

物理金属学

〔西德〕P. 哈森 著

科学出版社

物 理 金 属 学

〔西德〕 P. 哈森 著

肖纪美 马如璋 吴 兵 杨顺华 译

柯 俊 校

内 容 简 介

在近代金属学的迅速发展中,物理学的作用日益重要和显著。本书从固体物理学的原理出发,比较深入地阐明了金属中的各种物理过程及其发展方向。本书主要内容:显微结构、凝固过程、金属相、有序排列、扩散、沉淀、点缺陷、位错、范性形变、马氏体转变以及合金性质等。本书可供教学及科研工作参考。

原著为德文,1978年出英译本,作者略有修订。本书是根据英译本转译的。肖纪美译第五、七、八、九章;吴兵译第一、六、十四、十五章;马如璋译第二、三、四章;杨顺华译第十、十一、十二、十三章。全书由柯俊校订。

Peter Haasen

PHYSICAL METALLURGY

Cambridge University Press, 1978

物 理 金 属 学

〔西德〕P. 哈森 著

肖纪美 马如璋 吴 兵 杨顺华 译

柯 俊 校

责任编辑 陈咸亨

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1984年7月第一版 开本: 850×1168 1/32

1984年7月第一次印刷 印张: 11 1/2

印数: 0001—6,100 字数: 295,000

统一书号: 13031·2604

本社书号: 8586·13—3

定 价: 2.15 元

为中文版写的前言

1978 年,我尊敬的同事葛庭燧教授曾访问了 Göttingen,同年我到沈阳回访时,葛庭燧教授等表示了将本书译为中文的兴趣. Springer 出版公司和我本人对此欣然同意. 我们改正了几处印刷错误. 当时我也访问了北京钢铁学院,柯俊教授和该院的其他同事们以令人敬佩的热忱应允承担本书的翻译工作,并希望它有助于中国的金属物理的教学. 对于中国同事们的辛劳工作,我深表感激,并且希望本书能够通过他们的讲授获得许多成效.

P. 哈森(Peter Haasen)

1979 年 5 月写于柯俊教授

访问 Göttingen 之际

为英文版写的前言

许多英国和美国的同事曾希望本书出版英译本, 他们觉得本书对于金属学科荣誉学士的毕业班课程或硕士学位课程将是有用的。我很高兴我的两位朋友和过去的同事 Janet 和 Barry Mordike 承担了这项翻译工作, 因为他们既熟悉 Göttingen 的课程, 又了解英国的课程。对他们的认真灵活的翻译, 我谨表谢忱。

借出版英译本的机会, 改正了德文本中的一些错误, 这些错误是由学生们、同事们, 特别是 A.W.Sleeswyk 教授、H.H.Homann 博士和 V. Schlett 博士向我指出的。在适于使用国际单位制(SI)的地方, 现在都已使用国际单位制。L.Schultz 博士和 R.Wagner 博士帮助我进行了校对工作。

P. 哈森

1976 年 7 月于 Caen

原 书 序 言

自 1959 年以来, Göttingen 大学金属物理教研室为已经学完并通过了基础物理课的学生开设“物理金属学”课程。许多德国大学也感到有同样的需要,因为在金属材料的科研、发展和工业生产中,物理金属学工作者仍有相当好的职业前途。金属工学本身具有特别广泛多样的特点,作为一个研究领域它是很吸引人的。此外,与生产和加工固体材料有关的其它工业(如陶瓷、半导体、塑料)也不断增加对冶金技术的应用。过去,冶金工作者通常是由化学家或机械工程师转过来的。今天,物理学位可以是这个领域的一个理想的起始资格。基础物理课不但包含了数学的严格坚实基础,而且也包含了实验物理的讲授和实验,以及把量子理论的引论也包括在内的理论物理课。在三年级,“固体物理引论”是“物理金属学”的先行课。在德国,前者常以 C. Kittel 的教科书^[1,1]作为基础。

本书建立在固体物理学(如 Kittel 的教科书)所讲述的材料的基础之上,因此没有必要包括晶体学、金属电子理论等基本概念。本书与其它金属学教科书的一个不同之处是,本书把固体物理的基本原理作为读者已经熟悉的内容,而一般的金属学教科书则在一个比较初级的水平上包括这些基础内容。后者是为那些在德国大学中从一年级开始就学习冶金课程的学生用的。举例来说,原先在 Göttingen 采用的 Cottrell 的书^[1,2],在总共十五章的前七章中,叙述了量子力学引论、周期系统、晶体键合理论、晶体结构、金属电子理论、热力学、统计力学等内容;而本书则认为读者已具备了在 Kittel^[1,1]一书水平上的这些学科的知识,而把这些知识进一步应用于金属问题中。本书除适用于前面所提到的那些刚跨入冶金事业的物理系学生以外,也可以供那些冶金工作者使用,他们

在毕业后进修过程中已经学过固体物理而现在要为自己的专业课程加深物理基础知识.我感到直到目前为止还没有有一本合适的书,至少在德国是这样. Paul Shewmon 的书^[1,3]起源于1963—1964年间在 Göttingen 举行的客籍讲座,它对金属学的某些部分是好的导引.上述这本书以及1965—1969年当 Erhard Hornbogen 在 Göttingen 期间与他所进行的许多讨论,对编写本书起了相当大的推动作用.

与 Göttingen 侧重物理的金属课程平行的还有实验课.在开始实验以前,要求学生先学习一个专门写的讲义,并在一系列的辅导课中进一步加以阐明.研究金属的最重要的实验方法已有导论性书籍出版^[9,3].虽然实际实验步骤已在这些教材中有很好的描述,但感到仍有必要在本书中介绍冶金中所用的某些技术的原理.在本书第二章内包括了对于物理及固体物理工作者不太熟悉的方法或者是在以后的章节中要经常引用的一些内容.在学习后面的章节以前,不用把第二章全部学完.最好是,当对某一特定的实验方法需要了解更详细的情况时,再回过头来翻阅第二章.

有关进一步的情况可以学习文献.为了使读者比较容易地从数量巨大、往往令人困惑的原始文献中找到门径,我作了很大努力,举出近年来发表的某些文献,这些文献对本学科给出了一个很好的评述,并且是严格认真地处理的.因此,我不可能一个个地按年代顺序地介绍所有作者的贡献.在这个问题上,我想原作者是可以谅解的,因为本书是一本教科书而不是评述文章的汇编.本书的目的是通过定量叙述的物理论述,引导读者去掌握冶金学的基本方面,以及借助于适当的参考文献给读者一个有关冶金现象的最新物理诠释.

在实现这个计划的过程中,我得到了 Göttingen 大学几代学生的协助,特别是得到了一组紧密合作的同事们的协助.物理系毕业生 J. Dönch、H. Steinhardt 博士、讲师 W. Schröter 博士和物理系毕业生 R. Wagner 对课文进行了审慎的阅读,并提出了许多改进的建议.此外,朋友们和同事们阅读了与他们从事研究的专

业领域有关的章节，并提出了建设性的评论意见。我要特别感谢 Hermann Schmalzried 教授、Wolfgang Pitsch 教授、Helmut Alexander 教授、Jörg Diehl 博士、Theodor Hehenkamp 教授、Reiner Labusch 教授、Günther Petzow 博士以及 Barry Mordike 博士。在 Dönch 先生的指导下，Baatz 夫人、Linke 夫人、Hahn 夫人、Kuduz 先生和 Roth 先生在制图方面给予了宝贵的帮助。Andresen 夫人、Bartels 夫人、Bauer 夫人和 Straub 夫人负责为原稿打字。对所有这些人我表示衷心的感谢。

P. 哈森

Göttingen, 1974 年 8 月

常 用 符 号

A	波的振幅, 单位距离上位错应力的幅度	E_L	位错的线能量
a	点阵参数, 切应变	$\hat{E}$	杨氏模量
$\dot{a}$	应变速率	$\mathcal{E}$	电场强度
a_i	组元 i 的活度	EN	电负性
B	位错摩擦系数	e	应变能密度
b	Burgers 矢量	e/a	每原子的电子数
c	四方晶胞的高 (c/a 轴比), 光速	F	自由能
c_i	组元 i 的体积浓度	f	一个原子的散射振幅, 单位体积的自由能, 自由度的数目
c_j	单位长度上的割阶数	ℓ	相关因子
c_V	点阵空位分数	G	Gibbs 自由能, 切变模量
c_I	间隙原子分数	$\mathbf{g}$	倒易点阵矢量
c_D	双空位分数	H	焓, 磁场强度
c_t	横向声速	h	距离, Miller 指数
c_v	恒容比热	$\hbar$	Planck 常数除以 2π
D	扩散系数	I	强度, 电流
$\tilde{D}$	与浓度有关的互扩散系数	Im	复数的虚部
D_L	点阵扩散系数	J	通量
D_G	晶界扩散系数	j	通量密度
D_s	表面扩散系数	K	力, 反应速率常数
d	(原子的) 距离, 晶粒尺寸	$\mathbf{k}$	波矢
ds	线元	k	Boltzmann 常数, Miller 常数
E	内能	k_0	分配系数
E_F	费米能	k_y	Petch 参数
$\bar{E}$	单位面积的能量		

k_z	氧化速率参数	T_m	熔点
L	潜热, 磁畴尺寸, 位错平均自由程	t	时间, 厚度
l	长度, Miller 指数	U	电压, 位错运动的激活能
M	质量, Taylor 因子, 超点阵周期	u	位移, 振动能
M_{ij}	Onsager 迁移率参数	V	体积, (静电) 势
m	原子质量, 液相线斜率	v	速度
m'	应变速率灵敏度	W	功
m^*	电子有效质量	w	位错的分解宽度
m_s	Schmid 因子	X	体积分数
N	原子数目, 位错密度, 周期表中的族序号, 循环数	x	坐标
n	平面的法线	y	坐标
n	最近邻数目, 组元数	Z	配分函数, 离子电荷
n_i	组元 i 的原子数	z	坐标
P^{AB}	AB 偶的几率	α	角
p	声子波矢	α_m	第 m 层的短程有序度
p	压强	β	角, 亚稳分畴分解浓度起伏周期长度
Q	晶界运动的激活能	Γ	跳跃频率
Q^*	输运热	γ	层错能
q	截面	γ_i	组元 i 的活度系数
R	速率	Δ	角
Re	复数的实部	δ	尺寸失配, 晶界厚度
r	位置, 距离, 相的数目	ϵ	应变, 偶互换能
r_0	原子半径	η	(切变) 模量亏损, 晶界(扩散)因子
S	熵, 层间距	ζ	位错芯的宽度
s	倒易空间中的距离 (由 g 得到), 长程有序度	Θ	角, Debye 温度, 加工硬化系数
T	绝对温度	κ	波矢差

κ	梯度能系数	ρ_{el}	电阻率
L	滑移线长度参数	ρ_m	质量密度
λ	波长, 角	σ	应力, 电导率
μ	线性吸收系数	τ	弛豫时间, 切应力
μ_i	组元 i 的化学势	Φ	复散射振幅
ν	频率, 泊松比	φ	角, 统计散射振幅
ν_i	组元 i 的摩尔分数	χ	角
ν_0	冲击频率	ψ	波函数
ν_v	空位跃迁频率	Ω	原子体积
ξ	消光距离	ω	角频率, 能量 E 的状态数
ρ	位错线元密度		

单 位 换 算

$$1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m} = 1\text{W} \cdot \text{sec} = 0.24 \text{ cal}$$

$$1\text{eV/atom} = 23 \text{ kcal/mol} = 96 \text{ kJ/mol} = R \cdot (11600 \text{ K})$$

$$R \approx 2 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}$$

$$1 \text{ kgf/mm}^2 \approx 10 \text{ megN/m}^2 = 10^8 \text{ dyne/cm}^2 \approx 7 \times 10^3 \text{ psi} \\ = 10^7 \text{ pascal}$$

目 录

为中文版写的前言	v
为英文版写的前言	vi
原书序言	vii
常用符号	x
单位换算	xii
第一章 导论	1
第二章 对金属进行物理研究的实验方法	3
2.1 表面的显微观察	3
2.2 透射型电子显微镜 (TEM)	7
2.3 X射线的漫散射	15
2.4 场离子显微镜 (FIM)	19
2.5 热分析	21
2.6 力学试验方法	23
2.7 研究滞弹性	27
2.8 Mössbauer 效应	29
2.9 极射投影	32
第三章 显微结构和相, 晶界和相界	35
3.1 有关定义	35
3.2 晶界的结构	38
3.3 晶界能及其测量	43
3.4 相间界面	46
第四章 凝固	48
4.1 均匀成核过程	48
4.2 非均匀成核过程	50
4.3 晶体长大	50
4.4 单晶体生长和位错的起源	53

4.5	在凝固时溶入的溶质原子的分布	55
4.6	共晶凝固	64
第五章	合金热力学	69
5.1	平衡条件	69
5.2	理想及规则二元溶体的统计热力学	71
5.3	测定混合能与活度	75
5.4	更高级的溶体模型	77
5.5	从溶体模型推导二元相图	78
5.6	自由能与二元相图	82
5.7	三元相图	87
第六章	金属相的结构和理论	92
6.1	两个重要的二元系	92
6.2	纯金属的结构和弹性不稳定	100
6.3	Hume-Rothery 相及合金中的电子	108
6.4	由原子尺寸决定合金相	119
6.5	正常价化合物	127
第七章	原子的有序排列	129
7.1	超点阵	129
7.2	不完全有序,有序度	133
7.3	有序畴及有序畴界	140
7.4	有序化动力学	144
第八章	扩散	150
8.1	具有恒定扩散系数的恒温扩散	150
8.2	扩散的各种原子机制	152
8.3	D 随浓度而变的扩散	159
8.4	界面内的扩散及沿位错的扩散	167
8.5	电迁移及热迁移	172
8.6	金属的氧化	175
第九章	沉淀	177
9.1	沉淀的成核过程	178
9.2	沉淀长大的速率方程	185
9.3	Ostwald 成熟	189

9.4	亚稳分畴分解	190
9.5	不连续沉淀及共析分解	195
9.6	时间-温度-转变图(TTT)	198
第十章	点缺陷——特别是由淬火和辐照产生的点缺陷	200
10.1	空位平衡浓度的测定	200
10.2	过剩空位的淬火和退火	204
10.3	高能粒子辐照的效应	209
10.4	辐照以后的恢复阶段	212
10.5	反应堆材料的辐照损伤	214
第十一章	线缺陷——位错	217
11.1	位错的拓扑性质	217
11.2	位错的弹性理论	224
11.3	晶体中的位错	233
11.4	位错动力学	241
第十二章	范性形变、加工硬化和断裂	243
12.1	范性切变的晶体学	243
12.2	滑移与位错运动	247
12.3	流变应力和加工硬化	250
12.4	动态恢复过程——交叉滑移和攀移	255
12.5	多晶体的形变, 形变织构	258
12.6	晶界滑动和超范性	265
12.7	循环形变和疲劳	270
12.8	在小拉伸应变下的断裂——“脆性断裂”	275
第十三章	马氏体转变	280
13.1	机械孪生	280
13.2	马氏体转变的特征	283
13.3	马氏体转变的晶体学	286
13.4	马氏体相界	291
13.5	马氏体的成核过程	293
13.6	钢的硬化	296
第十四章	合金硬化	299
14.1	固溶硬化	299

14.2	位错的锁定与解锁·····	309
14.3	沉淀硬化·····	313
14.4	弥散硬化及纤维强化·····	317
第十五章	再结晶·····	321
15.1	有关定义·····	321
15.2	初次再结晶·····	322
15.3	晶粒长大·····	328
15.4	再结晶织构·····	338
15.5	二次再结晶(晶粒长大)·····	340
参考文献	·····	341
校后记	·····	349

第一章 导 论

既然金属是固体的一类,于是就自然地产生这样的问题:金属学中有哪些方面是现在还没有包括在固体物理学的范围之内?如果以 Kittel 的书作为依据,那末至少有一个基本的冶金学概念是固体物理学家所不熟悉的.金属学把金属和金属“混合物”即合金的性质与它们的显微结构联系起来.虽然固体物理学建立在所有原子都占据三维点阵的各有关位置的单晶晶体结构上,但金属学却考虑到,排列的完全规律性往往只局限于微观区域以内,而任一微观区域的排列规律性不同于与它相邻的微观区域的排列规律性.换句话说,在一块宏观的金属上,叠加有另一种称为“显微结构”的图样,它比构成固体物理学的基础的晶体结构要粗得多.

事实上,金属的许多性质,特别是那些在工艺上重要的性质,是取决于这种显微结构的.从力学工程的观点看来最为重要的性质就是强度,而强度则是强烈地受显微结构的影响,它是一个(但决不是唯一的一个)对显微结构敏感的性质.为了定义“强度”并给予它某种物理意义(第十二章、第十四章),我们必须首先考查金属的显微结构并给它以定量的描述(第三章、第四章、第十一章、第十三章、第十五章等).

固体物理学与金属学之间的第二个差别是,前者考虑简单的、纯净的材料,而后者关心的是合金.物理学家倾向于认为材料性质对成份的依赖关系是一种化学现象.然而,认为合金的成份一经给定,它的性质就确定了,这种看法是完全不正确的.举例来说,含碳量为 $\frac{1}{3}\%$ 的钢的硬度 HV(参阅 2.6.3 节)可以从 10^9 变到 $7 \times 10^9 \text{N/m}^2$,视材料经过怎样的热处理而定.热处理改变碳在铁中的分布,从而改变了微观结构,也就改变了力学性质.实际形

成的分布状态取决于合金系的热力学和动力学,因此,也就取决于描述能量、熵以及几何形状的几个参数. 这些内容将在研究合金中的典型原子组态(例如在第七章、第九章)以前进行讨论,也就是在第五章、第八章、第十章中讨论. 原子分布的热力学和动力学实际上已属于物理化学的范畴,也正是从物理化学出发, Gustav Tammann 于 1906—1930 年期间在 Göttingen 发展了物理金属学. 物理学家倾向于探究原子性的根源,在金属的情况下,他们倾向于探究决定金属系统的热力学和动力学的能量项的电子理论解释. 沿着这条思路的理论在第六章中论述,可是考虑到多粒子、多组元系统理论的现状,热力学本身能够更好地给出这种知识,并且可以更好地用实验检验,所以在第五章中比较详细地讨论了热力学.

本书的构思是引导读者从比较简单的金属现象开始进而理解比较复杂的金属现象,并从第三章的显微结构这一中心概念出发对这些金属现象给以某种物理意义. 学物理的人在使用这本书时,应当竭力使自己掌握那些初看起来可能是枯燥无味的课题,例如化学热力学或位错理论. 本书的逻辑结尾是讨论金属学中一个主要问题,这就是关于金属的力学硬化(以及再结晶时的逆过程,第十五章). 按照我们在 Göttingen 的长期坚持的目标,除了力学硬化以外,自然要再增加两章:一章是铁磁材料的硬化,另一章是超导体的硬化^[14,11]. 在这两类材料中,硬化过程产生了更多的重要性能,例如,应用于永久磁铁的性能以及能在磁场中载运大电流的超导体的性能. 然而,这两章需要的新概念和基础知识太多,对于这本引论性课程的书来说已超出了范围. 不过我相信,人们对铁磁材料和超导体领域内新的金属学发展的普遍兴趣会不断增长,在可预见的将来,在另一卷中讨论这个问题是恰当而应该的.