

高等学校教材

金属物理

中 册

周如松 主编

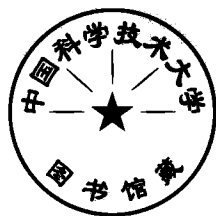
高等学校教材

金属物理

(中 册)

周如松 主 编

徐约黄 王绍苓 编著



高等教育出版社

(京) 112 号

内 容 提 要

本书共分上中下三册。中册介绍晶体缺陷与力学性质。晶体缺陷部分包括晶体中的点、线、面缺陷,细致地介绍了位错几何学与弹性性质,特别介绍了体心立方结构中位错的精细结构、向错、位错动力学与位错观察。力学性质部分包括形变、强化与断裂,介绍了有关疲劳的近期发展。

本书特别考虑到可读性,选用并设计了大量插图以帮助读者理解。

本书可作高等院校固体物理和材料科学等专业大学生、研究生教材,也可供有关科技人员参考。

高 等 学 校 教 材

金 属 物 理

(中 册)

周如松 主编

徐鹤黄、王绍苓 编著

*

科学出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

上海祝桥新华印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 13.625 字数 327,000

1992年5月第1版 1992年5月第1次印刷

印数 0,001—1,045

ISBN 7-04-003837-4/O·1124

定价 6.05 元

出版者前言

为适应高等学校固体物理学及其各分支学科课程教学的需要，高等学校理科物理学教材编审委员会固体物理编审小组和高等教育出版社组织编写了一套固体物理学学科的教学参考书，其中包括固体物理学及其各分支学科的基础课程和实验课程用的教学参考书和一部《固体物理学大辞典》。这些书将由高等教育出版社陆续出版。

本书是这套书中的一本。

序

我们受高等教育出版社和固体物理教材编审小组之托编写这本《金属物理学》，它是高等院校有关专业高年级用的教材。金属物理学是固体物理学的一个分支，是介乎物理学与金属学之间的一门边缘学科，它旨在利用物理学中的一些学科的成果来阐明金属及合金的种种宏观规律，因此涉及的内容很广。在各高等院校金属物理专业的教学大纲中很少列入包括整个内容的金属物理课程，大都分成几门课程设置。我们以专业教学中已多次试用的几门课程的讲义为基础，经过加工修改和补充，编写成目前这本书稿。

全书由周如松主编并审订。全书分为上、中、下三册。上册第一章至第六章由邹宪武、金准智执笔，介绍了金属及合金的结构及其理论，其中对金属元素的晶体结构和电子结构只作一般介绍；重点介绍几种典型的合金相的晶体结构和电子结构，以及与之有关的重要规律；除讨论平衡态问题外，也介绍了亚稳的非晶态金属及合金的结构及电子态，并简单介绍了近期发展的准晶体。第七至第十章由田德诚执笔，介绍了合金热力学，主要讨论溶体的热力学性质，强调了普遍适用于溶体的 $G-D$ 关系及其应用；分别就几种类型的固溶体和液态合金介绍了合金的统计理论；用了较大篇幅介绍相图的热力学原理，溶体自由焓曲线与相图构造的关系，并阐述了一些典型的简单相图的计算方法。

中册第一、五、八、九章由王绍苓执笔，其余由徐约黄执笔。介绍了晶体缺陷与力学性质。其中晶体缺陷主要介绍较成熟的内容；介绍了一般有关书籍少见但较重要的体心立方结构中位

错的精细结构，及向错的概貌；分别用两章较详细地介绍了位错动力学与位错观察。关于力学性质，主要讨论它们的微观机制，介绍了有关疲劳的近期发展，蠕变问题再版时再补充。书中选得并设计了大量插图来阐明位错的几何形态和行为，以帮助读者的理解。

下册讨论金属与合金中的扩散和相变，由王子孝执笔。前五章讨论扩散，只限于作为基础和研究得比较充分的原子扩散问题；系统地阐明了扩散的唯象理论和微观机制；介绍了实际材料中的短路扩散和非热平衡状态下点缺陷的扩散。后十一章讨论相变，比较全面地介绍了各种相变现象，包括液态-非晶态-准晶态-晶态相变以及低维体系中的相变；反映了现代相变理论的概况及其与新型材料研究的联系。

金属物理学和物理冶金学所讨论的问题本身基本上没有多少差别，只是前者更侧重物理学。本书力求更多地从物理学的观点提出问题，突出问题的物理模型，以区别于物理冶金学。我们假定读者已掌握了金属学和晶体学的基本知识，具备大学物理专业的理论物理基础，在有关的理论阐述中少作繁琐的数学推导，但力求环节分明，重点突出，陈述清楚，使这本书便于教师讲授和学生自学。

本书撰稿人较多，但各分册、各章都有统一的观点和贯穿的线索，我们尽可能减少各分册之间的重复和失调。不足和错误之处，尚祈读者指正。

承冯端教授为本书内容的取舍和处理提出宝贵意见并审阅文稿，特此致谢。

编 者

1988年12月

绪 论

大多数固体是晶体,对称性十分完整的晶体称为理想晶体,但实际晶体中总存在对称性的破缺,即有缺陷。晶体中的缺陷种类很多,按其几何形状,大致可为三类:

(1) 点缺陷: 在所有方向上尺寸都很小,又称零维缺陷,如空位、间隙原子、及杂质原子等。

(2) 线缺陷: 在两个方向尺寸很小,又称一维缺陷,如位错。

(3) 面缺陷: 在一个方向尺寸很小,又称二维缺陷,如层错、晶界、相界等。

缺陷在晶体中所占比例通常并不大,例如 20°C 时铜中的平衡空位浓度为 3.8×10^{-17} ,退火后的铁中位错密度约为 10^{12} 米⁻²,每千万个原子中才有一个位错露头,强烈形变后位错密度大增,但也只是每一千个原子才有约一个位错露头。因此,从整体上看,可以认为一般晶体是近乎完整的, X射线衍射及电子衍射等实验主要反映了晶体的完整性、对称性。但这千分之一,千万分之一,甚至比例更小(硅单晶中)的缺陷,却对晶体的性能起着不容忽视的作用。缺陷的存在使金属的电阻率上升,磁矫顽力增大,透明晶体出现色心,抗腐蚀性下降,扩散速率加快,晶体生长速率加快,……。特别是对力学性能,可以造成几个数量级的变化。因此,在金属物理学中,晶体缺陷的研究占重要地位。

对晶体缺陷的研究从本世纪早期开始,钱临照曾于 1980 年在《物理》杂志上对其曲折发展史作了概述。1914 年达尔文 (C. G. Darwin) 首先提出镶嵌组织来描述不很完整的实际晶体结构。20 年代弗伦克耳 (Я. И. Френкель) 提出了晶体的点缺陷理论。为了

解释金属晶体的实际强度远低于理论强度，1934年泰勒 (G. I. Taylor)、奥罗万 (E. Orowan)、与波兰伊 (M. Polanyi) 几乎同时提出了位错的假设。随后康托洛娃 (Т.А.Конторова) 与弗仑克耳提出了动态的一维点阵位错模型，柏格斯 (J. M. Burgers) 将位错概念加以普遍化，并发展了位错应力场的一般理论。随后，在解释范性形变的很多问题上，位错理论得到较大发展。可是，由于未获得实验证明，在相当长一段时间内，位错理论未能被人们普遍接受。1949年是一个转折的年代，弗兰克 (F. C. Frank) 的螺位错促成晶体生长的理论预言在这一年得到实验证实。1953年福格耳 (Vogel) 等利用侵蚀法显示晶体表面位错露头，在锗晶体上观察到位错线的间距与两晶块间小角取向的关系与理论相符。同年赫基 (Hedge) 等应用银原子沉积在位错上这一缀饰法，使 AgBr 晶体中的位错网在显微镜下显示出来。特别是1956年门特 (Menter) 用电子显微镜在铂酞花青晶体薄片首次观察到位错的结构，十分惊奇地发现它和20年前泰勒等人的模型完全一致。至此，位错理论奠定了坚实的实验基础。50年代位错理论得到很大进展。

60年代以后，位错理论的研究领域扩宽。在范性形变问题中，详细研究了体心立方金属中位错的精细结构，研究了两相合金的范性形变机制，并将计算机模拟用于位错点阵组态的研究。同时，还越出了金属的范性与强度这一传统领域，研究了加磁场对正常态金属流变应力的影响，从而研究了位错与电子的交互作用。又研究了磁化率和磁滞回线的结构敏感性能，从而探讨了缺陷与畴壁壁的交互作用。1991年7月美国《大众科学》杂志报导，有两个研究钇钡铜氧超导体的科研小组已经证明：高T_c超导膜并非单晶而是多晶，它的每个晶粒都是沿螺位错的轴线生长而成，他们认为该材料中的磁力线或被“钉扎”在螺位错中心，或被“钉扎”在众多的晶粒界面处。晶体的光学、声学性质与缺陷的关系也正在研

究中。从研究的材料看,从面心立方、体心立方及密排六方等简单结构的金属晶体,已扩大到比较复杂的无机化合物,又逐渐进入高分子材料、液晶、及超流体材料等新领域,揭示出一些新的缺陷模型,例如液晶中的向错(disclination)。从研究的深度看,有从亚微观向微观领域深入,从静态观测向动态观测发展,从定性向定量过渡的趋势。近年来,高分辨率电子显微镜的发展,使直接观察晶体缺陷的原子图像成为可能。

本册着重介绍晶体缺陷较成熟的内容,前九章介绍晶体缺陷的基本性质,包括点缺陷、线缺陷、面缺陷,以及主要的实验方法。后五章介绍缺陷对力学性能的影响,仍以介绍较成熟的理论为主,只包括极少量还处于发展中的机制。蠕变本是力学性质中十分重要的一章,但本册暂未编入,待再版时再补上。

本册插图(底图)由汪大海同志绘制,在此表示感谢。

符 号 表

b	位错的柏格斯矢量
c	弹性常数, 浓度
C	波速
C_t	切变波速
C_L	纵波波速
COD	裂纹尖端张开位移
D	扩散系数, 位错间距, 位错胞平均直径
$D(x)$	连续分布位错密度(位错分布函数)
e	位错弹性能密度
E	杨氏模量, 位错的弹性能
E_b	晶界能
E_e	刃位错的弹性能
E_s	螺位错的弹性能
E_ω	向错的弹性能
f	单位长位错的向心恢复力, 体积分数
F	作用力, 摩尔自由能, 单位长位错线所受的力
J_{1c}	J 积分的临界值
$k(k_B)$	玻耳兹曼常数
K_1	I 型裂纹的应力强度因子
K_{1c}	临界应力强度因子(断裂韧度)
Δk	应力强度因子幅
m	位错运动速率的应力敏感指数, 取向因子
m^*	位错线的有效质量
M	位错线的动量
n	加工硬化指数
N	再结晶成核率, 位错源数
N_A	阿伏伽德罗常数
P	范性形变能, 负荷, 点缺陷的跃迁几率

r	半径, 距离
R	应力比
R_c	晶核临界尺寸
S	向错的强度
T	绝对温度, 位错线张力
T_r	再结晶温度
T_D	德拜温度
T	应力张量
u, v, w	位移分量
U	内能, 激活能, 形成能, 系统的能量, 点缺陷迁移能
ΔU	互作用能
v	激活体积
W	功
Z	配位数
α	应力集中系数, 应力状态软性系数
γ	切应变, 每单位面积层错能, 裂致的表面能
δ	延伸率, 裂纹尖端张开位移, 体应变
ε	正应变
ϵ	错配度
ε	应变张量
η	广义坐标, 粘滞系数
θ	加工硬化系数
λ	拉梅(Lamé)常数, 形状因子
μ (或 G)	切变模量
ν	泊松比, 频率
ν_0	固有频率
ν_a	原子振动频率
ρ	位错密度, 电阻率
ρ_0	介质密度
ρ_m	可动位错密度
σ	应力, 正应力
σ_b	抗张强度(强度极限)

$\sigma_y(\sigma_{0.2}, \sigma_s)$	屈服强度
$\sigma_r(\sigma_{-1})$	疲劳极限
τ	切应力
τ_c	临界切应力
τ_i	正电子捕获态寿命
τ_f	正电子自由态寿命
x	位错振动的振幅
ψ	截面收缩率
ω	向错的旋转矢量
Ω	位错振动的圆频率

目 录

符号表	1
第一章 点缺陷	1
§ 1-1 空位及间隙原子的几何组态	1
§ 1-2 点缺陷的形成能	3
§ 1-3 点缺陷的热平衡浓度	6
§ 1-4 点缺陷的迁移能及热跃迁几率	10
§ 1-5 空位形成能及迁移能的测定	13
§ 1-6 辐照效应	16
第二章 金属晶体的拉伸形变	20
§ 2-1 拉伸曲线	20
§ 2-2 范性形变的方式	24
§ 2-3 单晶滑移的临界切应力与施密德定律	30
§ 2-4 滑移过程中晶体的转动	32
§ 2-5 多晶体的范性形变	35
§ 2-6 金属的超塑性	37
§ 2-7 理论切变强度的估计	39
§ 2-8 逐步滑移与位错	42
第三章 位错几何学	46
§ 3-1 位错的几何模型	46
§ 3-2 柏格斯回路与柏格斯矢量	52
§ 3-3 位错的运动	57
§ 3-4 位错环及其运动	61
§ 3-5 位错运动与宏观范性形变	62
§ 3-6 割阶	66

第四章 位错的弹性性质	74
§ 4-1 位错的连续介质模型	74
§ 4-2 直螺位错的应力场	76
§ 4-3 直刃位错的应力场	78
§ 4-4 直位错的弹性能	84
§ 4-5 位错的线张力	87
§ 4-6 向错	92
§ 4-7 位错的半点阵模型	96
第五章 位错与晶体缺陷的弹性交互作用	105
§ 5-1 位错所受的力	105
§ 5-2 位错与位错间的交互作用	107
§ 5-3 位错与自由表面的交互作用——镜像力	113
§ 5-4 位错的增殖机制	115
§ 5-5 位错塞积群	119
§ 5-6 位错与溶质原子的交互作用	124
§ 5-7 位错与过饱和点缺陷的交互作用	131
第六章 典型结构金属中的位错与不全位错	135
§ 6-1 典型晶体中的全位错与位错反应	135
§ 6-2 密排晶体中的堆垛层错	138
§ 6-3 面心立方晶体中的不全位错	145
§ 6-4 面心立方晶体中的扩展位错	152
§ 6-5 面心立方晶体中由扩展位错形成的几种组态	159
§ 6-6 体心立方晶体中的层错	170
§ 6-7 体心立方晶体中的扩展位错	177
§ 6-8 体心立方晶体中螺位错芯模型	184
§ 6-9 体心立方晶体中形变孪晶的位错机制	187
第七章 位错动力学	194
§ 7-1 运动位错的应力场	194
§ 7-2 运动位错的能量、有效质量与动量	200

§ 7-3	位错的加速运动	203
§ 7-4	位错运动的阻尼	208
§ 7-5	位错攀移动力学	213
第八章	晶界	222
§ 8-1	小角晶界的位错模型	222
§ 8-2	大角晶界	228
§ 8-3	晶界的能量	232
§ 8-4	晶界偏析	235
§ 8-5	晶界的运动	238
§ 8-6	相界的位错模型	242
第九章	研究晶体缺陷的实验方法	245
§ 9-1	表面法	245
§ 9-2	缀饰法	249
§ 9-3	透射电子显微术	252
§ 9-4	场离子显微术	257
§ 9-5	正电子湮没	261
第十章	金属的范性形变	269
§ 10-1	范性形变的障碍	269
§ 10-2	屈服现象及其机制	275
§ 10-3	范性流变与热激活	282
第十一章	加工硬化	290
§ 11-1	形变金属的性能与组织结构的变化	290
§ 11-2	单晶体加工硬化的三个阶段	293
§ 11-3	加工硬化理论	301
§ 11-4	加工硬化的消除	309
第十二章	合金强化	316
§ 12-1	固溶强化现象	317
§ 12-2	均匀固溶强化理论	318
§ 12-3	非均匀固溶强化理论	326

§ 12-4 弥散强化	335
§ 12-5 纤维强化	346
第十三章 断裂	354
§ 13-1 断裂的类型与方式	354
§ 13-2 断口分析	357
§ 13-3 断裂的应力条件	361
§ 13-4 脆断理论	365
§ 13-5 断裂力学简介	372
§ 13-6 裂纹的稳态扩展	378
§ 13-7 裂纹的位错模拟	381
第十四章 疲劳	385
§ 14-1 有关疲劳的基本概念	385
§ 14-2 疲劳过程中组织结构的变化	391
§ 14-3 疲劳裂纹的萌生与扩展	401
§ 14-4 疲劳断口特征	406
索引	411

第一章 点 缺 陷

晶体中的点缺陷包括空位、间隙原子、杂质原子或溶质原子(置换式、间隙式),以及它们组成的复杂缺陷。本章主要涉及到空位和间隙原子。空位在点缺陷中占有极重要的地位,这是由于空位普遍存在,而间隙原子只有在高能辐照条件下才有可“察觉”的数量;另一方面,空位对材料内部原子的扩散有很大影响,工业上常用的退火、均匀化处理、沉淀析出、蠕变等过程,都在不同程度上借助于空位在点阵中的运输,因此,空位的运动对材料的某些性能影响很大。

§ 1-1 空位及间隙原子的几何组态

从晶体正常点阵位置上抽去一个原子,失去了原子的这个位置就是空位。空位的集合可以形成更复杂的点缺陷,例如,邻近位置的一对空位组成了一个空位对;面心立方点阵的 $\{111\}$ 面上,三个空位形成一个三角形,组成一个三空位;一个邻近原子向三空位运动后,组成空位四面体;空位在某结晶学面上聚集,形成空位片等。图 1-1(a)(b)(c)描绘出空位、空位对、三空位及空位四面体。

在点阵间隙位置挤进了一个同类原子,这个原子称为间隙原子,如图 1-1(a)所示的 C 位置。单个间隙原子能表现出较复杂的形态,图 1-2 表示面心立方点阵的体心位置有一间隙原子,形成间隙原子的体心组态,它所产生的畸变具有球对称性。图 1-3 中,体心处的间隙 A 原子向右运动至位置 A' ,将 B 原子从面心位置向右挤出至 B' 处,形成“哑铃”形状的缺陷,称为对分间隙组态,它的能量略低于体心组态的。这种点缺陷有六种可能的方位,在一定