0. 23	0. 77	1. 01	1. 20	1. 57	1. 78	0. 950
23Q130	0. 23	0. 80	1. 06	1. 30	1. 65	1. 75	0. 950
27Q110	0. 27	0. 73	0. 97	1. 10	1. 45	1. 78	0. 950
27Q120	0. 27	0. 80	1. 07	1. 20	1. 58	1. 78	0. 950
27Q130	0. 27	0. 85	1. 12	1. 30	1. 68	1. 78	0. 950
27Q140	0. 27	0. 89	1. 17	1. 40	1. 85	1. 75	0. 950
30Q120	0. 30	0. 79	1. 06	1. 20	1. 58	1. 78	0. 960
30Q130	0. 30	0. 85	1. 15	1. 30	1. 71	1. 78	0. 960
30Q140	0. 30	0. 92	1. 21	1. 40	1. 83	1. 78	0. 960
30Q150	0. 30	0. 97	1. 28	1. 50	1. 98	1. 75	0. 960
35Q135	0. 35	1. 00	1. 32	1. 35	1. 80	1. 78	0. 960
35Q145	0. 35	1. 03	1. 36	1. 45	1. 91	1. 78	0. 960
35Q155	0. 35	1. 07	1. 41	1. 55	2. 04	1. 78	0. 960

注：多年来习惯上采用磁感应强度，实际上爱泼斯坦方圈测量的是磁极化强度。

12.2.4 高磁导率级取向电工钢带（片）的磁特性（表 12-7）

表 12-7 高磁导率级取向电工钢带（片）的磁特性（GB/T 2521—2008）

牌 号	公称厚度 /mm	最大比总损耗 $P/(W/kg)$		最小磁极化强度/T $H=800A/m$	最小叠装系数
		1. 7T, 50Hz	1. 7T, 60Hz	50Hz	
23QG085 ^①	0. 23	0. 85	1. 12	1. 85	0. 950
23QG090 ^①	0. 23	0. 90	1. 19	1. 85	0. 950
23QG095	0. 23	0. 95	1. 25	1. 85	0. 950

(续)

牌 号	公称厚度 /mm	最大比总损耗 $P/(W/kg)$		最小磁极化强度/T $H=800A/m$	最小叠装 系数
		1.7T,50Hz	1.7T,60Hz	50Hz	
23QG100	0.23	1.00	1.32	1.85	0.950
27QG090 ^①	0.27	0.90	1.19	1.85	0.950
27QG095 ^①	0.27	0.95	1.25	1.85	0.950
27QG100	0.27	1.00	1.32	1.88	0.950
27QG105	0.27	1.05	1.36	1.88	0.950
27QG110	0.27	1.10	1.45	1.88	0.950
30QG105	0.30	1.05	1.38	1.88	0.960
30QG110	0.30	1.10	1.46	1.88	0.960
30QG120	0.30	1.20	1.58	1.85	0.960
35QG115	0.35	1.15	1.51	1.88	0.960
35QG125	0.35	1.25	1.64	1.88	0.960
35QG135	0.35	1.35	1.77	1.88	0.960

注：1. 在800A/m的磁场下， B 和 J 之间的差值达到0.001T。

2. $P1.5$ 和 $P1.7/60$ 作为参考值，不作为交货依据。

① 该级别的钢可以磁畴细化状态交货。

12.2.5 无取向电工钢带（片）的磁特性（表12-8）

表 12-8 无取向电工钢带（片）的磁特性（GB/T 2521—2008）

牌 号	公称 厚度 /mm	理论密度 /(kg/dm^3)	最大比总损耗 $P/(W/kg)$		最小磁极化强度/T 50Hz			最小 弯曲 次数	最小 叠装 系数
			1.5T, 50Hz	1.5T, 60Hz	$H=$ 2500A/m	$H=$ 5000A/m	$H=$ 10000A/m		
35W230	0.35	7.60	2.30	2.90	1.49	1.60	1.70	2	0.950
35W250		7.60	2.50	3.14	1.49	1.60	1.70	2	
35W270		7.65	2.70	3.36	1.49	1.60	1.70	2	
35W300		7.65	3.00	3.74	1.49	1.60	1.70	3	
35W330		7.65	3.30	4.12	1.50	1.61	1.71	3	
35W360		7.65	3.60	4.55	1.51	1.62	1.72	5	

(续)

牌 号	公称 厚度 /mm	理论密度 /(kg/dm ³)	最大比总损耗 P/(W/kg)		最小磁极化强度/T			最小 弯曲 次数	最小 叠装 系数
			1.5T, 50Hz	1.5T, 60Hz	H = 2500A/m	H = 5000A/m	H = 10000A/m		
35W400	0.35	7.65	4.00	5.10	1.53	1.64	1.74	5	0.950
35W440		7.70	4.40	5.60	1.53	1.64	1.74	5	
50W230	0.50	7.60	2.30	3.00	1.49	1.60	1.70	2	0.970
50W250		7.60	2.50	3.21	1.49	1.60	1.70	2	
50W270		7.60	2.70	3.47	1.49	1.60	1.70	2	
50W290		7.60	2.90	3.71	1.49	1.60	1.70	2	
50W310		7.65	3.10	3.95	1.49	1.60	1.70	3	
50W330		7.65	3.30	4.20	1.49	1.60	1.70	3	
50W350		7.65	3.50	4.45	1.50	1.60	1.70	5	
50W400		7.70	4.00	5.10	1.53	1.63	1.73	5	
50W470		7.70	4.70	5.90	1.54	1.64	1.74	10	
50W530		7.70	5.30	6.66	1.56	1.65	1.75	10	
50W600		7.75	6.00	7.55	1.57	1.66	1.76	10	
50W700		7.80	7.00	8.80	1.60	1.69	1.77	10	
50W800		7.80	8.00	10.10	1.60	1.70	1.78	10	
50W1000		7.85	10.00	12.60	1.62	1.72	1.81	10	
50W1300		7.85	13.00	16.40	1.62	1.74	1.81	10	
65W600	0.65	7.75	6.00	7.71	1.56	1.66	1.76	10	
65W700		7.75	7.00	8.98	1.57	1.67	1.76	10	
65W800		7.80	8.00	10.26	1.60	1.70	1.78	10	
65W1000		7.80	10.00	12.77	1.61	1.71	1.80	10	
65W1300		7.85	13.00	16.60	1.61	1.71	1.80	10	
65W1600		7.85	16.00	20.40	1.61	1.71	1.80	10	

注：P1.5/60 及 H = 2500A/m、H = 10000A/m 的磁极化强度值作为参考值，不作为交货依据。

12.3 不锈钢和耐热钢的物理性能

常用不锈钢和耐热钢的物理性能如表 12-9 所示。

表 12-9 常用不锈钢和耐热钢牌号的物理性能(GB/T 20878—2007)

新牌号	旧牌号	密度 (20℃) /(kg /dm ³)	熔点/℃	比热容 (0 ~ 100℃) /[kJ /(kg·K)]	热导率 /[W/(m · K)]		线胀系数 /(10 ⁻⁶ /K)		电阻率 (20℃) /(10 ⁻⁶ Ω·m)	纵向弹性模量 (20℃) /(kN/mm ²)	磁性
					100℃	500℃	0 ~ 100℃	0 ~ 500℃			
奥氏体型											
12Cr17Mn6Ni5N	1Cr17Mn6Ni5N	7. 93	1398 ~ 1453	0. 50	16. 3	—	15. 7	—	0. 69	197	无 ^①
12Cr18Mn9Ni5N	1Cr18Mn8Ni5N	7. 93	—	0. 50	16. 3	19. 0	14. 8	18. 7	0. 69	197	
20Cr13Mn9Ni4	2Cr13Mn9Ni4	7. 85	—	0. 49	—	—	—	—	0. 90	202	
12Cr17Ni7	1Cr17Ni7	7. 93	1398 ~ 1420	0. 50	16. 3	21. 5	16. 9	18. 7	0. 73	193	
022Cr17Ni7	—	7. 93	—	0. 50	16. 3	21. 5	16. 9	18. 7	0. 73	193	
022Cr17Ni7N	—	7. 93	—	0. 50	16. 3	—	16. 0	18. 0	0. 73	200	
17Cr18Ni9	2Cr18Ni9	7. 85	1398 ~ 1453	0. 50	18. 8	23. 5	16. 0	18. 0	0. 73	196	
12Cr18Ni9	1Cr18Ni9	7. 93	1398 ~ 1120	0. 50	16. 3	21. 5	17. 3	18. 7	0. 73	193	
12Cr18Ni9Si3	1Cr18Ni9Si3	7. 93	1370 ~ 1398	0. 50	15. 9	21. 6	16. 2	20. 2	0. 73	193	
Y12Cr18Ni9	Y1Cr18Ni9	7. 98	1398 ~ 1420	0. 50	16. 3	21. 5	17. 3	18. 4	0. 73	193	
Y12Cr18Ni9Se	Y1Cr18Ni9Se	7. 93	1398 ~ 1420	0. 50	16. 3	21. 5	17. 3	18. 7	0. 73	193	
06Cr19Ni10	0Cr18Ni9	7. 93	1398 ~ 1454	0. 50	16. 3	21. 5	17. 2	18. 4	0. 73	193	
022Cr19Ni10	00Cr19Ni10	7. 90	—	0. 50	16. 3	21. 5	16. 8	18. 3	—	—	
07Cr19Ni10	—	7. 90	—	0. 50	16. 3	21. 5	16. 8	18. 3	0. 73	—	
06Cr18Ni9Cu2	0Cr18Ni9Cu2	8. 00	—	0. 50	16. 3	21. 5	17. 3	18. 7	0. 72	200	
06Cr19Ni10N	0Cr19Ni9N	7. 93	1398 ~ 1454	0. 50	16. 3	21. 5	16. 5	18. 5	0. 72	196	
022Cr19Ni10N	00Cr18Ni10N	7. 93	—	0. 50	16. 3	21. 5	16. 5	18. 5	0. 73	200	
10Cr18Ni12	1Cr18Ni12	7. 93	1398 ~ 1453	0. 50	16. 3	21. 5	17. 3	18. 7	0. 72	193	
06Cr16Ni18	0Cr16Ni18	8. 03	1430	0. 50	16. 2	—	17. 3	—	0. 75	193	

(续)

新牌号	旧牌号	密度 (20℃) /(kg /dm ³)	熔点/℃	比热容 (0~100℃) /[kJ /(kg·K)]	热导率 /[W/(m·K)]		线胀系数 /(10 ⁻⁶ /K)		电阻率 (20℃) /(10 ⁻⁶ Ω·m)	纵向弹性模量 (20℃) /(kN/mm ²)	磁性
					100℃	500℃	0~ 100℃	0~ 500℃			
奥氏体型											
06Cr20Ni11	—	8.00	1398~1453	0.50	15.5	21.6	17.3	18.7	0.72	193	无 ^①
22Cr21Ni12N	2Cr21Ni12N	7.73	—	—	20.9 (24℃)	—	—	16.5	—	—	
16Cr23Ni13	2Cr23Ni13	7.98	1398~1453	0.50	13.8	18.7	14.9	18.0	0.78	200	
06Cr23Ni13	0Cr23Ni13	7.98	1397~1453	0.50	15.5	18.6	14.9	18.0	0.78	193	
14Cr23Ni18	1Cr23Ni18	7.90	1400~1454	0.50	15.9	18.8	15.4	19.2	1.0	196	
20Cr25Ni20	2Cr25Ni20	7.98	1398~1453	0.50	14.2	18.6	15.8	17.5	0.78	200	
06Cr25Ni20	0Cr25Ni20	7.98	1397~1453	0.50	16.3	21.5	14.4	17.5	0.78	200	
022Cr25Ni22Mo2N	—	8.02	—	0.45	12.0		15.8	—	1.0	200	
015Cr20Ni18Mo6CuN	—	8.00	1325~1400	0.50	13.5 (20℃)	—	16.5	—	0.85	200	
06Cr17Ni12Mo2	0Cr17Ni12Mo2	8.00	1370~1397	0.50	16.3	21.5	16.0	18.5	0.74	193	
022Cr17Ni12Mo2	00Cr17Ni14Mo2	8.00	—	0.50	16.3	21.5	16.0	18.5	0.74	193	
06Cr17Ni12Mo2Ti	0Cr18Ni12Mo3Ti	7.90	—	0.50	16.0	24.0	15.7	17.6	0.75	199	
06Cr17Ni12Mo2N	0Cr17Ni12Mo2N	8.00	—	0.50	16.3	21.5	16.5	18.0	0.73	200	
022Cr17Ni12Mo2N	00Cr17Ni13Mo2N	8.04	—	0.47	16.5	—	15.0	—	—	200	
06Cr18Ni12Mo2Cu2	0Cr18Ni12Mo2Cu2	7.96	—	0.50	16.1	21.7	16.6	—	0.74	186	
022Cr18Ni14Mo2Cu2	00Cr18Ni14Mo2Cu2	7.96	—	0.50	16.1	21.7	16.0	18.6	0.74	191	
015Cr21Ni26Mo5Cu2	—	8.00	—	0.50	13.7	—	15.0	—	—	188	
06Cr19Ni13Mo3	0Cr19Ni13Mo3	8.00	1370~1397	0.50	16.3	21.5	16.0	18.5	0.74	193	

(续)

新牌号	旧牌号	密度 (20℃) /(kg /dm ³)	熔点/℃	比热容 (0 ~ 100℃) /[kJ /(kg·K)]	热导率 /[W/(m · K)]		线胀系数 /(10 ⁻⁶ /K)		电阻率 (20℃) /(10 ⁻⁶ Ω·m)	纵向弹 性模量 (20℃) /(kN/mm ²)	磁性
					100℃	500℃	0 ~ 100℃	0 ~ 500℃			
奥 氏 体 型											
022Cr19Ni13Mo3	00Cr19Ni13Mo3	7. 98	1375 ~ 1400	0. 50	14. 4	21. 5	16. 5	—	0. 79	200	无 ^①
022Cr19Ni16Mo5N	—	8. 00	—	0. 50	12. 8	—	15. 2	—	—	—	
06Cr18Ni11Ti	0Cr18Ni10Ti	8. 03	1398 ~ 1427	0. 50	16. 3	22. 2	16. 6	18. 6	0. 72	193	
45Cr14Ni14W2Mo	4Cr14Ni14W2Mo	8. 00	—	0. 51	15. 9	22. 2	16. 6	18. 0	0. 81	177	
24Cr18Ni8W2	2Cr18Ni8W2	7. 98	—	0. 50	15. 9	23. 0	19. 5	25. 1	—	—	
12Cr16Ni35	1Cr16Ni35	8. 00	1318 ~ 1427	0. 46	12. 6	19. 7	16. 6	—	1. 02	196	
06Cr18Ni11Nb	0Cr18Ni11Nb	8. 03	1398 ~ 1427	0. 50	16. 3	22. 2	16. 6	18. 6	0. 73	193	
06Cr18Ni13Si4	0Cr18Ni13Si4	7. 75	1400 ~ 1430	0. 50	16. 3	—	13. 8	—	—	—	
16Cr20Ni14Si2	1Cr20Ni14Si2	7. 90	—	0. 50	15. 0	—	16. 5	—	0. 85	—	
奥氏体-铁素体型											
14Cr18Ni11Si4AlTi	1Cr18Ni11Si4AlTi	7. 51	—	0. 48	13. 0	19. 0	16. 3	19. 7	1. 04	180	有
022Cr19Ni5Mo3Si2N	00Cr18Ni5Mo3Si2	7. 70	—	0. 46	20. 0	24. 0 (300℃)	12. 2	13. 5 (300℃)	—	196	
12Cr21Ni5Ti	1Cr21Ni5Ti	7. 80	—	—	17. 6	23. 0	10. 0	17. 4	0. 79	187	
022Cr22Ni5Mo3N	—	7. 80	1420 ~ 1462	0. 46	19. 0	23. 0 (300℃)	13. 7	14. 7 (300℃)	0. 88	186	
022Cr23Ni4MoCuN	—	7. 80	—	0. 50	16. 0	—	13. 0	—	—	200	
022Cr25Ni6Mo2N	—	7. 80	—	0. 50	21. 0	25. 0	13. 4 (200℃)	24. 0 (300℃)	—	196	
022Cr25Ni7Mo3WCuN	—	7. 80	—	0. 50	—	25. 0	11. 5 (200℃)	12. 7 (400℃)	0. 75	228	

(续)

新牌号	旧牌号	密度 (20℃) /(kg /dm ³)	熔点/℃	比热容 (0 ~ 100℃) /[kJ /(kg·K)]	热导率 /[W/(m · K)]		线胀系数 /(10 ⁻⁶ /K)		电阻率 (20℃) /(10 ⁻⁶ Ω·m)	纵向弹 性模量 (20℃) /(kN/mm ²)	磁性
					100℃	500℃	0 ~ 100℃	0 ~ 500℃			
奥氏体-铁素体型											
03Cr25Ni6Mo3Cu2N	—	7. 80	—	0. 46	13. 5	—	12. 3	—	—	210	有
022Cr25Ni7Mo4N	—	7. 80	—	—	14	—	12. 0	—	—	185 (200℃)	
铁素体型											
06Cr13Al	0Cr13Al	7. 75	1480 ~ 1530	0. 46	24. 2	—	10. 8	—	0. 60	200	有
06Cr11Ti	0Cr11Ti	7. 75	—	0. 46	25. 0	—	10. 6	12. 0	0. 60	—	
022Cr11Ti	—	7. 75	—	0. 46	24. 9	28. 5	10. 6	12. 0	0. 57	201	
022Cr12	00Cr12	7. 75	—	0. 46	24. 9	28. 5	10. 6	12. 0	0. 57	201	
10Cr15	1Cr15	7. 70	—	0. 46	26. 0	—	10. 3	11. 9	0. 59	200	
10Cr17	1Cr17	7. 70	1480 ~ 1508	0. 46	26. 0	—	10. 5	11. 9	0. 60	200	
Y10Cr17	Y1Cr17	7. 78	1427 ~ 1510	0. 46	26. 0	—	10. 4	11. 4	0. 60	200	
022Cr18Ti	00Cr17	7. 70	—	0. 46	35. 1 (20℃)	—	10. 4	—	0. 60	200	
10Cr17Mo	1Cr17Mo	7. 70	—	0. 46	26. 0	—	11. 9	—	0. 60	200	
10Cr17MoNb	—	7. 70	—	0. 44	30. 0	—	11. 7	—	0. 70	220	
019Cr18MoTi	—	7. 70	—	0. 46	35. 1	—	10. 4	—	0. 60	200	
019Cr19Mo2NbTi	00Cr18Mo2	7. 75	—	0. 46	36. 9	—	10. 6 (200℃)	—	0. 60	200	
008Cr27Mo	00Cr27Mo	7. 67	—	0. 46	26. 0	—	11. 0	—	0. 64	206	
008Cr30Mo2	00Cr30Mo2	7. 64	—	0. 50	26. 0	—	11. 0	—	0. 64	210	

(续)

新牌号	旧牌号	密度 (20℃) /(kg /dm ³)	熔点/℃	比热容 (0 ~ 100℃) /[kJ /(kg·K)]	热导率		线胀系数		电阻率 (20℃) /(10 ⁻⁶ Ω·m)	纵向弹 性模量 (20℃) /(kN/mm ²)	磁性
					/[W/(m · K)]		/(10 ⁻⁶ /K)				
					100℃	500℃	0 ~ 100℃	0 ~ 500℃			
马氏体型											
12Cr12	1Cr12	7. 80	1480 ~ 1530	0. 46	21. 2	—	9. 9	11. 7	0. 57	200	有
06Cr13	0Cr13	7. 75	—	0. 46	25. 0	—	10. 6	12. 0	0. 60	220	
12Cr13	1Cr13	7. 70	1480 ~ 1530	0. 46	24. 2	28. 9	11. 0	11. 7	0. 57	200	
04Cr13Ni5Mo	—	7. 79	—	0. 47	16. 30	—	10. 7	—	—	201	
Y12Cr13	Y1Cr13	7. 78	1482 ~ 1532	0. 46	25. 0	—	9. 9	11. 5	0. 57	200	
20Cr13	2Cr13	7. 75	1470 ~ 1510	0. 46	22. 2	26. 4	10. 3	12. 2	0. 55	200	
30Cr13	3Cr13	7. 76	1365	0. 47	25. 1	25. 5	10. 5	12. 0	0. 52	219	
Y30Cr13	Y3Cr13	7. 78	1454 ~ 1510	0. 46	25. 1	—	10. 3	11. 7	0. 57	219	
40Cr13	4Cr13	7. 75	—	0. 46	28. 1	28. 9	10. 5	12. 0	0. 59	215	
14Cr17Ni2	1Cr17Ni2	7. 75	—	0. 46	20. 2	25. 1	10. 3	12. 4	0. 72	193	
17Cr16Ni2	—	7. 71	—	0. 46	27. 8	31. 8	10. 0	11. 0	0. 70	212	
68Cr17	7Cr17	7. 78	1371 ~ 1508	0. 46	21. 2	—	10. 2	11. 7	0. 60	200	
85Cr17	8Cr17	7. 78	1371 ~ 1508	0. 46	24. 2	—	10. 2	11. 9	0. 60	200	
108Cr17	11Cr17	7. 78	1371 ~ 1482	0. 46	24. 0	—	10. 2	11. 7	0. 60	200	
Y108Cr17	Y11Cr17	7. 78	1371 ~ 1482	0. 46	24. 2	—	10. 1	—	0. 60	200	
95Cr18	9Cr18	7. 70	1377 ~ 1510	0. 48	29. 3	—	10. 5	12. 0	0. 60	200	
102Cr17Mo	9Cr18Mo	7. 70	—	0. 43	16. 0	—	10. 4	11. 6	0. 80	215	
90Cr18MoV	9Cr18MoV	7. 70	—	0. 46	29. 3	—	10. 5	12. 0	0. 65	211	
158Cr12MoV	1Cr12MoV	7. 70	—	—	—	—	10. 9	12. 2 (600℃)	—	—	

(续)

新牌号	旧牌号	密度 (20℃) /(kg /dm ³)	熔点/℃	比热容 (0 ~ 100℃) /[kJ /(kg·K)]	热导率 /[W/(m · K)]		线胀系数 /(10 ⁻⁶ /K)		电阻率 (20℃) /(10 ⁻⁶ Ω·m)	纵向弹性模量 (20℃) /(kN/mm ²)	磁性
					100℃	500℃	0 ~ 100℃	0 ~ 500℃			
马 氏 体 型											
18Cr12MoVNbN	2Cr12MoVNbN	7. 75	—	—	27. 2	—	9. 3	—	—	218	有
22Cr12NiWMoV	2Cr12NiWMoV	7. 78	—	0. 46	25. 1	—	10. 6 (260℃)	11. 5	—	206	
13Cr11Ni2W2MoV	1Cr11Ni2W2MoV	7. 80	—	0. 48	22. 2	28. 1	9. 3	11. 7	—	196	
14Cr12Ni2WMoVNb	1Cr12Ni2WMoVNb	7. 80	—	0. 47	23. 0	25. 1	9. 9	11. 4	—	—	
42Cr9Si2	4Cr9Si2	—	—	—	16. 7 (20℃)	—	—	12. 0	0. 79	—	
40Cr10Si2Mo	4Cr10Si2Mo	7. 62	—	—	15. 9	25. 1	10. 4	12. 1	0. 84	206	
80Cr20Si2Ni	8Cr20Si2Ni	7. 60	—	—	—	—	—	12. 3 (600℃)	0. 95	—	
沉淀硬化型											
04Cr13Ni8Mo2Al	—	7. 76	—	—	14. 0	—	10. 4	—	1. 00	195	有
022Cr12Ni9Cu2NbTi	—	7. 7	1400 ~ 1440	0. 46	17. 2	—	10. 6	—	0. 90	199	
05Cr15Ni5Cu4Nb	—	7. 78	1397 ~ 1435	0. 46	17. 9	23. 0	10. 8	12. 0	0. 98	195	
05Cr17Ni4Cu4Nb	0Cr17Ni4Cu4Nb	7. 78	1397 ~ 1435	0. 46	17. 2	23. 0	10. 8	12. 0	0. 98	196	
07Cr17Ni7Al	0Cr17Ni7Al	7. 93	1390 ~ 1430	0. 50	16. 3	20. 9	15. 3	17. 1	0. 80	200	
07Cr15Ni7Mo2Al	0Cr15Ni7Mo2Al	7. 80	1415 ~ 1450	0. 46	18. 0	22. 2	10. 5	11. 8	0. 80	185	
07Cr12Ni4Mn5Mo3Al	0Cr12Ni4Mn5Mo3Al	7. 80	—	—	17. 6	23. 9	16. 2	18. 9	0. 80	195	
09Cr17Ni5Mo3N	—	—	—	—	15. 4	—	17. 3	—	0. 79	203	
06Cr15Ni25Ti2MoAlVB	0Cr15Ni25Ti2MoAlVB	7. 94	1371 ~ 1427	0. 46	15. 1	23. 8 (600℃)	16. 9	17. 6	0. 91	198	无 ^①

① 冷变形后稍有磁性。

12.4 精密合金的物理性能

12.4.1 发条用高弹性 3J9 合金的物理性能

1. 发条用高弹性 3J9 合金的平均线胀系数（表 12-10）

表 12-10 发条用高弹性 3J9 合金的平均线胀系数（YB/T 5135—1993）

合金状态	合金的平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l (10^{-6}/^{\circ}\text{C})$					
	-40 ~ 20℃	20 ~ 50℃	20 ~ 100℃	20 ~ 200℃	20 ~ 300℃	20 ~ 400℃
固溶	16.4 ~ 17.6	15.4 ~ 16.0	16.0 ~ 16.4	16.3 ~ 16.7	16.8 ~ 17.2	17.3 ~ 17.7
固溶 + 时效	17.1 ~ 18.1	16.5 ~ 18.2	16.0 ~ 16.2	16.3 ~ 16.5	16.7 ~ 16.9	17.2 ~ 17.3
冷拉	18.0	14.6 ~ 15.6	15.9 ~ 16.4	16.7 ~ 16.8	16.8 ~ 17.2	17.2 ~ 17.4
冷拉 + 时效	17.8 ~ 18.1	15.5 ~ 15.9	15.9 ~ 16.1	16.3 ~ 16.5	16.6 ~ 16.9	17.2 ~ 17.4

2. 发条用高弹性 3J9 合金的主要特性（表 12-11）

表 12-11 发条用高弹性 3J9 合金的主要特性（YB/T 5135—1993）

合金状态	弹性模量 $E/(N/mm^2)$	切变模量 $G/(N/mm^2)$	频率温度系数 $\beta_f(-30 \sim 50^{\circ}\text{C})$ $/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	机械品质因数 Q (20℃)
固溶	186200 ~ 196000	72520 ~ 74480	-190 ~ -210	17000 ~ 19000
固溶 + 时效	186200 ~ 196000	73500 ~ 75460	-190 ~ -210	15000 ~ 18000
冷拉	166600 ~ 176400	68600 ~ 71540	-200 ~ -240	5000 ~ 6000
冷拉 + 时效	181300 ~ 196000	73500 ~ 75460	-190 ~ -210	14000 ~ 17000

3. 发条用高弹性 3J9 合金的电阻率和磁导率（表 12-12）

表 12-12 发条用高弹性 3J9 合金的电阻率和磁导率（YB/T 5135—1993）

合金状态	磁导率 $\mu/(mH/m)$		电阻率 ρ $/(10^{-6}\Omega \cdot m)$
	$H = 40000 A/m$	$H = 80000 A/m$	
固溶	0.0012589 ~ 0.0012595	0.0012589 ~ 0.0012595	—
固溶 + 550℃ × 4h	0.0012594 ~ 0.0012596	0.0012594 ~ 0.0012596	—
固溶 + ≥43% 变形率	0.0012602 ~ 0.0012624	0.0012602 ~ 0.0012624	0.87 ~ 0.88
固溶 + ≥43% 变形率 + 480℃ × 3h	0.0012615	0.0012614	0.84 ~ 0.86

12.4.2 正温度系数恒弹性合金 3J63 的物理性能

1. 正温度系数恒弹性合金 3J63 热处理制度（表 12-13）

表 12-13 正温度系数恒弹性合金 3J63 热处理制度（YB/T 5244—1993）

合金牌号	退火介质	加热温度及速度	保温时间	冷却速度
3J63	氢气或真空	550 ~ 650℃ 随炉升温	4h	炉冷至 300℃ 出炉

2. 正温度系数恒弹性合金 3J63 热处理后的物理性能（表 12-14）

表 12-14 正温度系数恒弹性合金 3J63 热处理后的物理性能（YB/T 5244—1993）

组别	频率温度系数 $\beta_f(-40 \sim 80^{\circ}\text{C})$ $/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	机械品质因数 Q $\geq$	纵振波传播速度 $c/(\text{m/s})$	
			平均值	同炉号允许波动值
A	10.0 ~ 20.0	9000	4800 ~ 5000	$\leq \pm 50$ (合格率达 90%)
B	20.0 ~ 30.0			

3. 正温度系数恒弹性合金 3J63 的其他状态的物理性能（表 12-15）

表 12-15 正温度系数恒弹性合金 3J63 的其他状态的物理性能（YB/T 5244—1993）

性能指标	冷轧(拉)态	冷加工 + 时效
弹性模量 $E/(\text{N/mm}^2)$	≈ 180000	189000 ~ 202000
频率温度系数 $\beta_f/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	-20.0 ~ -10.0	10.0 ~ 30.0
机械品质因数 Q	≈ 8000	≥ 10000
纵振波传播速度 $c_l/(\text{m/s})$	≈ 4800	4850 ~ 4950
平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l(20 \sim 100^{\circ}\text{C})/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	≈ 8.0	≈ 8.5
居里温度 $T_c/^{\circ}\text{C}$	≈ 150	≈ 130
磁饱和强度 B_{100}/Gs	6000 ~ 6500	4500 ~ 5500
密度 $\rho/(\text{g/cm}^3)$	≈ 8.05	≈ 8.05
电阻率 $\rho/(10^{-6}\Omega \cdot \text{m})$	≈ 1.00	1.05 ~ 1.10
抗拉强度 $R_m/(\text{N/mm}^2)$	≈ 950	≈ 1400
维氏硬度 HV	≈ 300	350 ~ 400

12.4.3 低膨胀铁镍及铁镍钴合金的物理性能

1. 低膨胀铁镍及铁镍钴合金的典型线胀系数（表 12-16）

表 12-16 低膨胀铁镍及铁镍钴合金的典型线胀系数 (YB/T 5241—2005)

合金牌号	平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$					
	20 ~ 50℃	20 ~ 100℃	20 ~ 200℃	20 ~ 300℃	20 ~ 400℃	20 ~ 500℃
4J32	0.7	0.8	1.4	4.3	7.2	9.3
4J36	0.6	0.8	2.0	5.1	8.0	10.0
4J40	1.4	1.3	1.2	1.7	4.5	—

2. 低膨胀铁镍及铁镍钴合金的平均线胀系数 (表 12-17)

表 12-17 低膨胀铁镍及铁镍钴合金的平均
线胀系数 (YB/T 5241—2005)

合金牌号	试样热处理制度	平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	
		20 ~ 100℃	20 ~ 300℃
4J32	将半成品试样加热至 $(840 \pm 10)^{\circ}\text{C}$, 保温 1h, 水淬; 再将试样加工为成品试样, 在 $(315 \pm 10)^{\circ}\text{C}$, 保温 1h, 随炉冷或空冷	≤ 1.0	—
4J36		≤ 1.5	—
4J38			
4J40		—	≤ 2.0

12.4.4 抗振耐磨轴尖用 3J40 合金的物理性能

1. 抗振耐磨轴尖用 3J40 合金的平均线胀系数 (表 12-18)

表 12-18 抗振耐磨轴尖用 3J40 合金的平均
线胀系数 (YB/T 5243—1993)

合金状态	合金的平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l/(\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$					
	20 ~ 55℃	20 ~ 100℃	20 ~ 200℃	20 ~ 300℃	20 ~ 400℃	20 ~ 500℃
固溶	12.2 ~ 12.7	12.4 ~ 12.5	12.6 ~ 12.8	13.0 ~ 13.1	13.5 ~ 13.6	13.8 ~ 14.0
固溶 + 时效	11.0 ~ 11.5	11.9 ~ 12.0	12.0 ~ 12.2	12.4 ~ 12.5	12.7 ~ 12.8	13.1 ~ 13.3
冷拉 + 时效	11.6	12.0	12.1	12.4	12.8	13.3

2. 抗振耐磨轴尖用 3J40 合金的主要特性 (表 12-19)

表 12-19 抗振耐磨轴尖用 3J40 合金的主要特性 (YB/T 5243—1993)

合金状态	弹性模量 E $/(N/mm^2)$	频率温度系数 $\beta_f/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$		机械品质因数 Q (20℃)
		-40 ~ 20℃	20 ~ 100℃	
固溶 + $\geq 80\%$ 变形率	176400 ~ 196000	—	—	—
固溶 + $\geq 80\%$ 变形率 + 时效 5h	225400 ~ 235200	-106 ~ -103	-110 ~ -104	49000 ~ 51000

3. 抗振耐磨轴尖用 3J40 合金的物理性能（表 12-20）

表 12-20 抗振耐磨轴尖用 3J40 合金的物理性能（YB/T 5243—1993）

合金状态	磁化率/ 10^{-5}		电阻率 / $(10^{-6}\Omega\cdot\text{m})$	密度 / (g/cm^3)
	$H=5000\text{e}^{\text{①}}$	$H=10000\text{e}^{\text{①}}$		
固溶	3.5~4.5	3.5~4.6	—	7.6
固溶+时效	3.8~4.0	2.4~4.2	—	—
固溶+冷拉	2.8~3.0	—	1.21	—
固溶+ $\geq 60\%$ 变形率 +时效	—	—	0.78	—

① $10\text{e}=79.5775\text{A}/\text{m}_0$

12.4.5 定膨胀封接铁镍钴合金的物理性能

1. 定膨胀封接铁镍钴合金的典型线胀系数（表 12-21）

表 12-21 定膨胀封接铁镍钴合金的典型线胀系数（YB/T 5231—2005）

合金牌号	平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$								
	20~ 100℃	20~ 200℃	20~ 300℃	20~ 400℃	20~ 450℃	20~ 500℃	20~ 600℃	20~ 700℃	20~ 800℃
4J29	—	5.9	5.3	5.1	5.3	6.2	7.8	9.2	10.2
4J44	—	4.9	4.6	4.9	5.9	6.8	8.7	—	—
4J33	—	7.1	6.5	6.3	—	7.1	8.5	—	—
4J34	—	7.5	6.9	6.6	—	6.9	8.3	—	—
4J46	6.8	6.5	6.4	6.4	—	7.9	9.3	—	—

2. 定膨胀封接铁镍钴合金的平均线胀系数（表 12-22）

表 12-22 定膨胀封接铁镍钴合金的平均线胀系数（YB/T 5231—2005）

合金 牌号	试样热处理制度	平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$				
		20~300℃	20~400℃	20~450℃	20~500℃	20~600℃
4J29	在真空或氢气气氛中加热至(900±20)℃,保温 1h,再加热至(1100±20)℃,保温 15min,以不大于 5℃/min 的速度冷至 200℃以下出炉	—	4.6~5.2	5.1~5.5	—	—
4J44		4.3~5.1	4.6~5.2	—	—	—
4J33	在真空或氢气气氛中加热至(900±20)℃,保温 1h,以不大于 5℃/min 的速度冷至 200℃以下出炉	—	6.0~6.8	—	6.6~7.4	—
4J34		—	6.3~7.1	—	—	7.8~8.5
4J46	在真空或氢气气氛中加热至 800~900℃,保温 1h,以不大于 5℃/min 的速度冷至 300℃以下出炉	5.5~6.5	5.6~6.6	—	7.0~8.0	—

12.4.6 定膨胀封接铁镍铬及铁镍合金的物理性能

1. 定膨胀封接铁镍铬及铁镍合金的典型线胀系数 (表 12-23)

表 12-23 定膨胀封接铁镍铬及铁镍合金的典型线胀系数 (YB/T 5235—2005)

合金牌号	平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l$ ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)						
	20 ~ 100℃	20 ~ 200℃	20 ~ 300℃	20 ~ 400℃	20 ~ 450℃	20 ~ 500℃	20 ~ 600℃
4J6	6.8	7.0	7.7	9.7	—	11.1	12.2
4J47	8.1	8.6	8.3	8.3	—	9.1	10.0
4J49	9.0	9.0	8.9	9.6	—	10.9	11.8
4J42	5.6	4.9	4.8	5.9	6.9	7.8	9.2
4J45	7.5	7.5	7.1	7.2	7.1	8.3	9.5
4J50	9.8	9.8	9.5	9.4	—	9.7	10.6

2. 定膨胀封接铁镍铬及铁镍合金的平均线胀系数 (表 12-24)

表 12-24 定膨胀封接铁镍铬及铁镍合金的平均线胀系数 (YB/T 5235—2005)

合金 牌号	试样热处理制度	平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l$ ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
		20 ~ 300℃	20 ~ 400℃	20 ~ 450℃
4J6	在真空或氢气气氛中加热至 $(1100 \pm 20)^{\circ}\text{C}$, 保温 15min, 以不大于 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度冷至 200℃ 以下出炉	7.6 ~ 8.3	9.5 ~ 10.2	—
4J47		—	8.1 ~ 8.7	—
4J49		8.6 ~ 9.3	9.4 ~ 10.1	—
4J42	在真空或氢气气氛中加热至 $(900 \pm 20)^{\circ}\text{C}$, 保温 1h, 以不大于 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度冷至 200℃ 以下出炉	4.0 ~ 5.0	—	6.5 ~ 7.5
4J45		6.5 ~ 7.2	6.5 ~ 7.2	—
4J50		9.2 ~ 10.0	9.2 ~ 9.9	—

12.4.7 变形永磁钢的物理性能

1. 变形永磁钢的热处理制度 (表 12-25)

表 12-25 变形永磁钢的热处理制度 (GB/T 14991—1994)

牌号	推荐热处理制度
2J63	1) 1050℃ 正火 2) 在 500 ~ 600℃ 预热 5 ~ 15min, 然后加热到 800 ~ 850℃ 保温 10 ~ 15min, 油淬 3) 在 100℃ 沸水中时效 5h 以上
2J64	1) 1200 ~ 1250℃ 正火 2) 在 500 ~ 600℃ 预热 5 ~ 15min, 然后加热到 800 ~ 860℃ 保温 5 ~ 15min, 油淬 3) 在 100℃ 沸水中时效 5h 以上

(续)

牌号	推荐热处理制度
2J65	1) 1150 ~ 1200℃ 正火 2) 在 500 ~ 600℃ 预热 5 ~ 15min, 然后加热到 930 ~ 980℃ 保温 10 ~ 15min, 油淬 3) 在 100℃ 沸水中时效 5h 以上
2J67	1) 在 1250℃ 保温 15 ~ 30min, 油淬 2) 在 650 ~ 725℃ 回火, 保温 1 ~ 2h, 空冷

2. 变形永磁钢热处理后的磁性能 (表 12-26)

表 12-26 变形永磁钢热处理后的磁性能 (GB/T 14991—1994)

牌号	矫顽力 $H_c/(kA/m)$	剩余磁感应强度 B_r/T	$B_r H_c/Gs \cdot Oe^{①}$
	$\geq$		
2J63	4.93	0.95	0.59×10^6
2J64	4.93	1.00	0.62×10^6
2J65	7.96	0.85	0.85×10^6
2J67	20.89	1.00	2.60×10^6

注: 在保证矫顽力 H_c 与剩余磁感应 B_r 的乘积不低于表中规定时, 允许矫顽力 H_c 降低 5%, 或剩余磁感应 B_r 降低 10%。

① $1Gs = 10^{-4}T$, $1Oe = 79.5775A/m$ 。

12.4.8 变形铁铬钴永磁合金的物理性能

1. 变形铁铬钴永磁合金的热处理制度 (表 12-27)

表 12-27 变形铁铬钴永磁合金的热处理制度 (YB/T 5261—1993)

牌号	推荐热处理制度
2J83	1) 固溶处理: 在 1300℃ 保温 15 ~ 25min, 冰水淬 2) 磁场处理: 在大于 200kA/m (2500Oe) 磁场强度的炉中, 于 640 ~ 650℃ 保温 30 ~ 60min 进行等温处理 3) 回火热处理: 在 610℃ 保温 0.5h + 600℃ 保温 1h + 580℃ 保温 2h + 560℃ 保温 3h + 540℃ 保温 4h 进行阶梯回火
2J84	1) 固溶处理: 在 1200℃ 保温 20 ~ 30min, 冷水淬 2) 磁场热处理: 在大于 200kA/m (2500Oe) 磁场强度的炉中, 于 640 ~ 650℃ 保温 40 ~ 80min 并在磁场中随炉缓冷至 500℃ 3) 回火热处理: 在 610℃ 保温 0.5h + 600℃ 保温 1h + 580℃ 保温 2h + 560℃ 保温 3h + 540℃ 保温 4h 进行阶梯回火
2J85	1) 固溶处理: 在 1200℃ 保温 20 ~ 30min, 冷水淬 2) 磁场热处理: 在大于 200kA/m (2500Oe) 磁场强度的炉中, 于 640 ~ 650℃ 保温 1 ~ 2h 进行等温处理 3) 回火热处理: 在 620℃ 保温 1h + 610℃ 保温 1h + 590℃ 保温 2h + 570℃ 保温 3h + 560℃ 保温 4h + 540℃ 保温 6h 进行阶梯回火

2. 变形铁铬钴永磁合金热处理后的磁性能（表 12-28）

表 12-28 变形铁铬钴永磁合金热处理后的磁性能（YB/T 5261—1993）

牌号	类别	剩余磁感应强度 B_r /T	矫顽力 H_c /(kA/m)	最大磁能积 $(BH)_{\max}$
		$\geq$	$\geq$	/(kJ/m ³)
2J83	各向异性	1.05	48	24 ~ 32
2J84	各向异性	1.20	52	32 ~ 40
2J85	各向异性	1.30	44	40 ~ 48

3. 变形铁铬钴永磁合金的退磁曲线

变形铁铬钴永磁合金的退磁曲线如图 12-1 所示，图中直线是坐标原点与 $(B, H)_{\max}$ 点的连线。

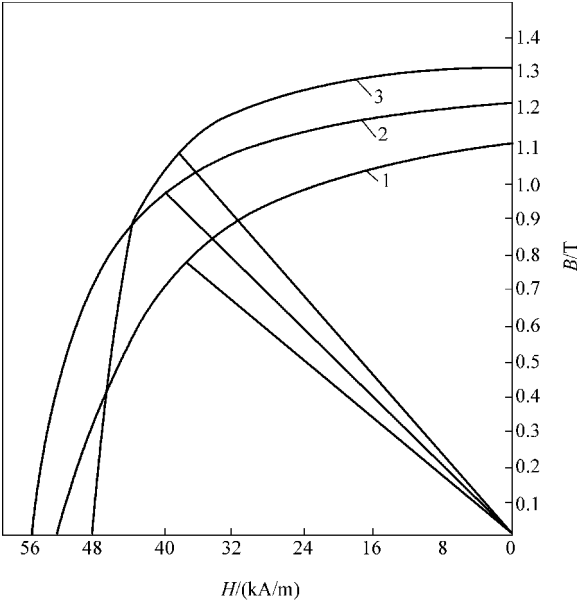


图 12-1 变形铁铬钴永磁合金退磁曲线

1—2J83 退磁曲线 2—2J84 退磁曲线 3—2J85 退磁曲线

4. 变形铁铬钴永磁合金的物理参数

1) 变形铁铬钴永磁合金的电阻率如表 12-29 所示。

表 12-29 变形铁铬钴永磁合金的电阻率（YB/T 5261—1993）

状 态	冷 态	固 溶	时 效
电阻率/ $\mu\Omega \cdot m$	0.80	0.76	0.64

2) 变形铁铬钴永磁合金的线胀系数如表 12-30 所示。

表 12-30 变形铁铬钴永磁合金的线胀系数 (YB/T 5261—1993)

温度/℃	100	200	300	400
线胀系数/(10 ⁻⁶ /℃)	13.0	11.0	10.4	10.7

3) 变形铁铬钴永磁合金的回复磁导率如表 12-31 所示。

表 12-31 变形铁铬钴永磁合金的回复磁导率 (YB/T 5261—1993)

退磁场磁场强度 kA/m	40	44
$\mu_{\text{rec}}/(H/m)$	38.5×10^{-4}	39.4×10^{-4}

4) 变形铁铬钴永磁合金居里温度为 671℃。

12.4.9 玻封铁铬 4J28 合金的物理性能

1. 玻封铁铬 4J28 合金的典型线胀系数 (表 12-32)

表 12-32 玻封铁铬 4J28 合金的典型线胀系数 (YB/T 5240—2005)

合金牌号	平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$						
	20 ~ 200℃	20 ~ 300℃	20 ~ 400℃	20 ~ 500℃	20 ~ 600℃	20 ~ 700℃	20 ~ 800℃
4J28	10.0	10.5	10.8	11.1	11.2	11.6	11.6

2. 玻封铁铬 4J28 合金的平均线胀系数 (表 12-33)

表 12-33 玻封铁铬 4J28 合金的平均线胀系数 (YB/T 5240—2005)

合金牌号	试样热处理制度	平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$
		20 ~ 530℃
4J28	加热至 (1100 ± 20)℃, 保温 15min, 空冷至室温	10.8 ~ 11.4

12.4.10 轴尖用 3J22 合金丝材的物理性能

轴尖用 3J22 合金丝材的力学性能及磁学性能如表 12-34 所示。

表 12-34 轴尖用 3J22 合金丝材的力学性能及磁学性能 (YB/T 5252—1993)

合金牌号	硬度 HV	质量磁化率 χ_m	弯曲性能
3J22	试样时效热处理后 ≥750	在 954930A/m (120000Oe) 磁场 下的 χ_m 应不大于 $120 \times 10^{-6} \text{emu}^{①}/\text{g}$	弯曲半径等于 2.5mm 反复弯曲 2 次, 在弯曲处不得出现裂纹和断裂

① emu 是电磁系单位, 物理含义是: 一段导线, 若放在磁感应强度均匀的磁场中, 方向与磁感应强度方向垂直的长直导线通有 1 电磁系单位 (emu) 的稳恒电流 (等于 10A) 时, 在每厘米长度的导线受到电磁力为 1dyn (1dyn = 10⁻⁵N), 则该磁感应强度就定义为 1Gs (1Gs = 10⁻⁴T)。

12.4.11 烧结钕铁硼永磁材料的物理性能

1. 烧结钕铁硼永磁材料在 $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$ 下的磁性能 (表 12-35)

表 12-35 烧结钕铁硼永磁材料在 $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$ 下的磁性能 (GB/T 13560—2000)

材 料			主要磁性能			
种类	数字牌号	字符牌号	B_r/T	$H_{cJ}/(\text{kA/m})$	$H_{cB}^{①}/(\text{kA/m})$	$(BH)_{\max}$
			$\geq$			$/(\text{kJ/m}^3)$
N	048021	NdFeB 380/80	1.38	800	677	366 ~ 398
	048022	NdFeB 350/96	1.33	960	756	335 ~ 366
	048023	NdFeB 320/96	1.27	960	876	302 ~ 335
	048024	NdFeB 300/96	1.23	960	860	287 ~ 320
	048025	NdFeB 280/96	1.18	960	860	263 ~ 295
	048026	NdFeB 260/96	1.14	960	836	247 ~ 279
	048027	NdFeB 240/96	1.08	960	796	223 ~ 256
M	048031	NdFeB 320/110	1.27	1100	910	302 ~ 335
	048032	NdFeB 300/110	1.23	1100	876	287 ~ 320
	048033	NdFeB 280/110	1.18	1100	860	263 ~ 295
H	048041	NdFeB 300/135	1.23	1350	890	287 ~ 318
	048042	NdFeB 280/135	1.18	1350	876	263 ~ 295
	048043	NdFeB 260/135	1.14	1350	844	247 ~ 279
	048044	NdFeB 240/135	1.08	1350	812	223 ~ 255
SH	048051	NdFeB 280/160	1.18	1600	876	263 ~ 295
	048052	NdFeB 260/160	1.14	1600	836	247 ~ 279
	048053	NdFeB 240/160	1.08	1600	796	223 ~ 255
	048054	NdFeB 220/160	1.05	1600	756	207 ~ 239
UH	048061	NdFeB 240/200	1.08	2000	756	223 ~ 255
	048062	NdFeB 220/200	1.05	2000	756	207 ~ 239
	048063	NdFeB 210/200	1.02	2000	732	191 ~ 223
EH	048071	NdFeB 240/240	1.08	2400	756	223 ~ 255
	048072	NdFeB 220/240	1.05	2400	756	207 ~ 239

① H_{cB} 为磁感应强度矫顽力。

2. 烧结钕铁硼永磁材料的其他物理性能 (表 12-36)

表 12-36 烧结钕铁硼永磁材料的其他物理性能 (GB/T 13560—2000)

性能	密度 $/(\text{g/cm}^3)$	硬度 HV	电阻率 $/(\mu\Omega \cdot \text{cm})$	抗压强度 $/(\text{N/mm}^2)$	线胀系数(垂 直于取向方向) $/(10^{-6}/\text{K})$	线胀系数 (平行于取向方向) $/(10^{-6}/\text{K})$
指标	7.45	570	150	780	-4.8	3.4

12.4.12 热双金属带材的物理性能

1. 热双金属的组元层合金牌号和热双金属特性（表 12-37）

表 12-37 热双金属的组元层合金牌号和热双金属特性（GB/T 4461—2007）

热双金属牌号	组元层合金牌号			热双金属特性
	高膨胀层	中间层	低膨胀层	
5J20110 ^①	Mn75Ni15Cu10(Mn72Ni10Cu18)	—	Ni36	高敏感、高电阻，中温用
5J14140 ^①	Mn75Ni15Cu10(Mn72Ni10Cu18)	—	Ni36	中敏感、高电阻，中温用
5J15120 ^①	Mn75Ni15Cu10(Mn72Ni10Cu18)	—	Ni45Cr6	中敏感、高电阻，中温用
5J1480	Ni22Cr3	—	Ni36	中敏感、中电阻，中温用
5J1380	Ni19Mn7	—	Ni34	中敏感、中电阻，中温用
5J1580	Ni20Mn6	—	Ni36	中敏感、中电阻，中温用
5J1017	Ni	—	Ni36	中敏感、低电阻，中温用
5J1413	Cu62Zn38	—	Ni36	中敏感、低电阻，高导热
5J1416	Cu62Zn38	—	Ni36	中敏感、低电阻，高导热
5J1070	Ni19Cr11	—	Ni42	中敏感，较高温用
5J0756	Ni22Cr3	—	Ni50	低敏感，高温度用
5J1306A	Ni20Mn6	Cu	Ni36	电阻系列
5J1306B	Ni22Cr3	Cu	Ni36	电阻系列
5J1309A	Ni20Mn6	Cu	Ni36	电阻系列
5J1309B	Ni22Cr3	Cu	Ni36	电阻系列
5J1411A	Ni20Mn6	Cu	Ni36	电阻系列
5J1411B	Ni22Cr3	Cu	Ni36	电阻系列
5J1417A	Ni20Mn6	Cu	Ni36	电阻系列
5J1417B	Ni22Cr3	Cu	Ni36	电阻系列
5J1320A ^②	Ni20Mn6	Ni(Cu)	Ni36	电阻系列
5J1320B ^②	Ni22Cr3	Ni(Cu)	Ni36	电阻系列
5J1325A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	电阻系列
5J1325B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	电阻系列
5J1430A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	电阻系列
5J1430B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	电阻系列
5J1433A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	电阻系列
5J1433B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	电阻系列
5J1435A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	电阻系列

(续)

热双金属牌号	组元层合金牌号			热双金属特性
	高膨胀层	中间层	低膨胀层	
5J1435B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	电阻系列
5J1440A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	电阻系列
5J1440B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	电阻系列
5J1445A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	电阻系列
5J1445B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	电阻系列
5J1450A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	电阻系列
5J1450B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	电阻系列
5J1455A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	电阻系列
5J1455B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	电阻系列
5J1075	Ni16Cr11	—	Ni20Co26Cr8	耐蚀、高强度
5J1085	Mn15Ni10Cr	—	Ni36Nb	耐蚀、高强度

① 高膨胀合金允许采用括号内的 Mn72Ni10Cu18。

② 中间层允许采用括号内的 Cu。

2. 热双金属带材的热处理制度（表 12-38）

表 12-38 热双金属带材的热处理制度（GB/T 4461—2007）

牌 号	试样热处理制度		
	处理温度/℃	保温时间/h	冷却方式
5J20110	260 ~ 280	1 ~ 2	空 冷
5J14140	260 ~ 280		
5J15120	260 ~ 280		
5J1480	300 ~ 320		
5J1380	300 ~ 320		
5J1580	300 ~ 320		
5J1017	300 ~ 320		
5J1413	180 ~ 200		
5J1416	180 ~ 200		
5J1070	380 ~ 400		
5J0756	400 ~ 420		
5J1306A	250 ~ 270		
5J1306B	250 ~ 270		
5J1309A	250 ~ 270		
5J1309B	250 ~ 270		
5J1411A	250 ~ 270		

(续)

牌 号	试样热处理制度		
	处理温度/℃	保温时间/h	冷却方式
5J1411B	250 ~ 270	1 ~ 2	空 冷
5J1417A	250 ~ 270		
5J1417B	250 ~ 270		
5J1320A	300 ~ 320		
5J1320B	300 ~ 320		
5J1325A	300 ~ 320		
5J1325B	300 ~ 320		
5J1430A	300 ~ 320		
5J1430B	300 ~ 320		
5J1433A	300 ~ 320		
5J1433B	300 ~ 320		
5J1435A	300 ~ 320		
5J1435B	300 ~ 320		
5J1440A	300 ~ 320		
5J1440B	300 ~ 320		
5J1445A	300 ~ 320		
5J1445B	300 ~ 320		
5J1450A	300 ~ 320		
5J1450B	300 ~ 320		
5J1075	400 ~ 420		

3. 热双金属带材的平均线胀系数（表 12-39）

表 12-39 热双金属带材的平均线胀系数（GB/T 4461—2007）

组元层合金牌号	平均线胀系数/(10 ⁻⁶ /℃)		组元层合金牌号	平均线胀系数/(10 ⁻⁶ /℃)	
	室温 ~ 100℃	室温 ~ 200℃		室温 ~ 100℃	室温 ~ 200℃
Ni34	≤3.0	≤5.6	Ni20Mn6	≥17.5	≥18.5
Ni36	≤1.6	≤2.0	Mn72Ni10Cu18	≥24.0	≥26.0
Ni42	≤5.7	≤5.5	Mn75Ni15Cu10	≥24.0	≥26.0
Ni50	≤10.3	≤10.2	Cu62Zn38	≥18.0	≥18.5
Ni36Nb	≤6.0	≤6.0	Cu	15.0	16.0
Ni19Cr11	≥15.4	≥16.0	Ni	13.0	13.7
Ni22Cr3	≥16.5	≥17.2	Mn15Ni10Cr	≥15.0	≥15.5
Ni19Mn7	≥17.2	≥18.0	Ni46Cr	≥14.0	≥14.5

4. 热双金属带材的其他物理性能（表 12-40）

表 12-40 热双金属带材的其他物理性能（GB/T 4461—2007）

牌 号	热敏性能			电阻率 ρ		弹性模量 E (室温) $\geq$ $\text{/(N/mm}^2\text{)}$	结合强度试验				参考值			
	比弯曲 K 标称值 $\text{/(10}^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$ $(20^{+5}_0 \sim 130^{+0}_{-5}\text{ }^\circ\text{C})$	温曲率 F 标称值 ^② $\text{/(10}^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$ $(20^{+5}_0 \sim 130^{+0}_{-5}\text{ }^\circ\text{C})$	允许偏差		标称值/ $(\mu\Omega \cdot \text{cm})$ $(20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C})$		允许 偏差	I	II			线性温度 范围 / $^\circ\text{C}$	允许使用 温度范围 / $^\circ\text{C}$	密度 $\text{/(g/cm}^3\text{)}$
			I 级	II 级				反复 弯断	扭转	反复 弯曲	弯曲			
5J20110	20.8	38.9	$\pm 5\%$	$\pm 7\%$	113	$\pm 5\%$	113000	反 复 弯 曲 至 断 裂, 断 口 处 不 得 有 分 层 现 象	不 得 出 现 开 裂、裂 纹	不 少 于 三 次, 不 得 出 现 开 裂、 裂 纹	不 得 出 现 开 裂、裂 纹	-20 ~ 150	-70 ~ 200	7.7
5J14140	14.5	28.0			140		113000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	7.5
5J15120	15.3	28.5			125		122000					-20 ~ 200	-70 ~ 250	7.6
5J1480	14.3	26.2			80.0		147000					-20 ~ 180	-70 ~ 350	8.2
5J1380 ^①	13.8	25.2			80.0		147000					-50 ~ 100	-70 ~ 350	8.1
5J1580	14.6	28.1			78.0		147000					-20 ~ 180	-70 ~ 350	8.1
5J1413	14.6	26.8			13.0		98000					-20 ~ 180	-70 ~ 250	8.3
5J1416	14.3	26.9	16.0	$\pm 10\%$	98000	-20 ~ 180	-70 ~ 250					8.3		
5J1017	10.0	18.8	$\pm 8\%$	$\pm 10\%$	17.0	$\pm 5\%$	152000					-20 ~ 180	-70 ~ 400	8.4
5J1070	10.8	19.6			70.0		152000					-20 ~ 350	-70 ~ 500	8.0
5J0756	7.8	13.1			56.0		152000					0 ~ 400	-70 ~ 500	8.2
5J1306A	13.8	25.1	$\pm 5\%$	$\pm 7\%$	6.0	$\pm 10\%$	122000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.3
5J1306B	13.5	24.8			6.0		122000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.3
5J1309A	13.9	25.6			9.0		122000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1309B	13.6	25.3			9.0		122000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1411A	14.6	27.0			11.0		122000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1411B	14.0	26.4			11.0		122000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1417A	14.6	27.0			17.0		122000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1417B	14.0	26.4			17.0		122000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2

(续)

牌 号	热敏性能				电阻率 ρ		弹性模量 E (室温) $\geq$ $\diagup$ (N/mm ²)	结合强度试验				参考值		
	比弯曲 K 标称值 $\diagup$ (10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹) (20 ⁺⁵ ₋₅ ℃)	温曲率 F 标称值 ^② $\diagup$ (10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹) (20 ⁺⁵ ₋₅ ℃)	允许偏差		标称值/ (μΩ·cm) (20℃ ± 5℃)	允许 偏差		I	II			线性温度 范围 /℃	允许使用 温度范围 /℃	密度 /(g/cm ³)
			I 级	II 级				反复 弯断	扭转	反复 弯曲	弯曲			
5J1320A	13.3	25.1	±5%	±7%	20.0	±8%	152000	反 复 弯 曲 至 断 裂, 断 口 处 不 得 有 分 层 现 象	不 得 出 现 开 裂、裂 纹	不 少 于 三 次, 不 得 出 现 开 裂、 裂 纹	不 得 出 现 开 裂、裂 纹	-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1320B	13.0	24.5			20.0		152000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1325A	13.9	25.1			25.0		152000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1325B	13.5	24.7			25.0		152000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1430A	14.6	25.6			30.0	±7%	152000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1430B	14.0	25.1			30.0		152000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1433A	14.6	25.6			33.0		152000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1433B	14.0	25.1			33.0		152000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1435A	14.6	25.6			35.0		152000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1435B	14.0	25.1			35.0		152000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1440A	14.6	25.6			40.0		152000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1440B	14.0	25.1			40.0		152000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1450A	14.6	25.6			50.0		152000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1450B	14.0	25.1			50.0		152000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1455A	14.6	25.6			55.0		152000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J1455B	14.0	25.1			55.0		152000					-20 ~ 150	-70 ~ 200	8.2
5J11075	10.8	20.2	±8%	±10%	75.0	±5%	166000	-20 ~ 200	-70 ~ 200	8.0				
5J1085	10.7	19.7	±5%	±7%	86.0		160000	-20 ~ 200	-20 ~ 400	8.0				

① 比弯曲 K 值为室温 ~ 100℃ 的测试数据。
② 温曲率的测试温度也可选用其他温度范围, 相关的数据由供需双方协商确定。

12.4.13 铁钴钕永磁合金热处理后的磁性能

1. 铁钴钕永磁合金热处理制度（表 12-41）

表 12-41 铁钴钕永磁合金热处理制度（GB/T 14989—1994）

合金牌号	回火温度/℃	保温时间/min	冷却方式
2J31	580 ~ 640	20 ~ 60	空冷
2J32			
2J33			

2. 钴钕永磁合金热处理后的磁性能（表 12-42）

表 12-42 铁钴钕永磁合金热处理后的磁性能（GB/T 14989—1994）

合金牌号	丝 材		带 材	
	矫顽力 $H_c/(kA/m)$	剩余磁感应 B_r/T	矫顽力 $H_c/(kA/m)$	剩余磁感应 B_r/T
	$\geq$		$\geq$	
2J31	23.88	1.00	17.51	1.00
2J32	27.86	0.85	23.88	0.75
2J33	31.84	0.70	27.86	0.60

12.4.14 高电阻电热合金软态丝材的物理性能

1. 高电阻电热合金的主要物理性能（表 12-43）

表 12-43 高电阻电热合金的主要物理性能（GB/T 1234—1995）

合金牌号	元件 最高 使用 温度 /℃	熔点 (近似) /℃	密度 /(g/cm ³)	电阻率 (20℃) /(μΩ · m)	比热容 /[J/ (g · °C)]	热导率/ [W/(m · °C)]	平均线胀 系数(20 ~ 1000℃) $\bar{\alpha}_l$ /(10 ⁻⁶ /°C)	组织	磁性
Cr20Ni80	1200	1400	8.40	1.09	0.440	16.75	18.0	奥氏体	非磁性
Cr30Ni70	1250	1380	8.10	1.18	0.461	12.56	17.0	奥氏体	非磁性
Cr15Ni60	1150	1390	8.20	1.12	0.494	12.56	17.0	奥氏体	非磁性
Cr20Ni35	1100	1390	7.90	1.04	0.500	12.17	19.0	奥氏体	弱磁性
Cr20Ni30	1100	1390	7.90	1.04	0.500	12.17	19.0	奥氏体	弱磁性

(续)

合金牌号	元件 最高 使用 温度 /℃	熔点 (近似) /℃	密度 /(g/cm ³)	电阻率 (20℃) /(μΩ · m)	比热容 /[J/ (g·℃)]	热导率/ [W/(m· ℃)]	平均线胀 系数(20 ~1000℃) $\bar{\alpha}_l$ /(10 ⁻⁶ /℃)	组织	磁性
1Cr13Al4	950	1450	7.40	1.25	0.490	14.64	15.4	铁素体	磁性
0Cr25Al5	1250	1500	7.10	1.42	0.494	12.80	16.0	铁素体	磁性
0Cr23Al5	1250	1500	7.25	1.35	0.460	16.72	15.0	铁素体	磁性
0Cr21Al6	1250	1500	7.16	1.42	0.520	17.56	14.7	铁素体	磁性
1Cr20Al3	1100	1500	7.35	1.23	0.490	13.02	13.5	铁素体	磁性
0Cr21Al6Nb	1350	1510	7.10	1.43	0.494	12.80	16.0	铁素体	磁性
0Cr27Al7Mo2	1400	1520	7.10	1.53	0.494	12.56	16.0	铁素体	磁性

2. 高电阻电热合金软态丝材的室温电阻率（表 12-44）

表 12-44 高电阻电热合金软态丝材的室温电阻率（GB/T 1234—1995）

合金牌号	直径/mm	电阻率/(μΩ·m)20℃
Cr20Ni80	<0.50	1.09±0.05
	0.50~3.00	1.13±0.05
	>3.00	1.14±0.05
Cr30Ni70	<0.50	1.18±0.05
	≥0.50	1.20±0.05
Cr15Ni60	<0.50	1.12±0.05
	≥0.50	1.15±0.05
Cr20Ni35	<0.50	1.04±0.05
Cr20Ni30	≥0.50	1.06±0.05
1Cr13Al4	0.03~8.00	1.25±0.08
0Cr25Al5		1.42±0.07
0Cr23Al5		1.35±0.06
0Cr21Al6		1.42±0.07
1Cr20Al3		1.23±0.06
0Cr21Al6Nb		1.45±0.07
0Cr27Al7Mo2	0.30~8.00	1.53±0.07

3. 高电阻电热合金的电阻温度因数（表 12-45）

表 12-45 高电阻电热合金的电阻温度因数（GB/T 1234—1995）

合金牌号	20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃	1000℃	1100℃	1200℃	1300℃
Cr20Ni80	1.000	1.006	1.012	1.018	1.025	1.026	1.018	1.010	1.008	1.010	1.014	1.021	1.025	—
Cr15Ni60	1.000	1.011	1.024	1.038	1.052	1.064	1.069	1.073	1.078	1.088	1.095	1.109	—	—
Cr20Ni35	1.000	1.029	1.061	1.090	1.115	1.139	1.157	1.173	1.188	1.208	1.219	1.228	—	—
Cr20Ni30	1.000	1.023	1.052	1.079	1.103	1.125	1.141	1.158	1.173	1.187	1.201	1.214	1.226	—
0Cr27Al7Mo2	1.000	0.992	0.986	0.981	0.978	0.976	0.974	0.972	0.970	0.969	0.968	0.968	0.967	0.967
0Cr21Al6Nb	1.000	0.997	0.996	0.994	0.991	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	—
0Cr25Al5	1.000	1.002	1.005	1.008	1.013	1.021	1.030	1.038	1.040	1.042	1.044	1.046	1.047	—
0Cr21Al6	1.000	1.000	1.002	1.006	1.011	1.020	1.037	1.043	1.046	1.049	1.052	1.055	1.058	—
1Cr20Al3	1.000	1.011	1.025	1.042	1.061	1.085	1.120	1.142	1.154	1.164	1.172	1.180	1.186	—
1Cr13Al4	1.000	1.005	1.014	1.028	1.044	1.064	1.090	1.120	1.132	1.142	1.150	—	—	—
0Cr23Al5	1.000	1.002	1.007	1.014	1.024	1.036	1.056	1.064	1.070	1.074	1.078	1.081	1.084	—
Cr30Ni70	1.000	1.007	1.016	1.028	1.038	1.044	1.036	1.030	1.028	1.029	1.033	1.037	1.043	—

4. 高电阻电热合金丝材的每米电阻均匀性（表 12-46）

表 12-46 高电阻电热合金丝材的每米电阻均匀性（GB/T 1234—1995）

每米电阻均匀性	
每轴（盘）丝材任意部位	每卷冷轧带材任意部位
≤4%	≤5%

5. 高电阻电热合金软态丝材的每米电阻值 (表 12-47)

表 12-47 高电阻电热合金软态丝材的每米电阻值 (GB/T 1234—1995)

直径/mm	每米电阻值/ (Ω /m)											
	Cr20Ni80			Cr30Ni70			Cr15Ni60			Cr20Ni35		
	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)
0.03	1542	1388 ~ 1696	±10	1669	1502 ~ 1836	±10	1584	1426 ~ 1742	±10	1471	1324 ~ 1618	±10
0.04	867.4	780.7 ~ 954.1	±10	939.0	845.1 ~ 1033	±10	891.3	802.2 ~ 980.4	±10	827.6	744.8 ~ 910.4	±10
0.05	555.1	499.6 ~ 610.6	±10	601.0	540.9 ~ 661.1	±10	570.4	513.4 ~ 627.4	±10	529.7	476.7 ~ 582.7	±10
0.06	385.5	347.0 ~ 424.1	±10	417.3	375.6 ~ 459.0	±10	396.1	356.5 ~ 435.7	±10	367.8	331.0 ~ 404.6	±10
0.07	283.2	260.5 ~ 305.9	±8	306.6	282.1 ~ 331.1	±8	291.0	267.7 ~ 314.3	±8	270.2	248.6 ~ 291.8	±8
0.08	216.8	199.5 ~ 234.1	±8	234.8	216.0 ~ 253.6	±8	222.8	205.0 ~ 240.6	±8	206.9	190.3 ~ 223.5	±8
0.09	171.3	157.6 ~ 185.0	±8	185.5	170.7 ~ 200.3	±8	176.1	162.0 ~ 190.2	±8	163.5	150.4 ~ 176.6	±8
0.10	138.8	127.7 ~ 149.9	±8	150.2	138.2 ~ 162.2	±8	142.6	131.2 ~ 154.0	±8	132.4	121.8 ~ 143.0	±8
0.11	114.7	105.5 ~ 123.9	±8	124.2	114.3 ~ 134.1	±8	117.9	108.5 ~ 127.3	±8	109.4	100.6 ~ 118.2	±8
0.12	96.38	88.67 ~ 104.1	±8	104.3	95.96 ~ 112.6	±8	99.03	91.11 ~ 107.0	±8	91.96	84.60 ~ 99.32	±8
0.13	82.12	76.37 ~ 87.87	±7	88.90	82.68 ~ 95.12	±7	84.38	78.47 ~ 90.29	±7	78.35	72.87 ~ 83.83	±7
0.14	70.81	65.85 ~ 75.77	±7	76.65	71.28 ~ 82.02	±7	72.76	67.67 ~ 77.85	±7	67.56	62.83 ~ 72.29	±7
0.15	61.68	57.36 ~ 66.00	±7	66.77	62.10 ~ 71.44	±7	63.38	58.94 ~ 67.82	±7	58.85	54.73 ~ 62.97	±7
0.16	54.21	50.42 ~ 58.00	±7	58.69	54.58 ~ 62.80	±7	55.70	51.80 ~ 59.60	±7	51.73	48.11 ~ 55.35	±7
0.17	48.02	44.66 ~ 51.38	±7	51.99	48.35 ~ 55.63	±7	49.34	45.89 ~ 52.79	±7	45.82	42.61 ~ 49.03	±7
0.18	42.83	40.26 ~ 45.40	±6	46.37	43.59 ~ 49.15	±6	44.01	41.37 ~ 46.65	±6	40.87	38.42 ~ 43.32	±6
0.19	38.44	36.13 ~ 40.75	±6	41.62	39.12 ~ 44.12	±6	39.50	37.13 ~ 41.87	±6	36.68	34.48 ~ 38.88	±6
0.20	34.70	32.62 ~ 36.78	±6	37.56	35.31 ~ 39.81	±6	35.65	33.51 ~ 37.79	±6	33.10	31.11 ~ 35.09	±6
0.22	28.67	26.95 ~ 30.39	±6	31.04	29.18 ~ 32.90	±6	29.46	27.69 ~ 31.23	±6	27.36	25.72 ~ 29.00	±6
0.25	22.21	20.88 ~ 23.54	±6	24.04	22.60 ~ 25.48	±6	22.82	21.45 ~ 24.19	±6	21.19	19.92 ~ 22.46	±6

(续)

直径/mm	每米电阻值/ (Ω /m)											
	Cr20Ni80			Cr30Ni70			Cr15Ni60			Cr20Ni35		
	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)
0.28	17.70	16.64 ~ 18.76	± 6	19.16	18.01 ~ 20.31	± 6	18.19	17.10 ~ 19.28	± 6	16.89	15.88 ~ 17.90	± 6
0.30	15.42	14.49 ~ 16.35	± 6	16.69	15.69 ~ 17.69	± 6	15.84	14.89 ~ 16.79	± 6	14.71	13.83 ~ 15.59	± 6
0.32	13.55	12.74 ~ 14.36	± 6	14.67	13.79 ~ 15.55	± 6	13.93	13.09 ~ 14.77	± 6	12.93	12.15 ~ 13.71	± 6
0.35	11.33	10.76 ~ 11.90	± 5	12.26	11.65 ~ 12.87	± 5	11.64	11.06 ~ 12.22	± 5	10.81	10.27 ~ 11.35	± 5
0.38	9.611	9.130 ~ 10.09	± 5	10.40	9.880 ~ 10.92	± 5	9.876	9.382 ~ 10.37	± 5	9.170	8.712 ~ 9.629	± 5
0.40	8.674	8.240 ~ 9.108	± 5	9.390	8.921 ~ 9.860	± 5	8.913	8.467 ~ 9.359	± 5	8.276	7.862 ~ 8.690	± 5
0.42	7.868	7.475 ~ 8.261	± 5	8.517	8.091 ~ 8.943	± 5	8.084	7.680 ~ 8.488	± 5	7.507	7.132 ~ 7.882	± 5
0.45	6.853	6.510 ~ 7.196	± 5	7.419	7.048 ~ 7.790	± 5	7.042	6.690 ~ 7.394	± 5	6.539	6.212 ~ 6.866	± 5
0.48	6.024	5.723 ~ 6.325	± 5	6.521	6.195 ~ 6.847	± 5	6.189	5.880 ~ 6.498	± 5	5.747	5.460 ~ 6.034	± 5
0.50	5.551	5.273 ~ 5.829	± 5	6.010	5.710 ~ 6.311	± 5	5.704	5.419 ~ 5.989	± 5	5.297	5.032 ~ 5.562	± 5
0.55	4.756	4.518 ~ 4.994	± 5	5.051	4.798 ~ 5.304	± 5	4.840	4.598 ~ 5.082	± 5	4.462	4.239 ~ 4.685	± 5
0.60	3.997	3.797 ~ 4.197	± 5	4.244	4.032 ~ 4.456	± 5	4.067	3.864 ~ 4.270	± 5	3.749	3.562 ~ 3.936	± 5
0.65	3.405	3.235 ~ 3.575	± 5	3.616	3.435 ~ 3.797	± 5	3.466	3.293 ~ 3.639	± 5	3.194	3.034 ~ 3.354	± 5
0.70	2.936	2.789 ~ 3.083	± 5	3.118	2.962 ~ 3.274	± 5	2.988	2.839 ~ 3.137	± 5	2.754	2.616 ~ 2.892	± 5
0.75	2.558	2.430 ~ 2.686	± 5	2.716	2.580 ~ 2.852	± 5	2.603	2.473 ~ 2.733	± 5	2.399	2.279 ~ 2.519	± 5
0.80	2.248	2.136 ~ 2.360	± 5	2.387	2.268 ~ 2.506	± 5	2.288	2.174 ~ 2.402	± 5	2.109	2.004 ~ 2.214	± 5
0.85	1.991	1.891 ~ 2.091	± 5	2.115	2.009 ~ 2.221	± 5	2.027	1.926 ~ 2.128	± 5	1.868	1.775 ~ 1.961	± 5
0.90	1.776	1.687 ~ 1.865	± 5	1.886	1.792 ~ 1.980	± 5	1.808	1.718 ~ 1.898	± 5	1.666	1.583 ~ 1.749	± 5
0.95	1.594	1.514 ~ 1.674	± 5	1.693	1.603 ~ 1.778	± 5	1.622	1.541 ~ 1.703	± 5	1.495	1.420 ~ 1.570	± 5
1.00	1.439	1.367 ~ 1.511	± 5	1.528	1.452 ~ 1.604	± 5	1.464	1.391 ~ 1.537	± 5	1.350	1.283 ~ 1.418	± 5

(续)

直径/mm	每米电阻值/ (Ω/m)											
	Cr20Ni30			1Cr13Al4			0Cr20Al3			0Cr23Al5		
	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)
0.03	1471	1324 ~ 1618	±10	1768	1591 ~ 1945	±10	1740	1566 ~ 1914	±10	1910	1719 ~ 2101	±10
0.04	827.6	744.8 ~ 910.4	±10	994.7	895.2 ~ 1094	±10	978.8	880.9 ~ 1077	±10	1074	966.6 ~ 1181	±10
0.05	529.7	476.7 ~ 582.7	±10	636.6	572.9 ~ 700.3	±10	626.4	563.8 ~ 689.0	±10	687.5	618.8 ~ 756.3	±10
0.06	367.8	331.0 ~ 404.6	±10	442.1	397.9 ~ 486.3	±10	435.0	391.5 ~ 478.5	±10	477.5	429.8 ~ 525.3	±10
0.07	270.2	248.6 ~ 291.8	±8	324.8	298.8 ~ 350.8	±8	319.6	294.0 ~ 345.2	±8	350.8	322.7 ~ 378.9	±8
0.08	206.9	190.3 ~ 223.5	±8	248.7	228.8 ~ 268.6	±8	244.7	225.1 ~ 264.3	±8	268.6	247.1 ~ 290.1	±8
0.09	163.5	150.4 ~ 176.6	±8	196.5	180.8 ~ 212.2	±8	193.3	177.8 ~ 208.8	±8	212.2	195.2 ~ 229.2	±8
0.10	132.4	121.8 ~ 143.0	±8	159.2	146.5 ~ 171.9	±8	156.6	144.1 ~ 169.1	±8	171.9	158.1 ~ 185.7	±8
0.11	109.4	100.6 ~ 118.2	±8	131.5	121.0 ~ 142.0	±8	129.4	119.0 ~ 139.8	±8	142.1	130.7 ~ 153.5	±8
0.12	91.96	84.60 ~ 99.32	±8	110.5	101.7 ~ 119.3	±8	108.8	100.1 ~ 117.5	±8	119.4	109.8 ~ 129.0	±8
0.13	78.35	72.87 ~ 83.83	±7	94.17	87.58 ~ 100.8	±7	92.67	86.18 ~ 99.16	±7	101.7	94.58 ~ 108.8	±7
0.14	67.56	62.83 ~ 72.29	±7	81.20	75.52 ~ 86.88	±7	79.90	74.31 ~ 85.49	±7	87.70	81.56 ~ 93.84	±7
0.15	58.85	54.73 ~ 62.97	±7	70.74	65.79 ~ 75.69	±7	69.60	64.73 ~ 74.47	±7	76.39	71.04 ~ 81.74	±7
0.16	51.73	48.11 ~ 55.35	±7	62.17	57.82 ~ 66.52	±7	61.18	56.90 ~ 65.46	±7	67.14	62.44 ~ 71.84	±7
0.17	45.82	42.61 ~ 49.03	±7	55.07	51.22 ~ 58.92	±7	54.19	50.40 ~ 57.98	±7	59.48	55.32 ~ 63.64	±7
0.18	40.87	38.42 ~ 43.32	±6	49.12	46.17 ~ 52.07	±6	48.34	45.44 ~ 51.24	±6	53.05	49.87 ~ 56.23	±6
0.19	36.68	34.48 ~ 38.88	±6	44.09	41.44 ~ 46.74	±6	43.38	40.78 ~ 45.98	±6	47.61	44.75 ~ 50.47	±6
0.20	33.10	31.11 ~ 35.09	±6	39.79	37.40 ~ 42.18	±6	39.15	36.80 ~ 41.50	±6	42.97	40.39 ~ 45.55	±6
0.22	27.36	25.72 ~ 29.00	±6	32.88	30.91 ~ 34.85	±6	32.36	30.42 ~ 34.30	±6	35.51	33.38 ~ 37.64	±6
0.25	21.19	19.92 ~ 22.46	±6	25.46	23.93 ~ 26.99	±6	25.06	23.56 ~ 26.56	±6	27.50	25.85 ~ 29.15	±6

(续)

直径/mm	每米电阻值/ (Ω/m)											
	Cr20Ni30			1Cr13Al4			0Cr20Al3			0Cr23Al5		
	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)
0.28	16.89	15.88 ~ 17.90	± 6	20.30	19.08 ~ 21.52	± 6	19.98	18.78 ~ 21.18	± 6	21.92	20.60 ~ 23.24	± 6
0.30	14.71	13.83 ~ 15.59	± 6	17.68	16.62 ~ 18.74	± 6	17.40	16.36 ~ 18.44	± 6	19.10	17.95 ~ 20.25	± 6
0.32	12.93	12.15 ~ 13.71	± 6	15.54	14.61 ~ 16.47	± 6	15.29	14.37 ~ 16.21	± 6	16.79	15.78 ~ 17.80	± 6
0.35	10.81	10.27 ~ 11.35	± 5	12.99	12.34 ~ 13.64	± 5	12.78	12.14 ~ 13.42	± 5	14.03	13.33 ~ 14.73	± 5
0.38	9.170	8.712 ~ 9.629	± 5	11.02	10.47 ~ 11.57	± 5	10.85	10.31 ~ 11.39	± 5	11.90	11.31 ~ 12.50	± 5
0.40	8.276	7.862 ~ 8.690	± 5	9.947	9.450 ~ 10.44	± 5	9.788	9.299 ~ 10.28	± 5	10.74	10.20 ~ 11.28	± 5
0.42	7.507	7.132 ~ 7.882	± 5	9.022	8.571 ~ 9.473	± 5	8.878	8.434 ~ 9.322	± 5	9.744	9.257 ~ 10.23	± 5
0.45	6.539	6.212 ~ 6.866	± 5	7.860	7.467 ~ 8.253	± 5	7.734	7.347 ~ 8.121	± 5	8.488	8.064 ~ 8.912	± 5
0.48	5.747	5.460 ~ 6.034	± 5	6.908	6.563 ~ 7.253	± 5	6.797	6.457 ~ 7.137	± 5	7.460	7.087 ~ 7.833	± 5
0.50	5.297	5.032 ~ 5.562	± 5	6.366	6.048 ~ 6.684	± 5	6.264	5.951 ~ 6.577	± 5	6.875	6.531 ~ 7.219	± 5
0.55	4.462	4.239 ~ 4.685	± 5	5.261	4.998 ~ 5.524	± 5	5.177	4.918 ~ 5.436	± 5	5.682	5.398 ~ 5.966	± 5
0.60	3.749	3.562 ~ 3.936	± 5	4.421	4.200 ~ 4.642	± 5	4.350	4.133 ~ 4.568	± 5	4.775	4.536 ~ 5.014	± 5
0.65	3.194	3.034 ~ 3.354	± 5	3.767	3.579 ~ 3.955	± 5	3.707	3.522 ~ 3.892	± 5	4.068	3.865 ~ 4.271	± 5
0.70	2.754	2.616 ~ 2.892	± 5	3.248	3.086 ~ 3.410	± 5	3.196	3.036 ~ 3.356	± 5	3.508	3.333 ~ 3.683	± 5
0.75	2.399	2.279 ~ 2.519	± 5	2.829	2.688 ~ 2.970	± 5	2.784	2.645 ~ 2.923	± 5	3.056	2.903 ~ 3.209	± 5
0.80	2.109	2.004 ~ 2.214	± 5	2.487	2.363 ~ 2.611	± 5	2.447	2.325 ~ 2.569	± 5	2.686	2.552 ~ 2.820	± 5
0.85	1.868	1.775 ~ 1.961	± 5	2.203	2.093 ~ 2.313	± 5	2.168	2.060 ~ 2.276	± 5	2.379	2.260 ~ 2.498	± 5
0.90	1.666	1.583 ~ 1.749	± 5	1.965	1.867 ~ 2.063	± 5	1.933	1.836 ~ 2.030	± 5	2.122	2.016 ~ 2.228	± 5
0.95	1.495	1.420 ~ 1.570	± 5	1.763	1.675 ~ 1.851	± 5	1.735	1.648 ~ 1.822	± 5	1.905	1.810 ~ 2.000	± 5
1.00	1.350	1.283 ~ 1.418	± 5	1.592	1.512 ~ 1.672	± 5	1.566	1.488 ~ 1.644	± 5	1.719	1.633 ~ 1.805	± 5

(续)

直径/mm	每米电阻值/ (Ω/m)											
	0Cr21Al6			0Cr25Al5			0Cr21Al6Nb			0Cr27Al7Mo2		
	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)
0.03	2009	1808 ~ 2210	± 10	2009	1808 ~ 2210	± 10	2051	1846 ~ 2256	± 10	2165	1949 ~ 2382	± 10
0.04	1130	1017 ~ 1243	± 10	1130	1017 ~ 1243	± 10	1154	1039 ~ 1269	± 10	1218	1096 ~ 1340	± 10
0.05	723.2	650.9 ~ 795.5	± 10	723.2	650.9 ~ 795.5	± 10	738.5	664.7 ~ 812.4	± 10	779.2	701.3 ~ 857.1	± 10
0.06	502.2	452.0 ~ 552.4	± 10	502.2	452.0 ~ 552.4	± 10	512.8	461.5 ~ 564.1	± 10	541.1	487.0 ~ 595.2	± 10
0.07	369.0	339.5 ~ 398.5	± 8	369.0	339.5 ~ 398.5	± 8	376.8	346.7 ~ 406.9	± 8	397.6	365.8 ~ 429.4	± 8
0.08	282.5	259.9 ~ 305.1	± 8	282.5	259.9 ~ 305.1	± 8	288.5	265.4 ~ 311.6	± 8	304.4	280.0 ~ 328.8	± 8
0.09	223.2	205.3 ~ 241.1	± 8	223.2	205.3 ~ 241.1	± 8	227.9	209.7 ~ 246.1	± 8	240.5	221.3 ~ 259.7	± 8
0.10	180.8	166.3 ~ 195.3	± 8	180.8	166.3 ~ 195.3	± 8	184.6	169.8 ~ 199.4	± 8	194.8	179.2 ~ 210.4	± 8
0.11	149.4	137.4 ~ 161.4	± 8	149.4	137.4 ~ 161.4	± 8	152.6	140.4 ~ 164.8	± 8	161.0	148.1 ~ 173.9	± 8
0.12	125.6	115.6 ~ 135.6	± 8	125.6	115.6 ~ 135.6	± 8	128.2	117.9 ~ 138.5	± 8	135.3	124.5 ~ 146.1	± 8
0.13	107.0	99.51 ~ 114.5	± 7	107.0	99.51 ~ 114.5	± 7	109.2	101.6 ~ 116.8	± 7	115.3	107.2 ~ 123.4	± 7
0.14	92.24	85.78 ~ 98.70	± 7	92.24	85.78 ~ 98.70	± 7	94.19	87.60 ~ 100.8	± 7	99.39	92.43 ~ 106.3	± 7
0.15	80.36	74.73 ~ 85.99	± 7	80.36	74.73 ~ 85.99	± 7	82.05	76.31 ~ 87.79	± 7	86.58	80.52 ~ 92.64	± 7
0.16	70.63	65.69 ~ 75.57	± 7	70.63	65.59 ~ 75.57	± 7	72.12	67.07 ~ 77.17	± 7	76.10	70.77 ~ 81.43	± 7
0.17	62.56	58.18 ~ 66.94	± 7	62.56	58.18 ~ 66.94	± 7	63.88	59.41 ~ 68.35	± 7	67.41	62.69 ~ 72.13	± 7
0.18	55.80	52.45 ~ 59.15	± 6	55.80	52.45 ~ 59.15	± 6	56.98	53.56 ~ 60.40	± 6	60.13	56.52 ~ 63.74	± 6
0.19	50.08	47.08 ~ 53.08	± 6	50.08	47.08 ~ 53.08	± 6	51.14	48.07 ~ 54.21	± 6	53.96	50.72 ~ 57.20	± 6
0.20	45.20	42.49 ~ 47.91	± 6	45.20	42.49 ~ 47.91	± 6	46.15	43.38 ~ 48.92	± 6	48.70	45.78 ~ 51.62	± 6
0.22	37.36	35.12 ~ 39.60	± 6	37.36	35.12 ~ 39.60	± 6	38.14	35.85 ~ 40.43	± 6	40.25	37.84 ~ 42.67	± 6
0.25	28.93	27.19 ~ 30.67	± 6	28.93	27.19 ~ 30.67	± 6	29.54	27.77 ~ 31.31	± 6	31.17	29.30 ~ 33.04	± 6

(续)

直径/mm	每米电阻值/ (Ω/m)											
	0Cr21Al6			0Cr25Al5			0Cr21Al6Nb			0Cr27Al7Mo2		
	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)	中值	范围	偏差(%)
0.28	23.06	21.68 ~ 24.44	±6	23.06	21.68 ~ 24.44	±6	23.55	22.14 ~ 24.96	±6	24.85	23.36 ~ 26.34	±6
0.30	20.09	18.88 ~ 21.30	±6	20.09	18.88 ~ 21.30	±6	20.51	19.28 ~ 21.74	±6	21.65	20.35 ~ 22.95	±6
0.32	17.66	16.60 ~ 18.72	±6	17.66	16.60 ~ 18.72	±6	18.03	16.95 ~ 19.11	±6	19.02	17.88 ~ 20.16	±6
0.35	14.76	14.02 ~ 15.50	±5	14.76	14.02 ~ 15.50	±5	15.07	14.32 ~ 15.82	±5	15.90	15.11 ~ 16.70	±5
0.38	12.52	11.89 ~ 13.15	±5	12.52	11.89 ~ 13.15	±5	12.79	12.15 ~ 13.43	±5	13.49	12.82 ~ 14.16	±5
0.40	11.30	10.74 ~ 11.87	±5	11.30	10.74 ~ 11.87	±5	11.54	10.96 ~ 12.12	±5	12.18	11.57 ~ 12.79	±5
0.42	10.25	9.738 ~ 10.76	±5	10.25	9.738 ~ 10.76	±5	10.47	9.947 ~ 10.99	±5	11.04	10.49 ~ 11.59	±5
0.45	8.928	8.482 ~ 9.374	±5	8.928	8.482 ~ 9.374	±5	9.117	8.661 ~ 9.573	±5	9.620	9.139 ~ 10.10	±5
0.48	7.847	7.455 ~ 8.239	±5	7.847	7.455 ~ 8.239	±5	8.013	7.612 ~ 8.414	±5	8.455	8.032 ~ 8.878	±5
0.50	7.232	6.870 ~ 7.594	±5	7.232	6.870 ~ 7.594	±5	7.385	7.016 ~ 7.754	±5	7.792	7.402 ~ 8.182	±5
0.55	5.977	5.678 ~ 6.276	±5	5.977	5.678 ~ 6.276	±5	6.103	5.798 ~ 6.408	±5	6.440	6.118 ~ 6.762	±5
0.60	5.022	4.771 ~ 5.273	±5	5.022	4.771 ~ 5.273	±5	5.128	4.872 ~ 5.384	±5	5.411	5.140 ~ 5.682	±5
0.65	4.279	4.065 ~ 4.493	±5	4.279	4.065 ~ 4.493	±5	4.370	4.152 ~ 4.589	±5	4.611	4.380 ~ 4.842	±5
0.70	3.690	3.506 ~ 3.875	±5	3.690	3.506 ~ 3.875	±5	3.768	3.580 ~ 3.956	±5	3.976	3.777 ~ 4.175	±5
0.75	3.214	3.053 ~ 3.375	±5	3.214	3.053 ~ 3.375	±5	3.282	3.118 ~ 3.446	±5	3.463	3.290 ~ 3.636	±5
0.80	2.825	2.684 ~ 2.966	±5	2.825	2.684 ~ 2.966	±5	2.885	2.741 ~ 3.029	±5	3.044	2.892 ~ 3.196	±5
0.85	2.502	2.377 ~ 2.627	±5	2.502	2.377 ~ 2.627	±5	2.555	2.427 ~ 2.683	±5	2.696	2.561 ~ 2.831	±5
0.90	2.232	2.120 ~ 2.344	±5	2.232	2.120 ~ 2.344	±5	2.279	2.165 ~ 2.393	±5	2.405	2.285 ~ 2.525	±5
0.95	2.003	1.903 ~ 2.103	±5	2.003	1.903 ~ 2.103	±5	2.046	1.944 ~ 2.148	±5	2.159	2.051 ~ 2.267	±5
1.00	1.808	1.718 ~ 1.898	±5	1.808	1.718 ~ 1.898	±5	1.846	1.754 ~ 1.938	±5	1.948	1.851 ~ 2.045	±5

6. 高电阻电热合金丝材的快速寿命（表 12-48）

表 12-48 高电阻电热合金丝材的快速寿命（GB/T 1234—1995）

合金牌号	试验温度/℃	快速寿命值/h ≥	合金牌号	试验温度/℃	快速寿命值/h ≥
Cr20Ni80	1200	80	0Cr23Al5	1300	80
Cr30Ni70	1250	50	0Cr21Al6	1300	80
Cr15Ni60	1150	80	1Cr20Al3	1250	80
Cr20Ni35	1100	80	0Cr21Al6Nb	1350	50
Cr20Ni30	1100	80	0Cr27Al7Mo2	1350	50
0Cr25Al5	1300	80			

12.4.15 高饱和、磁温度补偿、耐蚀、铁铝、恒磁导率软磁合金

1. 高饱和、磁温度补偿、耐蚀、铁铝、恒磁导率软磁合金的热处理制度（表 12-49）

表 12-49 高饱和、磁温度补偿、耐蚀、铁铝、恒磁导率
软磁合金的热处理制度（GB/T 14986—2008）

合金牌号	加热温度/℃	保温时 间/h	冷却制度	备 注
1J66	第一步：1200	3	以 100℃/h 的速度冷却到 600℃。然后以不小于 400℃/h 的速度冷至 300℃出炉	—
	第二步 在 16×10^4 A/m 的横向磁场中于 650 回火	1	以 50 ~ 100℃/h 的速度冷却至 200℃出炉	
1J6	950 ~ 1050	2 ~ 3	以 100 ~ 150℃/h 的速度冷却至 200℃出炉	适用于做磁阀铁芯
	900 ~ 1000	2 ~ 3	冷却至 250℃出炉	
1J12	1050 ~ 1200	2 ~ 3	以 100 ~ 150℃/h 的速度冷却到 500℃，然后快冷（吹风）至 200℃出炉	—
1J13	900 ~ 950	2	以 100℃/h 的速度冷却到 650℃，然后以不大于 60℃/h 的速度冷却至 200℃出炉	—
	780 ~ 800	2	以 100℃/h 的速度冷却到 650℃，然后以不大于 60℃/h 的速度冷却至 200℃出炉	适用于制做要求传播声速稳定的元件
1J16	950 保温 4h，再随炉升温到 1050	1.5	炉冷到 650℃冰水淬火	磁性能要求不高时可在空气环境下热处理

(续)

合金牌号	加热温度/℃	保温时间/h	冷却制度	备注
1J30、1J31、 1J32、1J33、 1J38	800	2	炉冷至 200℃ 出炉	—
1J36、1J116、 1J117	1150 ~ 1250	2 ~ 6	以 100 ~ 200℃/h 的速度冷却至 450 ~ 650℃ 以后, 快冷至 200℃ 出炉	—
1J22	850 ~ 900	3 ~ 6	以 50 ~ 100℃/h 的速度冷却到 750℃, 然后以 180 ~ 240℃/h 的速度冷却至 300℃ 出炉	适用于冷轧带材试样
	1100	3 ~ 6	以 50 ~ 100℃/h 的速度冷却到 850℃ 保温 3h, 然后以 30℃/h 的速度冷却到 700℃, 再以 200℃/h 的速度冷却至 300℃ 出炉	适用于锻坯取的试样
	850	4	以 50℃/h 的速度冷却到 750℃ 保温 3h, 然后以 200℃/h 的速度冷却到 300℃ 出炉。由保温 (750℃) 开始加 1200 ~ 1600A/m 的直流磁场	适用于要求在较低磁场下具有较高磁感应强度、较低矫顽力、较高矩形比的情况

2. 1J22 合金试样经热处理后的磁性能 (表 12-50)

表 12-50 1J22 合金试样经热处理后的磁性能 (GB/T 14986—2008)

合金 牌号	成品 种类	在不同磁场强度(A/m)时的磁感应强度/T						矫顽力
		B_{400}	B_{800}	B_{1600}	B_{2400}	B_{4000}	B_{8000}	$H_c/(A/m)$
		$\geq$						$\leq$
1J22	冷轧带材	1.70	1.90	2.00	2.10	2.20	2.25	110
	冷拉丝材、热锻 (轧)扁材和棒材	1.60	1.70	1.80	2.05	2.15	2.20	144

3. 1J30、1J31、1J32、1J33、1J38 合金的磁性能 (表 12-51)

表 12-51 1J30、1J31、1J32、1J33、1J38 合金的磁性能 (GB/T 14986—2008)

合金 牌号	在磁场强度为 8000A/m 时不同 温度下的磁感应强度 B/T					磁感应强度降落差/T		
	-20℃	20℃	40℃	60℃	80℃	$B(-20℃) \sim B(20℃)$	$B(20℃) \sim B(40℃)$	$B(20℃) \sim B(80℃)$
1J30	0.40 ~ 0.60	0.20 ~ 0.45	—	0.02 ~ 0.13	—	—	—	—
1J31	0.60 ~ 0.85	0.40 ~ 0.65	—	0.15 ~ 0.45	—	—	—	—

(续)

合金 牌号	在磁场强度为 8000 A/m 时不同 温度下的磁感应强度 B /T					磁感应强度降落差/T		
	-20℃	20℃	40℃	60℃	80℃	$B(-20℃) \sim B(20℃)$	$B(20℃) \sim B(40℃)$	$B(20℃) \sim B(80℃)$
1J32	0.80 ~ 1.10	0.60 ~ 0.95	—	0.40 ~ 0.75	—	—	—	—
1J33	—	0.40 ~ 0.70	—	—	0.10 ~ 0.40	—	—	0.22 ~ 0.42
1J38	0.25 ~ 0.42	0.05 ~ 0.24	0.015 ~ 0.12	—	—	0.16 ~ 0.24	0.035 ~ 0.15	—

4. 1J36、1J116、1J117 合金的磁性能（表 12-52）

表 12-52 1J36、1J116、1J117 合金的磁性能（GB/T 14986—2008）

合金 牌号	不同磁场强度 (A/m) 时的磁感应强度值/T					矫顽力
	B_{240}	B_{1240}	B_{800}	B_{3200}	B_{13200}	$H_c/(A/m)$
	$\geq$					$\leq$
1J36	0.8	0.3	—	1.2	0.35	16
1J116	1.0	—	1.1	1.3	—	80
1J117	0.9	—	1.0	1.25	—	80

5. 1J6 合金试样经热处理后的磁性能（表 12-53）

表 12-53 1J6 合金试样经热处理后的磁性能（GB/T 14986—2008）

合金 牌号	产品种类	公称厚度 或直径 /mm	在不同磁场强度 (A/ m)时的磁感应强度/T			矫顽力 (在饱 和磁感应强度 下) H_c' (A/m)	比铁损/(W/kg)	
			B_{500}	B_{1000}	B_{2500}		$P(0.75/400)$	$P(1/400)$
			≥				≤	
1J6	冷轧带材	0.10 ~ 0.50	1.15	1.25	1.35	48	12	21
	热轧 (锻) 棒材	8 ~ 100	1.10	1.15	1.30	64	—	—

注：比铁损 $P(0.75/400)$ 和 $P(1/400)$ 分别表示频率为 400 Hz、磁感应强度峰值为 0.75 T 和 1 T 时比铁损。

6. 1J12、1J13、1J16 合金试样经热处理后的磁性能（表 12-54）

表 12-54 1J12、1J13、1J16 合金试样经热处理后的磁性能

(GB/T 14986—2008)

合金 牌号	产品 种类	公称厚度 /mm	在 0.4 A/m 磁场中的 磁导率 $\mu_{0.4}$	在 0.8 A/m 磁场中的 磁导率 $\mu_{0.8}$	最大磁 导率 μ_m	饱和和磁致 伸缩系 数 ^① λ_s	在不同磁场 强度(A/m) 时 的磁感应 强度/T		矫顽力 (在饱和 磁感应 强度)下 H_c /(A/m)	剩余磁 感应强 度 ^② B_r /T	
			mH/m				B_{2400}	B_{3200}			
			$\geq$				$\leq$				
1J12	温 轧 带 材	0.20 ~ 1.00	—	3.1	31.3	—	1.2	1.3	12	0.5	
1J13		0.20 ~ 1.00	—	—	—	35×10^{-6}	—	—	—	—	
1J16		0.20 ~ <0.35	5	—	62.5	—	0.65	—	3.2	0.4	
		0.35 ~ 1.00	7.5	—	37.5	—	0.65	—	3.2	0.4	

① 饱和磁致伸缩系数 λ_s 用 $(24 \sim 32) \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 磁场强度测量。

② 剩余磁感应强度在 2400 A/m 磁场下测量。

7. 1J66 合金试样经热处理后的磁性能 (表 12-55)

表 12-55 1J66 合金试样经热处理后的磁性能 (GB/T 14986—2008)

合金牌号	公称厚度 /mm	级别	感应磁导率 $\mu_L/(mH/m)$	交流稳定值 (%)	交直流稳定值 (%)	温度稳定值 (%)
			$\geq$	$\leq$		
1J66	0.05 ~ 0.10	I	3.50	10	9	8
		II	3.75	7	6	5

8. 合金的密度 (表 12-56)

表 12-56 合金的密度 (GB/T 14986—2008)

合金牌号	密度/(g/cm ³)	合金牌号	密度/(g/cm ³)
1J22	8.2	1J6	7.2
1J30、1J31、1J32、1J33	8.1	1J12	6.7
1J38	8.15	1J13	6.6
1J36	8.1	1J16	6.5
1J116	7.75	1J66	8.25
1J117	7.77		

9. 合金的基本物理性能 (表 12-57)

表 12-57 合金的基本物理性能 (GB/T 14986—2008)

合金牌号	电阻率/($\mu\Omega \cdot m$)		居里温度/℃
	退火后	淬火后	
1J6	0.7	—	—
1J12	1.0	—	650
1J13	0.9	1.25 ~ 1.30	510
1J16	—	1.40 ~ 1.60	—

12.4.16 高硬度、高电阻、高磁导合金带材

1. 高硬度高电阻高磁导合金带材的热处理制度 (表 12-58)

表 12-58 高硬度高电阻高磁导合金带材的热处理制度 (GB/T 14987—1994)

合金 牌号	退火介质	合金带厚度 /mm	加热温度/℃ (随炉升温)	保温时间 /h	冷却制度
1J87	干氢或 真空	≤ 0.20	950 ~ 1150	2 ~ 3	以 100℃/h 速度冷却到 500℃ 保温 1h, 再以 10 ~ 30℃/h 冷却到 350℃ 后炉冷到 200℃ 出炉
		> 0.20	1150 ~ 1250	4 ~ 6	

(续)

合金 牌号	退火介质	合金带厚度 /mm	加热温度/℃ (随炉升温)	保温时间 /h	冷却制度
1J88	干氢或 真空	≤0.20	950 ~ 1150	2 ~ 3	以 100 ~ 200℃/h (或炉冷) 冷却到 500 ~ 600℃后炉冷 (200 ~ 300℃/h) 冷却到 200℃ 出炉
		>0.20	1150 ~ 1200	4 ~ 5	
1J89	干氢或 真空	≤0.20	950 ~ 1100	2 ~ 3	以 200 ~ 300℃/h 冷却到 200℃ 出炉或以 200 ~ 300℃/h 冷却到 600℃保温 1 ~ 4h,再以 100℃/h 冷却到 200℃ 出炉
		>0.20	1100 ~ 1200	3 ~ 5	
1J90	干氢或 真空	≤0.20	1000 ~ 1150	2 ~ 3	炉冷至 250℃ 出炉,或以 250℃/h 冷至 250℃ 出炉
		>0.20	1000 ~ 1200	3 ~ 4	
1J91	干氢或 真空	≤0.20	1100 ~ 1150	2 ~ 3	炉冷至室温后,再升温至 970℃保温 1h (介质为氢气或惰性气体)拉到炉口冷却
		>0.20	1100 ~ 1200	3 ~ 4	

2. 高硬度高电阻高磁导合金带材的密度 (表 12-59)

表 12-59 高硬度高电阻高磁导合金带材的密度 (GB/T 14987—1994)

合金牌号	1J87	1J88	1J89	1J90	1J91
密度/(g/cm ³)	8.75	8.80	8.70	8.77	8.66

3. 高硬度高电阻高磁导合金带材的直流磁性能、电阻率和硬度 (表 12-60)

表 12-60 高硬度高电阻高磁导合金带材的直流磁性能、
电阻率和硬度 (GB/T 14987—1994)

合金牌号	合金带厚度 /mm	直流磁性能				电阻率 ρ / $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	硬度 HV
		初始磁导率 μ_0 /(mH /m)	最大磁导率 μ_m /(mH /m)	矫顽力 H_c /(A/m)	磁感应强度 B_s /T		
		$\geq$		$\leq$	$\geq$	$\geq$	
1J87	0.02 ~ 0.04	37.5	125	2.0	0.5	75	190
	>0.04 ~ 0.09	43.8	150	1.2			
	>0.09 ~ 0.29	50.0	250	0.8			
	>0.29 ~ 0.50	43.8	225	1.3			
	>0.50 ~ 1.00	43.8	187.5	1.6			
1J88	0.02 ~ 0.04	37.5	125	2.0	0.55	70	180
	>0.04 ~ 0.09	43.8	150	1.6			
	>0.09 ~ 0.29	50.0	187.5	1.2			
	>0.29 ~ 1.00	37.5	125	2.0			

(续)

合金牌号	合金带厚度 /mm	直流磁性能				电阻率 ρ / $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	硬度 HV
		初始磁导率 μ_0 /(mH /m)	最大磁导率 μ_m /(mH /m)	矫顽力 H_c /(A/m)	磁感应强度 B_s /T		
		$\geq$		$\leq$	$\geq$	$\geq$	
1J89	0.02 ~ 0.04	18.8	87.5	2.4	0.45	85	200
	>0.04 ~ 0.09	25.0	112.5	1.6			
	>0.09 ~ 0.29	31.3	125	1.2			
	>0.29 ~ 1.00	25.0	100	1.6			
1J90	0.02 ~ 0.04	37.5	125	2.0	0.45	85	250
	>0.04 ~ 0.09	43.8	187.5	1.6			
	>0.09 ~ 0.29	50.0	225	0.8			
	>0.29 ~ 1.00	43.8	187.5	1.2			
1J91	0.02 ~ 0.04	6.25	50	3.2	0.45	80	300
	>0.04 ~ 0.09	10.0	75	2.0			
	>0.09 ~ 0.29	12.5	100	1.6			
	>0.29 ~ 1.00	10.0	75	2.0			

注：合金带材的直流磁性能在样品不涂层的情况下测定。对于涂层样品的初始磁导率 μ_0 和最大磁导率 μ_m 允许分别降低 20%，矫顽力 H_c 允许增加 20%。

4. 高硬度高电阻高磁导合金带材的弹性磁导率（表 12-61）

表 12-61 高硬度高电阻高磁导合金带材的弹性磁导率（GB/T 14987—1994）

合金牌号	合金带厚度 /mm	在 $B = 2 \times 10^{-3} \text{T}$ 下的弹性磁导率 $\mu'/(\text{mH/m})$				
		1kHz	10kHz	100kHz	500kHz	1000kHz
		$\geq$				
1J87	0.02	28.8	25.0	6.80	1.25	0.875
	0.03	31.3	21.3	5.00	1.00	0.625
	0.05	32.5	11.3	2.25	0.50	0.250
	0.10	28.8	5.63	1.00	—	—
1J88	0.02	27.5	25.0	5.63	—	—
	0.03	30.0	21.3	3.75	—	—
	0.05	27.5	11.3	1.88	—	—
	0.10	25.0	5.63	0.975	—	—
1J89	0.02	15.0	12.5	6.80	1.50	1.00
	0.03	17.5	8.75	5.00	1.25	0.75
	0.05	20.0	5.00	2.25	0.625	0.375
	0.10	16.3	2.50	1.00	—	—

(续)

合金牌号	合金带厚度 /mm	在 $B=2\times 10^{-3}\text{T}$ 下的弹性磁导率 $\mu'/(m\text{H}/\text{m})$				
		1kHz	10kHz	100kHz	500kHz	1000kHz
		$\geq$				
1J90	0.02	28.8	25.0	7.50	1.50	1.00
	0.03	31.3	21.3	5.63	1.13	—
	0.05	32.5	18.8	2.50	0.75	—
	0.10	28.8	6.25	1.13	—	—
1J91	0.02	4.88	4.38	3.75	1.25	0.875
	0.03	5.00	4.00	1.88	1.00	—
	0.05	5.25	3.75	1.25	0.375	—
	0.10	4.63	2.50	0.625	—	—

5. 高硬度高电阻高磁导合金带材峰值磁导率（表 12-62）

表 12-62 高硬度高电阻高磁导合金带材峰值磁导率（GB/T 14987—1994）

合金牌号	合金带厚度/mm	400Hz 下峰值磁导率/(mH/m)	
		$\geq$	
		$\mu_{p0.01}$	μ_{pm}
1J87	0.20	26.3	50.0
1J90	0.35	20.0	35.0

注：1. 对于制作特微电机铁心用的厚度为 0.20mm 和 0.35mm 的合金带材应测定峰值磁导率。

2. $\mu_{p0.01}$ 表示在 0.01Oe (1Oe = 79.5775A/m) 下测量的峰值磁导率； μ_{pm} 表示峰值磁导率的最大值。

12.4.17 弹性元件用 3J1 和 3J53 合金的物理性能

1. 弹性元件用 3J1 和 3J53 合金冷加工状态时效后的物理性能（表 12-63）

表 12-63 弹性元件用 3J1 和 3J53 合金冷加工状态时效后的物理性能（YB/T 5256—1993）

合金牌号	3J1	3J53
弹性模量 $E/(N/mm^2)$	186200 ~ 205800	176400 ~ 191100
切变模量 $G/(N/mm^2)$	68600 ~ 78400	63700 ~ 73500
相对密度 d	8.0	8.0
平均线胀系数 $\overline{\alpha}_l(20\sim 100^\circ\text{C})/(\times 10^{-6}/^\circ\text{C})$	—	8.5
饱和磁感应强度 B_{600}/T	—	0.7
电阻率 $\rho/(\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m})$	1.02	1.1
磁化率 $\chi/10^6$	150 ~ 250	—
维氏硬度 HV	400 ~ 480	350 ~ 450

注：磁化率 χ 值是绝对电磁单位制下的数值。

2. 3J53 合金带材的弹性模量温度系数（表 12-64）

表 12-64 3J53 合金带材的弹性模量温度系数（YB/T 5256—1993）

时效温度/℃	弹性模量温度系数 β_E (-60 ~ 80℃)/(10 ⁻⁶ /℃)		时效温度/℃	弹性模量温度系数 β_E (-60 ~ 80℃)/(10 ⁻⁶ /℃)	
	冷轧	软化		冷轧	软化
500	-38 ~ -15	-18 ~ +12	650	0 ~ +20	+42 ~ +64
550	-22 ~ 0	+10 ~ +35	700	0 ~ +20	+40 ~ +60
600	-10 ~ +10	+35 ~ +55	750	-4 ~ +16	+28 ~ +50

12.4.18 弹性元件用 3J21 合金的物理性能

弹性元件用 3J21 合金冷加工时效状态的物理性能如表 12-65 所示。

表 12-65 弹性元件用 3J21 合金冷加工时效状态的物理性能（YB/T 5253—1993）

弹性模量 E /(N/mm ²)	196000 ~ 215600
切变模量 G /(N/mm ²)	73500 ~ 83300
相对密度 d	8.4
平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l$ (0 ~ 100℃)/(×10 ⁻⁶ /℃)	14
电阻率 ρ /(Ω·mm ² /m)	0.92
磁化率 $\chi/10^6$	50 ~ 1000

注：磁化率 χ 值是绝对电磁单位制下的数值。

12.4.19 稀土钴永磁材料的物理性能

1. RC_{o5} 系列烧结稀土钴永磁材料主要磁性能（表 12-66）

表 12-66 RC_{o5} 系列烧结稀土钴永磁材料主要磁性能（GB/T 4180—2000）

品种	材料牌号	IEC 分类代号	最大磁能积 (BH) _{max} (kJ/m ³)	顽磁 (剩磁) B_r /mT ≥	矫顽力		典型 化合物
					H_{cB} /(kA/m) ≥	H_{cJ} /(kA/m) ≥	
低磁极 化强度 矫顽力	XGS 80/36	—	65 ~ 90	600	320	360	Ce(Co, Cu, Fe) ₅
	XGS 100/80	R5-1-1	80 ~ 120	650	500	800	MMCo ₅
	XGS 135/96	R5-1-2	120 ~ 150	770	590	960	SmCo ₅
	XGS 165/80	R5-1-3	150 ~ 180	900	640	800	(Sm, Pr)Co ₅
高磁极 化强度 矫顽力	XGS 135/120	—	120 ~ 150	770	590	1200	SmCo ₅ 或 (Sm, Pr)Co ₅
	XGS 135/160	—	120 ~ 150	770	590	1600	
	XGS 165/120	—	150 ~ 180	880	640	1200	
	XGS 165/145	—	150 ~ 180	880	640	1450	

2. R₂Co₁₇系列烧结稀土钴永磁材料主要磁性能（表 12-67）

表 12-67 R₂Co₁₇系列烧结稀土钴永磁材料主要磁性能（GB/T 4180—2000）

品种	材料牌号	IEC 分类代号	最大磁能积 (BH) _{max} /(kJ/m ³)	顽磁 (剩磁) B _r /mT ≥	矫顽力		典型 化合物
					H _{cB} /(kA/m) ≥	H _{cJ} /(kA/m) ≥	
低磁极 化强度 矫顽力	XGS 180/50	R5-1-11	165 ~ 195	950	440	500	Sm ₂ (Co, Cu, Fe, Zr) ₁₇
	XGS 185/70	R5-1-12	170 ~ 200	970	630	700	
	XGS 195/40	—	180 ~ 210	980	380	400	
	XGS 195/90	R5-1-13	180 ~ 210	1000	680	900	
	XGS 205/45	—	190 ~ 220	1000	420	450	
	XGS 205/70	R5-1-14	190 ~ 220	1050	560	700	
	XGS 235/45	—	220 ~ 250	1070	440	450	
高磁极化强 度矫顽力	XGS 205/120	—	190 ~ 220	1000	650	1200	
	XGS 205/160	—	190 ~ 220	1000	650	1600	

3. 粘结稀土钴永磁材料主要磁性能（表 12-68）

表 12-68 粘结稀土钴永磁材料主要磁性能（GB/T 4180—2000）

品种	材料牌号	IEC 分类代号	最大磁能积 (BH) _{max} /(kJ/m ³)	顽磁 (剩磁) B _r /mT ≥	矫顽力		典型 化合物
					H _{cB} /(kA/m) ≥	H _{cJ} /(kA/m) ≥	
低磁极化强 度矫顽力	XGN 65/60	R5-3-1	48 ~ 80	500	360	600	SmCo ₅ 或 Sm ₂ (Co, Cu, Fe, Zr) ₁₇

4. 烧结稀土钴永磁材料的辅助磁性能和物理力学性能（表 12-69）

表 12-69 烧结稀土钴永磁材料的辅助磁性能和物理力学性能（GB/T 4180—2000）

参数名称		RCO ₅		R ₂ Co ₁₇ 系列
		Ce(Co, Cu, Fe) ₅	SmCo ₅ 、(Sm, Pr)Co ₅	Sm ₂ (Co, Cu, Fe, Zr) ₁₇
辅助磁 性能	顽磁（剩磁）温度系数 ^① /(10 ⁻² /K)	-0.09	-0.05	-0.03
	磁极化强度矫顽力温度系 数 ^① /(10 ⁻² /K)	—	-0.3	-0.3
	居里温度/K	750	1000	1100
	回复磁导率	1.10	1.05	1.10

(续)

参数名称		RCo ₅		R ₂ Co ₁₇ 系列
		Ce(Co, Cu, Fe) ₅	SmCo ₅ 、(Sm, Pr)Co ₅	Sm ₂ (Co, Cu, Fe, Zr) ₁₇
物理性能和力学性能	密度/(g/cm ³)	7.8	8.2	8.4
	维氏硬度 HV	450	450	600
	电阻率/Ω·cm	5×10 ⁻⁴	5.3×10 ⁻⁵	8.5×10 ⁻⁵
	抗压强度/(N/mm ²)	—	1000	800
	抗拉强度/(N/mm ²)	—	400	350
	抗弯强度/(N/mm ²)	—	180	150

① 测量温度范围为 273 ~ 373K。

5. 稀土钴永磁材料的最低饱和磁化磁场强度 (表 12-70)

表 12-70 稀土钴永磁材料的最低饱和磁化磁场强度 (GB/T 4180—2000)

(单位: kA/m)

典型化合物	SmCo ₅	Sm ₂ (Co, Cu, Fe, Zr) ₁₇	Sm ₂ (Co, Cu, Fe, Zr) ₁₇	(Sm, Pr)Co ₅	Ce(Co, Cu, Fe) ₅
		$H_{cJ} \geq 800$ 时	$H_{cJ} < 800$ 时		
最低饱和磁化 磁场强度 H	3200	3200	1600	2400	1600

6. 烧结稀土钴永磁材料的典型退磁曲线

低、高磁极化强度矫顽力烧结稀土钴永磁材料的典型退磁曲线分别如图 12-2 和图 12-3 所示。

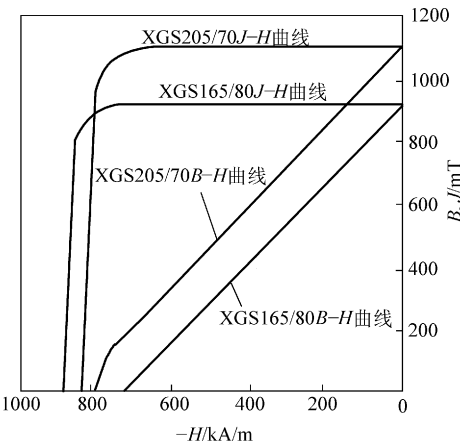


图 12-2 XGS165/80、XGS205/70 低磁极化强度
矫顽力烧结稀土钴永磁材料的典型退磁曲线

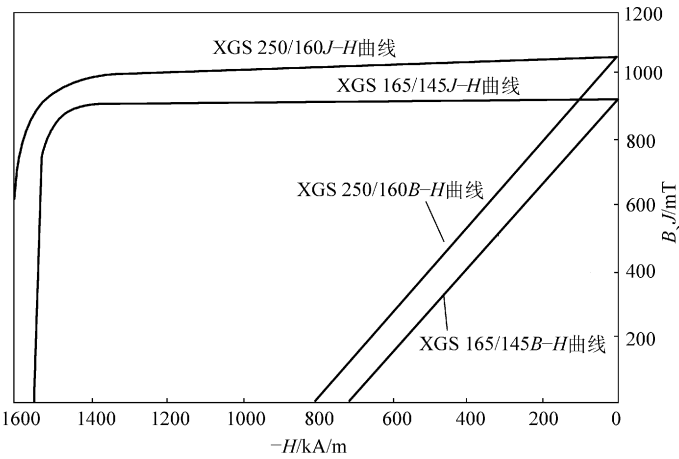


图 12-3 XGS165/145、XGS205/160 高磁极化强度
矫顽力烧结稀土钴永磁材料的典型退磁曲线

12.4.20 铽镝铁大磁致伸缩材料的物理性能

1. 铽镝铁大磁致伸缩材料的牌号和伸缩性能（表 12-71）

表 12-71 铽镝铁大磁致伸缩材料的牌号和伸缩性能
（GB/T 19396—2003）

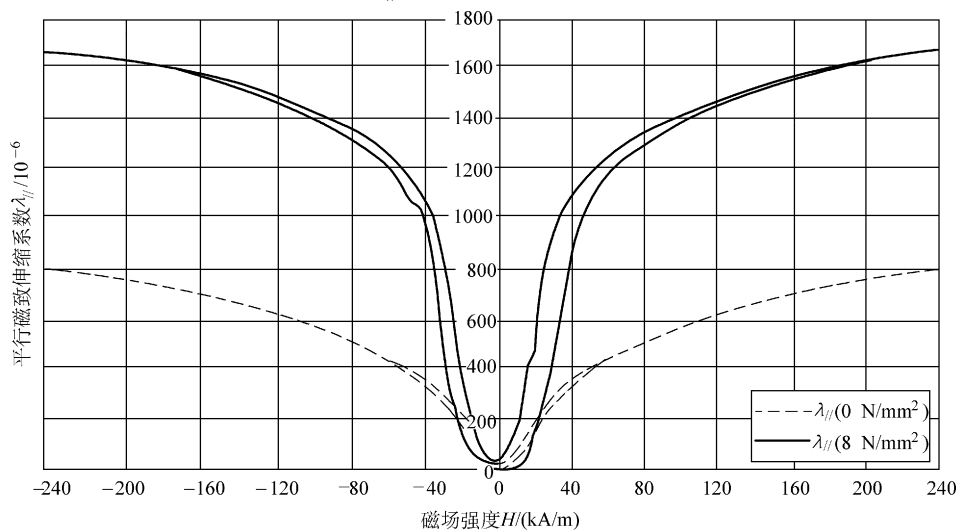
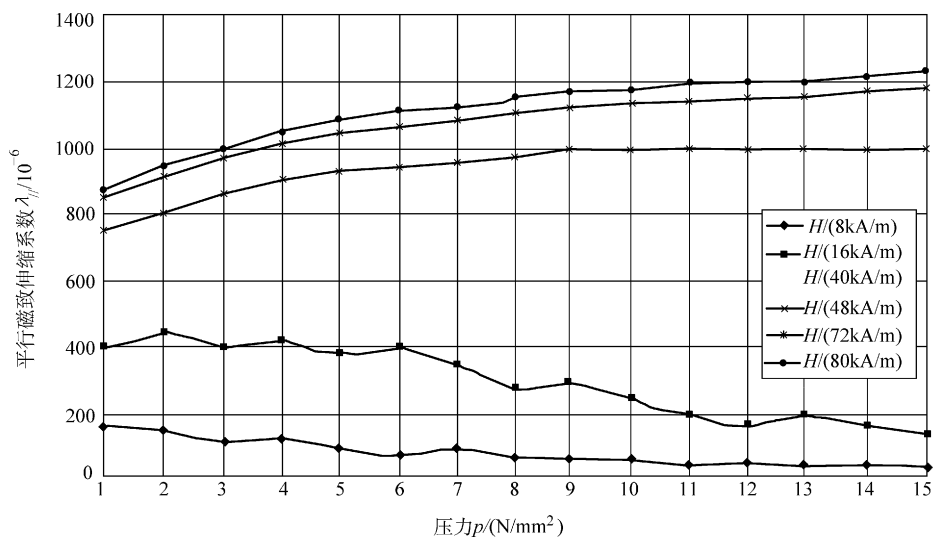
产品牌号	$\lambda_{\parallel}^{\text{①}}$ (40kA/m, 5 ~ 10N/mm ²)/10 ⁻⁶	$d_{33}^{\text{②}}$ /(10 ⁻⁶ m/A) ≥
203000	500 ~ 800	0.0125
203001	> 800 ~ 1100	0.025
203002	> 1100	0.04

① $\lambda_{\parallel}$ 为平行磁致伸缩系数。
② d_{33} 为最大磁致伸缩应变率。

2. 铽镝铁大磁致伸缩材料的物理性能（表 12-72）

表 12-72 铽镝铁大磁致伸缩材料的物理性能（GB/T 19396—2003）

项 目	指 标	项 目	指 标
弹性模量/(N/mm ²)	(2.5 ~ 3.5) × 10 ⁴	声速/(m/s)	1640 ~ 1940
抗拉强度/(N/mm ²)	≥20	能量密度/(kJ/m ³)	14 ~ 25
热膨胀系数/(1/°C)	(8 ~ 12) × 10 ⁻⁸	电阻率/Ω · m	(55 ~ 65) × 10 ⁻⁸
居里温度/°C	>370	相对磁导率	3 ~ 15
磁机耦合系数	0.6 ~ 0.75	比热容/[kJ/(kg · K)]	0.32 ~ 0.38

3. 典型平行磁致伸缩系数 $\lambda_{//}$ 与磁场强度 H 的关系曲线 (图 12-4)图 12-4 典型平行磁致伸缩系数 $\lambda_{//}$ 与磁场强度 H 的关系曲线4. 典型平行磁致伸缩系数 $\lambda_{//}$ 与压力 p 的关系曲线 (图 12-5)图 12-5 典型平行磁致伸缩系数 $\lambda_{//}$ 与压力 p 的关系曲线

5. 典型磁致伸缩应变率 d 与磁场强度 H 的关系曲线 (图 12-6)

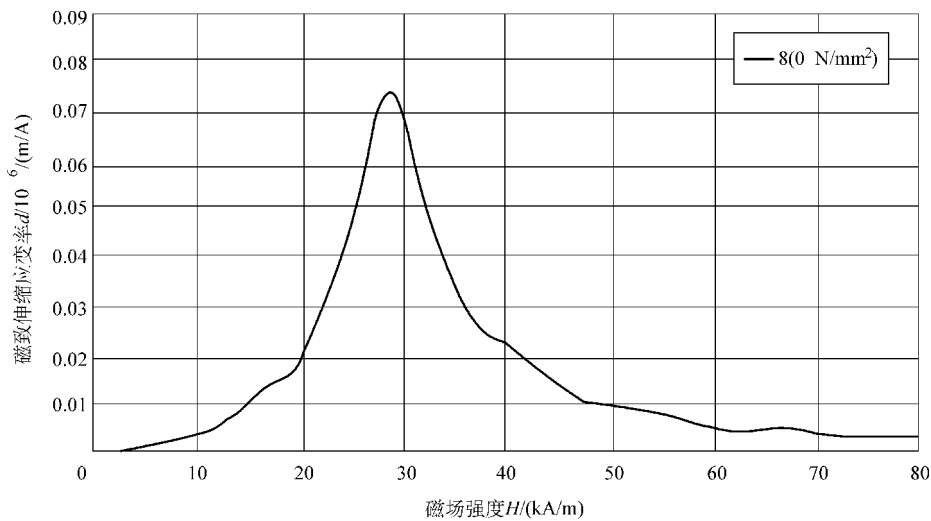


图 12-6 典型磁致伸缩应变率 d 与磁场强度 H 的关系曲线

6. 最大磁致伸缩应变率 d_{33} 与压力 p 的关系曲线 (图 12-7)

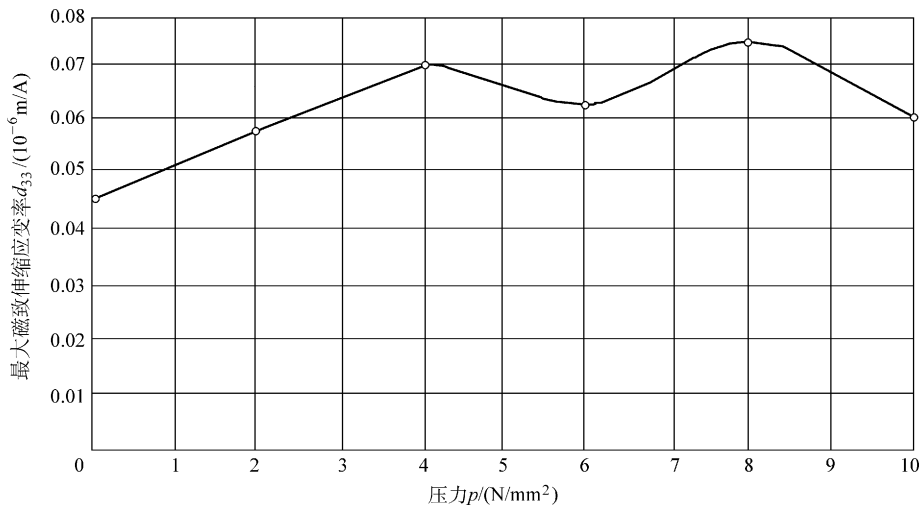


图 12-7 最大磁致伸缩应变率 d_{33} 与压力 p 的关系曲线

12.4.21 频率元件用恒弹性合金 3J53 和 3J58 的物理性能

1. 频率元件用恒弹性合金 3J53 和 3J58 的频率温度系数 (表 12-73)

表 12-73 频率元件用恒弹性合金 3J53 和 3J58 的
频率温度系数^① (YB/T 5254—1993)

合金牌号	组 别	频率温度系数 $\beta_f/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$
		-40 ~ 80℃
3J53	A 组	0 ~ +20
	B 组	0 ~ +10
3J58	—	-5 ~ +5

① 时效热处理后。

2. 频率元件用恒弹性合金 3J53 和 3J58 的纵振波传播速度 (表 12-74)

表 12-74 频率元件用恒弹性合金 3J53 和 3J58 的
纵振波传播速度^① (YB/T 5254—1993)

合金牌号	产品形状	厚度或直径/mm	纵振波传播速度 $c_l/(10^3\text{m/s})$
3J53	棒	3 ~ 10	4.80 ~ 5.05
3J58	带	1.0 ~ 3.5	4.75 ~ 5.00

① 时效热处理后。

3. 频率元件用恒弹性合金 3J53 和 3J58 冷加工时效状态的主要性能 (表 12-75)

表 12-75 频率元件用恒弹性合金 3J53 和 3J58 冷加工时效
状态的主要性能 (YB/T 5254—1993)

合金牌号	3J53	3J58
弹性模量 $E/(\text{N/mm}^2)$	176400 ~ 191100	176400 ~ 191100
切变模量 $G/(\text{N/mm}^2)$	63700 ~ 73500	63700 ~ 73500
相对密度 d	8.0	8.0
平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l(20 \sim 100^{\circ}\text{C})/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	8.5	8.1
饱和磁感应强度 B_{600}/T	0.7	0.8
饱和磁滞伸缩系数 $\lambda_s/10^{-6}$	+5	+5
居里温度 $T_c/^{\circ}\text{C}$	110	130
电阻率 $\rho/(\mu\Omega \cdot \text{m})$	1.1	1.1
抗拉强度 $R_m/(\text{N/mm}^2)$	1470	1470
断后伸长率 $A(\%)$	6	10
硬度 HV	420	400

12.4.22 频率元件用恒弹性合金 3J60 丝材的物理性能

1. 频率元件用恒弹性合金 3J60 丝材退火后的主要物理性能（表 12-76）

表 12-76 频率元件用恒弹性合金 3J60 丝材退火后的主要物理性能（YB/T 5255—1993）

组别	用途	机械品质 因数 Q	纵振频率温度系数 $ \beta_f (-60 \sim 80^{\circ}\text{C})$ $/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	纵振波速 $c_l/(10^3\text{m/s})$	谐振传输衰减 N/dB	试样推荐的 热处理制度
I	换能丝	≤ 50	≤ 40	4.20 ~ 4.40	≤ 26	在真空或气体保护条件下, 于 1000 ~ 1150℃, 30min 退火
II	耦合丝	—	—	4.20 ~ 4.40	—	

2. 频率元件用恒弹性合金 3J60 的其他物理性能（表 12-77）

表 12-77 频率元件用恒弹性合金 3J60 的其他物理性能（YB/T 5255—1993）

性能名称	状态	性能
相对密度 d	退火态	≈ 8.2
平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l(20 \sim 200^{\circ}\text{C})/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	退火态	7.0 ~ 7.5
居里温度 $T_c/^{\circ}\text{C}$	退火态	430 ± 10
饱和磁滞伸缩系数 $\lambda_s/10^{-6}$	退火态	$\leq +27.0$
电阻率 $\rho/(\mu\Omega \cdot \text{m})$	退火态	≈ 0.46

12.4.23 磁滞合金的物理性能

1. 磁滞合金的热处理制度

磁滞合金冷轧带材的热处理制度如表 12-78 所示，磁滞合金热轧或热轧带材的热处理制度如表 12-79 所示。

表 12-78 磁滞合金冷轧带材的热处理制度（GB/T 14988—2008）

合金牌号	回火温度/ $^{\circ}\text{C}$	保温时间/min	冷却方式
2J4	600 ~ 660	20 ~ 60	空冷
2J7	580 ~ 660		
2J9	580 ~ 640		
2J10	580 ~ 640		
2J11	580 ~ 640		
2J12	580 ~ 640		
2J53	500 ~ 560		

表 12-79 磁滞合金热轧或热轧带材的热处理制度 (GB/T 14988—2008)

合金牌号	淬 火			回 火		
	加热温度/℃ (在保护气氛下)	保温时间 /min	淬火介质	回火温度 /℃	保温时间 /min	冷却方式
2J21	1200 ± 10	15 ~ 30	油或沸水	625 ~ 700	60 ~ 120	空冷
2J23	1200 ± 10			625 ~ 700		
2J25	1250 ± 10			625 ~ 725		
2J27	1250 ± 10			625 ~ 725		

2. 磁滞合金热处理后的磁滞性能 (表 12-80)

表 12-80 磁滞合金热处理后的磁滞性能 (GB/T 14988—2008)

合金牌号	最大磁导率点对 应的磁场强度 $H_{\mu}/(\text{kA/m})$	最大磁导率点对 应的磁通密度 B_{μ}/T	比磁滞损耗 $P_{\mu}/(\text{kJ/cm}^3)$ $\geq$	凸起系数 K_{μ} $\geq$
2J4	3.98 ~ 5.17	1.3 ~ 1.6	15.0	0.62
2J7	6.37 ~ 9.55	1.0 ~ 1.3	19.0	0.61
2J9	8.75 ~ 11.94	0.9 ~ 1.25	22.0	0.59
2J10	14.32 ~ 18.30	0.9 ~ 1.2	30.0	0.58
2J11	15.92 ~ 20.69	0.9 ~ 1.2	35.0	0.57
2J12	19.89 ~ 27.85	0.8 ~ 1.1	45.0	0.56
2J21	9.52 ~ 12.73	1.0 ~ 1.3	20.0	0.46
2J23	14.32 ~ 17.51	1.0 ~ 1.3	30.0	0.48
2J25	17.51 ~ 22.28	0.9 ~ 1.2	38.0	0.50
2J27	23.87 ~ 28.65	0.9 ~ 1.2	47.0	0.45
2J53	6.37 ~ 11.94	0.6 ~ 0.9	10.0	0.45

3. 磁滞合金的其他物理性能 (表 12-81)

表 12-81 磁滞合金的其他物理性能 (GB/T 14988—2008)

合金牌号	密度 $\rho/(\text{g/cm}^3)$	居里温度 $T_c/^\circ\text{C}$	线胀系数 $\bar{\alpha}_l(20 \sim 300^\circ\text{C})/$ $(10^{-6}/^\circ\text{C})$	电阻率 $\rho/$ $(\mu\Omega \cdot \text{cm})$	弹性模量 $E/$ (N/mm^2)	硬度 HRC
2J4	8.2	860	10.70	33	180000	—
2J7	8.1	860	10.60	61	180000	—
2J9	8.1	860	10.60	65	180000	—
2J10	8.1	860	11.30	71	190000	—
2J11	8.1	860	11.20	77	170000	—

(续)

合金牌号	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm})^3$	居里温度 $T_c/^\circ\text{C}$	线胀系数 $\bar{\alpha}_l(20\sim 300^\circ\text{C})/$ $(10^{-6}/^\circ\text{C})$	电阻率 $\rho/$ $(\mu\Omega\cdot\text{cm})$	弹性模量 $E/$ (N/mm^2)	硬度 HRC
2J12	8.1	860	13.40	74	170000	—
2J21	8.2	820	11.24	35	220000	35~42
2J23	8.3	820	11.10	37	210000	35~42
2J25	8.3	820	11.18	42	210000	35~42
2J27	8.4	820	11.21	38	220000	35~42
2J53	7.8	—	15.50	61	170000	—

12.4.24 镍铬电阻合金丝的物理性能

1. 软态 6J20、6J15 合金丝的公称每米电阻值（表 12-82）

表 12-82 软态 6J20、6J15 合金丝的公称每米电阻值（YB/T 5259—1993）

直径/mm	公称每米电阻值/ (Ω/m)		直径/mm	公称每米电阻值/ (Ω/m)	
	6J20	6J15		6J20	6J15
0.009	14600	—	0.050	535	—
0.010	11800	—	0.055	442	—
0.011	10300	—	0.060	371	—
0.012	8660	—	0.070	273	—
0.014	6630	—	0.080	209	—
(0.015)	5780	—	0.090	165	—
0.016	5080	—	0.100	134	138
0.018	4010	—	0.110	111	114
0.020	3340	—	0.120	93.0	95.5
0.022	2770	—	(0.130)	80.6	81.5
0.025	2140	—	0.140	69.5	70.2
0.028	1700	—	(0.150)	60.5	61.0
0.030	1490	—	0.160	53.2	53.7
0.032	1310	—	(0.170)	47.2	47.5
0.035	1090	—	0.180	42.0	42.5
0.040	835	—	(0.190)	37.8	38.2
0.045	660	—	0.200	34.0	34.4

(续)

直径/mm	公称每米电阻值/(Ω /m)		直径/mm	公称每米电阻值/(Ω /m)	
	6J20	6J15		6J20	6J15
0.220	28.6	29.1	0.320	13.6	13.9
(0.230)	26.2	26.6	(0.330)	12.8	13.1
0.250	22.2	22.6	0.350	11.4	11.6
0.280	17.7	18.1	(0.380)	9.80	9.90
0.300	15.4	15.8	0.400	8.80	8.90

注：括号内的数值为非优先数。

2. 软态 6J20、6J15 合金丝的每米电阻值的允许偏差（表 12-83）

表 12-83 软态 6J20、6J15 合金丝的每米电阻值的允许偏差（YB/T 5259—1993）

直径/mm	每米电阻允许偏差(%)	直径/mm	每米电阻允许偏差(%)
0.009 ~ 0.018	± 15	0.055 ~ 0.080	± 8
0.020 ~ 0.025	± 12	0.090 ~ 0.170	± 6
0.028 ~ 0.050	± 10	0.180 ~ 0.400	± 5

3. 硬态 6J10 合金丝每米电阻值（表 12-84）

表 12-84 硬态 6J10 合金丝每米电阻值（YB/T 5259—1993）

直径/mm	每米电阻值/(Ω /m)		
	上限值	公称值	下限值
0.009	8500	7940	7000
0.010	7400	6800	6200
0.030	950	850	750
0.045	440	400	360

4. 镍铬电阻合金主要物理性能（表 12-85）

表 12-85 镍铬电阻合金主要物理性能（YB/T 5259—1993）

合金性能	合金牌号		
	6J10	6J15	6J20
20℃时电阻率/($\mu\Omega \cdot m$)	0.69	1.12	1.08
熔点/℃	1425	1390	1400
密度/(g/cm^3)	8.7	8.2	8.3
电阻温度系数(20 ~ 100℃)/($10^{-6}/K$)	350	150	50
对铜热电动势(0 ~ 100℃)/($\mu V/K$)	20.5	1.0	5.0
平均线胀系数(20 ~ 100℃)/($10^{-6}/K$)	13.8	13.5	13.0
20℃时比热容/[$J/(g \cdot ^\circ C)$]	0.46	0.46	0.46
磁性	无磁性	微磁性	无磁性

5. 镍铬电阻合金丝的每米电阻值（表 12-86）

表 12-86 镍铬电阻合金丝的每米电阻值（YB/T 5259—1993）

直径/mm	每米电阻值 允许偏差（%）	6J15			6J20		
		20℃时每米电阻值/(Ω/m)					
		上限值	公称值	下限值	上限值	公称值	下限值
0.009	±15	—	—	—	16800	14600	12400
0.010		—	—	—	13600	11800	10000
0.011		—	—	—	11800	10300	8760
0.012		—	—	—	9960	8660	7360
0.014		—	—	—	7620	6630	5640
(0.015)		—	—	—	6650	5780	4910
0.016		—	—	—	5840	5080	4320
0.018		—	—	—	4610	4010	3410
0.020	±12	—	—	—	3740	3340	2940
0.022		—	—	—	3100	2770	2440
0.025		—	—	—	2400	2140	1880
0.028	±10	—	—	—	1870	1700	1530
0.030		—	—	—	1640	1490	1340
0.032		—	—	—	1440	1310	1180
0.035		—	—	—	1200	1090	981
0.040		—	—	—	919	835	752
0.045		—	—	—	726	660	594
0.050		—	—	—	589	535	482
0.055	±8	—	—	—	477	442	407
0.060		—	—	—	401	371	341
0.070		—	—	—	295	273	251
0.080		—	—	—	226	209	192
0.090	±6	—	—	—	175	165	155
0.100		146	138	130	142	134	126
0.110		121	114	107	118	111	104
0.120		101	95.5	89.8	98.6	93.0	87.4
(0.130)		86.4	81.5	76.6	85.4	80.6	75.8
0.140		74.4	70.2	66.0	73.7	69.5	65.3
(0.150)		64.7	61.0	57.3	64.1	60.5	56.9
0.160		56.9	53.7	50.5	56.4	53.2	50.0
(0.170)		50.4	47.5	44.7	50.0	47.2	44.4

(续)

直径/mm	每米电阻值 允许偏差（%）	6J15			6J20		
		20℃时每米电阻值/(Ω/m)					
		上限值	公称值	下限值	上限值	公称值	下限值
0.180	±5	44.6	42.5	40.4	44.1	42.0	39.9
(0.190)		40.1	38.2	36.3	39.7	37.8	35.9
0.200		36.1	34.4	32.7	35.7	34.0	32.3
0.220		30.6	29.1	27.6	30.0	28.6	27.2
(0.230)		27.9	26.6	25.3	27.5	26.2	24.9
0.250		23.7	22.6	21.5	23.3	22.2	21.1
0.280		19.0	18.1	17.2	18.6	17.7	16.8
0.300		16.6	15.8	15.0	16.2	15.4	14.6
0.320		14.6	13.9	13.2	14.3	13.6	12.9
0.330		13.8	13.1	12.5	13.4	12.8	12.2
(0.350)		12.2	11.6	11.0	12.0	11.4	10.8
0.380		10.4	9.90	9.41	10.3	9.80	9.31
0.400		9.35	8.90	8.46	9.24	8.80	8.36

注：括号内的数值为非优先数。

12.4.25 镍铬基精密电阻合金的物理性能

1. 镍铬基精密电阻合金丝平均电阻温度系数（表 12-87）

表 12-87 镍铬基精密电阻合金丝平均电阻温度系数（YB/T 5260—1993）

温度/℃	平均电阻温度系数/(10 ⁻⁶ /℃)		
	I	II	III
-55 ~ 20	-5 ~ +5	-10 ~ +10	-20 ~ +20
20 ~ 150	-5 ~ +5	-10 ~ +10	-20 ~ +20

2. 镍铬基精密电阻合金丝的物理参数（表 12-88）

表 12-88 镍铬基精密电阻合金丝的物理参数（YB/T 5260—1993）

项 目	参 数	项 目	参 数
电阻率(20℃)/μΩ·m	1.33	熔点/℃	1400
密度/(g/cm ³)	8.04 ~ 8.10	抗拉强度/(N/mm ²)	950 ~ 1400
平均线胀系数(20 ~ 300℃) /(10 ⁻⁶ /℃)	13.6	比热容/[J/(g·℃)]	0.46
		最高工作温度/℃	300(光丝)

3. 镍铬基精密电阻合金丝的公称每米电阻值及允许偏差（表 12-89）

表 12-89 镍铬基精密电阻合金丝的公称每米电阻值
及允许偏差（YB/T 5260—1993）

公称直径 /mm	公称每米电阻值 /(Ω/m)	每米电阻值 允许偏差 (%)	漆膜最小厚度 /mm	漆包丝最 大外径 /mm	漆膜击 穿电压/V ≥			
0.010	16900	± 15	—	—	—			
0.011	14000							
0.013	10000							
0.014	8640							
0.016	6610							
0.018	5230							
0.020	4230	± 12	0.004	0.028	200			
0.022	3500			0.030				
0.025	2710			0.036		250		
0.028	2160			0.038				
(0.030)	1880			0.042	350			
0.032	1650			0.045				
0.036	1310	0.048						
0.040	1060	0.050						
0.045	836	0.055						
0.050	677	± 10	0.007	0.060	500			
0.056	540			0.066				
(0.060)	470	± 8	0.008	0.072	600			
0.063	427			0.009		0.079		
0.071	336					0.085		
0.080	265					0.089		
0.090	209					0.097		
0.100	169					0.108		
0.112	135	0.010	0.120					
0.125	108		0.011	0.132				
0.140	86.4			0.012	0.146			
(0.150)	75.3				0.013	0.161		
0.160	66.2					0.014	0.179	
0.180	52.3						0.015	0.191
0.200	42.3	0.016						0.202
0.224	33.8		0.017					0.225
0.250	27.1			0.018				0.248
0.280	21.6				0.019			0.275
(0.300)	18.9					0.020		0.310
0.315	17.1						0.021	0.338
0.355	13.4	0.022						0.358
0.400	10.6		0.023					0.376
				—				—

4. 镍铬基精密电阻合金丝直径、电阻、截面积、长度、质量换算 (表 12-90)

表 12-90 镍铬基精密电阻合金丝直径、电阻、截面积、
长度、质量换算 (YB/T 5260—1993)

公称直径 /mm	每米电阻值 (20℃) / (Ω /m)			截面积 /mm ²	每克长度 /(m/g)	每米质量 /(g/m)
	上限	公称值	下限			
0.010	19400	16900	14400	0.000079	1562	0.00064
0.011	16100	14000	11900	0.000095	1298	0.00077
0.012	13600	11800	10000	0.000113	1087	0.00092
0.013	11500	10000	8500	0.000133	995	0.00107
0.014	9940	8640	7340	0.000154	800	0.00125
0.016	7600	6610	5620	0.000201	613	0.00163
0.018	6020	5230	4450	0.000254	485	0.00206
0.020	4740	4230	3720	0.000314	394	0.00254
0.022	3920	3500	3080	0.000380	325	0.00308
0.025	3040	2710	2390	0.000491	252	0.00397
0.028	2420	2160	1900	0.000615	201	0.00498
0.030	2070	1880	1690	0.000707	175	0.00572
0.032	1820	1650	1490	0.000804	154	0.00651
0.036	1440	1310	1180	0.001017	121	0.00824
0.040	1170	1060	954	0.001256	98	0.01017
0.045	920	836	752	0.001589	78	0.01288
0.050	745	677	609	0.001963	63	0.01589
0.056	583	540	497	0.002462	50	0.01994
0.060	508	470	432	0.002826	44	0.02289
0.063	460	426	392	0.003116	40	0.02524
0.071	363	336	309	0.003957	31	0.03205
0.080	287	265	243	0.005024	25	0.04069
0.090	226	209	192	0.006359	19	0.05150
0.100	179	169	159	0.00785	16	0.06359
0.112	143	135	127	0.00985	12.5	0.07976
0.125	115	108	102	0.01226	10.0	0.09935
0.130	106	100	94.0	0.01327	9.3	0.1075
0.140	91.6	86.4	81.2	0.01539	8.0	0.1246
0.150	79.8	75.3	70.7	0.01767	7.0	0.1431

(续)

公称直径 /mm	每米电阻值 (20℃) /(Ω/m)			截面积 /mm ²	每克长度 /(m/g)	每米质量 /(g/m)
	上限	公称值	下限			
0.160	70.1	66.1	62.2	0.02011	6.1	0.1629
0.180	55.4	52.3	49.1	0.02545	4.9	0.2061
0.200	44.9	42.3	39.8	0.03142	3.9	0.2545
0.224	35.4	33.8	32.1	0.03939	3.1	0.3190
0.250	28.4	27.1	25.7	0.04909	2.5	0.3976
0.280	22.7	21.6	20.5	0.06158	2.0	0.4987
0.300	19.9	18.9	18.0	0.07069	1.7	0.5726
0.315	17.9	17.1	16.2	0.07789	1.6	0.6309
0.340	15.4	14.7	13.9	0.09075	1.4	0.7350
0.355	14.1	13.4	12.8	0.09898	1.2	0.8017
0.380	12.3	11.7	11.1	0.1134	1.1	0.9181
0.400	11.1	10.6	10.1	0.1257	1.0	1.0180

12.4.26 锰铜、康铜精密电阻合金线、片及带材的物理性能

1. 锰铜、康铜精密电阻合金线、片及带的体积电阻率 (表 12-91)

表 12-91 锰铜、康铜精密电阻合金线、片及带的体积电阻率 (GB/T 6145—1999)

合金名称	合金牌号	体积电阻率/(μΩ·m)	合金名称	合金牌号	体积电阻率/(μΩ·m)
锰铜	6J12	0.47 ± 0.03	F2 锰铜	6J13	0.44 ± 0.04
F1 锰铜	6J8	0.35 ± 0.05	康铜	6J40	0.48 ± 0.03

2. 锰铜、康铜精密电阻合金线、片及带的平均电阻温度系数 (表 12-92)

表 12-92 锰铜、康铜精密电阻合金线、片及带的
平均电阻温度系数 (GB/T 6145—1999)

产品名称		适用温度 /℃	测试温度 /℃	电阻温度系数		平均电阻温度系数
				α/(10 ⁻⁶ /℃)	β/(10 ⁻⁶ /℃ ²)	α/(10 ⁻⁶ /℃)
锰铜合金线、片	1 级	5 ~ 45	10、20、40	-3 ~ +5	-0.7 ~ 0	—
	2 级			-5 ~ +10		
	3 级			-10 ~ +20		
F1 锰铜合金线、片		10 ~ 80	10、40、60	-5 ~ +10	-0.25 ~ 0	—
F2 锰铜合金线、片		10 ~ 80		0 ~ +40	-0.7 ~ 0	—
康铜合金线、片		0 ~ 50	20、50	—	—	-40 ~ +40

3. 锰铜、康铜精密电阻合金线材直径、截面积及每米电阻值（表 12-93）

表 12-93 锰铜、康铜精密电阻合金线材直径、截面积及
每米电阻值（GB/T 6145—1999）

线径/mm		截面积 /mm ²	每米电阻值/(Ω/m)							
			6J12X		6J8X		6J13X		6J40X	
			标称值	允许偏差	标称值	允许偏差	标称值	允许偏差	标称值	允许偏差
0.200	±0.002	0.000314	1496	±10%					1528	±10%
0.022		0.000380	1236						1263	
0.025		0.000491	957						978	
0.028		0.000616	763						780	
0.032	±0.003	0.000804	584	±8%		±8%		±8%	597	±8%
0.036		0.001018	462						472	
0.040		0.001257	374						382	
0.045		0.001590	296						302	
0.050		0.001963	239						244	
0.056		0.002463	191						195	
0.063		0.003117	151						154	
0.071		0.003959	119						121	
0.080		0.005027	93.5		69.6		87.5		95.5	
0.090		0.006362	73.9		55.0		69.2		75.5	
0.100		0.007854	59.8		44.6		56.0		61.1	
0.112	±0.005	0.009852	47.7	±7%	35.5	±7%	44.7	±7%	48.7	±7%
0.125		0.01227	38.3		28.5		35.9		39.1	
0.140		0.01539	30.5		22.7		28.6		31.2	
0.160		0.02011	23.4		17.4		21.9		23.9	
0.180		0.02545	18.5		13.8		17.3		18.9	
0.200	±0.005	0.03142	15.0	±6%	11.1	±6%	14.0	±6%	15.3	±6%
0.224		0.03941	11.9		8.88		11.2		12.2	
0.250		0.04909	9.57		7.13		8.96		9.78	
0.280		0.06158	7.63		5.68		7.15		7.80	
0.315	±0.010	0.07793	6.03	±5%	4.49	±5%	5.65	±5%	6.16	±5%
0.355		0.09898	4.75		3.54		4.45		4.85	
0.400		0.1257	3.74		2.79		3.50		3.82	
0.450		0.1590	2.96		2.20		2.77		3.02	
0.500		0.1963	2.39		1.78		2.24		2.44	

(续)

线径/mm		截面积 /mm ²	每米电阻值/(Ω/m)							
			6J12X		6J8X		6J13X		6J40X	
			标称值	允许偏差	标称值	允许偏差	标称值	允许偏差	标称值	允许偏差
0.560	±0.015	0.2463	1.91	±4%	1.42	±4%	1.79	±4%	1.95	±4%
0.630		0.3117	1.51		1.12		1.41		1.54	
0.710		0.3959	1.19		0.884		1.11		1.21	
0.750		0.4418	1.06		0.792		1.00		1.09	
0.800		0.5027	0.935		0.696		0.875		0.955	
0.850		0.5674	0.828		0.617		0.775		0.846	
0.900		0.6362	0.739		0.550		0.692		0.755	
0.950		0.7088	0.663		0.494		0.621		0.677	
1.000		0.7854	0.598		0.446		0.560		0.611	
1.060	±0.020	0.8825	0.533	±4%	0.397	±4%	0.499	±4%	0.544	±4%
1.120		0.9852	0.477		0.355		0.477		0.487	
1.180		1.094	0.430		0.320		0.402		0.439	
1.250		1.227	0.383		0.285		0.359		0.391	
1.320		1.368	0.343		0.256		0.322		0.351	
1.400		1.539	0.305		0.227		0.286		0.312	
1.500		1.767	0.266		0.198		0.249		0.272	
1.600		2.011	0.234		0.174		0.219		0.239	
1.700	±0.025	2.270	0.207	±4%	0.154	±4%	0.194	±4%	0.211	±4%
1.800		2.545	0.185		0.138		0.173		0.189	
1.900		2.835	0.166		0.123		0.155		0.169	
2.000		3.142	0.150		0.111		0.140		0.153	
2.120		3.530	0.133		0.0992		0.125		0.136	
2.240	±0.030	3.941	0.119	±4%	0.0888	±4%	0.112	±4%	0.122	±4%
2.360		4.374	0.107		0.0800		0.101		0.110	
2.500		4.909	0.0957		0.0713		0.0896		0.0978	
2.650		5.515	0.0852		0.0635		0.0798		0.0870	
2.800		6.158	0.0763		0.0568		0.0715		0.0780	
3.000		7.069	0.0665		0.0495		0.0622		0.0679	

(续)

线径/mm		截面积 /mm ²	每米电阻值/(Ω/m)							
			6J12X		6J8X		6J13X		6J40X	
标称值	允许偏差		标称值	允许偏差	标称值	允许偏差	标称值	允许偏差	标称值	允许偏差
3.150	±0.035	7.793	0.0603	±4%	0.0449	±4%	0.0565	±4%	0.0616	±4%
3.350		8.814	0.0533		0.0397		0.0499		0.0545	
3.550		9.898	0.0475		0.0354		0.0445		0.0485	
3.750		11.04	0.0426		0.0317		0.0398		0.0435	
4.000		12.57	0.0374		0.0279		0.0350		0.0382	
4.250		14.19	0.0331		0.0247		0.0310		0.0338	
4.500		15.90	0.0296		0.0220		0.0277		0.0302	
4.750	±0.040	17.72	0.0265	±4%	0.0198	±4%	0.0248	±4%	0.0271	±4%
5.000		19.63	0.0239		0.0178		0.0224		0.0244	
5.300	±0.050	22.06	0.0213		0.0159		0.0199		0.0218	
5.600		24.63	0.0191		0.0142		0.0179		0.0195	
6.000	±0.060	28.27	0.0166		0.0124		0.0156		0.0170	
6.300		31.17	0.0151		0.0112		0.0141		0.0154	

4. 康铜精密电阻合金带材的每米电阻值（表 12-94）

表 12-94 康铜精密电阻合金带材的每米电阻值（GB/T 6145—1999）

（单位：Ω/m）

宽度/mm 厚度/mm	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	20.0	25.0	31.5	40.0
0.180	0.450								
0.200	0.405								
0.224	0.362	0.285							
0.250	0.324	0.255	0.196						
0.280	0.289	0.228	0.175						
0.315	0.257	0.203	0.155	0.124					
0.355	0.228	0.180	0.138	0.110					
0.400	0.203	0.160	0.122	0.0980	0.0765				
0.450	0.180	0.142	0.109	0.0871	0.0680	0.0544	0.0435		
0.500	0.162	0.128	0.0980	0.0784	0.0612	0.0490	0.0392		
0.560	0.145	0.114	0.0875	0.0700	0.0547	0.0437	0.0350		
0.630	0.129	0.101	0.0777	0.0622	0.0486	0.0389	0.0311		
0.710	0.114	0.090	0.0690	0.0552	0.0431	0.0345	0.0276		

(续)

宽度/mm 厚度/mm	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	20.0	25.0	31.5	40.0
0.800	0.101	0.080	0.0612	0.0490	0.0383	0.0306	0.0245	0.0194	0.0153
0.900	0.090	0.071	0.0544	0.0435	0.0340	0.0272	0.0218	0.0173	0.0136
1.000	0.081	0.064	0.0490	0.0392	0.0306	0.0245	0.0196	0.0155	0.0122
1.120	0.072	0.057	0.0437	0.0350	0.0273	0.0219	0.0175	0.0139	0.0109
1.250	0.065	0.051	0.0392	0.0313	0.0245	0.0196	0.0157	0.0124	0.0098
1.400	0.058	0.046	0.0350	0.0280	0.0219	0.0175	0.0140	0.0111	0.00875
1.600	0.051	0.040	0.0306	0.0245	0.0191	0.0153	0.0122	0.00972	0.00765
1.800	0.045	0.035	0.0272	0.0218	0.0170	0.0136	0.0109	0.00864	0.00680
2.000	0.041	0.032	0.0245	0.0196	0.0153	0.0122	0.0098	0.00777	0.00612

5. 锰铜、康铜精密电阻合金对铜热电动势率（表 12-95）

表 12-95 锰铜、康铜精密电阻合金对铜热电动势率（GB/T 6145—1999）

合金名称	合金牌号	温度范围/℃	对铜平均热电动势率/($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) $\leq$
锰铜	6J12	0 ~ 100	1
F1 锰铜	6J8	0 ~ 100	2
F2 锰铜	6J13	0 ~ 100	2
康铜	6J40	0 ~ 100	45

注：对铜热电动势率为绝对值。

12.4.27 热电偶用补偿导线合金丝的物理性能

1. 热电偶用补偿导线合金丝的热电特性

1) 热电偶用补偿导线合金丝由合金丝正、负极配对后，当参考端温度为 0℃ 时，其温度与热电动势的关系分别应符合 GB/T 3772—1998、GB/T 2614—2010、GB/T 17615—1998、GB/T 4993—2010、GB/T 4994—1998、GB/T 2903—1998 中的 S、K、N、E、J 和 T 分度表，其允许偏差应符合表 12-96 规定。

表 12-96 温度与热电动势的关系及允许偏差（GB/T 4990—1995）

热电偶 分度号	补偿导 线型号	合金丝名称	使用分类	温度范围 /℃	允许偏差		热电偶测 量端温度 /℃
					精密级 $\pm \mu\text{V}$	普通级 $\pm \mu\text{V}$	
S 或 R	SC 或 RC	铜-铜镍 0.6	G	0 ~ 100	30 (2.5℃)	60 (5.0℃)	1000
			H	0 ~ 200	—	60 (5.0℃)	1000

(续)

热电偶 分度号	补偿导 线型号	合金丝名称	使用分类	温度范围 /℃	允许偏差		热电偶测 量端温度 /℃
					精密级 ± μV	普通级 ± μV	
K	KCA	铁-铜镍 22	G	0 ~ 100	60 (1.5℃)	100 (2.5℃)	900
			H	0 ~ 200	60 (1.5℃)	100 (2.5℃)	900
	KCB	铜-铜镍 40	G	0 ~ 100	60 (1.5℃)	100 (2.5℃)	900
	KX	镍铬 10-镍硅 3	G	-25 ~ 100	60 (1.5℃)	100 (2.5℃)	900
			H	-25 ~ 200	60 (1.5℃)	100 (2.5℃)	900
N	NC	铁-铜镍 18	G	0 ~ 100	60 (1.5℃)	100 (2.5℃)	900
			H	0 ~ 200	60 (1.5℃)	100 (2.5℃)	900
	NX	镍铬 14 硅-镍硅 4	G	-25 ~ 100	60 (1.5℃)	100 (2.5℃)	900
			H	-25 ~ 200	60 (1.5℃)	100 (2.5℃)	900
E	EX	镍铬 10-铜镍 45	G	-25 ~ 100	120 (1.5℃)	200 (2.5℃)	500
			H	-25 ~ 200	120 (1.5℃)	200 (2.5℃)	500
J	JX	铁-铜镍 45	G	-25 ~ 100	85 (1.5℃)	140 (2.5℃)	500
			H	-25 ~ 200	85 (1.5℃)	140 (2.5℃)	500
T	TX	铜-铜镍 45	G	-25 ~ 100	30 (0.5℃)	60 (1.0℃)	300
			H	-25 ~ 200	48 (0.8℃)	90 (1.5℃)	300

2) 由合金丝正负极配对和正极对铂、铂对负极配对后, 当参考端温度为 0℃, 测量端温度分别为 -25℃、100℃、200℃时, 所测量的热电动势值及允许偏差应符合表 12-97、表 12-98、表 12-99 的规定。

表 12-97 正、负极配对时的热电动势及允许偏差范围 (GB/T 4990—1995)

热电偶 分度号	补偿导 线型号	使用 分类	测量端 温度 /℃	热电动势 标称值 /μV	精密级		普通级	
					允许偏差 /μV	热电动势范围 /μV	允许偏差 /μV	热电动势范围 /μV
S 或 R	SC 或 RC	G	100	645	± 30	615 ~ 675	± 60	585 ~ 705
	SC 或 RC	H	100	645	—	—	± 60	585 ~ 705
			200	1440	—	—	± 60	1380 ~ 1500
K	KX 或 KCA、KCB	G	-25	-968	± 60	-908 ~ -1028	± 100	-868 ~ 1068
			100	4095		4035 ~ 4155		3995 ~ 4195
	KX 或 KCA	H	-25	-968	± 60	-908 ~ -1028	± 100	-868 ~ -1068
			100	4095		4035 ~ 4155		3995 ~ 4195
			200	8137		8077 ~ 8197		8037 ~ 8237

(续)

热电偶 分度号	补偿导 线型号	使用 分类	测量端 温度 /℃	热电动势 标称值 /μV	精密级		普通级	
					允许偏差 /μV	热电动势范围 /μV	允许偏差 /μV	热电动势范围 /μV
N	NX 或 NC	G	−25 100	−646 2774	±60	−586 ~ −706 2714 ~ 2834	±100	−546 ~ 740 2674 ~ 2874
	NX 或 NC	H	−25 100 200	−646 2774 5912	±60	−586 ~ −706 2714 ~ 2834 5852 ~ 5972	±100	−546 ~ −746 2674 ~ 2874 5812 ~ 6012
E	EX	G	−25 100	−1432 6317	±120	−1312 ~ −1552 6197 ~ 6437	±200	−1232 ~ −1632 6117 ~ 6517
	EX	H	−25 100 200	−1432 6317 13419	±120	−1312 ~ −1552 6197 ~ 6437 13299 ~ 13539	±200	−1232 ~ −1632 6117 ~ 6517 13219 ~ 13619
J	JX	G	−25 100	−1239 5268	±85	−1154 ~ −1324 5183 ~ 5353	±140	−1099 ~ −1379 5128 ~ 5408
	JX	H	−25 100 200	−1239 5268 10777	±85	−1154 ~ −1324 5183 ~ 5353 10692 ~ 10862	±140	−1099 ~ −1379 5128 ~ 5408 10637 ~ 10917
T	TX	G	−25 100	−940 4277	±30 ±30	−910 ~ −970 4247 ~ 4307	±60 ±60	−880 ~ −1000 4217 ~ 4337
	TX	H	−25 100 200	−940 4277 9286	±48 ±48 ±48	−892 ~ −988 4229 ~ 4325 9238 ~ 9334	±90 ±90 ±90	−850 ~ −1030 4187 ~ 4367 9196 ~ 9376

表 12-98 正极与铂配对时的热电动势及允许偏差范围（GB/T 4990—1995）

补偿导 线型号	合金丝 代号	使用 分类	测量端 温度 /℃	热电动势 标称值 /μV	精密级		普通级	
					允许偏差 /μV	热电动势范围 /μV	允许偏差 /μV	热电动势范围 /μV
SC、RC 或 KCB	SPC、RPC 或 KPCB	G	100	773	±10	763 ~ 783	±12	761 ~ 785
		H	100 200	773 1336	±10		±12	761 ~ 785 1824 ~ 1848
TX	TPX	G	−25 100	−135 773	±10	−125 ~ −145 763 ~ 783	±12	−123 ~ −147 761 ~ 785
		H	−25 100 200	−135 773 1836	±10	−125 ~ −145 763 ~ 783 1826 ~ 1846	±12	−123 ~ −147 761 ~ 785 1824 ~ 1848

(续)

补偿导线型号	合金丝代号	使用分类	测量端温度/℃	热电动势标称值/ μV	精密级		普通级	
					允许偏差/ μV	热电动势范围/ μV	允许偏差/ μV	热电动势范围/ μV
KX	KPX	G	-25 100	-626 2855	± 40	-586 ~ -666 2815 ~ 2895	± 65	-561 ~ -691 2790 ~ 2920
		H	-25 100 200	-626 2855 5977	± 40	-586 ~ -666 2815 ~ 2895 5937 ~ 6017	± 65	-561 ~ -691 2790 ~ 2920 5912 ~ 6042
EX	EPX	G	-25 100	-626 2813	± 50	-576 ~ -676 2763 ~ 2863	± 80	-546 ~ -706 2733 ~ 2893
		H	-25 100 200	-626 2813 5969	± 50	-576 ~ -676 2763 ~ 2863 5919 ~ 6019	± 80	-546 ~ -706 2733 ~ 2893 5889 ~ 6049
NX	NPX	G	-25 100	-368 1784	± 40	-328 ~ -408 1744 ~ 1824	± 65	-303 ~ -433 1719 ~ 1849
		H	-25 100 200	-368 1784 3942	± 40	-328 ~ -408 1744 ~ 1824 3902 ~ 3982	± 65	-303 ~ -433 1719 ~ 1849 3877 ~ 4007

表 12-99 铂与负极配对时的热电动势及允许偏差范围 (GB/T 4990—1995)

补偿导线型号	合金丝代号	使用分类	测量端温度/℃	热电动势标称值/ μV	精密级		普通级	
					允许偏差/ μV	热电动势范围/ μV	允许偏差/ μV	热电动势范围/ μV
SC、RC	SNC 或 RNC	G	100	-128	± 20	-108 ~ -148	± 48	-80 ~ -176
		H	100 200	-128 -396	— —	— —		-80 ~ -176 -348 ~ -444
KCB	KNCB	G	100	3322	± 50	3272 ~ 3372	± 88	3234 ~ 3410
TX	TNX	G	-25 100	-805 3504	± 20 ± 20	-785 ~ -825 3484 ~ 3524	± 48 ± 48	-757 ~ -853 3456 ~ 3552
		H	-25 100 200	-805 3504 7450	± 38	-767 ~ -843 3466 ~ 3542 7412 ~ 7488	± 78	727 ~ 883 3426 ~ 3582 7372 ~ 7528
EX	ENX	G	-25 100	-805 3504	± 70	-735 ~ -875 3434 ~ 3574	± 120	-685 ~ -925 3384 ~ 3624
		H	-25 100 200	-805 3504 7450	± 70	-735 ~ -875 3434 ~ 3574 7380 ~ 7520	± 120	-685 ~ -925 3384 ~ 3624 7330 ~ 7570

(续)

补偿导线型号	合金丝代号	使用分类	测量端温度 /℃	热电动势标称值 /μV	精密级		普通级	
					允许偏差 /μV	热电动势范围 /μV	允许偏差 /μV	热电动势范围 /μV
KX	KNX	G	- 25 100	- 342 1240	± 20	- 322 ~ - 362 1220 ~ 1260	± 35	- 307 ~ - 377 1205 ~ 1275
		H	- 25 100 200	- 342 1240 2160	± 20	- 322 ~ - 362 1220 ~ 1260 2140 ~ 2180	± 35	- 307 ~ - 377 1205 ~ 1275 2125 ~ 2195
NX	NNX	G	- 25 100	- 278 989	± 20	- 258 ~ - 298 969 ~ 1009	± 35	- 243 ~ - 313 954 ~ 1024
		H	- 25 100 200	- 278 989 1970	± 20	- 258 ~ - 298 969 ~ 1009 1950 ~ 1990	± 35	- 243 ~ - 313 954 ~ 1024 1935 ~ 2005

3) 当参考端温度为 0℃ 时, 正极对铜和铜对负极在各主要温度点产生的热电动势及允许偏差应符合表 12-100 和表 12-101 的规定。

表 12-100 正极对铜的热电动势及允许偏差范围 (GB/T 4990—1995)

合金丝代号	测量端温度 /℃	热电动势标称值 /μV	精密级		普通级	
			允许偏差 /μV	热电动势范围 /μV	允许偏差 /μV	热电动势范围 /μV
KPX	- 25	- 492	± 40	- 452 ~ - 532	± 65	- 427 ~ - 557
	100	2082		2042 ~ 2122		2017 ~ 2147
	200	4141		4101 ~ 4181		4076 ~ 4206
EPX	- 25	- 492	± 50	- 442 ~ - 542	± 80	- 412 ~ - 572
	100	2040		1990 ~ 2090		1960 ~ 2120
	200	4133		4083 ~ 4183		4053 ~ 4213
NPX	- 25	- 234	± 40	- 194 ~ - 274	± 65	- 169 ~ - 299
	100	1012		972 ~ 1052		947 ~ 1077
	200	2106		2066 ~ 2146		2041 ~ 2171

表 12-101 铜对负极的热电动势及允许偏差范围 (GB/T 4990—1995)

合金丝代号	测量端温度 /℃	热电动势标称值 /μV	精密级		普通级	
			允许偏差 /μV	热电动势范围 /μV	允许偏差 /μV	热电动势范围 /μV
SNC 或 RNC	100	645	± 30	615 ~ 675	± 60	585 ~ 705
	200	1440				1380 ~ 1500

(续)

合金丝 代号	测量端 温度 /℃	热电动势 标称值 /μV	精密级		普通级	
			允许偏差 /μV	热电动势范围 /μV	允许偏差 /μV	热电动势范围 /μV
KNCB	100	4095	± 60	4035 ~ 4155	± 100	3995 ~ 4195
ENX	- 25	- 940	± 70	- 870 ~ - 1010	± 120	- 820 ~ - 1060
	100	4277		4207 ~ 4347		4157 ~ 4397
	200	9286		9216 ~ 9356		9166 ~ 9406
TNX	- 25	- 940	± 30	- 910 ~ - 970	± 60	- 880 ~ - 1000
	100	4277		4247 ~ 4307		4217 ~ 4337
TNX	- 25	- 940	± 48	- 892 ~ - 988	± 90	- 850 ~ - 1030
	100	4277		4229 ~ 4325		4187 ~ 4367
	200	9286		9238 ~ 9334		9196 ~ 9376
KNX	- 25	- 476	± 20	- 456 ~ - 496	± 35	- 441 ~ - 511
	100	2013		1993 ~ 2033		1978 ~ 2048
	200	3996		3976 ~ 4016		3961 ~ 4031
NNX	- 25	- 412	± 20	- 392 ~ - 432	± 35	- 377 ~ - 447
	100	1762		1742 ~ 1782		1727 ~ 1797
	200	3806		3786 ~ 3826		3771 ~ 3841

2. 热电偶用补偿导线合金丝的电阻率（表 12-102）

表 12-102 热电偶用补偿导线合金丝的电阻率（GB/T 4990—1995）

合金丝名称	代 号	20℃时的电阻率 /(μΩ·m)	合金丝名称	代 号	20℃时的电阻率 /(μΩ·m)
铜	SPC RPC KPCB TPX	< 0. 018	铜镍 45	ENX JNX TNX	< 0. 50
			镍铬 10	KPX EPX	
铜镍 0. 6	SNC RNC	< 0. 03	镍铬 14 硅	NPX	< 1. 05
			镍硅 4	NNX	< 0. 38
铜镍 40	KNCB	< 0. 50	镍硅 3	KNX	< 0. 28
铜镍 18	NNC		铁	JPX KPCA	< 0. 15
铜镍 22	KNCA	< 0. 55		NPC	< 0. 25

3. 热电偶用补偿导线合金丝的密度（表 12-103）

表 12-103 热电偶用补偿导线合金丝的密度（GB/T 4990—1995）

合金丝名称	20℃时密度 /(g/cm ³)	平均电阻温度 系数/℃ ⁻¹	合金丝名称	20℃时密度 /(g/cm ³)	平均电阻温度 系数/℃ ⁻¹
铜	8.95	4.3×10^{-3}	铁	7.8	6.0×10^{-3}
铜镍 0.6	8.9	2.8×10^{-3}	镍铬 14 硅 1.5	8.7	9.6×10^{-5}
镍铬 10	8.7	4.0×10^{-4}	镍硅 4.5	8.6	1.2×10^{-4}
镍硅 3	8.6	2.6×10^{-3}	铜镍 22	8.9	2.5×10^{-4}
铜镍 40	8.9	4.0×10^{-5}	铜镍 18	8.9	4.7×10^{-4}
铜镍 45	8.9	4.0×10^{-5}			

12.4.28 非晶、纳米晶软磁合金带材的物理性能

1. 非晶、纳米晶软磁合金带材的基本物理参数（表 12-104）

表 12-104 非晶、纳米晶软磁合金带材的基本物理参数（GB/T 19345—2003）

牌 号	居里温度 $T_{\text{C}}/^{\circ}\text{C}$	晶化温度 $T_{\text{g}}/^{\circ}\text{C}$	密度 d $/(\text{g}/\text{cm}^3)$	电阻率 ρ $/(\mu\Omega \cdot \text{cm})$	饱和磁感应 强度 B_{s}/T	饱和磁致伸缩系数 λ_{s}
	≈		≈	≈	≈	≈
1K101	415	550	7.2	130	1.56	27×10^{-6}
1K102	370	480	7.3	125	1.61	30×10^{-6}
1K103	360	535	7.3	130	1.41	25×10^{-6}
1K104	415	430	7.3	125	1.80	30×10^{-6}
1K105	310	520	7.5	130	1.30	20×10^{-6}
1K106	320	490	7.3	130	1.30	25×10^{-6}
1K107	570	510	7.2	110	1.25	$< 2 \times 10^{-4}$
1K201	360	530	7.6	130	0.80	$< 1 \times 10^{-6}$
1K202	220	540	7.6	135	0.55	$< 1 \times 10^{-6}$
1K203	250	480	7.6	135	0.60	$< 1 \times 10^{-6}$
1K204	365	520	7.8	135	0.70	$< 1 \times 10^{-6}$
1K205	485	410	7.6	120	0.95	$< 1 \times 10^{-6}$
1K501	250	410	7.5	135	0.78	12×10^{-6}
1K502	350	410	7.4	135	0.88	12×10^{-6}
1K503	240	400	7.5	135	0.75	15×10^{-6}
1K601	220	460	7.9	130	0.55	10×10^{-6}
1K602	300	440	7.9	130	0.60	10×10^{-6}

2. 铁基非晶、纳米晶软磁合金的化学成分、带材的磁性能 (表 12-105)

表 12-105 铁基非晶、纳米晶软磁合金的化学成分、带材的磁性能 (GB/T 19345—2003)

牌号	化学成分(摩尔分数,%)	磁感应强度 B_{800}/T	矫顽力 $H_c/(\text{A/m})$	矩形比 B_r/B_{800}	相对起始磁导率 $\mu_{0.08}$	比铁损/(W/kg)			
						$P(1.3/50\text{K})$	$P(0.4/10\text{K})$	$P(0.5/20\text{K})$	$P(0.2/10\text{K})$
1K101J	Fe78 ~ 80; Si8 ~ 10; B12 ~ 14	≥ 1.45	≤ 3.0	≥ 0.80	—	≤ 0.20	—	—	—
1K101		≥ 1.3	≤ 4.0	—	—	≤ 0.30	—	—	—
1K101H		—	≤ 4.0	≤ 0.20	—	≤ 0.30	—	—	—
1K102J	Fe80 ~ 83; Si3 ~ 4; B12 ~ 15; Cl1.5 ~ 2.5	≥ 1.5	≤ 3.0	≥ 0.80	—	—	≤ 35	—	—
1K102		≥ 1.4	≤ 4.0	—	—	—	≤ 30	—	—
1K102H		—	≤ 4.0	≤ 0.20	—	—	≤ 25	—	—
1K103	Fe76 ~ 80; Si4 ~ 9; B12 ~ 17; Cr0.5 ~ 2.0	≥ 1.3	≤ 4.0	—	—	—	≤ 35	—	—
1K104	Fe65 ~ 70; Co15 ~ 20; Si1 ~ 3; B12 ~ 15	≥ 1.6	≤ 4.0	—	—	—	≤ 35	—	—
1K105	Fe71 ~ 77; (Si, B)18 ~ 25; M1 ~ 10 ^①	≥ 1.2	≤ 4.0	—	—	—	≤ 35	—	—
1K106	Fe75 ~ 82; P15 ~ 18; C2 ~ 5; M0 ~ 5 ^①	≥ 1.3	≤ 4.0	—	—	≤ 0.25	—	—	—
1K107J	Fe70 ~ 75; (Si, B)20 ~ 25; Cu0.5 ~ 2; M1 ~ 5 ^①	≥ 1.1	≤ 2.0	≥ 0.85	—	—	—	≤ 35	≤ 150
1K107		≥ 1.1	≤ 1.6	—	≥ 60000	—	—	≤ 30	≤ 60
1K107H		≥ 1.0	≤ 1.6	≤ 0.20	—	—	—	≤ 25	≤ 50

① M 为一种或几种其他过渡金属元素。

3. 钴基非晶软磁合金的化学成分、带材的磁性能 (表 12-106)

表 12-106 钴基非晶软磁合金的化学成分、带材的磁性能 (GB/T 19345—2003)

牌号	化学成分(摩尔分数,%)	磁感应强度 B_{800}/T	矫顽力 $H_c/(\text{A/m})$	矩形比 B_r/B_{800}	相对起始磁导率 $\mu_{0.08}$	相对脉冲磁导率 μ_p ($\Delta B = 0.4 T_s$, $\tau = 1 \mu s$)	比铁损 $P(0.5/20\text{K})$ /(W/kg)	比铁损 $P(0.2/100\text{K})$ /(W/kg)
1K201	Co67 ~ 70; Fe3.5 ~ 5; Si8 ~ 12; B10 ~ 20; M2 ~ 5 ^①	≥ 0.60	≤ 2.0	—	—	≥ 6000	≤ 25	≤ 60
1K202J	Co65 ~ 68; Fe3 ~ 5; Si13 ~ 16; B13 ~ 16; M1 ~ 4 ^①	≥ 0.50	≤ 2.0	≥ 0.85	—	—	≤ 35	≤ 90
1K203	Co65 ~ 86; Fe1 ~ 7; Si0 ~ 14; B3 ~ 20; M2 ~ 15 ^①	≥ 0.70	≤ 2.0	—	≥ 50000	—	≤ 25	≤ 60
1K204	Co66 ~ 68; Fe4 ~ 5; Si6 ~ 10; B15 ~ 20; M2 ~ 7 ^①	≥ 0.70	≤ 4.0	—	≥ 10000	—	—	—
1K205H	Co50 ~ 70; Fe4 ~ 20; (Si, B)18 ~ 30; M2 ~ 15 ^①	≥ 0.80	≤ 3.0	≤ 0.10	—	—	≤ 25	≤ 60

① M 为一种或几种其他过渡金属元素。

4. 铁镍基非晶软磁合金的化学成分、带材的磁性能（表 12-107）

表 12-107 铁镍基非晶软磁合金的化学成分、带材的磁性能（GB/T 19345—2003）

编 号	化学成分(摩尔分数,%)	磁感应强度 B_{800}/T	矫顽力 $H_c/(\text{A/m})$	矩形比 B_r/B_{800}	比铁损 $P(0.5/5\text{K})$ $/(\text{W/kg})$
1K501J	Fe29 ~ 50; Ni30 ~ 44; (P, B, C) 15 ~ 24	≥ 0.60	≤ 1.6	≥ 0.80	≤ 20
1K501H		≥ 0.60	≤ 1.6	≥ 0.20	≤ 20
1K502J	Fe45 ~ 50; Ni28 ~ 30; Si7 ~ 8; B14 ~ 15; M1 ~ 2 ^①	≥ 0.80	≤ 1.6	≥ 0.80	≤ 20
1K503J	Fe35 ~ 45; Ni35 ~ 45; Si5 ~ 15; B5 ~ 15; Cr0.2 ~ 2	≥ 0.60	≤ 1.6	≥ 0.80	≤ 20

① M 为一种或几种其他过渡金属元素。

5. 钴镍基非晶软磁合金的化学成分、带材的磁性能（表 12-108）

表 12-108 钴镍基非晶软磁合金的化学成分、带材的磁性能（GB/T 19345—2003）

编号	化学成分(摩尔分数,%)	磁感应强度 B_{800}/T	矫顽力 $H_c/(\text{A/m})$	矩形比 B_r/B_{800}	比铁损 $P(0.5/5\text{K})$ $/(\text{W/kg})$
1K601	Co24 ~ 40; Ni28 ~ 39; Fe6 ~ 14; (Si, B) 12 ~ 25	≥ 0.50	≤ 1.3	—	≤ 40
1K601J		≥ 0.55	≤ 1.2	≥ 0.90	≤ 50

12.4.29 变压器用恒弹性合金棒材的物理性能

1. 变压器用恒弹性合金棒材的主要物理性能（表 12-109）

表 12-109 变压器用恒弹性合金棒材的主要物理性能^①（JB/T 8902—1999）

项目名称	性能参数	项目名称	性能参数
杨氏弹性模量 $E/(\text{N/mm}^2)$	165000 ~ 199000	密度 $\rho/(\text{g/cm}^3)$	8.0
频率温度系数 $\beta_f(-40^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C})/(10^{-6}/^\circ\text{C})$	1.0 ~ 13.0	饱和磁感应强度 B_{600}/T	0.7
		饱和磁滞伸缩系数 $\lambda_s/10^{-4}$	+5
		居里温度 $T_c/^\circ\text{C}$	110
切变模量 $G/(\text{N/mm}^2)$	65000 ~ 75000	电阻率 $\rho/\mu\Omega \cdot \text{m}$	1.1

① 冷加工时效状态。

2. 变压器用恒弹性合金棒材的弹性模量温度系数（表 12-110）

表 12-110 变压器用恒弹性合金棒材的弹性模量温度系数（JB/T 8902—1999）

时效温度 /℃	弹性模量温度系数		时效温度 /℃	弹性模量温度系数	
	β_E (-60℃ ~ +80℃) / (10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹)			β_E (-60℃ ~ +80℃) / (10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹)	
	冷 轧	软 化		冷 轧	软 化
500	-38 ~ -15	-18 ~ 20	650	0 ~ 20	42 ~ 64
550	-20 ~ 0	10 ~ 35	700	0 ~ 20	40 ~ 60
600	-10 ~ 10	35 ~ 55	750	-4 ~ 16	28 ~ 50

12.4.30 弹性敏感元件用合金带材的物理性能

1. 弹性敏感元件用合金带材的热处理制度 (表 12-111)

表 12-111 弹性敏感元件用合金带材的热处理制度 (JB/T 10078—1999)

合 金		交货状态	最佳热处理制度	
名称或组别	牌 号		固溶热处理	时效热处理
铍青铜	QBe2.0	冷轧软化	(780 ± 10)℃, 水冷	(320 ± 10)℃, 空冷 2h
锡磷青铜	QSn6.5 ~ 0.1	冷轧软化	500 ~ 600℃, 退火	—
黄铜	H80	冷轧软化	600 ~ 700℃, 退火	—
镍 36 铬钛铝	3J1	冷轧软化	980 ~ 1050℃, 水冷	620 ~ 720℃, 保温 2 ~ 4h 650 ~ 750℃, 保温 3 ~ 4h
镍 42 铬钛铝	3J53	冷轧软化	950 ~ 980℃, 水冷	620 ~ 720℃, 保温 2 ~ 3h 650 ~ 750℃, 保温 2 ~ 3h
镍 43 铬钛铝	3J58	冷轧软化	950 ~ 980℃, 水冷	620 ~ 720℃, 保温 2 ~ 3h 650 ~ 750℃, 保温 2 ~ 3h
奥氏体不锈钢	06Cr18Ni11Ti	冷轧软化	1000 ~ 1080℃, 水冷	—
奥氏体不锈钢	06Cr19Ni10	冷轧软化	1010 ~ 1150℃, 水冷	—
奥氏体不锈钢	Cr19Ni11	冷轧软化	1010 ~ 1150℃, 水冷	—
奥氏体不锈钢	06Cr17Ni12Mo2	冷轧软化	1010 ~ 1150℃, 水冷	—
奥氏体不锈钢	022Cr17Ni14Mo2	冷轧软化	1010 ~ 1150℃, 水冷	—

2. 弹性敏感元件用合金带材的物理性能 (表 12-112)

表 12-112 弹性敏感元件用合金带材的物理性能 (JB/T 10078—1999)

性 能	合 金		
	Ni36CrTiAl (3J1)	Ni42CrTiAl (3J53)	Ni43CrTiAl (3J58)
切变模量 $G/(N/mm^2)$	75000 ~ 80000	70000 ~ 80000	67000 ~ 72000
电阻率 $\rho/\mu\Omega \cdot m$	0.9 ~ 1.0	0.9 ~ 1.1	0.9 ~ 1.1
线胀系数 $\bar{\alpha}_l/(10^{-6}/^\circ C)$	12 ~ 14	9.5 ~ 10	8 ~ 9
弹性模量温度系数 $\beta_E/(10^{-6}/^\circ C)$	190	10 ~ 25	25 ~ 30
磁化率 $\chi^{(1)}/(10^{-6}/^\circ C)$	150 ~ 250	—	—
饱和磁感应强度 B_{50}/T	—	0.53	0.55

① 电磁单位制。

12.4.31 磁头用软磁合金冷轧带材的物理性能

1. 磁头用软磁合金冷轧带材的直流磁性能 (表 12-113)

表 12-113 磁头用软磁合金冷轧带材的直流磁性能^① (YB/T 086—1996)

合金牌号	相对磁导率 $\mu_{0.4}$ ($H=0.4 A/m$)	最大相对磁导率 μ_m	磁通密度 B_{10} /T	矫顽力 H_c /(A/m)
	$\geq$			$\leq$
1J75	30000	150000	0.70	1.6
1J77C	30000	100000	0.67	2.0
1J79C	30000	100000	0.75	1.6

(续)

合金牌号	相对磁导率 $\mu_{0.4}$ ($H=0.4\text{ A/m}$)	最大相对磁导率 μ_m	磁通密度 B_{10} /T	矫顽力 H_c /(A/m)
	$\geq$			$\leq$
1J85C	30000	100000	0.68	1.6
1J87C	35000	150000	0.64	1.5
1J92	35000	150000	0.70	1.5
1J93	35000	100000	0.60	2.0
1J94	40000	100000	0.60	1.6
1J95	40000	100000	0.55	1.6

① 热处理后的性能。

2. 磁头用软磁合金冷轧带材的交流磁性能（表 12-114）

表 12-114 磁头用软磁合金冷轧带材的交流磁性能（YB/T 086—1996）

合金牌号	带材厚度 /mm	阻抗相对磁导率 μ_s ($H=0.8\text{ A/m}$)			
		0.3kHz	1kHz	10kHz	100kHz
		$\geq$			
1J75	0.094	30000	20000	6000	1200
	0.116	25000	18000	5000	1000
	0.146	20000	14000	4000	700
	0.196	15000	10000	3000	500
1J79C	0.094	30000	15000	5000	1200
	0.116	20000	12000	4000	1000
	0.146	12000	10000	3000	700
	0.196	10000	8000	2500	500
1J85C	0.094	30000	20000	7000	1500
	0.116	25000	18000	6000	1200
	0.146	20000	14000	5000	700
	0.196	15000	10000	3000	500
	0.32	10000	8000	1500	300
1J87C	0.094	35000	25000	7000	1500
	0.116	30000	20000	6000	1200
	0.146	25000	15000	5000	800
	0.196	15000	10000	3000	600
1J92	0.094	30000	25000	6000	1400
	0.116	25000	20000	5500	1200
	0.146	20000	15000	4500	800
	0.196	15000	10000	3000	600
1J93	0.094	40000	25000	8000	1500
	0.116	35000	20000	7000	1200
	0.146	30000	15000	5000	1000
	0.196	20000	12000	4000	600
1J94	0.118	—	25000	—	1400
	0.144	—	15000	—	1000
	0.195	—	10000	—	700
1J95	0.116	—	20000	—	1300
	0.146	—	14000	—	700
	0.196	—	10000	—	500

注：指热处理后的性能。

3. 磁头用软磁合金冷轧带材的热处理制度 (表 12-115)

表 12-115 磁头用软磁合金冷轧带材的热处理制度 (YB/T 086—1996)

合金牌号	退火介质	加热温度 /°C	保温时间 /h	冷 却 制 度
1J75	氢气	950 ~ 1100	2 ~ 3	以 100 ~ 200°C/h 速度冷至 450°C 后快冷
1J77C		1050 ~ 1150	2 ~ 4	以 200°C/h 速度冷至 450°C 后快冷
1J79C		1050 ~ 1150	3 ~ 6	以 100 ~ 200°C/h 速度冷至 300°C 后出炉
1J85C		1050 ~ 1150	2 ~ 6	炉冷至 600°C 后,以 200°C/h 速度冷至 300°C 出炉
1J87C		1050 ~ 1150	2 ~ 4	以 150 ~ 200°C/h 速度冷至 600°C,以 200 ~ 300°C/h 速度冷却
1J92		950 ~ 1100	3 ~ 4	以 150 ~ 200°C/h 速度冷至 600°C,以 200 ~ 300°C/h 速度冷却
1J93		1050 ~ 1150	2 ~ 6	以 200°C/h 速度冷至 500 ~ 550°C 后快冷
1J94		1050 ~ 1150	2 ~ 4	以 200°C/h 速度冷至 400°C 后快冷
1J95		1050 ~ 1150	3 ~ 4	以 200°C/h 速度冷至 550 ~ 600°C 后快冷

注:露点低于 -40°C。

4. 磁头用软磁合金冷轧带材的基本物理参数和成品退火后的硬度值 (表 12-116)

表 12-116 磁头用软磁合金冷轧带材的基本物理参数和
成品退火后的硬度值 (YB/T 086—1996)

合金牌号	电阻率/ $\mu\Omega \cdot m$	密度/(g/cm^3)	居里温度/°C	硬度 HV
1J75	0.55	8.6	360	120
1J77C	0.55	8.6	350	120
1J79C	0.55	8.6	400	120
1J85C	0.60	8.75	400	120
1J87C	0.64	8.7	380	150
1J92	0.65	8.82	380	140
1J93	0.65	8.8	330	140
1J94	0.66	8.8	320	130
1J95	0.65	8.6	320	140

12.4.32 无磁定膨胀瓷封镍基合金的物理性能

1. 无磁定膨胀瓷封镍基合金的平均线胀系数和磁导率 (表 12-117)

表 12-117 无磁定膨胀瓷封镍基合金的平均线胀系数和
磁导率 (YB/T 5233—2005)

合金牌号	试样热处理制度	平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l/(10^{-6}/^{\circ}C)$		磁导率 μ_{16000} /($\mu H/m$)
		20 ~ 500°C	20 ~ 600°C	
4J78	在氢气或真空中加热至 1000 ~ 1050°C,保温 30 ~ 40min,以不大于 5°C/min 的速度冷至 300°C 以下,出炉	12.1 ~ 12.7	12.4 ~ 13.0	≤ 1.263

(续)

合金牌号	试样热处理制度	平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$		磁导率 μ_{16000} / $(\mu\text{H}/\text{m})$
		20 ~ 500 $^{\circ}\text{C}$	20 ~ 600 $^{\circ}\text{C}$	
4J80	在氢气或真空中加热至 850 ~ 900 $^{\circ}\text{C}$, 保温 30 ~ 40min, 以不大于 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度冷至 300 $^{\circ}\text{C}$ 以下, 出炉	12.7 ~ 13.3	13.0 ~ 13.6	≤ 1.263
4J82	在氢气或真空中加热至 1000 ~ 1050 $^{\circ}\text{C}$, 保温 30 ~ 40min, 以不大于 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度冷至 300 $^{\circ}\text{C}$ 以下, 出炉	12.5 ~ 13.1	13.0 ~ 13.6	≤ 1.263

2. 无磁定膨胀瓷封镍基合金的典型线胀系数 (表 12-118)

表 12-118 无磁定膨胀瓷封镍基合金的典型线胀系数 (YB/T 5233—2005)

合金 牌号	平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$										
	20 ~ 100 $^{\circ}\text{C}$	20 ~ 200 $^{\circ}\text{C}$	20 ~ 300 $^{\circ}\text{C}$	20 ~ 400 $^{\circ}\text{C}$	20 ~ 500 $^{\circ}\text{C}$	20 ~ 600 $^{\circ}\text{C}$	20 ~ 700 $^{\circ}\text{C}$	20 ~ 800 $^{\circ}\text{C}$	20 ~ 900 $^{\circ}\text{C}$	20 ~ 1000 $^{\circ}\text{C}$	20 ~ 1050 $^{\circ}\text{C}$
4J78	11.3	11.6	11.8	12.1	12.4	12.5	13.2	13.7	14.2	14.7	15.0
4J80	11.6	11.9	12.4	12.7	13.0	13.0	—	—	—	—	—
4J82	11.3	11.6	11.9	12.3	12.7	13.1	—	—	—	—	—

3. 无磁定膨胀瓷封镍基合金的其他物理性能 (表 12-119)

表 12-119 无磁定膨胀瓷封镍基合金的其他物理性能 (YB/T 5233—2005)

合金牌号	电阻率 $\rho/(\mu\Omega \cdot \text{m})$	密度 $\gamma/(\text{g}/\text{cm}^3)$	热导率 $\lambda/[10^3\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$		
			20 $^{\circ}\text{C}$	300 $^{\circ}\text{C}$	600 $^{\circ}\text{C}$
4J78	1.17	9.38	0.138	0.155	0.167
4J80	0.88	9.67	0.155	0.167	0.214
4J82	1.00	9.23	0.159	0.172	0.218

12.4.33 手表游丝用恒弹性合金 3J53Y 丝材的物理性能 (表 12-120)

表 12-120 手表游丝用恒弹性合金 3J53Y 丝材的物理性能 (YB/T 5262—1993)

弹性模量 $E/(\text{N}/\text{mm}^2)$	176520 ~ 191230	饱和磁致伸缩系数 $\lambda_s/10^{-6}$	+5
切变模量 $G/(\text{N}/\text{mm}^2)$	63745 ~ 73550	居里温度 $T_c/^{\circ}\text{C}$	110
密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	8.0	电阻率 $\rho/(\mu\Omega \cdot \text{m})$	1.1
平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l(20 \sim 100^{\circ}\text{C})/$ $(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	8.5	抗拉强度 $R_m/(\text{N}/\text{mm}^2)$	1470
		伸长率 $A(\%)$	6
饱和磁感应强度 R_s/T	0.7	硬度 HV	420

12.4.34 新康铜电阻合金的物理性能

1. 新康铜电阻合金的每米电阻值及允许偏差（表 12-121）

表 12-121 新康铜电阻合金的每米电阻值及允许偏差（GB/T 6149—1985）

线径/mm		截面积/mm ²	每米电阻值		每米标称质量 /(g/m)
标称值	允许偏差		标准值/(Ω/m)	允许偏差(%)	
0.315	±0.010	0.07793	6.29	±7	0.6234
0.355		0.09898	4.95		0.7918
0.400		0.1257	3.90		1.005
0.45		0.1590	3.08		1.272
0.50	+0.01 -0.02	0.1963	2.50		1.571
0.56		0.2463	1.99		1.970
0.63		0.3117	1.57		2.494
0.71		0.3959	1.24		3.167
0.75		0.4418	1.11		3.534
0.80		0.5027	0.975		4.021
0.85		0.5674	0.864		4.540
0.90		0.6362	0.770		5.089
0.95	±0.02	0.7088	0.691	±6	5.671
1.00		0.7854	0.624		6.283
1.06		0.8825	0.555		7.060
1.12		0.9852	0.497		7.882
1.18		1.093	0.448		8.749
1.25		1.227	0.399		9.817
1.32		1.368	0.358		10.95
1.40		1.539	0.318		12.32
1.50		1.767	0.277		14.14
1.60		2.011	0.244		16.08
1.70	+0.02 -0.03	2.270	0.216	±5	18.16
1.80		2.545	0.193		20.36
1.90		2.835	0.173		22.68
2.00		3.142	0.156		25.13
2.12		3.530	0.139		28.24
2.24	±0.03	3.941	0.124		31.53

(续)

线径/mm		截面积/mm ²	每米电阻值		每米标称质量 /(g/m)
标称值	允许偏差		标准值/(Ω/m)	允许偏差(%)	
2.36	±0.03	4.374	0.112	±5	34.99
2.50		4.909	0.0998		39.27
2.65		5.515	0.0888		44.12
2.80		6.158	0.0796		49.26
3.00	+0.03 -0.04	7.069	0.0693		56.55
3.15		7.793	0.0629		62.34
3.35		8.814	0.0556		70.51
3.55		9.898	0.0495		79.18
3.75		11.04	0.0444		88.36
4.00		12.57	0.0390		100.5
4.25		14.18	0.0346		113.5
4.50		15.90	0.0308		127.2
4.75	±0.04	17.72	0.0276	±4	141.8
5.00		19.63	0.0250		157.1
5.30		22.06	0.0222		176.5
5.60		24.63	0.0199		197.2
6.00		26.27	0.0186		226.2
6.30	±0.05	31.17	0.0157		249.4
6.70		35.26	0.0139		282.1
7.10		39.59	0.0124		316.7
7.50		44.18	0.0111		353.4
8.00		50.27	0.00975		402.1

注：1. 计算每米标称电阻时，电阻率取 0.49μΩ·m。

2. 计算每米标称质量时，密度取 8g/cm³。

2. 新康铜电阻合金的电阻温度系数（表 12-122）

表 12-122 新康铜电阻合金的电阻温度系数（GB/T 6149—1985）

合金名称	温度范围/°C	平均电阻温度系数/(10 ⁻⁶ /°C)
新康铜	20 ~ 200	- 40 ~ 40
	20 ~ 500	- 80 ~ 80

3. 新康铜电阻合金带材的每米标称电阻值（表 12-123）

表 12-123 新康铜电阻合金带材的每米标称电阻值（GB/T 6149—1985）

（单位： Ω/m ）

宽度/mm 厚度/mm	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	20.0	25.0	31.5	40.0
0.180	0.460								
0.200	0.414								
0.224	0.369	0.291							
0.250	0.331	0.261	0.200						
0.280	0.296	0.233	0.179						
0.315	0.263	0.207	0.159	0.127					
0.355	0.233	0.184	0.141	0.113					
0.400	0.207	0.163	0.125	0.100	0.0781				
0.450	0.184	0.145	0.111	0.0889	0.0694	0.0556	0.0444		
0.500	0.165	0.130	0.100	0.0800	0.0625	0.0500	0.0400		
0.560	0.148	0.116	0.0893	0.0714	0.0558	0.0446	0.0357		
0.630	0.131	0.103	0.0794	0.0635	0.0496	0.0397	0.0317		
0.710	0.117	0.0918	0.0704	0.0563	0.0440	0.0352	0.0282		
0.800	0.103	0.0814	0.0625	0.0500	0.0391	0.0312	0.0250	0.0198	
0.900	0.0919	0.0724	0.0556	0.0444	0.0347	0.0278	0.0222	0.0176	
1.000	0.0827	0.0652	0.0500	0.0400	0.0313	0.0250	0.0200	0.0159	0.0125
1.120	0.0739	0.0582	0.0446	0.0357	0.0279	0.0223	0.0179	0.0142	0.0112
1.250	0.0662	0.0521	0.0400	0.0320	0.0250	0.0200	0.0160	0.0127	0.0100
1.400	0.0591	0.0465	0.0357	0.0286	0.0223	0.0179	0.0143	0.0113	0.0089
1.600	0.0517	0.0407	0.0312	0.0250	0.0195	0.0156	0.0125	0.0099	0.0078
1.800	0.0460	0.0362	0.0278	0.0222	0.0174	0.0139	0.0111	0.0088	0.0069
2.000	0.0414	0.0326	0.0250	0.0200	0.0156	0.0125	0.0100	0.0079	0.0063

注：本表电阻率取 $0.49\mu\Omega \cdot \text{m}$ 。

4. 新康铜电阻合金的其他物理性能（表 12-124）

表 12-124 新康铜电阻合金的其他物理性能（GB/T 6149—1985）

项 目	性 能 数 据
熔点/ $^{\circ}\text{C}$	965
密度(20°C)/(g/cm^3)	8.0
热导率(20°C)/[$\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$]	21.8
比热容(20°C)/[$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$]	0.4
线胀系数($25 \sim 400^{\circ}\text{C}$)/($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	19.8
对铜热电动势率($0 \sim 100^{\circ}\text{C}$)/($\text{mV}/^{\circ}\text{C}$)	0.002

12.4.35 锰铜精密电阻合金的物理性能

1. 锰铜精密电阻合金线材的每米电阻值（表 12-125）

表 12-125 锰铜精密电阻合金线材的每米电阻值（JB/T 9502—1999）

线径/mm		截面积 /mm ²	每米电阻值/(Ω /m)				每米标称质量/(g/m)
标称值	允许偏差		标称值	允许偏差	下限值	上限值	
0.020	± 0.002	0.000314	1496	$\pm 10\%$	1346	1646	0.00265
0.022		0.000380	1236		1113	1360	0.00321
0.025		0.000491	957		862	1053	0.00414
0.028		0.000616	763		687	840	0.00520
0.032	± 0.003	0.000804	584	$\pm 8\%$	538	631	0.00679
0.036		0.001018	462		425	499	0.00859
0.040		0.001257	374		344	404	0.0106
0.045		0.001590	296		272	319	0.0134
0.050		0.001963	239		220	259	0.0166
0.056		0.002463	191		176	206	0.0208
0.063		0.003117	151		139	163	0.0263
0.071		0.003959	119		109	128	0.0334
0.080		0.005027	93.5		86.0	101	0.0424
0.090		0.006362	73.9		68.0	79.8	0.0537
0.100		0.007854	59.8		55.1	64.6	0.0663
0.112	± 0.005	0.009852	47.7	$\pm 7\%$	44.4	51.0	0.0832
0.125		0.01227	38.3		35.6	41.0	0.104
0.140		0.01539	30.5		28.4	32.7	0.130
0.160		0.02011	23.4		21.7	25.0	0.170
0.180		0.02545	18.5		17.2	19.8	0.215
0.200	± 0.005	0.03142	15.0	$\pm 6\%$	14.1	15.9	0.265
0.224		0.03941	11.9		11.2	12.6	0.333
0.250		0.04909	9.57		9.00	10.1	0.414
0.280		0.06158	7.63		7.17	8.09	0.520
0.315	± 0.010	0.07793	6.03	$\pm 5\%$	5.73	6.33	0.658
0.355		0.09898	4.75		4.51	4.99	0.835
0.400		0.1257	3.74		3.55	3.93	1.06
0.450		0.1590	2.96		2.81	3.10	1.34

(续)

线径/mm		截面积 /mm ²	每米电阻值/(Ω/m)				每米标称质量/(g/m)
标称值	允许偏差		标称值	允许偏差	下限值	上限值	
0.500	±0.010	0.1963	2.39	±5%	2.27	2.51	1.66
0.560	±0.015	0.2463	1.91	±4%	1.83	1.98	2.08
0.630		0.3117	1.51		1.45	1.57	2.63
0.710		0.3959	1.19		1.14	1.23	3.34
0.750		0.4418	1.06		1.02	1.11	3.73
0.800		0.5027	0.935		0.898	0.972	4.24
0.850		0.5674	0.828		0.795	0.861	4.79
0.900		0.6362	0.739		0.709	0.768	5.37
0.950		0.7088	0.663		0.637	0.690	5.98
1.000		0.7854	0.598		0.574	0.622	6.63
1.060	±0.020	0.8825	0.533	±4%	0.511	0.554	7.45
1.120		0.9852	0.477		0.458	0.496	8.32
1.180		1.094	0.430		0.413	0.447	9.23
1.250		1.227	0.383		0.368	0.398	10.4
1.320		1.368	0.343		0.330	0.357	11.5
1.400		1.539	0.305		0.293	0.318	13.0
1.500		1.767	0.266		0.255	0.277	14.9
1.600		2.011	0.234		0.224	0.243	17.0
1.700	±0.025	2.270	0.207	±4%	0.199	0.215	19.2
1.800		2.545	0.185		0.177	0.192	21.5
1.900		2.835	0.166		0.159	0.172	23.9
2.000		3.142	0.150		0.144	0.156	26.5
2.120		3.530	0.133		0.128	0.138	29.8
2.240	±0.030	3.941	0.119	±4%	0.114	0.124	33.3
2.360		4.374	0.107		0.103	0.112	36.9
2.500		4.909	0.0957		0.0919	0.0996	41.4

2. 锰铜精密电阻合金线材的电阻温度系数（表 12-126）

表 12-126 锰铜精密电阻合金线材的电阻温度系数（JB/T 9502—1999）

产 品 名 称		适用温度/°C	测试温度/°C	电阻温度系数	
				$\alpha/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	$\beta/(10^{-6}/^{\circ}\text{C}^2)$
锰铜合金线、片	0 级	5 ~ 45	10、20、40	-2 ~ 2	-0.7 ~ 0
	1 级			-3 ~ 5	

12.4.36 粘结钕铁硼永磁材料的物理性能

1. 粘结钕铁硼永磁材料 (23 ± 3)℃下的磁性能和密度 (表 12-127)

表 12-127 粘结钕铁硼永磁材料 (23 ± 3)℃下的磁性能和密度 (GB/T 18880—2002)

材 料			主要磁性能				密 度
成形方式	种类	牌号	B_r/T	$H_{CJ}/(kA/m)$	$H_{cB}/(kA/m)$	$(BH)_{max}/(kJ/m^3)$	$\rho/(g/cm^3)$
			范围值	范围值	范围值	范围值	范围值
压缩成型	L	048121A	0.70 ~ 0.80	200 ~ 280	160 ~ 200	36 ~ 52	5.5 ~ 6.0
	M	048131A	0.54 ~ 0.60	600 ~ 900	320 ~ 380	48 ~ 56	5.5 ~ 6.1
		048132A	0.59 ~ 0.64	640 ~ 900	340 ~ 420	56 ~ 64	5.6 ~ 6.1
		048133A	0.62 ~ 0.70	640 ~ 900	360 ~ 440	64 ~ 72	5.7 ~ 6.2
		048134A	0.65 ~ 0.72	640 ~ 880	400 ~ 460	72 ~ 80	5.7 ~ 6.2
		048135A	0.69 ~ 0.76	700 ~ 880	400 ~ 480	80 ~ 96	5.8 ~ 6.4
	H	048141A	0.58 ~ 0.62	1035 ~ 1380	380 ~ 440	56 ~ 68	5.8 ~ 6.2
注射成型	M	048131B	0.35 ~ 0.46	600 ~ 750	250 ~ 350	24 ~ 36	4.0 ~ 4.7
		048132B	0.46 ~ 0.52	520 ~ 750	280 ~ 350	35 ~ 40	4.5 ~ 5.2
		048133B	0.52 ~ 0.62	640 ~ 800	300 ~ 370	40 ~ 56	5.2 ~ 5.5

2. 压缩成型粘结钕铁硼永磁材料其他物理性能 (表 12-128)

表 12-128 压缩成型粘结钕铁硼永磁材料其他物理性能 (GB/T 18880—2002)

性 能	指 标
$\alpha(B_r)/(10^{-2}/^{\circ}C)$	-0.11
$\alpha(H_{CJ})/(10^{-2}/^{\circ}C)$	-0.40
μ_{rec}	1.16
T_C/K	578
硬度 HRB	35
线胀系数/ $(10^{-5}/^{\circ}C)$	1.24
压缩强度/ (N/mm^2)	200
最高工作温度/K(P=3,不可逆损失 $\geq 5\%$ 时对应的温度)	398

注：1. $\alpha(B_r)$ 、 $\alpha(H_{CJ})$ 的测量温度范围为 25 ~ 125℃。

2. 压缩强度试样尺寸为 $\phi 10mm \times 9mm$ 。

3. 注射成型粘结钕铁硼永磁材料其他物理性能 (表 12-129)

表 12-129 注射成型粘结钕硼永磁材料其他物理性能 (GB/T 18880—2002)

性 能	指 标	性 能	指 标
$\alpha(B_r)/(10^{-2}/^{\circ}\text{C})$	-0.10	μ_{rec}	1.20
$\alpha(H_{\text{CJ}})/(10^{-2}/^{\circ}\text{C})$	-0.40	T_{C}/K	578

注: $\alpha(B_r)$ 、 $\alpha(H_{\text{CJ}})$ 的测量温度范围为 25 ~ 125℃。

12.4.37 快淬钕铁硼永磁粉的物理性能

1. 快淬钕铁硼永磁粉 (23 ± 3)℃下的主要磁性能 (表 12-130)

表 12-130 快淬钕铁硼永磁粉 (23 ± 3)℃下的主要磁性能 (GB/T 20168—2006)

材 料		主要磁性能			
种类	牌号	剩余磁感应强度 B_r/T	磁极化强度矫顽力 $H_{\text{CJ}}/(\text{kA/m})$	磁感应强度矫顽力 $H_{\text{CB}}/(\text{kA/m})$	最大磁能积 $((BH)_{\text{max}})/(\text{kJ/m}^3)$
L	048221A	≥0.90 ~ 1.05	≥200 ~ 280	≥160 ~ 200	≥60 ~ 68
	048222A	≥0.82 ~ 0.88	≥280 ~ 500	≥200 ~ 400	≥54 ~ 72
	048223A	≥0.90 ~ 1.00	≥500 ~ 640	≥400 ~ 490	≥112 ~ 140
M	048231A	≥0.70 ~ 0.78	≥640 ~ 900	≥360 ~ 420	≥76 ~ 84
	048232A	≥0.77 ~ 0.82	≥640 ~ 900	≥300 ~ 460	≥84 ~ 96
	048233A	≥0.82 ~ 0.89	≥640 ~ 900	≥410 ~ 480	≥96 ~ 106
	048234A	≥0.84 ~ 0.89	≥640 ~ 880	≥450 ~ 510	≥106 ~ 114
	048235A	≥0.85 ~ 0.92	≥700 ~ 920	≥450 ~ 560	≥114 ~ 130
	048236A	≥0.75 ~ 0.85	≥920 ~ 1035	≥430 ~ 530	≥88 ~ 114
H	048241A	≥0.75 ~ 0.82	≥1035 ~ 1430	≥430 ~ 510	≥84 ~ 104
M	048231B	≥0.73 ~ 0.76	≥640 ~ 800	≥400 ~ 460	≥80 ~ 92

2. 快淬钕铁硼永磁粉其他物理性能 (表 12-131)

表 12-131 快淬钕铁硼永磁粉其他物理性能 (GB/T 20168—2006)

性 能	典型值
剩余磁感应强度温度系数 $\alpha(B_r)/(10^{-2}/^{\circ}\text{C})$	-0.11
磁极化强度矫顽力温度系数 $\alpha(H_{\text{CJ}})/(10^{-2}/^{\circ}\text{C})$	-0.40
居里温度 $T_{\text{C}}/^{\circ}\text{C}$	305
最高工作温度/ $^{\circ}\text{C}$ ($P=2.5$, 工作时间 $T=2\text{h}$, 不可逆损失 ≥5% 时对应的温度)	125
最高工艺温度/ $^{\circ}\text{C}$ (加热时间 $T=1\text{h}$, 剩余磁感应强度 B_r 不可逆损失 ≥2% 时对应的温度)	200
松装密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$	2.5
氧质量分数/ $(\mu\text{g/g})$	600
理论密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$	7.64

注: $\alpha(B_r)$ 、 $\alpha(H_{\text{CJ}})$ 的测量温度范围为 25 ~ 125℃。

12.4.38 铁-铜镍热电偶丝的物理性能

1. 铁-铜镍热电偶丝的温度使用上限（表 12-132）

表 12-132 铁-铜镍热电偶丝的温度使用上限（GB/T 4994—1998）

偶丝直径/mm	长期使用温度上限/°C	短期使用温度上限/°C
0.3、0.5	300	400
0.8、1.0、1.2	400	500
1.6、2.0	500	600
2.5、3.2	600	750

2. 铁-铜镍热电偶丝的不均匀热电动势（表 12-133）

表 12-133 铁-铜镍热电偶丝的不均匀热电动势（GB/T 4994—1998）

偶丝直径/mm	测量端温度/°C	不均匀热电动势/μV			
		Ⅰ级		Ⅱ级	
		铁	铜镍	铁	铜镍
0.3、0.5	300	10	45	20	75
0.8、1.0、1.2	400	10	50	20	90
1.6、2.0	500	15	60	25	115
2.5、3.2	600	20	75	35	140

3. 铁-铜镍热电偶丝的热电动势及允许偏差（表 12-134）

表 12-134 铁-铜镍热电偶丝的热电动势及允许偏差（GB/T 4994—1998）

（单位：μV）

测量端温度/°C	热电动势标称值	Ⅰ级		Ⅱ级	
		允许偏差	热电动势范围	允许偏差	热电动势范围
100	5269	± 82	5187 ~ 5351	± 136	5133 ~ 5405
200	10779	± 83	10696 ~ 10862	± 139	10640 ~ 10918
300	16327	± 83	16244 ~ 16410	± 138	16189 ~ 16465
400	21848	± 88	21760 ~ 21936	± 165	21683 ~ 22013
500	27393	± 112	27281 ~ 27505	± 210	27183 ~ 27603
600	33102	± 140	32962 ~ 33242	± 263	32839 ~ 33365
700	39132	± 174	38958 ~ 39306	± 327	38805 ~ 39459
750	42281	± 192	42089 ~ 42473	± 360	41921 ~ 42641
760	42919	± 194	42725 ~ 43113	± 364	42555 ~ 43283

4. 热电偶丝在主要温度点的热电动势率（表 12-135）

表 12-135 热电偶丝在主要温度点的热电动势率（GB/T 4994—1998）

温度/°C	S/($\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$)		
	铁-铜镍	铁-铂	铂-铜镍
0	50.38	17.55	32.83
100	54.36	17.18	37.18
200	55.51	14.57	40.94
300	55.35	11.69	43.66
400	55.15	9.72	45.43
500	55.99	9.59	46.40
600	58.49	11.56	46.93
700	62.15	15.32	46.83
750	63.70	17.05	46.65
760	63.92	17.31	46.61

5. 铁-铜镍热电偶丝的其他物理性能（表 12-136）

表 12-136 铁-铜镍热电偶丝的其他物理性能（GB/T 4994—1998）

性 能	铁丝	铜镍合金丝
熔点/°C	1402	1220
密度/(g/cm^3)	7.80	8.80
在 20°C 时的电阻率/($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	12.0	49.0
在 20 ~ 760°C 范围内平均电阻温度系数/($10^{-4}/^{\circ}\text{C}$)	95.0	0.5

12.4.39 发热电阻合金的物理性能

1. 发热电阻合金的公称电阻率及允许偏差（表 12-137）

表 12-137 发热电阻合金的公称电阻率及允许偏差（JB/T 6454—2008）

品 种 类 别	牌 号	电阻率(20°C)/ $\mu\Omega \cdot \text{m}$	允 许 偏 差
铜镍(锰)	NC003	0.03	$\pm 10\%$
	NC005	0.05	
	NC010	0.10	
	NC012	0.12	
	MC012	0.12	
	NC015	0.15	

(续)

品 种 类 别	牌 号	电阻率(20℃)/ $\mu\Omega \cdot m$	允 许 偏 差
铜镍(锰)	NC020	0. 20	$\pm 5\%$
	NC025	0. 25	
	NC030	0. 30	
	NC035	0. 35	
	NC040	0. 40	
	NC050	0. 49	
镍铬铁	NCF072	0. 72	
	NCF080	0. 80	
	NCF104	1. 04	
	NCF113	1. 13	
铁铬铝	FCA126	1. 25	
	FCA137	1. 37	
	FCA142	1. 42	
	FCA153	1. 53	

2. 发热电阻合金的其他物理性能（表 12-138）

表 12-138 发热电阻合金的其他物理性能（JB/T 6454—2008）

牌 号	电阻温度系数 (20 ~ 600℃) /($10^{-5}/K$)	熔点 /℃	密 度 /(g/cm^3)	比热容 /[$J/(g \cdot K)$]	热导率 /[$W/(m \cdot K)$]	平均线胀系数 (20 ~ 400℃) /($10^{-6}/K$)	对铜热电动势率 (0 ~ 100℃) /($\mu V/K$)
NC003	< 120	1085	8. 9	0. 38	145	17. 5	- 8
NC005	< 100	1090	8. 9	0. 38	130	17. 5	- 12
NC010	< 60	1095	8. 9	0. 38	92	17. 5	- 18
NC012	< 57	1097	8. 9	0. 38	75	17. 5	- 22
MC012	< 38	1050	8. 9	0. 39	84	18	—
NC015	< 50	1100	8. 9	0. 38	59	17. 5	- 25
NC020	< 38	1115	8. 9	0. 38	48	17. 5	- 28
NC025	< 25	1135	8. 9	0. 38	38	17. 5	- 32
NC030	< 16	1150	8. 9	0. 38	33	17. 5	- 34
NC035	< 10	1170	8. 9	0. 39	27	17	- 37
NC040	0	1180	8. 9	0. 40	25	16	- 39
NC050	- 6 <	1280	8. 9	0. 41	23	15	- 43

(续)

牌号	电阻温度系数 (20~600℃) /(10 ⁻⁵ /K)	熔点 /℃	密度 /(g/cm ³)	比热容 /[J/(g·K)]	热导率 /[W/(m·K)]	平均线胀系数 (20~400℃) /(10 ⁻⁶ /K)	对铜热电动势率 (0~100℃) /(μV/K)
NCF072	<190	1425	7.9	0.12	13	—	+3
NCF104	<31	1390	7.9	0.12	13	16	—
NCF113	<14	1390	8.2	0.11	13	15	+1
FCA126	15.5	1450	7.4	0.12	13	15.4	—
FCA137	8.6	1500	7.2	0.12	11	12	—
FCA142	4.1	1500	7.1	0.12	11	12	+5
FCA153	-1.4	1520	7.1	0.12	11	16.6	—

12.4.40 玻封铁镍铜合金 4J41 的物理性能

1. 玻封铁镍铜合金 4J41 的平均线胀系数 (表 12-139)

表 12-139 玻封铁镍铜合金 4J41 的平均线胀系数 (YB/T 5237—2005)

合金牌号	试样热处理制度	平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	
		20~300℃	20~400℃
4J41	在氢气或真空中加热至(850±20)℃,保温 1h,以不大于 5℃/min 的速度冷至 400℃ 以下出炉	8.4~9.5	8.5~9.6

2. 玻封铁镍铜合金 4J41 的典型线胀系数 (表 12-140)

表 12-140 玻封铁镍铜合金 4J41 的典型线胀系数 (YB/T 5237—2005)

合金牌号	平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$						
	20~100℃	20~200℃	20~300℃	20~350℃	20~400℃	20~450℃	20~500℃
4J41	9.26	8.76	8.53	8.47	8.56	9.19	9.87

3. 玻封铁镍铜合金 4J41 的其他物理性能 (表 12-141)

表 12-141 玻封铁镍铜合金 4J41 的其他物理性能 (YB/T 5237—2005)

合金牌号	电阻率 $\rho/(\mu\Omega\cdot\text{m})$	居里温度/℃
4J41	0.53	420

12.4.41 线纹尺用定膨胀铁镍合金 4J58 的物理性能

1. 线纹尺用定膨胀铁镍合金 4J58 的平均线胀系数 (表 12-142)

表 12-142 线纹尺用定膨胀铁镍合金 4J58 的平均线胀系数 (YB/T 5238—2005)

合金牌号	试样热处理制度	平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$
		20 ~ 100℃
4J58	在氢气或真空中加热至 $(900 \pm 20)^{\circ}\text{C}$, 保温 1h, 以不大于 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度冷至 200°C 以下出炉	11.1 ~ 11.9

2. 线纹尺用定膨胀铁镍合金 4J58 的典型线胀系数 (表 12-143)

表 12-143 线纹尺用定膨胀铁镍合金 4J58 的典型线胀系数 (YB/T 5238—2005)

合金牌号	平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$						
	20 ~ 50℃	20 ~ 100℃	20 ~ 200℃	20 ~ 300℃	20 ~ 400℃	20 ~ 500℃	20 ~ 600℃
4J58	10.6	11.3	11.5	11.7	11.9	12.1	12.3

12.4.42 无磁磁尺基体用铁锰合金 4J59 的物理性能

1. 无磁磁尺基体用铁锰合金 4J59 的平均线胀系数和磁导率 (表 12-144)

表 12-144 无磁磁尺基体用铁锰合金 4J59 的平均线胀系数和磁导率 (YB/T 5239—2005)

合金牌号	试样热处理制度	平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	磁导率 μ_{16000} /($\mu\text{H}/\text{m}$)
		20 ~ 50℃	
4J59	在氢气或真空中加热至 $(830 \pm 20)^{\circ}\text{C}$, 保温 1h, 以不大于 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度冷至 300°C 以下出炉	10.5 ~ 11.5	≤ 1.263

2. 无磁磁尺基体用铁锰合金 4J59 的直流磁导率 (表 12-145)

表 12-145 无磁磁尺基体用铁锰合金 4J59 的直流磁导率 (YB/T 5239—2005)

合金牌号	磁场强度 $H/(A/\text{m})$							
	4000	8000	12000	16000	24000	32000	40000	48000
	磁导率 $\mu/(m\text{H}/\text{m})$							
4J59	1.2515	1.2516	1.2518	1.2518	1.2518	1.2518	1.2518	1.2518

3. 无磁磁尺基体用铁锰合金 4J59 的其他物理性能 (表 12-146)

表 12-146 无磁磁尺基体用铁锰合金 4J59 的其他物理性能 (YB/T 5239—2005)

合金牌号	平均线胀系数 $\bar{\alpha}_l/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$				居里温度 $T/^{\circ}\text{C}$	金相组织 (-196℃ 冷冻 1h)
	20 ~ 50℃	20 ~ 100℃	20 ~ 200℃	20 ~ 300℃		
4J59	10.9	12.8	15.6	16.8	70	奥氏体

第 13 章 常用有色金属材料的物理性能

13.1 铝及铝合金的物理性能

13.1.1 电工用铝及铝合金扁线的电阻率（表 13-1）

表 13-1 电工用铝及铝合金扁线的电阻率（GB/T 5584.3—2009）

型 号	电阻率 $\rho_{20}/(\mu\Omega \cdot \text{m})$ $\leq$	型 号	电阻率 $\rho_{20}/(\mu\Omega \cdot \text{m})$ $\leq$
LBR	0.0280	LBY4	0.028264
LBY2	0.028264	LBY8	0.028264

注：计算 20℃ 时的铝扁线物理参数：密度取 2.703g/cm³；线胀系数取 0.000023/℃；电阻温度系数，LBR 型为 0.00407/℃，其余型为 0.00403/℃。

13.1.2 电工圆铝线的电性能（表 13-2）

表 13-2 电工圆铝线的电性能（GB/T 3955—2009）

型 号	直流电阻率 $\rho_{20}/(\mu\Omega \cdot \text{m})$ $\leq$
LR	0.02759
LY4	0.028264
LY6	
LY8	
LY9	

注：计算 20℃ 时的物理参数：密度取 2.703g/cm³；线胀系数取 0.000023/℃；电阻温度系数，LR 型取 0.00413/℃；其余型号取 0.00403/℃。

13.1.3 架空绞线用铝-镁-硅合金圆线的物理性能（表 13-3）

表 13-3 架空绞线用铝-镁-硅合金圆线的物理性能（GB/T 23308—2009）

性 能	LHA1	LHA2
20℃ 时的电阻率/(nΩ · m)	≤ 32.840	≤ 32.530
20℃ 时的密度/(g/cm ³)	2.703	2.703

(续)

性 能	LHA1	LHA2
线胀系数/(10 ⁻⁶ ℃)	23	23
20℃时的电阻温度系数/(1/℃)	0.0036	0.0036

13.1.4 一般工业用铝及铝合金锻件的电导率（表 13-4）

表 13-4 一般工业用铝及铝合金锻件的电导率（YS/T 479—2005）

牌号	状态	电导率值 ^① (% IACS)	力学性能值	合格判定
7049	T73、T7352	<38.0(22.0)	任何值	不合格
		38.0~39.9 (22.0~23.1)	符合要求,但纵向 $R_{p0.2}$ 值较所规定的极限值高出 70N/mm ² 或 70N/mm ² 以上	不合格
			符合要求,但纵向 $R_{p0.2}$ 值与所规定的极限值之差小于 70N/mm ²	合格
		≥40.0(23.2)	符合要求	合格
7075	T73、T7352	<38.0(22.0)	任何值	不合格
		38.0~39.9 (22.0~23.1)	符合要求,但纵向 $R_{p0.2}$ 值较所规定的极限值高出 85N/mm ² 或以上	不合格
7175	T74、T7452、 T7454		符合要求,但纵向 $R_{p0.2}$ 值与所规定的极限值之差小于 85N/mm ²	合格
		≥40.0(23.2)	符合要求	合格

① 括号内是单位为 MS/m 时的值，两种单位的数量关系见表 6-1。

13.1.5 电子陶瓷用氧化铝粉体材料的物理性能（表 13-5）

表 13-5 电子陶瓷用氧化铝粉体材料的物理性能（GB/T 15154—1994）

类别	物 理 性 能			
	粒度分布		真密度/(g/cm ³)	晶型 α-Al ₂ O ₃ 含量(体积分数, %)
	粒度/μm	含量(体积分数, %)		
1	≤10	≥95	≥3.96	≥95
	≤5	≥50		
2	≤7	≥90		
	≤3	≥50		
3	≤5	≥90		
	≤2	≥50		
4	平均粒度 $d \leq 0.3 \mu\text{m}$		—	—

13.1.6 电子陶瓷用氮化铝粉的物理性能（表 13-6）

表 13-6 电子陶瓷用氮化铝粉的物理性能（SJ 20637—1997）

级别	粒度分布		松装密度 /(g/cm ³)	比表面积 /(m ² /g)	物相
	粒度/μm	含量(体积分数,%)			
1	≤8	≥95	≤0.90	>1.0	AlN 单相 ≥98% (体积分数)
	≤4	≥50			
2	≤6	≥95		>2.0	
	≤2	≥50			
3	≤5	≥95		>3.0	
	≤1.5	≥50			

13.1.7 空气雾化铝粉的产品特性（表 13-7）

表 13-7 空气雾化铝粉的产品特性（GB/T 2085.1—2007）

牌号	粒度分布		松装密度 /(g/cm ³) ≥	典型用途示例	备 注
	粒度/μm	质量分 数(%) ≤			
FLPA2500	≥2500	0.3	—	用于冶金及特种铁合金行业	代替 FLG1
	<200	15			
FLPA1000	≥1000	0.3	—	用于冶金及特种铁合金行业	代替 FLG2
	<200	15			
FLPA630	≥630	0.3	0.96	用于烟火及炸药行业	代替 FLP1
	≥450	12			
	<250	20			
FLPA500	≥500	0.3	—	用于冶金行业	代替 FLG3
FLPA450	≥450	0.3	0.96	用于烟火及炸药行业	代替 FLP2
	≥250	10			
	<140	20			
FLPA280	≥280	10	0.96	用于烟火及焊接行业	—
	<180	40			
FLPA250	≥250	0.3	0.96	用于烟火及炸药行业	代替 FLP3
	≥160	10			
	<100	30			
FLPA180	≥180	10	0.96	用于烟火、摩擦材料及焊接行业	—
	<140	45			
FLPA160A	≥160	0.3	—	用于冶金及化工行业	代替 FLG4
FLPA160B	≥160	10	0.96	用于烟火及化工行业	—
	<125	50			

(续)

牌号	粒度分布		松装密度 /(g/cm ³) ≥	典型用途示例	备 注
	粒度/μm	质量分 数(%) ≤			
FLPA140	≥140	0.3	0.97	用于炸药及焊接行业	代替 FLP4
	≥100	15			
FLPA125	≥125	0.3	—	用于化工及耐火材料行业	—
FLPA80	≥80	5	—	用于耐火材料行业	—

13.1.8 球磨铝粉的产品特性（表 13-8）

表 13-8 球磨铝粉的产品特性（GB/T 2085.2—2007）

牌 号	粒 度 分 布		松装密度 /(g/cm ³)	附着率 (%) ≥	盖水面积 /(m ² /g) ≥	典型用途示例	备 注
	粒度/μm ≥	质量分数(%) ≤					
FLQ355A	355	0.3	≥0.3	—	—	用于农药、化工、火药、 炸药等	代替 FLX ₁
	160	8					
FLQ355B	355	5	≥0.3	—	—	用于农药等	—
	160	30					
FLQ250	250	0.3	≥0.4	—	—	用于农药、化工、火药、 炸药等	代替 FLX ₂
	100	8					
FLQ224	224	0.3	≥0.5	—	—		代替 FLX ₃
	80	10					
FLQ160	160	0.3	≥0.5	—	—		代替 FLX ₄
	63	12					
FLQ80A	80	1.0	—	80	0.6	用于防腐涂层、化工催 化剂、日用装饰等	代替 FLU ₁
FLQ80B	80	1.5	≤0.25	—	—	用于加气混凝土发气剂等	—
FLQ80C	80	1.0	≤0.22	—	—	用于烟花爆竹等	—
FLQ80D	80	1.0	—	—	0.42	用于加气混凝土发气剂 等	代替 FLQ ₁
FLQ80E	80	1.0	—	—	0.60		代替 FLQ ₂
FLQ80F	80	0.5	—	—	0.60		代替 FLQ ₃
FLQ63A	63	0.3	≤0.25	—	—		—
FLQ63B	63	1.0	≤0.22	—	—	用于烟花爆竹等	—
FLQ56	56	0.3		80	0.7	用于防腐涂层、化工催 化剂、日用装饰等	代替 FLU ₂
	45	0.5					
FLQ45	45	0.1		80	0.9		—

13.1.9 铝镁合金粉的牌号、粒度及用途（表 13-9）

表 13-9 铝镁合金粉的牌号、粒度及用途（GB/T 5150—2004）

牌 号	粒度组成		用途举例
	筛网孔径/ μm	质量分数(%) $\leq$	
FLM1	+700	0.3	用于烟火工业等
	+630	8	
	-315	8	
FLM2	+450	0.3	
	+315	8	
	-140	8	
FLM3	+315	0.3	
	+160	8	
	-71	22	
FLM4	+160	0.3	
	+80	8	
FLMH4	+160	0.3	用于烟花行业
	+80	6	

注：筛网孔径的数字，为网孔每边的基本尺寸，也就是筛网名义筛分粒度。“+”表示筛上物，“-”表示筛下物。

13.1.10 氮气雾化铝粉的牌号及粒度（表 13-10）

表 13-10 氮气雾化铝粉的牌号及粒度（YS/T 620—2007）

牌 号	原产品代号	中位径 $X_{50}/\mu\text{m}$	粒度集中系数 S
FLPN 320.0	FLPN 0 [#]	≥ 32	—
FLPN 291.1	FLPN 1 [#] -A	29 ± 3	< 1.1
FLPN 291.6	FLPN 1 [#] -B		< 1.6
FLPN 290.0	FLPN 1 [#] -C		≥ 1.6
FLPN 251.1	FLPN 2 [#] -1A	25 ± 1	< 1.1
FLPN 251.6	FLPN 2 [#] -1B		< 1.6
FLPN 250.0	FLPN 2 [#] -1C		≥ 1.6
FLPN 221.1	FLPN 2 [#] -2A	22 ± 1	< 1.1
FLPN 221.6	FLPN 2 [#] -2B		< 1.6
FLPN 220.0	FLPN 2 [#] -2C		≥ 1.6

(续)

牌 号	原产品代号	中位径 $X_{50}/\mu\text{m}$	粒度集中系数 S
FLPN 201.1	FLPN 2 [#] -3A	20 ± 1	<1.1
FLPN 201.5	FLPN 2 [#] -3B		<1.5
FLPN 200.0	FLPN 2 [#] -3C		≥1.5
FLPN 181.1	FLPN 2 [#] -4A	18 ± 1	<1.1
FLPN 181.5	FLPN 2 [#] -4B		<1.5
FLPN 180.0	FLPN 2 [#] -4C		≥1.5
FLPN 161.1	FLPN 3 [#] -1A	16 ± 1	<1.1
FLPN 161.5	FLPN 3 [#] -1B		<1.5
FLPN 160.0	FLPN 3 [#] -1C		≥1.5
FLPN 141.4	FLPN 3 [#] -2A	14 ± 1	<1.4
FLPN 141.7	FLPN 3 [#] -2B		<1.7
FLPN 140.0	FLPN 3 [#] -2C		≥1.7
FLPN 121.4	FLPN 3 [#] -3A	12 ± 1	<1.4
FLPN 121.7	FLPN 3 [#] -3B		<1.7
FLPN 120.0	FLPN 3 [#] -3C		≥1.7
FLPN 101.4	FLPN 3 [#] -4A	10 ± 1	<1.4
FLPN 101.7	FLPN 3 [#] -4B		<1.7
FLPN 100.0	FLPN 3 [#] -4C		≥1.7
FLPN 81.5	FLPN 4 [#] -1A	8 ± 1	<1.5
FLPN 81.7	FLPN 4 [#] -1B		<1.7
FLPN 80.0	FLPN 4 [#] -1C		≥1.7
FLPN 61.7	FLPN 4 [#] -2A	6 ± 1	<1.7
FLPN 61.8	FLPN 4 [#] -2B		<1.8
FLPN 60.0	FLPN 4 [#] -2C		≥1.8
FLPN 41.7	FLPN 4 [#] -3A	4.5 ± 0.5	<1.7
FLPN 41.8	FLPN 4 [#] -3B		<1.8
FLPN 40.0	FLPN 4 [#] -3C		≥1.8
FLPN 31.7	FLPN 4 [#] -4A	3.5 ± 0.5	<1.7
FLPN 30.0	FLPN 4 [#] -4B		≥1.7
FLPN 21.7	FLPN 5 [#] -A	2 ± 1.0	<1.7
FLPN 20.0	FLPN 5 [#] -B		≥1.7

13.1.11 铝中间合金锭的化学成分及物理特性（表 13-11）

表 13-11 铝中间合金锭的化学成分及物理特性（YS/T 282—2000）

牌号	化学成分(质量分数,%)		物 理 特 性	
	主要合金元素	Al	熔化温度/°C	特性
AlCu50	Cu48.0 ~ 52.0	余量	570 ~ 600	脆
AlSi24	Si 22.0 ~ 26.0	余量	700 ~ 800	脆
AlSi20	Si 18.0 ~ 21.0	余量	640 ~ 700	脆
AlSi12	Si 11.5 ~ 13.0	余量	560 ~ 620	脆
AlMn10	Mn9.0 ~ 11.0	余量	770 ~ 830	韧
AlTi4	Ti3.0 ~ 5.0	余量	1020 ~ 1070	易偏析
AlTi5	Ti4.5 ~ 6.0	余量	1050 ~ 1100	易偏析
AlNi10	Ni9.0 ~ 11.0	余量	680 ~ 730	韧
AlCr2	Cr2.0 ~ 3.5	余量	900 ~ 1000	易偏析
AlB3	B2.5 ~ 3.5	余量	800	韧
AlB1	B0.5 ~ 1.5	余量	800	韧
AlZr4	Zr3.0 ~ 5.0	余量	800 ~ 850	易偏析
AlSb4	Sb3.0 ~ 5.0	余量	660	易偏析
AlFe20	Fe18.0 ~ 22.0	余量	1020	脆
AlTi5B1	Ti4.5 ~ 6.0、B0.9 ~ 1.2	余量	800	易偏析
AlBe3	Be 2.0 ~ 4.0	余量	820	脆
AlSr5	Sr4.0 ~ 6.0	余量	680 ~ 750	脆
AlSr10	Sr9.0 ~ 11.0	余量	780 ~ 850	脆

13.1.12 铝及铝合金导体的电导率（表 13-12）

表 13-12 铝及铝合金导体的电导率（YS/T 454—2003）

牌 号	制造方法或状态	电导率(% IACS)	牌 号	制造方法或状态	电导率(% IACS)
1060	铸造、H112	≥61	3003	H16	≥32
1R35	铸造、H112	≥62	6101	T6、T6511、T10	≥55
1350	铸造、H112	≥61	6063	T5、T6、T6511、T10	≥51
1100	铸造、H112	≥61	6R05	T6、T6511、T10	≥52

13.1.13 铝及铝合金箔的直流电阻（表 13-13）

表 13-13 铝及铝合金箔的直流电阻^①（GB/T 3198—2003）

标定厚度/mm	最大直流电阻/(Ω /m) (宽度 10.0mm)	标定厚度/mm	最大直流电阻/(Ω /m) (宽度 10.0mm)
0.0060	0.55	0.010	0.32
0.0065 ~ 0.0070	0.51	0.011	0.28
0.0080	0.43	0.016	0.25
0.0090	0.36		

① 合金牌号为 1145、1235。

13.1.14 铝及铝合金花纹板的密度（表 13-14）

表 13-14 铝及铝合金花纹板的密度（GB/T 3618—2006）

牌 号	密度/(g/cm^3)	比密度换算系数	牌 号	密度/(g/cm^3)	比密度换算系数
2A11	2.80	1.000	3105	2.72	0.971
纯铝	2.71	0.968	5A02、5A43、5052	2.68	0.957
2A12	2.78	0.993	6061	2.70	0.964
3A21	2.73	0.975	—	—	—

13.1.15 铝及铝合金控制圆线材的电阻率和电导率（表 13-15）

表 13-15 铝及铝合金控制圆线材的电阻率和电导率（GB/T 3195—2008）

牌 号	状 态	20℃ 时的电阻率 $\rho/(\mu\Omega \cdot \text{m})$	体积电导率 (% IACS)	20℃ 时的电阻率 $\rho/(\mu\Omega \cdot \text{m})$	体积电导率 (% IACS)
		$\leq$	$\geq$	$\leq$	$\geq$
		普通级		高精级	
1A50	H19	0.0295	58.4	0.0282	61.1
1350	O	—	—	0.027899	61.8
	H12、H22	—	—	0.028035	61.5
	H14、H24	—	—	0.028080	61.4
	H16、H26	—	—	0.028126	61.3
	H19	—	—	0.028265	61.0

13.1.16 漆包铝圆绕组线的物理性能

1. 漆包铝圆绕组线的电阻（表 13-16）

表 13-16 漆包铝圆绕组线的电阻 (GB/T 23312.1—2009)

导体标称直径 /mm	每米电阻/(Ω /m)			导体标称直径 /mm	标称每米电阻 /(Ω /m)
	最小值	标称值	最大值		
0.250	0.5452	0.5683	0.5927	1.120	0.02831
0.280	0.4361	0.4530	0.4708	1.250	0.02273
0.315	0.3456	0.3579	0.3708	1.400	0.01812
0.355	0.2729	0.2818	0.2911	1.600	0.01387
0.400	0.2144	0.2220	0.2299	1.800	0.01096
0.450	0.1699	0.1754	0.1811	2.000	0.008879
0.500	0.1379	0.1421	0.1464	2.240	0.007078
0.560	0.1098	0.1133	0.1169	2.500	0.005683
0.630	0.08695	0.08948	0.09211	2.800	0.004530
0.710	0.06842	0.07045	0.07257	3.150	0.003579
0.800	0.05387	0.05549	0.05718	3.550	0.002818
0.900	0.04257	0.04385	0.04518	4.000	0.002220
1.000	0.03448	0.03552	0.03659	4.500	0.001754
				5.000	0.001421

2. 漆包铝圆绕组线的击穿电压

导体标称直径在 2.500mm 及以下的击穿电压如表 13-17 所示, 导体标称直径在 2.500mm 以上的击穿电压如表 13-18 所示。

表 13-17 导体标称直径在 2.500mm 及以下的击穿电压 (GB/T 23312.1—2009)

导体标称直径 /mm	最小击穿电压(有效值)/V					
	1 级和 1B 级		2 级和 2B 级		3 级	
	室温	高温	室温	高温	室温	高温
0.250	2100	1600	3900	2900	5500	4100
0.280	2200	1700	4000	3000	5800	4400
0.315	2200	1700	4100	3100	6100	4600
0.355	2300	1700	4300	3200	6400	4800
0.400	2300	1700	4400	3300	6600	5000
0.450	2300	1700	4400	3300	6800	5100
0.500	2400	1800	4600	3500	7000	5300
0.560	2500	1900	4600	3500	7100	5300
0.630	2600	2000	4800	3600	7100	5300

(续)

导体标称直径 /mm	最小击穿电压(有效值)/V					
	1 级和 1B 级		2 级和 2B 级		3 级	
	室温	高温	室温	高温	室温	高温
0.710	2600	2000	4800	3600	7200	5400
0.800	2600	2000	4900	3700	7400	5600
0.900	2700	2000	5000	3800	7600	5700
1.000 ~ 2.500	2700	2000	5000	3800	7600	5700

注：对于导体标称直径的中间尺寸，应取下一个较大导体标称直径对应的最小击穿电压值。

表 13-18 导体标称直径在 2.500mm 以上的击穿电压（GB/T 23312.1—2009）

导体标称直径 /mm	最小击穿电压(有效值)/V					
	1 级和 1B 级		2 级和 2B 级		3 级	
	室温	高温	室温	高温	室温	高温
> 2.500	1300	1000	2500	1900	3800	2900

13.1.17 铝电解电容器用电极箔的物理性能

铝电解电容器用低压形成阳极箔额定形成电压如表 13-19 所示，铝电解电容器用中高压形成阳极箔额定形成电压如表 13-20 所示。

表 13-19 铝电解电容器用低压形成阳极箔额定形成电压（SJ/T 11140—1997）

(单位：V)

额定工作电压 V_w		6.3	8	10		16		25		35	50	63	80	100
额定形成电 压 V_f	85℃	8	10	12	13	20	21	31	33	47	67	85	105	132
	105℃	9	11	14		23		36		51	73	92	114	143

表 13-20 铝电解电容器用中高压形成阳极箔额定形成电压（SJ/T 11140—1997）

(单位：V)

额定工作电压 V_w		160	200	250	315	350	400	450	500
额定形成电压 V_f	85℃	215	270	335	425	470	530	600	670
	105℃	235	295	365	460	510	590	660	—

13.2 铜及铜合金的物理性能

13.2.1 引线框架用铜及铜合金的物理性能

1. 引线框架用铜及铜合金平带的电性能（表 13-21）

表 13-21 引线框架用铜及铜合金平带的电性能 (GB/T 20254. 1—2006)

合 金 牌 号	电 导 率(% IACS) ≥
TP2	75
QFe0. 1	85
QFe2. 5	60

注：测试温度为 20℃。

2. 引线框架用铜及铜合金 U 型带的电性能 (表 13-22)

表 13-22 引线框架用铜及铜合金 U 型带的电性能 (GB/T 20254. 2—2006)

合 金 牌 号	电 导 率(% IACS) ≥
TP2	75
QFe0. 1	85

13. 2. 2 无氧铜板和带材的电导率 (表 13-23)

表 13-23 无氧铜板和带材的电导率 (GB/T 14594—2005)

牌 号	状 态	电 导 率(% IACS) ≥	电 阻 率/($\mu\Omega \cdot m$) ≤
TU0	M	101	0. 017070
	Y ₄	100	0. 017241
	Y ₂	99	0. 017415
	Y	98	0. 017593
TU1	M	100	0. 017241
	Y ₄	99	0. 017415
	Y ₂	98	0. 017593
	Y	97	0. 017774
TU2	M	99	0. 017415
	Y ₄	98	0. 017593
	Y ₂	97	0. 017774
	Y	96	0. 017959

注：测试温度为 20℃。

13. 2. 3 电缆用铜带的电性能 (表 13-24)

表 13-24 电缆用铜带的电性能 (GB/T 11091—2005)

合 金 牌 号	状 态	电 导 率(% IACS) ≥	电 阻 率/($\mu\Omega \cdot m$) ≤
TU1	M	100	0. 017241
	Y ₈	99	0. 017415
	Y ₄	98	0. 017593

(续)

合 金 牌 号	状 态	电 导 率 (% IACS) ≥	电 阻 率 / (μΩ · m) ≤
TU2	M	99	0.017415
	Y ₈	98	0.017593
	Y ₄	97	0.017774
T2	M	98	0.017593
	Y ₈	97	0.017774
	Y ₄	96	0.017959
TP1	M	90	0.019156
	Y ₈	89	0.019372
	Y ₄	88	0.019592

注：测试温度为 20℃。

13.2.4 导电用铜板和条的电性能（表 13-25）

表 13-25 导电用铜板和条的电性能（GB/T 2529—2005）

牌 号	状 态	20℃ 时的电导率 (% IACS) ≥
T2	热轧 (R)、软 (M)	100
	1/8 硬 (Y ₈)	99
	1/2 硬 (Y ₂)	97
	硬 (Y)	96

13.2.5 连铸结晶器用铜板的物理性能（表 13-26）

表 13-26 连铸结晶器用铜板的物理性能（YB/T 4119—2004）

牌 号	密 度 /(g/cm ³)	电 导 率 (% IACS)	热 导 率 /[W/(m · K)]	弹 性 模 量 /(10 ³ N/mm ²)	软 化 温 度 /°C
CuCrZr	8.9	≥80	≥320	≥128	≥450
CuAg	8.9	≥95	≥377	≥125	—
CuNiBe	8.8	≥69	≥290	≥128	≥500

13.2.6 铜及铜合金板材

1. 铜及铜合金板材的晶粒度（表 13-27）

表 13-27 铜及铜合金板材的晶粒度^①（GB/T 2040—2008）

牌 号	状 态	晶 粒 度			
		级 别	晶粒平均直径/mm	最小直径/mm	最大直径/mm
T2、T3、TP1、TP2、 TU1、TU2	M	—	—	<i>a</i>	0.050

(续)

牌 号	状 态	晶 粒 度			
		级别	晶粒平均直径/mm	最小直径/mm	最大直径/mm
H80、H70 H68、H65	M	A 级	0.015	<i>a</i>	0.025
		B 级	0.025	0.015	0.035
		C 级	0.035	0.025	0.050
		D 级	0.050	0.035	0.070

注：*a* 是指完全再结晶后的最小晶粒。

① 软状态下的晶粒度。

2. 铜及铜合金板材的电性能（表 13-28）

表 13-28 铜及铜合金板材的电性能（GB/T 2040—2008）

牌 号	电阻率 ρ [(20 ± 1) °C] / ($\mu\Omega \cdot m$)	电阻温度系数 α (0 ~ 100 °C) / (1/°C)	与铜的热电动势率 Q (0 ~ 100 °C) / ($\mu V/^\circ C$)
BMn3-12	0.42 ~ 0.52	$\pm 6 \times 10^{-5}$	≤ 1
BMn40-1.5	0.43 ~ 0.53	—	—
QMn1.5	≤ 0.087	$\leq 0.9 \times 10^{-3}$	—

13.2.7 电解铜箔的电性能（表 13-29）

表 13-29 电解铜箔的电性能（GB/T 5230—1995）

单位面积质量/(g/m ²)	质量电阻率 ^① /($\Omega \cdot g/m^2$) $\leq$	单位面积质量/(g/m ²)	质量电阻率 ^① /($\Omega \cdot g/m^2$) $\leq$
44.6	0.181	153.0	0.166
80.3	0.171	230.0	0.164
107.0	0.170	≥ 305.0	0.162

① 表面未处理铜箔在 20 °C 的质量电阻率。

13.2.8 电缆用无缝铜管的电性能（表 13-30）

表 13-30 电缆用无缝铜管的电性能（GB/T 19849—2005）

合 金 牌 号	状 态	电导率 (% IACS)
TU1、TU2、T2	M	≥ 100

13.2.9 导电用无缝圆形铜管的电性能（表 13-31）

表 13-31 导电用无缝圆形铜管的电性能（GB/T 19850—2005）

状 态	尺寸范围/mm	电导率(20 °C) (% IACS) $\geq$		
		TU1、TU2、T1、TAg0.1	T2	TP1
软(M)	全部	100	98	90

(续)

状 态	尺寸范围/mm	电导率(20℃)(% IACS) ≥		
		TU1、TU2、T1、TAg0.1	T2	TP1
半硬(Y ₂)	壁厚≤5.0	97	96	88
	壁厚>5.0	98	97	89
硬(Y)	壁厚≤5.0	97	95	87
	壁厚>5.0	98	96	88

13.2.10 连铸圆坯结晶器铜管的镀层材料及其性能

1. 连铸圆坯结晶器铜管的物理性能 (表 13-32)

表 13-32 连铸圆坯结晶器铜管的物理性能 (YB/T 4141—2005)

牌 号	密度/(g/cm ³)	电导率 ^① (% IACS) ≥	热导率(100℃) /[W/(m·K)] ≥	软化温度/℃ ≥
TU1、TU2	8.93	98	370	250
TP2	8.93	85	320	250
CuAg0.1	8.90	95	340	300
CuCrZr	8.90	80	310	450

① 测试温度为 20℃。

2. 连铸圆坯结晶器铜管镀层材料及其性能 (表 13-33)

表 13-33 连铸圆坯结晶器铜管镀层材料及其性能 (YB/T 4141—2005)

项 目	镀 层 材 料				
	Cr	Ni	Ni-Fe	Ni-Co	Co-Ni
硬度 HV	≥600	≥140	≥250	≥280	≥220
热膨胀系数/(10 ⁻⁶ /℃)	7	14~16.7	14	14	14
热导率/[W/(m·K)]	60~66	76~84	63~88	75~84	80~84

13.2.11 电力牵引用铜及铜合金接触线的电阻率 (表 13-34)

表 13-34 电力牵引用铜及铜合金接触线的电阻率 (GB/T 12971.1—2008)

接触线型号	电阻率(20℃)/(μΩ·m) ≤	接触线型号	电阻率(20℃)/(μΩ·m) ≤
CTY、CT	0.01768	CTMH	0.02778
CTA	0.01777	CTS	0.02395
CTM	0.02240		

13.2.12 电工用铜及铜合金母线的电性能（表 13-35）

表 13-35 电工用铜及铜合金母线的电性能（GB/T 5585.1—2005）

型 号	20℃ 直流电阻率/ $(\mu\Omega \cdot \text{m}) \leq$	电导率(% IACS) $\geq$
TMR、THMR	0.017241	100
TMY、THMY	0.01777	97

13.2.13 电工用铜线坯的电阻率（表 13-36）

表 13-36 电工用铜线坯的电阻率（GB/T 3952—2008）

牌 号	状 态	质量电阻率(20℃) $/(\Omega \cdot \text{g}/\text{m}^2) \leq$	体积电阻率(20℃) $/(\mu\Omega \cdot \text{m}) \leq$
T1、TU1	R	0.15176	0.01707
T2、TU2、T3		0.15328	0.01724
TU1	Y	0.15575	0.01750
TU2		0.15798	0.01777

13.2.14 电工软铜绞线的物理性能

1. TJR1 型及 TJRX1 型电工软铜绞线的性能（表 13-37）

表 13-37 TJR1 型及 TJRX1 型电工软铜绞线的性能（GB/T 12970.2—2009）

公称 截面积 $/\text{mm}^2$	计算 截面积 $/\text{mm}^2$	结 构		计算外径 $/\text{mm}$	20℃ 每千米直流电阻 $/(\Omega/\text{km}) \leq$		计算质量 $/(\text{kg}/\text{km})$
		单线 总数	(股数×根数)/ (单线公称直径/mm)		TJR1	TJRX1	
0.10	0.102	9	9/0.12	0.44	176	179	0.94
(0.12)	0.124	7	7/0.15	0.45	145	147	1.15
0.16	0.159	9	9/0.15	0.56	113	115	1.47
(0.20)	0.194	11	11/0.15	0.60	92.9	94.4	1.80
0.25	0.247	14	14/0.15	0.68	72.9	74.1	2.29
(0.30)	0.300	17	17/0.15	0.74	60.3	61.3	2.80
0.40	0.408	13	13/0.20	0.86	44.2	44.9	3.79
0.50	0.503	16	16/0.20	0.96	36.0	36.6	4.70
0.63	0.628	20	20/0.20	1.05	28.8	29.3	5.86
(0.75)	0.754	24	24/0.20	1.14	24.0	24.4	7.04
1.00	1.01	32	32/0.20	1.30	17.9	18.2	9.43

(续)

公称 截面积 /mm ²	计算 截面积 /mm ²	结 构		计算外径 /mm	20°C 每千米直流电阻 /(Ω/km) ≤		计算质量 /(kg/km)
		单线 总数	(股数×根数)/ (单线公称直径/mm)		TJR1	TJRX1	
1.60	1.57	32	32/0.25	1.63	11.5	11.7	14.7
(2.00)	1.96	40	40/0.25	1.82	9.24	9.39	18.3
2.5	2.41	49	(7×7)/0.25	2.25	7.58	7.92	22.7
4.0	3.94	49	(7×7)/0.32	2.88	4.64	—	37.1
6.3	6.16	49	(7×7)/0.40	3.60	2.97	—	58.0
10	10.01	49	(7×7)/0.51	4.59	1.83	—	94.3
16	15.84	84	(7×12)/0.49	6.17	1.16	—	150
25	25.08	133	(19×7)/0.49	7.35	0.736	—	239
(35)	35.14	133	(19×7)/0.58	8.70	0.525	—	334
40	40.15	133	(19×7)/0.62	9.30	0.459	—	382
(50)	48.30	133	(19×7)/0.68	10.20	0.382	—	459
63	62.72	189	(27×7)/0.65	12.00	0.294	—	597
(70)	68.64	189	(27×7)/0.68	12.53	0.269	—	653
80	78.20	259	(37×7)/0.62	13.02	0.236	—	744
(95)	94.06	259	(37×7)/0.68	14.28	0.196	—	895
100	99.68	259	(37×7)/0.70	14.70	0.185	—	948
(120)	117.67	324	(27×12)/0.68	17.39	0.157	—	1119
125	124.69	324	(27×12)/0.70	17.90	0.148	—	1186
160	162.86	324	(27×12)/0.80	20.20	0.113	—	1549
(185)	183.85	324	(27×12)/0.85	21.74	0.100	—	1749
200	196.15	444	(37×12)/0.75	21.80	0.0940	—	1866
250	251.95	444	(37×12)/0.85	24.72	0.0732	—	2397
315	310.58	703	(37×19)/0.75	26.25	0.0594	—	2954
400	398.92	703	(37×19)/0.85	29.75	0.0462	—	3795
500	498.30	703	(37×19)/0.95	33.25	0.0370	—	4740
630	627.1	1159	(61×19)/0.83	37.35	0.0294	—	5965
800	804.3	1159	(61×19)/0.94	42.30	0.0229	—	7651
1000	1003.6	1159	(61×19)/1.05	47.25	0.0184	—	9547

注：尽量不采用括号内规格。

2. TJR2 型及 TJRX2 型电工软铜绞线的性能（表 13-38）

表 13-38 TJR2 型及 TJRX2 型电工软铜绞线的性能（GB/T 12970.2—2009）

公称 截面积 /mm ²	计算 截面积 /mm ²	结 构		计算外径 /mm	20℃ 每千米直流电阻 /(Ω/km) ≤		计算质量 /(kg/km)
		单线 总数	(股数×根数)/ (单线公称直径/mm)		TJR2	TJRX2	
2.5	2.47	140	(7×20)/0.15	2.369	7.4	7.73	23.3
4.0	3.96	126	(7×18)/0.20	3.00	4.62	4.82	37.3
6.3	6.16	196	(7×28)/0.20	3.72	2.97	3.10	58.0
10	9.90	315	(7×45)/0.20	4.62	1.85	1.93	93.3
16	15.83	504	(12×42)/0.20	6.18	1.16	1.23	150
25	25.07	798	(19×42)/0.20	7.45	0.736	0.781	238
(35)	35.41	1127	(7×7×23)/0.20	10.57	0.521	0.545	337
40	40.02	1274	(7×7×26)/0.20	10.62	0.461	0.482	381
(50)	49.26	1568	(7×7×32)/0.20	11.70	0.375	0.392	469
63	63.11	2009	(7×7×41)/0.20	13.32	0.292	0.305	600

注：尽量不采用括号内规格，三个数值相乘表示大股数×小股数×根数。

3. TJR3 型及 TJRX3 型电工软铜绞线的性能（表 13-39）

表 13-39 TJR3 型及 TJRX3 型电工软铜绞线的性能（GB/T 12970.2—2009）

公称 截面积 /mm ²	计算 截面积 /mm ²	结 构		计算外径 /mm	20℃ 每千米直流电阻 /(Ω/km) ≤		计算质量 /(kg/km)
		单线 总数	(股数×根数)/ (单线公称直径/mm)		TJR3	TJRX3	
0.025	0.0255	13	13/0.05	0.22	707	759	0.24
0.04	0.0385	10	10/0.07	0.27	466	500	0.36
0.063	0.0616	16	16/0.07	0.34	294	316	0.58
0.10	0.100	26	26/0.07	0.42	181	194	0.93
0.16	0.158	41	41/0.07	0.52	115	123	1.47
0.25	0.250	65	65/0.07	0.65	72.4	77.7	2.33
(0.30)	0.296	77	(7×11)/0.07	0.84	61.7	64.5	2.79
0.40	0.404	105	(7×15)/0.07	0.97	45.2	48.5	3.81
(0.50)	0.512	133	(7×19)/0.07	1.05	35.7	38.3	4.82
0.63	0.620	161	(7×23)/0.07	1.18	29.5	31.7	5.84

(续)

公称 截面积 /mm ²	计算 截面积 /mm ²	结 构		计算外径 /mm	20°C 每千米直流电阻 /(Ω/km) ≤		计算质量 /(kg/km)
		单线 总数	(股数 × 根数)/ (单线公称直径/mm)		TJR3	TJRX3	
(0.75)	0.754	196	(7 × 28)/0.07	1.28	24.2	26.0	7.11
1.00	0.997	259	(7 × 37)/0.07	1.47	18.3	19.6	9.40
1.60	1.57	408	(12 × 34)/0.07	1.97	11.70	12.6	14.8
2.5	2.49	646	(19 × 34)/0.07	2.35	7.41	7.96	23.7
4.0	4.03	513	(19 × 27)/0.10	3.08	4.58	4.79	38.3
6.3	6.27	798	(19 × 42)/0.10	3.73	2.94	3.07	59.6
10	10.00	1273	(19 × 67)/0.10	4.73	1.85	1.93	95.1
16	15.83	2016	(12 × 7 × 24)/0.10	7.18	1.16	1.21	150
25	25.07	3192	(19 × 7 × 24)/0.10	8.55	0.736	0.769	238
(35)	34.47	4389	(19 × 7 × 33)/0.10	9.90	0.535	0.559	328
40	39.96	2261	(19 × 7 × 17)/0.15	11.03	0.462	0.483	380
(50)	49.36	2793	(19 × 7 × 21)/0.15	12.15	0.374	0.391	470
63	63.46	3591	(19 × 7 × 27)/0.15	13.50	0.291	0.304	604
(70)	70.51	3990	(19 × 7 × 30)/0.15	14.18	0.262	0.274	671
80	79.91	4522	(19 × 7 × 34)/0.15	15.08	0.231	0.241	760
(95)	94.01	5320	(19 × 7 × 40)/0.15	16.43	0.196	0.205	894
100	100.73	5700	(19 × 12 × 25)/0.15	18.27	0.183	0.191	958
(120)	120.87	6840	(19 × 12 × 30)/0.15	20.24	0.153	0.160	1150
125	127.59	7220	(19 × 19 × 20)/0.15	20.29	0.145	0.152	1214
160	159.42	9025	(19 × 19 × 25)/0.15	21.75	0.116	0.121	1517
(185)	185.00	10469	(19 × 19 × 29)/0.15	23.25	0.0997	0.104	1760
200	196.15	11100	(37 × 12 × 25)/0.15	25.58	0.0940	0.0982	1866
250	251.08	14208	(37 × 12 × 32)/0.15	28.67	0.0735	0.0768	2388
315	310.58	17575	(37 × 19 × 25)/0.15	30.45	0.0594	0.0621	2954
400	397.54	22496	(37 × 19 × 32)/0.15	34.13	0.0464	0.0485	3782
500	496.92	28120	(37 × 19 × 40)/0.15	38.06	0.0371	0.0388	4727

注：尽量不采用括号内规格，三个数值相乘表示大股数 × 小股数 × 根数。

13.2.15 电工软铜天线的性能（表 13-40）

表 13-40 电工软铜天线的性能（GB/T 12970.3—2009）

公称截面积/mm ²	拉断力/kN ≥	20°C 每千米直流电阻/(Ω/km) ≤
1.0	0.16	18.0
1.6	0.26	11.5
2.5	0.40	7.37
4.0	0.66	4.51
6.3	1.03	2.88
10	1.67	1.77
16	2.71	1.09
25	4.11	0.72

13.2.16 电工软铜电刷线的性能

1. TS 型及 TSX 型电工软铜电刷线的性能（表 13-41）

表 13-41 TS 型及 TSX 型电工软铜电刷线的性能（GB/T 12970.4—2009）

公称 截面积 /mm ²	计算 截面积 /mm ²	结 构		计算外径 /mm	20°C 每千米直流电阻 /(Ω/km) ≤		计算质量 /(kg/km)
		单线 总数	(股数×根数)/ (单线公称直径/mm)		TS 型	TSX 型	
0.25	0.242	63	(7×9)/0.07	1.0	75.5	81.1	2.28
0.315	0.323	84	(7×12)/0.07	1.1	56.6	60.7	3.04
0.40	0.404	105	(7×15)/0.07	1.2	45.2	48.6	3.81
0.50	0.512	133	(7×19)/0.07	1.3	35.7	38.3	4.82
0.63	0.620	161	(7×23)/0.07	1.5	29.5	31.6	5.84
0.80	0.808	210	(7×30)/0.07	1.6	22.6	24.3	7.61
1.00	0.990	126	(7×18)/0.10	1.8	18.5	19.3	9.33
1.25	1.264	161	(7×23)/0.10	2.0	14.5	15.1	11.9
1.6	1.594	203	(7×29)/0.10	2.2	11.5	12.0	15.0
2.0	1.979	252	(7×36)/0.10	2.4	9.23	9.65	18.6
2.5	2.474	315	(7×45)/0.10	2.7	7.39	7.72	23.3
3.15	3.134	399	(7×57)/0.10	3.0	5.83	6.09	29.5
4.0	3.958	504	(7×72)/0.10	3.3	4.62	4.83	37.3
5.0	4.948	630	(7×90)/0.10	3.8	3.69	3.86	46.6
6.3	6.243	552	(12×46)/0.12	4.3	2.94	3.07	59.1

(续)

公称 截面积 /mm ²	计算 截面积 /mm ²	结 构		计算外径 /mm	20°C 每千米直流电阻 /(Ω/km) ≤		计算质量 /(kg/km)
		单线 总数	(股数×根数)/ (单线公称直径/mm)		TS 型	TSX 型	
8	7.872	696	(12×58)/0.12	4.8	2.33	2.44	74.5
10	10.04	888	(12×74)/0.12	5.3	1.83	1.91	95.1
12.5	12.46	1102	(19×58)/0.12	5.9	1.48	1.55	118.5
16	15.90	1406	(19×74)/0.12	6.7	1.16	1.21	151.2

2. TSR 型电工软铜电刷线的性能 (表 13-42)

表 13-42 TSR 型电工软铜电刷线的性能 (GB/T 12970.4—2009)

公称 截面积 /mm ²	计算 截面积 /mm ²	结 构		计算外径 /mm	20°C 每千米直流电阻 /(Ω/km) ≤	计算质量 /(kg/km)
		单线 总数	(股数×根数)/ (单线公称直径/mm)			
0.063	0.0628	32	32/0.05	0.5	288	0.586
0.08	0.0785	40	40/0.05	0.55	231	0.733
0.10	0.0982	50	50/0.05	0.6	184	0.917
0.125	0.124	63	63/0.05	0.65	146	1.16
0.16	0.165	84	(7×12)/0.05	0.7	111	1.55
0.20	0.206	105	(7×15)/0.05	0.8	88.7	1.92
0.25	0.247	126	(7×18)/0.05	1.0	74.0	2.33
0.315	0.316	160	(7×23)/0.05	1.1	57.8	2.95
0.40	0.399	203	(7×29)/0.05	1.2	45.8	3.76
0.50	0.495	252	(12×21)/0.05	1.3	37.0	4.69
0.63	0.636	324	(12×27)/0.05	1.5	28.9	6.02
0.80	0.801	408	(12×34)/0.05	1.6	22.9	7.58
1.00	0.990	504	(12×42)/0.05	1.8	18.6	9.37
1.25	1.268	646	(19×34)/0.05	2.0	14.5	12.1
1.6	1.567	798	(19×42)/0.05	2.2	11.8	14.9
2.0	2.015	1026	(19×54)/0.05	2.4	9.16	19.2
2.5	2.500	1273	(19×67)/0.05	2.7	7.38	23.8
3.15	3.144	817	(19×43)/0.07	3.0	5.87	29.9
4.0	4.022	1045	(19×55)/0.07	3.3	4.59	38.3
5.0	4.972	1292	(19×68)/0.07	3.8	3.71	47.3
6.3	6.288	1634	(19×86)/0.07	4.3	2.93	59.8

13.2.17 电工圆铜线的电阻率（表 13-43）

表 13-43 电工圆铜线的电阻率（GB/T 3953—2009）

型 号	电阻率(20℃)/(μΩ·m) ≤	
	2.00mm 以下	2.00mm 及以上
TR	0.017241	0.017241
TY、TYT	0.01796	0.01777

13.2.18 电气化铁道用铜及铜合金接触线的电阻率（表 13-44）

表 13-44 电气化铁道用铜及铜合金接触线的电阻率（TB/T 2809—2005）

接触线型号	电阻率(20℃)/(μΩ·m) ≤	接触线型号	电阻率(20℃)/(μΩ·m) ≤
CT	0.01777	CTMH	0.02778
CTA、CTAH	0.01777	CTS	0.02395
CTM	0.02240		

13.2.19 镀锡圆铜线的电阻率（表 13-45）

表 13-45 镀锡圆铜线的电阻率（GB/T 4910—2009）

公称直径 d/mm	电阻率(20℃)/(μΩ·m) ≤	
	TXR	TXRH
>0.05 ~0.09	0.01851	0.01851
>0.09 ~0.25	0.01802	0.01831
>0.25 ~0.50	0.01770	0.01793
>0.50 ~4.00	0.01760	0.01775

13.2.20 镀镍圆铜线的电阻率（表 13-46）

表 13-46 镀镍圆铜线的电阻率（GB/T 11019—2009）

级别/级	电阻率(20℃)/(μΩ·m) ≥	级别/级	电阻率(20℃)/(μΩ·m) ≥
2	0.017960	10	0.019592
4	0.018342	27	0.024284
7	0.018947		

13.2.21 电解铜粉的产品特性（表 13-47）

表 13-47 电解铜粉的产品特性（GB/T 5246—2007）

产 品 牌 号	粒 度		松装密度/ (g/cm ³)
	粒度分布/μm	质量分数(%)	
FTD1	≤74(-200 目)	≥95	1.2 ~2.3
FTD2	≤43(-300 目)	≥95	0.8 ~1.9

(续)

产 品 牌 号	粒 度		松装密度/ (g/cm ³)
	粒度分布/μm	质量分数(%)	
FTD3	≤74(-200 目)	≥95	1.2 ~ 2.3
FTD4	>74 ~ 175(-80 ~ -200 目)	70 ~ 80	0.8 ~ 2.5
	≤74(-200 目)	30 ~ 20	
FTD5	≤43(-300 目)	≥95	1.2 ~ 1.9

注 “-” 表示筛下物。

13.2.22 雾化铜粉的物理性能（表 13-48）

表 13-48 雾化铜粉的物理性能（YS/T 499—2006）

牌号	粒度组成(质量分数,%)				松装密度/ (g/cm ³)	流动性/ (s/50g)
	>0.150mm	0.150 ~ 0.071mm	<0.071 ~ 0.045mm	<0.045mm		
FTW1	≤3	40 ~ 60	30 ~ 50	≤30	2.0 ~ 3.1	≤45
FTW2	—	≤3	15 ~ 50	≥50	0.9 ~ 3.1	≤45
FTW3	—	—	≤3	≥97	0.85 ~ 2.8	—

13.2.23 雾化 CuSn10 青铜粉的物理性能（表 13-49）

表 13-49 雾化 CuSn10 青铜粉的物理性能（JB/T 7380—2010）

产 品 牌 号	松装密度 g/cm ³	流动性 s/50g	压缩性 g/cm ³	粒度组成(体积分,%)					
				>150μm	150 ~ 105μm	105 ~ 75μm	75 ~ 63μm	63 ~ 45μm	<45μm
FSWCuSn10—Ⅰ	3.5 ~ 4.4	<35	>7.1	<1	<15	15 ~ 25	5 ~ 20	15 ~ 25	40 ~ 50
FSWCuSn10—Ⅱ	3.2 ~ 3.9	<38		—	2 ~ 5	3 ~ 8	5 ~ 10	10 ~ 20	40 ~ 70
FSWCuSn10—Ⅲ	2.7 ~ 3.4	<42	>7.0	—	—	<1	<5	5 ~ 15	75 ~ 90

第 14 章 其他金属材料的物理性能

14.1 镁合金的物理性能

14.1.1 镁合金牺牲阳极的电化学性能（表 14-1）

表 14-1 镁合金牺牲阳极的电化学性能（GB/T 17731—2009）

牌 号	开路电位 (Cu/CuSO ₄) /V	闭路电位 (Cu/CuSO ₄) /V	实际比电容量 /[(A · h)/kg]	电流效率 (%)
AZ63B	-1.57 ~ -1.67	-1.52 ~ -1.57	≥1210	≥55
AZ31B	-1.57 ~ -1.67	-1.47 ~ -1.57	≥1210	≥55
MIC	-1.77 ~ -1.82	-1.64 ~ -1.69	≥1100	≥50

14.1.2 雾化镁粉的粒度及松装密度（表 14-2）

表 14-2 雾化镁粉的粒度及松装密度（YS/T 628—2007）

牌 号	粒度分布		中位径 $X_{50}/\mu\text{m}$	松装密度 /(g/cm ³)
	粒度/ μm	质量分数 (%) ≤		
FMW350	≥850	5.0	—	0.97
	≥600	15.0		
	<300	40.0		
	<250	25.0		
	<150	5.0		
FMW180	≥600	0	—	0.97
	≥300	10.0		
	<125	20.0		
FMW120	≥600	0	120 ± 10	0.97
	≥300	10.0		
	≥150	40.0		
	<75	30.0		
	<45	5.0		
FMW60	≥100	0	60 ± 5	0.95
	≥80	22.0		
	<20	6.0		
FMW40	≥75	0.5	40 ± 5	0.90
	≥45	40.0		
FMW20	—	—	20 ± 4	0.70
FMW8	—	—	8 ± 3	0.50

14.1.3 纳米氢氧化镁的物理性能 (表 14-3)

表 14-3 纳米氢氧化镁的物理性能 (HG/T 3821—2006)

项 目	指 标	
	I 型	II 型
氢氧化镁[$\text{Mg}(\text{OH})_2$]质量分数(%)	≥ 98.0	98.0
激光粒径(D_{90})/ μm	≤ 1.0	3.0
电镜平均粒径/nm	≤ 100	100
团聚指数	≤ 10	30
比表面积/(m^2/g)	50 ~ 100	30 ~ 80
白度(%)	≥ 90	90
水分(质量分数,%)	≤ 0.3	0.3
重金属(以 Pb 计)质量分数(%)	≤ 0.001	0.001
铁(Fe)质量分数(%)	≤ 0.03	0.03
氯化物(以 Cl 计)质量分数(%)	≤ 0.4	0.4
灼烧减量(质量分数,%)	≥ 30	30
堆积密度/(g/cm^3)	0.1 ~ 0.5	0.1 ~ 0.5
pH 值(20g/L 悬浊液)	8.0 ~ 9.5	8.0 ~ 9.5

14.1.4 工业活性轻质氧化镁的物理性能 (表 14-4)

表 14-4 工业活性轻质氧化镁的物理性能 (HG/T 3928—2007)

[illegible]

(续)

项 目	活性-180		活性-150		活性-120		活性-80		活性-60	活性-40
	一等品	合格品	脱色用	橡胶用	一等品	合格品	一等品	合格品		
氯化物(以 Cl 计)质量 分数(%) ≤	0.05	0.20	0.05	0.20	0.15	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10
灼烧减量(质量分 数,%) ≤	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	6.0	8.0	6.0	6.0
堆积密度/(g/cm ³) ≤	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.12	0.12
吸碘值/(mg/g)	> 180.0		150.1 ~ 180.0		120.1 ~ 150.0		80.1 ~ 120.0		60.1 ~ 80.0	40.1 ~ 60.0

14.2 锌、钛合金的物理性能

14.2.1 锌粉的粒度 (表 14-5)

表 14-5 锌粉的粒度 (GB/T 6890—2000)

规 格	筛余物 ≤		粒度分布 (%) ≥	
	最大粒径/μm	质量分数 (%)	30μm 以下	10μm 以下
FZn30	45	—	99.5	80
FZn45	90	0.3	—	—
FZn90	125	0.1	—	—
FZn125	200	1.0	—	—

14.2.2 烟花用钛粉的粒度要求 (表 14-6)

表 14-6 烟花用钛粉的粒度要求 (NY/T 756—2003)

牌 号	粒 度 分 布		
	上筛筛网孔径/mm	下筛筛网孔径/mm	上筛筛余物(质量分数,%)
0	0.45	—	≥80
1	0.45	0.3	≤5
2	0.3	0.2	≤10
3	0.2	0.154	≤8
4	0.154	0.125	≤6

14.3 镍合金的物理性能

14.3.1 电池用泡沫镍的物理性能（表 14-7）

表 14-7 电池用泡沫镍的物理性能（GB/T 20251—2006）

项 目	指 标		项 目	指 标
面密度 $\rho/(\text{g}/\text{m}^2)$	300 ~ 600		孔数 PPI ^①	60 ~ 140
面密度允许偏差(%)	$\rho < 400\text{g}/\text{m}^2$	± 8	孔数允许偏差 PPI ^①	± 10
	$\rho \geq 400\text{g}/\text{m}^2$	± 7	孔隙率(%)	≥ 95.0

① 指 1in 长度上的孔数, 1in = 25.4mm。

14.3.2 电解镍粉的粒度（表 14-8）

表 14-8 电解镍粉的粒度（GB/T 5247—1985）

牌 号	粒度组成
FND-1	$< 5\mu\text{m}$ 颗粒的体积分数 $\leq 30\%$, $5 \sim 15\mu\text{m}$ 颗粒的体积分数 $\geq 55\%$, $> 15 \sim 25\mu\text{m}$ 颗粒的体积分数不限, $> 25\mu\text{m}$ 颗粒的体积分数 $\leq 3\%$
FND-2	$\geq 43\mu\text{m}$ (+ 300 目) 颗粒的质量分数 $\leq 3\%$
FND-3	$\geq 58\mu\text{m}$ (+ 250 目) 颗粒的质量分数 $\leq 3\%$

14.3.3 电解镍粉的松装密度（表 14-9）

表 14-9 电解镍粉的松装密度（GB 5247—1985）（单位： g/cm^3 ）

牌 号	松装密度/ (g/cm^3)
FND-1	0.85 ~ 1.05
FND-2	1.20 ~ 1.40
FND-3	1.40 ~ 1.70

14.3.4 纳米镍粉的物理性能（表 14-10）

表 14-10 纳米镍粉的物理性能（GB/T 19588—2004）

牌 号	中位径范围/nm	比表面积/ (m^2/g)	松装密度/ (g/cm^3)
FNiN-20	< 30	> 20	0.04 ~ 0.5
FNiN-50	30 ~ 60	> 15	0.05 ~ 0.7
FNiN-80	$> 60 \sim 100$	> 8	0.06 ~ 0.8

14.3.5 羰基镍粉的物理性能 (表 14-11)

表 14-11 羰基镍粉的物理性能 (GB/T 7160—2008)

牌号	费氏粒度/ μm	松装密度/ (g/cm^3)	比表面积/ (m^2/g)	用 途
FNiTQ-101	0.5 ~ 2.2	0.3 ~ 0.5	0.8 ~ 2.0	轻粉,主要用于电池行业
FNiTQ-121	>2.2 ~ 2.8	0.5 ~ 0.65	0.6 ~ 0.8	轻粉,主要用于电池行业
FNiTQ-131	>2.8 ~ 3.5	0.75 ~ 0.95	0.4 ~ 0.6	轻粉,主要用于电池、粉末冶金行业
FNiTZ-101	0.5 ~ 2.5	0.8 ~ 1.5		重粉,主要用于粉末冶金行业
FNiTZ-121	>2.5 ~ 7.0	1.6 ~ 2.6		重粉,主要用于粉末冶金行业
FNiTZ-131	>7.0 ~ 15.0	3.0 ~ 4.0		重粉,主要用于粉末冶金行业
FNiTS-100	1.5 ~ 3.0	1.5 ~ 2.0	0.4 ~ 2.0	高纯镍粉,主要用于电池等行业
FNiTS-120	>3.0 ~ 8.0	1.6 ~ 3.0		高纯镍粉,主要用于催化剂行业

14.3.6 球形氢氧化镍的物理性能 (表 14-12)

表 14-12 球形氢氧化镍的物理性能 (GB/T 20507—2006)

类别	牌号	形貌	晶型	松装密度/ (g/cm^3)	振实密度/ (g/cm^3)	粒度 d_{50} / μm	比表面积/ (m^2/g)
加锌型	Zn3Co1	球形或类球形	β	≥ 1.60	≥ 2.10	6 ~ 15	6 ~ 15
	Zn3Co1.5	球形或类球形	β	≥ 1.60	≥ 2.10	6 ~ 15	6 ~ 15
	Zn4Co0.7	球形或类球形	β	≥ 1.60	≥ 2.10	6 ~ 15	6 ~ 15
	Zn4Co1.5	球形或类球形	β	≥ 1.60	≥ 2.10	6 ~ 15	6 ~ 15
加镉型	Cd3Co1	球形或类球形	β	≥ 1.60	≥ 2.10	8 ~ 20	8 ~ 25
覆钴型	Zn4Co1.5 -Co3.5	球形或类球形	β	≥ 1.50	≥ 2.00	9 ~ 14	5 ~ 15
	Cd3Co1 -Co3	球形或类球形	β	≥ 1.50	≥ 2.00	8 ~ 20	8 ~ 25

14.3.7 球形氢氧化镍的放电平台率 (表 14-13)

表 14-13 球形氢氧化镍的放电平台率 (GB/T 20507—2006)

类 别	牌 号	比电容量/[$(\text{mA} \cdot \text{h})/\text{g}$]	放电平台率(%)
加锌型	Zn3Co1	≥ 245	≥ 65
	Zn3Co1.5	≥ 245	≥ 65
	Zn4Co0.7	≥ 240	≥ 65
	Zn4Co1.5	≥ 240	≥ 65

(续)

类 别	牌 号	比电容量/[(mA · h)/g]	放电平台率(%)
加镉型	Cd3Co1	≥225	≥65
覆钴型	Zn4Co1.5-Co3.5	≥225	≥65
	Cd3Co1-Co3	≥205	≥65

14.3.8 镍基喷涂合金粉的粒度范围（表 14-14）

表 14-14 镍基喷涂合金粉的粒度范围（YS/T 537—2006）

粒度/μm	< 38	38 ~ < 104	104 ~ 124	> 124
粉末(质量分数, %) ≤	5	余量	3	不允许有

14.3.9 镍基喷涂合金粉的流动性（表 14-15）

表 14-15 镍基喷涂合金粉的流动性（YS/T 537—2006）

类 别	A	B
流动时间 ≤	25s/50g	50s/50g

14.4 铅合金的物理性能

14.4.1 圆形铅熔丝的安全电流及特性（表 14-16）

表 14-16 圆形铅熔丝的安全电流及特性（GB 3132—1982）

安全电流 /A	直径/mm ≈	熔 断 电 流				额 定 电 流			
		倍数	电流/A	时间/min	结果	倍数	电流/A	时间/min	结果
0.25	0.08	2	0.5	1	熔断	0.725	0.36	5	不熔断
0.50	0.15		1.0				0.73		
0.75	0.20		1.5				1.09		
0.80	0.22		1.6				1.16		
0.90	0.25		1.8				1.31		
1.00	0.28		2.0				1.45		
1.05	0.29		2.1				1.52		
1.10	0.32		2.2				1.60		
1.25	0.35		2.5				1.81		
1.35	0.36		2.7				1.96		
1.50	0.40		3.0				2.18		
1.85	0.46		3.7				2.68		

(续)

安全电流 /A	直径/mm ≈	熔 断 电 流				额 定 电 流			
		倍数	电流/A	时间/min	结果	倍数	电流/A	时间/min	结果
2.00	0.52	2	4.0	1	熔断	0.725	2.90	5	不熔断
2.25	0.54		4.5				3.26		
2.50	0.60		5.0				3.63		
3.00	0.71		6.0				4.35		
3.75	0.81		7.5				5.44		
5.00	0.98		10.0				7.25		
6.00	1.02		12.0				8.70		
7.50	1.25		15.0				10.88		
10.00	1.51		20.0				14.50		
11.00	1.67		22.0				15.95		
12.50	1.75		25.0				18.13		
15.00	1.98		30.0				21.75		
20.00	2.40		40.0				29.00		
25.00	2.78		50.0				36.25		
27.50	2.95		55.0				39.88		
30.00	3.14		60.0				43.50		
40.00	3.81		80.0				58.00		
45.00	4.12		90.0				62.25		
50.00	4.44		100.0				72.50		
60.00	4.91		120.0				87.00		
70.00	5.24		140.0				101.50		

- 注：1. 熔丝工作环境条件为 +60℃、-40℃。
2. 熔丝安全电流试验应在周围介质温度不高于 +40℃、不低于 -20℃ 和周围介质无爆炸危险及腐蚀性的条件下进行。
3. 熔丝缠绕成卷后应平整。30~70A 不允许有弯头和接头，20~30A 不允许有弯头。
4. 熔丝表面应光滑、清洁，不应有凹槽、裂纹、毛刺和氧化发黑。许可有轻微的氧化色、丝纹、划伤和碰伤。

14.4.2 扁形铅熔丝的安全电流及特性（表 14-17）

表 14-17 扁圆形铅熔丝的安全电流及特性（GB 3132—1982）

安全电流 /A	面积/mm ² ≈	熔 断 电 流				额 定 电 流			
		倍数	电流/A	时间/min	结果	倍数	电流/A	时间/min	结果
5.0	0.75	2	10	1	熔断	0.725	7.25	5	不熔断
7.5	1.23		15				10.88		
10.0	1.79		20				14.50		

(续)

安全电流 /A	面积/mm ² ≈	熔 断 电 流				额 定 电 流			
		倍数	电流/A	时间/min	结果	倍数	电流/A	时间/min	结果
12.5	2.41	2	25	1	熔断	0.725	18.13	5	不熔断
15.0	3.08		30				21.75		
20.0	4.52		40				29.00		
25.0	6.07		50				36.25		
30.0	7.71		60				43.50		
35.0	9.51		70				50.75		
37.5	—		75				54.38		
40.0	11.40		80				58.00		
45.0	13.30		90				62.25		
50.0	15.28		100				72.50		
60.0	—		120				87.00		
75.0	26.33		150				108.75		
100.0	38.60		200				145.00		
125.0	52.04		250				181.25		
150.0	—		300				217.50		
200.0	—		400				290.00		
250.0	—		500				362.50		

- 注：1. 熔丝工作环境条件为 +60℃、-40℃。
2. 熔丝安全电流试验应在周围介质温度不高于 +40℃、不低于 -20℃ 和周围介质无爆炸危险及腐蚀性的条件下进行。
3. 熔丝缠绕成卷后应平整。30~70A 不允许有弯头和接头，20~30A 不允许有弯头。
4. 熔丝表面应光滑、清洁，不应有凹槽、裂纹、毛刺和氧化发黑。许可有轻微的氧化色、丝纹、划伤和碰伤。

14.4.3 锡铅钎料的物理性能（表 14-18）

表 14-18 锡铅钎料的物理性能（GB/T 3131—2001）

牌 号	固相线/℃ ≈	液相线/℃ ≈	电阻率/ (μΩ · m)	主 要 用 途	
S-Sn95Pb	183	224	—	用于电气电子工业、耐高温器件的钎焊	
S-Sn90Pb	183	215	—		
S-Sn65Pb	183	186	0. 122	用于电气电子工业、印制电路、微型技术、航空工业及镀层金属的软钎焊	
S-Sn63Pb	183	183	0. 141		
S-Sn60Pb	183	190	0. 145		
S-Sn60PbSb					

(续)

牌 号	固相线/℃ ≈	液相线/℃ ≈	电阻率/ ($\mu\Omega \cdot m$)	主 要 用 途
S-Sn55Pb	183	203	0.160	用于普通电气电子工业(电视机、收录机共用天线、石英钟)、航空、微连接等
S-Sn50Pb S-Sn50PbSb	183	215	0.181	
S-Sn45Pb	183	227	—	
S-Sn40Pb S-Sn40PbSb	183	238	0.170	
S-Sn35Pb	183	248	—	用于钣金、铅管、电缆线、换热器金属材料、辐射体、制罐等的软钎焊
S-Sn30Pb S-Sn30PbSb	183	258	0.182	用于灯泡、冷却机制造、钣金、铅管等的钎焊
S-Sn25PbSb	183	260	0.196	
S-Sn20Pb S-Sn18PbSb	183	279	0.220	
S-Sn10Pb	268	301	0.198	
S-Sn5Pb	300	314	—	用于钣金、锅炉及其他高温要求的场合
S-Sn2Pb	316	322	—	
S-Sn50PbCd	145	145	—	用于轴瓦、陶瓷的烘烤软钎焊,热切割,分级软钎焊及其他低温软钎焊
S-Sn5PbAg	296	301	—	用于电气工业、高温工作的场合
S-Sn63PbAg	183	183	0.120	同 S-Sn63Pb,但焊点质量等诸方面优于 Sn-Sn63Pb
S-Sn40PbSbP	183	238	0.170	用于对抗氧化有较高要求的场合
S-Sn60PbSbP	183	190	0.145	

14.5 稀有金属及贵金属的物理性能

14.5.1 稀土抛光粉的牌号、化学成分及物理性能 (表 14-19)

表 14-19 稀土抛光粉的牌号、化学成分及物理性能 (GB/T 20165—2006)

理 化 性 能			产 品 牌 号		
			206088A	206088B	206088C
化学成分(质量分 数,%)	REO	≥	88	88	88
	CeO ₂ /REO	≥	50	50	50

(续)

理化性能			产 品 牌 号		
			206088A	206088B	206088C
化学成分(质量分数,%)	F	≤	7.0	7.0	7.0
	灼烧减量	≤	2.0	2.0	2.0
	水分	≤	1.0	1.0	1.0
物理性能	中心粒径/ μm	≤	3.5	3.5	3.5
	真密度/ (g/cm^3)		6.0 ± 1.0	6.0 ± 1.0	6.0 ± 1.0
	相对抛光效率(%)	≥	100	85	65

14.5.2 灯用稀土三基色荧光粉

1. 灯用稀土三基色红色荧光粉的光学性能及颗粒特性 (表 14-20)

表 14-20 灯用稀土三基色红色荧光粉的光学性能及颗粒特性 (GB/T 14633—2002)

数字牌号		200000
字符牌号		G27
相对亮度(%)		≥99.0
色品坐标	x	0.650 ± 0.010
	y	0.345 ± 0.010
发射主峰/nm		611 ± 1
密度/ (g/cm^3)		5.1 ± 0.2
中心粒径 $d_{50}/\mu\text{m}$		5.0
粒度分布(体积分数,%)	≤2.0 μm	≤6.0
	≥10.0 μm	≤7.5
比表面积/ (cm^2/g)		2800
热稳定性 (550℃,0.5h)	$B_s^{\text{①}}$ (%)	≥99.0
	Δx	≤0.003
	Δy	≤0.003

① B_s 表示相对亮度热稳定性。

2. 灯用稀土三基色蓝色荧光粉的光学性能及颗粒特性 (表 14-21)

表 14-21 灯用稀土三基色蓝色荧光粉的光学性能及颗粒特性 (GB/T 14633—2002)

数字牌号		200101A	200101B
字符牌号		G26-1	G26-2
相对亮度(%)		≥99.0	≥99.0
色品坐标	x	0.150 ± 0.010	0.150 ± 0.010
	y	0.070 ± 0.010	0.135 ± 0.010
发射主峰/nm		450 ± 5	$450 \pm 5; 515 \pm 5$ (次峰)
密度/ (g/cm^3)		3.7 ± 0.2	3.7 ± 0.2
中心粒径 $d_{50}/\mu\text{m}$		7.0	7.0

(续)

数字牌号		200101A	200101B
粒度分布(体积分数,%)	$\leq 4.0\mu\text{m}$	≤ 12.0	≤ 12.0
	$\geq 10.0\mu\text{m}$	≤ 12.0	≤ 12.0
比表面积/(cm^2/g)		3700	3700
热稳定性 (550°C,0.5h)	$B_s^{①}(\%)$	≥ 95.0	≥ 95.0
	Δx	≤ 0.005	≤ 0.005
	Δy	≤ 0.005	≤ 0.005

① B_s 表示相对亮度热稳定性。

3. 灯用稀土三基色绿色荧光粉的光学性能及颗粒特性 (表 14-22)

表 14-22 灯用稀土三基色绿色荧光粉的光学性能
及颗粒特性 (GB/T 14633—2002)

数字牌号		200202
字符牌号		G25
相对亮度(%)		≥ 99.0
色品坐标	x	0.335 ± 0.010
	y	0.595 ± 0.010
发射主峰/nm		543 ± 2
密度/(g/cm^3)		4.3 ± 0.2
中心粒径 $d_{50}/\mu\text{m}$		8.0
粒度分布(体积分数,%)	$\leq 4.0\mu\text{m}$	≤ 13.5
	$\geq 16.0\mu\text{m}$	≤ 13.5
比表面积/(cm^2/g)		3200
热稳定性 (550°C,0.5h)	$B_s^{①}(\%)$	≥ 99.0
	Δx	≤ 0.003
	Δy	≤ 0.003

① B_s 表示相对亮度热稳定性。

4. 灯用稀土三基色混合荧光粉的光学性能及颗粒特性 (表 14-23)

表 14-23 灯用稀土三基色混合荧光粉的光学性能及颗粒特性 (GB/T 14633—2002)

数字牌号	字符牌号	相对亮度 (%)	色品坐标		中心粒径 $d_{50}/\mu\text{m}$	显色指数	相关色温 T_{cc}/K
			x	y			
200303A	G-RD	≥ 98.0	$x_m \pm 0.005$	$y_m \pm 0.005$	5.5	≥ 80	$T_{cc_m} \pm 50$
200303B	G-RN	≥ 98.0	$x_m \pm 0.005$	$y_m \pm 0.005$	5.5	≥ 80	$T_{cc_m} \pm 50$
200303C	G-RB	≥ 98.0	$x_m \pm 0.005$	$y_m \pm 0.005$	6.0	≥ 82	$T_{cc_m} \pm 100$
200303D	G-RL	≥ 98.0	$x_m \pm 0.005$	$y_m \pm 0.005$	6.0	≥ 82	$T_{cc_m} \pm 100$
200303E	G-RZ	≥ 98.0	$x_m \pm 0.005$	$y_m \pm 0.005$	6.5	≥ 82	$T_{cc_m} \pm 100$
200303F	G-RR	≥ 98.0	$x_m \pm 0.005$	$y_m \pm 0.005$	6.5	≥ 82	$T_{cc_m} \pm 100$

注: x_m 、 y_m 表示色品坐标的中心值, T_{cc_m} 表示相关色温的中心值。

14.5.3 钨板的密度（表 14-24）

表 14-24 钨板的密度（GB/T 3875—2006）

板材厚度/mm	密度/(g/cm ³)	板材厚度/mm	密度/(g/cm ³)
≤3.0	≥19.20	>3.0~6.0	≥19.15

14.5.4 钨粉的粒度范围及氧含量（表 14-25）

表 14-25 钨粉的粒度范围及氧含量（GB/T 3458—2006）

产 品 规 格	平均粒度范围/μm		w(O)(%) ≤
04	BET	<0.10	0.80
06		0.10~0.20	0.50
08		≥0.8~1.0	0.40
10	Fsss	>1.0~1.5	0.30
15		>1.5~2.0	0.30
20		>2.0~3.0	0.25
30		>3.0~4.0	0.25
40		>4.0~5.0	0.25
50		>5.0~7.0	0.25
70		>7.0~10.0	0.20
100		>10.0~15.0	0.20
150		>15.0~20.0	0.10
200		>20.0~30.0	0.10
300		>30.0	0.10

注：BET 是指按比表面积法测定的平均粒度，Fsss 是指按费氏法测定的平均粒度。

14.5.5 碳化钨粉的物理性能

1. 碳化钨粉的产品特性（表 14-26）

表 14-26 碳化钨粉的产品特性（GB/T 4295—2008）

牌 号	比表面积 /(m ² /g)	平均粒度 范围/μm	氧含量 (质量分 数,%) ≤	总碳 (质量分 数,%)	游离碳 (质量分 数,%) ≤	化合碳 (质量分 数,%) ≥
FWC02-04	>2.5	—	0.35	6.20~6.30	0.20	6.07
FWC04-06	1.5~2.5	—	0.30	6.15~6.25	0.15	6.07
FWC06-08	—	≥0.60~0.80	0.20	6.13~6.23	0.12	6.07
FWC08-10	—	>0.80~1.00	0.18	6.08~6.18	0.08	6.07
FWC10-14	—	>1.00~1.40	0.15	6.08~6.18	0.06	6.07
FWC14-18	—	>1.40~1.80	0.15	6.08~6.18	0.06	6.07
FWC18-24	—	>1.80~2.40	0.12	6.08~6.18	0.06	6.07

(续)

牌 号	比表面积 /(m ² /g)	平均粒度 范围/μm	氧含量 (质量分 数,%) ≤	总碳 (质量分 数,%)	游离碳 (质量分 数,%) ≤	化合碳 (质量分 数,%) ≥
FWC24-30	—	>2.40 ~ 3.00	0.10	6.08 ~ 6.18	0.06	6.07
FWC30-40	—	>3.00 ~ 4.00	0.08	6.08 ~ 6.18	0.06	6.07
FWC40-50	—	>4.00 ~ 5.00	0.08	6.08 ~ 6.18	0.06	6.07
FWC50-70	—	>5.00 ~ 7.00	0.08	6.08 ~ 6.18	0.06	6.07
FWC70-100	—	>7.00 ~ 10.00	0.05	6.08 ~ 6.18	0.06	6.07
FWC100-140	—	>10.00 ~ 14.00	0.05	6.08 ~ 6.18	0.06	6.07
FWC140-200	—	>14.00 ~ 20.00	0.05	6.08 ~ 6.18	0.06	6.07
FWC200-260	—	>20.00 ~ 26.00	0.05	6.08 ~ 6.18	0.06	6.07
FWC260-350	—	>26.00 ~ 35.00	0.08	6.08 ~ 6.18	0.06	6.07

2. 铸造碳化钨粉装产品的粒度 (表 14-27)

表 14-27 铸造碳化钨粉装产品的粒度 (GB/T 2967—2008)

牌 号	粒度范围/mm	上筛筛上物 (质量分数,%) ≤	下筛筛下物 (质量分数,%) ≤
YZi20 ~ 30	<0.85 ~ 0.60 (- 20 ~ + 30 目)	5	7
YZi30 ~ 40	<0.60 ~ 0.425 (- 30 ~ + 40 目)	5	7
YZi40 ~ 60	<0.425 ~ 0.25 (- 40 ~ + 60 目)	5	7
YZi60 ~ 80	<0.25 ~ 0.18 (- 60 ~ + 80 目)	5	7
YZi65 ~ 100	<0.21 ~ 0.15 (- 65 ~ + 100 目)	5	7
YZi100 ~ 150	<0.15 ~ 0.106 (- 100 ~ + 150 目)	5	7
YZi150 ~ 200	<0.106 ~ 0.075 (- 150 ~ + 200 目)	5	10
YZi80 ~ 200	<0.18 ~ 0.075 (- 80 ~ + 200 目)	5	7
YZi100 ~ 200	<0.15 ~ 0.075 (- 100 ~ + 200 目)	5	7
YZi200 ~ 400	<0.075 ~ 0.038 (- 200 ~ + 400 目)	5	7

3. 高碳铸造碳化钨粉装产品的粒度 (表 14-28)

表 14-28 高碳铸造碳化钨粉装产品的粒度 (GB/T 2967—2008)

牌 号	粒度范围/mm	上筛筛上物 (质量分数,%) ≤	下筛筛下物 (质量分数,%) ≤
YZGi18 ~ 24	<1.0 ~ 0.71 (- 18 ~ + 24 目)	5	10
YZGi40 ~ 60	<0.425 ~ 0.25 (- 40 ~ + 60 目)	5	7
YZGi50 ~ 80	<0.3 ~ 0.18 (- 50 ~ + 80 目)	5	7
YZGi70 ~ 100	<0.21 ~ 0.15 (- 70 ~ + 100 目)	5	8
YZGi100 ~ 200	<0.15 ~ 0.075 (- 100 ~ + 200 目)	1.5	8
YZGi200 ~ 400	<0.075 ~ 0.038 (- 200 ~ + 400 目)	5	10

4. 铸造碳化钨管装产品的粒度（表 14-29）

表 14-29 铸造碳化钨管装产品的粒度（GB/T 2967—2008）

牌 号	钢管外径/mm	粒度范围/mm	上筛筛上物 (质量分数,%) ≤	下筛筛下物 (质量分数,%) ≤
YZg20 ~ 30	7 ± 0.5	< 0.85 ~ 0.60(-20 ~ +30 目)	5	7
YZg30 ~ 40	6 ± 0.5	< 0.60 ~ 0.425(-30 ~ +40 目)	5	7
YZg40 ~ 60	5 ± 0.5	< 0.425 ~ 0.25(-40 ~ +60 目)	5	7
YZg60 ~ 80	4 ± 0.5	< 0.25 ~ 0.18(-60 ~ +80 目)	5	7

5. 铸造碳化钨粉的松装密度（表 14-30）

表 14-30 铸造碳化钨粉的松装密度（GB/T 2967—2008）

粒度范围/mm	< 0.85 ~ 0.60	< 0.60 ~ 0.425	< 0.425 ~ 0.25	< 0.25 ~ 0.18	< 0.18 ~ 0.15	< 0.15 ~ 0.106	< 0.106 ~ 0.075	< 0.075 ~ 0.038
松装密度 /(g/cm ³)	≥8.0	≥7.8	≥7.6	≥7.5	≥7.4	≥7.2	≥7.0	≥6.7

14.5.6 钼粉的产品特性（表 14-31）

表 14-31 钼粉的产品特性（GB/T 3461—2006）

型号	平均粒径范围 /μm	w (O) (%) ≤	型号	平均粒径范围 /μm	w (O) (%) ≤
05	0.5 ~ 1	0.30	40	>4 ~ 6	0.15
10	>1 ~ 2	0.25			
20	>2 ~ 4	0.20	60	>6 ~ 10	0.10

14.5.7 碳化钽粉的粒度（表 14-32）

表 14-32 碳化钽粉的粒度（GB/T 20508—2006）

产品粒度规格	10	15	30
费氏平均粒径/μm	≤1.0	>1.0 ~ 1.5	>1.5 ~ 3.0

14.5.8 吸气用锆铝合金粉的型号、粒度范围及用途（表 14-33）

表 14-33 吸气用锆铝合金粉的型号、粒度范围及用途（YS/T 529—2009）

型 号	粒度范围/μm	用 途 举 例
XQF1	850 ~ 2360(-8 目 ~ +20 目)	用于惰性气体纯化等
XQF2	45 ~ 150(-100 目 ~ +325 目)	用于压制吸气用带、环、片

(续)

公称阻值/(Ω/□)	1	5	10	30	100	1000	10000	100000	1000000	10000000
电阻温度系数 /(10 ⁻⁶ /℃)	± 500	± 200	± 100	± 100	± 100	± 100	± 100	± 100	± 100	± 200
电阻稳定性 ΔR/R(%)	≤ ± 1		≤ ± 0.5							≤ ± 1
短期过载电压 /(V/mm)	—	—	8	5	21	60	80	280	370	400
标准工作电压 /(V/mm)	—	—	3	2	8	24	32	110	150	—
最大功率损耗 /(mW/mm ²)	—	—	900	135	650	600	100	120	23	—
浸渍焊锡 (Sn62Pb36Ag2, 225℃,5s)ΔR(%)	—	± 1	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 1
噪声/dB	< -25	< -25	< -25	< -25	< -20	< -10	< -5	< 5	< 5	< 10

① 烧成膜厚为 (12 ± 2) μm。

14.5.13 超细水合二氧化钨粉的性能 (表 14-38)

表 14-38 超细水合二氧化钨粉的性能 (YS/T 598—2006)

比表面积/(m ² /g)	平均粒度/μm	松装密度/(g/cm ³)	振实密度/(g/cm ³)
> 30	< 1	0.5 ~ 0.9	1.0 ~ 1.4

14.5.14 超细金粉的性能 (表 14-39)

表 14-39 超细金粉的性能 (GB/T 1775—2009)

牌 号	比表面积/(m ² /g)	平均粒径/μm	松装密度/(g/cm ³)	振实密度/(g/cm ³)
FAuH-1	1.85 ~ 1.95	0.17 ~ 0.25	6.0 ~ 6.2	6.8 ~ 6.9

14.5.15 超细氧化钼粉的性能 (表 14-40)

表 14-40 超细氧化钼粉的性能 (YS/T 599—2006)

比表面积/(m ² /g)	平均粒度/μm	松装密度/(g/cm ³)	振实密度/(g/cm ³)
≥ 20	< 0.5	1.0 ~ 1.6	1.8 ~ 2.5

14.5.16 银钯厚膜导体浆料的物理性能（表 14-41）

表 14-41 银钯厚膜导体浆料的固体含量、细度及粘度（YS/T 614—2006）

银/钯/(g/g)	固体含量(质量分数,%)	细度/ μm	粘度/ $\text{Pa}\cdot\text{s}$
99/1~80/20	75~85	≤ 10	250~400

14.5.17 银钯浆料烧成膜后的性能（表 14-42）

表 14-42 银钯浆料烧成膜后的性能（YS/T 614—2006）

银/钯/(g/g)	99/1	97/3	95/5	92/8	90/10	85/15	80/20
方阻/($\text{m}\Omega/\square$) $\leq$	5	5	8	12	14	16	20
焊接性	好	好	好	好	好	好	好
耐焊性/次	1	1	1~2	3~4	4~6	6~8	7~9
初始剥离附着力 ($2\text{mm}\times 2\text{mm}$)/N $\geq$	40	40	40	40	40	40	40
老化剥离附着力 ($2\text{mm}\times 2\text{mm}$)/N $\geq$	20	20	20	20	20	20	20

注：烧成膜厚度应为 10~15 μm 。

14.5.18 超细铂粉的产品特性（表 14-43）

表 14-43 超细铂粉的产品特性（GB/T 1776—2009）

牌 号	比表面积 /(m^2/g)	平均粒径 /nm	松装密度 /(g/cm^3)	振实密度 /(g/cm^3)
FPtH-1	>7.0	<50	0.4~0.7	0.7~1.1

14.5.19 铂电极浆料的固体含量、细度及粘度（表 14-44）

表 14-44 铂电极浆料的固体含量、细度及粘度（YS/T 609—2006）

产品牌号	固体含量(质量分数,%)	细度/ μm	粘度/ $\text{Pa}\cdot\text{s}$
PE-Pt- $\times\times\times\times$	75~85	≤ 15	20~60

14.5.20 电阻温度计用铂丝的物理性能

1. 电阻温度计用铂丝的特性（表 14-45）

表 14-45 电阻温度计用铂丝的特性（GB/T 5977—1999）

品 种	代号	电阻比 W (100 $^{\circ}\text{C}$)	电阻温度系数 $\alpha/^{\circ}\text{C}^{-1}$	适 用 范 围
1 号铂丝	Pt1	≥ 1.39254	—	用于制造标准铂电阻温度计

(续)

品 种	代号	电阻比 W (100℃)	电阻温度系数 $\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$	适 用 范 围
2 号铂丝	Pt2	—	0.003850 ± 0.000004	用于制造 A 级允许偏差的工业铂热电阻温度计
3 号铂丝	Pt3	—	0.003850 ± 0.000010	用于制造 B 级允许偏差的工业铂热电阻温度计
4 号铂丝	Pt4	—	≥ 0.003920	用于制造标准铂电阻温度计用引线及其他
5 号铂丝	Pt5	—	≥ 0.003840	用于制造工业铂热电阻温度计用引线及其他

2. 电阻温度计用铂丝的稳定性（表 14-46）

表 14-46 电阻温度计用铂丝的稳定性（GB/T 5977—1999）

代 号	铂电阻温度计 试样允许偏差等级	试验时间/h		温度变化值 / $^\circ\text{C}$
		上限使用温度	下限使用温度	
Pt2	A	250	250	0.13
Pt3	B	250	250	0.26

14.5.21 铂铑热电偶丝的物理性能

1. 铂铑 10-铂热电偶丝的不均匀热电动势（表 14-47）

表 14-47 铂铑 10-铂热电偶丝的不均匀热电动势^①（GB/T 3772—1998）

产品名称	不均匀热电动势/ $\mu\text{V} \leq$		
	标准级	I 级	Ⅱ级
铂铑 10 合金丝	9	9	18
铂丝	3	3	6

① 参考端温度为 0℃，测量端温度为 1084.62℃（铜点）。

2. 铂铑 10-铂热电偶丝的热电动势范围（表 14-48）

表 14-48 铂铑 10-铂热电偶丝的热电动势范围（GB/T 3772—1998）

测量端 温度/ $^\circ\text{C}$	热电动势 公称值/ μV	I 级		Ⅱ级	
		允许偏差/ μV	热电动势范围/ μV	允许偏差/ μV	热电动势范围/ μV
100	646	± 7	639 ~ 653	± 11	635 ~ 657
200	1441	± 8	1433 ~ 1449	± 13	1428 ~ 1454
300	2323	± 9	2314 ~ 2332	± 14	2309 ~ 2337
400	3259	± 10	3249 ~ 3269	± 14	3245 ~ 3273
419.527	3447	± 10	3437 ~ 3457	± 14	3433 ~ 3461
500	4233	± 10	4223 ~ 4243	± 15	4218 ~ 4248
600	5239	± 10	5229 ~ 5249	± 15	5224 ~ 5254

(续)

测量端 温度/℃	热电动势 公称值/ μV	Ⅰ级		Ⅱ级	
		允许偏差/ μV	热电动势范围/ μV	允许偏差/ μV	热电动势范围/ μV
630.63	5553	± 10	5543 ~ 5563	± 16	5537 ~ 5569
660.323	5860	± 10	5850 ~ 5870	± 17	5843 ~ 5877
700	6275	± 11	6264 ~ 6286	± 18	6257 ~ 6293
800	7345	± 11	7334 ~ 7356	± 22	7323 ~ 7367
900	8449	± 11	8438 ~ 8460	± 25	8424 ~ 8474
961.78	9148	± 11	9137 ~ 9159	± 27	9121 ~ 9175
1000	9587	± 12	9575 ~ 9599	± 29	9558 ~ 9616
1064.18	10334	± 12	10322 ~ 10346	± 31	10303 ~ 10365
1084.62	10575	± 12	10563 ~ 10587	± 32	10543 ~ 10607
1100	10757	± 12	10745 ~ 10769	± 33	10724 ~ 10790
1200	11951	± 16	11935 ~ 11967	± 36	11915 ~ 11987
1300	13159	± 19	13140 ~ 13178	± 39	13120 ~ 13198
1400	14373	± 23	14350 ~ 14396	± 42	14331 ~ 14415
1500	15582	± 26	15556 ~ 15608	± 45	15537 ~ 15627
1554.8	16239	± 28	16211 ~ 16267	± 46	16193 ~ 16285
1600	16777	± 30	16747 ~ 16807	± 47	16730 ~ 16824

3. 铂铑 10-铂热电偶丝的热电动势率 (表 14-49)

表 14-49 铂铑 10-铂热电偶丝的热电动势率 (GB/T 3772—1998)

温度/℃	热电动势率 $S/(\mu\text{V}/^\circ\text{C})$	温度/℃	热电动势率 $S/(\mu\text{V}/^\circ\text{C})$	温度/℃	热电动势率 $S/(\mu\text{V}/^\circ\text{C})$
100	7.39	700	10.53	1300	12.13
200	8.46	800	10.87	1400	12.13
300	9.13	900	11.21	1500	12.04
400	9.57	961.78	11.42	1554.8	11.95
419.527	9.64	1000	11.54	1600	11.85
500	9.90	1064.18	11.74	1700	11.45
600	10.21	1084.62	11.80	1768.1	10.31
630.63	10.30	1100	11.84		
660.323	10.40	1200	12.03		

4. 铂铑 10 合金丝和铂丝的物理参数（表 14-50）

表 14-50 铂铑 10 合金丝和铂丝的物理参数（GB/T 3772—1998）

名 称	铂铑 10 合金丝	铂 丝
密度/(g/cm ³)	20. 00	21. 46
熔点/℃	1847. 00	1769. 00
每米偶丝(φ0. 5mm)的质量/g	3. 93	4. 21
在 20℃时的电阻率/μΩ·cm	18. 90	10. 40
在 0 ~ 1600℃范围内平均电阻温度系数/(10 ⁻⁴ /℃)	14. 00	31. 00
抗拉强度/(N/mm ²)	314. 00	137. 00
断后伸长率(%)	35. 00	40. 00

5. 铂铑 13-铂热电偶丝的尺寸及使用温度上限（表 14-51）

表 14-51 铂铑 13-铂热电偶丝的尺寸及使用温度上限（GB/T 1598—1998）

偶丝直径/mm	直径允许偏差/mm	长期使用温度上限/℃	短期使用温度上限/℃
0. 5	-0. 015	1400	1600

6. 铂铑 13-铂热电偶丝的不均匀热电动势（表 14-52）

表 14-52 铂铑 13-铂热电偶丝的不均匀热电动势^①（GB/T 1598—1998）

产品名称	不均匀热电动势/μV ≤		
	标准级	I 级	Ⅱ级
铂铑 13 合金丝	10	10	20
铂丝	3	3	6

① 参考端温度为 0℃，测量端温度为 1084. 62℃（铜点）。

7. 铂铑 13-铂热电偶丝的热电动势范围（表 14-53）

表 14-53 铂铑 13-铂热电偶丝的热电动势范围（GB/T 1598—1998）

测量端 温度/℃	热电动势 公称值/μV	I 级		Ⅱ级	
		允许偏差/μV	热电动势范围/μV	允许偏差/μV	热电动势范围/μV
100	647	± 7	640 ~ 654	± 11	636 ~ 658
200	1469	± 9	1460 ~ 1478	± 13	1456 ~ 1482
300	2401	± 10	2391 ~ 2411	± 15	2386 ~ 2416
400	3408	± 10	3398 ~ 3418	± 16	3392 ~ 3424
419. 527	3611	± 10	3601 ~ 3621	± 16	3595 ~ 3627

(续)

测量端 温度/℃	热电动势 公称值/ μV	Ⅰ级		Ⅱ级	
		允许偏差/ μV	热电动势范围/ μV	允许偏差/ μV	热电动势范围/ μV
500	4471	± 11	4460 ~ 4482	± 16	4455 ~ 4487
600	5583	± 11	5572 ~ 5594	± 17	5566 ~ 5600
630. 63	5934	± 12	5922 ~ 5946	± 18	5916 ~ 5952
660. 323	6277	± 12	6265 ~ 6289	± 19	6258 ~ 6296
700	6743	± 12	6731 ~ 6755	± 21	6722 ~ 6764
800	7950	± 12	7938 ~ 7962	± 25	7925 ~ 7975
900	9205	± 13	9192 ~ 9218	± 29	9176 ~ 9234
961. 78	10003	± 13	9990 ~ 10016	± 31	9972 ~ 10034
1000	10506	± 13	10493 ~ 10519	± 33	10473 ~ 10539
1064. 18	11364	± 13	11351 ~ 11377	± 36	11328 ~ 11400
1084. 62	11640	± 14	11626 ~ 11654	± 37	11603 ~ 11677
1100	11850	± 14	11836 ~ 11864	± 37	11813 ~ 11887
1200	13228	± 18	13210 ~ 13246	± 42	13186 ~ 13270
1300	14629	± 23	14606 ~ 14652	± 46	14583 ~ 14675
1400	16040	± 27	16013 ~ 16067	± 49	15991 ~ 16089
1500	17451	± 31	17420 ~ 17482	± 53	17398 ~ 17504
1554. 8	18219	± 33	18186 ~ 18252	± 54	18165 ~ 18273
1600	18849	± 35	18814 ~ 18884	± 56	18793 ~ 18905

8. 铂铑 13-铂热电偶丝的热电动势率 (表 14-54)

表 14-54 铂铑 13-铂热电偶丝的热电动势率 (GB/T 1598—1998)

温度/℃	热电动势率 $S/(\mu\text{V}/^\circ\text{C})$	温度/℃	热电动势率 $S/(\mu\text{V}/^\circ\text{C})$	温度/℃	热电动势率 $S/(\mu\text{V}/^\circ\text{C})$
100	7. 48	700	11. 83	1300	14. 08
200	8. 84	800	12. 31	1400	14. 13
300	9. 74	900	12. 78	1500	14. 06
400	10. 37	961. 78	13. 06	1554. 8	13. 98
419. 527	10. 48	1000	13. 23	1600	13. 88
500	10. 88	1064. 18	13. 50	1700	13. 46
600	11. 36	1084. 62	13. 58	1768. 1	12. 26
630. 63	11. 50	1100	13. 63		
660. 323	11. 64	1200	13. 92		

9. 铂铑 13-铂热电偶丝的物理参数（表 14-55）

表 14-55 铂铑 13-铂热电偶丝的物理参数（GB/T 1598—1998）

名 称	铂铑 13 合金丝	铂 丝
密度/(g/cm ³)	19.61	21.46
熔点/℃	1860.00	1769.00
每米偶丝的质量/g	3.82	4.21
在 20℃ 时的电阻率/ $\mu\Omega\cdot\text{cm}$	19.60	10.40
在 0 ~ 1600℃ 范围内平均电阻温度系数/(10 ⁻⁴ /℃)	13.30	31.00
抗拉强度/(N/mm ²)	344.00	137.00
断后伸长率(%)	35.00	40.00

10. 铂铑 30-铂铑 6 热电偶丝的尺寸及使用温度上限（表 14-56）

表 14-56 铂铑 30-铂铑 6 热电偶丝的尺寸及使用温度上限（GB/T 2902—1998）

偶丝直径/mm	直径允许偏差/mm	长期使用温度上限/℃	短期使用温度上限/℃
0.5	0 -0.015	1600	1700

11. 铂铑 30-铂铑 6 热电偶丝的不均匀热电动势（表 14-57）

表 14-57 铂铑 30-铂铑 6 热电偶丝的不均匀热电动势^①（GB/T 2902—1998）

产品名称	不均匀热电动势/ μV ≤		
	标准级	Ⅱ 级	Ⅲ 级
铂铑 30 合金丝	10	10	20
铂铑 6 合金丝	12	13	25

① 参考端温度为 0℃，测量端温度为 1200℃。

12. 铂铑 30-铂铑 6 热电偶丝的热电动势范围（表 14-58）

表 14-58 铂铑 30-铂铑 6 热电偶丝的热电动势范围（GB/T 2902—1998）

测量端 温度/℃	热电动势 公称值/ μV	Ⅱ 级		Ⅲ 级	
		允许偏差/ μV	热电动势范围/ μV	允许偏差/ μV	热电动势范围/ μV
600	1792	±9	1783 ~ 1801	±24	1768 ~ 1816
700	2431	±12	2419 ~ 2443	±27	2404 ~ 2458
800	3154	±15	3139 ~ 3169	±31	3123 ~ 3185
900	3957	±19	3938 ~ 3976	±38	3919 ~ 3995
1000	4834	±23	4811 ~ 4857	±46	4788 ~ 4880

(续)

测量端 温度/℃	热电动势 公称值/μV	Ⅱ级		Ⅲ级	
		允许偏差/μV	热电动势范围/μV	允许偏差/μV	热电动势范围/μV
1064.18	5434	±25	5409 ~ 5459	±51	5383 ~ 5485
1084.62	5630	±26	5604 ~ 5656	±52	5578 ~ 5682
1100	5780	±27	5753 ~ 5807	±54	5726 ~ 5834
1200	6786	±31	6755 ~ 6817	±62	6724 ~ 6848
1300	7848	±35	7813 ~ 7883	±71	7777 ~ 7919
1400	8956	±39	8917 ~ 8995	±79	8877 ~ 9035
1500	10099	±43	10056 ~ 10142	±87	10012 ~ 10186
1554.8	10735	±45	10690 ~ 10780	±91	10644 ~ 10826
1600	11263	±47	11216 ~ 11310	±94	11169 ~ 11357
1700	12433	±50	12383 ~ 12483	±99	12334 ~ 12532

13. 铂铑 30-铂铑 6 热电偶丝的热电动势率 (表 14-59)

表 14-59 铂铑 30-铂铑 6 热电偶丝的热电动势率 (GB/T 2902—1998)

温度/℃	热电动势率 S/(μV/℃)	温度/℃	热电动势率 S/(μV/℃)	温度/℃	热电动势率 S/(μV/℃)
600	5.96	1084.62	9.68	1554.8	11.65
700	6.81	1100	9.77	1600	11.69
800	7.64	1200	10.36	1700	11.67
900	8.41	1300	10.87	1768.1	11.56
1000	9.12	1400	11.28		
1064.18	9.55	1500	11.56		

14. 铂铑 30-铂铑 6 热电偶丝的物理参数 (表 14-60)

表 14-60 铂铑 30-铂铑 6 热电偶丝的物理参数 (GB/T 2902—1998)

名 称	铂铑 30 合金丝	铂铑 6 合金丝
密度/(g/cm ³)	17.60	20.60
熔点/℃	1927.00	1826.00
每米偶丝的质量/g	3.45	4.04
在 20℃时的电阻率/μΩ·cm	19.00	17.50
电阻温度系数(0 ~ 100℃)/(10 ⁻⁴ /℃)	13.30	20.60
抗拉强度/(N/mm ²)	483.00	276.00
断后伸长率(%)	30.00	35.00

15. 微型热电偶用铂铑细偶丝的不均匀热电动势（表 14-61）

表 14-61 微型热电偶用铂铑细偶丝的不均匀热电动势^①（GB/T 18034—2000）

偶丝名称	不均匀热电动势/ μV $\leq$		
	定碳丝	I 级	II 级
铂	2	3	5
铂铑 6	9	10	20
铂铑 10	7	8	14
铂铑 13	7	8	16
铂铑 30	7	8	16

① 参考端温度为 0℃，测量端温度为 1554.8℃（铋点）。

16. 微型热电偶用铂铑细偶丝的热电动势及允许偏差（表 14-62）

表 14-62 微型热电偶用铂铑细偶丝的热电动势及允许偏差（GB/T 18034—2000）

偶丝 型号	测量端温度 /℃	热电动势 标称值/ μV	偶丝 分类	允许偏差/ μV			相当于温度偏差/℃		
				I	II	III	I	II	III
S 型	1064.18	10334	D	± 12	—	—	± 1	—	—
			C	± 24	± 31	—	± 2	± 2.6	—
	1554.8	16239	D	± 12	—	—	± 1	—	—
			C	± 24	± 36	—	± 2	± 3	—
R 型	1064.18	11364	D	± 13	—	—	± 1	—	—
			C	± 27	± 36	—	± 2	± 2.6	—
	1554.8	18219	D	± 14	—	—	± 1	—	—
			C	± 28	± 42	—	± 2	± 3	—
B 型	1064.18	5434	D	± 10	—	—	± 1	—	—
			C	± 20	± 29	± 38	± 2	± 3	± 4
	1554.8	10735	D	± 18	—	—	± 1.5	—	—
			C	± 24	± 36	± 48	± 2	± 3	± 4

14.5.22 片状银粉的特性（表 14-63）

表 14-63 片状银粉的特性（GB/T 1773—2008）

项 目		指 标		
		PAg-S2	PAg-S8	PAg-S15
粒径分布/ μm	D_{10}	≤ 0.5	1 ~ 4	≤ 5
	D_{50}	≤ 2	2 ~ 8	8 ~ 15
	D_{90}	≤ 10	5 ~ 15	≤ 25

(续)

项 目		指 标		
		PAg-S2	PAg-S8	PAg-S15
比表面积/(m^2/g)		≥ 2	≥ 0.5	≤ 0.5
松装密度/(g/cm^3)		0.5 ~ 2	1.2 ~ 2.5	1.0 ~ 2.0
振实密度/(g/cm^3)		3 ~ 6	2.5 ~ 4.5	2.0 ~ 3.5
烧损率 (%)	110℃	≤ 1	≤ 0.8	≤ 0.8
	538℃	≤ 3	≤ 2	≤ 2

14.5.23 银浆的物理性能

1. 银浆的固体含量、细度及粘度 (表 14-64)

表 14-64 银浆的固体含量、细度及粘度 (YS/T 603—2006)

产品类型	产品牌号	固体含量 (质量分数, %)	细度/ μm	粘度/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$
厚膜混合集成电路用银浆	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (T)	78 ~ 82	≤ 10	250 ~ 400
压电陶瓷滤波器、谐振器用银浆	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (Z)	60 ~ 80	≤ 10	200 ~ 400
真空荧光显示屏用银浆	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (V)	71 ~ 75	≤ 7.5	200 ~ 400
化霜用电极银浆	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (D)	74 ~ 87	≤ 15	60 ~ 250
圆片陶瓷电容器用银浆	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (C)	56 ~ 60	≤ 12.5	200 ~ 400
		61 ~ 65		
		66 ~ 70		
分立元器件线路引线用银浆	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (S)	75 ~ 82	≤ 10	250 ~ 400

2. 银浆烧成膜的主要性能 (表 14-65)

表 14-65 银浆烧成膜的主要性能 (YS/T 603—2006)

产品类型	产品牌号	主 要 性 能		
		方阻/ ($\text{m}\Omega/\square$)	焊接性	附着力/ N
厚膜混合集成电路用银浆	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (T)	2 ~ 5	好	>40 (剥离)
压电陶瓷滤波器、谐振器用银浆	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (Z)	2 ~ 5	好	>20 (剥离)
真空荧光显示屏用银浆	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (V)	2 ~ 5	好	>15 (剥离)
化霜用电极银浆	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (D)	1.5 ~ 10	好	>80 (垂直)
圆片陶瓷电容器用银浆	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (C)	2 ~ 5	好	>15 (剥离)
分立元器件线路引线用银浆	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (S)	2 ~ 5	好	>40 (垂直)

3. 银浆的不挥发物含量、细度及粘度（表 14-66）

表 14-66 银浆的不挥发物含量、细度及粘度（YS/T 606—2006）

产品类型	产品牌号	不挥发物含量 (质量分数,%)	细度/ μm	粘度/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$
膜片开关用低温银浆	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (M)	70 ~ 78	< 10	15 ~ 80
碳膜电位器用银浆	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (P)	58 ~ 75	< 30	15 ~ 80
银导电胶	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (A)	60 ~ 80	< 15	—

4. 银浆固化后的主要性能（表 14-67）

表 14-67 银浆固化后的主要性能（YS/T 606—2006）

产品类型	产品牌号	方阻/ ($\text{m}\Omega/\square$)	电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}$	附着力	硬度	机械耐 久性/周	抗挠折性 $\Delta R/\Omega$
膜片开关用低温银浆	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (M)	≤ 15	—	不脱膜	≥ 3	—	≤ 2
碳膜电位器用银浆	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (P)	< 200	—	不脱膜	—	≥ 12000	—
银导电胶	PC-Ag- $\times \times \times \times$ (A)	—	$\leq 1 \times 10^{-4}$	不脱膜	—	—	—

14.5.24 保险管用银铜合金丝的每米电阻（表 14-68）

表 14-68 保险管用银铜合金丝的每米电阻（GB/T 23515—2009）

牌号	直径/mm	每米电阻/(Ω/m)	牌号	直径/mm	每米电阻/(Ω/m)
Ag72Cu	0.09	2.888 ~ 3.066	Ag45Cu	0.08	4.414 ~ 4.687
	0.14	1.200 ~ 1.270		0.10	2.745 ~ 2.915
	0.25	0.385 ~ 0.410		0.14	1.472 ~ 1.564
	0.32	0.235 ~ 0.247		0.20	0.706 ~ 0.750
Ag50Cu	0.10	2.728 ~ 2.926		0.25	0.440 ~ 0.460
	0.25	0.440 ~ 0.460		0.32	0.272 ~ 0.292

14.6 复合材料的物理性能

14.6.1 电力牵引用钢铝复合接触线的性能（表 14-69）

表 14-69 电力牵引用钢铝复合接触线的性能（GB 12971.4—1991）

型号规格	综合拉断力/ $\text{N} \geq$	结合力/ $\text{N} \geq$	20℃时的每千米直流电阻/(Ω/km) $\leq$
CGLHD195	29400	1960	0.20
CGLHD260	39200	2960	0.12
CGLHJ260	49000	4900	0.12

14.6.2 电工用铝包钢线的物理常数（表 14-70）

表 14-70 电工用铝包钢线的物理常数（GB/T 17937—2009）

等级	LB14	LB20		LB23	LB27	LB30	LB35	LB40
类型	—	A	B	—	—	—	—	—
最终弹性模量实测值/GPa	170	162	155	149	140	132	122	109
线胀系数/K ⁻¹	12.0 × 10 ⁻⁶	13.0 × 10 ⁻⁶	12.6 × 10 ⁻⁶	12.9 × 10 ⁻⁶	13.4 × 10 ⁻⁶	13.8 × 10 ⁻⁶	14.5 × 10 ⁻⁶	15.5 × 10 ⁻⁶
定质量电阻温度系数/K ⁻¹	0.0034	0.0036	0.0036	0.0036	0.0036	0.0038	0.0039	0.0040

14.6.3 电工用铝包钢线的标称密度（表 14-71）

表 14-71 电工用铝包钢线的标称密度（GB/T 17937—2009）

等级	类型	20℃时标称密度/(g/cm ³)	等级	类型	20℃时标称密度/(g/cm ³)
LB14	—	7.14	LB27	—	5.91
LB20	A	6.59	LB30	—	5.61
	B	6.53	LB35	—	5.15
LB23	—	6.27	LB40	—	4.64

14.6.4 铝包镍复合粉的物理性能（表 14-72）

表 14-72 铝包镍复合粉的物理性能（YS/T 528—2006）

产品牌号	粒度组成		流动性/(s/50g) <	松装密度/(g/cm ³) >
	粒度/μm	所占百分数(%)		
FF06·01	≥106(+140 目)	<0.5	25	3.20
	≥92(+160 目)	<10		
	≥46(+320 目)	>95		
FF06·02	≥106(+140 目)	<0.5	25	3.25
	≥92(+160 目)	<15		
	≥57(+260 目)	>93		
FF06·03	≥106(+140 目)	<0.5	25	3.20
	≥92(+160 目)	<10		
	≥46(+320 目)	>95		

(续)

产品牌号	粒度组成		流动性/(s/50g) <	松装密度/(g/cm ³) >
	粒度/ μm	所占百分数(%)		
FF06·04	≥ 106 (+140目)	<0.5	25	3.25
	≥ 92 (+160目)	<15		
	≥ 57 (+260目)	>93		

14.6.5 镍包氧化铝复合粉的物理性能（表 14-73）

表 14-73 镍包氧化铝复合粉的物理性能（YS/T 510—2006）

产品牌号	粒度范围		包覆层完整程度 (%)	流动性/ (s/50g)	松装密度/ (g/cm ³)
	粒度/ μm	所占百分数(%)			
FF03·01	46~106(−140目~+320目)	>95	>90	<35	>2.3
FF03·02	46~106(−140目~+320目)	>95	>85	<40	>1.4
FF03·03	46~106(−140目~+320目)	>90	>70	<45	>1.2
FF03·04	38~80(−180目~+400目)	>95	>70	<80	>0.8
FF03·05	46~106(−140目~+320目)	>90	>50	<60	>1.0

14.6.6 镍包铜复合粉的物理性能（表 14-74）

表 14-74 镍包铜复合粉的物理性能（YS/T 513—2006）

产品牌号	粒度范围		包覆层完整 程度(%)	流动性/ (s/50g)	松装密度/ (g/cm ³)
	粒度/ μm	所占百分数(%)			
FF04·01	46~106(−140目~+320目)	>95	>85	<30	>3.0
FF04·02	46~80(−180目~+320目)	>90	>85	<32	>2.8
FF04·03	46~106(−140目~+320目)	>90	>70	<40	>2.0
	≤ 46 (−320目)	<5			

14.6.7 镍包铝复合粉的物理性能（表 14-75）

表 14-75 镍包铝复合粉的物理性能（GB/T 3989—1983）

产品牌号	粒度范围		包覆层完整程度 (%)	流动性/ (s/50g)	松装密度/ (g/cm ³)
	粒度/ μm	所占百分数(%)			
FF01·01	≥ 109 (+140目)	<0.5	≥ 95	<30	>3.2
	≥ 92 (+160目)	<10			
	≥ 46 (+320目)	>95			

(续)

产品牌号	粒度范围		包覆层完整程度 (%)	流动性/ (s/50g)	松装密度/ (g/cm ³)
	粒度/ μm	所占百分数(%)			
FF01·02	≥ 109 (+140目)	< 0.5	≥ 95	< 35	> 2.9
	≥ 92 (+160目)	< 5			
	≥ 46 (+260目)	> 93			
FF01·03	≥ 75 (+200目)	< 2	≥ 90	< 37	> 2.6
	≥ 46 (+320目)	> 93			
FF01·04	≥ 109 (+140目)	< 0.5	≥ 90	< 37	> 2.7
	≥ 92 (+160目)	< 10			
	≥ 46 (+320目)	> 95			

14.6.8 镍包铬复合粉的物理性能 (表 14-76)

表 14-76 镍包铬复合粉的物理性能 (YS/T 512—2006)

产品牌号	粒度范围		包覆层完整程度(%)	流动性/ (s/50g)	松装密度/ (g/cm ³)
	粒度/ μm	所占百分数(%)			
FF05·01	46~106(−140目~+320目)	> 90	> 95	< 40	> 3.0
FF05·02	38~80(−180目~+400目)	> 90	> 90	< 45	> 2.9
FF05·03	46~106(−140目~+320目)	> 90	> 80	< 50	> 2.4

附录

附录 A 常用物理量名称及符号

量的名称	符号	量的名称	符号
空间和时间		波长	λ
[平面]角	$\alpha, \beta, \gamma, \theta, \varphi$	波数	σ
		角波数	k
立体角	Ω	场[量]级	L_F
长度	l, L	功率[量]级	L_P
宽度	b	阻尼系数	δ
高度	h	对数减缩	Λ
厚度	d, δ	衰减系数	α
半径	r, R	相位系数	β
直径	d, D	传播系数	γ
程长	s	力学	
距离	d, r	质量	m
笛卡儿坐标	x, y, z	体积质量, [质量]密度	ρ
曲率半径	ρ	相对体积质量, 相对[质量]密度	d
面积	$A, (S)$	质量体积, 比体积	v
体积	V	线质量, 线密度	ρ_l
时间, 时间间隔, 持续时间	t	面质量, 面密度	$\rho_A, (\rho_S)$
角速度	ω	转动惯量, (惯性矩)	$J, (I)$
角加速度	α	动量	p
速度	v, c	力	F
加速度	a	重量	$W, (P, G)$
自由落体加速度, 重力加速度	g	冲量	I
周期及其有关现象		动量矩, 角动量	L
周期	T	力矩	M
时间常数	τ	力偶矩	M
频率	f, ν	转矩	T, M
旋转频率, 旋转速度	n	引力常量	$G, (f)$
角频率	ω	压力, 压强	p

(续)

量的名称	符 号	量的名称	符 号
正应力	σ	摄氏温度	t, θ
切应力	τ	线[膨]胀系数	α_l
线应变,(相对变形)	ε, e	体[膨]胀系数	$\alpha_V, (\alpha, \gamma)$
切应变	γ	相对压力系数	α_p
体应变	θ	压力系数	β
泊松比,泊松数	μ, ν	等温压缩率	κ_T
弹性模量	E	等熵压缩率	κ_S
切变模量,刚度模量	G	热,热量	Q
体积模量,压缩模量	K	热流量	Φ
[体积]压缩率	κ	面积热流量,热流[量]密度	q, φ
截面二次矩,截面二次轴矩,(惯性矩)	$I_a, (I)$	热导率,(导热系数)	$\lambda, (\kappa)$
截面二次极矩,(极惯性矩)	I_p	传热系数	$K, (k)$
截面系数	W, Z	表面传热系数	$h, (\alpha)$
动摩擦因数	$\mu, (f)$	热绝缘系数	M
静摩擦因数	$\mu_s, (f_s)$	热阻	R
[动力]粘度	$\eta, (\mu)$	热导	G
运动粘度	ν	热扩散率	a
表面张力	γ, σ	热容	C
能[量]	E	质量热容,比热容	c
功	$W, (A)$	质量定压热容,比定压热容	c_p
势能,位能	$E_p, (V)$	质量定容热容,比定容热容	c_V
动能	$E_k, (T)$	质量热容比,比热[容]比	γ
功率	P	等熵指数	κ
效率	η	熵	S
质量流量	q_m	质量熵,比熵	s
体积流量	q_V	能[量]	E
热学		热力学能	U
		焓	H
		质量能,比能	e
热力学温度	$T, (\Theta)$	质量焓,比焓	h

(续)

量的名称	符 号	量的名称	符 号
电学和磁学		[直流]电阻	R
电流	I	[直流]电导	G
电荷[量]	Q, q	[直流]功率	P
体积电荷, 电荷[体]密度	$\rho, (\eta)$	电阻率	ρ
面积电荷, 电荷面密度	σ	电导率	γ, σ
电场强度	E	磁阻	R_m
电位, (电势)	V, φ	磁导	$\Lambda, (P)$
电位差, (电势差), 电压	$U, (V)$	绕组的匝数	N
电动势	E	相数	m
电通[量]密度	D	相[位]差, 相[位]移	φ
电通[量]	Ψ	阻抗, (复[数]阻抗)	Z
电容	C	[交流]电阻	R
介电常数, (电容率)	ε	电抗	X
真空介电常数, (真空电容率)	ε_0	[交流]电导	G
相对介电常数, (相对电容率)	ε_r	品质因数	Q
面积电流, 电流密度	$J, (S)$	损耗因数	d
线电流, 电流线密度	$A, (\alpha)$	损耗角	δ
磁场强度	H	[有功]功率	P
磁位差, (磁势差)	U_m	视在功率, (表观功率)	S, P_s
磁通势, 磁动势	F, F_m	无功功率	Q, P_Q
磁通[量]密度, 磁感应强度	B	功率因数	λ
磁通[量]	Φ	[有功]电能[量]	W
自感	L	光及有关电磁辐射	
互感	M, L_{12}	发光强度	$I, (I_v)$
磁导率	μ	光通量	$\Phi, (\Phi_v)$
真空磁导率	μ_0	光量	$Q, (Q_v)$
相对磁导率	μ_r	[光]亮度	$L, (L_v)$
磁化强度	$M, (H_i)$	光出射度	$M, (M_v)$
		[光]照度	$E, (E_v)$

(续)

量的名称	符 号	量的名称	符 号
曝光量	H	吸声量	A
光视效能	K	响度级	L_N
光视效率	V	响度	N
折射率	n	物理化学和分子物理学	
声学		相对原子质量	A_r
声速,(相速)	c	相对分子质量	M_r
声能密度	$w,(e), (D)$	分子或其他基本单元数	N
		物质的量	$n,(\nu)$
声功率	W,P	摩尔质量	M
声强[度]	I,J	摩尔体积	V_m
声阻抗	Z_a	摩尔焓	H_m
声阻	R_a	摩尔热容	C_m
声抗	X_a	摩尔定压热容	$C_{p,m}$
声质量	M_a	摩尔定容热容	$C_{V,m}$
声导纳	Y_a	摩尔熵	S_m
声导	G_a	B 的分子浓度	C_B
声纳	B_a	体积质量,质量密度,密度	ρ
声阻抗率	Z_s	B 的质量浓度	ρ_B
声压级	L_p	B 的质量分数	w_B
声强级	L_I	B 的浓度,B 的物质的量浓度	c_B
声功率级	L_W	B 的摩尔分数	$x_B,(y_B)$
损耗因数,(损耗系数)	δ,ψ	溶质 B 的摩尔比	r_B
反射因数,(反射系数)	$\gamma,(\rho)$	B 的体积分数	φ_B
透射因数,(透射系数)	τ	标准平衡常数	K
吸收因数,(吸声系数)	α	分子质量	m
隔声量	R	摩尔气体常数	R

- 注：1. 当一个量给出两个或两个以上的名称或符号，而未加区别时，则它们处于同等的地位。
2. 去掉表中“量的名称”栏中的方括号后均为量的全称。方括号中的字，在不致引起混淆、误解的情况下可以省略。去掉方括号中的字即为量的简称。
3. 表中“量的名称”栏中圆括号内的名称是它前面名称的同义词。
4. 表中“符号”栏中圆括号内的符号为“备用符号”，供在特定情况下主符号以不同意义使用时使用。

附录 B 常用法定计量单位及其换算

物理量名称	法定计量单位		非法定计量单位		单 位 换 算
	单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
长度	米 海里	m n mile	费密	—	1 费密 = 1 fm = 10 ⁻¹⁵ m
			埃	Å	1 Å = 0.1 nm = 10 ⁻¹⁰ m
			码	yd	1 yd = 0.9144 m
			[市]里	—	1 里 = 500 m
			丈	—	1 丈 = (10/3) m = 3. $\dot{3}$ m
			尺	—	1 尺 = (1/3) m = 0.3 $\dot{3}$ m
			寸	—	1 寸 = (1/30) m = 0.03 $\dot{3}$ m
			[市]分	—	1 分 = (1/300) m = 0.00 $\dot{3}$ m
			英尺	ft	1 ft = 0.3048 m
			英寸	in	1 in = 0.0254 m
			英里	mile	1 mile = 1609.344 m
			密耳	mil	1 mil = 25.4 × 10 ⁻⁶ m
面积	平方米 公顷	m ² hm ² ①	公亩	a	1 a = 100 m ²
			平方英尺	ft ²	1 ft ² = 0.0929030 m ²
			平方英寸	in ²	1 in ² = 6.4516 × 10 ⁻⁴ m ²
			平方英里	mile ²	1 mile ² = 2.58999 × 10 ⁶ m ²
			平方码	yd ²	1 yd ² = 0.836127 m ²
			英亩	acre	1 acre = 4046.856 m ²
			亩	—	1 亩 = 10000/15 m ² = 666. $\dot{6}$ m ²

(续)

物理量名称	法定计量单位		非法定计量单位		单位换算
	单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
体积	立方米	m ³	立方英尺	ft ³	1ft ³ = 0. 0283168m ³
	升	L, (l)	立方英寸	in ³	1in ³ = 1. 63871 × 10 ⁻⁵ m ³
			立方码	yd ³	1yd ³ = 0. 7645549m ³
			英加仑	UKgal	1UKgal = 4. 54609dm ³
			美加仑	USgal	1USgal = 3. 78541 dm ³
			英品脱	UKpt	1UKpt = 0. 568261 dm ³
			美液品脱	USliqpt	1USliqpt = 0. 4731765dm ³
			美干品脱	USdrypt	1USdrypt = 0. 5506105dm ³
			美桶 (用于石油)	—	1 美桶 = 158. 9873dm ³
			英液盎司	UKfloz	1UKfloz = 28. 41306cm ³
速度	米每秒	m/s	英尺每秒	ft/s	1ft/s = 0. 3048m/s
			英里每[小]时	mile/h	1mile/h = 0. 44704m/s
加速度	米每二次方秒	m/s ²	英尺每二次方秒	ft/s ²	1ft/s ² = 0. 3048m/s ²
			伽	Gal	1Gal = 0. 01m/s ²
质量	千克,(公斤)	kg	磅	lb	1lb = 0. 45359237kg
	吨	t	英担	cwt	1cwt = 50. 8023kg
	原子质量单位	u	英吨	ton	1ton = 1016. 05kg

(续)

物理量名称	法定计量单位		非法定计量单位		单 位 换 算
	单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
质量	千克,(公斤)	kg	短吨	sh ton	1 sh ton = 907. 185kg
	吨	t	盎司	oz	1 oz = 28. 3495g
	原子质量单位	u	格令	gr	1 gr = 0. 06479891 g
			夸特	qr, qtr	1 qr = 12. 7006kg
			[米制]克拉	—	1 米制克拉 = 2×10^{-4} kg
体积质量 [质量]密度	千克每立方米	kg/m ³	磅每立方英尺	lb/ft ³	1 lb/ft ³ = 16. 0185kg/m ³
	吨每立方米	t/m ³	磅每立方英寸	lb/in ³	1 lb/in ³ = 27679. 9kg/m ³
	千克每升	kg/L	盎司每立方英寸	oz/in ³	1 oz/in ³ = 1729. 99kg/m ³
质量体积 比体积	立方米每千克	m ³ /kg	立方英尺每磅	ft ³ /lb	1 ft ³ /lb = 0. 0624280m ³ /kg
			立方英寸每磅	in ³ /lb	1 in ³ /lb = $3. 61273 \times 10^{-5}$ m ³ /kg
线质量(线重量) 线密度	千克每米	kg/m	旦[尼尔]	den	1 den = $0. 111112 \times 10^{-6}$ kg/m
	特[克斯]	tex	磅每英尺	lb/ft	1 lb/ft = 1. 48816kg/m
			磅每英寸	lb/in	1 lb/in = 17. 8580kg/m
			磅每码	lb/yd	1 lb/yd = 0. 496055kg/m
转动惯量	千克二次方米	kg·m ²	磅二次方英尺	lb·ft ²	1 lb·ft ² = 0. 0421401kg·m ²
			磅二次方英寸	lb·in ²	1 lb·in ² = $2. 92640 \times 10^{-4}$ kg·m ²
			盎司二次方英寸	oz·in ²	1 oz·in ² = $1. 82900 \times 10^{-5}$ kg·m ²
动量	千克米每秒	kg·m/s	磅英尺每秒	lb·ft/s	1 lb·ft/s = 0. 138255kg·m/s
			达因秒	dyn·s	1 dyn·s = 10^{-5} kg·m/s

(续)

物理量名称	法定计量单位		非法定计量单位		单 位 换 算
	单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
力	牛[顿]	N	达因	dyn	1 dyn = 10 ⁻⁵ N
			千克力	kgf	1 kgf = 9. 80665 N
			磅力	lbf	1 lbf = 4. 44822 N
			吨力	tf	1 tf = 9. 80665 × 10 ³ N
			盎司力	ozf	1 ozf = 0. 278014 N
			磅达	pdl	1 pdl = 0. 138255 N
动量矩 角动量	千克二次方米 每秒	kg·m ² /s	磅二次方英尺 每秒	lb·ft ² /s	1 lb·ft ² /s = 0. 0421401 kg·m ² /s
力矩 力偶矩 转矩	牛[顿]米	N·m	千克力米	kgf·m	1 kgf·m = 9. 80665 N·m
			磅力英尺	lbf·ft	1 lbf·ft = 1. 35582 N·m
			磅力英寸	lbf·in	1 lbf·in = 0. 112985 N·m
			达因厘米	dyn·cm	1 dyn·cm = 10 ⁻⁷ N·m
			盎司力英寸	ozf·in	1 ozf·in = 7. 06155 × 10 ⁻³ N·m
压力 压强 正应力 切应力	帕[斯卡]	Pa	达因每平方厘米	dyn/cm ²	1 dyn/cm ² = 0. 1 Pa
			英寸汞柱	inHg	1 inHg = 3386. 39 Pa
			英寸水柱	inH ₂ O	1 inH ₂ O = 249. 082 Pa
			巴	bar	1 bar = 10 ⁵ Pa
			千克力每平方厘米	kgf/cm ²	1 kgf/cm ² = 0. 0980665 MPa
			毫米水柱	mmH ₂ O	1 mmH ₂ O = 9. 80665 Pa

(续)

物理量名称	法定计量单位		非法定计量单位		单 位 换 算
	单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
压力 压强 正应力 切应力	帕[斯卡]	Pa	毫米汞柱	mmHg	1mmHg = 133.322Pa
			托	Torr	1Torr = 133.322Pa
			工程大气压	at	1at = 98066.5Pa = 98.0665kPa
			标准大气压	atm	1atm = 101325Pa = 101.325kPa
			磅力每平方英尺	lbf/ft ²	1lbf/ft ² = 47.8803Pa
			磅力每平方英寸	lbf/in ²	1lbf/in ² = 6894.76Pa = 6.89476kPa
[动力]粘度	帕[斯卡]·秒	Pa·s	泊	P, Po	1P = 10 ⁻¹ Pa·s
			厘泊	cP	1cP = 10 ⁻³ Pa·s
			千克力秒每平方米	kgf·s/m ²	1kgf·s/m ² = 9.80665Pa·s
			磅力秒每平方英尺	lbf·s/ft ²	1lbf·s/ft ² = 47.8803Pa·s
			磅力秒每平方英寸	lbf·s/in ²	1lbf·s/in ² = 6894.76Pa·s
运动粘度	二次方米每秒	m ² /s	斯[托克斯]	St	1St = 10 ⁻⁴ m ² /s
			厘斯[托克斯]	cSt	1cSt = 10 ⁻⁶ m ² /s
			二次方英尺每秒	ft ² /s	1ft ² /s = 9.29030 × 10 ⁻² m ² /s
			二次方英寸每秒	in ² /s	1in ² /s = 6.4516 × 10 ⁻⁴ m ² /s
能[量] 功 热	焦[耳]	J	尔格	erg	1erg = 10 ⁻⁷ J
	电子伏	eV	千克力米	kgf·m	1kgf·m = 9.80665J
			英马力[小]时	hp·h	1hp·h = 2.68452MJ
			卡	cal	1cal = 4.1868J

(续)

物理量名称	法定计量单位		非法定计量单位		单位换算
	单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
能[量] 功 热	焦[耳] 电子伏	J eV	热化学卡	cal _{th}	1 cal _{th} = 4. 1840J
			马力[小]时	—	1 马力·时 = 2. 64779MJ
			电工马力[小]时	—	1 电工马力·时 = 2. 68560MJ
			英热单位	Btu	1 Btu = 1055. 06J = 1. 05506kJ
			吨标准煤,吨当量煤	tec	1 tec = 29. 3076GJ
			英尺磅力	ft·lbf	1 ft·lbf = 1. 35582J
功率	瓦[特]	W	千克力米每秒	kgf·m/s	1 kgf·m/s = 9. 80665W
			马力,[米制]马力	—	1 马力 = 735. 499W
			英马力	hp	1 hp = 745. 700W
			电工马力	—	1 电工马力 = 746W
			卡每秒	cal/s	1 cal/s = 4. 1868W
			千卡每[小]时	kcal/h	1 kcal/h = 1. 163W
			热化学卡每秒	cal _{th} /s	1 cal _{th} /s = 4. 184W
			英尺磅力每秒	ft·lbf/s	1 ft·lbf/s = 1. 35582W
			尔格每秒	erg/s	1 erg/s = 10 ⁻⁷ W
质量流量	千克每秒	kg/s	磅每秒	lb/s	1 lb/s = 0. 453592kg/s
			磅每[小]时	lb/h	1 lb/h = 1. 25998 × 10 ⁻⁴ kg/s
体积流量	立方米每秒	m ³ /s	立方英尺每秒	ft ³ /s	1 ft ³ /s = 0. 0283168m ³ /s
	升每秒	L/s	立方英寸每[小]时	in ³ /h	1 in ³ /h = 4. 55196 × 10 ⁻⁶ L/s

(续)

物理量名称	法定计量单位		非法定计量单位		单位换算
	单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
热力学温度 摄氏温度	开[尔文] 摄氏度	K °C	华氏度	°F	表示温度差和温度间隔时： $1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$ 表示温度数值时： $\frac{t^{(2)}}{^{\circ}\text{C}} = \frac{T^{(2)}}{\text{K}} - 273.15$ 表示温度差和温度间隔时： $1^{\circ}\text{F} = \frac{5}{9}\text{K}$ 表示温度数值时： $\frac{T}{\text{K}} = \frac{5}{9} \left(\frac{\theta^{(2)}}{^{\circ}\text{F}} + 459.67 \right)$ $\frac{t}{^{\circ}\text{C}} = \frac{5}{9} \left(\frac{\theta}{^{\circ}\text{F}} - 32 \right)$
			兰氏度	°R	表示温度差和温度间隔时： $1^{\circ}\text{R} = \frac{5}{9}\text{K}$ 表示温度数值时： $\frac{T}{\text{K}} = \frac{5}{9} \frac{\theta}{^{\circ}\text{R}}$ $\frac{t}{^{\circ}\text{C}} = \frac{5}{9} \left(\frac{\theta^{(2)}}{^{\circ}\text{R}} - 491.67 \right)$
热导率 (导热系数)	瓦[特]每米开[尔文]	W/(m·K)	卡每厘米秒开[尔文]	cal/(cm·s·K)	1cal/(cm·s·K) = 418.68W/(m·K)
			千卡每米[小]时开[尔文]	kcal/(m·h·K)	1kcal/(m·h·K) = 1.163W/(m·K)
			英热单位每英尺[小]时华氏度	Btu/(ft·h·°F)	1Btu/(ft·h·°F) = 1.73073W/(m·K)

(续)

物理量名称	法定计量单位		非法定计量单位		单位换算
	单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
传热系数 表面传热系数	瓦[特]每平方米开[尔文]	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	卡每平方米秒开[尔文]	$\text{cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$	$1 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}) = 418.68 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
			千卡每平方米[小]时开[尔文]	$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$	$1 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}) = 1.163 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
			英热单位每平方英尺[小]时华氏度	$\text{Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F})$	$1 \text{ Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}) = 5.67826 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
			尔格每平方厘米秒开[尔文]	$\text{erg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$	$1 \text{ erg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}) = 0.001 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
热容 熵	焦[耳]每开[尔文]	J/K	克劳	Cl	$1 \text{ Cl} = 4.1868 \text{ J/K}$
质量热容 比热容, 比熵	焦[耳]每千克开尔文	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	千卡每千克开[尔文]	$\text{kcal}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$1 \text{ kcal}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 4186.8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
质量热容 比热容 比熵	焦[耳]每千克开[尔文]	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	热化学千卡每千克开[尔文]	$\text{kcal}_{\text{th}}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$1 \text{ kcal}_{\text{th}}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 4184 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
			英热单位每磅华氏度	$\text{Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{F})$	$1 \text{ Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}) = 4186.8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
			英热单位每磅兰氏度	$\text{Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{R})$	$1 \text{ Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{R}) = 4186.8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
			尔格每克开[尔文]	$\text{erg}/(\text{g} \cdot \text{K})$	$1 \text{ erg}/(\text{g} \cdot \text{K}) = 10^{-4} \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
质量能 比能 质量焓 比焓	焦[耳]每千克	J/kg	千卡每千克	kcal/kg	$1 \text{ kcal}/\text{kg} = 4186.8 \text{ J}/\text{kg}$
			热化学千卡每千克	$\text{kcal}_{\text{th}}/\text{kg}$	$1 \text{ kcal}_{\text{th}}/\text{kg} = 4184 \text{ J}/\text{kg}$
			英热单位每磅	Btu/lb	$1 \text{ Btu}/\text{lb} = 2326 \text{ J}/\text{kg}$
			尔格每克	erg/g	$1 \text{ erg}/\text{g} = 10^{-4} \text{ J}/\text{kg}$
磁场强度	安[培]每米	A/m	奥斯特	Oe	$1 \text{ Oe} = 79.5775 \text{ A/m}$
磁通[量]密度 磁感应强度	特[斯拉]	T	高斯	Gs, G	$1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$
磁通[量]	韦[伯]	Wb	麦克斯韦	Mx	$1 \text{ Mx} = 10^{-8} \text{ Wb}$
电导	西[门子]	S	姆欧	$\bar{\Omega}$	$1 \bar{\Omega} = 1 \text{ S}$
[光]亮度	坎[德拉]每平方米	cd/m^2	尼特	nt	$1 \text{ nt} = 1 \text{ cd}/\text{m}^2$
[光]照度	勒[克斯]	lx	辐透 英尺烛光	ph fc	$1 \text{ ph} = 10^4 \text{ lx}$ $1 \text{ fc} = 10.764 \text{ lx}$

① $1 \text{ hm}^2 = 10^4 \text{ m}^2$, 公顷的国际通用符号为 ha。
② T 、 t 、 θ 、 θ 分别表示热力学温度、摄氏温度、兰氏温度和华氏温度。

附录 C 化学元素常规物理性能

元素符号	原子序数	相对原子质量	状态	熔点 /°C	沸点 /°C	密度 / (g/cm ³)	弹性模量 /GPa	切变模量 /GPa	线胀系数 /10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	比热容 /[J / (g·K)]	熔化潜热 / (J/g)	热导率 /[W / (m·K)]	电阻率 /μΩ·cm	电阻温度系数 /10 ⁻³ ·K ⁻¹	质量磁化率 / (10 ⁻⁶ cm ³ /g)	其 他
Ac	89	227.0278	固	1050	3200	10.07	—	—	14.9	0.120	—	—	—	—	—	<i>t</i> (1/2) = 21.77a
Ag	47	107.8682	固	961.9	2193	10.5020	78.9	28.8	19.2	0.236	105	429	1.59	4.10	-0.227	—
Al	13	26.98154	固	660.4	2467	2.702	70.6	27.1	23.2	0.903	397	247	2.65	4.29	+7.70	<i>θ</i> = 1.20K
Am	95	242.00	固	994	2607	13.67	—	—	50.8	0.140	50.0	—	67.0	—	(+40.5)	<i>t</i> (1/2) = 7950a
Ar	18	29.948	气	-189.4	-185.71	1.784 × 10 ⁻³	—	—	3672.4	0.519	29.4	1.772 × 10 ⁻²	—	—	-6.17	—
As	33	74.9216	固	883	1637	5.727	(体积模量 10.30GPa)		5.6	0.328	370.3	50.2	33.3	—	-9.22	α 相; <i>θ</i> ≈ 1.2K
At	85	(210)	固	302	337	—	—	—	—	0.279	—	—	—	—	—	<i>t</i> (1/2) = 8.3h
Au	79	196.9665	固	1064.43	2817	19.32	78.6	27.7	14.1	0.129	62.762	317.9	2.35	3.98	-1.79	—
B	5	10.811	固	2300	≈2550	2.3420	0.440 (非晶形)	—	8.3	1.285	2000	27.4	1.8 × 10 ¹²	—	-7.77	—
Ba	56	137.33	固	725	1637	3.512	13	5	18.8	0.192	56.4	18.4	36.0	6.1	+1.88	—
Be	4	9.01218	固	1278	2970	1.8520	294	140	12.4	1.886	1300	201	4.02	25.2	-12.5	<i>θ</i> = 0.026K
Bi	83	208.9804	固	271.3	1560	9.808	31.3	11.8	13.5	0.122	53.976	7.92	106.80	4.45	-1.71	—
Bk	97	(247)	固	≥983	—	14.79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	<i>t</i> (1/2) = 1400a
Br	35	79.904	液	-7.0	58.78	3.119	—	—	1120	0.448	68	0.122	7.8 × 10 ¹⁸	1.7	-4.17	—
C	6	12.01115	固	非晶 3550 晶 ≥3820	4827 5100	1.8 ~ 2.1	4.8	—	0.4 ~ 4.3	0.691	—	0.24	—	—	—	—
						石墨 2.267	—	—	8.8	0.711	17000	0.49	1375.0	3.6	-62.2	—
						金刚石 3.515	—	—	1.1	0.509	—	1.56	—	—	-6.06	—

(续)

元素符号	原子序数	相对原子质量	状态	熔点 /°C	沸点 /°C	密度 /(g/cm ³)	弹性模量 /GPa	切变模量 /GPa	线胀系数 /10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	比热容 /[J/(g·K)]	熔化潜热 /(J/g)	热导率 /[W/(m·K)]	电阻率 /μΩ·cm	电阻温度系数 /10 ⁻³ ·K ⁻¹	质量磁化率 /(10 ⁻⁶ cm ³ /g)	其 他
Ca	20	40.078	固	839	1484	1.55	19.6	7.38	22.3	0.658	212.9	201	4.06	4.16	+12.5	—
Cd	48	112.41	固	320.9	765	8.642	52.0	21.0	30.6	0.230	54.4	96.9	6.83	4.26	-2.21	—
Ce	58	140.12	固	798	3257	6.6893	30.0	12.0	6.3	0.1923	38.97	11.3	74.4	0.87	+206	γ相; T _N = 13.7K
Cf	98	(251)	固	—	—	8.72	—	—	—	—	—	—	—	—	—	t(1/2) = 898a
Cl	17	35.453	气	-100.98	-34.6	3.214 × 10 ⁻³	—	—	3830	0.486	181	8.9 × 10 ⁻³	—	—	-7.2	—
Cm	96	(247)	固	1340	—	13.51	—	—	—	—	—	—	86.0	3.98	(+605)	t(1/2) = 1.56 × 10 ⁷ a
Co	27	58.9332	固	1495	2877	8.832	211	82.6	13.7	0.414	292	69.04	6.24	6.58	铁磁性	H _c = 708.3A/m; T _c = 1121°C
Cr	24	51.9961	固	1875	2672	7.19	279.0	115.3	8.5	0.4598	280	93.9	13.0	2.5	+43.5	θ = 0.08K
Cs	55	132.9054	固	28.64	678.4	1.892	—	—	97	0.234	15.7	35.9	18.1	4.8	+2.72	—
Cu	29	63.546	固	1084.88	2567	8.93	129.8	48.3	16.8	0.385	205	401	1.67	4.33	-1.08	—
Dy	66	162.50	固	1407	2627	8.551	63.3	25.4	9	0.1730	68.06	10.7	57.0	1.19	+8010	α相; T _c = 85K; T _N = 178.5K; θ ≤ 0.45K
Er	68	167.26	固	1529	2868	9.066	65.9	28.3	12.2	0.1678	119.0	14.5	86.0	2.01	+3360	T _N = 85K; T _c = 19.6K θ ≤ 0.03K
Es	99	(252)	固	相变点 820°C		8.84	—	—	—	—	—	—	—	—	—	t(1/2) = 276d
Eu	63	151.96	固	822	1529	5.244	18.2	7.8	35.0	0.1820	63.63	13.9	90.0	—	+2550	T _N = 89K; θ ≤ 0.03K
F	9	18.998403	气	-219.62	-188.41	1.696 × 10 ⁻³	—	—	—	0.824	82.1	0.0279	—	—	—	—

(续)

元素符号	原子序数	相对原子质量	状态	熔点 /°C	沸点 /°C	密度 / (g/cm ³)	弹性模量 /GPa	切变模量 /GPa	线胀系数 /10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	比热容 /[J / (g·K)]	熔化潜热 / (J/g)	热导率 /[W / (m·K)]	电阻率 /μΩ·cm	电阻温度系数 /10 ⁻³ ·K ⁻¹	质量磁化率 / (10 ⁻⁶ cm ³ /g)	其 他
Fe	26	55.847	固	1538	2870	7.870	208.2	80.65	11.76	0.447	276	80.4	9.7	6.16	铁磁性	α相; $T_c = 771^{\circ}\text{C}$ $H_c = 10.74\text{A/m}$
Fr	87	(223)	固	≈27	≈677	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$t(1/2) = 22\text{min}$
Ga	31	69.723	固	29.78	2403	5.907	—	—	18.3	0.3723	80.16	33.49	15.05	4.1	-4.40	$\theta = 8.4\text{K}$
Gd	64	157.25	固	1313	3273	7.901	56.3	22.4	8.3	0.2357	63.94	10.5	140.5	1.76	$+6.06 \times 10^4$	$T_c = 20.2^{\circ}\text{C}$; $\theta \leq 0.37\text{K}$
Ge	32	72.59	固	937.4	2834	5.3243	81	31	5.722	0.3271	509.0	60.2	8.96×10^4	6.58	-13.4	—
H	1	1.00797	气	-259.14	-252.87	8.987×10^{-5}	—	—	3360.3	14.3	116	0.1815	—	—	-24.8	—
He	2	4.002602	气	-271.4	-268.934	0.17847×10^{-3}	—	—	3659.1	5.19	58	0.1520	—	—	-5.88	—
Hf	72	178.49	固	2147	5427	13.31	83	30	6.0	0.144	140	23.0	35.1	3.8	+5.28	$\theta = 0.134\text{K}$
Hg	80	200.59	液	-38.47	356.58	13.546	—	—	181.9	0.1396	11.8	8.30	95.8	0.99	-2.10	$\theta = 4.153\text{K}$
Ho	67	164.9304	固	1461	2720	8.803	65.2	26.8	11.2	0.1646	102.28	16.2	81.4	1.71	(a) +5780 (c) +5290	$T_N = 132\text{K}$; $T_c = 20\text{K}$; $\theta \leq 0.38\text{K}$
I	53	126.9054	固	114	184.4	4.93	—	—	93	0.218	123	0.449	1.3×10^{15}	—	-4.38	—
In	49	114.82	固	156.63	2073	7.286	10.8	4	32.1	0.233	28.42	81.8	8.19	5.1	-7.01	$\theta = 3.403\text{K}$
Ir	77	192.22	固	2447	4500	22.65	527	209	6.8	0.134	144	147	5.3	4.33	+1.66	$\theta = 0.140\text{K}$
K	19	39.0983	固	63.65	756.5	0.862	4.94	1.88	83.0	0.757	59.7	102.5	6.15	5.4	+5.73	—
Kr	36	83.80	气	-156.6	-152.90	3.736×10^{-3}	—	—	3691.6	0.247	19.5	9.49×10^{-3}	—	—	-4.31	—
La	57	138.9055	固	918	3464	6.1453	38.4	14.9	5.1	0.1952	44.61	13.4	61.5	2.18	+8.67	α相; $\theta = 4.92\text{K}$

(续)

元素符号	原子序数	相对原子质量	状态	熔点 /°C	沸点 /°C	密度 /(g/cm ³)	弹性模量 /GPa	切变模量 /GPa	线胀系数 /10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	比热容 /[J/(g·K)]	熔化潜热 /(J/g)	热导率 /[W/(m·K)]	电阻率 /μΩ·cm	电阻温度系数 /10 ⁻³ ·K ⁻¹	质量磁化率 /(10 ⁻⁶ cm ³ /g)	其 他
Li	3	6.939	固	180.54	1347	0.534	4.9	—	47.0	3.570	430	84.8	8.55	4.6	+25.7	—
Lu	71	147.967	固	1663	3402	9.842	68.4	27.1	9.9	0.2913	106.6	16.4	58.2	2.40	(a)+13.7	θ(11GPa)=0.3K
Mg	12	24.312	固	648.8	1090	1.738	44.7	16.7	25.2	1.025	368	156	4.45	3.7	+6.79	—
Mn	25	54.9380	固	1244	2042	7.47	197.7	80	22.8	0.477	266	7.81	144.0	0.17	+16.6	α 相
Mo	42	95.54	固	2617	5560	10.22	324.8	125.6	5.0	0.251	270	138	5.2	4.7	+11.6	θ=0.92K
N	7	14.0067	气	-209.86	-196.36	1.2506×10 ⁻³	—	—	3671	1.04	25.7	2.598×10 ⁻²	—	—	-5.38	—
Na	11	22.98977	固	97.82	881.4	0.9674	6.4	1.86	69.6	1.2220	113	142	4.28	5.5	+7.54	—
Nb	41	92.9064	固	2468	4927	8.57	104.9	37.5	7.1	0.267	290	53.7	12.5	2.28	+26.4	θ=9.25K
Nd	60	144.24	固	1021	3074	7.008	42.2	16.5	9.6	0.188	49.51	16.5	64.0	1.64	+517	γ 相; T _N =19.0K θ≤0.25K
Ne	10	20.183	气	-248.67	-246.048	0.9002×10 ⁻³	—	—	3660	1.03	16.7	0.0493	—	—	-4.20	—
Ni	28	58.69	固	1453	2732	8.902	199.5	76.0	12.7	0.444	310	90.9	6.84	6.75	铁磁性	H _c (4kA/m)=167A/m T _c =358°C
Np	93	237.042	固	640	3902	20.45	—	—	50.8	—	—	6.3	—	—	+2.6	t(1/2)=2.14×10 ⁶ a
O	8	15.9994	气	-218.4	-182.962	1.3318×10 ⁻³	—	—	3674	0.916	13.8	0.02674	—	—	+1.4×10 ³	—
Os	76	190.2	固	3045	5027	22.48	560	216	4.7	0.130	140	87.6	9.5	4.2	+0.654	θ=0.655K
P	15	30.97376	固	44.1	280.5	1.828	—	—	125	0.750	21	0.236	1×10 ¹⁷	—	-10.8	白磷
Pa	91	231.0359	固	1227	4027	15.37	—	—	—	0.121	—	—	—	—	+32.7	θ=1.4K; t(1/2)=3.25×10 ⁴
Pb	82	207.19	固	327.502	1740	11.3437	16.1	5.59	28.9	0.130	24.6	35.3	20.648	4.22	-1.39	θ=7.193K
Pd	46	106.42	固	1552	3140	12.02	125.8	45.2	11.76	0.243	162	71.8	10.8	3.77	+66.7	—

(续)

元素符号	原子序数	相对原子质量	状态	熔点 /°C	沸点 /°C	密度 / (g/cm ³)	弹性模量 /GPa	切变模量 /GPa	线胀系数 /10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	比热容 /[J / (g·K)]	熔化潜热 / (J/g)	热导率 /[W / (m·K)]	电阻率 /μΩ·cm	电阻温度系数 /10 ⁻³ ·K ⁻¹	质量磁化率 / (10 ⁻⁶ cm ³ /g)	其 他
Pm	61	145.00	固	1042	≈2460	7.264	≈46	≈18	11	0.184	≈52	17.9	75.0	—	≥ +200	T _N 在 Nd 与 Sm 之间
Po	84	(209)	固	254	962	9.32	—	—	24.4	0.126	—	—	≈42	4.6	—	t(1/2) = 103a
Pr	59	140.9077	固	935	3520	6.773	37.9	14.7	6.7	0.1948	48.8	12.5	68	1.65	+493	α 相; θ≤0.25K
Pt	78	195.08	固	1769	3827	21.45	167	61	8.9	0.134	113	71.6	10.6	3.927	+13.0	
Pu	94	239.052	固	640	3235	19.86	107	45	57	0.0339(?)	39	6.70	150	-2.97	+31.7	α 相; θ≤1.3K
Ra	88	226.0254	固	700	1140	5.0	—	—	—	0.121	44	18.6	—	—	—	t/(1/2) = 1602a
Rb	37	85.4678	固	38.89	688	1.532	2.35	—	88.1	0.360	25.535	58.2	12.5	5.3	+2.5	—
Re	75	186.207	固	3180	5627	21.04	462	154	6.6	0.138	178	71.2	19.3	3.95	+4.45	θ = 1.699K
Rh	45	102.9055	固	1966	3727	12.41	378.9	150.0	8.4	0.247	210	150	4.51	4.57	+13.5	—
Rn	86	222.00	气	-71	-61.8	9.73 × 10 ⁻³	—	—	—	0.92	13	3.64 × 10 ⁻³	—	—	—	t(1/2) = 3.82d
Ru	44	101.07	固	2310	3900	12.41	422	169	6.7	0.238	257	117	7.6	4.2	+5.33	θ = 2.04K
S	16	32.06	固	119.2	444.674	2.07	—	—	64	0.736	39	0.264	2 × 10 ²³	—	-6.09	α 相
Sb	51	121.75	固	630.74	1587	6.697	78.0	21	11.4	0.207	163.17	24.4	39.0	5.4	-10.2	—
Sc	21	44.95591	固	1541	2836	2.992	75.2	29.4	10.2	0.5674	313.6	15.8	51.4	2.82	+82.6	θ = 0.032K
Se	34	78.96	固	217	684.9	4.809	53.82	6.46	49	0.317	84.93	0.519 (玻璃态)	12.0 (玻璃态)	4.45	-3.97	γ 相
Si	14	28.0855	固	1414	2355	2.330	110.7	33	2.6	0.67796	1807.9	83.680	1 × 10 ⁵	—	-17.6	—
Sm	62	150.36	固	1074	1794	7.536	50.0	19.5	12.7	0.1964	57.31	13.3	94.0	1.84	+107	α 相; T _N = 14K θ = 0.37K
Sn	50	118.710	固	231.968	2270	7.168	54.3	20.4	21.2	0.222	59.5	66.8	11.4	4.5	-2.69	β 相; θ = 3.722K

(续)

元素符号	原子序数	相对原子质量	状态	熔点 /°C	沸点 /°C	密度 / (g/cm ³)	弹性模量 /GPa	切变模量 /GPa	线胀系数 /10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	比热容 /[J / (g·K)]	熔化潜热 / (J/g)	热导率 /[W / (m·K)]	电阻率 /μΩ·cm	电阻温度系数 /10 ⁻³ ·K ⁻¹	质量磁化率 / (10 ⁻⁶ cm ³ /g)	其 他
Sr	38	87.62	固	769	1384	2.54	(体积模量 11.61GPa)		20	0.284	105	35.4	23	5.0	+13.5	α 相
Ta	73	180.9479	固	2996	5427	16.60	184.6	68.6	6.55	0.144	170	54.4	12.45	3.83	+10.7	θ = 4.483K
Tb	65	158.9254	固	1356	3230	8.272	57.1	22.7	10.3	0.1819	102.6	11.1	115.0	—	+1.15 × 10 ⁴	T _c = -52°C; θ = 0.37K
Tc	43	99.0000	固	2172	4877	11.487	322	123	8.1	0.243	235	50.2	18.5	6.57	+14.2	θ = 8.22K
Te	52	127.60	固	449.5	989.8	6.237	41.7	15.16	18.2	0.201	140	1.7	4.36 × 10 ⁵	5	-3.74	—
Th	90	232.0381	固	1755	4227	11.72	72.4	27.6	11.4	0.11778	67.2	54.0	13.1	3.57	+5.18	θ = 1.390K
Ti	22	47.88	固	1675	3257	4.507	110	40	8.41	0.523	313	21.9	42.0	5.5	+40.2	α 相; θ = 0.39K
Tl	81	204.383	固	303.5	1473	11.872	7.9	3	29.4	0.129	20.27	46.1	18.0	5.2	-31.2	θ = 2.39K
Tm	69	168.9342	固	1545	1727	9.332	74.0	30.4	13.3	0.159	99.68	16.0	67.6	1.95	+1.9 × 10 ³	T _N = -215°C; T _c = -251°C θ ≈ 0.35K
U	92	238.0289	固	1132.3	3818	19.05	180	72	13.5	0.117	38.72	27.6	29	2.1	+21.6	α 相; θ = 0.68K
V	23	50.9415	固	1887	3377	5.87	127.6	46.7	8.3	0.486	353	30.7	25	—	+63.9	θ = 5.30K
W	74	183.85	固	3410	5660	19.35	407.2	160.6	4.6	0.134	183	173	5.65	4.83	+4.05	α 相; θ = 0.016K
Xe	54	131.29	气	-111.9	-107.9	5.887 × 10 ⁻³	—	—	3739.5	0.519	17.5	5.69 × 10 ⁻³	—	—	-4.20	—
Y	39	88.9059	固	1522	3338	4.469	66.3	26.2	12.0	0.2984	191	17.2	59.6	2.7	+26.5	—
Yb	70	173.04	固	819	1196	6.966	23.9	9.9	26.3	0.1545	44.36	38.5	29	1.3	+18.1	α 相; θ ≥ 0.015K
Zn	35	65.38	固	419.53	907	7.133	104.5	41.9	29.7	0.385	100.9	116	5.916	4.19	-2.19	θ = 0.85K
Zr	40	91.224	固	1852	4377	4.574	68.4	24.9	5.85	0.276	186	22.7	40.0	4.4	+16.6	θ = 0.546K

注: 1. 具有同素异构转变者, 以 α、β 或 γ 分示室温相。2. $t(1/2)$ 示半衰期, T_c 示居里点, T_N 示奈耳温度, θ 示超导临界温度。3. 轴向示于数字前的括号内。

附录 D 常用金属材料物理性能相关标准

标准代号	标准名称
GB/T 351—1995	金属材料电阻系数测量方法
GB/T 1423—1996	贵金属及其合金密度的测试方法
GB/T 1424—1996	贵金属及其合金材料电阻系数测试方法
GB/T 1479—1984	金属粉末松装密度的测定 第1部分：漏斗法
GB/T 1551—2009	硅单晶电阻率测定方法
GB/T 3048.16—2007	电线电缆电性能试验方法 第16部分：表面电阻试验
GB/T 3048.2—2007	电线电缆电性能试验方法 第2部分：金属材料电阻率试验
GB/T 3048.4—2007	电线电缆电性能试验方法 第4部分：导体直流电阻试验
GB/T 3048.5—2007	电线电缆电性能试验方法 第5部分：缘电阻试验
GB/T 3655—2008	用爱泼斯坦方圈测量电工钢片(带)磁性能的方法
GB/T 3656—2008	软磁材料矫顽力的抛移测量方法
GB/T 3658—2008	软磁材料交流磁性能环形试样的测量方法
GB/T 3850—1983	致密烧结金属材料与硬质合金密度测定方法
GB/T 4067—1999	金属材料电阻温度特征参数的测定
GB 4192—1984	电真空器件及电光源用钨、钼材料电阻率的测试方法
GB/T 4193—1984	电真空器件及电光源用细钨丝、钼丝和薄带密度的测试方法
GB/T 4196—1984	钨、钼条密度测定方法
GB/T 4339—2008	金属材料热膨胀特征参数的测定
GB/T 5060—1985	金属粉末松装密度的测定 第2部分：斯柯特容量计法
GB/T 5061—1998	金属粉末松装密度的测定 第3部分：振动漏斗法
GB/T 5161—1985	金属粉末 有效密度的测定 液体浸透法
GB/T 5162—2006	金属粉末 振实密度的测定
GB/T 5166—1998	烧结金属材料和硬质合金弹性模量测定
GB/T 5167—1985	烧结金属材料和硬质合金电阻率的测定
GB/T 5252—2006	锆单晶位错腐蚀坑密度测量方法
GB/T 5986—2000	热双金属弹性模量试验方法
GB/T 6148—2005	精密电阻合金电阻温度系数测试方法
GB/T 6616—2009	半导体硅片电阻率及硅薄膜薄层电阻测试方法 非接触涡流法
GB/T 6617—2009	硅片电阻率测定 扩展电阻探针法
GB/T 8760—2006	砷化镓单晶位错密度的测量方法
GB 10129—1988	电工钢片(带)中频磁性能测量方法
GB/T 10421—2002	烧结金属摩擦材料 密度的测定

(续)

标准代号	标准名称
GB/T 11073—2007	硅片径向电阻率变化的测量方法
GB 11297.7—1989	铈化钢单晶电阻率及霍尔系数的测试方法
GB/T 12631—1990	印制导线电阻测试方法
GB/T 12968—1991	纯金属电阻率与剩余电阻比涡流衰减测量方法
GB/T 13789—2008	用单片测试仪测量电工钢片(带)磁性能的方法
GB/T 13888—2009	在开磁路中测量磁性材料矫顽力的方法
GB/T 15078—2008	贵金属电触点材料接触电阻的测量方法
GB/T 15717—1995	真空金属镀层厚度测试方法 电阻法
GB/T 16701.1—1996	热电偶材料试验方法 第1部分:贵金属热电偶丝热电动势测量方法
GB/T 16701.2—1996	热电偶材料试验方法 第2部分:廉金属热电偶丝热电动势测量方法
GB/T 17764—2008	密度计的结构和校准原则
GB/T 18036—2008	铂铑热电偶细丝的热电动势测量方法
GB/T 19198—2008	贵金属及其合金对铂、对铜热电动势的测量方法
GB/T 19289—2003	电工钢片(带)的密度、电阻率和叠装系数的测量方法
GB/T 21219—2007	磁性材料 分类
GB/T 21354—2008	粉末产品振实密度测定通用方法
GB/T 22315—2008	金属材料 弹性模量和泊松比试验方法
GB/T 22638.10—2008	铝箔试验方法 第10部分:涂层表面密度的测定
GB/T 24270—2009	永磁材料磁性能温度系数测量方法

参 考 文 献

- [1] 桂立丰, 曹用涛. 机械工程材料测试手册: 物理金相卷[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1999.
- [2] 陈骝骥. 材料物理性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [3] 邱成军, 王元化, 王义杰. 材料物理性能[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.
- [4] 柳百成, 黄天佑. 中国材料工程大典[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [5] 中国金属学会, 中国有色金属学会. 金属材料物理性能手册: 第一册 金属物理性能及测试方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987.
- [6] 李维钺. 中外钢铁材料力学性能速查手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [7] 李维钺. 中外有色金属及其合金力学性能速查手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [8] 刘胜新. 新编钢铁材料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [9] 孙玉福. 新编有色金属材料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [10] 屠海令, 干勇. 金属材料理化测试全书[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

机械工业出版社现有金属材料工具书书目(部分)

书 号	书 名	作 者	定价/元
31501	中外钢铁牌号速查手册 (第3版)	李维钺	48.00
29275	中外有色金属及其合金牌号速查手册 (第2版)	李维钺	39.00
18590	中外钢铁材料力学性能速查手册	李维钺	32.00
21277	中外有色金属及合金力学性能速查手册	李维钺	35.00
26507	中外金属材料牌号速查手册	李维钺	29.80
24367	中外不锈钢和耐热钢速查手册	李维钺	38.00
27620	钢铁材料速查手册	孙玉福	48.00
27406	有色金属材料速查手册	刘胜新	48.00
25050	袖珍世界钢号手册 (第4版)	林慧国	218.00
20922	实用钢铁材料手册 (第2版)	曾正明	82.00
22415	实用有色金属材料手册 (第2版)	曾正明	78.00
09104	五金速查手册 (第2版)	虞莲莲	28.00
09425	实用建筑五金手册	施 龚	106.00
04497	五金手册 (第2版)	李维荣	89.00
30459	新编五金手册	陈 永 潘继民	66.00
30122	新编钢铁材料手册	刘胜新	98.00
30832	新编有色金属材料手册	孙玉福	106.00
31300	机械工程材料手册——金属材料 (第7版)	曾正明	198.00
32306	金属材料力学性能手册	刘鸣放 刘胜新	72.00

上架指导：工业技术/材料工程/金属材料

地址：北京市百万庄大街22号
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

邮政编码：100037
网络服务
门户网：<http://www.cmpbook.com>
教材网：<http://www.cmpedu.com>
封面无防伪标均为盗版

定价：68.00元

ISBN 978-7-111-33830-7



9 787111 338307 >