

金属热处理丛书

金属的结构分析

中国机械工程学会热处理学会 主编



机械工业出版社

金属热处理丛书

金属的结构分析

中国机械工程学会热处理学会 主编

王传雅 苟文礼 编著

陈仁悟 审校



机械工业出版社

本书介绍X射线衍射和电子衍射金属晶体结构分析。首先叙述有关晶体学、X射线物理学、X射线衍射和电子衍射的基本知识和原理以及主要实验方法；然后介绍各种衍射花样的分析方法；最后系统阐明根据各种衍射花样的固有规律和变化，研究X射线衍射和电子衍射晶体结构分析在金属学及热处理中的各种主要应用。书末附有主要的常用数据和图表，便于读者查阅。本书可供从事金属学、金属材料及热处理以及其它热加工专业的科学技术工作者参考，亦可供高等院校有关专业的师生作为教学参考书。

金属的结构分析

中国机械工程学会热处理学会 主编

王传雅 苟文礼 编著

陈仁悟 审校

责任编辑：王文华 责任校对：贾立萍

封面设计：郭景云 版式设计：乔毅

责任印制：庞云武

机械工业出版社出版（北京阜成门外大街25号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

煤炭工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₃₂·印张11⁷/₈·字数257千字
1989年11月北京第一版·1989年11月北京第一次印刷
印数00,001—2,377 定价：9.50 元

ISBN 7-111-01401-4/TG·348

中国机械工程学会热处理学会

《金属热处理丛书》编委会

成 员

主任委员：朱沅浦

副主任委员：戚正风 丁文华 侯增寿

委员：（按姓氏笔划排列）

丁文华	邓 洋	朱沅浦	宋余九	陈 洵
陈仁悟	陈善述	杨 让	侯增寿	俞德刚
陆载厚	戚正风	崔 崑	裘 汲	雷廷权
樊东黎				

•

序

热处理是机械制造中关键工艺之一，它是保证机器零件内在质量，延长服役寿命的有效方法。无论对于民用产品还是军用产品的制造，热处理都是必不可少的。因而在四化建设中起着极其重要的作用。

热处理的进步又与物理冶金和一些新技术的发展息息相关。很多热处理工艺的改进就是以物理冶金理论的新发展和一些新技术的应用为根据的。例如：根据组织性能研究的新成果，发展了一些强韧化的新工艺；由于激光、电子束的应用，发展了一些高能密度快速加热的表面改性工艺。这些知识已是许多热处理工作者感到不足的方面，需要自学加以迅速补充。

中国机械工程学会热处理学会从目前热处理行业中技术人员的普遍需要出发，由编辑出版工作委员会组织国内大专院校和科研单位及工厂具有专长的专家、学者编写了这套《金属热处理丛书》，以提高金属热处理科技人员的理论水平与技术水平，补充一些新的理论和其它领域中的新技术知识，扩大眼界，开阔思路，推动行业发展，为四化建设做出应有的贡献。

作者在编写时力求理论联系实际，取材上深度广度适宜，文字上深入浅出，便于自学，以期读者阅读后有所收获，有所提高。

由于我们的知识面不广，在选题方面和编写内容方面可

能还有不恰当之处。希望广大读者提出宝贵意见，以便在第二批丛书的选题方面和编写方面有所改进。

中国机械工程学会热处理学会
《金属热处理丛书》编委会

前 言

金属材料的性能取决于其成分、结构（参阅附录1）、组织和状态。随着材料科学的发展，研究和测定金属材料的结构、状态及其变化的重要性显得更加突出。许多金属材料热处理工作者日益感到迫切需要了解和掌握关于金属晶体结构分析方面的理论、知识和方法。

目前，虽然已出版了不少X射线金属学和电子显微分析方面的教科书，其中包括金属结构分析的许多内容。然而，由于篇幅较大、内容较分散，不尽适合于在职的科学技术工作者阅读。为了有助于未专门学习过X射线金属学和电子显微分析的热处理工作者学习和掌握金属结构分析方法；为了有助于非热处理专业的但在工作中需要了解和应用金属结构分析的知识和方法的其它专业、特别是热加工专业的科学技术工作者了解和应用金属结构分析的内容；也为了有助于虽学习过X射线金属学和电子显微分析，但由于种种原因而长期不接触这方面内容的科学技术工作者重新学习、巩固并更新这方面的知识，特编写了“金属结构分析”一书，以期对广大热处理工作者有所裨益。本书亦可作为金属材料热处理专业和热加工的其它专业的研究生及大学生的教学参考书。

研究金属结构的主要手段包括X射线衍射、电子衍射和中子衍射。本书仅介绍用得最广泛的X射线衍射和电子衍射内容。

本书的特点是由浅入深，不集中给出大量专业术语和概念。所介绍的基本理论力求重点突出，与应用环节密切相关，并力求使读者能应用这些基本理论解决更多更难的金属结构分析问题。在研究方法部分着重阐明主要研究方法的原理及各种方法的异同点。应用部分的内容系根据物质的衍射花样本身的固有规律（反映物质本质）进行归纳和分类。为了缩短篇幅，对于设备和仪器结构以及操作技能等凡属看说明书即可了解和掌握的内容未作详细介绍。

本书的第一章至第六章由大连铁道学院王传雅编写，本书的第七章至第十章由大连铁道学院苟文礼编写。全书由王传雅统编。由于编者水平有限，难免有错误和不当之处，敬请读者阅后提出指正意见。

本书由陕西机械学院陈仁悟教授审阅，特此表示衷心的感谢！

王传雅

1988.1

目 录

第一章 晶体学基础.....	1
一、晶体点阵和空间点阵.....	1
(一) 晶体点阵、阵点、晶胞.....	1
(二) 空间点阵、结点、基胞.....	2
二、晶体的对称性.....	4
(一) 对称要素.....	4
(二) 晶体的宏观对称类型——32个点群.....	7
(三) 晶体的微观对称类型——230个空间群.....	8
三、七个晶系和十四种空间点阵形式.....	8
(一) 七个晶系.....	8
(二) 十四种空间点阵形式.....	11
四、结点指数、晶向指数和晶面指数.....	13
(一) 结点指数.....	13
(二) 晶向指数.....	13
(三) 晶面指数.....	14
(四) 六方晶系指数.....	17
五、晶带和晶面间距.....	19
(一) 晶带.....	19
(二) 晶面间距.....	20
六、晶体投影.....	22
(一) 球面投影.....	22
(二) 平面投影.....	22
(三) 乌里弗网.....	25
(四) 标准极图.....	25

七、倒易点阵	30
(一) 倒易空间	30
(二) 倒易矢量	32
(三) 倒易点阵	34
(四) 倒易点阵的应用之一——晶体学公式的推导	35
(五) 零阶倒易面的绘制	39
第二章 X射线物理学基础	42
一、X射线的产生、本质和特性	42
(一) X射线产生的条件	42
(二) X射线的本质	43
(三) X射线的特性	45
二、X射线谱	45
(一) 连续X射线谱	46
(二) 标识(特征)X射线谱	49
三、X射线通过物质时所产生的效应	52
(一) X射线衰减规律	52
(二) X射线的散射	53
(三) X射线的吸收	56
第三章 衍射基本原理	60
一、X射线在晶体中的衍射	60
二、X射线衍射基本定律	61
(一) 劳厄(M·Laue)方程	61
(二) 倒易点阵衍射方程	61
(三) 布拉格(W·H·Bragg)方程	63
三、厄瓦尔德球及其图解法	65
(一) 厄瓦尔德(Ewald)球	65
(二) 厄瓦尔德球图解	66
第四章 衍射X射线的强度	68
一、强度综合公式	68

X

二、对各因数的讨论	69
(一) 结构因数	69
(二) 多重性因数	70
(三) 角因数	70
(四) 温度因数	71
(五) 吸收因数	72
三、相对强度公式	72
第五章 X射线衍射基本实验方法	74
一、X射线衍射方法概述	74
(一) 转动晶体法	74
(二) 劳厄法	74
(三) 多晶体衍射法	75
二、粉末法	75
(一) 粉末法衍射花样的形成原理	75
(二) 试样的制备	77
(三) 底片的安装	78
(四) 德拜相的测量和计算	79
(五) 德拜相的摄影技术	80
三、衍射仪法	84
(一) 测角仪	85
(二) 辐射探测器	85
(三) 实验技术	88
(四) 衍射线强度分布曲线峰位的确定方法	89
四、劳厄法	90
第六章 X射线衍射晶体结构分析在金属学及热处理中的主要应用	93
一、根据衍射线的分布规律研究金属	93
(一) 点阵类型的确定	93
(二) 物相鉴定	101

二、根据衍射线所对应的衍射角度的变化研究金属	108
(一) 点阵参数的精确测定	108
(二) 固溶体类型的确定	112
(三) 固溶体溶解度曲线的测定	113
(四) 过饱和固溶体分解过程的研究	114
(五) 淬火钢回火过程的分析	115
(六) 淬火工艺参数的判断	115
(七) 第一类内应力的测定	117
三、根据衍射线宽度的变化研究金属	122
(一) 衍射线宽度的测定	122
(二) 衍射线变宽(宽化)	123
(三) 亚晶尺寸、位错密度和第二类内应力的测定	126
四、根据衍射线强度的变化研究金属	128
(一) 直接对比法	130
(二) 等强线对法	132
五、根据衍射斑点的分布规律研究金属	133
(一) 晶体取向的测定	133
(二) 织构的测定	142
第七章 电子衍射的基本知识和方法	161
一、电子束	161
(一) 电子波波长	161
(二) 电子束的发生——电子枪	163
二、透射电子显微镜	164
三、透射电子显微镜的样品制备方法	166
四、电子衍射基本公式	172
五、透射电子显微镜的几种电子衍射方法	175
(一) 衍射花样的形成	176
(二) 选区电子衍射	177
(三) 高分散电子衍射	179

(四) 高分辨电子衍射·····	179
第八章 各种电子衍射花样的分析方法·····	182
一、多晶电子衍射花样的指数化·····	182
二、单晶电子衍射花样的指数化·····	186
(一) 单晶花样的几何特征·····	187
(二) 单晶花样指数化方法·····	188
(三) 单晶花样指数化的不唯一性·····	208
三、高阶劳厄花样的指数化·····	212
(一) 高阶花样出现的条件·····	213
(二) 高阶花样指数化原理·····	213
(三) 高阶花样指数化方法·····	218
四、孪晶花样的指数化·····	220
(一) 孪晶花样指数化原理·····	221
(二) 立方晶系孪晶花样的指数化·····	224
五、菊池花样的指数化·····	227
(一) 菊池花样的衍射几何·····	227
(二) 菊池花样指数化方法·····	231
六、其它复杂花样的指数化·····	232
(一) 双衍射花样的指数化·····	232
(二) 超点阵花样的指数化·····	235
(三) 双晶带花样的指数化·····	236
第九章 电子衍射晶体结构分析在金属学及热处理中的主要应用·····	238
一、根据两相的复合电子衍射花样测定金属的位向关系·····	239
(一) 马氏体相变中的位向关系·····	239
(二) 位向关系的表示方法·····	245
(三) 测定位向关系应注意的事项·····	245
(四) 由两相合成花样测定位向关系的方法·····	247
(五) 位向关系的极射赤面投影测定法·····	252

(六) 位向关系的矩阵处理	258
二、根据电子衍射花样鉴定金属的物相	273
(一) 多晶花样的物相鉴定	274
(二) 单晶花样的物相鉴定	276
第十章 低能电子衍射的基本知识	278
一、单晶体表面原子排列的状态	279
(一) 纯净表面原子排列状态	281
(二) 吸附表面原子排列状态	290
二、低能电子衍射原理和花样	297
(一) 二维点阵的衍射	297
(二) 纯净表面的低能电子衍射花样	302
(三) 吸附表面的低能电子衍射花样	304
三、低能电子衍射花样的强度特性	307
(一) 运动学理论	307
(二) 衍射花样的强度特性	310
四、低能电子衍射装置	312
五、低能电子衍射在金属学及热处理中的主要应用	314
附录	316

第一章 晶体学基础

固态金属和合金的原子系按照一定规律在空间呈周期性排列，称为晶体（非晶态金属属于过冷液体，故称为玻璃态金属）。单独存在的一个晶体称为单晶体，单晶体在宏观上的基本特征为外形上的对称性，恰恰反映出内部原子的规则排列，单晶体呈各向异性。由许多取向不同的晶体所构成的集合体称为多晶体，无织构的多晶体呈各向同性。

在实际晶体中，每个原子均系围绕其自身的平衡位置不停地进行振动，而且还存在着点缺陷、线缺陷和面缺陷，这些缺陷局部破坏了原子排列的完整性，但总体看来原子仍呈规则排列。原子在晶体中的实际排列情况统称为晶体结构。各种金属和合金均具有自己的晶体结构，即或对同一种金属或合金而言，亦会因加工过程不同而影响其原子排列的完整性，从而使晶体结构产生差异。

一、晶体点阵和空间点阵

（一）晶体点阵、阵点、晶胞

为便于研究，可视晶体为不含有缺陷的理想晶体。

理想晶体的原子在三维空间中的规则排列所形成的阵列称为晶体点阵。构成晶体点阵的各原子的振动中心（平衡位置）称为阵点。因此，晶体点阵可视为原子的振动中心在空间所排成的阵列。能代表晶体点阵排列规律的最小的平行六面体称为晶胞。

自然界中晶体点阵的形式可有无限多.图1-1a)、b)、c)所示为三种不同的晶体点阵。

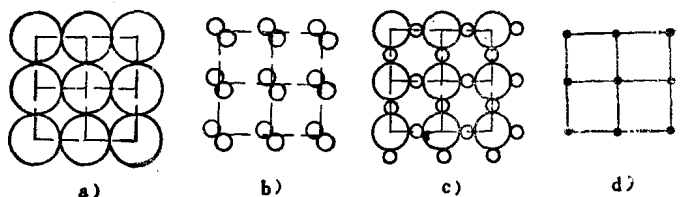


图 1-1 几种晶体点阵的平面图a)、b)、c)及其空间点阵的平面图d)

(二) 空间点阵、结点、基胞

若将晶体点阵中的各阵点抽象成几何点，而且每个几何点不仅可以代表一个阵点，亦可代表几个阵点，亦即不仅可以代表一个原子的振动中心，还可代表几个原子或分子的振动中心，则图1-1a、b、c所示的三种不同的晶体点阵均可抽象成图1-1d)所示的点阵，称为空间点阵。这种抽象的几何点称为结点，如图1-1a)、b)、c)中虚线的交点所示。每个结点均具有完全相同的周围环境。可见，空间点阵即为抽象的结点在三维空间所排成的阵列。

为便于观察和研究，通常用直线将各结点连接起来，构成三维几何格架，称为空间格子（图1-2）。空间格子因连接方式不同而有许多种形式。用适当的直线将空间点阵描绘成空间格子后，可明显看出空间点阵系由具有代表性的基本单元（最小的平行六面体）所组成。这种能代表空间点阵排列规律的基本单元称为基胞（单胞或原胞）。

基胞的选法需尽量满足以下条件：

- (1) 基胞应为平行六面体，

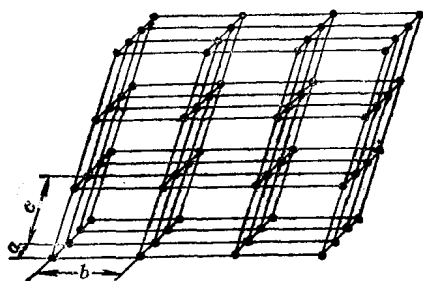


图 1-2 空间点阵的一部分

(2) 基胞的几何形状应与宏观晶体具有相同的对称性。

(3) 在所选的平行六面体内，等长的棱和相等的棱间夹角的数目应最多，且呈直角的棱间夹角的数目应最多，

(4) 所选的平行六面体的体积应最小。

例如，在图1-3中，应选取 A 为基胞。

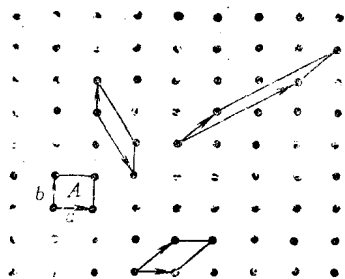


图 1-3 在空间点阵中选取基胞

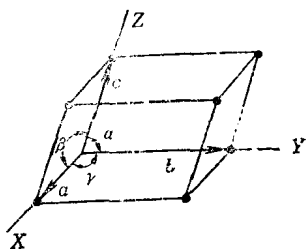


图 1-4 基胞、晶轴和基矢