

Neutrons and Synchrotron
Radiation in Engineering
Materials Science

中子和同步辐射 在工程材料科学中的应用

〔德〕 W. Reimers 〔德〕 A. R. Pyzalla 编著
〔德〕 A. Schreyer 〔奥〕 H. Clemens
姜晓明 丁 洪 孙冬柏 主译



科学出版社



中子和同步辐射在工程材料 科学中的应用

**Neutrons and Synchrotron Radiation
in Engineering Materials Science**

〔德〕 W. Reimers 〔德〕 A. R. Pyzalla 编著
〔德〕 A. Schreyer 〔奥〕 H. Clemens

姜晓明 丁 洪 孙冬柏 主译

科 学 出 版 社

北 京

图字: 01-2013-7344 号

内 容 简 介

中子和同步辐射技术是工程材料结构分析的一对互补的物理分析方法,能够无损地对材料表面区域和体相的微结构信息进行研究。与传统实验室的X射线相比,利用同步辐射和中子能使空间分辨率和可探测信息的深度增加几个量级,为新材料和复合材料微结构的分析带来新进展,满足工程材料研究不断增长的需求。中子和同步辐射在物理学和其他自然科学领域已应用多年。伴随着在反应堆、散裂源和电子储存环上建立的专门的材料科学应用装置的发展,以及适用于复杂工程材料微结构研究的实验技术的发展,中子和同步辐射的应用吸引了工作在大学、研究所和工业界的材料学家和工程师们。中子和同步辐射在工程材料科学研究中最主要的实验技术包括衍射、小角散射和断层成像。本书的第一部分对工程材料科学基础,以及中子和同步辐射的产生与特性等背景知识进行了介绍;第二部分介绍了中子和同步辐射在工程材料研究中使用的衍射、散射和成像等方法的详细信息;第三部分介绍了该领域中出现的新方法;第四部分提供了中子和同步辐射在工业上应用的例子。本书将会成为在工程材料科学研究领域应用中子和同步辐射技术的入门参考书,将会促进学生、科研人员和工程技术人员在该研究领域的深入研究和兴趣。

本书适合相关专业研究人员、教师和学生、工程材料产业界的研究人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

中子和同步辐射在工程材料科学中的应用/(德)赖默斯(Reimers, W.)编著;
姜晓明等译. —北京:科学出版社, 2014. 6

书名原文: Neutrons and synchrotron radiation in engineering materials science
ISBN 978-7-03-041250-8

I. ①中… II. ①赖… ②姜… III. ①中子-应用-工程材料-研究②同步
辐射-应用-工程材料-研究 IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第129076号

责任编辑: 钱俊周涵 / 责任校对: 朱光兰
责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年9月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2014年9月第一次印刷 印张: 24 1/4

字数: 463 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

Copyright © 2008 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Neutrons and Synchrotron Radiation in Engineering Materials Science, ISBN 978-3-527-31533-8, by W. Reimers, A. R. Pyzalla, A. Schreyer, and H. Clemens, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

编著者简介

沃尔特·赖默斯(Walter Reimers)博士、教授
柏林技术大学，材料科学与技术学院，金属材料系
德国柏林市 10587，恩斯特·罗伊特广场 1 号

安克·丽塔·皮扎拉(Anke Rita Pyzalla)博士、教授
马克斯普朗克钢铁研究所有限公司
德国杜塞尔多夫市 40237，马克斯·普朗克街 1 号

安德里亚斯·施赖尔(Andreas Schreyer)博士、教授
GKSS 研究中心，材料研究所
德国格斯塔特市 21502，马克斯·普朗克街 1 号

赫尔穆特·克莱门斯(Helmut Clemens)博士、教授
莱奥本大学，物理冶金与材料试验系
奥地利莱奥本市 8700，弗朗茨·约瑟夫街 18 号

本书译校者名单

常 海	北京科技大学
陈 洁	中国科学院高能物理研究所
陈 雨	中国科学院高能物理研究所
丁 洪	中国科学院物理研究所
董宝中	中国科学院高能物理研究所
董宇辉	中国科学院高能物理研究所
胡天斗	中国科学院高能物理研究所
贾全杰	中国科学院高能物理研究所
姜晓明	中国科学院高能物理研究所
黎 刚	中国科学院高能物理研究所
梁天骄	中国科学院物理研究所
刘 鹏	中国科学院高能物理研究所
罗万居	中国科学院高能物理研究所
彭 杰	中国科学院高能物理研究所
钱 天	中国科学院物理研究所
石倩颖	北京科技大学
孙冬柏	北京科技大学
王芳卫	中国科学院物理研究所
王焕华	中国科学院高能物理研究所
王坤鹏	北京科技大学
王 莹	北京科技大学
魏文娟	北京科技大学
吴安琪	北京科技大学
吴 奇	中国科学院物理研究所
吴忠华	中国科学院高能物理研究所
徐海嵩	北京科技大学
颜 雷	中国科学院物理研究所
袁清习	中国科学院高能物理研究所
张 杰	中国科学院高能物理研究所

译者序

中子和同步辐射 X 射线均具有高穿透能力,其衍射、散射和成像技术在工程材料领域中具有重要的作用。二者在工程材料科学的研究中的应用主要包括内应力测量、织构测量、材料的制备、加工过程(变形、结晶、再结晶、相变)和服役过程的原位研究,在实现无损研究的同时,能够提供比传统实验研究方法更高的空间分辨、更短的时间尺度分辨的微结构信息。一般情况下,中子主要与材料中的原子核相互作用,而同步辐射 X 射线主要与原子核外的电子相互作用,二者的结构信息正好互补,因此中子与同步辐射的结合将大大提升新一代工程材料的研发和创新。

中国大陆目前拥有 3 台同步辐射装置:北京同步辐射装置、合肥光源和上海光源。20 世纪 90 年代建成使用的北京同步辐射装置和合肥光源分别为第一代和第二代同步辐射装置。2009 年建成的上海光源是先进的第三代同步辐射装置,其首批 7 条光束线站已经投入使用,并迅速成为我国大陆先进光源的主力。上海光源在中能区亮度已达到国际先进水平,成功迈出了我国在同步辐射光源领域走向国际先进水平的第一步。但是国内在高能同步辐射光源方面仍与世界先进水平有着很大的差距,严重制约了我国在工程材料等方面自主创新能力的提升。2009 年初,在我国新建一台高能同步辐射光源的方案得到了相关专家和广大用户的强烈支持。目前,该方案已被列入《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030 年)》,“十二五”期间开展高能同步辐射光源预研工作,以支撑“十三五”期间正式建设高能同步辐射光源。高能同步辐射光源的建设可以和国内现有光源在能量上实现互补,提供高亮度的高性能硬 X 射线。另一方面,位于广东东莞的中国散裂中子源正在紧锣密鼓地建设中,将于 2018 年建成完工。中国散裂中子源将成为发展中国家拥有的第一台散裂中子源,并进入世界四大散裂中子源行列,将为国内外科学家提供世界一流的中子科学综合实验研究装置。先进的散裂中子源与同步辐射光源建成之后,将成为我国基础科学研究和新材料研发的最重要平台,大大推动我国在工程材料等方面的快速发展和自主创新能力的大幅度提升,在支撑国家创新驱动发展战略方面发挥重要的作用。

在稳步推进中国散裂中子源和高能同步辐射光源建设的同时,培育和扩大用户群体、提升用户利用中子和同步辐射开展研究工作的水平是充分发挥装置实验研究能力和优势的重要前提条件,以保证在装置建成投入使用之时,能够较快地产出优秀的创新成果。散裂中子源和高能同步辐射光源对于我国的广大科研人员来

说还是相对比较陌生的,为了帮助大家更快、更好地了解并掌握中子与高能同步辐射在工程材料科学领域中的应用,并吸引新的研究人员进入该领域,中国科学院高能物理研究所、物理研究所和北京科技大学三个单位的相关专家共同翻译了这本书。本书的第一部分对工程材料科学基础和中子与同步辐射的产生及特性方面的知识进行了综述,为具有自然科学、材料科学和工程科学背景的读者提供必要的基础知识;第二部分详细介绍了应用于工程材料表征的先进的中子和同步辐射衍射、散射和成像方法;第三部分介绍了该学科领域的新方法;第四部分举例介绍了中子和同步辐射在工业中的应用。

希望本书中文版的翻译出版能够促进国内工程材料科学等相关领域的研究人员对中子和同步辐射相关实验技术和方法的认识和了解,能够引领他们将研究工作更多地与中子和同步辐射结合起来,为我国工程材料学科等相关领域的发展做出重要贡献。

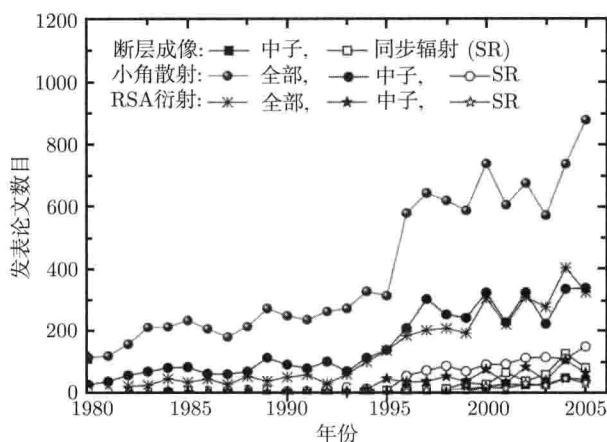
译者

2014年6月

前 言

中子源和光子源用其辐射的互补性为分析先进工程材料的结构提供了唯一的可能性。散裂源、反应堆和同步辐射源各自发射的中子和光子可以非破坏性地提供材料近表面区域和组分块体的微结构信息。与实验室常规 X 射线相比较,在空间分辨率和信息可达到的深度上,用同步辐射和中子能够增加几个数量级。材料工程学观念不断增加的需求推动了新材料和复合材料系统的微结构分析的发展。在工程材料科学中,微观结构参数和宏观性能之间关系的建立和细化需要能够覆盖几个数量级的不同长度和时间尺度的信息。

中子和同步辐射在物理学和其他自然科学领域已经应用了很多年。实验技术的发展适应于通常很复杂工程材料和部件的表征,其不亚于应用在反应堆、散裂源和电子储存环上的材料科学专用设备的实用性,如今致使中子和同步辐射的应用吸引了工作在大学、研究所和工厂的材料科学的科研和工程技术人员。应用的主要的实验技术是衍射、小角散射和断层成像。分析列在检索引擎 SCOPUS 上的论文数可知,科学界明显地增加了在这些实验技术上的兴趣(见下图)。更详细地查看用中子和同步辐射的衍射、小角散射和断层成像实验方法作残余应力分析的科学工作者发表的论文数,显示出和同步辐射最近的强劲的影响一样,中子在这些科学领域中的重要性呈现持续和不断的增加。



图中给出了分别用 X 射线、同步辐射和中子的衍射、小角散射和断层成像实验方法进行残余应力分析 (RSA) 的论文数目。这些论文数目是在 2006 年 10 月用

搜索引擎 SCOPUS(www.scopus.com) 确定的, 用的关键词是“残余应力分析 + 衍射、小角散射和断层成像”与“同步辐射和中子”的结合。

写这本书的想法是与名为“工程材料科学与中子和同步辐射”的首届秋季学校的讲师和参加者讨论的结果, 从第十届到 2005 年 10 月的第十四届秋季学校在位于德国汉堡附近阿梅尔斯贝克的“豪斯·安·舒伯格”会议中心举办。这个秋季学校计划为来自全欧洲的学生提供了一个该领域的系统的概述。它是由“先进工程材料的光子和中子的研究”的虚拟学院 (VI-PNAM) 与奥地利的莱奥本大学合作组织开办。这个虚拟学院 VI-PNAM 是德国的柏林技术大学、德累斯顿技术大学、克劳斯塔尔技术大学、奥地利的维也纳技术大学、马克斯普朗克钢铁研究所有限公司和 HMI(柏林)、GKSS(格斯塔特)、DESY(汉堡) 三个德国研究中心合作成立, 这三个德国研究中心是由其上级组织亥姆霍兹学会 (HGF) 资助。秋季学校的讲座显然激发了超过 50% 的学生今后在中子和同步辐射源上开展研究, 约 40% 的学生以前没有使用过中子或同步辐射, 在秋季学校之后他们几乎全部想要用中子和同步辐射做实验。

本书准备用作秋季学校参加者的参考书, 也可用作那些对此感兴趣但还不是该领域专家的学者的入门书。为了给具有自然科学、材料科学和工程学科背景的读者提供必要的工程材料科学基础和中子与同步辐射的产生及特性方面的知识, 这些主题在该书的第一部分“概述”中作了简要的叙述。第二部分包含了用于工程材料表征的应用中子和同步辐射的最先进的衍射、散射和成像方法的详细信息。该科学领域的新兴的方法在第三部分介绍。第四部分给出中子和同步辐射工业应用的例子。

我们希望这本教科书为该领域的新人作简单的介绍, 并培养学生、科研人员和工厂的工程技术人员在实现他们的研发目标时, 使用中子和同步辐射的兴趣。

编者感谢所有的作者为本书做的积极贡献。同时, 也非常感激我们学院和系里帮助准备草稿、处理章节的审核及在编者与作者和出版社之间联络的同事们。我们衷心地感激迪马斯·苏扎先生和本杰明·布赖特巴赫先生, 特别是马克斯普朗克钢铁研究所有限公司的阿德尔海德·艾德里安小姐在这些工作中持续有力的贡献。最后, 同样重要的是我们想感谢出版社, 尤其感谢尼古拉·欧博贝克曼·温特博士和约恩·里特布什博士在本书写作和编辑期间给予的巨大支持。

沃尔特·赖默斯
安克·丽塔·皮扎拉
安德里亚斯·施赖尔
赫尔穆特·克莱门斯

目 录

译者序

前言

第一部分 概 述

第 1 章 工程材料的显微结构和特性	3
1.1 引言	3
1.2 显微结构	4
1.2.1 晶体缺陷	6
1.2.2 晶界 (相界) 和孪晶	6
1.2.3 沉淀相和弥散物	7
1.3 显微结构及性能	9
1.4 显微结构的表征	12
参考文献	15
第 2 章 工程材料中的内应力	18
2.1 定义	18
2.1.1 应力张量、应变张量和弹性张量	18
2.1.2 定义, 残余应力	20
2.2 宏观和微观残余应力的产生	23
2.2.1 主要成型过程中残余应力的形成	24
2.2.2 热处理过程中残余应力的形成	25
2.2.3 成型过程中残余应力的形成	29
2.2.4 切削加工中残余应力的形成	33
2.2.5 焊合过程中的残余应力	35
2.2.6 涂层中残余应力的形成	39
2.3 相关内容	41
2.3.1 温度变化引发残余应力形成或释放导致的失效	42
2.3.2 静态和动态机械加载对失效零部件上残余应力的影响	43
2.3.3 腐蚀环境中残余应力对工件失效的影响	45
2.3.4 残余应力对耐磨性的影响	45

参考文献	46
第 3 章 工程材料的织构与织构分析	50
3.1 引言	50
3.2 极图	52
3.3 实验室尺度上的织构测量	53
3.3.1 X 射线衍射	53
3.3.2 电子衍射	55
3.4 大型设备织构测量	56
3.4.1 中子衍射	56
3.4.2 同步 X 射线在织构分析中的应用	60
参考文献	64
第 4 章 光子和中子的物理性能	67
4.1 引言	67
4.2 X 射线光子和中子与单个原子的相互作用	68
4.2.1 中子	68
4.2.2 X 射线	70
4.3 原子集群的 X 射线光子和中子的散射	73
参考文献	75
第 5 章 辐射源	76
5.1 中子的产生和特性	76
5.1.1 引言	76
5.1.2 中子的产生	76
5.1.3 谱仪	80
参考文献	81
5.2 同步辐射的产生和特性	81
5.2.1 引言	81
5.2.2 同步辐射的特性	83
5.2.3 同步辐射光源	87
5.2.4 展望: 自由电子激光器	91
5.2.5 总结	93
参考文献	93

第二部分 方 法

第 6 章 用于内应力分析的衍射方法介绍	97
-----------------------------------	-----------

6.1 一般性质	97
6.2 衍射原理	97
6.3 用衍射方法确定应变的原理	99
6.4 无应力晶面间距 d_0 的确定	101
6.5 $\sin^2 \psi$ 技术	102
6.6 非线性的晶格应变分布	103
6.6.1 各向异性	103
6.6.2 应力/应变梯度	104
6.6.3 剪切应力/应变	105
6.7 衍射弹性常数	106
6.7.1 DEC 的计算	107
6.7.2 DEC 的实验测定	107
6.8 实验装置和测量步骤	108
6.8.1 实验装置	108
6.8.2 测量步骤	110
6.9 深度和局部残余应力分析综述	111
参考文献	111
第 7 章 利用角度色散中子衍射方法分析应力	114
7.1 引言	114
7.2 残余应力分析衍射仪	115
7.2.1 应变扫描衍射仪的布局	115
7.2.2 单色器	116
7.2.3 狭缝系统	116
7.2.4 样品定位	117
7.2.5 探测器	117
7.3 测量和数据分析	118
7.3.1 测试体积与样品定位	118
7.3.2 数据简化和分析	120
7.4 实例	122
7.4.1 搅拌摩擦焊薄铝片中的残余应力分析	122
7.4.2 水淬火涡轮盘中的残余应力	124
7.5 总结与展望	126
参考文献	126
第 8 章 利用中子能量色散衍射方法分析应力	128
8.1 引言	128

8.2	飞行时间中子衍射	128
8.2.1	飞行时间的衍射峰形状与数据分析包	129
8.3	飞行时间应变扫描仪	131
8.3.1	计数时间与分辨率	132
8.3.2	中子光学与时间聚焦	134
8.4	虚拟应变扫描实验室	135
8.5	晶粒间的应力演化	137
8.6	飞行时间透射分析	138
8.6.1	布拉格边	139
8.6.2	绘制应变图	139
8.6.3	定量物相分析	140
8.6.4	其他方面的应用	141
8.7	小结	142
	参考文献	142
第 9 章	利用高能单色 X 射线分析残余应力	145
9.1	基本装置	145
9.2	狭缝成像原理及数据重建	147
9.3	锥形狭缝	148
9.3.1	工作原理	148
9.3.2	性能	149
9.3.3	实例	150
9.4	螺线形狭缝	151
9.4.1	功能原理	151
9.4.2	性能	152
9.4.3	实例	153
9.5	同时测量几个大晶粒的应变	154
9.6	粗粒度效应	156
9.7	面探测器获取的衍射数据分析	157
9.8	针对具体问题选择实验技术	158
	参考文献	159
第 10 章	高能 X 射线白光分析残余应力	161
10.1	反射模式	161
10.1.1	原因	161
10.1.2	反射几何下深度分辨能量色散 X 射线应力分析 (XSA) 的基本关系式	161
10.1.3	实验装置	164

10.1.4	用能量色散衍射法分析深度方向的残余应力实例	166
10.1.5	结束语和展望	169
参考文献		170
10.2	透射模式	171
10.2.1	原因	171
10.2.2	实验装置和实验细节	171
10.2.3	数据处理	175
10.2.4	例子	176
10.2.5	总结	179
参考文献		179
第 11 章	微结构分析的衍射成像方法	183
11.1	介绍和衍射成像的原理	183
11.2	HASYLAB 光源 G3 束线上的 MAXIM 实验	183
11.3	数据结构	184
11.4	数据处理和可视化策略	185
11.5	展望, 块体成像	187
参考文献		189
第 12 章	小角散射方法基础	190
12.1	小角散射装置的共同特征	190
12.2	衬度	190
12.3	散射曲线	191
12.4	幂定律/分形系统的散射	193
12.5	纪尼叶 (Guinier) 和波罗德 (Porod) 近似	193
12.6	宏观微分散射截面	194
12.7	尺寸分布的模型计算	195
12.8	磁结构	195
参考文献		196
第 13 章	小角中子散射	198
13.1	氢可逆存储的二氢化镁纳米晶体	198
13.2	钢铁中的析出物	201
13.3	聚合物基体中的 SiO_2 纳米颗粒——工业应用	203
13.4	绿色表面活性剂	204
参考文献		205
第 14 章	Cu-Co 合金的分解动力学: 小角 X 射线散射应用	207
14.1	引言	207

14.2	反常小角 X 射线散射 (ASAXS) 的基本原理	207
14.3	表征铜钴合金分解的 ASAXS 实验结果	209
14.4	展望	211
14.5	总结	212
	参考文献	212
第 15 章	B3 成像	214
15.1	射线投影成像	214
15.1.1	基本原理	214
15.1.2	中子与物质的相互作用	215
15.1.3	几何结构	218
15.1.4	分辨率函数	220
15.1.5	图像退化	223
15.1.6	其他成像技术	224
15.2	断层成像	228
15.2.1	数学处理方法介绍	228
15.2.2	切片定理和香农定理	230
15.2.3	图像重建	231
15.3	中子断层成像的新进展	234
	参考文献	238
第 16 章	基于中子和同步辐射的成像在材料科学中的应用 —— 从宏观到 纳米断层成像	240
16.1	引言	240
16.1.1	吸收衬度投影	240
16.1.2	相位衬度投影	241
16.1.3	相位增强投影	241
16.1.4	直接相位衬度投影	242
16.1.5	非直接相位衬度投影	242
16.2	平行束断层成像	242
16.2.1	数据测量和重建	243
16.2.2	密度分辨率和探测器质量	244
16.2.3	数据评估和可视化	245
16.3	中子宏观断层成像	247
16.3.1	实验装置	247
16.3.2	测量和结果	248
16.4	基于同步辐射的显微断层成像	249

16.4.1 束线光学	250
16.4.2 实验装置	252
16.5 总结和展望	254
参考文献	254
第 17 章 工程材料的微断层成像技术 (μ-CT)	257
17.1 同步辐射断层成像的优点	257
17.2 应用和 3D 图像分析	257
17.2.1 碱性电池的放电过程	257
17.2.2 Nb_3Sn 多丝超导线的微结构检测	260
17.2.3 发泡剂在金属泡沫结构中的影响	261
17.3 图像伪影	263
17.3.1 环状伪影	263
17.3.2 图像噪声	263
17.3.3 边缘伪影	264
17.3.4 运动伪影	264
17.3.5 旋转轴的中心误差	265
参考文献	265
第 18 章 衍射增强成像	268
18.1 引言	268
18.1.1 理论基础	268
18.1.2 消光衬度	270
18.1.3 DEI 的原理	270
18.2 实验装置	272
18.3 实例	273
18.3.1 一套完整的 DEI 图像	273
18.3.2 材料科学	274
18.3.3 矿物学研究举例	274
18.4 结论	275
参考文献	276

第三部分 新出现的方法

第 19 章 三维 X 射线衍射显微术	279
19.1 基本实验装置和方法	279
19.1.1 3DXRD 显微镜	282

19.2 晶粒指标化和平均特性表征	282
19.2.1 应用 I: 成核和生长研究	283
19.2.2 应用 II: 塑性形变	284
19.2.3 应用 III: 亚晶粒和纳米晶粒材料研究	285
19.3 晶粒和取向分布图	286
19.3.1 模式 III: 无形变样品中晶粒分布图	286
19.3.2 模式 IV: 形变样品的晶粒取向分布图	287
19.3.3 应用 I: 再结晶	288
19.3.4 应用 II: 晶粒生长	289
19.4 3DXRD 和断层成像术的结合	290
19.4.1 利用断层成像术获取晶粒分布图	290
19.5 展望	291
参考文献	291
第 20 章 三维微米分辨劳埃衍射	293
20.1 引言	293
20.1.1 多色微衍射的需求	293
20.2 先进的多色微衍射理论基础	294
20.2.1 劳埃衍射的修正埃瓦球描述	294
20.2.2 定量信息: 相, 织构, 弹性应变, 位错密度	295
20.3 针对自动 3D 探针的技术发展	296
20.3.1 光源	297
20.3.2 微束单色器	298
20.3.3 非色散聚焦光学元件	299
20.3.4 面探测器	299
20.3.5 差分孔径	299
20.3.6 软件	300
20.4 研究例子	300
20.4.1 晶粒边界的 3D 网络	300
20.4.2 形变行为与晶界	301
20.4.3 单晶中的形变	302
20.4.4 表面及三维尺度上的晶粒生长	302
20.4.5 反常晶粒的生长	304
20.5 未来展望与机遇	304