



普通高等教育教学参考书

PUTONG GAODENG JIAOYU JIAOXUE CANKAOSHU

# 金属学原理

(第2版)

余永宁 编著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

014009290

TG11  
29-2

介 简 容 内

本书共分11章，第1、2、4、5章为总论，第3章为金属的晶体结构，第6、7、8、9、10、11章为金属的力学性能、物理性能、化学性能、热处理、金属的腐蚀与防护。本书可作为高等院校材料科学与工程、金属材料工程、金属材料成型工程、金属材料加工工程、金属材料表面处理工程、金属材料分析工程、金属材料检测工程等专业的教材，也可供从事金属材料工作的工程技术人员参考。

# 普通高等教育教学参考书

# 金属学原理

(第2版)

余永宁 编著

ISBN 978-7-2024-0202-8  
 冶金工业出版社  
 北京 100029

I. ①金... II. 余... III. 金属学—高等学校—教材  
 V. ①TG11  
 中国版本图书馆CIP数据核字 130292号



出版人：余永宁  
 地址：北京北四环中路114号  
 电话：(010) 64021332  
 网址：http://www.cmpip.com.cn  
 责任编辑：宋永刚、李永刚、王玉山  
 ISBN 978-7-2024-0202-8  
 冶金工业出版社发行：各地新华书店经销  
 2000年1月第1版，2013年10月第2版，2013年10月第1次印刷  
 710mm×287mm；63.2印张；3020千字；999页  
 160.00元

北京  
 冶金工业出版社  
 2013



北航 C1695447

TG11  
29-2

082800110

## 内 容 简 介

本书共分11章。第1、2、4、5章论述了晶体材料的结构,包括完整理想结构及结构的点缺陷、线缺陷、面缺陷和体缺陷;第3章讨论了材料中各相之间平衡的热力学关系——相图;第6章讨论了材料动力学的一个重要基元过程——原子扩散;第7章概述了相变的基本理论;第8章和第10章分别讨论了凝固过程和固态转变过程;第9章和第11章分别讨论了材料在受力发生塑性变形的结构变化规律和从塑性变形后的不稳定态恢复到稳定态的过程——回复和再结晶。

本书可用作本科生、研究生和从事材料科学与工程研究工作的人员的参考读物。

金属学原理

(第二版)

### 图书在版编目(CIP)数据

金属学原理/余永宁编著. —2版. —北京:冶金工业出版社, 2013. 10  
普通高等教育教学参考书  
ISBN 978-7-5024-6262-8

I. ①金… II. ①余… III. ①金属学—高等学校—教材 IV. ①TG11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 243869 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号, 邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 宋良 李臻 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6262-8

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2000年1月第1版, 2013年10月第2版, 2013年10月第1次印刷

210mm×297mm; 63.5印张; 2050千字; 999页

160.00元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

## 第2版前言

《金属学原理》第1版作为金属材料专业的教材于2000年正式出版，是普通高等教育“九五”国家级重点教材。出于拓宽专业面的需要，目前许多学校的材料科学与工程专业将相应的专业基础课程更名为“材料科学基础”。不过，以金属材料为主体的高校，该专业基础课程的内容仍以金属学原理为主。因此，应冶金工业出版社邀请，作者编写了《金属学原理》第2版，以适应学科发展的需要，方便有关专业的师生更好、更深入地了解金属学原理。本书内容仍以金属材料为主，其中很多原理也适用于一些非金属材料。本书主要读者为金属材料专业的高校学生，从事金属材料研究工作的专业技术人员，以及讲授本课程的高校教师。

本书大部分内容经过重新编写，相对于第1版增加了不少的新内容，有关介绍也更为深入和详尽，因此篇幅增加很多。第1章把晶体学点群和空间群纳入正文，并较详细地介绍了晶体取向和取向分布的描述（包括极图、反极图、欧拉角和欧拉空间、罗德里格斯矢量和罗德里格斯空间、宏观织构与微观织构等）。第2章增加介绍离子晶体结构和准晶结构。第3章增加多元相图的简介，讨论了相图的几何关系，简单介绍了纳米颗粒中的两相平衡，在相图热力学与相图计算中增加了计算例题。第4章增加了有序合金中的点缺陷和线缺陷的讨论。第5章详细讨论晶界及相界的几何理论（包括 CSL、DSC 点阵、O 点阵和取向关系）；广泛讨论界面迁移的驱动力、迁移率及溶质原子和第二相颗粒对界面迁移的影响；介绍多晶体中的晶界特征分布和取向连接性。第6章对有序合金中的扩散机制和相关系数进行了更详尽的讨论，并讨论了 Kirkendall 面的稳定性、不可逆过程热力学与扩散、外驱动力与扩散；较详细讨论了快速扩散通道；简单介绍了多重扩散偶的应用。因为“凝固”、“固态转变”有很多共同的基本理论，所以新辟了第7章“相变理论概述”，来概括转变的共同理论，其中一些理论如转变动力学也适用于“再结晶转变”。主要内容包括相变驱动力、经典形核和长大理论、相变动力学、第二相颗粒的竞争粗化（Ostwald 熟化）。第8章讨论金属和合金的凝固，对移动界面形貌的稳定性、枝晶生长动力学作了较详细的讨论；提供包晶合金凝固的一些新资料；介绍触变行为与半固态成型的基本概念。第9章对形变孪晶的形成机制及影响因素、多晶体变形的组织结构、两相合金的塑性变形作了详细讨论。在第10章加大了对调幅分解的讨论篇幅，增加了马氏体转变（包括转变晶体学唯象理论、热力学、动力学、TRIP 效应、形状记忆效应和伪弹性等）、贝氏体转变（包括贝氏体铁素体、碳化物脱溶沉淀和碳化物晶体学、转变热力学和动力学、贝氏体转变机制不同观点的简述

等)的内容。第11章对再结晶后的晶粒长大(包括正常长大和非正常长大)、动态再结晶都作了详细的讨论;特别是介绍和讨论各种连续再结晶机制与过程。

不同章节中,某些概念可能重复出现,某些内容也会发生相互穿插,如何安排内容的先后次序成为值得商榷的问题。例如,结构缺陷中讨论位错攀移以及界面迁移时都涉及扩散问题,而讨论扩散也需要关于晶体结构的知识。安排内容的先后次序时,依照重要性次序来安排,即先讨论晶体缺陷,再讨论扩散。又如,各种转变都会涉及界面(包括相界面)的迁移问题,虽然各种情况下界面迁移的驱动力不同,界面的结构也不相同,但是它们的迁移都具有一些相类似的规律,所以,把同相界面迁移的主要理论放在“界面”一章讨论,而异相界面迁移大都涉及扩散,将其放在“相变概论”中讨论。在其他地方遇到界面迁移时,再根据其具体特点加以补充。诸多事例不一一叙述。

本书正文中编入了为数不少的例题,以帮助读者准确理解其内容。同时,以章为单位提供了一定数目的练习题,以供读者解答和研究。

材料科学所涵盖的知识面非常广泛,专业知识博大精深,并且涉及广泛的基础知识。作者深感难以全面掌控,更不敢称全面精通。故此,本书内容难免因作者对所选文献内容的理解有误或不足而出现讹误,在此诚请读者批评指正。

作者编写本书,一来是信守与冶金工业出版社的约定,二来将其作为较系统地重新学习和总结材料学科的专业理论和新成果,并借此与同行们进行交流。有这样的机会,作者内心甚感欣慰。不过,作者完稿后回头看时,总感觉存在诸多不满意之处,为此内心有些惶恐。在此,作者将本书权作考试答卷交稿,唯盼有个合格的分数。对于要求学习更深一步的读者,作者诚心建议他们能够进一步阅读一些专著和专题综述。

本书涉及的内容绝大部分都是引自有关学者的工作成果,各章末尾列出了所参考的主要文献,但是并没有将全部的参考文献一一列出。在此,对所有列出的和省略的参考文献的作者致以深深的感谢。

本书的出版,得到了教育部本科教学工程——专业综合改革试点建设经费和北京科技大学教材建设基金的资助,北京科技大学教务处、材料科学与工程学院对本次修订给予了热情鼓励和大力支持;孟利博士协助查找了有关文献,特此一并致谢。

余永宁

2013年2月

于北京科技大学

## 第1版前言

本书是在我校（北京科技大学）金属材料与热处理专业的金属学课程自编教材的基础上编写而成的。我校金属材料与热处理专业的金属学课程十多年来都使用自编教材，并在使用中边讲授边修改，故全书经过了十多次使用和三次以上的修改，本书即最新完成的修改版。

本书主要讨论金属材料科学与工程的基础知识和基础理论。通过学习，可使学生了解金属材料科学与工程的基本概念和方法。金属材料的基础知识和理论在近十多年来有很大发展，本书在编写中尽量摒弃旧的和不确切的概念和理论，采用新的和较准确的概念和理论。

本书所涉及的数学和物理知识，一般都没有超出学生在大学基础课程中的学习范围。但是，由于“金属学”课程新概念比较多，对初学者有一定的难度，因此在使用本书时应根据不同的对象和不同的要求，按三个层次进行选用：其一是只要求了解基本概念并知道这些概念的应用，这就可以避开其中大部分数学的描述和一些深层次的内容，这是最基本的要求；其二是在上述的基础上还需要了解基本概念的物理和数学根据，了解有关问题建立数学模型思路，这就需要选读一些有关数学描述的内容；最高层次的要求是应用基本概念和基本理论去分析和解决一些简单问题，这就要求通读全书并进一步选读有关参考读物。

本书每章都有一定数量的练习题。练习题大体分为三种类型：第一种是通过做练习题使读者掌握金属材料科学与工程的一些基本数据及其数量级；第二种是通过做练习题帮助读者掌握基本概念和基本理论；第三种是需要读者通过思考和分析才能作出解答的，通过做这类练习题可提高读者的自学能力以及分析问题和解决问题的能力。读者可根据自己的要求选做适当的练习题。

现在正进行的高等教育改革，要求加强基础教育，拓宽专业面，着重培养学生独立获取知识的能力。在编写本书的过程中，编者也力求做到这一点。本书的分量是按120学时编写的，在新的“金属材料工程”专业中，可能授课学时有所减少，但本书仍可作为这一专业的专业基础课程教材或主要参考书。

在本书的编写和修改过程中，沈宝莲、贾成厂、朱国辉提出了很多宝贵意见，陈楠、吴勇等也做了不少工作，编者在此向他们一并表示感谢。

尽管编者在编写本书时努力注意概念准确和理论正确，但是由于水平所限，难免有错漏之处，诚恳希望读者给予指正。

编者  
1999年6月

# 符 号

本书中尽量使用以下共同符号，个别情况在所在文本加以说明。

$A$	面积	$m^2$
$A$	变换矩阵	
$a, b, c$	点阵基矢	$m$
$a_i$	$i$ 组元的活度	
$a$	热扩散系数	$m^2/s$
$B$	在界面的任意线所截的位错净柏氏矢量	$m$
$b$	位错的柏氏矢量	$m$
$C$	在热力学体系中的组元数	
$c_i$	$i$ 组元体积浓度	$kg/m^3, mol/m^3$
$c_p$	等压热容	$J$
$D; D$	扩散系数; 扩散系数张量	$m^2/s$
$D^B$	晶界扩散系数	$m^2/s$
$D^D$	位错扩散系数	$m^2/s$
$D^S$	表面扩散系数	$m^2/s$
$D^L$	晶界扩散系数	$m^2/s$
$D_i$	$i$ 组元禀性扩散系数	$m^2/s$
$\tilde{D}$	互扩散系数 (化学扩散系数)	$m^2/s$
$*D$	在纯材料中的自扩散系数	$m^2/s$
$*D_i$	在多元系中 $i$ 组元自扩散系数	$m^2/s$
$d$	多晶体的晶粒尺寸	$m$
$\mathcal{E}; E; E$	能; 摩尔能; 单位长度位错能	$J; J/mol; J/m$
$E$	杨氏模量	$Pa = J/m^3$
$E_{el}; E_{co}$	单位长度位错弹性应变能、核心能	$J/m$
$f_0$	在扩散过程中原子跳动相关因子	
$F$	自由度	
$F; f$	力; 单位长度的力	$N; N/m$
$G; G; g$	吉布斯自由能; 摩尔自由能; 单位体积吉布斯自由能	$J/mol; J/m^3$
$H; H; h$	焓; 摩尔焓; 单位体积焓	$J/mol; J/m^3$
$h$	高度; 界面台阶高度	$m$
$h$	普朗克常数	$6.626 \times 10^{-34} Js$
$I$	单位张量	
$J; J_i$	流量; $i$ 组元流量	$kg/(m^2 \cdot s), mol/(m^2 \cdot s)$
$K_0$	压缩系数	$N/m^2, Pa$
$k$	热导率	$J/(m \cdot s \cdot K)$
$K$	速度常数; 反应速度常数	
$k_B$	玻耳兹曼常数	$1.38 \times 10^{-23} J/K$
$L; L_{ij}$	Onsager 耦合张量; 对应的系数	$kg/(m^2 \cdot s \cdot N), mol/(m^2 \cdot s \cdot N)$

$M; \mathbf{M}$	迁移率; 迁移率张量	$\text{m}/(\text{s} \cdot \text{Pa})$							
$M_i^0$	$i$ 组元的相对原子或分子质量	$\text{kg}/N_A$							
$m$	质量	$\text{kg}$							
$N_A$	阿伏伽德罗数	$6.023 \times 10^{23}$							
$n$	单位体积原子数	原子数/ $\text{m}^3$							
$n_i$	$i$ 组元的摩尔数								
$\mathbf{n}$	法线单位矢量	$\text{m}^{-1}$							
$p$	压力	$\text{Pa} = \text{J}/\text{m}^3$							
$P$	几率								
$Q; Q$	激活能; 摩尔激活能	$\text{J}; \text{J}/\text{mol}$							
$Q$	热量	$\text{J}$							
$q$	电荷	$\text{C}$							
$R$	曲率半径	$\text{m}$							
$\mathbf{R}$	层错矢量; 反相畴矢量	$\text{m}$							
$r$	距离, 半径	$\text{m}$							
$\mathbf{r}$	相对原点的位置	$\text{m}$							
$S; S; s$	熵; 摩尔熵; 单位体积熵	$\text{J}/\text{K}; \text{J}/(\text{K} \cdot \text{mol}); \text{J}/(\text{K} \cdot \text{m}^3)$							
$s$	界面台阶矢量	$\text{m}$							
$\mathbf{T}$	位移矩阵								
$T$	热力学温度	$\text{K}$							
$T_m$	熔点温度	$\text{K}$							
$t$	时间	$\text{s}$							
$\mathbf{t}$	位错切向 (正向) 单位矢量	$\text{m}$							
$\mathcal{U}; U; u$	内能; 摩尔内能; 单位体积内能	$\text{J}; \text{J}/\text{mol}; \text{J}/\text{m}^3$							
$u_{ij}$	$i$ 原子与 $j$ 原子间的结合能	$\text{J}/\text{原子}$							
$\mathbf{u}$	位移场	$\text{m}$							
$\mathcal{V}; V_m; V_{at}$	体积; 摩尔体积; 原子体积	$\text{m}^3$							
$\mathbf{v}; v$	速度; 速率	$\text{m}/\text{s}$							
$v$	比体积	$\text{m}^3$							
$W; w$	功; 单位体积功 (应变能密度)	$\text{J}; \text{J}/\text{m}^3$							
$w$	位错宽度	$\text{m}$							
$w_i$	$i$ 组元的质量浓度								
$x_i$	$i$ 组元的摩尔浓度 (原子浓度)								
$z; z_c$	配位数; 临界晶核有效配位数								
$Z$	Zeldovich 因子	$\text{s}^{-1}$							
$\Gamma$	原子 (分子) 跳动频率	$\text{s}^{-1}$							
$\Gamma_i$	单位面积 $i$ 组元的吸附 (偏析) 量	$\text{mol}/\text{m}^2$							
$\Gamma$	位错线张力	$\text{J}/\text{m}$							
$\gamma$	切应变								
$\gamma_s; \gamma_b; \gamma_{SFE}$	比表面能; 比界面能; 层错能	$\text{J}/\text{m}^2$							
$\gamma_i$	$i$ 组元的活度系数								
$\delta$	界面有效厚度	$\text{m}$							
$\eta$ </tr <tr> <td><math>\boldsymbol{\varepsilon}; \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}</math></td> <td>应变张量; 应变张量分量</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>\varepsilon</math></td> <td>互换能; 尺寸错配</td> <td><math>\text{J}/\text{mol}</math></td> </tr> <tr> <td><math>\phi</math></td> <td>热力学势</td> <td></td> </tr>	$\boldsymbol{\varepsilon}; \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$	应变张量; 应变张量分量		$\varepsilon$	互换能; 尺寸错配	$\text{J}/\text{mol}$	$\phi$	热力学势	
$\boldsymbol{\varepsilon}; \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$	应变张量; 应变张量分量								
$\varepsilon$	互换能; 尺寸错配	$\text{J}/\text{mol}$							
$\phi$	热力学势								



$\varphi$	相的数目	
$\kappa^*$	梯度能系数	J/m
$\lambda$	波长	m
$\lambda$	扩散的缩放比例因子, $x/(4Dt)^{1/2}$	
$\rho$	密度; 位错密度	$\text{kg/m}^3$ ; $\text{m}^{-2}$
$\rho$	电阻率	$\Omega \cdot \text{m}$
$\nu$	泊松比	
$\nu$	原子振动频率	$\text{s}^{-1}$
$\nu$	晶界法线单位矢量 (第 5 章使用)	
$\mu$	弹性切变模量	$\text{Pa} = \text{J/m}^3$
$\sigma$ ; $\sigma_{ij}$	应力张量; 应力张量的分量	$\text{Pa} = \text{J/m}^3$
$\sigma_d$	电导率	$\text{m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$
$\mu$ ; $\mu_i$	化学势; $i$ 组元化学势	J/mol
$\Theta$	硬化率	$\text{Pa} = \text{J/m}^3$
$\theta$	取向差角	( $^\circ$ ); rad
$\zeta$	相 (或物质) 的相对量	
$\Omega$	交互作用参数	J/mol

## 冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
中国冶金百科全书·金属材料	编委会 编	229.00
合金相与相变(第2版)(本科教材)	肖纪美 主编	37.00
材料的结构(本科教材)	余永宁 等编	49.00
金属学原理习题解答(本科教材)	余永宁 编著	19.00
物理化学(第4版)(本科教材)	王淑兰 主编	45.00
冶金物理化学(本科教材)	张家芸 主编	39.00
冶金与材料热力学(本科教材)	李文超 等编	65.00
冶金工程实验技术(本科教材)	陈伟庆 主编	39.00
钢铁冶金原理(第4版)(本科教材)	黄希祐 编	82.00
现代物理测试技术(本科教材)	梁志德 等编	29.00
材料现代测试技术(本科教材)	廖晓玲 主编	45.00
无机非金属材料研究方法(本科教材)	张 颖 等编	35.00
金属材料学(第2版)(本科教材)	吴承建 等编	29.00
金相实验技术(第2版)(本科教材)	王 岚 等编	32.00
金属学与热处理(本科教材)	陈惠芬 主编	39.00
相图分析及应用(本科教材)	陈树江 等编	20.00
传输原理(本科教材)	朱光俊 主编	42.00
耐火材料(第2版)(本科教材)	薛群虎 主编	35.00
金属材料工程实习实训教程(本科教材)	范培耕 主编	33.00
金属材料及热处理(高职高专教材)	王悦祥 主编	35.00
工程材料基础(高职高专教材)	甄丽萍 主编	26.00
稀土永磁材料制备技术(高职高专教材)	石 富 编著	29.00
金属热处理生产技术(高职高专教材)	张文丽 主编	35.00
稀土金属材料	唐定骧 等著	140.00
高纯金属材料	郭学益 著	69.00
金属基纳米复合材料脉冲电沉积制备技术	徐瑞东 等著	36.00
现代材料表面技术科学	戴达煌 等编	99.00
超细晶钢	翁宇庆 等著	188.00
一维无机纳米材料	晋传贵 等编	40.00
真空材料	张以忱 等编	29.00
镁钙系耐火材料	陈树江 等著	39.00



北航

C1695447

双峰检

# 目 录

<b>1 晶体学</b> .....	1
1.1 结晶状态及晶体的宏观特性 .....	1
1.2 点阵、晶体结构 .....	3
1.3 对称性, 空间变换 .....	5
1.3.1 坐标架变换 (操作) .....	5
1.3.2 对称变换 (操作) .....	10
1.3.3 点对称变换 (操作) .....	11
1.3.4 第一类操作和第二类操作的 联系和区别 .....	17
1.3.5 非点式对称变换 .....	19
1.4 晶系和布拉维点阵 .....	23
1.4.1 二维晶体点阵类型(二维晶系) ..	24
1.4.2 三维晶体点阵类型(三维晶系) ..	25
1.4.3 布拉维点阵 .....	28
1.5 点阵直线和点阵平面 .....	33
1.5.1 点阵直线指数 (方向指数) .....	33
1.5.2 点阵平面及平面指数 .....	35
1.5.3 六方(和三方)晶系的四轴坐标架 的方向指数及面指数 .....	37
1.5.4 晶带及晶带定律 .....	39
1.6 倒易点阵 .....	42
1.6.1 倒易点阵的定义 .....	42
1.6.2 正点阵的基矢间夹角与倒易点阵 基矢夹角之间的关系 .....	43
1.6.3 倒易点阵的基本性质 .....	44
1.6.4 由正点阵导出倒易点阵 .....	44
1.6.5 晶带与倒易面 .....	47
1.6.6 倒易矢量在晶体学中几何关系 的应用 .....	48
1.7 晶体投影 .....	52
1.7.1 球面投影 .....	52
1.7.2 极射赤面投影 .....	52
1.7.3 吴氏网和极网 .....	54
1.7.4 标准投影图 .....	56
1.8 晶体学点群 .....	59
1.8.1 群的概念及群的基本性质 .....	59
1.8.2 点群的描述和图示 .....	60
1.8.3 32种点群的导出 .....	61
1.8.4 11种劳埃群 .....	72

1.8.5 确定 (推导) 物体点群 的程序图 .....	72
1.9 空间群概念 .....	73
1.9.1 点式空间群 .....	74
1.9.2 非点式空间群 .....	75
1.9.3 空间群的推导方法简介 .....	76
1.9.4 空间群符号 .....	77
1.9.5 二维晶体学点群和平面群 .....	77
1.9.6 国际表简介 .....	79
1.9.7 按照对称性对晶体的分类 .....	81
1.10 晶体取向和取向分布的描述 .....	82
1.10.1 试样坐标架和晶体坐标架 .....	82
1.10.2 “理想取向”(密勒或 密勒-布拉维指数) 记号 .....	83
1.10.3 极图和反极图 .....	86
1.10.4 欧拉 (Eular) 角和欧拉空间 ..	90
1.10.5 以参考点阵某轴[uvw]旋转 $\theta$ 角 (角/轴) 表示晶体取向及 两晶粒间的取向差 .....	95
1.10.6 罗德里格斯 (Rodrigues) 矢量和 罗德里格斯空间 .....	97
1.10.7 宏观织构与微观织构 .....	104
练习题 .....	107
参考文献 .....	111
<b>2 晶体结构</b> .....	112
2.1 晶体结构分类和晶体结构符号 .....	113
2.2 原子 (离子)、分子堆垛和配位 .....	114
2.2.1 等径原子晶体的密排堆垛和 配位 .....	114
2.2.2 两种或多种不等径原子晶体的 堆垛和配位 .....	116
2.2.3 离子晶体的堆垛和配位 .....	117
2.2.4 共价晶体的堆垛和配位 .....	119
2.3 原子半径和离子半径 .....	119
2.3.1 金属原子半径 .....	120
2.3.2 离子半径 .....	121
2.3.3 共价半径 .....	125
2.3.4 范德华半径 .....	125
2.4 金属元素晶体结构 .....	126

2.4.1	面心立方结构	126	3.3.2	杠杆规则	194
2.4.2	密排六方结构	128	3.3.3	三元相图中各类平衡的空间 结构	194
2.4.3	体心立方结构	130	3.3.4	含稳定化合物的三元相图分割为 简单的三元系	201
2.4.4	简单立方结构	132	3.3.5	三元相图简例	202
2.4.5	金刚石 C 类型结构	132	3.3.6	三元相图截面和投影图的例子	214
2.4.6	周期表中各族元素在常态 (室温、 一大气压) 的晶体结构	134	3.4	多元相图	219
2.5	元素的同素异构结构	138	3.5	相图几何关系	221
2.6	端际固溶体	142	3.5.1	真实相图的坐标轴及常量的 选择	221
2.6.1	固溶体的类型	142	3.5.2	真实相图截面的一般几何规则	221
2.6.2	控制端际固溶体固溶度的因素	143	3.5.3	零相分数 (ZPF) 线	222
2.6.3	填隙 (间隙) 固溶体	146	3.5.4	连结线	222
2.6.4	固溶体的微观结构	147	3.6	相图热力学与相图的计算	224
2.7	金属化合物的晶体结构	148	3.6.1	溶体的吉布斯自由能函数的 表达式	225
2.7.1	Hume-Ruthery 相 (电子相)	148	3.6.2	图解法求化学势	226
2.7.2	间隙化合物	150	3.6.3	规则溶体模型	228
2.7.3	尺寸因素化合物	151	3.6.4	固态和液态平衡固相线和 液相线	230
2.7.4	有序固溶体	154	3.6.5	固溶度线与互溶间隙	233
2.8	离子化合物的晶体结构	159	3.6.6	简单共晶系相图	237
2.8.1	拉姆伯格规则 (Ramberg's Rule)	159	3.6.7	简单包晶系相图	239
2.8.2	鲍林规则 (Pauling's Rule)	160	3.6.8	过剩吉布斯自由能数值对 相图形貌的影响	239
2.8.3	氧化物的晶体结构	163	3.6.9	含中间相的二元系	240
2.9	硅酸盐结构特点	170	3.6.10	亚稳相图, $T_0$ 曲线	242
2.10	共价化合物晶体结构	170	3.6.11	相图计算方法	243
2.11	准晶	171	3.6.12	相图合成法	247
2.11.1	彭罗斯 (Penrose) 拼块及 准周期的描述	171	3.7	在纳米颗粒中的两相平衡	247
2.11.2	一维准晶	174	3.8	有关相图和热力学资料	249
2.11.3	二维准晶	174	练习题	249	
2.11.4	二十面体准晶相	175	参考文献	257	
练习题		176			
参考文献		177			
3	相图	178			
3.1	单元系	179			
3.2	二元系	181	4	点缺陷, 线缺陷	258
3.2.1	单相平衡和两相平衡	182	4.1	点缺陷	258
3.2.2	三相平衡	183	4.1.1	点缺陷的类型	258
3.2.3	恒压二元相图的中间相	184	4.1.2	纯组元晶体空位浓度	259
3.2.4	有序-无序转变以及磁性转变 在相图上表示	185	4.1.3	空位浓度的测量	260
3.2.5	包含各种平衡及化合物的 假想相图	185	4.1.4	空位形成能和空位形成熵的 估算	262
3.2.6	恒压二元相图举例	186	4.1.5	双空位	264
3.3	三元系相图	192	4.1.6	自间隙原子	264
3.3.1	三元系相图的成分表达	193	4.1.7	空位与溶质原子结合体	265
			4.1.8	在有序合金中的点缺陷	265

4.1.9 辐照产生的点缺陷 .....	272	6.2.2 挤列机制 .....	502
4.2 线缺陷 .....	273	6.2.3 协同机制 .....	503
4.2.1 位错理论发展的简述 .....	275	6.2.4 空位机制 .....	504
4.2.2 位错的几何特征 .....	275	6.2.5 间隙-置换互换机制 .....	504
4.2.3 位错的观察 .....	280	6.2.6 各种材料中的扩散机制 .....	504
4.2.4 位错的弹性性质 .....	282	6.3 无规行走理论、原子跳动过程与 扩散系数 .....	505
4.2.5 作用在位错线上的力 .....	291	6.3.1 无规行走与扩散系数 .....	505
4.2.6 位错运动 .....	303	6.3.2 在点阵中随机行走 .....	506
4.2.7 位错的起源和增殖 .....	321	6.3.3 相关因子 .....	507
4.2.8 位错塞积群 .....	326	6.3.4 扩散系数 .....	510
4.2.9 典型晶体中的位错 .....	328	6.4 互扩散和柯肯德尔(Kirkendall)效应 .....	518
4.2.10 位错和点缺陷交互作用 .....	362	6.4.1 互扩散 .....	519
练习题 .....	367	6.4.2 讨论扩散的坐标架 .....	519
参考文献 .....	369	6.4.3 禀性扩散和 Kirkendall 效应 .....	520
<b>5 晶态固体的表面和界面 .....</b>	<b>370</b>	6.4.4 Kirkendall 平面移动速度 $v_K$ .....	521
5.1 晶体表面 .....	371	6.4.5 Darken 公式 .....	522
5.1.1 表面能定义及热力学函数 .....	371	6.4.6 达肯-曼宁 (Darken-Manning) 公式 .....	523
5.1.2 表面结构 .....	379	6.4.7 Kirkendall 面的稳定性 .....	524
5.1.3 表面吸附及偏析 .....	382	6.4.8 扩散系数的综合比较 .....	526
5.2 固-固界面 .....	387	6.5 二元合金的扩散 .....	526
5.2.1 平移界面 .....	388	6.5.1 极稀溶液中置换溶质的扩散 .....	526
5.2.2 匀相界面 .....	389	6.5.2 在合金中溶剂和溶质原子的 扩散 .....	528
5.2.3 异相界面 .....	458	6.6 二元金属中间相的扩散 .....	530
5.3 多晶体和多相材料中的平衡 .....	470	6.7 不可逆过程热力学与扩散 .....	532
5.3.1 与表面相交的晶界与表面之间 的平衡 .....	470	6.7.1 不可逆过程热力学的基本假设 .....	532
5.3.2 多晶体中的晶粒平衡形貌 .....	470	6.7.2 恒温扩散的唯象方程 .....	534
5.3.3 多晶体中的晶界特征分布 (CBCD) .....	474	6.8 外驱动力与扩散 .....	537
5.3.4 多晶体的取向连接性 .....	477	6.8.1 附加飘移的修正 Fick 方程 .....	537
5.3.5 多相系统晶粒的平衡形貌 .....	478	6.8.2 Nernst-Einstein 关系 .....	538
练习题 .....	479	6.8.3 在离子导体中的带电离子扩散 .....	539
参考文献 .....	483	6.8.4 在金属中的电迁移 .....	539
<b>6 金属和合金中的扩散 .....</b>	<b>484</b>	6.8.5 在热梯度的物质扩散 .....	540
6.1 扩散方程 .....	484	6.8.6 在应力场中的物质扩散 .....	541
6.1.1 在各向同性介质的菲克定律 .....	484	6.9 沿捷径扩散(高扩散率)通道扩散 .....	542
6.1.2 与菲克定律类似的其他物理 定律 .....	485	6.9.1 沿晶界扩散 .....	543
6.1.3 在不同坐标系菲克定律的表达 形式 .....	486	6.9.2 沿位错扩散 .....	552
6.1.4 在各向异性介质中的菲克定律 .....	486	6.9.3 沿表面扩散 .....	553
6.1.5 扩散方程的解 .....	489	6.9.4 在多晶体及纳米多晶体中的 扩散 .....	555
6.2 扩散机制 .....	502	6.10 三元合金中的扩散 .....	558
6.2.1 间隙机制 .....	502	6.11 多相二元合金的扩散 .....	559
		6.12 “多重扩散偶”的应用 .....	560
		练习题 .....	563

参考文献 .....	567	8.2.3 凝固过程的溶质再分布 .....	646
<b>7 相变理论概述 .....</b>	<b>568</b>	8.2.4 区域提纯与区域致匀 .....	657
7.1 相变分类 .....	568	8.2.5 组分过冷 .....	658
7.2 相变驱动力 .....	570	8.2.6 移动界面形貌的稳定性 .....	661
7.2.1 纯组元相变的驱动力 .....	571	8.2.7 凝固的显微组织 .....	667
7.2.2 压力和曲率对平衡温度的影响 .....	571	8.2.8 枝晶动力学 .....	673
7.2.3 脱溶转变的驱动力 .....	572	8.2.9 枝晶臂间距 .....	682
7.2.4 合金中形成新相的可能成分范围 .....	573	8.2.10 单相凝固的 $G_L$ 和 $v$ 与微观组织形态之间的关系综合图 .....	685
7.3 不连续型(形核长大型)相变 .....	573	<b>8.3 多相合金凝固 .....</b>	<b>686</b>
7.3.1 形核的驱动力和核心成分 .....	574	8.3.1 共晶凝固 .....	686
7.3.2 亚稳平衡过渡相的形成 .....	576	8.3.2 包晶凝固 .....	702
7.3.3 均匀形核 .....	576	8.3.3 偏共晶凝固 .....	711
7.3.4 非均匀形核 .....	588	<b>8.4 铸锭的组织 and 偏析 .....</b>	<b>713</b>
7.4 核心的长大 .....	598	8.4.1 三个晶区的形成 .....	713
7.4.1 相界面结构与核心长大 .....	599	8.4.2 微观偏析和宏观偏析 .....	718
7.4.2 热传导控制的长大 .....	602	8.4.3 铸件中的孔洞和夹杂 .....	721
7.4.3 新相与母相成分相同时界面过程控制的长大 .....	604	<b>8.5 连续铸造和熔焊 .....</b>	<b>721</b>
7.4.4 新相与母相成分不相同时相界面迁移 .....	608	8.5.1 连续铸造 .....	722
7.4.5 热传导与物质扩散同时控制长大 .....	617	8.5.2 熔焊 .....	722
7.4.6 共格核心长大时共格的丧失 .....	618	<b>8.6 触变行为与半固态成型 .....</b>	<b>724</b>
7.4.7 长大时界面的稳定性 .....	618	<b>8.7 快速凝固技术 .....</b>	<b>728</b>
7.5 形核长大型相变动力学 .....	620	练习题 .....	730
7.6 竞争粗化, Ostwald 熟化 .....	625	参考文献 .....	731
7.6.1 扩散控制的粗化 .....	626	<b>9 晶体的塑性形变 .....</b>	<b>732</b>
7.6.2 板状或针状(圆柱状)颗粒的粗化 .....	629	9.1 晶体滑移 .....	732
7.6.3 界面源/阱控制的粗化 .....	630	9.1.1 各种晶体中的滑移要素(滑移系) .....	732
7.6.4 颗粒粗化的一般公式 .....	631	9.1.2 Schmid 因子, Schmid 定律 .....	733
7.6.5 经典平均场理论的局限 .....	631	9.1.3 等效滑移系与多系滑移 .....	737
7.6.6 共格应变及应力场对颗粒粗化机制和动力学的影响 .....	632	9.1.4 晶体在滑移时的转动 .....	740
7.6.7 粗化在整体脱溶过程的作用 .....	634	<b>9.2 晶体起始塑性形变及流变应力 .....</b>	<b>742</b>
练习题 .....	635	9.2.1 晶体起始塑性形变的分切应力估计 .....	742
参考文献 .....	638	9.2.2 温度和形变速率对晶体滑移流变应力的影响 .....	744
<b>8 金属和合金的凝固 .....</b>	<b>639</b>	9.2.3 Cottrell-Stokes 定律 .....	748
8.1 凝固的过冷与再辉 .....	639	<b>9.3 晶体应变硬化 .....</b>	<b>748</b>
8.2 固溶体凝固 .....	640	9.3.1 晶体应力-应变曲线 .....	748
8.2.1 分配系数 .....	640	9.3.2 变形各阶段的滑移分布和位错结构组态 .....	754
8.2.2 平衡凝固与非平衡凝固浅述 .....	645	9.3.3 应变硬化理论 .....	756
		<b>9.4 形变孪生 .....</b>	<b>760</b>
		9.4.1 孪晶几何 .....	761
		9.4.2 形变孪生和滑移的差别 .....	767

9.4.3 孪生的位错机制 .....	768	10.2.1 脱溶前期形成的 GP 区 .....	819
9.4.4 产生形变孪生的应力 .....	770	10.2.2 脱溶前期形成的其他过渡 亚稳相 .....	820
9.4.5 温度和层错能对形变孪生的 宽度的影响 .....	774	10.2.3 晶格缺陷在连续脱溶时的 作用 .....	824
9.4.6 孪生伴随的其他变形协调, 孪生与断裂的关系 .....	774	10.2.4 形核和长大初期的颗粒 尺寸变化 .....	826
9.5 不均匀变形的扭折带 .....	777	10.2.5 脱溶强化 (时效硬化) .....	827
9.6 多晶体变形的特征 .....	778	10.3 调幅分解 .....	828
9.6.1 多晶体变形的显微组织结构的 演化 .....	779	10.3.1 非经典形核理论-漫散界面 模型 .....	828
9.6.2 形变带和切变带 .....	782	10.3.2 Cahn-Hilliard 线性方程 .....	831
9.7 形变过程宏观组织 .....	784	10.3.3 Cahn-Hilliard 方程的改进 .....	834
9.8 硬化和回复与屈服现象 .....	785	10.4 无序-有序转变 .....	836
9.9 动态应变时效 .....	788	10.5 不连续反应-移动的两相界面 (MTPB) 上的反应 .....	839
9.10 包兴格效应 .....	788	10.5.1 共析转变 .....	839
9.11 晶界强化 .....	789	10.5.2 不连续脱溶 (胞状脱溶) .....	846
9.11.1 霍尔-佩奇 (Hall-Petch) 关系 .....	789	10.5.3 不连续粗化 .....	850
9.11.2 超细和纳米尺度的多晶体屈服 强度与晶粒尺寸的关系 .....	790	10.6 块形转变 .....	850
9.11.3 其他的力学性能与晶粒尺寸 的关系 .....	791	10.7 无扩散转变 .....	852
9.12 两相合金的塑性变形 .....	793	10.7.1 概述 .....	852
9.12.1 两个相的塑性都比较好的并且 两个相的相对量都相当的情况 .....	793	10.7.2 马氏体转变概述 .....	853
9.12.2 一个相的塑性较好另一个相 不易变形的情况 .....	794	10.7.3 马氏体转变的特征 .....	854
9.12.3 分散障碍点对位错滑移阻力的 一般情况 .....	794	10.7.4 马氏体转变晶体学唯象理论 .....	857
9.12.4 位错越过分散障碍颗粒的 情况 .....	796	10.7.5 滑动界面 .....	869
9.12.5 含不可变形的硬颗粒的基体 变形时的位错分布 .....	798	10.7.6 马氏体转变热力学 .....	871
9.13 形变织构 .....	799	10.7.7 马氏体形核 .....	873
9.13.1 多晶体变形织构 .....	799	10.7.8 马氏体相变动力学 .....	878
9.13.2 轧制织构 .....	800	10.7.9 应力和形变对马氏体转变的 影响 .....	883
9.13.3 纤维织构 .....	808	10.7.10 转变诱导塑性 (TRIP) .....	885
9.13.4 影响织构发展的因素 .....	809	10.7.11 形状记忆效应与伪弹性 .....	886
9.13.5 织构强化 .....	810	10.8 贝氏体转变 .....	890
9.14 残余内应力及弹性储存能 .....	811	10.8.1 贝氏体铁素体 (BF) .....	891
练习题 .....	814	10.8.2 贝氏体的中脊 .....	893
参考文献 .....	816	10.8.3 碳化物脱溶沉淀 .....	894
10 固态转变 .....	817	10.8.4 贝氏体转变热力学和动力学 .....	896
10.1 过饱和固溶体分解 .....	817	10.8.5 其他形态的贝氏体 .....	901
10.2 连续脱溶 .....	818	10.8.6 针状铁素体 .....	902
		10.8.7 贝氏体转变机制的不同观点 简述 .....	903
		练习题 .....	904
		参考文献 .....	905
		11 回复和再结晶 .....	906
		11.1 回复 .....	907

11.1.1 储存能的释放 ..... 908

11.1.2 物理和力学性能的回火 ..... 911

11.1.3 回火动力学的经验关系 ..... 912

11.1.4 回火过程组织结构的变化 ..... 916

11.1.5 第二相颗粒对亚晶长大的影响 ... 924

11.1.6 回火组织结构与力学性能的关系 ..... 924

11.2 单相合金的再结晶 ..... 924

11.2.1 再结晶基本规律 ..... 925

11.2.2 再结晶形核的一般特点 ..... 926

11.2.3 再结晶形核 (再结晶开始) 机制 ..... 927

11.2.4 再结晶核心的长大 ..... 932

11.2.5 再结晶整体动力学 ..... 933

11.2.6 退火孪晶 ..... 937

11.2.7 有序结构的再结晶 ..... 939

11.3 两相合金的再结晶 ..... 940

11.3.1 在形变前已经存在的第二相颗粒对再结晶的影响 ..... 940

11.3.2 脱溶与再结晶交互作用 ..... 945

11.4 再结晶后的晶粒长大 ..... 946

11.4.1 晶粒正常长大 ..... 946

11.4.2 晶粒非正常长大和二次再结晶 ... 957

11.5 再结晶织构 ..... 963

11.5.1 典型金属和合金的再结晶织构 ... 963

11.5.2 再结晶织构理论 ..... 966

11.5.3 晶粒长大时织构的发展 ..... 969

11.6 热加工过程及动态回复和动态再结晶 ..... 970

11.6.1 热加工变形的本构方程 ..... 970

11.6.2 动态回复 ..... 971

11.6.3 动态再结晶 ..... 973

11.7 连续再结晶 ..... 979

11.7.1 退火时第二相颗粒演化引起的静态连续再结晶 ..... 979

11.7.2 经大应变变量变形后退火发生的静态连续再结晶 ..... 980

11.7.3 几何动态再结晶 ..... 983

11.7.4 点阵逐渐转动的动态连续再结晶 ..... 984

11.7.5 扩展回复的连续再结晶特点 ... 985

11.8 热变形后的退火 ..... 985

11.8.1 静态回复 ..... 986

11.8.2 静态再结晶 ..... 986

11.8.3 亚动态再结晶 ..... 987

11.8.4 热变形后的晶粒长大 ..... 988

练习题 ..... 988

参考文献 ..... 989

索 引 ..... 990



# 1 晶 体 学

现代使用的材料绝大部分是晶态材料。晶态材料包括单晶材料、多晶材料、微晶材料和液晶材料等。我们日常使用的各种金属材料大部分是多晶材料。

人们对晶体的认识是从天然的晶体开始的。由于天然晶体具有规则外形和宏观对称性，因此，最初人们认为只有规则外形的天然矿物才是晶体。到了 20 世纪初，发现了晶体 X 射线衍射，使人们能从微观更深的层次上来认识和研究晶体，间接地证明了晶体中的原子（原子团、分子）的规则排列。现代更可以用高分辨率电镜直接观察晶体中原子的规则排列，图 1-1 是用高分辨率电镜（HREM）观察硅晶体（111）面的原子排列情况。现在已经明确知道，物质结晶状态的本质特征是：**结构基元**（可以是原子、分子或配合离子）在空间呈不随时间变化的规则的三维周期排列。这一本质特征决定了晶体的宏观、微观特征和物理性质。

人们在对晶体进行研究时总是把晶体的构造、生长和性质作为一个统一的综合问题来研究。通常用各种衍射方法、晶体化学方法、计算数学方法、对称性理论方法对理想晶体结构和实际晶体结构进行研究，在此基础上进一步研究晶体的生长、合成以及晶体物理问题。这些研究涉及分子生物、固体物理、金属学、矿物学及聚合物等广泛领域。对晶体结构以及晶体生长进行的综合研究，可以获得控制组分和实际结构的知识，从而可以用各种手段来控制晶态材料的性质，据此还能探索具有非常宝贵性质的新晶体。事实上，对晶体的综合研究已经使人们制成了并且正在发展一大批结构材料及功能材料。

从上面的叙述可知，晶体科学既是很多学科的基础，又是很多学科的边缘和交叉，它包含广泛的内容：（1）晶体几何学，研究晶体的外表几何形状及它们之间的规律性；（2）晶体结构学，研究晶体内部质点排列的规律性以及晶体结构的不完整性；（3）晶体生成学，研究天然以及人工晶体的发生、成长和变化过程及其机制；（4）晶体物理学，研究晶体的光学、电学、力学等物理性质以及和它们相关的结构对称性；（5）晶体化学，研究晶体的化学组成和晶体结构与晶体物理化学性质间的关系。晶体学的内容如此广泛，使得应用晶体学的各个学科大都只根据各自的需要选择其中的部分内容作为自己的专业知识。本章主要讨论晶体结构学中的基本知识——晶体几何学，其他一些内容例如晶体结构的不完整性、晶体生成学将在其他章节讨论。

从上面的叙述可知，晶体科学既是很多学科的基础，又是很多学科的边缘和交叉，它包含广泛的内容：（1）晶体几何学，研究晶体的外表几何形状及它们之间的规律性；（2）晶体结构学，研究晶体内部质点排列的规律性以及晶体结构的不完整性；（3）晶体生成学，研究天然以及人工晶体的发生、成长和变化过程及其机制；（4）晶体物理学，研究晶体的光学、电学、力学等物理性质以及和它们相关的结构对称性；（5）晶体化学，研究晶体的化学组成和晶体结构与晶体物理化学性质间的关系。晶体学的内容如此广泛，使得应用晶体学的各个学科大都只根据各自的需要选择其中的部分内容作为自己的专业知识。本章主要讨论晶体结构学中的基本知识——晶体几何学，其他一些内容例如晶体结构的不完整性、晶体生成学将在其他章节讨论。

## 1.1 结晶状态及晶体的宏观特性

前已叙及，物质结晶状态的本质特征是：**结构基元**在空间呈不随时间变化的三维周期排列，它决定了晶体的宏观和微观物理性质。不具有这种特性的物质例如石蜡、玻璃等是非晶态物质。有一些有机高分子聚合物，它们的结构基元具有一维或二维的近似长程有序排列，其性质介于晶体和非晶体之间，这种物质称为**液晶**。晶态物质可以由多个晶体组成，许多取向不同的单晶体晶粒随机排列的组合称**多晶体**，各个晶粒之间有晶界分隔开。当晶体颗粒尺度很小（约为微米级）时称为**微晶**。

为什么晶体结构会呈三维周期排列？原子间的交互作用力主要是键力，除了离子键基础上的静电力之外，还存在着其他类型如金属键、共价键以及范德华键等。每一种实际晶体中，各种键结合的机制都会存在，但在不同晶态物质中它们的相对贡献是不同的。虽然定量分析原子键合力十分困难，但我们可以用一个简单的双原子模型示意性地描绘这些力的本性。如果两个原子相距无穷远，则原子间的作用力

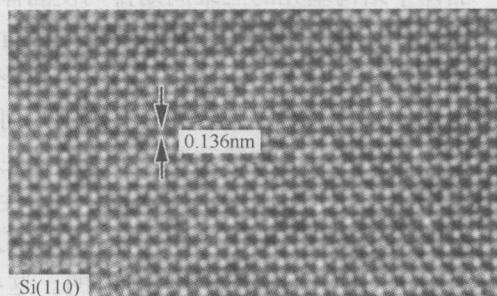


图 1-1 用高分辨率电子显微镜观察硅的（110）面原子排列