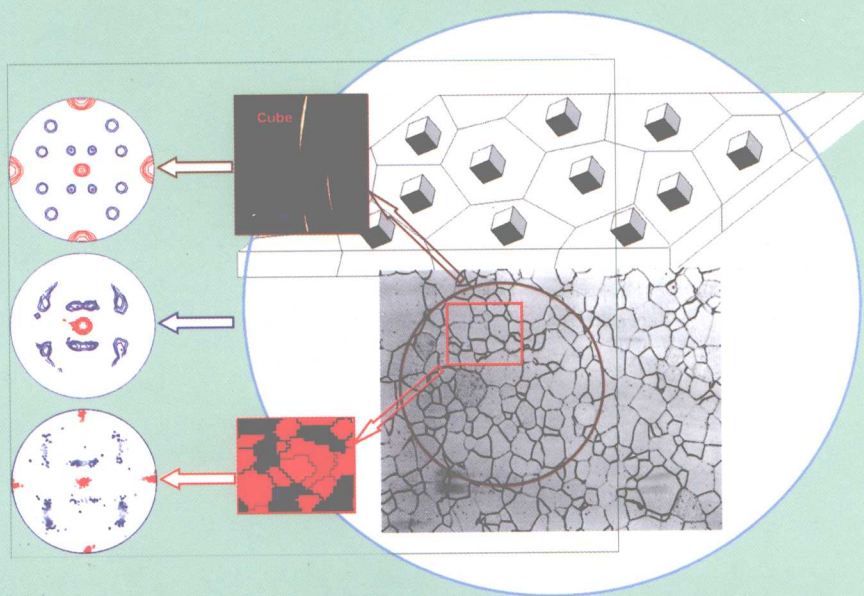


材料织构分析原理 与检测技术

毛卫民 杨平 陈冷 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

材料织构分析原理与检测技术

毛卫民 杨 平 陈 冷 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2008

内 容 简 介

晶体学织构及相应的各向异性是现代先进材料十分重要的特性。本书介绍了材料宏观织构、微观织构和织构快速检测的基本过程和相关技术,综述了工程材料中存在的织构类型,阐述了织构检测技术在生产检验中的实际应用以及在材料开发研究中的基本分析方法。本书内容侧重于基础性、实用性和技术可操作性。

本书可作为钢铁企业从事织构检测人员的技术参考书或培训教材;也可作为从事冶金、铸造、材料研发、材料加工等专业的技术人员在进行织构检测、分析与研究时的参考用书;还可作为高等院校相关专业教师、大学生或研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料织构分析原理与检测技术/毛卫民,杨平,陈冷编著.
—北京:冶金工业出版社,2008.4
ISBN 978-7-5024-4550-8

I. 材… II. ①毛… ②杨… ③陈 III. 工程材料—
织构 IV. TG111.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 055088 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 张爱平 张 卫 美术编辑 张媛媛 版式设计 张 青

责任校对 栾雅谦 责任印制 丁小晶

ISBN 978-7-5024-4550-8

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2008 年 4 月第 1 版;2008 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 13.5 印张; 260 千字; 203 页; 1~3000 册

36.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

现代科技的进步与高新技术的发展对传统材料提出了严峻的挑战,人们不再满足于现有材料已有的优势与性能水平,甚至不再满足于传统材料性能逐年有所提高的步伐。高技术新材料的开发虽然取得了较大的成功,但这往往会或多或少地牺牲传统材料的一些优异特性换取某些性能的明显提高。工程材料大多是晶体材料,如何利用晶体本身存在的各向异性,既可以保持工程材料原有的全部传统优点,又可使必要的性能在特定方向得到显著的提高,这是材料生产者和研究者十分关注的焦点。因此,检测材料自身存在的晶体学织构与各向异性就成为了材料生产和开发研究的重要分析内容之一。同时,利用织构检测手段还可以对工程材料相关结构参数和工程性能实施无损检测。

各向异性是晶体材料最基本的本征特性。各向异性也会出现于各种多晶体材料的制备过程中,因此具有一定的普遍性。在材料的凝固、形变、再结晶、固态相变、沉积、烧结、热处理等制备过程中,材料往往会在各向异性的力场、电场、磁场、温度梯度场、物流场等外界物理条件下以及化学驱动力、储存能、晶界能、相界能、表面能及其他材料组织结构内在因素的作用下生成特定的各向异性,并会按照特定的规律发生演变。材料在各向异性外场下进行加工的基本规律决定了各向异性的晶体会以不同的形式形成非随机的多晶取向分布形态,即形成各种类型的织构,如铸造织构、变形织构、薄膜沉积织构、再结晶织构、烧结构等。

由于多晶材料中织构存在的普遍性以及织构在现代工业中对改进材料性能的重要作用,越来越多的企业和科研、教育机构开始重视材料织构的检测与分析工作。然而,材料织构的概念毕竟比较抽象,其实验检测技术及相关原理又有一定的复杂性。因此,一些初步涉足织构检测分析的技术人员和研究人员会需要一种比较实用的入门读物,以便较快地掌握织构原理及其检测技术的要点,并开展织构的检测分析工作。目前相关的基础读物还不多,且往往不适合于初步涉足织构检测

分析的人员。

本书作者近二十年来在北京科技大学材料各向异性的多种研究课题中从事材料织构的检测分析和基础理论研究,书中总结了这些方面的经验和体会,以此奉献给广大读者。

在本书的编写过程中,作者特别注意内容的基础性、实用性和技术可操作性,以期读者能够把本书内容直接联系到织构分析检测或相关技术开发研究之中,有助于实际的操作和分析。本书可作为织构检测人员的技术参考书或培训教材,也可作为从事冶金、铸造、材料研发、材料加工等专业的技术人员在进行织构检测、分析与研究时的参考资料;还可用作高等院校相关专业教师、大学生或研究生的教学参考书。

本书共分宏观织构检测、微观织构检测和织构快速检测三部分内容。其中宏观织构检测与分析部分由毛卫民负责编写,微观织构检测与分析部分由杨平负责编写,织构快速检测与分析部分由陈冷负责编写。作者感谢国家自然科学基金对本书部分内容研究工作的资助(资助号:50372007、50571020、50171014、50171009、50571009、50771019)。希望本书能对我国材料织构检测分析及相关科研的发展有一定的帮助和推动作用。

由于作者的认识水平有限,书中不妥之处恳请读者给予指正。

作 者

2007年12月

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
电子背散射衍射技术及其应用	杨 平	59.00
材料的晶体结构原理	毛卫民	26.00
材料的结构	余永宁 毛卫民	49.00
高性能低碳贝氏体钢 ——成分、工艺、组织、性能与应用	贺信莱 尚成嘉 等	56.00
材料科学基础	陈立佳	20.00
超细晶钢——钢的组织细化理论与控制技术	翁宇庆 等	188.00
钒钛材料	杨绍利 等	35.00
不锈钢的金属学问题(第2版)	肖纪美	58.00
动力与能源用高温结构材料 ——第十一届中国高温合金年会论文集	中国金属学会高温材料分会	149.00
有序金属间化合物结构材料物理金属学基础	陈国良(院士) 等	28.00
泡沫金属设计指南	刘培生 等译	25.00
多孔材料检测方法	刘培生 马晓明	45.00
功能陶瓷显微结构、性能与制备技术	殷庆瑞 祝炳和	58.00
超强永磁体——稀土铁系永磁材料(第2版)	周寿增 董清飞	56.00
材料评价的分析电子显微方法	[日]进藤大辅 及川哲夫 刘安生 译	38.00
材料评价的高分辨电子显微方法	[日]进藤大辅 平贺贤二 刘安生 译	68.00
二元合金状态图集	[日]长崎诚三 平林 真 刘安生 译	38.00
材料组织结构转变原理	刘宗昌 等	32.00
金属材料工程概论	刘宗昌 等	26.00
材料腐蚀与保护	孙秋霞	25.00
铝阳极氧化膜电解着色及其功能膜的应用	[日]川合 慧 著 朱祖芳 译	20.00
合金相与相变	肖纪美 主编	37.00
薄膜材料制备原理技术及应用(第2版)	唐伟忠	28.00
金属材料学	吴承建	32.00
2004年材料科学与工程新进展	中国材料研究学会	238.00
现代材料表面技术科学	戴达煌	99.00
材料加工新技术与新工艺	谢建新 等	26.00
Ni-Ti 形状记忆合金在生物医学领域的应用	杨大智 等	33.00
金属固态相变教程	刘宗昌	30.00
新材料概论	谭 毅 李敬锋	89.00
钴基合金铝化物涂层的高温氧化行为	刘培生	45.00

目 录

1 材料宏观织构原理与检测技术	1
1.1 晶体取向与多晶体织构	1
1.1.1 晶体的结构及旋转特性	1
1.1.2 晶体取向与晶体学织构	2
1.1.3 取向与织构的极图表达原理	5
1.1.4 反极图原理	7
1.1.5 极图的局限性	8
1.2 材料宏观织构生成原理	8
1.2.1 铸造织构的生成	8
1.2.2 粉末烧结构	10
1.2.3 冷变形织构的生成	12
1.2.4 再结晶与热轧织构的生成	15
1.2.5 二次再结晶织构的生成	16
1.2.6 相变对织构生成的影响	17
1.2.7 金刚石薄膜织构的生成	18
1.3 材料 X 射线宏观织构检测原理	21
1.3.1 X 射线衍射基本原理	21
1.3.1.1 X 射线衍射的布拉格方程	21
1.3.1.2 X 射线衍射强度	22
1.3.1.3 X 射线衍射的结构因子	24
1.3.1.4 晶体点阵类型所引发的系统消光	25
1.3.2 多晶体极图的 X 射线测量原理	26
1.3.3 取向分布函数的数学原理	28
1.3.3.1 极密度分布函数	29
1.3.3.2 取向分布函数的数学式	29
1.3.3.3 取向分布函数计算原理	30
1.4 材料结构的表达与定量分析方法	31
1.4.1 取向空间的划分	31

1.4.1.1	立方晶系的取向空间	31
1.4.1.2	六方晶系的取向空间	32
1.4.1.3	四方晶系的取向空间	33
1.4.2	取向分布函数截面图分析	33
1.4.3	取向分布函数取向线分析	35
1.4.4	织构组分分析	35
1.5	宏观织构定量分析	37
1.5.1	常见的取向分布函数截面图分析	37
1.5.2	材料织构变化过程的取向线分析	41
1.5.2.1	冷轧织构分析	42
1.5.2.2	再结晶织构分析	45
1.5.2.3	不均匀织构分析	46
1.5.3	织构组分分析实例	48
1.5.4	织构与材料宏观性能的定量关系	49
1.5.4.1	多晶体取向分布函数与性能的线性定量关系	49
1.5.4.2	金属材料屈服行为与织构的关系	51
1.5.4.3	材料磁致伸缩行为与织构的定量关系	52
1.5.4.4	材料织构与性能定量关系的唯象理论	53
1.6	宏观织构测量技术	55
1.6.1	X射线测角器的结构与工作原理	55
1.6.2	织构试样的制备与安放	57
1.6.3	实测极图数据的整理	58
1.6.4	板材织构检测数据示例	61
1.6.5	取向分布函数测量与计算精度的评价	68
	参考文献	69
2	材料微观织构及电子背散射衍射技术	73
2.1	电子背散射衍射(EBSD)技术的发展过程与应用现状	75
2.1.1	EBSD 技术发展过程简述	75
2.1.2	EBSD 技术与其他相关技术的比较	78
2.1.2.1	侵蚀法	78
2.1.2.2	SEM 下的单个取向分析技术	79
2.1.2.3	TEM 下的取向测定技术	80
2.1.3	EBSD 技术在我国的应用现状	81
2.2	EBSD 技术相关基础简述	82

2.2.1 取向的各种表示法及其数据操作	82
2.2.1.1 取向的数字表示法	82
2.2.1.2 各种取向表示法之间的关系	83
2.2.1.3 由 EBSD 数据算出的织构与 X 射线法算出的织构的差异	85
2.2.2 取向差及取向关系	86
2.2.2.1 同种晶粒间的取向差	87
2.2.2.2 不同相之间的取向关系	89
2.2.3 界面法线晶面指数的测定	90
2.3 电子背散射衍射测试技术及原理简介	92
2.3.1 EBSD 的硬件	92
2.3.2 EBSD 测量的主要原理	95
2.3.2.1 菊池带的产生	95
2.3.2.2 取向标定原理	97
2.3.2.3 菊池带自动识别原理	98
2.3.2.4 EBSD 分辨率	99
2.3.2.5 花样(或图像)质量 IQ 、花样衬度 BC 与置信指数 CI	101
2.3.3 EBSD 测试的操作过程	102
2.3.4 取向显微镜及取向成像	104
2.3.5 EBSD 测定时可能出现的问题	107
2.4 电子背散射衍射数据的处理	109
2.4.1 EBSD 数据结构	109
2.4.2 用于取向、织构分析的 EBSD 数据处理	111
2.4.3 取向差或取向关系数据的处理	115
2.4.4 取向成像分析中的其他信息处理	118
2.4.5 EBSD 数据误差来源	124
2.4.5.1 样品坐标系确定不当带来的误差	124
2.4.5.2 EBSD 花样标定不好带来的误差	125
2.4.5.3 EBSD 数据中的噪声	129
2.5 电子背散射衍射技术在微织构分析中的应用	130
2.5.1 微观组织的形变不均匀性	130
2.5.1.1 BCC 结构低碳钢压缩时的形变不均匀	130
2.5.1.2 FCC 铝锰合金形变后取向差分布对析出的影响	131
2.5.1.3 金丝球键合时的形变不均匀性及工艺参数的影响	132
2.5.1.4 第二相粒子周围亚晶的取向变化	134
2.5.2 金属静、动态再结晶及相变初期取向	136

2.5.2.1	第二相粒子周围新晶粒的取向	136
2.5.2.2	形变强化相变初期(小应变)晶界及形变带上铁素体的取向	137
2.5.2.3	HCP 镁合金动态再结晶初期新晶粒取向特征	139
2.5.3	各类孪晶的分析	141
2.5.3.1	高锰钢中形变孪晶变体的确定及其与晶粒取向的关系	141
2.5.3.2	镁中拉伸孪晶的确定	142
2.5.3.3	铝-锰合金退火孪晶取向特点分析	143
2.5.3.4	键合铜丝内退火孪晶分析	144
2.6	EBSD 分析样品的制备	145
2.6.1	EBSD 分析样品的基本要求及各种抛光方法的特点	146
2.6.1.1	基本要求	146
2.6.1.2	各种抛光法的特点	146
2.6.2	EBSD 分析样品的制备方法	146
2.6.3	特殊的样品制备方法	148
2.6.3.1	小样品的处理	148
2.6.3.2	表面喷碳、金	149
2.6.3.3	聚焦离子束(FIB)技术	151
2.6.4	一些材料的 EBSD 分析样品制备方法	153
	参考文献	154
3	材料织构在线检测技术	158
3.1	织构在线检测概述	158
3.1.1	织构在线检测的工业背景	158
3.1.2	织构在线检测的研究历史	159
3.2	X 射线二维衍射理论基础	160
3.2.1	X 射线面探测器衍射系统	160
3.2.2	X 射线二维衍射几何关系	163
3.3	织构在线检测原理与方法	167
3.3.1	织构在线检测原理	167
3.3.2	快速采集极图数据及计算取向分布函数	170
3.3.3	在线采集极图数据及计算取向分布函数	171
3.4	金属材料织构在线检测应用	173
3.4.1	超深冲压钢板织构快速检测	173
3.4.2	冲压铝板织构快速检测	178
3.4.3	退火铝板织构在线检测	182

3.4.4 冷轧铝板织构在线检测	184
3.4.5 深冲压钢板塑性应变比 r 值在线检测技术	187
3.4.6 冲压铝板塑性应变比 r 值的在线检测技术	192
3.4.7 多相材料的织构检测	196
参考文献	199
术语索引	202

1 材料宏观织构原理与检测技术

1.1 晶体取向与多晶体织构

1.1.1 晶体的结构及旋转特性

1895年德国物理学家伦琴发现了X射线之后,1912年德国科学家劳厄用X射线作光源,用晶体作光栅,进行照射实验,发现了X射线在晶体中的衍射现象,进而间接证明了晶体中的原子或分子呈现规则排列的特征。运用现代高分辨率电子显微技术还可以直接观察到晶体中原子的规则排列。图1-1是用高分辨率电子显微镜观察到的铝晶体中原子规则排列的情况。铝原子在晶体结构中的规则排列表现为,铝原子沿空间3个方向做特定平移后又可以移到附近另一个铝原子的位置,而且这种平移可以持续不变地重复下去,并可以用某种平移的周期性来描述^[1]。

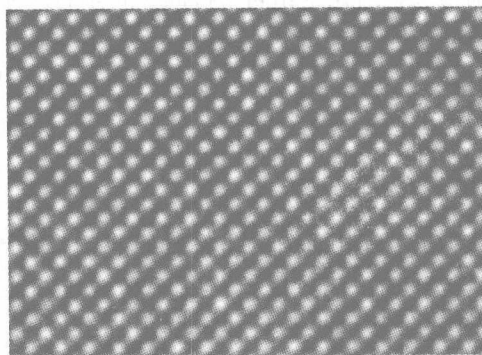


图 1-1 铝原子规则排列的高分辨率电子显微成像

人们长期的研究表明,由原子或原子团构成的基本结构单元体进行三维长程有序排列而构成的一切固体物质都是**晶体**。晶体的诸如物理性质、化学性质、几何形态等各种性质都与其内部长程的周期性结构紧密相联。

晶体中原子的周期性排列促成晶体的某些特性与所观察的方向有一定的联系。图1-2为某三维无限大的晶体中原子的有序排列结构示意图。可以看出,长程有序排列的原子导致晶体性质的各向异性,即晶体在不同的方向上具有不同的物理、化学等性质。当观察晶体某性质的方向从图中的方向0转动到方向1或2时(图1-2),各方向上原子的密度、相对几何关系等排列规则发生了改变,因而会

使所观察的性能也发生改变,这反映出了晶体性质的旋转特性。这种特征起源于晶体三维长程有序排列的本质^[1]。

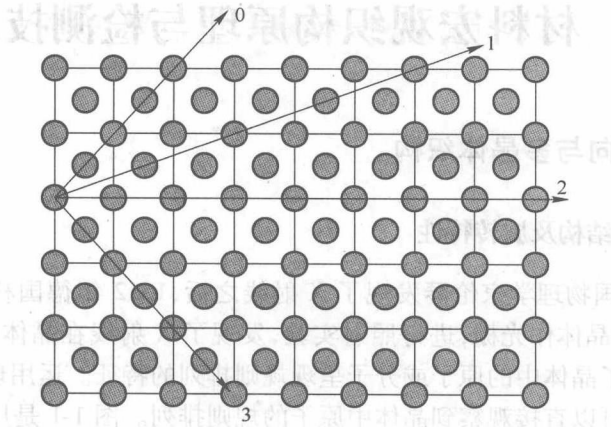


图 1-2 晶体原子的有序排列结构示意图

另外,在旋转晶体并改变观察方向时,如果旋转到特定的方向,则晶体的某些性质可能会表现出旋转前与旋转后完全相同的特征。晶体的这种特征称为**晶体的旋转对称性**,或简称**对称性**,即晶体在某几个特定方向上所表现出的物理、化学性质完全相同的特征。当观察晶体某性质的方向从图中的方向 0 平移到方向 3 时,方向 3 上的原子排列规则与方向 1 上的相同,因而所观察的性能在旋转前后不发生改变^[1]。

1.1.2 晶体取向与晶体学织构

设空间有一由 x, y, z 3 个互相垂直的坐标轴组成的直角参考坐标系。再设有 1 个立方晶体坐标系,其坐标轴的排列方式为: $[100]$ 方向平行于 x 轴, $[010]$ 方向平行于 y 轴, $[001]$ 方向平行于 z 轴,且 3 个晶体方向分别同与之平行的 x, y, z 坐标轴保持同向。人们把晶体坐标系中晶体方向在参考坐标系内的这种排布方式称为**起始取向**或**初始取向** e (图 1-3a)^[2]。

若把一多晶体或任一单晶体放在坐标系 $Oxyz$ 内,则每个晶粒或晶体坐标系的 $\langle 100 \rangle$ 方向通常不具有上述排列,因此它们不具有初始取向,而只有一般的取向(图 1-3b)。如果把一具有初始取向的晶体坐标系做某种转动,使它与一单晶体或多晶体内一晶粒的晶体坐标系重合,这样转动过的晶体坐标系就具有了与之重合的晶体坐标系的取向。综上所述,取向描述了物体从初始取向出发相对于参考坐标系的转动状态,晶体取向也表达了基本的晶体坐标轴在一参考坐标系内排布的方式。可以用具有初始取向的晶体坐标系到达实际晶体坐标系时所转动的角度表达该实际晶体的取向。

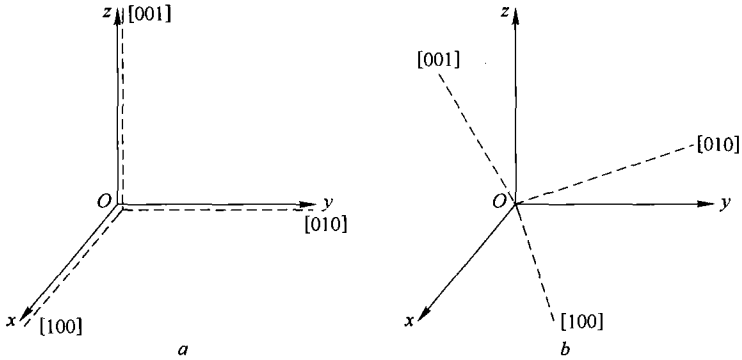


图 1-3 取向的确定
a—初始取向；b—任意取向

人们通常用晶体的某晶面晶向在参考坐标系中的排布方式来表达晶体的取向。如在立方晶体 $Oxyz$ 参考样品坐标系中,用 $(hkl)[uvw]$ 来表达某一晶粒的取向。这种晶粒的取向特征为其 (hkl) 晶面平行于 xoy 面, $[uvw]$ 方向平行于 x 方向。另外,也可以用 $[rst] = [hkl] \times [uvw]$ 表示平行于 y 方向的晶向,这样就可以构成一个标准正交矩阵。若在上述参考坐标系中用 g 代表一取向则有

$$g = \begin{bmatrix} u & r & h \\ v & s & k \\ w & t & l \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

这样式 1-1 可表达立方晶体中任一晶粒在 $Oxyz$ 参考样品坐标系中的取向。对初始取向 e 有

$$e = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

由于从初始取向出发经过某种转动可将晶体坐标系 $Oxyz$ 转到任何取向的晶体坐标系上,所以也可以用这种转动操作的转角表示晶体取向,即采用欧拉角来确定取向。图 1-4 为常见的从初始取向出发,按 $\varphi_1, \Phi, \varphi_2$ 的顺序所做的 3 个欧拉转动。经过这种转动可以实现任意的晶体取向,因此取向 g 可表示成

$$g = (\varphi_1, \Phi, \varphi_2) \quad (1-3)$$

显然对于初始取向 e 有

$$e = (0, 0, 0) \quad (1-4)$$

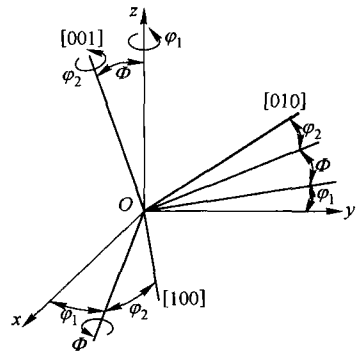


图 1-4 取向的欧拉转动

若用矩阵表示经任意 $(\varphi_1, \Phi, \varphi_2)$ 转动所获得的取向,则可推导出如下关系

$$\begin{aligned}
 g &= \begin{bmatrix} \cos\varphi_2 & \sin\varphi_2 & 0 \\ -\sin\varphi_2 & \cos\varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Phi & \sin\Phi \\ 0 & -\sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 & \sin\varphi_1 & 0 \\ -\sin\varphi_1 & \cos\varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 - \sin\varphi_1 \sin\varphi_2 \cos\Phi & \sin\varphi_1 \cos\varphi_2 + \cos\varphi_1 \sin\varphi_2 \cos\Phi & \sin\varphi_2 \sin\Phi \\ -\cos\varphi_1 \sin\varphi_2 - \sin\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos\Phi & -\sin\varphi_1 \sin\varphi_2 + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos\Phi & \cos\varphi_2 \sin\Phi \\ \sin\varphi_1 \sin\Phi & -\cos\varphi_1 \sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} u & r & h \\ v & s & k \\ w & t & l \end{bmatrix} \quad (1-5)
 \end{aligned}$$

此时 O_x, O_y 和 O_z 分别平行于 $[uvw]$ 、 $[rst]$ 和 $[hkl]$, 这样就建立了两种取向表达方式的换算关系。表 1-1 给出了立方金属轧板常见取向的欧拉角与其晶面晶向指数的换算关系, 在 $Oxyz$ 参考坐标系中, O_x 为轧向, O_y 为轧板横向, O_z 为轧板法向。

表 1-1 立方金属轧板常见取向的欧拉角与其晶面晶向指数的换算

取向名称	φ_1	Φ	φ_2	$\{hkl\} \langle uvw \rangle$
立方	0°	0°	0°	$\{001\} \langle 100 \rangle$
旋转立方	45°	0°	0°	$\{001\} \langle 110 \rangle$
铜型	90°	35°	45°	$\{112\} \langle 111 \rangle$
黄铜型	35°	45°	0°	$\{011\} \langle 211 \rangle$
戈斯	0°	45°	0°	$\{011\} \langle 100 \rangle$
S	59°	37°	63°	$\{123\} \langle 634 \rangle$
R	57°	29°	63°	$\{124\} \langle 211 \rangle$
黄铜 R	79°	31°	33°	$\{236\} \langle 385 \rangle$
	0°	22°	0°	$\{025\} \langle 100 \rangle$
	90°	55°	45°	$\{111\} \langle 112 \rangle$
	0°	55°	45°	$\{111\} \langle 110 \rangle$

由式 1-1 所示的取向表达方式可知表达式中共有 9 个变量。但这 9 个变量并不都是独立的, 且有下列 6 个归一与正交的约束条件:

$$\begin{aligned}
 r^2 + s^2 + t^2 = 1, \quad h^2 + k^2 + l^2 = 1, \quad u^2 + v^2 + w^2 = 1, \\
 rh + sk + tl = 0, \quad hu + kv + lw = 0, \quad ur + vs + wt = 0 \quad (1-6)
 \end{aligned}$$

由此可见, 9 个变量中只可能有 3 个变量是独立的。因此取向的自由度是 3。用欧拉角表达取向时, $\varphi_1, \Phi, \varphi_2$ 刚好反映出了取向的 3 个独立变量。

当多晶体各晶粒的取向聚集到一起时, 多晶体内就会呈现织构现象^[3]。如图 1-5 所示, 一多晶体轧材中许多晶粒都有类似的取向(图中小立方体表示晶粒的晶

体学取向), 即该板内有织构存在。一般认为, 许多晶粒取向集中分布在某一或某些取向位置附近时称为择优取向。择优取向的多晶体取向结构称为织构。

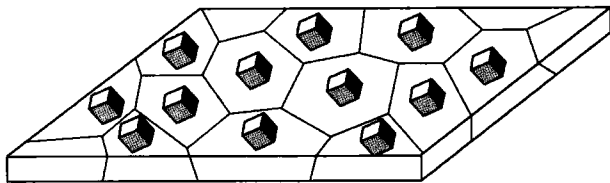


图 1-5 板材的织构现象

1.1.3 取向与织构的极图表达原理

以 x, y, z 为坐标轴的直角坐标系为样品坐标系, 以坐标系原点为中心作一半径为单位长度 1 的球面。将一定取向的晶体放到该坐标系统的球心原点处, 作该晶体所有 $\{HKL\}$ 面的法线, 交球面于若干点, 成球面投影图。图 1-6a 给出了一晶体所有 $\{100\}$ 面法线的投影而成的 1、2、3 各点。然后对这些投影点再作极射赤面投影, 使它们与垂直于板法向且过球心的圆面 (即赤面) 有一组交点, 如图 1-6b 所示的 $1', 2', 3'$ 各点。设样品坐标系中 z 向与球面的正向交点为 N 极, 反向交点为 S 极, 则投影线是图 1-6a 中上半球面上各投影交点与下半球 S 极点的连线。一般一个 $\{HKL\}$ 晶面法线在上下球面上各有一个交点, 图 1-6b 中只取上半球的那一组点作极射赤面投影。投影过的赤面图即为表达该晶体取向的极射赤面投影图或称为极图, 图 1-6c 即是相应的 $\{100\}$ 极图。图 1-6 描述了表达晶体取向的 $\{100\}$ 极图的形成过程。图 1-7 给出了获得一晶体取向 $\{111\}$ 极图的投影过程。可以通过与此相似的过程得到表达晶体取向的 $\{110\}$ 、 $\{112\}$ 、或任一 $\{HKL\}$ 极图。图 1-6c 和 1-7c 所示极图上各点的位置可用 α, β 两角表示。 α 角表示 $\{HKL\}$ 晶面法向与样品坐标系 Z 向的夹角, β 角表示该 $\{HKL\}$ 晶面法向绕 Z 向转动的角度。

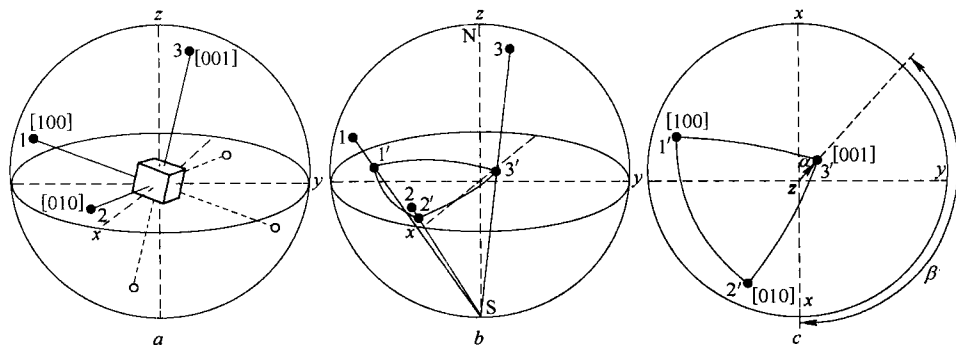


图 1-6 晶体取向的 $\{100\}$ 极图投影原理

a— $\{100\}$ 面法线投影; b—投影点的极射赤面投影; c— $\{100\}$ 极图

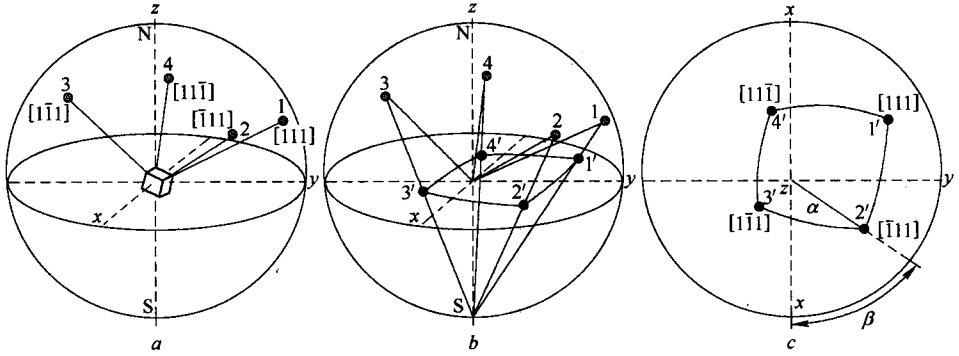


图 1-7 晶体取向的 $\{111\}$ 极图投影原理

a — $\{111\}$ 面法线投影； b —投影点的极射赤面投影； c — $\{111\}$ 极图

如果把一多晶体内所有晶粒都作上述的投影,则会在球面上得出许多投影点来。把每个点所代表的晶粒体积作为这个点的权重,则这些点在球面上的加权密度分布称为极密度分布。通常球面上极密度分布在赤道上的投影分布图称为多晶体的极图。如图 1-8 所示,在半径为 1 的球面上该极密度分布为 α, β 两个角的函数。根据图 1-8 的投影关系,图 1-6c 与 1-7c 所示的极射赤面投影图上所标投影点到赤道中心的距离,即极径 α_p 为 $\tan(\alpha/2)$,但在实际表示时直接标为 $\alpha^{[4]}$ 。

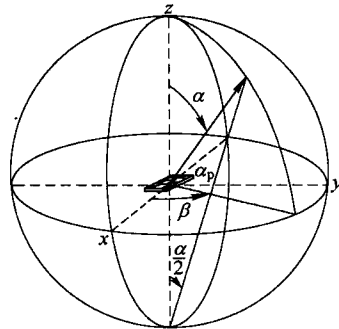


图 1-8 极密度分布函数 $p = p(\alpha, \beta)$

假如多晶体内无织构,极密度分布在整个球面的分布将是均匀的;反之,极密度分布在极图上不均匀,有些地方极密度值会比较高。根据极密度的高低可得到赤道投影后的极图密度分布。再根据具体极密度值的起伏范围画出等密度线,即可制成通常分析织构所用的极图。图 1-9 给出了用极图显示轧制铝板织构的 $\{200\}$ 和 $\{111\}$ 极图。