

材料工艺中的现代物理技术

〔英〕 T. 马 维 主编
R. K. 韦伯斯特

韩大星 郑关林 毕 文 等 译
章 综 校

科 学 出 版 社

1 9 8 4

内 容 简 介

本书介绍测试材料性能的各种物理技术。全书共分二十章，内容相当广泛，并按基本工作原理分为衍射术、显微术以及光谱技术三大部分。衍射测试技术主要包括X射线衍射，中子衍射以及电子衍射；显微测试技术主要包括场离子显微术、光显微术与干涉，以及各种电子显微技术；光谱测试技术主要包括俄歇能谱、X射线光谱、原子吸收光谱、光发射光谱、质谱、活化分析、穆斯堡尔谱以及核磁共振谱等。

本书内容深入浅出，每章除介绍基本工作原理，仪器结构以及典型应用实例外，还附有补充读物目录。本书可供从事材料试验研究工作的广大科技人员和大专院校师生使用和参考。

MODERN PHYSICAL TECHNIQUES IN MATERIALS TECHNOLOGY

T. Mulvey and R. K. Webster (ed.)

Oxford Press, 1974

材料工艺中的现代物理技术

[英] T. 马 维 主编
R. K. 韦伯斯特

韩大星 郑关林 毕文等译

章 综 校

责任编辑 陈咸亨

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院开封印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984年10月第 一 版 开本：787×1092 1/32
1984年10月第一次印刷 印张：12
印数：0001—6,450 字数：271,000

统一书号：13031·2706

本社书号：3724·13—3

定 价：1.85 元

译者的话

《材料工艺中的现代物理技术》是一部介绍测试材料性能的各种物理技术专著，内容极为丰富，涉及的面较广，但叙述深入浅出，通俗易懂。本书为测定材料的元素成分、杂质，晶体结构、缺陷、表面位错，元素的化学环境，表面层的化学形态等方面提供了一整套的方法。因此，本书不仅可供从事于材料试验研究工作的科技人员、大专院校有关专业师生参考，而且对于有关业务管理部门的科技人员也是值得一读的。我们认为此书是一部比较难得的好书，故将它翻译出版介绍给广大读者。

本书的翻译分工如下：第一、十九、二十章和索引，穆文；第二、八、九、十三、十七章，毕文、韩大星；第三、四、五、十六、十八章，韩大星、王克达；第十一、十二、十五章，郑关林；第六、七、十章，余鸿文、韩大星；第十四章李哲。在翻译过程中，应育浦、廖策、陈炳卫等同志对本书某些章节进行了审阅，提供了许多宝贵意见，全书由章综同志进行了认真仔细的全面校订。谨在此对他们表示衷心感谢。

由于我们水平有限，译文中难免有不妥之处，请读者批评指正。

译者

序 言

《材料工艺中的现代物理技术》一书，是根据哈威尔海军部实验研究所教育与培训中心使用过数年的一套跨学科精读教材编写而成的。本书对讲稿内容作了补充，在每一章里，一般地给出基本原理概要以及对典型仪器和应用的评述。每章末尾附有简短的文献目录，以供希望对任一具体课题进行更详细深入研究的读者作为入门之用。

本书内容主要涉及材料的鉴别。这是个十分复杂的问题，可能需要测定材料的元素成分，鉴定某一特定价态或化学形态，研究材料表面元素或夹杂物的分布状况，或测定晶体结构、晶格缺陷或表面位错等。

X射线光谱学、原子吸收与光发射光谱术、质谱以及活化分析，为测定元素杂质提供了一系列方法。在某些条件下，可测得的杂质浓度小于十亿分之一。穆斯堡尔谱以及磁共振方法可用来研究某一给定元素的化学环境，而俄歇能谱还可扩展到研究仅有几个单分子层厚的表面层的化学形态。电子探针分析法提供了在表面上进行逐点元素分析的手段，而要用它分析原子序数低的元素，则要借助于某些带电粒子的核技术。许多光学显微方法和电子显微方法以及电子、中子、X射线衍射技术，为研究材料表面问题和晶体特性提供了一整套方法。为了概括这些课题，本书把各章大致分为衍射、显微技术、电子束以及光谱技术等几个部分。

本书的主要目的，是为负责制定研究规划的人员，为应对对各种可选择技术的潜在效果作出判断的人员，并为从事

某项技术而要求对各相邻领域情况有个大体了解的专家们，
针对各种分析方法提供一个对比性和综合性的介绍，并希望
本书有助于高等院校学生对各个论题有一个概括了解。

T. 马 维

R. K. 韦伯斯特

1973年11月

目 录

第一章 晶体学和晶体衍射 (B. 拉尔夫)	1
晶体学基础.....	1
衍射.....	13
电子衍射.....	16
第二章 X射线衍射 (T. W. 贝克)	21
X射线衍射揭示信息的基础.....	21
X射线衍射的基本测量.....	23
辐射.....	23
X射线衍射方法的固有困难.....	23
X射线衍射技术的三种主要方法.....	24
X射线衍射的主要应用.....	26
第三章 中子衍射 (G. E. 培根)	37
原理.....	38
应用.....	44
远景展望.....	48
第四章 电子衍射 (J. A. 贝尔克)	50
原理.....	50
无透镜衍射.....	54
选区衍射.....	56
扫描电子衍射.....	60
小角散射.....	61
结论.....	61
第五章 场离子显微术 (B. 拉尔夫)	63
操作原理.....	63
场离子显微镜的优点和局限性.....	68

应用.....	71
原子探针场离子显微镜.....	77
结论.....	78
第六章 定量光学显微术和干涉量度学 (H. 迈库拉).....	80
原理.....	81
二维定量测量.....	82
用光学显微镜进行三维测量.....	83
自动测量系统.....	86
第七章 电子显微镜原理 (T. 马维).....	88
结构.....	91
操作.....	93
电子显微镜中的衍射花样.....	95
衬度孔径.....	97
图象处理.....	100
扫描透射电子显微术.....	101
第八章 透射电子显微术的样品制备技术 (S. R. 凯文).....	104
复型技术.....	106
薄箔法.....	116
结论.....	126
第九章 高压电子显微术 (B. 赫德森).....	129
结构.....	129
穿透能力.....	132
电子光学参数随电压的变化.....	134
荧光屏和照相乳胶.....	136
样品与电子束的其它相互作用.....	137
高压电镜的其它应用.....	142
高压电镜特点小结.....	144
第十章 定量电子显微术 (K. F. 黑尔).....	145
简单的定量显微术.....	147
精确测定样品取向.....	150

电子显微照片的计算和它们在微观结构鉴别方面的应用	153
现场定量电子显微术	164
第十一章 扫描电子显微术(G. R. 博克尔)	167
仪器工作原理	167
电子沟道花样	178
动态实验	180
信号处理	181
一些实际问题	181
应用	183
第十二章 电子探针显微分析(D. M. 普勒)	194
原理	197
仪器设备	204
应用	205
第十三章 俄歇能谱学(J. C. 里维埃)	211
俄歇技术的原理	212
仪器设备	216
应用	221
结论	230
第十四章 X射线光谱术(J. D. 威尔森)	232
原理	232
仪器装置	238
应用	243
结论	248
第十五章 原子吸收光谱学(W. R. 纳尔)	250
理论	250
仪器装置	253
应用	257
结论	260
第十六章 发射光谱学(A. L. 格雷)	262
原理	262

仪器装置的使用	268
应用	273
结论	276
第十七章 质谱测定法(R. K. 韦伯斯特)	279
同位素稀释分析法	280
火花源质谱测定法	287
新的仪器技术	297
结论	298
第十八章 活化分析(T. B. 皮尔斯)	300
一般原理	300
活化分析技术	305
中子活化分析	307
γ 光子活化分析	313
带电粒子活化分析	314
结论	317
第十九章 穆斯堡尔谱学(B. W. 达勒)	318
穆斯堡尔谱仪	320
穆斯堡尔谱学的一般应用	323
特殊应用	327
结论	328
第二十章 磁共振波谱学(J. A. S. 史密斯)	330
原理和方法	330
应用	341
结论	355
索引	358

第一章 晶体学和晶体衍射

B. 拉尔夫

许多工程上所使用的材料（如金属和陶瓷）是晶态物质。晶态是固态的一个重要组成部分。虽然通常所使用的材料（如玻璃和聚合物）有些并不是完全的晶态物质，但在研究这些材料时所使用的许多方法是以晶体学原理为基础的。在一些类型的材料中，晶态的性质表现为它们的外观上具有高度的对称性。它们的结合以离子键或共价键为主，例如氯化钠（NaCl）。形态或外形上的对称性部分地反映出原子在固体中的内部排列的规律性。对于包括金属（它是结晶的）在内的所有材料来说，这种内部排列的规律性是它们共同的特征；晶体学就是描述这些排列的学科。在晶体中，原子的有规律的重复排列是很重要的，它决定了晶体性质的各向异性程度。而使用衍射的方法，就能够对原子的这些排列进行研究和分类。

晶体学基础

点阵与结构

我们已经确认，原子有规则的周期性排列是晶态的一种合适的定义。通过规定这种重复的要素以及它们的平移周期性，我们就能够描述晶体的结构。在这种描述中，阵点代替了这种重复的要素。所有阵点上的原子构成情况都完全相同。因此，这种点阵，即阵点的有规则排列，就显示出原子

结构的平移周期性。由于在任一方向上的任何一对阵点之间的平移与同一方向上的任何其他一对阵点之间的平移是相同的，所以我们就能以一个晶胞来代替整个的点阵，并记住这个晶胞重复地充满整个空间。晶胞可用三个不在一个平面上的矢量 a , b , c 来定义，它们是最短的点阵平移矢量（也称为基矢）。换句话说，我们可用三个重复距离 a 、 b 、 c （通常在 0.1 毫微米和 10 毫微米之间）和三个轴间夹角 α 、 β 、 γ 来定义晶胞。

在晶体学中，由于我们最关心的是对称性，所以我们可以对材料进行初步的分类。一共有 14 种不同形状的点阵晶胞，这就是 14 种布喇菲点阵，如图 1.1 中所示。根据它们的基本形状，又可分为七个晶系（如图 1.1 中所示的三斜晶系等）。

根据平移的周期性，我们得到了这些点阵，但还存在着许多其他类型的对称。例如，我们考虑一个立方体，很清楚，有各种旋转对称，也有通过镜面的反射对称。采用这些对称元素，我们就能把晶体视为 32 种点群（或称为晶类）中的一种，在这些对称元素中，由于不包含平移，所以我们就可以认为它们是作用在一个点上的。如果我们把旋转对称轴和反射镜面与平移结合起来考虑，我们就能把晶体看成是 230 种空间群中的一种〔见补充读物，基础晶体学和投影几何学（P.17）〕。

在这一段中，我们只需了解到晶体结构与点阵类型之间的关系。有两个简单的实例可以帮助我们理解这种关系。很多金属具有面心立方结构；这是很多结构中的一种，一些具有范德瓦耳斯或金属键的材料（Al、Cu、Ni 等）都具有这种结构。我们可以把这种结构看作是由同样球体的密堆积而形成的。图 1.2 (a) 表示 Al、Cu、Ni 等的结构，而图

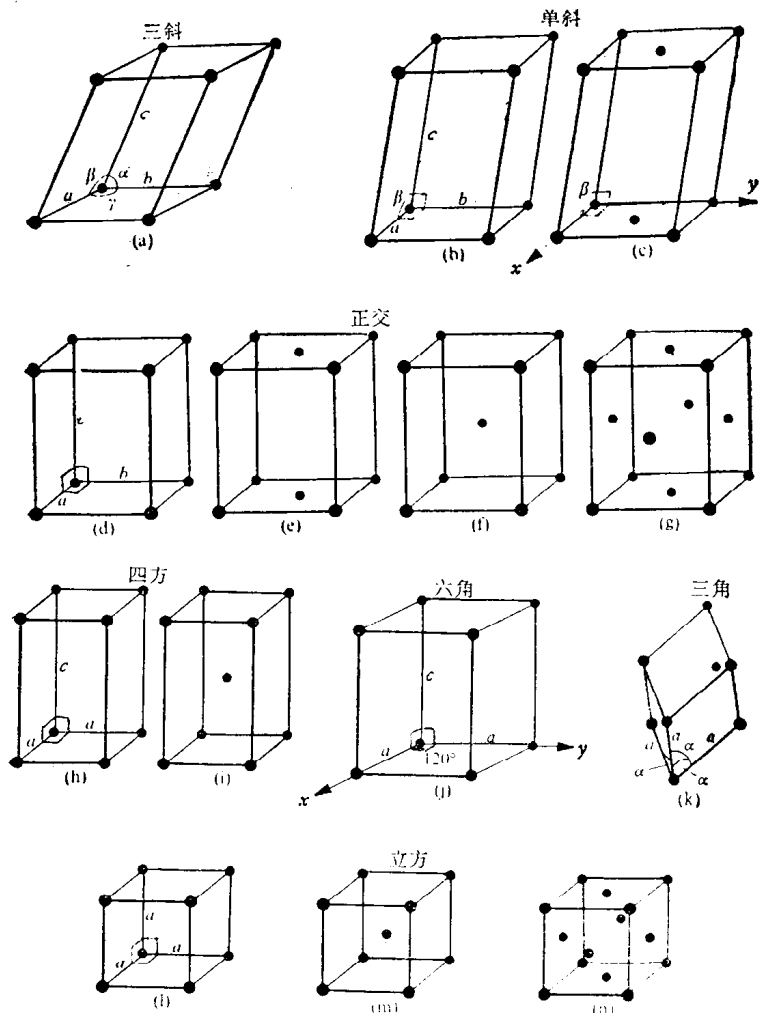


图1.1 14种布喇菲空间点阵的晶胞。(a)简单三斜(P);(b)简单单斜(P);(c)底心单斜——通常取二次轴平行于y轴,并取(001)为有中心的面(C中心);(d)简单正交P;(e)底心正交——通常在(001)面上(C中心);(f)体心正交(I);(g)面心正交(F);(h)四方P;(i)四方I;(j)六角P;(k)简单菱面体(三角R);(l)立方P;(m)立方I(体心立方);(n)立方F(面心立方)。

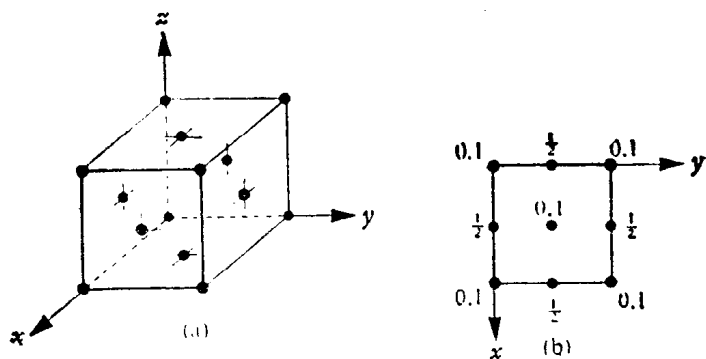


图1.2 面心立方结构的晶胞和投影。(a) 面心立方结构的晶胞[见图1.1(n)]。图中已标明结构位置的坐标。在这种结构中，通常假设原子是沿着立方体各个面的对角线方向($\langle 110 \rangle$ 方向)而保持接触的，称这种结构为密堆积结构；(b) 面心立方结构沿Z轴向下的投影。在结构位置旁边的坐标以沿Z轴的重复周期为单位。

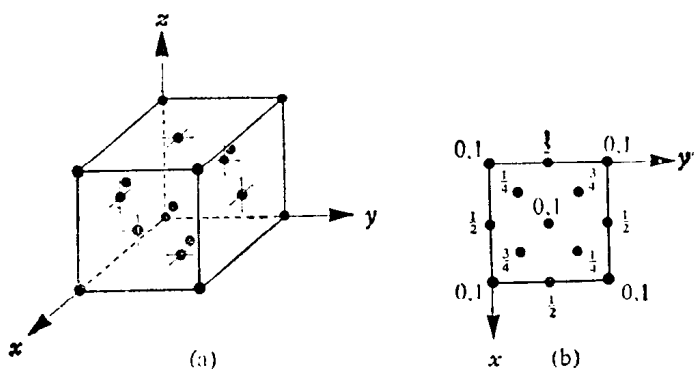


图1.3 金刚石结构的晶胞(a)和从Z轴向下的投影(b)。这种结构具有面心立方点阵[见图1.1(n)]，每一阵点含有两个原子。

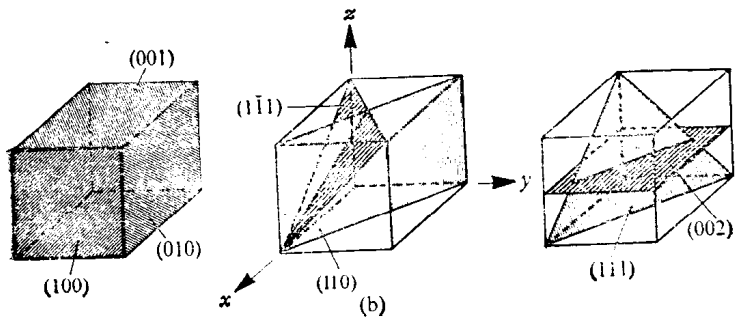
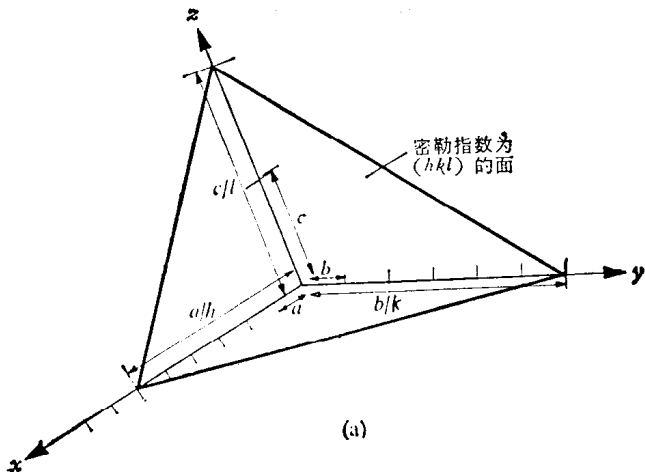
1.2(b) 是沿 z 轴的投影图。可以看出，这种结构是每个阵点中含有一个原子的面心立方点阵(图1.1(n))。图 1.3(a) 和图 1.3(b) 示出金刚石结构的晶胞及其投影(由于强定向的共价键，金刚石中的碳原子为四面体配位，它的结构并不是密堆积的)。由此可知，这种结构为每个阵点中含有两个原子的面心立方点阵。

在叙述晶体对波的衍射以前，我们首先需要一种用来表示空间中的各个方向和晶面的方法，还需要一种投影的方法。在晶体学中，密勒指数系统就是最常用的一种方法，这里我们将介绍这种方法。

点阵平面在三维空间中的指标

把定义晶胞的三个晶轴选作坐标轴，并以 a 、 b 、 c 来表示在这三个轴上的单位平移距离。那么，一个晶面的密勒指数就由这个晶面在这三个轴上的截距 a/h 、 b/k 、 c/l 来决定；求出这些截距的倒数并在需要时加以有理化，便可得出这个晶面的指数 (hkl) [见图 1.4(a)]。在这种定指标的方法中，由于点阵的平移性质，因此所有平行的晶面都具有相同的指数。图 1.4(b) 所示的立方体中，一些主要晶面的指数都已经标定。应该指出，如果晶面的截距为负号时，那末，相关的密勒指数就可以用这个晶面指数上面加一横号来表示(即 $\bar{h}\bar{k}\bar{l}$)，无限大截距的倒数可取为零，并且 (hkl) 平行于 $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$ 。

在研究衍射几何学时，根据间距来规定晶面指标是很重要的。为此，要规定在一组平行的平面中，必须有一个晶面通过坐标原点，并取其下一个平面在各轴上的截距的倒数。这样，按此规定，处在 (100) 平面间距二分之一位置上的 一组晶面的指数将为 (200) 。



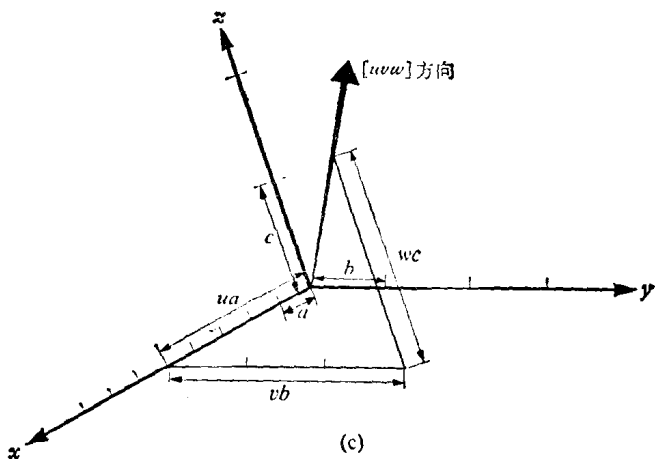


图1.4 晶面和方向的密勒指数系统。(a) 晶面的指数系统；(b) 在立方体中各种不同晶面的密勒指数系统的一些实例；(c) 各种方向的指数系统。

为一个方向规定指标

在所需要的方向上使一个矢量通过坐标原点，并在该矢量上选择一点，从原点到被选择点推导出平行于三个轴的平移 (ua 、 vb 和 wc)。这样，这个方向的密勒指数则为 $[uvw]$ (如图 1.4 (c) 中所示)。

符号：

(111)表示单一的一组平行的平面。

$\{111\}$ 表示诸如 (111)， $(1\bar{1}1)$ 等等类型的平面，叫做面式(它是由点群对称要素对一特定晶面进行操作而产生的)。

$[111]$ 表示单一的晶带轴或方向。

$\langle 111 \rangle$ 表示一种类型的各个方向。

晶带定律

能够确定一个晶面内的某一个方向等，常常是重要的。

因为一个晶面是由它的法线来确定的。因此，如果一个方向 $[uvw]$ 处在晶面 (hkl) 内，那么

$$hu + kv + lw = 0 \quad (\text{外斯晶带定律})$$

要求出两个晶面 (hkl) 和 $(h'k'l')$ 的交线的方向，我们就要解联立方程式：

$$hu + kv + lw = 0$$

和

$$h'u + k'v + l'w = 0.$$

因为这些量都是矢量指数，所以我们可以写成

$$\begin{array}{c|ccc|c} h & k & l & h & k & l \\ & \times & \times & \times & & \\ h' & k' & l' & h' & k' & l' \end{array}$$

即 $u = kl' - k'l, v = lh' - l'h, w = hk' - h'k.$

这整个一组晶面 (hkl) 、 $(h'k'l')$ 、 $(h''k''l'')$ 等具有共同方向 $[uvw]$ ，称为晶带，同时把这一共同方向叫做晶带轴。我们将看到，在衍射照相和场离子显微照相中规定指标时，晶带关系是重要的。

投影法

晶体学是一门三维空间的学科，而显然必须有一些能以二维空间表示三维空间对称操作的方法。我们已经讲过几种结构的投影方法（如图 1.2 和图 1.3 所示），现在我们需要一种投影方法，来表示各个晶面和各个方向。

我们首先把坐标原点放在一个包围它的圆球（称为投影球面）的球心上，在所需要的方向上，让一些直线从原点向外延伸，直至它们分别相截于投影球面的一点，这些点叫极点。可以用两种方法来表示平面：或者用在投影球面上法线