

金属材料 物理性能手册

李立碑 孙玉福 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

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

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
.....	47
.....	47
.....	47
.....	47
.....	49
3.2.3 通	50
3.2.4 示	51
3.3 典型元	52
第4章 金属	56
4.1 热膨胀系数	56
4.1.1 热膨胀	56
4.1.2 影响热膨	59
4.1.3 热膨胀系	60
4.2 热膨胀系数的测	63
4.2.1 推杆式膨胀	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	84
4.3.1 室温以下金属元素的	84
4.3.2 高温下金属元素的瞬	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 钎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动势的测量	178
7.4.5 廉金属热电偶丝热电动势的测量	181
7.4.6 贵金属合金对铂及对铜热电动势的测量方法	183
7.4.7 铂铑热电偶细丝热电动势的测量方法	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 and 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	烧结铁铬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	铽镱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	铝及铝合金控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	吸气用锆铝合金粉的型号、粒度范围及用途	477
14.5.9	区熔锆铈的电性能	478
14.5.10	还原锆铈的电性能	478
14.5.11	锆单晶的电阻率参数	478
14.5.12	钌基厚膜电阻浆料烧成后的电性能	478
14.5.13	超细水合二氧化钌粉的性能	479
14.5.14	超细金粉的性能	479
14.5.15	超细氧化钡粉的性能	479
14.5.16	银钡厚膜导体浆料的物理性能	480
14.5.17	银钡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，合金的焓、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，说明固溶化分解已结束。

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 10×10^{-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。数字修约到个位数示例如表 1-2 所示。

表 1-2 数字修约到个位数示例

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 单位修约到个位数的示例如表 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 单位修约到百位数的示例如表 1-4 所示。

表 1-3 按 0.5 单位修约到个位数的示例

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 单位修约到百位数的示例

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