

材料科学与技术丛书

R. W. 卡恩 P. 哈森 E. J. 克雷默 主编

(第2B卷)

材料的 特征检测

(第Ⅱ部分)

(美) E. 利弗森 主编

科学出版社



材料科学与技术丛书(第 2B 卷)

R. W. 卡恩 P. 哈森 E. J. 克雷默 主编

材料的特征检测 (第 II 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2B卷)

ISBN 7-03-006451-8

I. 材… II. 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 28116 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:44 1/4

印数:1—2 600 字数:102 000

定价:96.00 元

Materials science and technology; a comprehensive treatment/ed. by R. W. Cahn---Weinheim; New York; Basel; Cambridge; VCH

Characterization of materials/Vol. ed. ; Eric Lifshin. -Weinheim; New York; Basel; Cambridge; Tokyo; VCH

(Materials science and technology; Vol. 2)

© VCH Verlagsgesellschaft mbH, D 69451 Weinheim (Federal Republic of Germany), 1994

《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

《材料科学和技术》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,每一章都介绍得足够详细,但文字又比较简洁。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,本卷在介绍检验与研究方面偏向后者,所以没有提及较普遍使用的材料评价技术;在论及表征材料与技术发展方面偏向前者,所以不侧重介绍方法与技术最终研究结果。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1993年末,距今已有4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发表的期刊和会议文集,或请教有关专家以及及时掌握近年来的新进展。

本卷(B卷)的翻译主要由中国科学院金属研究所的学者承担。此外,我们还约请了湘潭大学的杨奇斌教授和北京钢铁研究总院的张晋远教授翻译了第20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)。编者们特别注意到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)

我们的朋友和主编 P. 哈森教授,在今年五月份生病,并于 10 月 18 日在哥丁根 (Göttingen) 逝世,时年 66 岁。直到临终的最后一段时间,由于意志的驱使和对科学的热爱,他一直从事与我们合作的事业和参与有关的编辑工作。他的逝世对他的深为他热爱的家庭,他的同事们,他的教会,以及对全世界与他有密切联系的、从事金属物理和物理冶金方面研究的同行们是巨大的损失。

哈森博士为哥丁根大学的金属物理教授逾 30 年,直到近来退休,他的名字传遍了大西洋两岸。在他的祖国,他智慧的箴言,在公众界和学生间将会留下巨大的影响。他是《金属材料杂志》(Zeitschrift für Metallkunde) 的编辑,曾是哥丁根艺术与科学院 (Göttingen Academy of Arts and Sciences) 主席,Deutsche Gesellschaft für Metallkunde 理事会的中心人物,欧洲科学院院士,美国工程院院士。

1986 年,他首先倡议而最终导致出版《材料科学与技术》丛书前 18 卷,他亲自编著的关于相变方面的第 5 卷《材料的相变》于 1991 年出版,并获赞誉。我们感谢他对这一伟大事业的贡献,并以成功地完成这一事业作为对他的纪念。

R. W. 卡恩 (Cambridge)

E. J. 克雷默 (Ithaca)

1993 年 10 月

前 言

表征对于系统地发展新材料及了解其在实际使役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。它们重要的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,它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去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须的,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。第2卷编写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射线发射技术。晶体与晶粒结构的问题是归纳在X射线衍射、光学显微术和电子衍射结合透射电子显微像等章节。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的材料的分析技术。

第2B卷的内容包括俄歇显微术和高能离子探针等表面分析技术,后者着重在聚合物的表面分析;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。此外,本卷还介绍了中子衍射、X射线散射、小角散射、

立体视显微术、力学频谱术和电子探针分析等。对比较起来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研究方法。

我感谢各位作者的辛勤劳动。特别对 Robert Cahn 教授表示谢意,感谢他有益的讨论,以及他对编辑的建议和帮助选定作者。

E. 利弗森

Schenectady, 纽约州, 1993 年 9 月

目 录

11	表面和界面的纳米尺度表征	(1)
12	机械谱学	(142)
13	扫描俄歇显微术	(194)
14	定量声显微术	(212)
15	用图像分析方法定量描述显微组织	(246)
16	电子探针显微分析	(306)
17	高能离子束分析技术	(366)
18	场离子显微学和原子探针分析	(445)
19	中子衍射	(485)
20	X 射线和中子小角散射	(531)
21	有机材料的表面、界面和薄膜的表征	(571)
索引		(650)

11 表面和界面的纳米尺度表征

N. John DiNardo

Department of Physics and Atmospheric Science, Drexel
University, Philadelphia, PA, U. S. A.

(李日昇 译)

目录

11.1 引言	7
11.2 扫描隧道显微术 (STM)	12
11.2.1 历史展望	12
11.2.2 理论	15
11.2.2.1 电子隧穿和 STM 成像	16
11.2.2.2 扫描隧道谱 (STS)	21
11.2.2.3 非弹性隧道谱	27
11.2.2.4 弹道电子发射显微术 (BEEM)	27
11.2.3 仪器	29
11.2.3.1 显微镜的设计: STM 主机	29
11.2.3.2 针尖	34
11.2.3.3 振动与撞击的隔离	35
11.2.3.4 电子学	37
11.2.3.5 微机控制	39
11.2.4 半导体表面	39
11.2.4.1 Si(111)	39
11.2.4.2 Si(100)	42
11.2.4.3 GaAs(110)	45
11.2.4.4 光子诱导的过程	45
11.2.5 金属-半导体界面	46
11.2.5.1 碱金属-半导体界面	46
11.2.5.2 三价金属在 Si(001) 上的生长	47
11.2.5.3 结构测定中的不确定性	48
11.2.5.4 外延层中缺陷处电子的局域化	50
11.2.5.5 E_F 钉扎, 中隙态和金属化	51
11.2.5.6 生长在半导体表面上的金属性 Fe 原子簇从绝缘体向金属的转变	53
11.2.5.7 隐蔽界面的显微术和谐术——BEEM	54
11.2.6 金属表面	57
11.2.6.1 密堆表面	58
11.2.6.2 表面扩散	60

11.2.6.3	台阶表面	61
11.2.6.4	吸附物诱发的金属表面重构	62
11.2.6.5	金属吸附层的生长	65
11.2.6.6	多晶金属的电阻-扫描隧道电位法	66
11.2.7	绝缘体	66
11.2.8	层状化合物	70
11.2.9	电荷密度波系统	77
11.2.10	超导体	81
11.2.11	分子膜、吸附质及表面化学	85
11.2.11.1	分子成像	85
11.2.11.2	吸附和表面化学	86
11.2.12	液-固界面的电化学	95
11.2.13	生物系统	97
11.2.14	计量学上的应用	101
11.3	原子力显微术	104
11.3.1	原子力成像	109
11.3.1.1	石墨	110
11.3.1.2	绝缘体	110
11.3.1.3	金属	110
11.3.1.4	薄膜	112
11.3.1.5	聚合物表面和聚合物衬底上的金属膜	112
11.3.1.6	生物分子	113
11.3.1.7	生物分子的实时吸附动力学	115
11.3.2	纳米尺度表面力	115
11.3.3	纳米摩擦学	117
11.3.4	非接触成像	118
11.3.4.1	范德瓦耳斯力	118
11.3.4.2	静电力	118
11.3.4.3	磁力	120
11.4	原子和原子簇的纳米尺度操纵	121
11.4.1	原子和原子簇在针尖和试样之间的转移	122
11.4.2	针尖诱发的原子在表面上的横向运动	123
11.4.3	针尖诱导的局部电子激发脱附导致的纳米尺度改性	125
11.4.4	纳米尺度的化学改性	126
11.4.5	高温纳米加工	126
11.4.6	使用 AFM 进行纳米尺度的表面改性	126
11.4.7	走向纳米尺度器件	127
11.5	STM 的衍生物——非接触纳米尺度探针	127
11.5.1	扫描近场光学显微镜(SNOM)	128
11.5.2	光子扫描隧道显微镜(PSTM)	128

11.5.3	扫描热剖面仪(STP)	130
11.5.4	扫描化学势显微镜(SCPM)	130
11.5.5	光吸收显微镜(OAM)	132
11.5.6	扫描离子传导显微镜(SICM)	133
11.6	致谢	133
11.7	参考文献	134

符号与缩语表

A	常数
A, A_0	振动振幅
a, b, c	点阵方向
a_0, b_0, c_0	点阵间距
$\text{acf}(a)$	自动关联函数
d	试样-针尖间距
d_{31}	压电系数
E, E_T, E_S	能量(针尖, 试样)
E_F	费米(Fermi)能
E_t	横向能
e	电子电荷
F	原子间力
f	力场
f_r	共振频率
h	普朗克(Plank)常量; 管壁厚度; 高度
h_0	表面平均高度
I	电流
I_c	收集极电流
I_0, I_t	隧道电流
I_t	注入电流
j	电流密度
$K_z, K_{\parallel}$	压电常量
k, k'	力常数
k	波矢
k_B	玻尔兹曼(Boltzmann)常量
k_{bond}	原子间力常数
M_{TS}	针尖波函数和试样波函数之间的隧道矩阵元
m	自由电子质量
m_a	原子质量

m_{eff}, m_n, m_t	有效质量
R	隧道电阻; 散射参数; 针尖曲率半径
r	针尖半径
s	针尖-试样间距
T	绝对温度
t	时间
U	结合能
U_{eff}	库仑(Coulomb)能
V, V_0	电压
V_s	试样电位
x, y, z	笛卡儿(Cartesian)坐标
z	针尖-试样间距
Δ	(表面)起伏振幅; 能隙
ϑ_c	临界角
κ	逆衰减长度
λ	波长
λ_F	费米波长
μ	化学势
ρ	电阻率
$\rho(r_0, t)$	电荷密度
ρ_m	由针尖原子确定的孔隙直径
ϕ, ϕ_T, ϕ_S	功函数
ϕ, ϕ_a	(表观)势垒高度
ψ_S, ψ_T	试样、针尖的波函数
ψ_S^0, ψ_T^0	试样、针尖的表面波函数
$\psi_S(z), \psi_T(z)$	真空中能隙中的波函数
ω	振动频率
ω_0, ω'_0	共振频率
AC	交流
ADC	模拟-数字转换器
AES	俄歇(Auger)电子谱
AFM	原子力显微镜; 原子力显微术
ATP	腺苷-5'-三磷酸
BCS	Bardeen-Cooper-Schrieffer
BEEM	弹道电子发射显微术
CBM	导带极小(值)
CDW	电荷密度波
CFM	电荷力显微镜
CITS	电流成像隧道谱