



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

材料科学与工程系列

# 材料科学基础

(修订版)

潘金生 仝健民 田民波 著



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
材料科学与工程系列

# 材料科学基础

(修订版)

潘金生 仝健民 田民波 著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书是《材料科学基础》(清华大学出版社,1998年)的修订版。作为一部比较经典的高等院校教材,本书结合金属和合金、陶瓷、硅酸盐等各类材料,着重阐述材料科学的基础理论及其应用,包括晶体学、晶体缺陷、固体材料的结构和键合理论、材料热力学和相图、固体动力学(扩散)、凝固与结晶和相变等内容。此次修订,除订正上一版的差错之外,还替换了不少陈旧的图表,增补了若干新的内容,并增补了习题和解题指导。

本书可用作高等学校材料院系各专业本科生及研究生的材料科学课程教材,也可作为其他院系材料类专业学生及广大材料工作者的参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

## 图书在版编目(CIP)数据

材料科学基础/潘金生,全健民,田民波著. --修订版. --北京:清华大学出版社,2011.1

(清华大学科学与工程系列)

ISBN 978-7-302-24761-6

I. ①材… II. ①潘… ②全… ③田… III. ①材料科学—高等学校—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 012263 号

责任编辑:宋成斌

责任校对:刘玉霞

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:43.75 字 数:1057千字

版 次:2011年1月第1版 印 次:2011年1月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:70.00元

## 修订版序言

《材料科学基础》自 1998 年出版以来,已重印 12 次,发行量逾 20 000 册。本书被国内不少大学的相关院系选为教材,经常被国内外文献引用,特别是作者不断收到热心读者的来信,探讨问题、指出不足、提出建议。所有这些都说明,本书在国内已产生一定影响。

《材料科学基础》一直是清华大学材料科学与工程系为本科生开设的必修课“材料科学基础”的教材;该课程于 2007 年被评为国家级精品课,并曾进行过全课程录像。在精品课程建设期间,完成了全英文 PPT 教案(第 6 版),还合作编写了与之相配的学习辅导及试题汇编。

本次修订融入了本书出版以来十几年的教学经验和体会,吸收了许多热心读者的建议,修改了上一版中的错、漏之处,更换、补充了许多图表,更新了部分论述,增补了习题和解题指导并在不久的将来出版教学辅导及教学课件。

清华大学最早于 20 世纪 50 年代中后期由李恒德院士开设“金属物理”课程,这在全国也是最早的。以此为源头,经历半个多世纪,经过六代人的不懈努力,终将“材料科学基础”建设成现在的课程体系。

修订者力求将更完整、更准确、更时新的版本奉献给读者,但限于本人水平,欠妥或谬误之处在所难免,恳请读者继续关心并批评指正。

田氏波

2011 年 1 月

# 第 1 版绪论

能源、信息和材料被认为是现代国民经济的三大支柱。其中材料更是各行各业的基础。可以说,没有先进的材料,就没有先进的工业、农业和科学技术。无怪乎历史学家将材料作为文明社会进化的标志,将历史划分为石器时代、陶器时代、青铜器时代、铁器时代,等等。从世界科技发展史看,重大的技术革新往往起始于材料的革新。例如,20 世纪 50 年代镍基超级合金的出现,将材料使用温度由原来的 700℃ 提高到 900℃,从而导致了超音速飞机问世;而高温陶瓷的出现则促进了表面温度高达 1000℃ 的航天飞机的发展。反过来,近代新技术(如原子能、计算机、集成电路、航天工业等)的发展又促进了新材料的研制。目前已涌现出了各种各样的新材料,以致有人将我们的时代称为精密陶瓷时代、复合材料时代、塑料时代或合成材料时代等,不管叫什么名称,这反映了当代材料的多样化。

各种材料可以从不同角度分类。例如,根据材料的组成,可以将材料分为金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料(聚合物)和复合材料(有人将它们称为固体材料的四大家族)。根据材料的特征和用途,可将它分为结构材料和功能材料两大类。结构材料主要是利用它的力学性能,用于制造需承受一定载荷的设备、零部件、建筑结构等。功能材料主要是利用它的特殊物理性能(电学、热学、磁学、光学性能等),用于制造各种电子器件、光电及电光元件、显示器件、超导及绝缘材料等。此外,还可以根据材料内部原子排列情况分为晶态材料和非晶态材料;根据材料的热力学状态分为稳态材料和亚稳态材料;根据材料尺寸分为一维(纤维及晶须)、二维(薄膜)和三维(大块),以及纳米材料等。

今后材料研究的方向应该是充分利用和发掘现有材料的潜力,继续开发新材料,以及研究材料的再循环(回收)工艺。

在利用现有材料和开发新材料方面,人们预计,不仅在目前,而且在今后一个时期内,结构材料仍然是材料的主体部分,而且今后 30 年可能是复合材料的世界。在功能材料方面,人们预计,在今后 20 年,需重点发展应用于计算机、集成电路、光电子、激光技术等方面的电子材料。关于材料再循环的研究,则不仅是为了节约原材料,而且是减少能耗、保护环境的急需。

新材料的特点之一是具有特殊的性能。例如,超高强度、超高硬度、超塑性,以及各种特殊物理性能,如磁性、超导电性等。

新材料的特点之二是它的制备和生产往往与新技术、新工艺紧密相关。例如,为了制得用纤维或晶须增强的新型复合材料,需要制备高强度、高热稳定性、无(或很少)缺陷的陶瓷晶须或纤维,并解决它们和基体的复合工艺问题;为了获得具有特殊性质的薄膜或表层,需要应用各种近代溅镀技术、激光技术、高能粒子轰击或离子注入技术。又如通过离子注入、机械合金化等技术可以得到具有特殊性能的新型亚稳晶态材料或非晶态材料等。

新材料的特点之三是更新换代快,式样多变。新材料和传统材料并无明显的界限,有的就是由传统材料发展而来的。

新材料的特点之四是它的发展和材料理论的关系比传统材料更密切。如果说,传统材料的制备或生产更多的是依靠经验和手艺(在早期尤其如此),那么新材料的研制则更多的是在理论指导下进行,尽管目前材料理论还没有发展到定量指导生产的阶段。

正是由于新材料的不断涌现,新技术、新工艺的不断发展,以及新材料、新技术对材料理论的日益需要和推动作用,“材料科学与工程”这一新的学科才应运而生。从20世纪70年代以来,国内外的大学内纷纷设立了材料科学与工程院系,开设了材料科学与工程方面的课程。

“材料科学与工程”的任务是研究材料的结构、性能、加工和使用状况四者间的关系。这里所指材料,包括传统材料和各种新型材料。所谓结构,包括用肉眼或低倍放大镜观察到的宏观组织(粗视组织),用光学或电子显微镜观察到的微观组织,用场离子显微镜观察到的原子像,以及原子的电子结构;所谓性能,包括力学性能、物理性能、化学性能,以及冶金和加工性能等工艺性能;所谓加工,是指包括材料的制备、加工、后处理(再循环处理)在内的各项生产工艺;所谓使用状况,则是指材料的应用效果和反响(例如,有些材料在使用过程中组织结构不稳定,或易受环境的影响,使性能迅速下降)。材料的结构、性能、加工和使用状况这四个因素称为材料科学与工程的四要素。因此,材料科学与工程就是研究四要素之间关系的一门学科。

在四要素关系中,最基本的是结构与性能间的关系,而“材料科学基础”这门课程的主要任务就是研究材料的结构、性能及二者间的关系。研究的途径一是通过实验,二是总结生产实践的经验,三是建立材料基础理论,从理论上预计材料的结构和性能。

材料的基础理论实际上就是综合数学、物理、化学等各种基础知识来分析实际的材料问题。具体来说,它包括以下几部分:

- (1) 晶体学基础;
- (2) 晶体缺陷理论;
- (3) 固体材料热力学和平衡态理论(包括相图);
- (4) 固体动力学理论(包括扩散和相变理论);
- (5) 固体材料的结构理论;
- (6) 固体电子论(包括分子轨道理论和能带理论)。

目前国内外材料科学课程的内容并未定型,材料科学书籍的内容也很不相同。有的偏重材料,有的偏重性能,且面比较宽,但对基础理论的阐述则比较简略。本书的内容则偏重材料的基础理论,结合各种材料讲述材料基础理论及其应用。我们的考虑是:

(1) 基础理论是普遍的,适用于各种材料,是材料科学与工程系各专业的共性。

(2) 随着材料科学与工程的发展,基础理论显得日益重要,对发展新材料、培养学生创新能力具有深远的意义。

(3) 基础理论是比较定型的,不管材料和工艺如何更新换代,基础理论一般不会过时。

我们希望并相信,这样的体系和内容对材料院系学生、研究生和广大材料工作者是有益的。

当然,在阐述材料基础理论时,必然会涉及一些材料性能和工艺问题。作为例子,本书比较多地列举了金属材料,这不仅是考虑到清华大学材料系的专业设置情况,也是由于金属材料涉及的基础理论问题较多,研究得也最充分。此外,本书内容的选择也和后续课程有

关。例如,由于后续课程中有 X 射线衍射、电镜分析、固体物理等,在本书中与这些课程有关的内容就没有详细讨论或根本没有涉及。

本书具有一定的广度和深度。它既可作为材料科学与工程系各专业学生和研究生的教科书,也可作为从事材料工作的科技工作者的参考书。在用作本科生教材时,教师可根据具体情况舍去某些内容。

本书是由北京清华大学材料科学与工程系三位教师在长期从事金属学、金属物理、材料科学基础等课程教学的基础上共同编写而成。其中第 1 章~第 4 章由潘金生编写;第 5 章~第 7 章和第 9、10 章由仝健民编写,第 8、11 章和第 12 章由田民波编写。全书由三人互校。

作者水平有限,不妥或谬误之处在所难免,恳请读者批评指正。

# 目 录

<b>第 1 章 晶体学基础</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 空间点阵 .....	1
1.2.1 晶体的特征和空间点阵.....	1
1.2.2 晶胞、晶系和点阵类型 .....	2
1.2.3 复式点阵,晶胞和原胞 .....	5
1.3 晶面指数和晶向指数 .....	7
1.3.1 晶面和晶向指数的确定.....	8
1.3.2 立方和六方晶体中重要晶向的快速标注 .....	12
1.4 常见晶体结构及其几何特征.....	13
1.4.1 常见晶体结构 .....	13
1.4.2 几何特征 .....	13
1.4.3 常见晶体结构中的重要间隙 .....	15
1.5 晶体的堆垛方式.....	19
1.6 晶体投影.....	21
1.6.1 球投影 .....	21
1.6.2 极射投影 .....	24
1.6.3 乌氏网及其应用 .....	25
1.6.4 标准投影 .....	26
1.6.5 极射投影练习 .....	27
1.7 倒易点阵.....	29
1.7.1 倒易点阵的确定方法,倒易基矢.....	29
1.7.2 倒易点阵的基本性质 .....	30
1.7.3 实际晶体的倒易点阵 .....	31
1.7.4 倒易点阵的应用 .....	35
1.8 菱方晶系的两种描述.....	39
1.8.1 菱方轴和六方轴的基矢关系 .....	39
1.8.2 点阵常数换算公式 .....	39
1.8.3 晶向指数变换 .....	40
1.8.4 晶面指数变换 .....	40
习题 .....	41



<b>第 2 章 固体材料的结构</b> .....	44
2.1 引言 .....	44
2.2 原子结构 .....	44
2.2.1 经典模型和玻尔理论 .....	44
2.2.2 波动力学理论和近代原子结构模型 .....	45
2.2.3 能级图和元素的原子结构 .....	50
2.2.4 原子稳定性和能级的实验测定 .....	54
2.3 结合键 .....	55
2.3.1 离子键 .....	56
2.3.2 共价键 .....	56
2.3.3 金属键 .....	57
2.3.4 分子键 .....	58
2.3.5 氢键 .....	58
2.4 分子的结构 .....	60
2.4.1 多原子体系电子状态的一般特点 .....	60
2.4.2 共价分子的结构 .....	61
2.5 晶体的电子结构 .....	73
2.5.1 晶体的结合键 .....	73
2.5.2 晶体中电子的能态 .....	74
2.5.3 晶体的结合能 .....	76
2.6 元素的晶体结构和性质 .....	80
2.6.1 元素的晶体结构 .....	80
2.6.2 元素性质的周期性 .....	83
2.7 合金相结构概述 .....	86
2.7.1 基本概念 .....	86
2.7.2 合金成分表示 .....	87
2.7.3 合金相分类 .....	87
2.8 影响合金相结构的主要因素 .....	87
2.8.1 原子半径或离子半径 .....	87
2.8.2 电负性 .....	90
2.8.3 价电子浓度 .....	91
2.8.4 其他因素 .....	92
2.9 固溶体 .....	92
2.9.1 什么是固溶体 .....	92
2.9.2 固溶体分类 .....	92
2.9.3 固溶度和 Hume-Rothery 规则 .....	94
2.9.4 固溶体的性能与成分的关系 .....	98
2.10 离子化合物 .....	100
2.10.1 决定离子化合物结构的几个规则 .....	100

2.10.2	典型离子化合物的晶体结构	103
2.10.3	氧化物结构的一般规律	108
2.10.4	决定无机化合物晶体结构的其他方法	109
2.11	硅酸盐结构简介	110
2.11.1	硅酸盐结构的一般特点及分类	110
2.11.2	含有有限硅氧团的硅酸盐	110
2.11.3	链状硅酸盐	112
2.11.4	层状硅酸盐	113
2.11.5	骨架状硅酸盐	115
2.12	金属间化合物(I): 价化合物	116
2.13	金属间化合物(II): 电子化合物	120
2.14	金属间化合物(III): 尺寸因素化合物——密排相	122
2.14.1	密排相中原子排列的几何原则	122
2.14.2	几何密排相	123
2.14.3	拓扑密排相	123
2.15	间隙化合物	134
2.15.1	间隙化合物的分类: Hägg 规则	134
2.15.2	间隙化合物的结构	135
2.15.3	间隙化合物的特性	137
2.16	合金相结构符号	138
	习题	140
<b>第3章</b>	<b>晶体的范性形变</b>	<b>141</b>
3.1	引言	141
3.2	滑移系统和 Schmid 定律	143
3.2.1	晶体的滑移系统	143
3.2.2	Schmid 定律	143
3.2.3	Schmid 定律的应用	145
3.3	滑移时参考方向和参考面的变化	146
3.3.1	参考方向的变化	146
3.3.2	参考面的变化	147
3.4	滑移过程中晶体的转动	148
3.4.1	晶体转动的原因	148
3.4.2	晶体转动的规律	149
3.4.3	晶体转动的后果	149
3.5	滑移过程的次生现象	153
3.6	单晶体的硬化曲线	154
3.7	孪生系统和原子的运动	155
3.7.1	晶体的孪生系统	155

3.7.2	孪生时原子的运动和特点	156
3.8	孪生要素和长度变化规律	158
3.8.1	孪生引起的形状变化	158
3.8.2	孪生四要素和切变计算	158
3.8.3	孪生时长度变化规律	159
3.8.4	孪生时试样的最大伸长和最大缩短量	161
3.9	孪晶和基体的位向关系	162
3.9.1	位向关系	162
3.9.2	孪生引起的晶向变化	165
3.10	孪生系统的实验测定	167
3.11	滑移和孪生的比较	169
3.12	多晶体范性形变的一般特点	170
3.12.1	晶粒边界	170
3.12.2	多晶体范性形变的微观特点	173
3.12.3	晶粒度及其对性能的影响	174
3.13	冷加工金属的储能和内应力	175
3.14	应变硬化	177
3.14.1	应变硬化现象	177
3.14.2	实际晶体的硬化行为	179
3.14.3	影响应变硬化的因素	180
3.14.4	应变硬化在生产实际中的意义	181
3.15	多晶材料的择优取向(织构)	182
3.15.1	概述	182
3.15.2	织构的描述和测定方法	183
3.15.3	实际金属的织构和各向异性	186
3.15.4	织构理论概述	187
3.15.5	织构的实际意义及其控制方法	188
3.16	纤维组织和流线	190
3.17	晶体的断裂	192
3.17.1	概述	192
3.17.2	脆性断裂的微观理论——Griffith 裂缝理论	193
3.17.3	金属脆性断裂的特点	195
3.17.4	影响金属的韧性、脆性和断裂的因素	197
	习题	201
<b>第4章</b>	<b>晶体中的缺陷</b>	<b>203</b>
4.1	引言	203
4.2	点缺陷的基本属性	203
4.2.1	点缺陷类型	203

4.2.2	点缺陷的平衡浓度	204
4.2.3	过饱和点缺陷的形成	207
4.2.4	点缺陷对晶体性质的影响	207
4.3	点缺陷的实验研究	208
4.3.1	比热容实验	208
4.3.2	热膨胀实验	209
4.3.3	淬火实验	211
4.3.4	淬火—退火实验	212
4.3.5	正电子湮没实验	213
4.4	位错理论的提出	215
4.5	什么是位错	216
4.5.1	局部滑移	216
4.5.2	局部位移	219
4.6	位错的普遍定义与柏格斯矢量	221
4.6.1	柏格斯回路	221
4.6.2	柏氏矢量的物理意义	221
4.6.3	柏氏矢量和位错的表征	221
4.6.4	柏氏矢量的守恒性	222
4.7	位错的运动	223
4.7.1	刃型位错的运动	223
4.7.2	螺型位错的运动	225
4.7.3	混合位错的运动	225
4.8	位错密度和晶体的变形速率	227
4.8.1	位错密度的定义及其实验测定	227
4.8.2	位错密度和晶体的变形速率	227
4.8.3	位错密度和晶体的强度	228
4.9	位错的基本几何性质	229
4.10	固体弹性理论简介	230
4.10.1	应力分析	230
4.10.2	应变分析:位移和应变张量	235
4.10.3	胡克定律	236
4.10.4	平衡方程	237
4.10.5	柱坐标系下的应力和应变	238
4.10.6	弹性力学的应用简介	241
4.11	位错的应力场	241
4.11.1	螺型位错的应力场	242
4.11.2	刃型位错的应力场	243
4.12	位错的弹性能和线张力	244
4.13	作用于位错上的力	245

4.13.1	引起位错滑移的力	246
4.13.2	引起刃型位错攀移的力	246
4.13.3	一般情形下位错受的力	247
4.14	位错与位错间的交互作用	249
4.14.1	同号刃型位错间的交互作用	249
4.14.2	异号刃型位错间的交互作用	250
4.14.3	平行螺型位错间的作用力	251
4.14.4	螺型位错和刃型位错间的交互作用	251
4.14.5	位于同一滑移面上的一对平行混合位错间的交互作用	251
4.14.6	交叉位错间的交互作用	252
4.15	位错与点缺陷之间的交互作用	253
4.15.1	刃型位错与点缺陷的交互作用能和作用力	253
4.15.2	柯氏气团和明显屈服现象	254
4.15.3	脱钉力的计算	255
4.15.4	讨论	256
4.16	位错的起动力——派-纳力	256
4.16.1	位错起动力的分析——Peirls-Nabarro 模型	256
4.16.2	讨论	259
4.17	镜像力	260
4.18	位错的起源与增殖	261
4.18.1	位错的起源	261
4.18.2	位错的增殖机制	261
4.18.3	位错的源地和尾闾	266
4.19	位错的塞积	267
4.20	位错的交割	269
4.20.1	刃型位错与刃型位错的交割	269
4.20.2	刃型位错与螺型位错的交割	270
4.20.3	螺型位错与螺型位错的交割	271
4.21	面心立方晶体中的位错	273
4.21.1	全位错	273
4.21.2	Shockley 分位错	274
4.21.3	扩展位错	276
4.21.4	Frank 分位错	279
4.21.5	压杆位错	279
4.22	位错反应	280
4.22.1	自发位错反应的条件	281
4.22.2	FCC 中位错反应的一般表示; Thompson 四面体	281
4.22.3	位错反应举例	283
4.23	密排六方和体心立方晶体中的位错	288

4.23.1	密排六方晶体中的位错	288
4.23.2	体心立方晶体中的位错	291
4.24	其他晶体中的位错	293
4.24.1	离子晶体中的位错	293
4.24.2	超点阵中的位错	294
4.24.3	共价晶体中的位错	295
4.24.4	层状结构中的位错	296
4.24.5	聚合物晶体中的位错	296
4.25	小角度晶粒边界	297
4.25.1	倾侧晶界	297
4.25.2	扭转晶界	300
4.25.3	一般小角度晶界	301
4.26	位错的实验观测	305
4.26.1	表面法(或蚀坑法)	305
4.26.2	缀饰法	306
4.26.3	透射电镜法	307
4.26.4	其他方法	308
4.27	位错理论的应用(小结)	310
	习题	313
<b>第5章</b>	<b>材料热力学</b>	<b>316</b>
5.1	热力学在材料科学中的意义	316
5.2	热力学基本参数和关系	316
5.2.1	热力学第一定律	316
5.2.2	热力学第二定律	317
5.2.3	热力学函数的基本关系	319
5.2.4	化学位	320
5.3	纯金属吉布斯自由能和凝固热力学	321
5.4	合金相热力学	324
5.4.1	二组元固溶体相的吉布斯自由能	324
5.4.2	中间相和混合相的吉布斯自由能	328
5.5	相平衡热力学	330
5.5.1	相平衡的化学位	330
5.5.2	化学位的图解确定	330
5.5.3	相平衡的公切线定则	332
5.6	相图热力学	334
5.6.1	二元连续固溶体相图的建立	334
5.6.2	二元系共晶相图的热力学确定	335
5.6.3	具有固溶度间隙相图的建立	337

5.6.4	含有金属间化合物相图的建立	338
5.7	晶体缺陷热力学	339
5.7.1	空位的热力学分析	339
5.7.2	位错的热力学分析	341
5.7.3	界面的热力学分析	342
5.8	相变热力学	343
5.8.1	固溶体脱溶分解的驱动力	343
5.8.2	由驱动力看新相形成的规律	344
5.8.3	调幅分解	345
	习题	346
<b>第6章</b>	<b>相图</b>	<b>348</b>
6.1	概述	348
6.1.1	研究相图的意义	348
6.1.2	相图的表示方法	348
6.1.3	相图的建立	349
6.1.4	相图的类型和结构	351
6.2	相律和杠杆定律	352
6.2.1	相律	352
6.2.2	杠杆定律	354
6.3	二元匀晶相图	355
6.3.1	图形分析	355
6.3.2	结晶过程分析	355
6.3.3	结晶中的扩散过程分析	356
6.3.4	非平衡结晶分析	357
6.4	二元共晶相图	359
6.4.1	图形分析	359
6.4.2	结晶过程分析	360
6.4.3	共晶结晶机理	363
6.4.4	初生相和共晶组织分析	364
6.4.5	非平衡状态分析	366
6.5	二元包晶相图	367
6.5.1	图形分析	367
6.5.2	结晶过程分析	367
6.5.3	非平衡状态分析	369
6.6	其他二元相图	369
6.6.1	液态无限溶解, 固态形成化合物的相图	369
6.6.2	液态无限溶解, 固态有转变的相图	371
6.6.3	二组元在液态有限溶解的相图	372

6.6.4	二组元在液态无限溶解, 固态有单析反应的相图	374
6.6.5	有熔晶(再熔)反应的相图	374
6.7	相图基本类型小结	374
6.7.1	相图基本型式的特点	374
6.7.2	相图基本单元及其组合规律——相区接触法则	375
6.7.3	假想相图	376
6.8	相图与性能关系	376
6.8.1	相图与力学性能关系	376
6.8.2	相图与铸造工艺性关系	377
6.9	Fe-C 合金相图	378
6.9.1	图形分析	378
6.9.2	结晶过程分析	380
6.9.3	组织区分析	385
6.9.4	虚线部分相图分析	386
6.10	三元相图	388
6.10.1	概述	388
6.10.2	三元匀晶相图	391
6.10.3	三元共晶相图	394
6.10.4	固态有限溶解, 具有一个三相平衡区的三元相图	398
6.10.5	固态有限溶解, 具有四相平衡区的三元相图	400
6.10.6	有化合物的三元相图	405
	习题	407
<b>第7章</b>	<b>界面</b>	<b>411</b>
7.1	研究界面的意义	411
7.2	界面类型和结构	411
7.2.1	按界面两边物质状态分类	411
7.2.2	按界面两边晶体取向差角度分类	412
7.2.3	根据界面上原子排列情况和吻合程度分类	414
7.3	界面能量	417
7.3.1	表面能	417
7.3.2	小角界面能	418
7.3.3	大角界面能	419
7.4	界面偏聚	420
7.4.1	晶界偏聚方程	420
7.4.2	影响晶界偏聚的因素	421
7.5	界面迁移	422
7.5.1	界面迁移速度	422
7.5.2	界面迁移的驱动力	423



7.5.3	影响界面迁移率的因素	425
7.6	界面与组织形貌	426
7.6.1	单相组织形貌	426
7.6.2	复相组织平衡形貌	428
7.7	界面能的测量	431
7.7.1	界面张力平衡法	431
7.7.2	测量界面能的动力学方法	432
	习题	432
<b>第8章</b>	<b>固体中的扩散</b>	<b>434</b>
8.1	引言	434
8.2	菲克定律	434
8.2.1	菲克第一定律	434
8.2.2	菲克第二定律	435
8.3	稳态扩散及其应用	437
8.3.1	一维稳态扩散	438
8.3.2	柱对称稳定扩散	439
8.3.3	球对称稳态扩散	440
8.4	非稳态扩散	441
8.4.1	一维无穷长物体的扩散	442
8.4.2	半无穷长物体的扩散	445
8.4.3	瞬时平面源	446
8.4.4	有限长物体中的扩散	446
8.5	$D$ - $C$ 关系, 俣野方法	448
8.6	克根达耳效应	449
8.6.1	克根达耳(Kirkendall)效应	450
8.6.2	克根达耳效应的理论和实际意义	450
8.7	分扩散系数, 达肯公式	451
8.8	扩散的微观理论和机制	454
8.8.1	扩散与原子的随机行走	454
8.8.2	菲克定律的微观形式及 $D$ 的微观表示	456
8.8.3	扩散的微观机制	457
8.8.4	扩散系数和扩散激活能的计算	459
8.9	扩散热力学	462
8.9.1	菲克定律的普遍形式	463
8.9.2	扩散系数、溶质分布等与热力学量之间的关系	464
8.10	影响扩散的因素	465
8.10.1	温度的影响	465
8.10.2	成分的影响	466