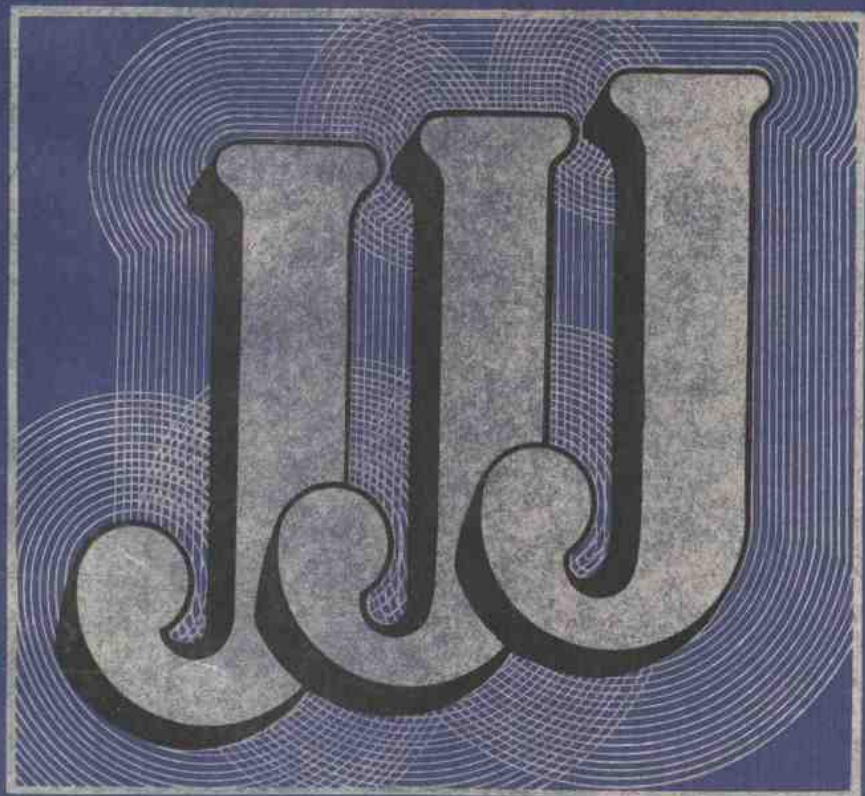


国家机械工业委员会统编

金属学及热处理

机械工人技术理论培训教材

JIXIE GONGREN JISHULILUN PEIXUN JIAOCAI



机械工业出版社

机械工人技术理论培训教材

金属学及热处理

国家机械工业委员会统编



机械工业出版社

本书共分为五章。第一章至第三章是金属学的基本理论，第四、五章是热处理的基本原理和新技术简介。在编写过程中，注重基本概念和理论的叙述，并力求使理论联系实际。

本书由国家机械工业委员会上海材料研究所朱振琳、上海华通开关厂杨玉芬、上海材料研究所吴刚嘉、邢宜强、汤福林编写。由上海柴油机厂李向民、上海材料研究所李润辉、上海工具厂袁家栋审核。

金属学及热处理

国家机械工业委员会统编

责任编辑：王明贤 版式设计：罗文莉
封面设计：林胜利 方 芬 责任校对：陈 松
责任印制：郭 炜

机械工业出版社出版（北京东黄门内大街25号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

人民卫生出版社印刷厂印刷

机械工业出版社发行·新华书店经销

开本 $787 \times 1092^{1/8}$ · 印张 $9^{7/8}$ · 字数 217 千字
1988年10月北京第一版·1988年10月北京第一次印刷
印数 00,001—14,800 · 定价：3.40元

ISBN 7-111-01073-0/TG · 259

前 言

1981年，原第一机械工业部为贯彻、落实《中共中央、国务院关于加强职工教育工作的决定》，确定对机械工业系统的技术工人按照初、中、高三个阶段进行技术培训。为此，组织制定了30个通用技术工种的《工人初、中级技术理论教学计划、教学大纲（试行）》，编写了相应的教材，有力地推动了“六五”期间机械行业的工人培训工作，初步改变了十年动乱造成的工人队伍文化技术水平低下的状况，取得了比较显著的成绩。

鉴于原机械工业部1985年对《工人技术等级标准（通用部分）》进行了全面修订，原教学计划、教学大纲已不适应新《标准》的要求，而且缺少高级部分；编写的教材，由于时间仓促、经验不足，在内容上存在着偏深、偏多、偏难等脱离实际的问题。为此，原机械工业部根据新《标准》，重新制定了33个通用技术工种的《机械工人技术理论培训计划、培训大纲》（初、中、高级），于1987年3月由国家机械工业委员会颁发，并根据培训计划、大纲的要求，编写了配套教材149种。

这套新教材的编写，体现了《国家教育委员会关于改革和发展成人教育的决定》中对“技术工人要按岗位要求开展技术等级培训”的有关精神，坚持了文化课为技术基础课服务，技术基础课为专业课服务，专业课为提高操作技能和分解解决生产实际问题的能力服务的原则。在内容上，力求以

基本概念和原理为主，突出针对性和实用性，着重讲授基本知识，注重能力培养，并从当前机械行业工人队伍素质的实际情况出发，努力做到理论联系实际，通俗易懂，具有工人培训教材的特色，同时注意了初、中、高三级之间合理的衔接，便于在职技术工人学习运用。

这套教材是国家机械工业委员会委托上海、江苏、四川、沈阳等地机械工业管理部门和上海材料研究所、湘潭电机厂，长春第一汽车制造厂、济南第二机床厂等单位，组织了200多个企业、院校和科研单位的近千名从事职工教育的同志、工程技术人员、教师、科技工作者及富有生产经验的老工人，在调查研究和认真汲取“六五”期间工人教材建设工作经验教训的基础上编写的。在新教材行将出版之际，谨向为此付出艰辛劳动的全体编、审人员，各地的组织领导者，以及积极支持教材编审出版并予以通力合作的各有关单位和机械工业出版社致以深切的谢意！

编好、出好这套教材不容易；教好、学好这些课程更需要广大职教工作者和技术工人的奋发努力。新教材仍难免存在某些缺点和错误，我们恳切地希望同志们在教和学的过程中发现问题，及时提出批评和指正，以便再版时修订，使其更完善，更好地发挥为振兴机械工业服务的作用。

国家机械工业委员会
技工培训教材编审组

1987年11月

目 录

前言

第一章 金属及合金的晶体结构	1
第一节 晶体的基本概念	2
第二节 金属的晶体结构	13
第三节 合金相结构	36
复习题	55
第二章 合金相图	57
第一节 相图的基本知识	57
第二节 二元合金相图	64
第三节 三元合金相图	100
复习题	126
第三章 塑性变形与再结晶	128
第一节 位错与钢的性能	128
第二节 塑性变形	145
第三节 回复与再结晶	162
第四节 金属的热塑性变形（热加工）	169
复习题	176
第四章 钢的热处理基本原理	177
第一节 钢在加热时的转变	177
第二节 钢在冷却时的转变	188
第三节 退火与正火	212
第四节 淬火与回火	214
第五节 时效	234
第六节 形变热处理	240

复习题	246
第五章 热处理新技术简介	247
第一节 亚温淬火	247
第二节 激光热处理	257
第三节 微合金化非调质钢	269
第四节 离子注入	280
第五节 离子镀	288
第六节 其它热处理	297
复习题	307

第一章 金属及合金的晶体结构

在工业、农业、国防等方面应用了各种金属或合金，这些金属材料的物理、化学性能及机械性能各不相同，它们受到许多因素影响。长期的生产实践和研究发现，金属和合金的内部结构和组织状态是影响材料特性的基本因素。例如，金属材料中晶粒度愈小，则取向愈不规则，这种材料的电学、磁学等物理性能就愈接近各向同性，其室温的屈服强度、硬度及加工硬化速率也愈高。所以说，研究金属及合金的微观结构，才能在本质上改善和提高金属材料的性能。

通常，金属和合金在固态时都是晶体。物质的三态中，气体和液体都是非晶体，固体中有的是晶体有的是非晶体，玻璃就是一种典型的非晶体，所以常称非晶态的固体为玻璃体。某些金属材料在特殊条件下冷却后，虽为固体，但内部结构却保持着液态结构的长程无序状态，称这些金属为非晶态金属或金属玻璃。晶体与非晶体的区别主要在于，晶体有一定的熔点和凝固点，而非晶体却没有。晶体的另一特点是各向异性，即沿金属晶体的不同方向所测得的导电性、导热性、热膨胀性、弹性、强度、光学、表面化学等性能不相同，而非晶体不具有各向异性。晶体的这些特性是由其内部的原子排列决定的。

晶体中，原子（或离子、分子）在三维空间作有规则的周期性的重复排列。晶体的结晶状态、类型、缺陷决定了它们的特性。所以，首先研究金属及合金中的原子排列、聚集

状态和分布规律等晶体特性，掌握晶体结构知识，以便进一步了解金属和合金的内部微观特征。学习晶体结构基本知识是研究金属材料的重要基础。

第一节 晶体的基本概念

一、晶体

固态物质按其原子（或离子、分子）的聚集状态分为两大类：晶体与非晶体。在结构晶体学、X射线晶体学及金属物理学中，理想晶体的定义是：晶体是由许多质点（离子、原子或分子等）在三维空间作规则排列而成的固体物质。单独存在的一个晶体是单晶体，由许多晶体结合而成的是多晶体。实际的金属材料大多数是由许许多多位向不同的小晶体组合而成的，小晶体与小晶体之间形成界面。

晶体是由原子、离子或分子在空间有规则的排列聚集而成的，这些粒子之间作用方式或键合方式不同。按键合方式可将晶体分为四种类型：

（1）离子晶体 是由简单的或复杂的正离子及负离子以静电作用键合而成，如 NaCl 、 CaF_2 等。在离子晶体中，离子间存在着较强的离子键，因此，离子晶体一般来说，硬度较高，密度较大，难于压缩，难于挥发，有较高的熔点和沸点。离子晶体是绝缘体。

（2）共价晶体 由相邻原子间公用电子（即共价电子）结合而成的晶体，如金刚石型的晶体、 ZnS 、 SiC 等。这种晶体内相邻原子间以共价键相结合的，又称为原子晶体。这种晶体的熔点和沸点都高，不管是在固态和液态，它们都是绝缘体，而熔化了离子晶体却可以变为导体。

（3）分子晶体 气态物质在降低温度、增大压强条件

下，能转变为液体和固体，其内部分子之间靠范德华力的相互作用而规则排列起来。分子间以这种分子间的相互作用力而相互结合的晶体叫做分子晶体。如惰性气体、氧、二氧化碳等。因分子间相互作用力很弱，因此分子晶体的熔点、沸点都比较低，且硬度低。

(4) 金属晶体 由失去了价电子的金属离子按一定规律排列，价电子在整个晶体内自由地运动（称为自由电子）。金属离子和自由电子之间相互作用形成金属键，通过这种金属键相互作用形成的晶体称为金属晶体。典型的金属晶体如铁、铜、铝等。这类晶体的熔点由中到高不等，液相期较长，硬度不太高但延性好。

二、空间点阵

1. 点阵与晶胞 在晶体学中，为了便于研究晶体中原子或离子、分子的规则排列情况，将它的抽象化为在空间规则排列的几何点，而几何点的中心便是这些粒子的中心。这些几何点在空间排列构成了所谓空间点阵（简称点阵）。空间点阵中的几何点称为阵点或结点。

空间点阵的有规则的周期重复性，使各阵点在空间具有相同的周围环境。为了说明阵点的排列规律和特征，在点阵中取出一个具有代表性的基本单元作为点阵的组成单元，称为晶胞（或初级晶胞、简单晶胞）。选取晶胞时应尽量反映出这个点阵的对称性。

图 1-1 表示出一个晶胞。以晶胞左下角的阵

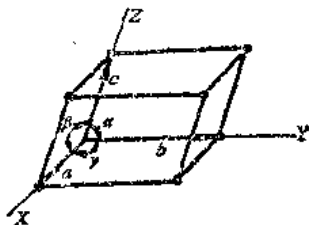


图1-1 晶胞、晶轴和点阵矢量

点为原点，沿三个棱边作坐标轴 X 、 Y 、 Z ，称为晶轴。沿 X 、 Y 、 Z 轴方向上用三个矢量 a 、 b 、 c 表示晶胞矢量，这三个矢量确定了晶胞的形状和大小，也完全确定了此空间点阵。晶胞矢量 a 、 b 、 c 的长度 a 、 b 、 c 称为点阵常数。三个晶轴之间的夹角分别用 α 、 β 、 γ 表示，习惯上 X 和 Y 轴之间夹角用 γ 表示， Y 轴和 Z 轴之间夹角用 α 表示， X 轴和 Z 轴之间夹角用 β 表示。 a 、 b 、 c 和 α 、 β 、 γ 为晶胞的六个参数。晶胞矢量或晶胞的六个参数确定了晶胞的形状和大小。根据晶胞的六个参数可将晶体分为七个晶系。

晶轴方向有正负规定，在点阵原点 O 的前上方为正，反之为负。

2. 晶系 在晶体学中，根据晶胞的六个参数，不涉及晶胞中原子的具体排列情况，将晶体分为七大晶系：

1) 三斜晶系： $a \neq b \neq c$ ， $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ ，例如 K_2CrO_7 。

2) 单斜晶系： $a \neq b \neq c$ ， $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$ ，例如 $\beta-S$ ， $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 。

3) 六方（或六角）晶系： $a = b \neq c$ ， $\alpha = \beta = 90^\circ$ ， $\gamma = 120^\circ$ ，例如 Zn ， Cd ， Mg ， $NiAs$ 。

4) 菱形（或三角）晶系： $a = b = c$ ， $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ ，例如 As ， Sb ， Bi 。

5) 正交晶系： $a \neq b \neq c$ ， $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，例如 $\alpha-S$ ， Ga ， Fe_3C 。

6) 四方（或正方）晶系： $a = b \neq c$ ， $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，例如 $\beta-Zn$ ， TiO_2 。

7) 立方（或等轴）晶系： $a = b = c$ ， $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，例如 Fe ， Cr ， Cu ， Ag ， Au 。

所有晶体都可以归纳于这七个晶系中。

晶体按其晶轴参数不同分为七大晶系，而按对称性分为 32 种点群。说明在同一晶系的晶体中，由于阵点上原子的组合情况不同，其对称性也不同。根据宏观对称要素组合的 32 种点群，再加上两种微观对称要素，在三维空间排列组合，便构成了更多的空间群。空间群是用来描述晶体中原子组合的可能方式的。晶体学家应用几何理论证明，晶体中可能用 230 种空间群，分属于 32 个点群。

3. 布拉菲点阵与晶体结构 如上所述，晶胞是空间点阵中具有代表性的基本单元，若将晶胞作三维重复堆积就构成了空间点阵。空间点阵的排列形式只可能有 14 种，这是布拉菲用数学方法确定的，所以后来就称 14 种空间点阵为布拉菲点阵。图 1-2 是 14 种布拉菲点阵的晶胞，它们分别属于七个晶系，见表 1-1。

除图 1-2 所示的 14 种布拉菲点阵的晶胞外，其它任何点阵形式都可以用这 14 种的一种表示。例如，14 种中没有面心四方点阵，但可用体心四方点阵来表示，因此没有列出面心四方点阵。但面心立方点阵却不能用体心立方点阵来表示，因为面心立方点阵的对称性在体心立方点阵中得不到反映。

空间点阵是晶体中质点的几何抽象化的阵点排列，不涉及晶体内部具体是什么离子、原子还是分子的排列情况。面晶体结构是指晶体中原子、离子或分子的排列情况，由于具体排列组合不同便组成各种类型的晶体结构，因此，晶体结构也是无限的。不管晶体结构有多少，总能按照其中原子或分子排列的周期性及对称性将它们分属于 14 种空间点阵。

图 1-3 是铜、氯化钠和氟化钙三种不同的晶体结构，假

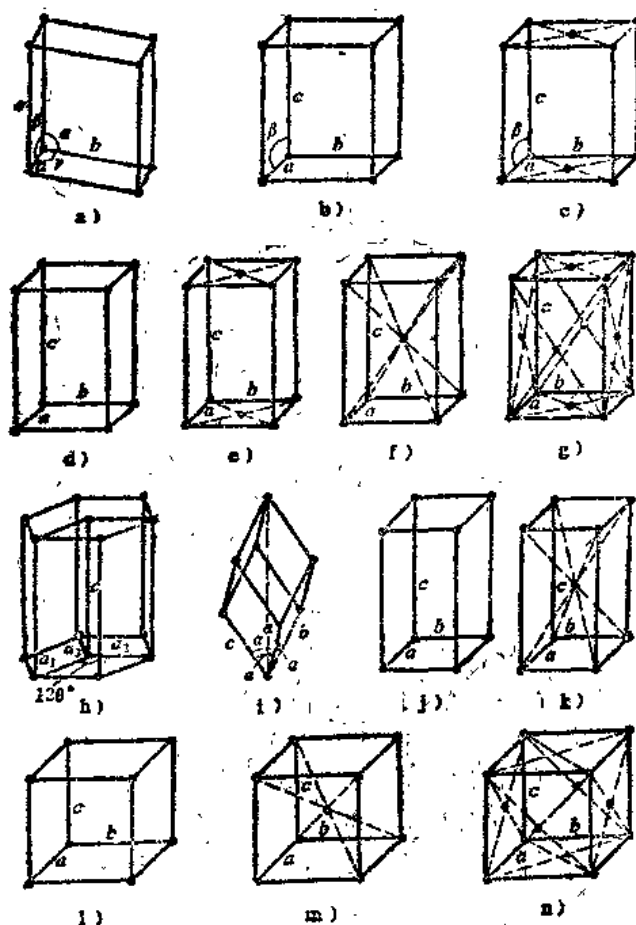
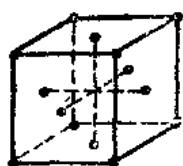


图1-2 14种布拉菲点阵的晶胞

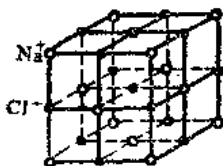
a) 简单三斜 b) 简单单斜 c) 底心单斜 d) 简单正交 e) 简单正交 f) 体心正交 g) 面心正交 h) 简单六方 i) 菱形(三方) j) 简单四方 k) 体心四方 l) 简单立方 m) 体心立方 n) 面心立方

表1-1 布拉菲点阵与晶系

序号	点 阵 类 型	晶 系
a	简 单 三 斜	三 斜
b	简 单 单 斜	单 斜
c	底 心 单 斜	
d	简 单 正 交	正 交
e	底 心 正 交	
f	体 心 正 交	
g	面 心 正 交	
h	简 单 六 方	六 方
i	菱 形(三角)	菱 方
j	简 单 四 方	四 方
k	体 心 四 方	(正方)
l	简 单 立 方	立 方
m	体 心 立 方	
n	面 心 立 方	



Cu



NaCl

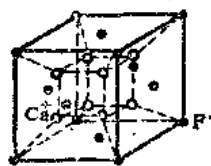
CaF₂

图1-3 具有相同点阵的晶体结构

的晶向，则晶向指数的数字相同，符号相反。以立方晶系为例具体说明确定晶向指数的步骤（见图 1-4）。

1) 以晶胞的晶轴为坐标轴 X 、 Y 、 Z 。以晶胞边长为坐标轴的长度单位。

2) 从晶轴系的原点 O 沿所指方向的直线上取最近一个阵点的坐标，即相对于点阵矢量 a 、 b 、 c 的倍数。例如图 1-4 中 G 点的坐标为 1、1、1。

3) 将坐标数化为最小整数，再加上方括号，便是晶向指数。如图 1-4 中， OG 方向的晶向指数为 $[111]$ 。 OH 方向的晶向指数为 $[210]$ 。 EF 方向的晶向指数的标定方法是，先通过原点 O 作 EF 的平行线 OF' ， F' 的坐标为 -1、1、0，所以 EF 的晶向指数为 $[\bar{1}10]$ 。此例说明阵点坐标为负值时，则负号要记在数字的上方，如 $[\bar{1}00]$ 、 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 、 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 等。

由于晶体的对称性，将因对称关系关联的性质完全相同的晶向归并为一个晶向族，用 $\langle uvw \rangle$ 形式表示。例如，对立方晶系来说， $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 、 $[\bar{1}00]$ 、 $[0\bar{1}0]$ 、 $[00\bar{1}]$ 等六个晶向，性质完全相同，组成晶向族用 $\langle 100 \rangle$ 表示。应指出，晶向指数的这套表示方法适用于所有晶系，对六方晶系来说也适用，但六方晶系还可采用另一种方法来描述晶向指数，将在下面介绍。

2. 晶面指数 晶体中原子、离子或分子排列构成许多方位不同的晶面，这些晶面用晶面指数来表示，国际上通用密勒指数。确定晶面指数的步骤如下（见图 1-5）：

1) 以晶胞的晶轴为坐标轴 X 、 Y 、 Z 。以晶胞边长作为坐标轴的长度单位。

2) 待确定的晶面与 X 、 Y 、 Z 轴上的截距，取倒数

b 、 c 的倍数来表示。图 1-5 中 $a_1b_1c_1$ 面在三个轴上的截距分别为 $1/2$, $1/3$, $2/3$ 。

3) 取截距的倒数。 $1/2$, $1/3$, $2/3$ 的倒数为 2, 3, $3/2$ 。

4) 将这些倒数化为最小的简单整数, 并用圆括号括起来, 一般记为 (hkl) 。图 1-5 中的 $a_1b_1c_1$ 晶面在三个轴上截距的倒数化为最小的简单整数后, 应为 4, 6, 3, 所以此晶面的晶面指数为 (463) 。

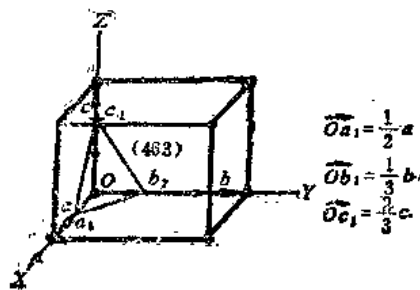


图1-5 晶面指数的表示方法

在确定晶面指数时, 若该晶面与某轴平行时, 则在此轴上的截距为无穷大, 其倒数为零。因此, 晶面指数中有零者, 表明该晶面平行于某轴。

晶体中, 许多晶面是相互平行的, 它们在三个轴上的截距虽不同, 但成比例, 因此截距的倒数化为最小整数后, 仍然相同, 所以所有互相平行的晶面它们的晶面指数是相同的, 只是可能出现负数而已, 因此, 晶面指数代表着一组平行的晶面。

在立方晶系中, (100) 、 (010) 、 (001) 、 $(\bar{1}00)$ 、 $(0\bar{1}0)$ 、 $(00\bar{1})$ 晶面上的原子排列情况及晶面间距离完全相等, 将它们归并为一个晶面族, 用 $\{100\}$ 来表示。一般表示为 $\{hkl\}$ 。