

凝聚态物理学丛书

金属物理学

第三卷 金属力学性质

冯 端 等著



科学出版社

内 容 简 介

金属物理学第三卷阐述金属力学性质,分三编:第十编论述内耗与超声衰减,主要介绍内耗的唯象理论,点缺陷引起的内耗,位错与晶界内耗,相变与共格界面的内耗与超声衰减,以及与热、磁、电性有关的内耗;第十一编论述晶体的范性,主要介绍范性形变的几何学与晶体学,范性形变的物理本质,合金强化等;第十二编论述断裂和高温力学性质,主要介绍断裂,高温力学性质,包括回复与再结晶、蠕变与蠕变断裂等。

本书可作为大学高年级学生教学参考书,也可作为固体物理、冶金学和金属物理与材料科学等专业的研究生教材,或供有关领域的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属物理学 第三卷:金属力学性质/冯端等著.-北京:
科学出版社,1999

(凝聚态物理学丛书)

ISBN 7-03-006436-4

I. 金… II. 冯… III. ①金属学:物理学②金属-力学性质
IV. TG111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 04578 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

新 华 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999年8月第 一 版	开本:850×1168 1/32
1999年8月第一次印刷	印张:19 1/2
印数:1—2 500	字数:509 000

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

5-3.219

5-3

《凝聚态物理学丛书》出版说明

以固体物理学为主干的凝聚态物理学,通过半个世纪以来的迅速发展,已经成为当今物理学中内容最丰富、应用最广泛、集中人力最多的分支学科.从历史的发展来看,凝聚态物理学无非是固体物理学的向外延拓.由于近年来固体物理学的基本概念和实验技术在许多非固体材料中的应用也卓有成效.所以人们乐于采用范围更加广泛的“凝聚态物理学”这一名称.

凝聚态物理学是研究凝聚态物质的微观结构、运动状态、物理性质及其相互关系的科学.诸如晶体学、金属物理学、半导体物理学、磁学、电介质物理学、低温物理学、高压物理学、发光学以及近期发展起来的表面物理学、非晶态物理学、液晶物理学、高分子物理学及低维固体物理学等都是属于它的分支学科,而且新的分支尚在不断进发,还有,凝聚态物理学的概念、方法和技术还在向相邻的学科渗透,有力地促进了材料科学、化学物理学、生物物理学和地球物理学等有关学科的发展.

研究凝聚态物质本身的性质和它在各种外界条件(如力、热、光、气、电、磁、各种微观粒子束的辐照乃至处于各种极端条件)下发生的变化,常常可以发现多种多样的物理现象和效应,揭示出新的规律,形成新的概念,彼此层出不穷,内容丰富多彩,这些既体现了多粒子体系的复杂性,又反映了物质结构概念上的统一性.所有这一切不仅对人们的智力提出了强有力的挑战,更重要的是,这些规律往往和生产实践有着密切的联系,在应用、开发上富有潜力,有可能开辟出新的技术领域,为新材料、元件、器件的研制和发展,提供牢固的物理基础.凝聚态物理学的发展,导致了一系列重要的技术突破和变革,对社会和科学技术的发展将发生深远的影响.

为了适应世界正在兴起的新技术革命的需要,促进凝聚态物理学的发展,并为这一领域的科技人员提供必要的参考书,我们特组织了这套《凝聚态物理学丛书》,希望它的出版将有助于推动我国凝聚态物理学的发展,为我国的四化建设做出贡献。

主 编: 葛庭燧

副主编: 冯 端

第一卷

主要参考书目(附有按语)

绪论

第一编 金属的结构及其理论

冯 端

第一章 金属的结构

第二章 金属结构的理论

第二编 合金的结构及其理论

冯 端

第三章 合金的热力学

第四章 合金的结构

第五章 微观的合金理论

第三编 晶体的缺陷

冯 端

第六章 点缺陷

第七章 位错

第四编 表面与界面

冯 端

第八章 表面

第九章 界面

第五编 原子的迁移

丘第荣

第十章 金属中的扩散

第十一章 几个和扩散有关的实际问题

第二卷

序言

第六编 相变导论

冯 端

第十二章 相变的基本类型

第十三章 朗道理论及其应用

第七编 相变动力学

刘治国

第十四章 非匀相转变动力学

第十五章 匀相转变动力学

第八编 界面稳定性与形态的演变

冯 端

第十六章 界面形态的稳定性

第十七章 界面形态的演变

第九编 相变的微观理论

杨正举 金国钧

第十八章 统计模型与临界现象

第十九章 软模理论与结构相变

第二十章 电子-晶格耦合系统

第四卷

序言

第十三编 超导电性

丁世英

- 第三十一章 金属超导电性基础
- 第三十二章 晶体缺陷与超导电性
- 第三十三章 高温超导电性

第十四编 金属磁性

翟宏如

- 第三十四章 金属磁性分类及来源
- 第三十五章 无磁序金属磁性
- 第三十六章 金属中的磁有序
- 第三十七章 强磁金属的内禀磁性
- 第三十八章 强磁物质中的磁畴与磁化
- 第三十九章 固体缺陷与技术磁化性能
- 第四十章 特殊状态下金属的磁性

目 录

《凝聚态物理学丛书》出版说明

葛庭燧 冯 端

第十编 内耗与超声衰减

王业宁 沈惠敏

引言.....	1
第二十一章 内耗的唯象理论	7
I 滞弹性的行为及内耗的量度	7
§ 21.1 弹性体和滞弹性体	7
§ 21.2 滞弹性行为的表现	8
§ 21.3 内耗的量度	13
II 滞弹性响应函数之间的关系	17
§ 21.4 玻尔兹曼叠加原理	17
§ 21.5 诸响应函数之间的关系	19
III 内耗的唯象理论	23
§ 21.6 佛克脱模型.....	23
§ 21.7 麦克斯韦模型	24
§ 21.8 标准滞弹性固体与三参量模型	25
§ 21.9 滞弹性弛豫的离散谱和连续谱	30
§ 21.10 弛豫过程的连续谱和微观机制的关系	45
§ 21.11 阻尼共振型内耗	49
§ 21.12 非滞弹性引起的内耗	51
IV 滞弹性弛豫的热力学基础	52
§ 21.13 内参量	52

§ 21.14	弛豫过程的热力学基础	56
§ 21.15	各向异性材料的弛豫过程	59
§ 21.16	绝热和等温条件下弛豫量之间的关系	60
第二十二章	点缺陷引起的内耗	64
§ 22.1	缺陷对称性	64
§ 22.2	弹性偶极子的概念	67
§ 22.3	单轴应力下的弛豫	70
§ 22.4	在高对称性立方晶体中不同缺陷对称性引起弛豫的 例子	72
§ 22.5	点缺陷的弛豫动力学	76
§ 22.6	斯诺克弛豫	83
§ 22.7	包含弹性偶极子之间相互作用的情况	85
§ 22.8	曾讷弛豫	88
§ 22.9	包含反应的情况	96
§ 22.10	其它点缺陷引起的弛豫	103
第二十三章	位错与晶界内耗	107
I	位错弛豫与位错共振	107
§ 23.1	低温本征位错弛豫峰——博多尼峰	107
§ 23.2	位错的振动弦模型	122
II	位错与可动点缺陷相互作用的效应	132
§ 23.3	阻尼振动弦模型的推广——位错拖曳点缺陷	132
§ 23.4	bcc 间隙式固体中冷加工内耗峰——斯诺克-科斯特 峰	138
§ 23.5	fcc 金属中本征点缺陷与位错相互作用的弛豫	148
§ 23.6	fcc 金属中替代式溶质原子与位错相互作用效应	150
§ 23.7	位错脱钉引起的内耗	157
§ 23.8	位错与点阵中均匀分布点缺陷的相互作用	168
§ 23.9	低频超声两波耦合技术——确认位错内耗机制的一种 方法	176
III	晶粒间界内耗与高温位错内耗	180
§ 23.10	晶界内耗峰	180
§ 23.11	竹节晶界内耗峰	185

§ 23.12	高温位错内耗	187
第二十四章	相变与共格界面的内耗与超声衰减	190
I	一级结构相变的低频内耗	190
§ 24.1	瞬态一级相变的低频内耗	191
§ 24.2	稳态一级相变的低频内耗	196
II	晶格不稳定性及畴界引起的内耗	204
§ 24.3	孪晶粗(细)化过程及其他晶格不稳定性引起的内耗	204
§ 24.4	铁电铁弹畴界在 T_c 附近的粘滞性损耗	213
§ 24.5	铁电铁弹畴界有关的热激活弛豫峰及其冻结效应	217
III	二级相变及动态畸变畴引起的内耗	224
§ 24.6	二级相变涨落引起的低频内耗	224
§ 24.7	高温超导体的超导相变前后的内耗——载流子动态畸 变畴的内耗	225
IV	与沉淀有关的内耗	230
§ 24.8	沉淀有关内耗的实验	230
§ 24.9	沉淀弛豫峰机理的进一步探讨	234
V	与相变有关的超声衰减与声速	239
§ 24.10	应变和序参量的耦合	240
§ 24.11	朗道-卡拉特尼可夫二级相变弛豫理论	242
§ 24.12	临界温度附近的弹性常数	249
第二十五章	与热、磁、电性质有关的内耗	253
I	热弹性内耗与声子弛豫	253
§ 25.1	热流引起的弛豫型内耗	253
§ 25.2	声子弛豫	259
II	磁弹性内耗	263
§ 25.3	宏观涡流引起的内耗	263
§ 25.4	微观涡流引起的内耗	267
§ 25.5	静态滞后型内耗	268
III	电子阻尼	270
§ 25.6	超声波与金属中电子的交互作用	270

§ 25.7 超声波与半导体中电子的交互作用	280
§ 25.8 超声波与绝缘体中电子的交互作用	284
§ 25.9 杨-特勒缺陷引起的弛豫型内耗	287
§ 25.10 二能级系统的弛豫	288
第十编 参考文献	300

第十一编 晶体的范性

冯 端

引言	311
第二十六章 范性形变的几何学与晶体学	313
I 基本情况	313
§ 26.1 范性形变的测量	313
§ 26.2 滑移的晶体学特征	317
§ 26.3 临界切应力定律	326
§ 26.4 形变过程中滑移的几何关系	329
II 若干特殊问题	334
§ 26.5 不均匀的范性形变	334
§ 26.6 孪生	339
§ 26.7 多晶体范性形变的特征	344
§ 26.8 形变织构	347
第二十七章 范性形变的物理本质	354
I 屈服	354
§ 27.1 晶体软硬的物理本质	354
§ 27.2 屈服现象	360
§ 27.3 热激活的形变过程	367
II 加工硬化	372
§ 27.4 流变应力的位错机制	372
§ 27.5 加工硬化的一些实验结果	380
§ 27.6 加工硬化的理论	389
§ 27.7 包辛格效应与疲劳硬化	392

■ 细晶硬化	394
§ 27.8 多晶体的屈服与流变	394
§ 27.9 纳米微晶的硬化	400
第二十八章 合金强化	403
I 单相合金的强化	403
§ 28.1 固溶硬化的基本情况	403
§ 28.2 均匀固溶硬化的理论	407
§ 28.3 位错线上溶质原子偏聚的效应	410
§ 28.4 有序合金的硬化	414
II 复相合金的硬化	417
§ 28.5 第二相粒子强化的基本情况	417
§ 28.6 两相合金屈服强度的理论	418
§ 28.7 两相合金加工硬化的理论	427
第十一编 参考文献	434

第十二编 断裂和高温力学性质

吴希俊 孔庆平

引言	437
第二十九章 断裂	440
§ 29.1 断裂的基本类型	440
§ 29.2 脆性断裂的格里菲斯理论	443
§ 29.3 裂纹的弹性场	448
§ 29.4 裂纹的受力问题	461
§ 29.5 裂纹和位错之间的相互作用	468
§ 29.6 断裂的原子过程	482
§ 29.7 延性断裂	491
§ 29.8 脆性解理断裂	498
§ 29.9 延性-脆性转变	510
§ 29.10 晶间断裂	524
§ 29.11 疲劳断裂	535
第三十章 高温力学性质	548

I	回复与再结晶	548
§ 30.1	概述	548
§ 30.2	回复	549
§ 30.3	再结晶	552
§ 30.4	晶粒长大	557
§ 30.5	退火织构与退火孪生	559
II	蠕变	560
§ 30.6	蠕变试验及工程蠕变数据的表示	561
§ 30.7	蠕变的实验规律	563
§ 30.8	蠕变过程中的结构变化	568
§ 30.9	低温对数蠕变的理论	572
§ 30.10	高温瞬态蠕变的理论	574
§ 30.11	高温稳态蠕变的理论	575
§ 30.12	扩散蠕变的理论	578
§ 30.13	蠕变断裂	580
§ 30.14	层错能与稳态蠕变速率的关系	584
§ 30.15	溶质原子和弥散相对蠕变的影响	586
§ 30.16	蠕变与疲劳的交互作用	587
§ 30.17	超塑性	588
第十二编	参考文献	590
	人名索引	596
	内容索引	600

第十编 内耗与超声衰减

王业宁 沈惠敏

引 言

内耗与超声衰减是在固体振动过程中由于弹性波与各种缺陷或声子、电子、磁子等元激发的相互作用而使机械能消耗的现象。因而,通常又称力学损耗。在宽的频率范围或温度范围测量可以获得力学损耗谱(或称声吸收谱),它是固体能谱的一个分支。

内耗测量多半是在驻波情况下进行,频率范围是 10^{-4} — 10^5 Hz. 可提供有关原子尺度的各种缺陷如点缺陷、位错、晶界、畴界等的状态、运动及其间互作用以及相变的信息。超声衰减的测量多数是在行波情况下进行的,频率范围是 10^6 — 10^{10} Hz, 它也可提供缺陷和相变的信息,而且更常用于研究声子、电子、磁子等元激发的状态与变化规律。机械能的吸收必伴随有固体弹性的变化,因而常同时测出损耗与弹性模量(低频)或声速(高频)的变化。这样不仅可获得弹性本身的参数,而且有助于对损耗峰的性质和机理进行分析。

内耗(包括超声衰减)是一门边缘分支学科。研究内耗当然首先要产生各种损耗峰的根源和物理机制搞清楚,但这不是唯一的目的,更重要的是,它是一种工具和一种研究方法,要用它去解决凝聚态物质中的各种物理问题,只有这样它才有生命力,在解决

问题的过程中可以不断发现新现象,从而再充实与发展内耗本身的知识。

在曾讷的专著^[1]中,金属的弹性与滞弹性是这门学科的奠基性工作。因为大多数的内耗是属于滞弹性的范畴,而葛庭燧的晶界内耗峰的发现又是滞弹性理论的重要实验基础之一。自1948年该书出版以后,正好也是位错理论的兴起时期,因此大量点缺陷与位错的内耗研究迅速开展起来。1953年,诺威克(Nowick, A. S.)关于“金属中的内耗”综述论文及1960年尼布莱特(Niblett, D. H.)和威尔克斯(Wilks, J.)的“金属中的位错阻尼”文章都是当时内耗工作的总结。冯端等著的《金属物理》第一版下册第十三章“金属中的内耗”也是一篇阶段性的综述,该章按缺陷类型与相变来描述的体系是新的,但正如冯端在新版金属物理的序言中所说,旧版下册的出版虽是1975年,但脱稿是在1965年,因此内容是比较少的。1969年特鲁艾尔,艾尔鲍姆和奇克(Truell, R., Elbaum, C., Chick, B. B.)也写了一篇专题论文“固态物理中的超声方法”,在这篇论文中既讨论了缺陷,也讨论了元激发,比较深入但仅限于超声方法的结果。1972年,诺威克出版的专著《固态晶体中的滞弹性弛豫》^[2]是一本既详细而系统性又很强的好书,特别是对线性滞弹性弛豫的基础理论给出了完善的描述。因为其他各种内耗理论都未形成系统的理论,所以该书后面关于各种物理原因引起的内耗也是突出滞弹性弛豫方面的,如各种缺陷的弛豫(包括点缺陷、位错、晶界)、各种元激发以及相变的弛豫机制等都有详尽的阐述。因此,这本书前后贯穿的一条线索很清楚。同年,德巴蒂斯特(De Batist, R.)也出版了一本专著《晶体中结构缺陷的内耗》,其体系和我们金属物理中的相似,也是按缺陷类型分别讨论的,由于篇幅大得多,内容丰富,包括的文献也比较全,特别是在位错内耗方面对诺威克的书是一补充。

此后,点缺陷内耗由于实际需要,对氢的扩散峰和复合点缺陷做了大量工作,特别重要的是体心立方金属中氢和其它间隙原子形成的对或小团簇引起的隧道弛豫,格伦纳托(Granato, A.)等引

进了非晶态低温隧道弛豫的两能级模型,得到了很好的定量结果,并求出了能隙、内应变和耦合参数等,这是近年来成功地解决物理问题的最好的范例,得到众人的关注与肯定。此外,过去对点缺陷弛豫都是当作独立的弛豫中心来处理,但当其溶质原子浓度足够高时(如位错或沉淀物周围)必须考虑点缺陷之间的互相作用,也即相关效应。倪嘉陵(Ngai, K. L.)等曾运用相关态理论(后来多称为耦合弛豫理论)处理高分子和非晶材料中的介电弛豫的慢化而导致峰的不对称宽化现象获得成功,最近在合金中也有了考虑相关效应的初步工作。

位错内耗方面从1956年科勒(Koehler, J. S.)、格伦纳托与柳克(Lücke, K.)的位错弦模型成功地解释了不少实验规律,同时塞格(Seeger, A.)提出弯结对模型解释了位错本征弛豫峰后,与位错有关的内耗研究,特别是位错和位错弯结拖曳点缺陷运动的各种模型和理论曾是内耗研究的热点,这方面论文最多。近10年来有减少趋势,但葛庭燧等对1949年发现的fcc替代合金中位错溶质原子互作用引起的具有反常振幅效应的内耗又作了大量实验和理论工作,称之为非线性滞弹性行为。晶界内耗峰在80年代也发生过争论,经过对高纯度金属的精心研究后得到了澄清,并有新的发现。

相变和畴界(共格界面)引起的低频内耗,由于形状记忆材料和高阻尼材料的应用开发曾推动了大量实验工作,同时也发展了理论。这种畴界的动性不仅是力学记忆的核心问题,也是铁电存储器中电记忆的关键所在。实际上,金属和氧化物铁电晶体的相变与畴界有许多共性。因此,内耗测量和介电测量平行进行,可获得更丰富而可靠的信息,目前,这方面的工作已初见成效。由于70年代初相变的理论有过飞跃的发展(见《金属物理》第二卷第二编绪论),对相变点附近的临界现象作了大量理论和实验的研究,因而超声对相变的研究也有进一步的发展,但这方面纯属理论性研究,与低频内耗的研究尚未完全沟通。

值得注意的是,对元激发的研究,着重于重费米子合金超导转