

材料科学与技术丛书

R. W. 卡恩 P. 哈森 E. J. 克雷默 主编

(第2A卷)

材料的 特征检测

(第I部分)

(美) E. 利弗森 主编

科学出版社



材料科学与技术丛书(第 2A 卷)

R. W. 卡恩 P. 哈森 E. J. 克雷默 主编

材料的特征检测

(第 I 部分)

〔美〕 E. 利弗森 主编

叶恒强 等 译

科学出版社

1998

图字:01-97-1612 号

图书在版编目(CIP)数据

材料的特征检测 第 I 部分/(美)E. 利弗森(Lifshin, E.)主编;叶恒强等译. —北京:科学出版社,1998. 6

书名原文:Characterization of Materials Part I

(材料科学与技术丛书,第 2A 卷)

ISBN 7-03-006435-6

I. 材… I. ①利… ②叶… III. 工程材料-检测 IV. TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 27760 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

北京双青印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1998 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16
1998 年 6 月第一次印刷 印张:42 1/4
印数:1—2 600 字数:975 000

定价:95.00 元

《材料科学与技术》丛书

中文版编委会

主编

师昌绪 国家自然科学基金委员会
柯 俊 北京科技大学
R. W. 卡恩 英国剑桥大学

成员 (以姓氏笔画为序)

丁道云 中南工业大学
干福熹 中国科学院上海光机研究所
叶恒强 中国科学院金属研究所
刘嘉禾 北京钢铁研究总院
朱逢吾 北京科技大学
朱鹤孙 北京理工大学
吴人洁 上海交通大学
闵乃本 南京大学
周邦新 中国核动力研究设计院
柯 伟 中国科学院金属腐蚀与防护研究所
施良和 中国科学院化学研究所
郭景坤 中国科学院上海硅酸盐研究所
徐 僊 四川大学
徐元森 中国科学院上海冶金研究所
黄 勇 清华大学
屠海令 北京有色金属研究总院
雷廷权 哈尔滨工业大学
詹文山 中国科学院物理研究所
颜鸣皋 北京航空材料研究院

总 译 序

20 世纪 80 年代末,英国剑桥大学的 R. W. 卡恩教授、德国哥丁根大学的 P. 哈森教授和美国康乃尔大学的 E. J. 克雷默教授共同主编了《材料科学与技术》(Materials Science and Technology)丛书。该丛书是自美国麻省理工学院于 80 年代中期编写的《材料科学与工程百科全书》(Encyclopedia of Materials Science and Engineering)问世以来的又一部有关材料科学和技术方面的巨著。该丛书全面系统地论述了材料的形成机理、生产工艺及国际公认的科研成果,既深刻阐述了有关的基础理论,具有很高的学术水平,又密切结合生产实际,实用价值较强。

该丛书共 19 卷(23 分册),分三大部分:第 1~6 卷主要阐述材料科学的基础理论;第 7~14 卷重点介绍材料的基本性能及实际应用;第 15~19 卷则着重论述材料的最新加工方法和工艺。

该丛书覆盖了现代材料科学的各个领域,系统而深入地对材料科学和技术的各个方面进行了精辟的论述,并附以大量图表加以说明,使其内容更加全面、翔实,论述也比较严谨、简洁。

有 400 余名国际知名学者、相关领域的学术带头人主持或参加了该丛书的撰写工作,从而使该丛书具有很高的权威性和知名度。

该丛书各卷都附有大量参考文献,从而为科技工作者进一步深入探讨提供了便利。

随着我国科学技术的飞速发展,我国从事与材料有关研究的科技人员约占全部科技人员的 1/3,国内现有的有关材料科学方面的著作远远满足不了广大科技人员的需求。因此,把该丛书译成中文出版,不但适应我国国情,可以满足广大科技人员的需要,而且必将促进我国材料科学技术的发展。

基于此,几年前我们就倡议购买该丛书的版权。科学出版社与德国 VCH 出版社经过谈判,于 1996 年 10 月达成协议,该丛书的中文版由科学出版社独家出版。

为使该丛书中文版尽快与广大读者见面,我们成立了以师昌绪、柯俊、R. W. 卡恩为主编,各分卷主编为编委的中文版编委会。为保证翻译质量,各卷均由国内在本领域学术造诣较深的教授或研究员主持有关内容的翻译与审核工作。

本丛书的出版与中国科学院郭传杰研究员的帮助和支持是分不开的,他作为长期从事材料科学研究的学者,十分理解出版本丛书的重大意义,购买本

丛书版权的经费问题就是在他的大力协助下解决的，特此对他表示感谢。另外，本丛书中文版的翻译稿酬由各卷主编自筹，或出自有关课题组和单位，我们对他们给予的支持和帮助表示衷心的感谢。

我们还要感谢中国科学院外籍院士、英国皇家学会会员 R. W. 卡恩教授，他以对中国人民的诚挚友谊和对我国材料科学发展的深切关怀，为达成版权协议做出了很大努力。

材料是国民经济发展、国力增强的重要基础，它关系着民族复兴的大业。最近几年，我国传统材料的技术改造，以及新型材料的研究正在蓬勃展开。为适应这一形势，国内科技界尽管编著出版了不少材料科学技术方面的丛书、工具书等，有的已具有较高水平，但由于这一领域的广泛性和迅速发展，这些努力还是不能满足科技工作者进一步提高的迫切要求，以及我国生产和研究工作的需要。他山之石，可以攻玉。在我国造诣较深的学者的共同努力下，众煦漂山，集腋成裘，将这套代表当代科技发展水平的大型丛书译成中文。我们相信，本丛书的出版，必将得到我国广大材料科技工作者的热烈欢迎。

为了使本丛书尽快问世，原著插图中的英文说明一律未译，各卷索引仍引用原著的页码，这些页码大致标注在与译文相应的位置上，以备核查。

由于本丛书内容丰富，涉及多门学科，加之受时间所限，故译文中难免存在疏漏及不足之处，请读者指正。

师昌绪

柯俊

1998年3月于北京

译 者 序

《材料科学与技术》丛书中将材料的表征集中在第2卷(A,B)介绍,而且给予了两分卷的较大容量,这反映出材料表征技术的重要性和应用范围的广泛性。为了对所涉及的技术提供恰当的介绍,每一章都写得足够详细,但又比较简洁。各章作者都是本领域有成就的专家,所以内容的准确性是无庸置疑的。根据翻译的体会,我们想向读者说明两点:第一,本卷内容在检验与研究中偏向后者,所以没有提及较普遍使用的材料评价技术;在材料的表征及其与技术发展中偏向前者,所以不侧重介绍方法与技术的最终结果。这无疑很适合广大的材料科学工作者参阅。第二,本书原版出版于1992年末,距今已有5年多。虽然材料表征技术的本体是比较稳定的,但新技术的发展也很迅猛。有兴趣的读者可以查阅最近的期刊和会议文集,或请教有关专家以及时掌握近年来的新进展。

本卷(A卷)的翻译主要由中国科学院金属研究所的学者承担,我们还约请了大连海事大学的黑祖昆教授翻译第9章和中国科学院金属腐蚀与防护研究所的贺智端研究员翻译第10章。

丛书序

材料是多种多样的,如金属、陶瓷、电子材料、塑料和复合材料,它们在制备和使用过程中的许多概念、现象和转变都惊人地相似。诸如相变机理、缺陷行为、平衡热力学、扩散、流动和断裂机理、界面的精细结构与行为、晶体和玻璃的结构以及它们之间的关系、不同类型材料中的电子的迁移与禁锢、原子聚集体的统计力学或磁自旋等的概念,不仅用来说明最早研究过的单个材料的行为,而且也用来说明初看起来毫不相干的其它材料的行为。

正是由于各材料之间相互有机联系而诞生的材料科学,现在已成为一门独立的学科以及各组成学科的聚集体。这本新的丛书就是企图阐明这一新学科的现状,定义它的性质和范围,以及对它的主要组成论题提供一个综合的概述。

材料技术(有时称材料工程)更注重实际。材料技术与材料科学相互补充,主要论及材料的工艺。目前,它已变成一门极复杂的技艺,特别是对新的学科诸如半导体、聚合物和先进陶瓷(事实上对古老的材料)也是如此。于是读者会发现,现代钢铁的冶炼与工艺已远超越古老的经验操作了。

当然,其它的书籍中也会论及这些题目,它们往往来自百科全书、年报、专题文章和期刊的个别评论之中。这些内容主要是供专家(或想成为专家的人)阅读。我们的目的并非是贬低同行们在材料科学与技术方面的这些资料,而是想创立自己的丛书,以便放在手边经常参考或系统阅读;同时我们尽力加快出版,以保证先出的几卷与后出的几卷在时效方面有所衔接。个别的章节是较之百科全书和综述文章讨论得更为详细,而较之专题文章为简略。

本丛书直接面向的广大读者,不仅包括材料科学工作者和工程师,而且也针对活跃在其它学科诸如固体物理、固体化学、冶金学、建筑工程、电气工程和电子学、能源技术、聚合物科学与工程的人们。

本丛书的分类主要基于材料的类型和工艺模式,有些卷着眼于应用(核材料、生物材料),有些卷则偏重于性能(相变、表征、塑性变形和断裂)。有些题材的不同方面有时会被安排在两卷或多卷中,而有些题材则集中于一专卷内(如有关腐蚀的论述就是编在第7卷的一章中,有关粘结的论述则是编在第12卷的一章中)。编者特别注意卷内与卷间的相互引证。作为一个整体,本丛书完成时将刊出一卷累积的索引,以便查阅。

我们非常感谢 VCH 出版社的编辑和生产人员,他们为收集资料并最后出

书,对这样繁重的任务作出了大量而又高效的贡献。对编辑方的 Peter Gregory 博士和 Deborah Hollis 博士、生产方的 Hans-Jochen Schmitt 经济学工程师表示我们的特别谢意。我们亦感谢 VCH 出版社的经理们对我们的信任和坚定的支持。

R. W. 卡恩 (Cambridge)

P. 哈森 (Göttingen)

E. J. 克雷默 (Ithaca)

1991 年 4 月

前 言

表征对于系统地发展新材料及了解其在实际使用中的行为是很重要的。在本丛书所有各卷中,性能与显微组织及化学成分相联系的主题一再重复。第2卷集中介绍为表征合金、半导体、聚合物及陶瓷所需的主要方法。现代材料诸如高温合金,热塑性工程材料和半导体多层膜等,都是多组元、多相的,这些相的细节非常复杂而且通常随加工过程而变化。它们的重要结构特征的尺度会有数量级的差别,有时关键的特点仅存在于原子尺度,即使已制成产品,这些产品在温度与压力等物理环境下仍会发生变化。既然这些物理化学变化会影响制成品的性能,因此也需要了解如何通过调整成分、制备与加工来达到延长产品寿命的制造方法和技术。对材料表征专家的要求是了解特定的设备与分析技术如何能提供是哪些因素使得材料或制成品性能独特的详细信息。对材料科学家、化学家和工程师的要求则是要知道哪些信息对充分表征具体材料与制品是必需的,知道如何运用这些信息去解释材料的行为、发展新材料、改善已有材料的性能、降低价格和按规程要求确保可靠性。

现在已有成千种技术用于表征材料。这些技术的适用性取决于所提供的是什么样品,以及样品对给定探针的响应范围。探针可以是电子、中子、离子、电磁辐射,或者甚至是物理实体的针。响应可以是上述列举射线以某种形式被散射或吸收,但也有可能是二次响应的激发,如辐射或发射质点。可能提供的表征技术范围是如此之广泛,所以每个人只能掌握少数几种。各种学术刊物和技术会议每年有数以百计的论文或报告公布新的表征技术。编撰第2B卷的目的是对一些最重要的技术提供概要的介绍。每一章都写得足够详细以使得读者了解所介绍的仪器是怎样工作的,它能提供哪些信息,以及它的局限性。

第2A卷集中介绍各种显微技术,其放大倍数从光学显微镜的低倍到扫描电子显微镜的高倍,直到透射电子显微镜的非常高分辨能力的倍数。元素分析是基于光与X射线的发射技术。晶体与晶粒结构的问题归纳在X射线衍射、光学显微术和电子衍射结合透射电子显微术等章节。其它章介绍用诸如热分析及同步辐射技术得到的信息。由于用于高分子聚合物的许多分析技术与用于金属及陶瓷分析的有显著不同,所以另辟一章介绍频繁用于这类重要材料的分析技术。

第2B卷包括俄歇显微术、高能离子探针和X射线光电子能谱等表面分析技术,对令人振奋的扫描隧道显微术及原子力显微术等新技术作了专门的介绍。其它章包括中子衍射、X射线散射、小角度散射、体视显微术、机械频

谱术和电子探针分析等。对比较不那么普遍的声显微术也介绍了其信息定量处理的方法。对于那些只对一种信息例如元素分析感兴趣的读者,建议他们先浏览有关的章节,从中发现不同的途径,然后根据自己的需要及资源的可能选择最适合的方法。

我感谢各位作者的辛勤劳动。特别对 R. W. 卡恩教授表示谢意,感谢他所提出的意见,以及他对编辑的建议和帮助选定作者。

E. 利弗森

Schenectady, 纽约州, 1992 年 2 月

目 录

1	电子衍射与透射电子显微术	(1)
2	分析电子显微术	(131)
3	扫描电子显微术	(197)
4	X 射线衍射	(221)
5	光学显微术	(314)
6	原子光谱法	(370)
7	热分析方法	(430)
8	同步 X 射线辐射用于材料科学	(482)
9	X 射线荧光分析	(541)
10	聚合物分子结构的测定	(577)
索 引		(618)

1 电子衍射与透射电子显微术

Severin Amelinckx

Laboratorium voor Algemene Natuurkunde en Fysica van de Vaste Stof,

Universiteit Antwerpen, Antwerpen, Belgium

(叶恒强 译)

目 录

1.1 引言	9
1.2 衍射几何	9
1.2.1 布拉格(Bragg)定律与埃瓦尔德(Ewald)构型	9
1.2.2 原子散射因子——相互作用强度	10
1.3 运动学衍射理论	11
1.3.1 引言	11
1.3.2 菊池(Kikuchi)线	12
1.3.3 测定偏离参数 s 的符号与量值	14
1.3.4 电子的折射	15
1.3.5 运动学理论基本方程	15
1.3.6 运动学摆动曲线	18
1.3.7 晶柱近似	19
1.3.8 变形晶体的描述	20
1.3.9 形变晶体的衍射方程	21
1.3.10 层错条纹	21
1.3.11 位错位移场	22
1.4 双束动力学理论	22
1.4.1 基本方程的推导:达尔文(Darwin)途径	22
1.4.2 衍射方程的另一种形式	24
1.4.3 形变晶体的动力学方程	25
1.4.4 完整晶体动力学方程的解	25
1.4.5 色散面与波场	28
1.4.5.1 双束情况	28
1.4.5.2 多束情况	31
1.4.6 出射面的波函数	32
1.4.7 点阵条纹起源的直观模型	32
1.4.8 吸收	33
1.4.8.1 正常吸收	33

1.4.8.2 反常吸收	34
1.4.9 包括反常吸收的动力学方程	35
1.4.10 波场	35
1.4.11 完整晶体的弯曲消光轮廓	37
1.5 平面界面的衬度:双束动力理论	38
1.5.1 引言	38
1.5.2 矩阵公式	38
1.5.2.1 完整晶体矩阵	38
1.5.2.2 有缺陷晶体的矩阵,位移矩阵	39
1.5.2.3 真空矩阵	41
1.5.2.4 重叠界面	41
1.5.3 包括反常吸收的平面界面的条纹剖面	42
1.5.3.1 引言	42
1.5.3.2 平移界面	42
1.5.3.3 平移界面的条纹性质(α 条纹)	43
1.5.3.4 畴界条纹(δ 条纹)	44
1.5.3.5 畴界条纹的性质	46
1.5.4 应用	47
1.5.4.1 测定层错类型	47
1.5.4.2 畴织构	49
1.5.4.3 畴织构的衍射图	50
1.5.4.4 在非中心对称晶体的反演边界	52
1.5.4.5 结构因子衬度	52
1.6 位错衬度	53
1.6.1 直觉的考虑	53
1.6.2 像剖面图:运动学理论	58
1.6.3 像剖面图:动力学理论	58
1.6.3.1 螺位错像	59
1.6.3.2 刃位错与混合位错的像	62
1.6.3.3 部分位错	63
1.6.3.4 小缺陷	64
1.6.3.5 定性像剖面图	64
1.6.3.6 位错的像侧	66
1.6.3.7 表征位错	67
1.6.3.8 弱束法	68
1.7 水纹图	71
1.7.1 直观的考虑	71
1.7.2 理论考虑	71
1.8 双束点阵条纹	73
1.8.1 理论的考虑	73
1.8.2 点阵条纹的性质	74

1.9 高分辨电子显微术(HREM)	75
1.9.1 引言	75
1.9.2 理想显微镜中像的形成	75
1.9.3 实际显微镜中像的形成	75
1.9.3.1 球差	76
1.9.3.2 光阑	76
1.9.3.3 离焦	77
1.9.3.4 色差	77
1.9.3.5 束发散	78
1.9.3.6 极限分辨率	78
1.9.3.7 相移	78
1.9.4 成像的数学公式	79
1.9.4.1 总论	79
1.9.4.2 相光栅近似	79
1.9.4.3 弱相位体	80
1.9.4.4 最佳欠焦像	81
1.9.4.5 厚相位体或投影电荷密度近似	82
1.9.5 二维多束像	83
1.9.5.1 波动途径(傅里叶分析)	83
1.9.5.2 粒子途径(通道)	84
1.9.5.3 像解释	85
1.9.5.4 由高分辨电子显微术揭示的缺陷	85
1.10 几何衍射理论	86
1.10.1 引言	86
1.10.2 调制结构的衍射	88
1.10.3 成分调制	89
1.10.4 位移调制	89
1.10.5 成分加位移调制	91
1.10.6 平移界面调制	91
1.11 二元系短程序	92
1.11.1 引言	92
1.11.2 过渡态漫散射	93
1.11.3 应用事例	95
1.11.3.1 漫散射平面	95
1.11.3.2 漫散射线	95
1.11.4 短程序参数	95
1.11.5 由于取向无序的漫散射	96
1.11.6 位移无序	98
1.11.7 散射中心非周期排列	98
1.11.7.1 引言	98
1.11.7.2 均匀序列	99

1.11.7.3 几率序列	101
1.12 应用实例	103
1.12.1 引言.....	103
1.12.2 位错的精细结构	104
1.12.2.1 测量层错能	104
1.12.2.2 多重带	105
1.12.2.3 塑性形变:滑移位错	106
1.12.3 小质点.....	108
1.12.4 点缺陷团簇.....	109
1.12.5 准晶体.....	110
1.12.6 混合层化合物.....	110
1.12.7 MTS_3 化合物	112
1.12.8 平面界面.....	113
1.12.9 畴结构.....	114
1.12.10 有序合金结构	115
1.12.11 合金的长周期结构	117
1.12.12 矿物	120
1.12.13 半导体中制造诱生的缺陷	122
1.12.14 非化学比超结构	123
1.12.15 其它应用	125
1.12.15.1 原位研究	125
1.12.15.2 辐照损伤	125
1.12.15.3 辐照有序	125
1.12.15.4 磁畴结构	126
1.13 致谢	126
1.14 参考文献	127

符号与缩语表

$A(\mathbf{h})$	散射矢 $\mathbf{h}$ 的散射振幅
$A(u, v)$	光阑函数
$A(x, y)$	在 (x, y) 处由晶柱散射的波振幅
$A_B(\mathbf{h}), A_D(\mathbf{h})$	布拉格衍射峰和漫散射峰的散射振幅
$\mathbf{a}_i$	晶体点阵的基矢
$\mathbf{b}$	位错的伯格斯矢量
$\mathbf{b}_i$	倒易点阵基矢
$B^{(1,2)}(\mathbf{r})$	在晶柱中被激发的 Bloch 波
c	真空中光速
C	衬度

C_c	色差系数
C_s	球差系数
d_g	产生反射平面的面间距
d_{hkl}	指数为 h, k, l 的面间距
e	一套平面界面的法线单位矢
e	电子电荷
E	加速电压
e_n	单位法线
f	焦距
$f_e(\theta)$	电子的原子散射因子
F_g	指数为 (h_1, h_2, h_3) 反射 g 的结构因子
$f_X(\theta)$	X 射线的原子散射因子
$F, F_{u,v, x, y}$	傅里叶变换
Δf	离焦距离
g	倒易点阵矢
$\Delta g_{\parallel, \perp}$	Δg 在 g 上的平行与垂直分量
h	在倒易空间的衍射矢或位矢
h	普朗克常量
h, k, l	米勒指数
H	面指数 h, k, l (或 h_1, h_2, h_3)
I_g	衍射束强度
$I_{g, \max}$	I_g 在 $s_g=0$ 处的强度
$I(h)$	散射矢 h 的散射强度
I_s	衍射束的强度
I_T	透射束的强度
$I_{s,0}, I_{T,0}$	$s_g=0$ 处的 I_s, I_T
k	波矢
K	入射电子束进入晶体后经平均内势折射修正后的波矢
K	埃瓦尔德球半径
k_g	晶体内衍射波矢; $k_g = k_0 + g$
K_t	K 的切线分量
k_0	晶体内入射波矢
K_0	真空中入射电子波波矢
$k_{0,t}, K_{0,t}$	k_0, K_0 的切线分量
m	长间距的份额
m	相对论性电子质量
$M(s, z)$	完整晶体片的传播矩阵
$m_{A,B}$	A, B 原子的原子份额