

金属材料物理
性能手册



金属物理性能
及测试方法

冶金工业出版社

金属材料物理 性能手册

第一册

金属物理性能及测试方法

中国金属学会 中国有色金属学会 编

冶金工业出版社

内 容 简 介

《金属材料物理性能手册》是物理性能检测、研究、金属材料研制以及材料使用设计部门科技人员的专业工具书。第一册《金属物理性能及测试方法》介绍了有关金属各项物理性能的基本理论及各种测试方法。二、三、四册将登载国产牌号金属及合金各项物理性能的数据。

金 属 材 料 物 理 性 能 手 册

第 一 册

金 属 物 理 性 能 及 测 试 方 法

中国金属学会 中国有色金属学会 编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张44 3/4字数1069千字

1987年12月第一版 1987年12月第一次印刷

印数00,001~13,200册

统一书号: 15062·4432 定价11.65元

主 编	陈洪荪	宝鸡有色金属研究所
常务编委	李 昕	北京冶金研究所
	郝玉才	北京有色金属研究总院
	叶庆和	中国科学院金属研究所
	尤清照	北京钢铁研究总院
	杨建新	中国金属学会
编 委	卫锦先	航天工业部七〇三研究所
	王培玉	上海钢铁研究所
	王梅华	成都计量测试研究院
	卢邦洪	昆明贵金属研究所
	申鹤章	大冶钢厂研究所
	孙殿文	广州有色金属研究院
	李汉曙	洛阳铜加工厂
	张孙元	重庆仪表材料研究所
	何华春	昆明贵金属研究所
	张佩璜	中国科学院金属研究所
	何冠虎	中国科学院金属研究所
	沈勇将	上海有色金属研究所
	李铁真	航天工业部七〇三研究所
	花桂泰	太原钢铁公司研究所
	周文生	北京大学物理系
	林均衡	中国科学院金属研究所
	陈贵录	东北轻合金加工厂
	郭一玲	北京有色金属研究总院
	黄德凯	鞍山钢铁公司研究所

序

金属材料在材料科学与工程中占有重要的地位。为了经济、合理地使用现有的金属材料，最大限度地发挥材料的作用，并不断开发与研制新型金属材料，以满足社会主义建设的需要，正确了解和掌握金属材料的各项物理性能参数是极为重要的。国外，一些经济发达国家建有金属材料物理性能数据库或出版物理性能的专著和手册，对于金属材料的使用和研制起了积极的作用。

我国建国以来，材料工业发展很快，现已能够为我国生产、建设各部门提供各种金属材料，在金属材料物理性能的研究和测试方面也积累了不少经验和数据，并有了一支具有一定水平的专业队伍。但是，无论是金属材料的设计、使用部门，还是研究、生产部门都感到缺乏一套我国国产金属材料的物理性能工具书，在金属材料的研制和应用方面没有可资依据的技术资料。有鉴于此，中国金属学会和中国有色金属学会支持并组织了编写《金属材料物理性能手册》的工作。

三年来，经过《手册》编辑委员会与同行同志们的努力，现在手册的第一册《金属物理性能及测试方法》与大家见面了。它较详细地介绍了金属物理性能的基本理论、各种测试方法的理论基础、实验装置以及实验技术，反映了国内外物理性能测试技术的发展。我认为这本书是金属材料研究工作者、金属物理性能检测和研究人员和金属结构设计人员的一部很好的工具书，也可以作为高等院校有关专业师生的教学参考用书。

特别值得指出的是，这本书各篇的作者，都是从事物理性能检测和研究达二十年以上的中年科技人员，他们在各该领域内有较好的理论基础和较丰富的实践经验，因而这本书具有理论与实践相结合的特色。我为这本书的出版感到高兴，并认为中国金属学会今后应支持更多的中年科技人员著书立说，把宝贵的经验贡献给祖国和人民。

中国金属学会副理事长

中国科学院学部委员技术科学部常委兼冶金组组长

王之玺

前 言

金属材料各项物理性能参数(密度、弹性、热膨胀、热容、热传导、热辐射、电阻、热电势、磁性、相变点等等)是使用材料的依据,也是研究材料内部结构和过程的重要线索。建国三十余年以来,我国金属物理性能检测和研究工作者,在建立物理性能测试手段,研究物理性能与工艺、内部结构的联系方面,做了大量工作,积累了不少科研成果和技术经验。1979年,中国金属学会理化检验学术委员会物理性能学术小组在太原召开的学术会议上,建议编著一套包括理论、实验技术、数据在内的比较完整的《金属材料物理性能手册》,作为物理性能检测和研究、金属材料研制以及材料使用设计部门科技人员的专业工具书。中国金属学会和中国有色金属学会对这一建议十分重视,组织了有国内主要研究单位、工厂和有关高等院校专业人员参加的《手册》编辑委员会。并从1981年初开始,着手撰写第一册《金属物理性能及测试方法》。同时,向国内各有关单位征集金属材料物理性能数据。

《金属材料物理性能手册》第一册介绍了金属物理性能的基本理论和各种测试方法,以后的各分册将登载国产牌号金属及合金的各项物理性能数据。我们希望,读者从这样一部《手册》中,既可以获得一个金属物理性能检测和研究工作者所必须的专业知识,也可以方便地查阅到所需要的数据和资料。当然,包含了国内各单位工作经验和测试结果这样一部手册,也是我国金属物理性能检测和研究工作者共同的技术积累,必将推动这一领域科研和检测工作的发展。

《手册》共分四册《金属物理性能及测试方法》是《手册》的第一册,它涉及十项物理性能的微观机理、宏观理论、影响因素、测量原理、测试装置和试验技术,分别请从事该项性能测试和研究多年的专业科技人员撰写。在编写过程中,我们力求做到定义严格、概念清晰,微观机理重物理图象、宏观理论简明扼要,影响因素主要介绍有一般规律和有实用意义的,而重点在于全面而详尽地介绍各种测试技术,特别是目前广泛应用的试验方法。为了反映我国在物理性能测试技术和研究工作方面的进展,各篇均尽量介绍了近年来国内出现的一些新方法、新装置和新技术。考虑到各篇内容具有相对的独立性,在总编时除了在总体结构上力求全书统一之外,保留了各篇作者的撰写特点。各篇的编者为:第一篇卢邦洪、何华春;第二篇李昕;第三篇郭一玲;第四篇张佩璜;第五篇何冠虎;第六篇卫锦先;第七篇尤清照、魏丽坤;第八篇张孙元;第九篇周文生;第十篇陈洪荪。本书的最后审订和汇编由陈洪荪、李昕同志负责。并请李铁真同志审阅了第五篇(热传导),叶庆和同志审阅了第二篇(弹性),郭一玲同志审阅了第十篇(热分析与金属中的相变)。尤清照同志对全书的图表、文献单位、符号等进行了校订。中国有色金属学会理化检验学术委员姚隆卿同志自始至终关心并指导了这项工作,有色金属研究总院为本书的编写提供了必要的条件,在此谨致感谢。我们第一次编写这样的专业工具书,在内容编排和文字表述方面,可能会有不少缺点,欢迎读者批评指正。

中国金属学会 中国有色金属学会
《金属材料物理性能手册》编委会

1983年11月

目 录

第一篇 密度 (卢邦洪 何华春)	
第1章 金属的密度	1
§ 1. 基本概念与密度的理论计算	1
§ 1.1 密度及与密度有关的物理量	1
§ 1.2 密度的理论计算	1
§ 2. 密度与金属结构	2
§ 2.1 密度与原子间结合力	2
§ 2.2 密度与相变和化学键	4
§ 3. 影响密度的因素	6
§ 3.1 合金组分的影响	6
§ 3.2 工艺过程的影响	7
§ 3.3 温度和热膨胀的影响	10
第2章 密度的测量方法	12
§ 4. 密度测量的基本知识	12
§ 4.1 密度测量的意义	12
§ 4.2 密度测量的基本原理	12
§ 4.3 测量方法和评价	13
§ 5. 质量测定	15
§ 5.1 测定质量的装置	15
§ 5.2 影响质量测定的因素	16
§ 6. 流体静力学方法	18
§ 6.1 天平称量法	18
§ 6.2 弹簧秤法	20
§ 6.3 扭力天平法	21
§ 6.4 尼科尔森称法	21
§ 6.5 直读比重仪和固体比重天平法	21
§ 6.6 利用两种液体的浮力差测量密度的方法	23
§ 6.7 影响密度测量的因素	23
§ 7. 液相置换法	26
§ 7.1 比重瓶法	26
§ 7.2 勒夏特利埃重瓶法	27
§ 7.3 排代法	28
§ 8. 与重液比较的方法	28
§ 8.1 悬浮法	28
§ 8.2 密度梯度管法	30
§ 9. 粉末及多孔材料密度的测量方法	31
§ 9.1 测量粉末真密度的流体静力学方法	31
§ 9.2 气体置换法	32
§ 9.3 测量多孔材料体积密度的方法	33
§ 9.4 松装密度测量方法	34
§ 9.5 振实密度测量方法	34
§ 10. 射线法	35
§ 10.1 X射线衍射法	35
§ 10.2 放射性同位素法	36
§ 11. 直接形状法	37
§ 11.1 直接测量体积法	37
§ 11.2 静滴法	37
§ 12. 超声波法	38
§ 12.1 阻抗法	38
§ 12.2 测速法	39
附录	41
附录 1 测量密度用纯水的制备方法	41
附录 2 不同温度下纯水的密度	42
附录 3 不同温度下几种工作液体的密度	43
附录 4 20°C时某些工作液体的性质	43
附录 5 干燥空气的密度	44
参考文献	45
第二篇 弹性与非弹性 (李昕)	
第1章 弹性的基本理论与影响因素	47
§ 1. 弹性及其表述方法	47
§ 1.1 胡克定律	47
§ 1.2 晶体的弹性	49
§ 1.3 弹性的技术常数与晶体的弹性系数和弹性常数	50
§ 2. 弹性的基本理论	52
§ 2.1 弹性与原子结合力	52
§ 2.2 弹性与晶格固有振动	53
§ 3. 弹性与其它物理参量的关系	55
§ 3.1 弹性与德拜温度的关系	55
§ 3.2 弹性与点阵常数和熔点的关系	56
§ 3.3 弹性与溶质原子浓度的关系	57
§ 3.4 弹性与其它力学量的关系	58

§ 4. 影响弹性的因素	58	§ 13.1 连续波法	126
§ 4.1 温度的影响	58	§ 13.2 脉冲回波法与相位比较法	128
§ 4.2 冷加工与择优取向的影响	59	§ 13.3 调频技术的应用	131
§ 4.3 磁场的影响	61	§ 13.4 表面波的测量与其应用	133
§ 4.4 变形速度和弛豫过程的影响	63	第5章 其它测量方法	136
第2章 静态测量方法	65	§ 14. 泊松比测量法	136
§ 5. 静态拉伸法	65	§ 15. 衍射技术的应用	137
§ 6. 静态扭转法	66	§ 15.1 X射线衍射法	137
§ 7. 静态弯曲法	66	§ 15.2 中子衍射法	137
§ 7.1 理论基础	66	§ 16. 激光技术的应用	137
§ 7.2 悬臂测量法	68	第6章 非弹性基本理论与影响因素	139
§ 7.3 简支测量法	70	§ 17. 金属中的非弹性现象	139
第3章 共振测量方法	73	§ 17.1 非弹性与理想弹性体	139
§ 8. 弯曲共振法	73	§ 17.2 粘弹性与静滞后	140
§ 8.1 理论基础	73	§ 18. 金属中的内耗	142
§ 8.2 自由弯曲共振法	79	§ 18.1 内耗与非弹性	142
§ 8.3 悬臂弯曲共振法	85	§ 18.2 内耗的表述及有关量间的 关系	142
§ 8.4 敲击测量法	89	§ 18.3 内耗的形式理论	144
§ 9. 纵向共振法	91	§ 19. 金属结构对内耗的影响	146
§ 9.1 纵振测量基本原理	91	§ 19.1 一些典型的内耗源	146
§ 9.2 纵共振测量方法	94	§ 19.2 弛豫谱	149
§ 10. 扭转共振法	101	第7章 金属的非弹性测量方法	150
§ 10.1 扭振测量基本原理	101	§ 20. 应力弛豫测量法	150
§ 10.2 扭共振测量方法	107	§ 21. 弹性后效测量法	151
§ 11. 共振判别方法	112	§ 21.1 概述	151
§ 11.1 预算法	112	§ 21.2 弯曲后效测量方法	151
§ 11.2 共振的判别与单自由度系统 的受迫振动	113	§ 22. 超低频内耗测量法	153
§ 11.3 幅度判别法	115	§ 22.1 测量原理	154
§ 11.4 相位判别法	115	§ 22.2 测量装置	155
§ 11.5 频率比判别法	116	§ 23. 音频内耗测量法	158
§ 11.6 虚假共振与共振法适用限度	117	§ 23.1 衰减法	158
第4章 弹性波波速测量方法	118	§ 23.2 幅比法	160
§ 12. 固体中的应力波与弹性常数	118	§ 23.3 峰宽法	163
§ 12.1 介质纵波与横波	118	§ 23.4 方法选择与结果讨论	166
§ 12.2 细杆的拉伸波与扭转波	120	§ 24. 超声频内耗测量法	167
§ 12.3 杆中的弯曲波	121	§ 25. 内耗测量在扩散过程研究中 的应用	168
§ 12.4 板中的蓝姆波与表面波	121	§ 25.1 间隙原子扩散系数的测定	168
§ 12.5 波速与弹性常数	123	§ 25.2 扩散激活能的测定	169
§ 12.6 尺寸因素的影响与修正办法	124	§ 25.3 间隙原子浓度变化的测定	169
§ 13. 波速测量方法	126		

附录	171	§ 4. 合金成分对热膨胀的影响 及其应用	207
附录 1 弯曲振动中均匀杆的固有频率 与简正波形	171	§ 4.1 合金成分对热膨胀的影响	207
附录 2 弯曲振动中圆杆的尺寸因素、 泊松比与修正系数	173	§ 4.2 膨胀合金——反常热膨胀 行为的应用	208
附录 3 矩形杆弯曲共振弹性模量测 定公式修正因子	173	第 2 章 热膨胀的测量方法	211
附录 4 圆形杆纵共振弹性模量测定 公式修正系数	176	§ 5. 顶杆法	211
附录 5 矩形杆扭共振测切变模量 形状因子	176	§ 5.1 概述	211
附录 6 圆形杆中拉伸波波速修正 系数	179	§ 5.2 千分表法	212
附录 7 单位换算表	180	§ 5.3 差动变压器法	213
参考文献	182	§ 5.4 可变变压器法	217
第三篇 热膨胀 (郭一玲)		§ 6. 光杠杆法	219
第 1 章 金属材料的热膨胀	186	§ 6.1 史文纳尔膨胀仪	219
§ 1. 热膨胀的基本理论	186	§ 6.2 高灵敏光杠杆法	222
§ 1.1 基本概念	186	§ 7. 直接观测法	222
§ 1.2 热膨胀的定性解释	187	§ 7.1 概述	222
§ 1.3 准谐振近似理论	188	§ 7.2 测量装置	223
§ 1.4 格律乃森关系	190	§ 8. 光干涉法	225
§ 1.5 热膨胀的各向异性	192	§ 8.1 等厚干涉法	225
§ 1.6 电子和磁性对热膨胀的贡献	195	§ 8.2 等倾干涉法	229
§ 2. 热膨胀系数与其它性能的 关系	197	§ 8.3 调频干涉法	230
§ 2.1 热膨胀系数与热容量的关系	197	§ 8.4 偏振光干涉法	231
§ 2.2 热膨胀系数与熔点的关系	197	§ 8.5 其它光干涉法	231
§ 2.3 热膨胀系数与德拜温度的关系	198	§ 9. X 光法	232
§ 2.4 热膨胀系数与键能的关系	199	§ 9.1 概述	232
§ 2.5 热膨胀系数与原子量、原子价、 配位数等参数的关系	201	§ 9.2 粉末照像法	233
§ 2.6 热膨胀与相变的关系	202	§ 9.3 衍射仪法	234
§ 3. 多相体和复合材料的热膨胀和 应力	204	§ 10. 电容法	235
§ 3.1 特诺 (Turner) 方程	204	§ 10.1 两端电容法	235
§ 3.2 克诺 (Kerner) 方程	205	§ 10.2 三端电容法	237
§ 3.3 多层复合材料和多孔材料 的热膨胀系数	206	§ 11. 其它方法	239
§ 3.4 热应力和热震性	206	§ 11.1 光栅法	239
		§ 11.2 机械杠杆法	241
		§ 11.3 热调幅法	241
		§ 11.4 超声微波法	243
		§ 11.5 密度测量法	243
		§ 11.6 电阻测量法	244
		§ 12. 热膨胀的标准参考材料和标准 试验方法	244
		§ 12.1 标准参考材料	244
		§ 12.2 标准试验方法	244

附录	247
附录 1 室温以下金属元素的微分线膨胀系数	247
附录 2 高温下金属元素的微分线膨胀系数	249
参考文献	251

第四篇 热容 (张佩璜)

第1章 基础理论	254
§ 1. 热力学基本概念	254
§ 1.1 热力学第一定律, 热、功和内能的关系	254
§ 1.2 热力学第二定律及熵的概念	255
§ 1.3 焓、热容和比热容的基本含义	257
§ 2. 解释固体热容的基本理论	258
§ 2.1 杜隆-珀替定律	258
§ 2.2 爱因斯坦的热容理论	259
§ 2.3 德拜的热容理论	260
§ 2.4 科珀-奈曼 (Kopp-Neumann) 定律	262
§ 3. 影响金属热容的几种因素	262
§ 3.1 温度的影响	262
§ 3.2 成分及杂质的影响	263
§ 3.3 相变的影响	264
§ 3.4 加工状态的影响	265
第2章 测试方法及装置	267
§ 4. 滴落式量热计法	268
§ 4.1 水卡计法	268
§ 4.2 冰卡计法	268
§ 4.3 铜卡计法	271
§ 4.4 反向量热计法	277
§ 5. 绝热量热计法	278
§ 5.1 撒克司法	278
§ 5.2 斯密特法	280
§ 5.3 连续测定自动绝热量热计法	280
§ 5.4 高分辨率量热计法	284
§ 5.5 示差扫描量热计法	286
§ 6. 他热式脉冲法	288
§ 6.1 激光脉冲法的发展	288
§ 6.2 激光脉冲加热-降温法	289
§ 6.3 激光吸收板法	293

§ 7. 自热式脉冲法	295
§ 7.1 一般脉冲法	295
§ 7.2 计算机运控全自动高速脉冲法	296
参考文献	298

第五篇 热传导 (何冠虎)

第1章 固体热传导的基础知识	299
§ 1. 研究导热系数的意义	299
§ 2. 导热基本定律	299
§ 2.1 温度场和温度梯度	299
§ 2.2 傅立叶定律	300
§ 2.3 各向异性固体的导热	301
§ 3. 稳定导热的计算公式	302
§ 3.1 平壁的导热	302
§ 3.2 圆筒壁的导热	303
§ 3.3 球壁的导热	304
§ 4. 不稳定导热及导温系数的物理意义	305
§ 4.1 不稳定导热的特点	305
§ 4.2 导热微分方程的建立	305
§ 4.3 导温系数的物理意义	307
§ 5. 导热系数单位的换算	307
第2章 金属导热的基本理论和影响因素	308
§ 6. 金属导热物理机理概述	308
§ 7. 金属中的电子导热	309
§ 7.1 自由电子费密气体的能级和能级密度	309
§ 7.2 电子气的热容	310
§ 7.3 金属导热系数与导电系数之比	311
§ 7.4 金属的电子导热	312
§ 8. 金属中的晶格导热	315
§ 8.1 晶格导热概说	315
§ 8.2 声子对声子的散射	316
§ 8.3 电子对声子的散射	316
§ 8.4 缺陷对声子的散射	317
§ 9. 其他导热机制	317
§ 10. 影响金属导热的因素	319
§ 10.1 金属原子结构对导热的影响	319
§ 10.2 成分和结构对导热的影响	319
§ 10.3 气孔率对导热的影响	323

§ 10.4 温度对导热的影响	324	§ 23.2 实验过程	372
第3章 测量导热系数的稳态法	326	参考文献	374
§ 11. 测量方法概述和分类	326	第六篇 热辐射 (卫锦先)	
§ 12. 纵向热流法	326	第1章 热辐射基础理论	377
§ 12.1 纵向热流绝对法(低温部分)	327	§ 1. 辐射传热	377
§ 12.2 纵向热流绝对法(高温部分)	330	§ 1.1 研究热辐射的意义	377
§ 12.3 纵向热流比较法(分割式棒 状法)	332	§ 1.2 定义和符号	377
§ 13. 福培斯(Fobes)法	333	§ 2. 基本定律	378
§ 13.1 概述	333	§ 2.1 普朗克定律	378
§ 13.2 改进的福培斯法—荷根 (Hogan)法	334	§ 2.2 斯蒂芬-波尔兹曼定律	379
§ 14. 径向热流法	336	§ 2.3 基尔霍夫定律	382
§ 14.1 径向热流圆柱法	336	§ 2.4 兰贝特余弦定律	383
§ 14.2 圆球法和椭球法	338	§ 3. 金属材料的热辐射特性及其与 表面特征的关系	384
§ 15. 直接通电加热法	338	§ 3.1 关于金属材料的热辐射特性	384
§ 15.1 径向法	339	§ 3.2 热辐射特性的表征	387
§ 15.2 纵向法	340	§ 3.3 热辐射特性的相互关系	388
§ 15.3 细长棒近似法	342	§ 3.4 热辐射特性的理论模型	392
§ 15.4 矩形试样法	346	§ 3.5 热辐射特性与金属表面特征的 关系	396
§ 16. 热比较仪法	349	第2章 热辐射特性的测试方法	399
§ 17. 标准参考材料	350	§ 4. 基础技术	399
§ 18. 测试方法和测试数据 的综合评价	352	§ 4.1 热辐射特性测试技术概述	399
第4章 测量导热系数的非稳态法	354	§ 4.2 热辐射特性测试方法的分类	399
§ 19. 概述	354	§ 5. 卡计技术	400
§ 20. 棒状试样周期热流纵向法 (Ångström法)	354	§ 5.1 稳态卡计法	400
§ 20.1 基本原理	354	§ 5.2 非稳态卡计法	403
§ 20.2 温度波速度法和振幅衰减法	356	§ 6. 辐射计技术	405
§ 20.3 改进的棒状试样周期热流 纵向法	356	§ 6.1 分离黑体技术	406
§ 21. 板状试样周期热流纵向法	358	§ 6.2 试样构成黑体技术	408
§ 21.1 基本原理	358	§ 7. 反射计技术	409
§ 21.2 实验方法	359	§ 7.1 热腔反射计	409
§ 22. 闪光法(Flash method)	359	§ 7.2 积分球反射计	410
§ 22.1 闪光法的测试原理和装置	360	§ 7.3 积分反射镜反射计	411
§ 22.2 闪光法测试误差分析和几种 修正方法	362	参考文献	414
§ 22.3 导温系数与比热的同时测量	371	第七篇 电阻 (尤清照、魏丽坤)	
§ 23. 移动热源法	371	第1章 金属的电阻	418
§ 23.1 基本原理	371	§ 1. 基本概念	418
		§ 1.1 金属材料的电导率及电阻率	418
		§ 1.2 各向异性金属晶体的电导率	

§ 2. 离子或原子的磁性	493	§ 9.4 超导磁体	554
§ 2.1 电子和原子核的磁矩	493	§ 9.5 脉冲磁场	554
§ 2.2 离子或原子的磁矩	495	§ 9.6 磁场的稳定	555
§ 3. 物质的磁性	500	§ 10. 磁场的测量	557
§ 3.1 物质磁性的分类	500	§ 10.1 磁通测量法	557
§ 3.2 金属的抗磁性和顺磁性	501	§ 10.2 霍尔效应法和磁电阻效应法	560
第2章 金属的磁有序结构	506	§ 10.3 核磁共振法	562
§ 4. 磁有序结构的理论基础	506	§ 10.4 弱磁场的测量(I)——磁通门 磁强计和磁性薄膜磁强计	562
§ 4.1 分子场(平均场)理论	506	§ 10.5 弱磁场的测量(II)——光泵 共振磁强计	566
§ 4.2 海森堡交换作用理论	510	第5章 静态磁性的测量	568
§ 4.3 能带理论	512	§ 11. 冲击法	568
§ 4.4 自旋波理论	516	§ 11.1 闭磁路样品的测量	568
§ 4.5 RKKY相互作用理论	520	§ 11.2 开磁路样品的测量	570
§ 4.6 金属及合金中的磁转变	522	§ 12. 电子积分器法	572
§ 5. 铁磁畴及磁化过程	525	§ 12.1 光电积分放大器	572
§ 5.1 磁晶各向异性	526	§ 12.2 电子积分放大器	573
§ 5.2 磁致伸缩	527	§ 12.3 数字积分器	575
§ 5.3 磁畴结构	529	§ 13. 振动样品磁强计	576
§ 5.4 静态磁化过程概述	531	§ 13.1 基本原理	576
§ 5.5 磁导率	532	§ 13.2 探测线圈	577
§ 5.6 矫顽力	534	§ 13.3 测量装置	579
§ 5.7 动态磁化过程	535	§ 14. 磁秤法	580
第3章 金属中的磁效应	537	§ 14.1 基本原理	580
§ 6. 磁共振	537	§ 14.2 梯度磁场的产生	581
§ 6.1 塞曼效应和磁共振	537	§ 14.3 磁秤的结构	582
§ 6.2 核磁共振	538	§ 15. 超导量子干涉器件磁强计	585
§ 6.3 穆斯堡尔效应	539	§ 15.1 约瑟夫逊效应和SQUID的 基本原理	585
§ 6.4 铁磁共振	540	§ 15.2 SQUID磁强计	587
§ 7. 中子衍射	541	§ 15.3 仪器的校准	588
§ 7.1 单个原子对中子的弹性散射	541	§ 16. 测量磁化强度的其他方法	589
§ 7.2 固体的中子弹性散射	542	§ 16.1 电流线圈替代法	589
§ 7.3 中子的非弹性散射	543	§ 16.2 铁磁共振法	590
§ 8. 磁-电、磁-热和磁光效应	543	第6章 动态磁性的测量	592
§ 8.1 磁-电效应	543	§ 17. 动态磁性的自动测量	592
§ 8.2 磁-热效应	545	§ 17.1 交流磁滞回线(B-H)的自动 测量	592
§ 8.3 磁光效应	547	§ 17.2 交流磁化曲线(B_m-H_m)的自 动测量	594
第4章 磁场的产生和测量	549		
§ 9. 磁场的产生	549		
§ 9.1 永久磁体	549		
§ 9.2 电流线圈	549		
§ 9.3 电磁铁	552		

§ 17.3 交流磁导率曲线 (μ_m-H_m) 的 自动测量	594	位制(CGS)中电磁学量的单位	635
§ 17.4 交直流迭加磁化的测量	596	附录表2 重要的物理常数	636
§ 18. 交流磁化损耗的测量	596	参考文献	637
§ 18.1 交流磁化损耗的分离	596	第十篇 热分析技术与金属中的相变	
§ 18.2 艾泼斯坦方圈和瓦特计法	597	(陈洪荪)	
§ 18.3 时间分割乘法器	598	第1章 热分析原理	641
§ 18.4 硅钢带损耗的连续自动测量	600	§ 1. 热分析概说	641
§ 19. 交流电桥	601	§ 1.1 热分析技术的发展概况	641
§ 19.1 四臂电桥	601	§ 1.2 热分析的基本原理	643
§ 19.2 变压器电桥	604	§ 1.3 热分析技术的应用范围	644
§ 19.3 低场交流磁化率的测量	604	§ 2. 热分析曲线的类型	644
第7章 本征磁性的测量	607	§ 2.1 简单热分析曲线 [温度(T)-时间 (τ) 曲线]	645
§ 20. 磁晶各向异性常数的测量	607	§ 2.2 示差热分析曲线 (I) (温差(ΔT)- 时间 (τ)、温度 (T)-时间 (τ) 联合曲线)	645
§ 20.1 转矩磁强计	607	§ 2.3 示差热分析曲线 (II) (温差(ΔT)- 温度 (T) 曲线)	645
§ 20.2 转动样品磁强计	611	§ 2.4 升温速度曲线及速度倒数曲线 ($\frac{dT}{d\tau}-\tau$ 及 $\frac{d\tau}{dT}-\tau$ 曲线)	646
§ 20.3 根据磁化曲线测定磁晶各向异 性常数	613	§ 2.5 温差导数曲线 [$\frac{d}{d\tau}(\Delta T)-\tau$ 曲线]	646
§ 21. 磁致伸缩系数的测量	615	§ 2.6 示差扫描量热曲线 [补偿功率 (ΔW)-时间(τ)曲线]	647
§ 21.1 张力计法	615	§ 3. 相变温度测定	648
§ 21.2 光干涉法	616	§ 3.1 相变热分析曲线的基本形式	648
§ 21.3 根据趋近饱和定律测定多晶 样品的磁致伸缩系数	617	§ 3.2 热分析曲线的钝化	648
§ 22. 居里温度的测量	618	§ 3.3 热分析曲线特征点与相变特征温 度之间的关系	649
第8章 磁结构的研究	621	§ 4. 相变热测量	650
§ 23. 磁畴的观测	621	§ 4.1 热效应峰面积与相变热的关系	650
§ 23.1 胶液技术	621	§ 4.2 定量热分析方法	652
§ 23.2 磁光效应	623	§ 4.3 示差扫描量热法	653
§ 23.3 电子显微镜法	624	第2章 金属相变的理论基础	654
§ 24. 中子衍射技术	625	§ 5. 相变热力学基础	654
§ 24.1 中子衍射谱仪	625	§ 5.1 相与元	654
§ 24.2 中子衍射在磁结构研究中的 应用	627	§ 5.2 热力学平衡状态及其判据	654
§ 25. 核磁共振技术	629	§ 5.3 相变	655
§ 25.1 连续波核磁共振谱仪	629	§ 5.4 状态图	655
§ 25.2 脉冲核磁共振谱仪	629		
§ 26. 穆斯堡尔效应的应用	632		
§ 26.1 穆斯堡尔谱仪	632		
§ 26.2 穆斯堡尔效应的应用	632		
附录	635		
附录表1 在国际单位制(SI)和高斯单 位制(CGS)中电磁学量的单位	635		

§ 5.5 金属的三态及固态的相结构 … 656	§ 9.3 记录部分 …………… 682
§ 5.6 相变的热力学分类 (相变时物理性质的变化) …………… 657	§ 10. 示差扫描量热计 …………… 683
§ 6. 相变动力学基础 …………… 658	§ 11. 影响热分析记录的因素 …… 684
§ 6.1 晶核的形成 …………… 658	§ 11.1 试样的性质 …………… 685
§ 6.2 新相的长大 …………… 662	§ 11.2 试样量 …………… 686
§ 6.3 相变速度 …………… 663	§ 11.3 试样的形态 …………… 687
§ 7. 金属和合金中的相变 …………… 664	§ 11.4 参考样品的性质 …………… 688
§ 7.1 固液转变 …………… 664	§ 11.5 样品支持器 …………… 689
§ 7.2 固相中的基本转变 …………… 666	§ 11.6 升 (降) 温速度 …………… 690
§ 7.3 非平衡转变 …………… 668	§ 11.7 热偶的测量位置 …………… 691
§ 7.4 二阶转变 …………… 669	§ 12. 热分析仪器介绍 …………… 692
§ 8. 金属相变热分析曲线的典型形式 …………… 671	§ 12.1 塞莫夫列克斯 (Thermoflex) 系列台式热分析仪 …………… 693
§ 8.1 等温转变 …………… 671	§ 12.2 DT-2B 系列热分析仪 …………… 694
§ 8.2 连续转变 …………… 672	§ 12.3 DSC-2C 型示差扫描量热计 … 695
§ 8.3 混合转变 …………… 672	§ 12.4 990 组合式热分析仪 …………… 695
§ 8.4 不可逆转变 …………… 672	§ 12.5 M5 型微量差热分析仪 …… 696
§ 8.5 持续转变 …………… 672	§ 12.6 OD-102 型导数记录仪 (Derivatograph) …………… 696
第3章 热分析技术 …………… 674	§ 12.7 DTA2000 差热分析装置 …… 696
§ 9. 热分析装置 …………… 674	§ 12.8 LCP-1 型差热膨胀仪 …… 698
§ 9.1 探测部分 …………… 674	§ 12.9 CDR-1 型差动热分析仪 …… 699
§ 9.2 变温部分 …………… 678	参考文献 …………… 700

第一篇 密 度

第1章 金属的密度

§ 1. 基本概念与密度的理论计算

§ 1.1 密度及与密度有关的物理量

密度是材料每单位体积的质量，即物质的质量与其体积之比^[2]。密度通常用符号 ρ 表示，其单位为千克/米³、克/厘米³^[3]。若已知某金属的质量 m 和体积 V ，可按定义由下式确定其密度

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

密度是物质的基本特征参数，是物质致密程度的度量^[1]。与密度有关的物理量有比重、相对密度和摩尔体积。

比重是材料每单位体积的重量，即物质的重量与其体积之比。用符号 γ 表示。其单位为牛顿/米³。

相对密度是材料的密度和某一参考材料的密度之比。相对密度是一个没有量纲的量。对液体和固体物质，通常以4°C时的纯水为参考材料^[1]。相对密度的符号为 d 。

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

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

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

$$V_A = \frac{M}{\rho} \quad (1-3)$$

原子的体积与摩尔体积成正比，等于 V_A 被阿佛加德罗常数除。

§ 1.2 密度的理论计算

金属及其合金的晶体是由晶胞紧密堆垛而成的，如果知道晶胞的质量和体积，就可以计算它们的理论密度。晶胞的质量 m 和体积 V 按下式计算：

$$m = m_u \sum_{i=1}^K n C_i A_i \quad (1-4)$$

$$V = abc \sqrt{1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma + 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma} \quad (1-5)$$

式中 n 为晶胞中的原子数， K 为晶体中不同种类原子的种数， C_i 和 A_i 为第 i 种组元的原子百分比和原子量， m_u 为统一原子质量常数 $m_u = 1.66044 \times 10^{-24}$ 克^[3]。 a 、 b 、 c 为晶胞三个棱边的长，单位为埃， α 、 β 、 γ 为棱边之间的夹角，这六个量统称为晶格参数。对

于纯金属, $i=K=1$, $C_i=1$, 故其密度等于:

$$\rho = 1.66044nA/V \quad \text{克/厘米}^3 \quad (1-6)$$

在确定固溶体及可变成分的中间相的密度时, 可以把原子量 A 换成平均原子量 \bar{A} , 其换算公式为^[4]:

$$\bar{A} = \frac{100}{\sum_{i=1}^K \frac{x_i}{A_i}} = \sum_{i=1}^K C_i A_i / 100 \quad (1-7)$$

利用上述公式计算金属材料的密度时, 是假设晶体为理想晶体。但事实上金属的晶体通常存在有大量的点阵缺陷, 这些缺陷的存在, 使得实际晶体的密度要略小于理想晶体的密度。实际金属的密度应该通过测量确定。

若合金是组元的机械混合物, 则合金密度与组元成分及其密度的关系可用下式表示:

$$\rho = 100 / \sum_{i=1}^K \frac{x_i}{\rho_i} \quad (1-8)$$

式中 ρ_i 表示第 i 种组元的密度。对于多相合金也可以应用上式计算合金的密度。但此时, K 为相数, x_i 和 ρ_i 则分别是第 i 种相的重量百分数和密度。若合金是以某一组元为基的(如铜基、铝基等), 当添加元素的浓度很低(近似稀溶液)时, 按(1-8)式计算的密度, 其准确度可达 $\pm 0.3\%$ ^[5]。此时合金不一定是机械混合物, 而可以有其他相存在。

如果以体积浓度 C_i 代替重量百分数 x_i , 则合金密度与添加元素的体积浓度具有线性关系:

$$\rho = \sum_{i=1}^K C_i \rho_i / 100 \quad (1-9)$$

Cu-Zn及Pb-Sn合金密度与组元重量百分数的关系分别表示在图1-1和图1-2中。这些合金

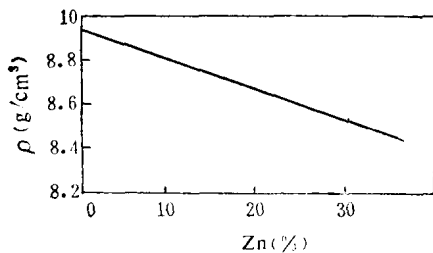


图 1-1 Cu-Zn合金的密度

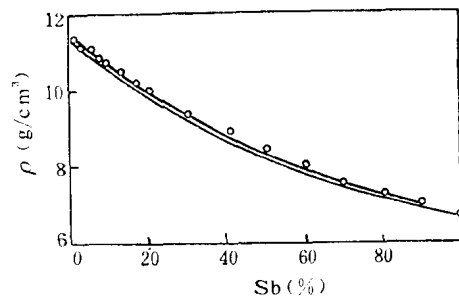


图 1-2 Pb-Sb合金的密度

是组元的多相混合物, 它们的密度可用(1-8)式算出。上述两式不适用于多孔性和具有大的内应力的多相合金以及弥散多相混合物。

§ 2. 密度与金属结构

§ 2.1 密度与原子间结合力

金属的密度是一个宏观物理性能, 它与微观结构有着密切联系。金属与合金通常都是晶体, 组成晶体的原子、离子、分子等质点在空间是规则排列的。密度与组成金属晶体的