

现代物理基础丛书

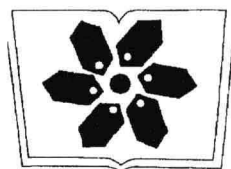
59

内应力衍射分析

姜传海 杨传铮 编著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

现代物理基础丛书 59

内应力衍射分析

姜传海 杨传铮 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

内应力是指产生应力的各种因素不存在时,材料内部依然存在并且自身保持平衡的弹性应力。一般它分为第Ⅰ类、第Ⅱ类和第Ⅲ类应力。本书是基于第Ⅰ类和第Ⅱ类应力分别引起射线衍射线的位移和宽化效应而进行的内应力衍射测定、分析及应用的专业书籍。全书分14章。为了避免深奥的弹性力学理论,本书第1章直接进入内应力定义、分类、衍射效应,按应力分布的三轴、两轴和单轴应力状态的特征及其主应力状态,通过材料的弹性常数(或参数)——杨氏模量、泊松比、刚度和柔度,把应力和应变(应变和应力)联系起来。第2章是晶体学、射线源(包括普通X射线源、同步辐射和中子源)和衍射原理简介。下面分别介绍宏观应力测定一般原理和方法、实验测定设备、各向同性试样的应力分析技术、各向异性试样应力分析技术和应力测定的实验技巧和误差,共5章。第8章为微观应力和相关衍射宽化效应的线形分析。第9章为形变金属材料中的位错和微结构的线形分析。作为应用把机械加工和表面处理引起的残余应力分析、焊接应力分析分别列入第10章和第11章。喷丸引起的宏观残余应力和喷丸材料的晶块细化、微观应变和位错分别列入第12章和第13章。最后一章专门介绍三种典型的绿色电池(镍-氢电池、石墨/LiCoO₂和石墨/LiFePO₄电池)在充放电过程中,由于氢离子和锂离子在正负极活性材料中脱-嵌引起材料内应力(包括第Ⅰ类应力和第Ⅱ类应力)和精细结构变化的分析研究,阐明了这三种电池在充放电过程中导电的物理机制。

本书不仅可供材料、机械、道桥、高铁、城市轨交、航空航天和航海等相关工程技术人员阅读和工作参考,还可供高等院校和科研院所与材料科学、材料物理、物理测试(特别是从事衍射分析)相关专业的教师、科研人员及研究生教学参考和工作参考。

图书在版编目(CIP)数据

内应力衍射分析/姜传海,杨传铮编著. —北京:科学出版社,2013
(现代物理基础丛书;59)

ISBN 978-7-03-038940-4

I. 内… II. ①姜… ②杨… III. ①内应力-射线衍射分析 IV. ①O343②O657.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第250453号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:钟 洋
责任印制:赵德静/封面设计:陈 敬

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年11月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2013年11月第一次印刷 印张:27 1/4

字数:519 000

定价:129.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

主要作者介绍



姜传海, 男, 1963 年 9 月生, 汉族, 教授, 博士生导师。

1983 年 7 月毕业于兰州大学物理系, 1983 年 8 月~1995 年 8 月在哈尔滨汽轮机厂材料研究所工作, 1995 年 9 月~2000 年 2 月在哈尔滨工业大学材料科学与工程学院攻读博士学位, 2001 年 3 月~2003 年 11 月在上海交通大学材料科学与工程学院从事博士后工作。2001 年 12 月至今, 在上海交通大学材料科学与工程学院从事材料表征、教学和实验技术开发研究。2007 年在法国国立高等工程技术学院(ENSAM)做高级访问学者。

现担任中国机械工程学会材料分会理事及残余应力专业委员会副主任兼秘书长、中国机械工程学会失效分析分会理事及喷丸技术专业委员会常务副主任、中国机械工程学会理化检验分会理事、中国晶体学会理事及粉末衍射专业委员、中国物理学会 X 射线衍射专业委员、上海市物理学会 X 射线与同步辐射专业委员会主任等。

开设有材料组织结构表征、X 射线衍射原理和技术、材料近代物理测试方法、不完整晶体结构及其分析方法、同步辐射技术及其应用课程。

共主持国家级、省部级及大中型企业科研项目 50 余项, 发表论文 200 余篇, 被 SCI 及 EI 检索 150 余篇。

著作有《材料的射线衍射和散射分析》《X 射线衍射技术及其应用》《材料组织结构表征》和《中子衍射技术及其应用》。



杨传铮, 男, 1939 年 8 月生, 侗族, 教授。

1963 年 6 月毕业于上海科学技术大学金属物理专业。1963 年 7 月~1988 年 9 月在中国科学院上海冶金研究所从事材料物理和 X 射线衍射及电子显微镜应用方面的研究。1988 年 10 月~1993 年 5 月先后应美国 EXXON 研究与工程公司和美国 Biosym 技术有限公司邀请, 在美国长岛 Brookhaven 国家实验室(BNL)从事材料的同步辐射和中子衍射散射合作研究。1993 年 6 月~1999 年 8 月在上海大学物理系任教, 退休。

先后给研究生开设激光光谱学、物质结构研究的理论与方法、同步辐射应用基础和应用物理前沿系列讲座等课程。先后在各种期刊杂志上发表相关论文 60 多篇。《材料科学中的晶体结构和缺陷的 X 射线研究》获 1982 年国家自然科学四等奖(排名第二),《遥控式 X 射线貌相机》获 1984 年上海市重大科研成果三等奖(排名第一)。

曾任中国物理学会 X 射线专业委员会第一届委员(1982~1998)兼秘书长(1982~1986),上海市物理学会 X 射线专业委员会第一届委员兼秘书长(1982~1992),上海市金属学会理事,兼材料专业委员会副主任。现任上海市物理学会 X 射线和同步辐射专业委员会资深委员。

著作有《物相衍射分析》《晶体的射线衍射基础》。

2004 年 3 月~2011 年 10 月应中国科学院上海微系统与信息技术(原冶金)研究所之聘,对纳米材料和电池活性物质及电极过程进行大量研究,又发表论文 40 多篇。新著有《同步辐射 X 射线应用技术基础》《纳米材料的 X 射线分析》《材料的射线衍射和散射分析》《X 射线衍射技术及其应用》和《中子衍射技术及其应用》。

前 言

内应力是指产生应力的各种因素不存在时 (如外力去除、温度已均匀、相变结束等), 由于不均匀的塑性变形 (包括由温度及相变等引起的不均匀体积变化), 在材料内部依然存在, 并且自身保持平衡的弹性应力。它一般分为三类, 即第 I 类、第 II 类和第 III 类应力。

材料中第 I 类内应力的作用与平衡范围为宏观尺寸, 此范围包含了无数个小晶粒。材料中第 II 类内应力的作用与平衡范围为晶粒尺寸数量级。材料中第 III 类内应力的作用与平衡范围为晶胞尺寸数量级, 是原子之间的相互作用应力, 如晶体缺陷-空位、间隙原子或位错等周围的应力场。

英美文献中把第 I 类应力称为“宏观应力”, 第 II 类和第 III 类应力称为“微观应力”。而我国的科学技术工作者比较习惯于把第 I 类应力称为“残余应力”, 把第 II 类应力称为“微观应力”, 而把第 III 类应力称为晶格 (点阵) 畸变应力或超微观应力。

本书基本采用英美的分类, 同时基于本书主要研究讨论第 I 类和第 II 类应力的衍射分析, 为了避免概念混淆, 采用“内应力”的名称, 其中包括宏观应力和微观应力。在讨论第 I 类 (宏观) 应力时, 又常与残余应力混用。

测定应力的方法有多种, 如应力释放法、磁性方法、超声波方法和应力衍射测定法等, 但以衍射法最为直接, 衍射法具有其他方法不可比拟的优点。

在一般衍射专业书籍中都有一章介绍应力的衍射法测定内容, 在此列出已有的 9 本专著及文集。

(1) 张定铨, 何家文. 材料中残余应力的 X 射线衍射分析和作用. 西安: 西安交通大学出版社, 1999.

(2) 安正植, 王文字. X 射线应力测定方法. 长春: 吉林大学出版社, 1990.

(3) 袁发荣, 伍尚礼. 残余应力的测试与计算. 长沙: 湖南大学出版社, 1987.

(4) (日) 米谷茂. 残余应力的发生和对策. 朱荆璞, 邵会孟, 译. 北京: 机械工业出版社, 1983.

(5) Hutchings M T, Withiers P J, Holden T M, et al. Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction. New York: CRC Press, 2005.

(6) Hutchings M T, Krawitz A D. Measurement of residual stress in materials using neutron diffraction. Proceedings of Technical Meeting. Vienna, 2003.

(7) Hauk V. Structural and Residual Stress Analysis by Non-destructive Methods. Amsterdam: Elsevier, 1997.

(8) Noyan I C, Cohen J B. Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation. Berlin: Springer, 1987.

(9) 日本材料学会志. X 线应力测定法. 东京: 株式会社养贤堂, 1966.

此外, 还有许多应力测定标准:

(1) 1971 年美国汽车工程师学会发布第一个行业标准 SAE J784a “Residential Stress Measurement by X-ray Diffraction”.

(2) 1973 年日本材料学会颁布第一个国家标准 JSMS-SD-10-73 “Standard Method for X-ray Stress Measurement”.

(3) 欧盟标准委员会 (CEN) 于 2008 年 7 月 4 日批准了新的 X 射线衍射残余应力测试标准 EN 15305-2008 “Non-destructive Testing-test Method for Residual Stress Analysis by X-ray Diffraction”.

(4) 美国试验材料学会 (ASTM) 于 2010 年 7 月发布了最新的美国标准版本 ASTM E915-10 “Standard Test Method for Verifying the Alignment of X-ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement”.

(5) 中华人民共和国标准 GB7704—87“X 射线应力测定方法”.

作者阅读了上述的 9 本书, 并对它们的内容、材料的组织、书的结构等进行了对比分析, 感到每本书都各有特点、各有所长, 但也都有些美中不足。由于第一作者长期从事应力 X 射线衍射测量和应用方面的教学和科学研究工作, 培养了许多硕士、博士研究生, 积累了许多资料, 我们想通过合作以较新的组织结构和全新手法编著一本这方面的书, 并定名为《内应力衍射分析》。除书面的署名作者外, 参与编著的还有吴雪艳博士和詹科博士。

本书共分为 14 章, 内容介绍如下。

第 1 章作为绪论 (内应力概述), 其中包括: 内应力的定义及其由来、内应力状态分类、内应力的种类及衍射效应、内应力对材料和部件性能的影响、测定应力的各种方法、用衍射法测定应力的发展简史和内应力的去除与调整。重点是: 为了避免深奥的弹性力学理论, 直接进入按应力分布的三轴、两轴和单轴应力状态的特征及其主应力状态介绍, 通过材料的弹性常数 (或参数)——杨氏模量、泊松比、刚度和柔度, 把应力和应变 (应变和应力) 联系起来。

第 2 章是晶体学、射线源 (包括普通 X 射线源、同步辐射源和中子源) 和衍射原理简介。

第 3 章 ~ 第 7 章以循序渐进的手法分别介绍宏观应力测定的一般原理和方法、实验测定设备、各向同性试样的应力分析技术、各向异性试样应力分析技术和应力测定的实验技术技巧和误差。

第 8 章为微观应力和相关衍射宽化效应的线形分析。第 9 章为形变金属材料中的位错和微结构的线形分析。这两章是关于第 II 类 (微观) 应力、微纳米晶和晶体缺陷 (如堆垛层错和位错等) 引起衍射线宽化效应的所谓“线形分析”及应用。这方面的内容比前面列出的 9 本书中的篇幅有很大扩充和加强。

作为应用把机械加工和表面处理引起的残余应力、焊接应力分别列入第 10 章、第 11 章, 喷丸引起的宏观残余应力和微结构 (包括晶粒细化、微观应变和位错) 分别列入第 12 章和第 13 章。第 10 章的内容比较广泛, 第 12 章和第 13 章的内容是作者多年从事的领域, 许多资料和例子取自研究生的论文 (硕士学位论文、博士学位论文和发表的论文)。

最后一章 (第 14 章) 专门介绍三种典型的绿色电池 (镍-氢电池、石墨/ LiCoO_2 和石墨/ LiFePO_4 电池) 在充放电过程中, 由于氢离子或锂离子在正负极活性材料中脱-嵌引起的内应力 (包括宏观应力和微观应力) 和精细结构随充放电的进程而变化的情况。在分析研究这些变化与充放电深度的关系基础上, 阐明了这三种电池在充放电过程中全新的导电物理机制。

涉及应用实例的这五章, 虽然以宏观应力为主, 但也有许多微观应力的实例, 有些测试对象同时存在宏观应力和微观应力。关于微观应力 (应变) 及其宽化效应在疲劳部件中的应用, 作者做了大量工作, 并在疲劳部件的检测和部件结构的改进方面发挥了重要作用, 由于保密等各种因素, 本书未能给出。

本书的创新处和特点如下:

(1) 系统性。就宏观应力而言, 对应力的起源、测量的一般原理和方法、实验设备、分析技术和实验技巧、测定实例和应用作了系统的介绍; 对微观应力和缺陷宽化的原理、实验线形半宽度正确测量、仪器宽化的扣除, 以及多重宽化效应的分离和微观应变的求解、缺陷参数 (层错几率和位错密度) 的计算及实际应用都系统地作了介绍; 就实际应用而言, 除重点介绍焊接应力和喷丸应力外, 还在“机械加工和表面处理残余应力分析”一章中介绍多种原因产生的应力。

(2) 全面性和完整性。所列的 9 本书中, 要么只介绍 X 射线, 要么只介绍中子衍射, 而本书既介绍了实验室 X 射线衍射的应力测定, 也介绍了同步辐射 X 射线衍射的应力测定, 还介绍中子衍射测定应力 (应变) 的方法; 就实验方法而言, 既介绍一般的同倾法、侧倾法, 还介绍了在此基础上发展出的各种方法 (见第 5 章), 也介绍了二维 X 射线衍射法、X 射线残余应力的层析扫描测定法; 实际例子的介绍也比较全面, 以宏观应力为主, 但也包括微观应力分析和晶体缺陷 (位错和层错) 的例子。

(3) 全书章节的安排循序渐进, 一环扣一环, 紧凑性和可读性强。各部分内容所占比例为基础 (第 1 章、第 2 章): [宏观应力测定原理和方法 (第 3 章) + 实验设备 (第 4 章) + 应力分析技术 (第 4 章、第 5 章) + 应力测定的实验技巧和误差

(第 7 章)]：微观应力的衍射线形分析：应用实例 =2:5:2:5，这样的比例看来是比较合理的。

(4) 在许多章节中注入了作者最新研究成果，如第 8 章衍射线多重宽化效应分离的最小二乘法，以及纳米晶的平均晶粒尺度、微观应变和堆垛层错几率的求解；第 9 章除了从测得的均方应变求位错密度的 Fourier 方法、Williamson 方法及其改进、王煜明方法外，还介绍了分离微晶-位错、微晶-位错-层错多重效应的最小二乘法。不但求得微晶大小、堆垛层错几率和位错密度，还简单介绍了从单条衍射线求解晶块尺度、微观应变和位错密度的 Voigt 方法。

(5) 第二作者与其合作者对镍-氢电池和锂离子电池在充电过程和放电过程中，测定了正负极活性材料宏观应变、微观应变和精细结构参数，研究分析了它们随充放电深度的变化规律，在追究其起因时发现，内应力是氢原子（镍-氢电池）或锂原子（锂离子电池）在正负极活性材料中的脱-嵌所引起的。根据化学电源（电池）在充放电过程中的氧化和还原，无论是充电过程还是放电过程，都是分别在正负极上发生的原理，从而对导电的相变理论产生质疑。相变过程的氧化和还原都是在一个电极上，并分别在充电和放电时发生，而且实验研究证明，在充电过程中 $\beta\text{-Ni}(\text{OH})_2$ （镍-氢电池）和 LiCoO_2 （石墨/ LiCoO_2 电池）并没有发生相变。在此基础上提出，在充电过程中氢原子（镍-氢电池）脱离 $\beta\text{-Ni}(\text{OH})_2$ 点阵到达正极-电解液界面失去一个电子（氧化）变成离子（ H^+ ），进入电解液，在电场的作用下，定向地向负极迁移运动，到达电解液-负极界面时获得从外电路来的电子（还原）成原子，嵌入负极的导电机制。放电过程则与上述过程相反。

与此相似，对于锂离子电池，是锂原子在正负极的脱-嵌，氧化和还原的主体是锂原子。这是本书第 14 章内容对化学电源的一个全新的、重要的贡献。这是所有应力测定和分析方面论文和书籍均未提到的。

作者在总结前人经验的基础上，在全书的组织结构、取材、编写手法，以及创新上作了很大努力，但不妥之处难免存在，敬请读者批评指正，在此深表谢意。最后，感谢科学出版基金的资助。

姜传海 杨传铮

2012 年 12 月于上海交通大学材料与工程学院

目 录

前言

第 1 章 内应力概述	1
1.1 内应力及其由来	1
1.1.1 内应力的定义	1
1.1.2 内应力的起源	1
1.1.3 内应力产生的根本原因	4
1.2 应力状态分类和应力-应变间的基本关系式	5
1.2.1 三轴应力	5
1.2.2 平面应力	9
1.2.3 单轴应力	11
1.2.4 主应力状态	11
1.3 内应力的宏观应力和微观应力	12
1.3.1 第Ⅰ类内应力	12
1.3.2 第Ⅱ类内应力	13
1.3.3 第Ⅲ类内应力	14
1.4 内应力对材料和部件性能的影响	14
1.4.1 内应力对静态强度的影响	14
1.4.2 内应力对疲劳性能的影响	16
1.4.3 内应力对脆性破坏和应力腐蚀开裂的影响	16
1.5 测定应力的方法	18
1.5.1 有损测定法	18
1.5.2 磁性应力测定法	18
1.5.3 超声波应力测定法	19
1.5.4 应力衍射测定法	19
1.5.5 几种应力测定方法的比较	19
1.6 用衍射法测定应力的历史发展	20
1.7 内应力的去除和调整	21
参考文献	23
第 2 章 晶体学基础、射线源和衍射原理	24
2.1 晶体学基础	24

2.1.1	点阵概念	24
2.1.2	晶胞、晶系	25
2.1.3	点阵类型	25
2.2	实验室 X 射线源	27
2.3	同步辐射 X 射线源	29
2.3.1	同步辐射光源的原理	29
2.3.2	同步辐射光源的主要特征	32
2.4	中子射线源	36
2.4.1	稳态反应堆中子源	36
2.4.2	脉冲中子源	37
2.4.3	三种源的比较	39
2.5	射线衍射线束方位——劳厄方程和布拉格公式	41
2.5.1	劳厄方程	41
2.5.2	布拉格公式	43
2.6	多晶体的衍射强度	45
2.6.1	X 射线和中子衍射强度公式	45
2.6.2	三种结构因子的比较和其中原子位置参数	45
	参考文献	46
第 3 章	宏观内应力衍射测定的一般原理和方法	47
3.1	应力衍射测定概述	47
3.1.1	应力衍射测量的出发点	47
3.1.2	衍射应力分析的参考坐标系	47
3.1.3	一般情况下 $\varepsilon_{\varphi\psi}$ 的表达式	48
3.2	应变的测量原理和衍射几何	49
3.2.1	一般的 X 射线衍射	49
3.2.2	掠入射 X 射线衍射	51
3.3	宏观应力测定的基本方法	54
3.3.1	宏观内应力测量的同倾法	54
3.3.2	宏观内应力测量的侧倾法	55
3.3.3	φ 旋转和 ψ 旋转的实质	58
3.4	单轴应力的测定原理和方法	59
3.5	平面应力的测定	59
3.5.1	0° - 45° 法	60
3.5.2	$\sin^2\psi$ 法	60
3.6	三维应力的测定	61

3.6.1	三维应力状态下应力分量和 $\varepsilon_{\varphi\psi} \sim \sin^2 \psi$ 图	61
3.6.2	求三维应力状态的主应力	62
3.6.3	求全部应力分量	63
3.7	无应力状态的晶面间距 d_0 测量及与厚度方向 σ_{33} 的关系	64
3.7.1	无应力-应变方向 ψ^* 的 $d_0(\psi^*)$ 值	65
3.7.2	实验测定无应力状态的 d_0	66
3.8	X 射线残余应力的层析扫描测定	68
3.8.1	X 射线残余应力层析扫描测定原理及装置	69
3.8.2	三维应力计算的自我控制机制及程序设计	70
3.8.3	残余应力 X 射线层析扫描测定方法的程序设计	71
3.9	二维衍射测定残余应变的方法	72
3.9.1	用 2D-XRD 测量应力的基本方程	72
3.9.2	二维方程与普通方程间的关系	73
3.9.3	双轴应力状态	74
3.9.4	真实无应力点阵的晶面间距 d_0	75
3.9.5	各向异性因子	76
3.10	残余应力构图的测绘	77
	参考文献	78
第 4 章	宏观应力衍射测定的设备和装置	79
4.1	一般的二圆 (三圆) 衍射仪	79
4.1.1	现代 X 射线粉末衍射仪的结构	80
4.1.2	衍射仪的扫描模式	81
4.1.3	粉末衍射仪的工作模式	81
4.1.4	利用二圆衍射仪进行应变测量有关问题的讨论	82
4.2	X 射线应力测定仪	83
4.2.1	应力测定仪的设计要求	84
4.2.2	应力测定仪的结构和特点	85
4.2.3	国产 X 射线应力测定仪	86
4.2.4	国外 X 射线应力测定仪	87
4.3	同步辐射 X 射线应力测定设备——六圆衍射仪	88
4.4	中子衍射法应变测定装置	89
	参考文献	93
第 5 章	宏观弹性各向同性材料应力状态分析技术	94
5.1	弹性各向同性试样中的 $\sin^2 \psi$ 定律	94
5.2	宏观弹性各向同性试样和弹性各向异性试样	95

5.3 单个 hkl 反射方法	98
5.3.1 单个 hkl 反射中的 $\sin^2 \psi - \sin 2\psi$ 方法: 三轴应力状态分析	98
5.3.2 单个 hkl 反射中 $\sin^2 \psi$ 方法: 三轴主应力状态分析	100
5.3.3 单个 hkl 反射中 $\sin^2 \psi$ 方法: 两轴应力状态分析	101
5.3.4 单个 hkl 反射中 $\sin^2 \psi$ 方法: 两轴主应力状态分析	102
5.3.5 单个 hkl 反射中 $\sin^2 \psi$ 方法: 旋转对称两轴应力状态分析	102
5.3.6 单个 hkl 反射中 $\sin^2 \psi$ 方法: 单轴应力状态分析	102
5.3.7 单个 hkl 反射中 φ 积分法: 三轴应力状态分析	103
5.3.8 单个 hkl 反射中 $\cos^2 \varphi$ 法: 双轴应力状态分析	103
5.4 多重 hkl 反射法	104
5.4.1 多重 hkl 反射中 $g(\psi; hkl)$ 方法: 双轴应力状态分析	105
5.4.2 多重 hkl 反射中 $f(\psi; hkl)$ 方法: 旋转对称双轴应力状态分析	105
5.5 任何应力状态的一般最小二乘方分析	107
5.6 所描述方法的注释和评论	108
5.6.1 从测得的点阵间距计算点阵应变	109
5.6.2 所描述各种方法的特点	110
5.6.3 对掠入射衍射有利的方法	111
5.7 张量计算的 ψ 角倾斜 Dolle-Hauk 方法	111
5.8 衍射 (X 射线) 弹性常数的测定	113
5.8.1 在平面应力状态下测定	113
5.8.2 在单轴应力状态下测定	115
参考文献	117
第 6 章 宏观弹性各向异性试样应力状态分析技术	118
6.1 衍射 (X 射线) 应力因子	118
6.2 宏观弹性各向异性试样任何应力状态的一般最小二乘方分析	119
6.2.1 例 1: 单轴负载冷轧铁钢带深度绘图	119
6.2.2 例 2: 显示各向异性晶粒交互作用的织构薄铜层	120
6.3 织构宏观弹性各向异性试样的特殊方法 —— 微晶群方法	121
6.3.1 微晶群方法	121
6.3.2 例子	123
6.4 晶粒交互作用模型	124
6.4.1 Voigt 模型	125
6.4.2 Reuss 模型	125
6.4.3 Eshelby-Kroner 模型	126
6.4.4 Vook-Witt 模型和反 Vook-Witt 模型	128

6.4.5	有效晶粒交互作用模型	130
6.4.6	各种晶粒交互作用模型比较	131
6.5	晶粒交互作用模型模拟实例和试样实例	132
6.5.1	基于各种晶粒交互作用模型衍射应变模拟	132
6.5.2	实验实例	135
6.6	单晶体的应力测定	136
6.6.1	单晶体的应力测定原理	136
6.6.2	三轴应力的测定	137
6.6.3	二轴应力的测定	138
6.6.4	单晶体应力测定的例子——Al 单晶的内应力测定	140
6.7	织构样品的应力测定	140
6.7.1	一般讨论	140
6.7.2	织构试样应力测定原理和方法	144
6.8	薄膜和表面宏观应力的衍射测定	147
	参考文献	151
第 7 章	应变衍射测量实验技术和误差	153
7.1	应变衍射测量的对象和要求	153
7.1.1	测定对象	153
7.1.2	试样表面状态的影响	153
7.1.3	试样形状对应力测定的影响	154
7.1.4	试样晶粒大小的影响	156
7.1.5	材料组织结构的影响	157
7.1.6	测点位置设定	158
7.2	测量参数选择和设置	158
7.2.1	φ 和 ψ 角设置	158
7.2.2	辐射波长与衍射晶面	160
7.3	衍射峰位的测量	160
7.3.1	测定衍射峰位的方法	160
7.3.2	各种测定峰位的比较	163
7.4	应力测定中的误差	164
7.4.1	应力测定与衍射晶面的选择有关的误差	164
7.4.2	峰位测定引入的误差	165
7.5	残余应力分析中的仪器误差	169
7.5.1	由光束光学引起的误差	169
7.5.2	仪器调整引起的误差	171

7.6 应力的统计误差	172
7.6.1 $\sin^2 \psi$ 技术	172
7.6.2 双倾斜技术	173
7.6.3 三轴应力分析	173
7.7 X 射线弹性常数的统计误差	175
7.8 复杂形状样品的应力测定	176
7.8.1 曲面切向残余应力的测定	176
7.8.2 曲面轴向残余应力的测定	178
7.8.3 小半径缺口件的残余应力测定	179
7.8.4 复杂形状部件残余应力测定实例 —— 曲轴圆角的残余应力测定	181
7.9 多相材料中第 II 类应力对第 I 类应力测定的影响	185
参考文献	186
第 8 章 微观应力和相关衍射宽化效应的线形分析	188
8.1 谱线线形的卷积关系	188
8.2 晶粒度宽化和微应变宽化	189
8.2.1 X 射线衍射晶粒度宽化效应 —— 谢乐公式	189
8.2.2 微观应变引起的宽化	191
8.3 分离微晶和微观应力宽化效应的各种方法	191
8.3.1 Fourier 级数法	191
8.3.2 方差分解法	193
8.3.3 近似函数法	193
8.3.4 前述几种方法的比较	194
8.4 堆垛层错引起的 X 射线衍射效应	195
8.4.1 密堆六方的堆垛层错效应	195
8.4.2 面心立方的堆垛层错效应	195
8.4.3 体心立方的堆垛层错效应	197
8.5 分离密堆六方 ZnO 中微晶-层错宽化效应的 Langford 方法	197
8.6 分离 XRD 线宽多重化宽化效应的最小二乘方法	198
8.6.1 分离微晶和微观应力宽化效应的最小二乘方法	198
8.6.2 分离微晶-层错 XRD 线宽化效应的最小二乘方法	200
8.6.3 分离微应力-层错二重宽化效应的最小二乘方法	201
8.6.4 微晶-微应力-层错三重宽化效应的最小二乘方法	201
8.6.5 系列计算程序的结构	203
8.7 面心立方纳米材料 NiO 的制备和表征中微结构的研究	205
8.8 体心立方结构 V-Ti 合金在储放氢中的微结构研究	207

8.9 生产态 β -Ni(OH) ₂ 中的微结构的研究	209
8.10 Mg-Al 合金中的微结构研究	211
8.11 作图法与最小二乘法的比较	213
参考文献	215
第 9 章 形变金属材料中的位错和微结构宽化的线形分析	218
9.1 Fourier 方法和改进的 Williamson-Hall 方法	219
9.1.1 Williamson 公式和改进的 Williamson-Hall 方法	219
9.1.2 用 Fourier 方法测定位错密度	220
9.1.3 球磨 α -铁粉中的晶粒大小和位错密度测定	221
9.2 测定多晶样品位错的王煜明方法	222
9.2.1 基本原理	222
9.2.2 实例的试样和实验	225
9.2.3 实例的结果和讨论	225
9.3 位错宽化的确定	228
9.4 位错的比对因子 C_{hkl}	229
9.4.1 位错的比对因子 C_{hkl} 的计算	229
9.4.2 测定位错的位移场	233
9.5 比对因子 C_{hkl} 的计算	235
9.5.1 FCC 材料的 C_{hkl} 值	235
9.5.2 BCC 材料的 C_{hkl} 值	240
9.6 由半高宽求解晶粒大小和位错密度	244
9.7 由半高宽求解晶粒大小、位错密度和层错概率	245
9.8 用最小二乘方法测定位错密度实例 —— 球磨铁粉末的晶粒大小和位错密度	247
9.9 Voigt 的单线分析法	248
参考文献	248
第 10 章 机械加工和表面处理残余应力分析	250
10.1 切削加工的残余应力	250
10.2 磨削加工的残余应力	253
10.3 棒材因拉拔、挤压所产生的残余应力	256
10.4 拉拔圆管产生的残余应力	259
10.5 冷轧产生的残余应力	262
10.5.1 冷轧产生残余应力的一些例子	262
10.5.2 轧制板材残余应力分析的发展趋势	265
10.6 表面淬火处理的残余应力	265

10.7 渗碳层和渗氮层中的残余应力	270
10.7.1 渗碳层中的残余应力	270
10.7.2 渗氮层中的残余应力	272
10.8 硬质合金后处理过程中残余应力	273
10.9 ZrO_2 热障涂层残余应力分析	276
10.10 电镀产生的应力	278
参考文献	280
第 11 章 焊接残余应力测定和对策	281
11.1 引言	281
11.1.1 焊接方法分类	281
11.1.2 焊接残余应力的分类	283
11.1.3 焊接残余应力对结构性能的影响及其成因	283
11.1.4 用于焊接应力测定方法	285
11.2 平板焊接残余应力测定的若干例子	286
11.2.1 薄板焊接和厚板焊接	286
11.2.2 厚板焊接表面应力测定实例	287
11.2.3 35CrMnSi 钢平板电子束焊接残余应力的分析	290
11.2.4 对接焊铝板残余应力分析	293
11.3 钢管道焊接残余应力分析和点焊的残余应力分析	297
11.3.1 钢管道焊接残余应力分析	297
11.3.2 点焊产生的残余应力	300
11.4 焊接应力分布等应力线图	300
11.5 控制和消除焊接残余应力的方法	302
11.5.1 控制焊接残余应力的方法	302
11.5.2 消除焊接残余应力的方法	304
11.6 焊接残余应力研究的发展方向	306
参考文献	306
第 12 章 材料和部件的表层喷丸残余应力	308
12.1 喷丸及其对材料性能的影响	308
12.1.1 喷丸工艺	308
12.1.2 喷丸对性能的影响	310
12.1.3 喷丸工艺适用的领域	310
12.2 喷丸应力的模型数值模拟	311
12.2.1 有限元法综述	311
12.2.2 ANSYS 简介	312