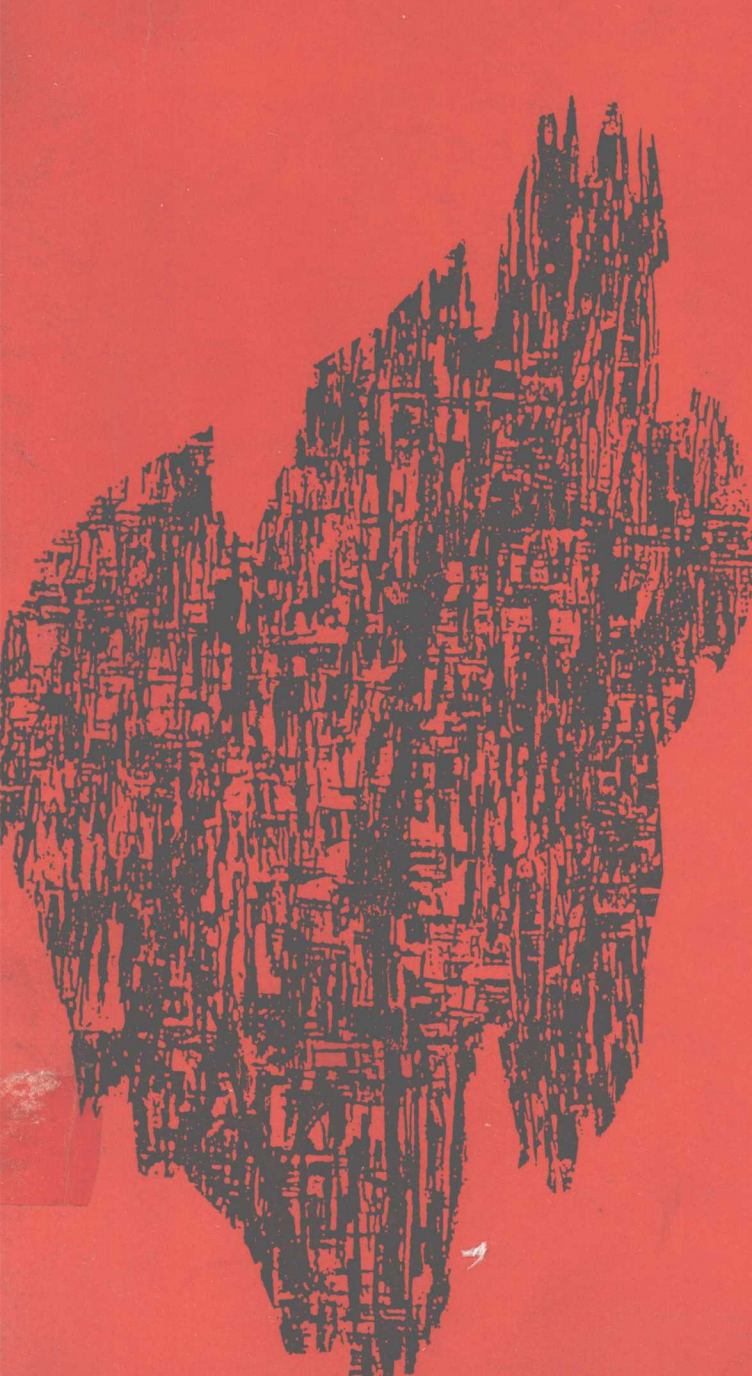


变形岩石和金属 的优选方位

— 现代结构分析概论

H. - R. 温克主编

Preferred Orientation in
Deformed Metals and Rocks



The first deals with techniques, procedures, and theoretical bases for the accumulation and analysis of orientation data. The second introduces processes by which polycrystals deform and the microstructural mechanisms responsible for the development of preferred orientation.

中国地质大学出版社



变形岩石和金属的优选方位

——现代结构分析概论

[美]H. - R. 温 克 主编

金振民

钟增球 等译

金淑燕

游振东

韩郁菁 等校

中国地质大学出版社

Preferred Orientation in
Deformed metals and Rocks:
An Introduction to modern
Texture analysis
Edited by H. - R. Wenk
Academic Press, Inc.
New York (1985)

变形岩石和金属的优选方位—现代结构分析概论

译者 金振民 钟增球 金淑燕等

校者 游振东 韩郁菁等

出 版 中国地质大学出版社

责任编辑 卢淑英 责任校对 徐润英

印 刷 湖北省国营人民大垸印刷厂

发 行 湖北省新华书店经销

开本 787×1092 1/16 • 印张 27.5 字数 700 千字
1991 年 5 月第 1 版 1991 年 5 月第 1 次印刷 印数 1—800 册

ISBN 7-5625-0599-3/P • 205 定价: 22.80 元

Foreword for Chinese Edition

It is with great pleasure that I add a few words to the translation of "Preferred Orientation in Deformed Metals and Rocks". In the few years since its first appearance the book has received a favorable response, both from metallurgists and structural geologists. The main goal, to provide a comprehensive introduction to the fascinating field of texture analysis, has been achieved. It also contributed to the rapidly growing interest in textures and anisotropy as documented by many recent papers such as those contributed to the 1987 ICOTOM 8 meeting. Whereas new data have been added on a number of specialized topics, most of the content of the book remains up-to-date and the introductory emphasis should remain so for many years to come. The translation into Chinese will make this book available to a new large group of scientists who may wish to participate in texture research which has given us fascinating insight into deformation processes joining such diverse disciplines as industrial metallurgy and field geology. I congratulate Zhendong You, Zhenming Jin, Zengqiu Zhong, Yujing Han, Shuyan Jin, Hanwen Zhou and Shuren Wu for excellent job they done in translating the book.

I feel particularly privileged because of my sympathy for the wonderful country and its people and because of the many personal ties with Chinese scientists.

October 1987.

H. - R. Wenk

为中译版作序

能为“变形岩石与金属的优选方位”一书的中译本写几句话,我感到由衷地高兴。该书第一次出版的短短几年以来,已有了很好的反响,得到了构造地质学家和冶金学家的好评。该书的主要目的是对结构分析这一引人注目的领域作一广泛深入的介绍。这一目的看来已经实现。该书的出版,还起着一定的促进作用,使得人们对结构分析及各向异性等的兴趣与日俱增,这在许多文章中,如第八届国际材料结构分析大会(ICOTOM, 1987年8月)的大量文章中已有所反映。今天,尽管结构分析的一些特殊领域已补充了不少新资料,但书中的大部分内容仍然是最新颖的,而且在若干年内仍将保持领先地位。将该书翻译成中文,无疑将有利于又一大批从事变形结构分析的学者将工业冶金学与野外地质学等多学科相结合,使我们对变形过程有一个透彻的了解。在此我对游振东、金振民、钟增球、韩郁菁、金淑燕、周汉文和吴树仁先生、女士们的出色翻译工作表示感谢。

我对美好的中国和中国人民有着良好的祝愿,并与许多中国学者有着密切联系。为此,我感到不胜荣幸。

加州大学地质和地球物理系教授

H. - R. Wenk

1987年10月

Foreword for Chinese Edition

It is with great pleasure that I add a few words to the translation of "Preferred Orientation in Deformed Metals and Rocks". In the few years since its first appearance the book has received a favorable response, both from metallurgists and structural geologists. The main goal, to provide a comprehensive introduction to the fascinating field of texture analysis, has been achieved. It also contributed to the rapidly growing interest in textures and anisotropy as documented by many recent papers such as those contributed to the 1987 ICOTOM 8 meeting. Whereas new data have been added on a number of specialized topics, most of the content of the book remains up-to-date and the introductory emphasis should remain so for many years to come. The translation into Chinese will make this book available to a new large group of scientists who may wish to participate in texture research which has given us fascinating insight into deformation processes joining such diverse disciplines as industrial metallurgy and field geology. I congratulate Zhendong You, Zhenming Jin, Zengqiu Zhong, Yujing Han, Shuyan Jin, Hanwen Zhou and Shuren Wu for excellent job they done in translating the book.

I feel particularly privileged because of my sympathy for the wonderful country and its people and because of the many personal ties with Chinese scientists.
October 1987.

H. - R. Wenk

中译版序

岩石组构与显微构造是构造地质研究中一项重要的基础工作。它是通过变形岩石的优选方位和微观构造的定向规律,来揭示宏观构造变形规律、应力状态、运动方式及动力学分析等构造信息。毫无疑问,岩石的优选方位是变形岩石的普遍存在特征,而变形岩石和矿物晶体优选方位形成机制及其发育规律一直是构造岩石学研究中为人们所关注的中心课题之一。

众所周知,现代结构分析是由 B. Sander (1930) 为首的奥地利学派在野外与实验工作基础上发展起来的,其经典著作《岩石组构学》(Gefügekunde der Gesteine) 阐述了变形岩石组构及其几何对称分析方法和运动学关系的解释原则,这是早期的阶段性总结。其后美国学者 E. B. Knopf 等 (1933, 1938) 和 H. W. Fairbairn (1949), 苏联 H. A. Флюцев (1951) 分别介绍了“岩石构造学”(Petrotectonics) 和“构造岩石学”(Structural Petrology 或 Структурная Литрология) 的显微组构分析方法。上述地质学家的研究成果为岩石组构学作为一门独立学科奠定了基础。F. J. Turner 和 L. E. Weiss (1963) 发表的《变质构造岩的构造分析》著作是 60 年代岩石组构分析的系统性阶段总结。该专著对变形岩石的性质、意义及其分析程序和方法进行了全面总结和重新评价,指出构造组构可适用于各种尺度构造分析。70 年代以来,由于广泛引入金属物理学

和材料科学中位错理论和流变学理论,使用新的技术手段(如透射电镜、中子衍射、计算机模拟和高温高压岩石变形试验等),使组构和显微构造研究无论在深度上或在广度上都得到蓬勃发展。1976 年 A. Nicolas 和 J. P. Poirier 发表《变质岩的晶质塑性和固态流变》一书,积极倡导位错理论和流变学在阐述岩石变形流动过程中的地位和意义,并着重对上地幔橄榄岩塑性流变做了较全面论述,可以认为这是第三次阶段性总结。由 H. - R. Wenk (1985) 主编的专著《变形岩石和金属的优选方位——现代结构分析概论》可以说是 80 年代的一次最新的总结。专辑由来自美国等六个国家 27 位多学科专家撰写而成的,博取众长,真正体现了各相邻学科和边缘学科互相渗透和补充。该书在研究思路和方法学上有四个特点:(1) 变形结构研究与位错理论和流变学、连续介质力学、物理学相结合;(2) 变形结构与先进实验手段和定量表示方法相结合(例如透射电子显微镜和取向分布函数);(3) 实验研究成果与计算机模拟相结合;(4) 结构分析与实践应用相结合(如岩石圈流变学、上地幔动力学、相变、深源地震、核废料处理等),该书特别强调优选方位的科学定量表示方法和程序,同时提醒地质学家要重视金属矿物和矿物的变形机制研究和岩石各向异性在岩石圈动力学和地震学中的重要意义。总之,该专著思路新颖,结构严谨、实例丰富,插图和显微

照片精美,是值得推荐一读的岩石组构和显微构造研究领域中一本很有价值的参考书。此外还应当提及,最近美国地球物理联合会为纪念澳大利亚著名构造变形实验学家 M. S. Paterson 教授 60 诞辰而出版的《矿物和岩石的变形实验研究》专辑 (B. E. Hobbs 等主编, 1985) 是当前组构实验研究的高水平总结。

我国组构分析方法的发展和应用也大致经历了上述的沿革。我国岩组学研究的奠基人何作霖教授,早在 30 年代曾随学于 B. Sander, 并把旋转台技术和岩组分析方法介绍给我国地质界 (1933, 1937), 首次将 X 光技术成功地引进岩组分析中 (1947), 为发展我国岩组学研究做出了出色的贡献。在四五十年代王嘉荫教授对应力矿物研究和池际尚教授对方解石实验变形研究 (1951) 和《构造岩石学》的教学科研工作也作出了贡献。60 年代以来,我和原北京地质学院一些同行们在对

河南嵩山地区变质岩构造研究的长期实践基础上提出构造解释方法 (1974, 1981), 指出组构分析不仅适用于显微尺度,而且也完全可以应用于大中型构造研究,并特别强调野外宏观扎实的基础研究与室内微观研究相结合的重要意义。上述成果已日益为广大地质工作者所认识,并在区域地质调查中起着一定作用。

70 年代以来,我国的组构与显微构造研究工作方兴未艾,它在理论研究、实验和应用方面都已有了新的起点,已取得了一些可喜的成果,中青年显微构造研究人才正在迅速成长。但是总的来说,从事这方面研究的学者还为数不多,理论研究水平和实验手段方面与先进国家相比,还有相当大的差距。因此,金振民、钟增球、游振东等同志将 H. -R. Wenk 主编的这本书翻译介绍给我国地质界是值得欢迎的。我也期望本书的出版对我国这一学科深入发展和研究水平提高起着推动作用。



1990 年 9 月 25 日

晶作用的结构演化, 颗粒形态定向等。第三部分(第十三章—二十六章)是应用实例。主要介绍了碳酸盐岩、石英岩、上地幔岩石(橄榄石和辉石)、矿石矿物、层状硅酸盐岩和片理等的优选方位型式特征; 显微构造分析的地质意义; 岩石的磁性和各向异性以及变形动力学意义; 变形材料的高温高压变形实验类型、仪器、实验成果及其应用意义。

本书所涉及的学科多, 研究面广, 因此有些术语目前尚无统一译法。我们根据作者的建议并结合我国地学界一般用法, 对一些术语的译法做如下说明。

(1) texture: 译为“结构”, 在冶金学和陶瓷研究中 texture 已作为多晶集合体中优选方位的广义同义词, 在地质学中也有这样应用之趋势。在岩相学上的结构(texture)应包含三个重要内容: 即矿物结晶习性, 粒度, 颗粒形态及其空间分布(Spry, 1969; Willimas 等, 1982), 它与本书中的结构(texture)的涵义有所区别。

(2) fabric, 译为“组构”, 是一个概括性术语, 它主要是指构成岩石全部组分的空间方位和几何形态(即岩石总体内部构造, Weiss 等, 1985)。组构应该包含诸如岩相学上的结构(texture)、构造(structure)和优选方位(preferred orientation)等(Hobbs, 1976)。在本书有的章节中, 组构也主要指结晶优选方位及颗粒中的一些亚构造(Price, 1985; Hobbs, 1985)。

(3) microfabric 译为“显微组构”, 是指光学显微镜和电子显微镜下所见的特征, 即包

括两方面内容: 一是岩石中各个矿物的结晶优选方位; 二是岩石显微构造——颗粒形态、空间分布及颗粒中的亚构造, 如扭折边界、变形纹和位错阵列。

(4) orientation 以习惯用法为准分别译为: 例如 preferred orientation (优选方位); orientation mechanism (定向机理); orientation distribution function (取向分布函数)。

(5) rolling 译为轧制, flow 通译为流动或塑性变形。

本书中广泛应用的冶金物理学和材料科学术语, 我们主要以科学出版社 1980 年版《金属材料及热处理词汇》为准。对原书中个别错误之处也做更正。

本书各章翻译和校对分工如下: 序言、第四、五、六、二十三、二十四和二十五章由金振民译, 钟增球校; 第一、七、八、九、十、二十二、二十六章由钟增球译, 游振东校; 第十一、十六、十七、十八和十九章由金淑燕译, 金振民校; 第十二、十三、十四、十五和二十章由周汉文译, 韩郁菁校对; 第二、三、二十一章由吴树仁译, 金振民校; 闫桂林参加了第二十五章校阅。最后由金振民、钟增球对全书进行统稿。金淑燕和马长玲负责全部图件整理工作。

加利福尼亚大学(Berkely) H.-R. Wenk 教授和国家地震局马杏垣教授分别为中译版写了序言, 我们对此表示衷心感谢。

由于译者水平有限, 错误在所难免, 谨请读者提出宝贵意见。

译者

1990 年 8 月

前 言

测定和解释变形多晶集合体中晶体优选方位——本书也称为结构(texture)——一直是地质学家和材料科学家关注的问题。例如晶体塑性的位错理论等类似理论已经成为了解岩石和金属流动的基础,而包括显微术和X射线衍射的类似测试技术,也已用于研究结构和显微构造。虽然Jeffery, Sachs, Sander, Schmid, Schmidt和Taylor等科学家已在本世纪初建立了许多基本原理,但只是最近几年来,才使理论认识达到定量水平,从而取代了大量的现象学研究。正如近来出版的大量文献所证实的,对结构研究获得了新的突然的重视。

本书可作为学习本学科人员的入门书,也可供深入研究这一领域的学者参考。

本书是在Berkely(1982年)举行的全美23届岩石力学学术讨论会的岩石变形机制及结构演化专题讨论会上酝酿的。来自各个领域(材料科学、冶金学、地质学、地球物理学、物理学和数学等)的与会者认为有必要对理论、实验和分析技术的最新进展予以总结。本书为多人撰写,大家普遍认为,需要加强地质学和冶金学之间的联系。地质学家应当熟悉用于高对称金属的先进方法论,这种方法论在研究材料的物理特性与优选方位型式之间的关系方面已取得了显著的成就。冶金学家也应当了解矿物的优选方位型式和研究由地壳变形的复

杂应变史所提出的一些有争议的问题。

本书分三部分。第一部分(第二—七章)讲述方位数据收集和分析的技术、程序和理论基础。第二部分(第八—十二章)介绍多晶质体变形的过程和其优选方位发育的显微构造机制,这几章重点讲述基本原理及其在金属和矿物中的应用。第三部分(第十三—二十六章)列举了特定系统中的结构和如何运用前述基本原理解决具体问题。读者很快会意识到,对金属的研究要比对矿物的研究透彻得多,然而他们也会认识到由于金属的对称一般远比岩石简单,因而对金属结构的解释较容易。有关参考资料的详细目录为读者提供了有关结构研究的原著索引。

对某些章节——对已研究得较深入的材料,如立方心金属、碳酸盐、石英等只摘述了某些重点,而对另一些章节——如对矿石和蒸发岩等——则只作综述。我们提倡作者注意议题的导论性。但很自然,本书内容包括从较一般的原理到反映现代结构分析前沿的最新知识。各章内容由作者选定,其中有内容不全之处也是主编之过,因为我们主张限制篇幅,以使本书为广大读者所接受(在内容和价格上)。

我们向G. Wassermann(Clausthal)和F. J. Turner(Berkely)教授表示敬意,他们在过去的几十年中致力于发展结构分析的定量

方法,并且激励着我们几代地质学家和冶金学家。1982年书中的几位作者由 Berkely 前往德国庆祝了 Wassermann 教授的 80 岁生日。Turner 教授在 1982 年的会上向大家做了有关他早年实验岩石组构分析的动人报告,1984 年他亦已 80 高龄。两位科学家对结构研究作出了特殊贡献,值得铭记。

为了行文简洁流畅,我们打算对有关的人一一列名表示感谢。我们要感谢启发过我们的所有人,感谢审阅和完善手稿以及提供有关研究思想和图件的许多同事,感谢打印初稿和修改稿的秘书及绘图专家。本书的许多工作得到了政府机关、大学和企业部门的资助。作为主编,我要特别感谢作者们热忱而辛勤的工作和满足许多难以兑现的要求时所表现的耐心。

尤其要感谢 L. Weiss 教授的启发性讨论和对忧虑的分担。我衷心感谢国家自然科学基金对 Berkely 专题讨论会的支持,因为正是这次讨论会为本书奠定了基础。我对德国 Kiel 矿物研究所也表示谢意,在那里我得到了洪堡基金会的资助,得以利用休假年 (Sabbatical leave) 完成本书的许多编辑工作。对美国科学出版社始终不渝的关心和出色的出版工作表示感谢。我们还要对允许我们复制图件的众多出版者、杂志编辑和作者表示感谢。

我希望“变形材料的优选方位”一书不是最后总结,而是更加鼓励拓宽结构分析领域,吸引学生和科学家向许多已经出现的遗留问题提出挑战。

常用符号和缩语

数学参数

K_A, x, y, z	样品坐标系, 轴
$y = \{y_1, y_2, y_3\} = \{\alpha, \beta\}$	由直角坐标或极坐标规定的样品方向
RD	轧制方向
ND	垂向
TD	横向
s	页理面
l	线理
K_B, x', y', z'	晶体坐标系, 轴
$h = \{h_1, h_2, h_3\} = \{\theta, \gamma\}$	由直角坐标或极坐标规定的晶体方向
$(hkl), \{hkl\}$	米勒氏晶面指数和等效对称组
$(hkil), \{hkil\}, i = -(h+k)$	六方晶系的米勒-布格维指数
$[uvw], \langle uvw \rangle$	晶带轴方向符号和等效对称组
$\varphi_1, \Phi, \varphi_2$	欧拉角 (邦奇标记法)
Ψ, θ, Φ	欧拉角 (罗标记法)
$\Psi, \lambda, \xi, (\omega)$	鲁尔方位角
ρ	极点密度
m. r. d	随机密度倍数
$f(g)$	取向分布函数, ODF
$\bar{f}(g)$	可测部分, 用偶谐函数表示
$\tilde{f}(g)$	不可测部分, 用奇谐函数表示
$P_k(y)$	极图 hkl
$R_y(h)$	反极图
$A(h, y)$	轴分布函数
Y, y_s	结构矢量, 离散的 ODF
X, x_p	极图, 离散极点分布图
σ	用矢量法表示的对应矩阵
δ	克朗内克函数符号
Θ	正交变换
$T_l^{mn}(g)$	一般球谐函数
C_l^{mn}	对应系数
$K_l^r(y), K_l^r(h)$	球谐函数
$F_l^r(y), F_l^r(h)$	对应系数
$\dot{A}_l^r(y), \dot{A}_l^r(h)$	对称球谐函数
$P_l^{mn}(\varphi)$	缔合勒纳让函数
a_l^{mn}	对应系数
$P_l^r(\varphi)$	均一化缔合勒纳让函数
T	旋转矩阵

φ, χ, ω

衍射仪角度

2θ

布拉格角

物理参数

$1\text{cm}=10^4\mu\text{m}=10^7\text{nm}=10^8\text{\AA}$

$1\text{MPa}=10\text{bars(巴)}$

N

阿佛加德罗常数, $6.025 \times 10^{23}(\text{mole})^{-1}$

R

气体常数, $8.137\text{J}(\text{mole})^{-1}(\text{K})^{-1}$

k

玻茨曼常数, $1.380 \times 10^{-23}\text{J}(\text{K})^{-1}$

λ

波长

T

温度($^{\circ}\text{C}$ 或 K)

P_c

围压

δ_{ij}

应力

τ

剪应力

τ_c

临界分解剪切应力

$\dot{\epsilon}$

应变速率

E, ϵ_{ij}

应变张量

E, e_{ij}

位移梯度张量

Ω, ω_{ij}

位移梯度张量的非对称部分

$(1+\epsilon)$

伸长

$(1+\epsilon)^2$

二次伸长

$\ln(1+\epsilon)$

自然应变

γ

剪切

ρ

位错密度(cm^{-2})

b

柏氏位错矢量

d

颗粒或亚颗粒大小(μm)

S

滑移向

K

双晶面

$m=\cos\Psi, \cos\lambda$

施密特因子, Ψ_i 和 λ_i 分别为应力轴与滑移面法线及滑移方向的夹角

M

泰勒(Taylor)因子

ρ

密度

K

体积模量

μ

剪切或刚性模量

ν

泊松比

E

杨氏模量

S_{ij}, S_{ijM}

塑性张量要素

C_{ij}, C_{ijM}

刚性张量要素

V_p, V_s

纵波和横波

A, W

功

f. c. c.	立方面心
b. c. c.	立方体心
h. c. p.	六方紧密堆积
TEM	透射电子显微镜
U-stage	费氏台

目 录

中译版序.....	(VI)
译者的话.....	(IX)
前言.....	(XI)
常用符号和缩语	(XIII)

第一章 绪论 (1)

L. E. Weiss 和 H. - R. Wenk

1. 引言.....	(1)
2. 岩石和金属.....	(1)
3. 变形.....	(2)
4. 变形效应.....	(3)
5. 变形材料中的优选方位：结构	(4)
6. 术语注释.....	(6)

第二章 极图的测量 (8)

H. - R. Wenk

1. 组构图解和极图.....	(8)
2. 光学方法	(11)
3. 衍射方法	(22)
4. 方法比较	(32)

第三章 极图和结构的对称..... (34)

L. E. Weiss 和 H. - R. Wenk

1. 引言	(34)
2. 对称：操作、群、要素	(34)
3. 三维点群	(35)
4. 均匀多晶集合体	(36)
5. 晶体方向	(36)
6. 极图的对称	(39)
7. 黑-白对称.....	(42)
8. 黑-白群在极图对称中的应用	(43)
9. 极图和结构的实际对称	(46)

第四章 优选方位表示法..... (50)

H. J. Bunge

1. 多晶质构造的特征参数	(50)
2. 取向分布函数	(50)
3. 晶体定向的技术要求	(51)
4. 极图定义	(61)
5. 结构分析的基本关系	(62)
6. 极图变换方法	(62)
7. 一般轴分布函数	(64)

8. 丝结构	(65)
9. 非均质结构	(66)
10. 第二类型对称要素	(67)
11. ODF 的演化	(71)

第五章 谐函数方法..... (74)

H. J. Bunge 和 C. Esling

1. 一般方法概述	(74)
2. 附加有效关系	(76)
3. 谐函数	(79)

第六章 矢量法..... (83)

H. Schaeben A. Vadon 和

H. -R. Wenk

1. 引言	(83)
2. 基本原理	(83)
3. 应用条件	(89)
4. 分析实例	(90)
5. 结论和展望	(91)

第七章 取向分布函数推导及条件重像校正..... (93)

S. Matthies 和 H. -R. Wenk

1. 引言	(93)
2. 理论	(94)
3. 实例	(95)
4. 结论	(96)

第八章 位错和显微构造..... (99)

D. J. Barber

1. 引言	(99)
2. 非理想晶体.....	(100)
3. 塑性变形.....	(107)
4. 屈服、塑性和晶质固体的恢复 ——冷加工.....	(108)
5. 重结晶作用.....	(109)
6. 位错研究的技术方法.....	(110)
7. 显微构造实例.....	(112)

第九章 重结晶作用..... (119)

G. Gottstein 和 H. Mecking

1. 引言.....	(119)
2. 现象和术语.....	(119)
3. 重结晶的驱动力.....	(122)
4. 变形状态和恢复.....	(124)
5. 成核作用.....	(126)
6. 颗粒界面迁移.....	(130)
7. 初始重结晶的动力学.....	(133)
8. 颗粒生长现象.....	(136)
9. 动态重结晶.....	(138)

第十章 塑性变形机制..... (141)

T. G. Langdon

1. 引言.....	(141)
2. 塑性变形机制.....	(141)
3. 塑性变形的本构关系.....	(144)
4. 影响流动作用的因素.....	(145)
5. 变形机制图的编制.....	(147)

第十一章 由滑移和双晶作用形成的结构..... (151)

P. Van Houtte 和 F. Wagner

1. 引言.....	(151)
2. 方法.....	(151)
3. 单晶体的塑性变形.....	(154)
4. 多晶体.....	(157)
5. 根据 Taylor-Bishop-Hill 理论的 变形结构计算机模拟.....	(160)
6. Taylor 模拟所需数据	(163)
7. 综合讨论.....	(165)

第十二章 颗粒形态的重新定向..... (169)

G. Oertel

1. 概述.....	(169)
2. 均匀应变.....	(169)
3. 刚性悬浮颗粒.....	(172)
4. 可变形的悬浮颗粒.....	(173)
5. 分散流动.....	(173)