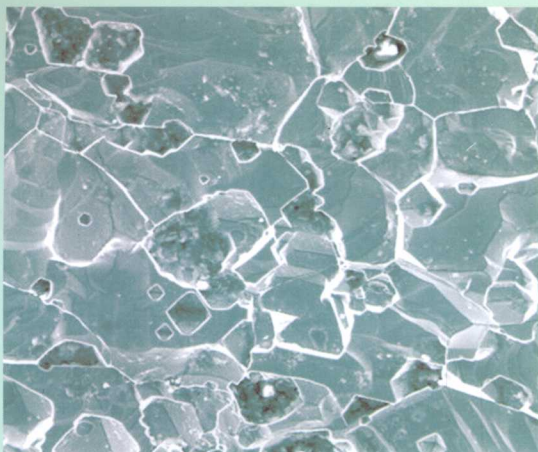


理化检验人员培训系列教材



金属材料金相检验

机械工业理化检验人员技术培训和资格鉴定委员会 编
中国机械工程学会理化检验分会

 科学普及出版社
POPULAR SCIENCE PRESS

理化检验人员培训系列教材

第 1 册

金属材料金相检验

中国标准出版社 CIP 数据 (2012) 第 037281 号

机械工业理化检验人员技术培训和资格鉴定委员会
中国机械工程师学会理化检验分会

编

主编 曹玉梅
副主编 何士如
主审 张春林

科学普及出版社
地址 北京市海淀区
邮编 100081
电话 010-6510312
传真 010-6515919
网址 <http://www.spp.com.cn/>

科学普及出版社

（封面背页设计张林·北京·页图，页图设计，封面设计）

图书在版编目 (CIP) 数据

金属材料金相检验/机械工业理化检验人员技术培训和
资格鉴定委员会, 中国机械工程学会理化检验分会编. —北京:
科学普及出版社, 2015. 2

ISBN 978 - 7 - 110 - 08949 - 1

I. ①金… II. ①机… ②中… III. ①金属材料-金相组织-检验
IV. ①TG115. 21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 037561 号

责任编辑 鲍黎钧
责任校对 何士如
责任印制 张建农

出版发行 科学普及出版社
地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号
邮政编码 100081
电 话 010 - 62103123
传 真 010 - 62179148
网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>
印 刷 北京长宁印刷有限公司

开 本 787mm × 1092mm 1/16
字 数 493 千字
印 张 19.25
版 次 2015 年 2 月第 1 版
印 次 2015 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 110 - 08949 - 1/TG · 29
定 价 50.00 元

(凡购买本社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

编辑委员会名单

主任 杨学桐
副主任 鄢国强 李建林 阎育镇
委员 朱敏 陈文哲 陶美娟 王滨 马冲先
蔡宏伟 张宏鹤 巴发海 杨力 奚建法
王承忠 王淑华 申卫东 林介东 王维发
胡晓燕 林江海 高尚书 杨浩义 史秀春

编审人员名单

总主编 陶美娟 (上海材料研究所高级工程师)
总主审 鄢国强 (上海材料研究所教授级高级工程师)

《金属材料力学性能试验》

分册主编 王滨 (上海材料研究所教授级高级工程师)
编写 凌霄 (上海材料研究所教授级高级工程师)
奚建法 (上海材料研究所工程师)
丁富连 (宝山钢铁股份有限公司研究院高级工程师)
陈运远 (上海材料研究所教授级高级工程师)
凌树森 (上海材料研究所教授级高级工程师)
高怡斐 (钢铁研究总院教授级高级工程师)
徐关根 (上海紧固件和焊接材料技术研究所高级工程师)
王承忠 (上海钢铁研究所教授级高级工程师)
分册主审 凌树森 (上海材料研究所教授级高级工程师)
王承忠 (上海钢铁研究所教授级高级工程师)

《金属材料金相检验》

单各会员委编编

分册主编 蔡宏伟 (上海材料研究所高级工程师)
编 写 巴发海 (上海材料研究所教授级高级工程师)
陆 慧 (上海材料研究所高级工程师)
王 荣 (上海材料研究所教授级高级工程师)
杨 力 (上海材料研究所教授级高级工程师)
强明道 (上海材料研究所高级工程师)
李 晋 (上海材料研究所教授级高级工程师)
王春亮 (上海材料研究所高级工程师)
龚应时 (上海材料研究所高级工程师)

主 编
主 编
员 委

分册主审 唐汝均 (上海材料研究所教授级高级工程师)

(钢铁工业高级技术职称评审委员会)

总 主 编

(钢铁工业高级技术职称评审委员会)

审 主 总

《金属材料化学分析》

分册主编 马冲先 (上海材料研究所教授级高级工程师)
编 写 戴亚明 (上海材料研究所高级工程师)
李莎莎 (上海材料研究所高级工程师)
陶美娟 (上海材料研究所高级工程师)
葛 皓 (杭州杭氧股份有限公司高级工程师)
胡晓燕 (钢铁研究总院教授级高级工程师)
张宏鹤 (上海材料研究所高级工程师)

主 编
员 委

分册主审 吴 诚 (上海材料研究所教授级高级工程师)

(钢铁工业高级技术职称评审委员会)

总 主 编

(钢铁工业高级技术职称评审委员会)

审 主 总

(钢铁工业高级技术职称评审委员会)

总 主 编

(钢铁工业高级技术职称评审委员会)

审 主 总

(钢铁工业高级技术职称评审委员会)

总 主 编

内 容 提 要

本书为理化检验人员培训系列教材之一。全书分十二章，主要内容包括：金相检验基础；钢的宏观检验技术；金相检验技术及设备；钢的显微组织评定；结构钢的金相检验；工模具钢的金相检验；不锈钢与耐热钢的金相检验；铸钢和铸铁的金相检验；零件表面处理后的金相检验；焊接件的金相检验；非铁金属和粉末冶金的金相检验；缺陷分析及失效分析。

本书主要供机械行业一、二级理化检验人员《金属材料金相检验》课程资格培训使用，也可作为三级金相检验人员的基础参考书，同时也可供冶金、有色、航空、航天、兵器等行业从事金属材料分析的人员参考。

目 录

<p>第一章 金相检验基础 (1)</p> <p> 第一节 金属与合金的晶体结构 (1)</p> <p> 第二节 纯金属及合金的结晶 (8)</p> <p> 第三节 Fe - C (Fe - Fe₃C) 相图 (16)</p> <p> 第四节 钢中的基本组织和合金 元素在钢中的作用 (21)</p> <p> 第五节 钢的热处理基础 (27)</p> <p> 第六节 非铁金属热处理 (46)</p> <p> 第七节 金相组织相分析方法简介 (51)</p> <p>第二章 钢的宏观检验技术 (57)</p> <p> 第一节 钢的低倍酸蚀检验 (57)</p> <p> 第二节 钢材断口检验 (64)</p> <p>第三章 金相检验技术及设备 (69)</p> <p> 第一节 金相试样的制备 (69)</p> <p> 第二节 金相显微镜 (75)</p> <p> 第三节 定量金相 (82)</p> <p> 第四节 显微硬度计 (86)</p> <p>第四章 钢的显微组织评定 (91)</p> <p> 第一节 钢中非金属夹杂物含量的 测定 (91)</p> <p> 第二节 金属平均晶粒度测定法 (98)</p>	<p> 第三节 钢的显微组织评定方法 (106)</p> <p> 第四节 钢的脱碳层深度测定法 (110)</p> <p> 第五节 中碳钢与中碳合金结构 钢马氏体等级 (111)</p> <p> 第六节 钢质模锻件金相组织评 级图与评定方法 (111)</p> <p>第五章 结构钢的金相检验 (113)</p> <p> 第一节 冷变形钢的金相检验 (113)</p> <p> 第二节 易切削结构钢的金相 检验 (116)</p> <p> 第三节 低碳马氏体钢的组织 检验 (117)</p> <p> 第四节 低碳低合金钢的组织检验 (118)</p> <p> 第五节 调质钢的金相检验 (121)</p> <p> 第六节 大截面用钢的金相检验 (122)</p> <p> 第七节 低合金超高强度马氏 体钢的金相检验 (122)</p> <p> 第八节 低合金超高强度贝氏 体钢的金相检验 (123)</p> <p> 第九节 非调质钢的金相检验 ... (124)</p>
--	--

第十节 双相钢	(124)	第二节 焊接区域显微组织特征	(219)
第十一节 弹簧钢的金相检验 ...	(125)	第三节 几种典型焊接组织识别	(225)
第六章 工模具钢的金相检验	(136)	第十一章 非铁金属和粉末冶金的金相检验	(228)
第一节 碳素工具钢的金相检验	(136)	第一节 概述	(228)
第二节 合金工具钢的金相检验	(139)	第二节 铝及铝合金的金相检验	(228)
第三节 模具钢的金相检验	(142)	第三节 铜及其铜合金的金相检验	(241)
第四节 高速工具钢的金相检验	(146)	第四节 镁合金的金相检验	(249)
第五节 轴承钢的金相检验	(150)	第五节 钛合金的金相检验	(252)
第七章 不锈钢与耐热钢的金相检验	(156)	第六节 硬质合金的金相检验 ...	(254)
第一节 不锈钢的金相检验	(156)	第七节 铁基、铜基粉末冶金制品的金相检验	(258)
第二节 耐热钢的金相检验	(167)	第十二章 缺陷分析和失效分析 ...	(262)
第八章 铸钢和铸铁的金相检验 ...	(172)	第一节 铸造缺陷	(262)
第一节 铸钢的金相检验	(172)	第二节 锻造缺陷	(269)
第二节 铸铁的金相检验	(181)	第三节 热处理缺陷	(272)
第九章 零件表面处理后的金相检验	(196)	第四节 机械产品失效分析的目的意义	(276)
第一节 概述	(196)	第五节 机械构件失效的主要形式及其特征	(278)
第二节 钢的渗碳层检验	(197)	第六节 失效分析思路及方法 ...	(289)
第三节 钢的碳氮共渗层检验 ...	(200)	第七节 机械产品失效案例分析	(293)
第四节 钢的渗氮层检验	(202)	附录 常用金相检验标准目录	(299)
第五节 钢的渗硼层检验	(205)	参考文献	(302)
第六节 钢的渗金属层检验	(205)		
第七节 表面热处理检验	(208)		
第十章 焊接件的金相检验	(213)		
第一节 焊接接头的宏观检验与常见缺欠	(213)		

第一章 金相检验基础

第一节 金属与合金的晶体结构

金属和合金在固态下,通常都是晶体。晶体是原子在三维空间中有规则作周期重复排列的物质,也就是说,在金属和合金中,原子的排列是有规则的,而不是杂乱无章的。

晶体通常具有如下的特性:

- (1) 均匀性,即晶体内部各处宏观性质相同,如密度、化学组成。
- (2) 各向异性,即晶体中不同的方向上具有不同的性质,如电导率、热胀系数。
- (3) 能自发地形成多面体外形。在理想环境中长成凸多面体,其晶面数(F)、晶棱数(E)和顶点数(V)符合公式: $F + V = E + 2$ 。
- (4) 具有确定的、明显的熔点。
- (5) 晶体的理想外形和内部结构都具有特定的对称性。
- (6) 对 X 射线等产生衍射效应。

这些性质是由晶体结构最基本的特征——内部原子或分子的排列具有三维空间的周期性所决定的。

一、纯金属的晶体结构

(一) 金属键

金属原子主要是靠金属键结合的。处于聚集状态的金属原子,全部或大部分将它们的价电子贡献出来,为其整个原子集体所共有,这些价电子或自由电子已不再只围绕自己的原子核运动,而是与所有的价电子一起在所有原子核周围按量子力学的规律运动,形成所谓的电子云或电子气。而贡献出价电子的原子则变成了正离子,沉浸在电子云中,它们依靠运动于其间的公有化的自由电子的静电作用而结合,这种方式的键合就叫金属键。图 1-1 为其示意图。

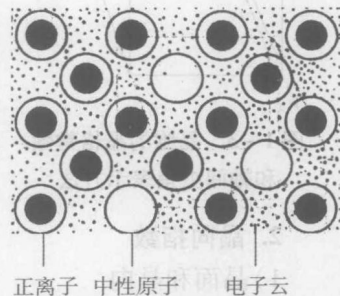


图 1-1 金属键模型

在固态金属中,众多的原子依靠金属键牢固地结合在一起,但是金属原子或正离子又是什么力量使它们规则地、紧密地排列在一起的呢?主要是靠原子间的结合能——原子间的排斥能与原子间的吸引能的代数和。在原子的平衡位置上,结合能最低,此时原子也最稳定。当大量金属原子结合成固体时,为使固体金属具有最低的能量,以保持其稳定状态,因此原子间就必须保持一定的平衡距离,这就是固态金属中的原子趋于规则排列的主要原因。

(二) 晶体学基础

1. 晶体中的空间点阵

晶体结构是指晶体中的原子、离子或分子等的具体排列情况,也就是它们在三维空间中有

规律的周期性的重复排列方式。由于组成晶体的物质质点不同,排列规律不一样,所以就存在各种各样的晶体结构。假设晶体中的物质质点都是固定的钢球,那么,晶体就是由这些钢球堆垛而成,其模型如图 1-2(a)所示。从图中可见,原子在各个方向的排列都是很有规律的。为了便于研究,往往把构成晶体的实际质点忽略,而将它们抽象地认为是纯粹的几何点,称为阵点。这种阵点有规则地周期性重复排列所构成的空间几何图形,即称为空间点阵。晶体结构是一种点阵结构,点阵在空间分布上是无限伸展的,即点阵中所含有的点数是无限的;每个点阵点都具有相同的周围环境。需要特别指出,晶体结构是具体的,而点阵是抽象的。通常为了方便,把点阵用直线连接起来形成空间格子,称为晶格[图 1-2(b)]。

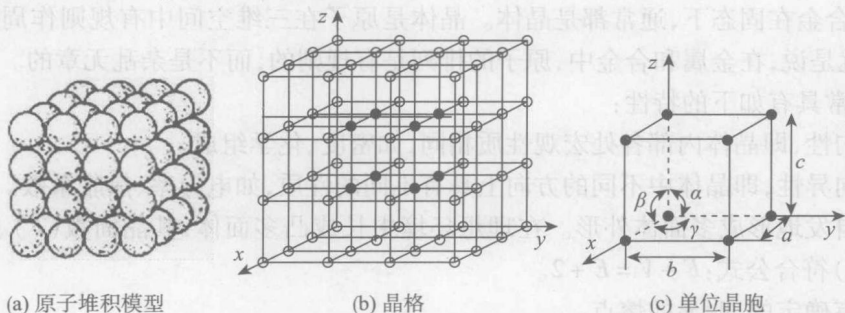


图 1-2 晶体中原子排列示意图

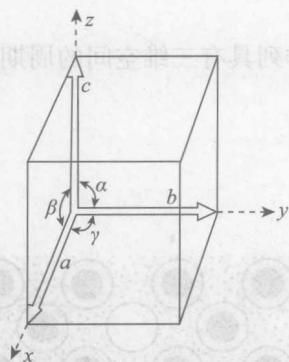


图 1-3 晶胞的晶格常数和轴向夹角表示方法

晶格中的阵点排列具有周期性,为了研究方便,常从晶格中选取一个能够完全反映晶格特征的最小几何单元来分析阵点排列的规律性,这个最小的几何单元就称为晶胞[图 1-2(c)]。晶胞的大小和形状常用晶胞的棱边长度 a 、 b 、 c 及棱边间的夹角 α 、 β 、 γ 表示,如图 1-3 所示。图中沿晶胞三条相交于一点的棱边也设置了三个坐标轴(又叫晶轴) x 、 y 、 z 。一般以原点前、右、上为正方向。晶胞的棱边长度一般称为晶格常数或点阵常数,在 x 、 y 、 z 轴上分别以 a 、 b 、 c 表示。晶胞的棱边间夹角又称为轴向夹角,通常把 $y-z$ 轴、 $z-x$ 轴和 $x-y$ 轴的夹角分别用 α 、 β 、 γ 表示。晶胞参数表示晶胞的大小和形状,如果还能表示晶胞中原子的坐标参数即晶胞内部各原子的相对位置,那么整个晶体的空间结构也就知道了。

2. 晶向指数

1) 晶面和晶向

晶体中由一系列原子所组成的平面叫晶面,任意两个原子之间连线所指的方向叫晶向,表示晶向和晶面的数字叫晶向指数和晶面指数。

2) 晶向指数

晶向指数的确定步骤如下:

- (1) 以晶胞的三个棱边为坐标轴 x 、 y 、 z ,以棱边长度(晶格常数)作为坐标轴的长度单位;
- (2) 从坐标原点引一有向直线平行于待定晶向;
- (3) 在所引的有向直线上任意取一点(为了分析方便,可取距原点最近的那个原子),求出该点在 x 、 y 、 z 上的坐标值;

(4) 将 3 个坐标值按比例化为最小简单整数,依次写入方括号中,即为所求的晶向指数。通常以 $[uvw]$ 表示晶向指数的普遍形式,若晶向指向坐标为负方向时,则坐标值中出现负值,

这时在晶向指数的这一数字之上冠以负号,如 $[\bar{0}10]$ 。

原子排列相同但空间位向不同的所有晶向称为晶向族,用 $\langle \quad \rangle$ 表示。如 $\langle 100 \rangle$ 晶向族表示立方晶系中的 $[000]$, $[010]$, $[001]$, $[\bar{0}00]$, $[0\bar{1}0]$, $[00\bar{1}]$ 6个晶向指数。

3. 晶面指数

晶面指数的确定步骤如下:

(1)以晶胞的三条相互垂直的棱边为参考坐标轴 x 、 y 、 z ,坐标原点 O 应位于待定晶面之外,以免出现零截距;

(2)以棱边长度(即晶格常数)为度量单位,求出待定晶面在各轴上的截距;

(3)取各截距的倒数,并化为最小简单整数,放在圆括号内,即为所求的晶面指数;晶面指数的一般表示形式为 (hkl) ,如果所求的晶面在坐标轴上的截距为负值,则在相应的指数上加一负号,如 $(\bar{1}11)$ 。

与晶向指数相似,某一晶面也是代表一组相互平行的晶面,即所有相互平行的晶面都具有相同的晶面指数。

在同一晶体结构中,有些晶面虽然在空间的位向不同,但其原子排列的情况完全相同,这些晶面均属于一个晶面族,用大括号 $\{hkl\}$ 表示。如在立方晶系中, $\{100\}$ 包含有 (100) 、 (010) 、 (001) 、 $(\bar{1}00)$ 、 $(0\bar{1}0)$ 、 $(00\bar{1})$ 晶面。

4. 六方晶格的晶面指数和晶向指数

如图1-4所示, a_1 、 a_2 、 a_3 、 c 为4个坐标轴, a_1 轴、 a_2 轴和 a_3 轴之间的夹角均为 120° , c 轴与 a_1 轴、 a_2 轴相垂直,其晶面指数以 $(hkil)$ 4个指数表示,这样6个柱面的指数分别为 $(10\bar{1}0)$ 、 $(01\bar{1}0)$ 、 $(\bar{1}100)$ 、 $(\bar{1}010)$ 、 $(0\bar{1}10)$ 和 $(1\bar{1}00)$,它们可归并为 $\{10\bar{1}0\}$ 晶面族。

六方晶系的晶向指数既可用3个坐标轴标定,也可用4个坐标轴标定。当用3个坐标轴时,其标定方法与立方晶系完全相同。如用4个坐标轴标定时,如图1-5所示,可从原点出发,沿着平行于4个坐标轴的方向依次移动,使之最后到达要标定方向上的某一结点。移动时必须选择适当的路线,使沿 a_3 轴移动的距离等于沿 a_1 、 a_2 轴移动距离之和的负值(即 $u+v=-1$),将各个方向移动距离化成最小整数,加上方括号,即表示该方向的晶向指数。

比较简单的方法是用三个坐标轴求出晶向指数 $[UVW]$,然后再根据如下公式换算成4个坐标轴的晶向指数 $[vlw]$ 。

$$u = 2/3U - 1/3V \quad (1-1)$$

$$v = 2/3V - 1/3U \quad (1-2)$$

$$l = -(u+v) \quad (1-3)$$

$$w = W \quad (1-4)$$

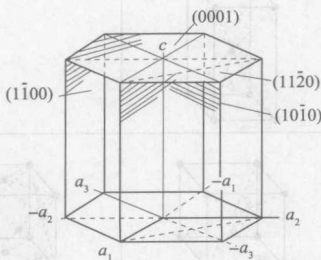


图1-4 六方晶系的一些晶面指数

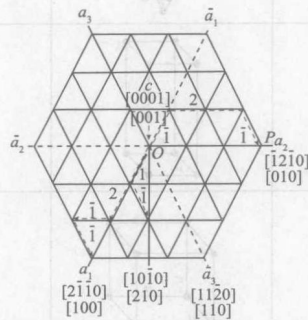


图1-5 六方晶系晶向指数标定方法

(三) 纯金属的晶体结构

自然界中的晶体有成千上万种,虽然它们的晶体结构各不相同,但若根据晶胞的三个晶格常数和三个轴间夹角的相互关系进行分类,则可将所有的空间点阵归为七种类型,即7个晶系。按照“每个阵点的周围环境相同”的要求,布拉菲(A. Bravais)用数学方法推导能够反映空间点阵全部特征的单位平行六面体只有十四种,这十四种空间点阵也称为布拉菲点阵,如表1-1所示。工业上使用的金属元素中,绝大多数都具有比较简单的晶体结构,其中最常见晶体结构有三种,即体心立方结构、面心立方结构和密排六方结构。前两者属于立方晶系,后一种属于六方晶系。

表1-1 7个晶系和十四种点阵

晶系和实例	点阵类型			
	简单	底心	体心	面心
三斜晶系 $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ K_2CrO_7				
单斜晶系 $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$ $\beta - S$				
正交晶系 $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $\alpha - S, Fe_3C$				
六方晶系 $a_1 = a_2 = a_3 \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$ Zn, Cd, Mg				
菱方晶系 $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ As, Sb, Bi				
四方晶系 $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $\beta - Sn, TiO_2$				
立方晶系 $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ Fe, Cr, Ca, Ag				

1. 体心立方晶格

体心立方晶格晶胞的三个棱边长度相等,三个轴间夹角均为 90° ,构成立方体。晶胞的8个角上各有一个原子,在立方体的中心还有一个原子,其模型如图1-6所示。具有体心立方结构的金属有 α -Fe、Cr、V、Nb、Mo、W等30多种。

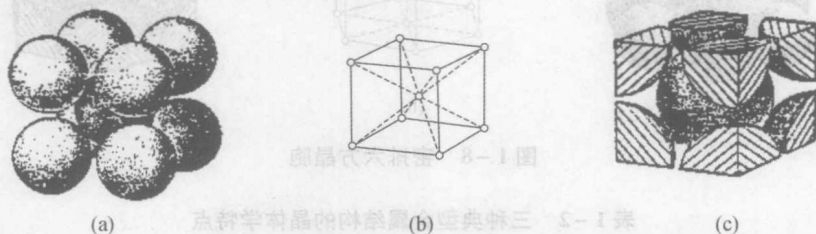


图1-6 体心立方晶胞及点阵

体心立方晶胞中,原子沿立方体对角线紧密地接触,如假设晶胞的点阵常数(或晶格常数)为 a ,则立方体对角线的长度为 $\sqrt{3}a$;它又等于4个原子半径,所以体心立方晶胞中的原子半径 $r = \sqrt{3} \frac{a}{4}$ 。体心立方晶胞的原子数则为 $8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$ 。在体心立方晶格中,以立方体中心的原子来看,与其最近邻、等距离的原子数有8个,所以它的配位数为8。体心立方晶格的晶胞中含有两个原子,晶胞的棱边长为 a ,原子半径为 $\sqrt{3} \frac{a}{4}$,所以其致密度 $K = nV_1/V \approx 0.68$ (式中: V_1 为一个原子的体积; V 为晶胞的体积),即有68%的体积为原子所占据,其余32%为空隙体积。

2. 面心立方晶格

面心立方晶格晶胞的8个角上各有一个原子,构成立方体。在立方体的6个面的中心各有一个原子,如图1-7所示。具有面心立方结构的金属有 γ -Fe、 β -Co、Ni、Al、Ag等。

面心立方晶胞中只有晶胞的6个面的对角线上的原子才是相互接触的,所以它的原子半径为 $\sqrt{2} \frac{a}{4}$ 。每个面心立方晶胞有4个原子,其配位数为12,致密度约为74%。

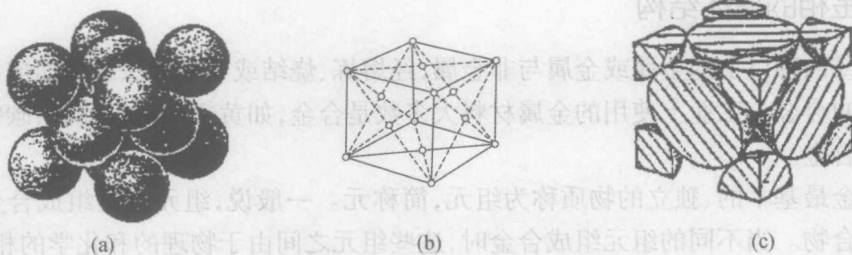


图1-7 面心立方晶胞及点阵

3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞如图1-8所示。在晶胞的12个顶角上各有一个原子,构成六方柱体,上、下底面的中心也各有一个原子,晶胞内还有三个原子。具有密排六方结构的金属有Zn、Mg、Be、 α -Ti、 α -Co、Cd等。密排六方晶胞有6个原子,配位数为12,致密度约为74%。

表1-2列出了三种典型金属结构的晶体学特点,可供比较。

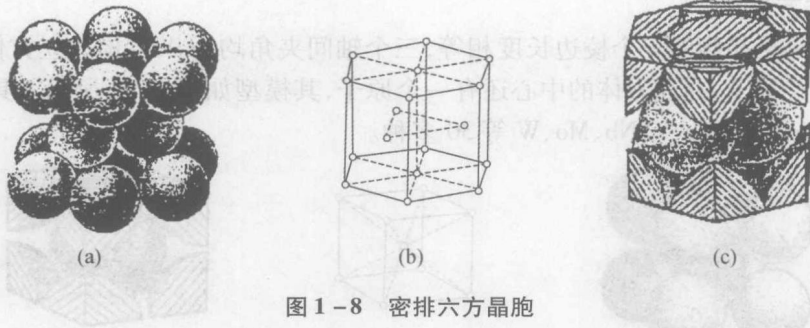


图 1-8 密排六方晶胞

表 1-2 三种典型金属结构的晶体学特点

晶体特征		晶体结构类型		
		面心立方	体心立方	密排六方
晶体结构		面心立方	体心立方	密排六方
点阵常数		a	a	$a, c (c/a = 1.633)$
原子半径 r		$\frac{\sqrt{2}}{4}a$	$\frac{\sqrt{3}}{4}a$	$\frac{a}{2}$ 或 $\frac{1}{2}\sqrt{\frac{a^2}{3} + \frac{c^2}{4}}$
晶胞内原子数		4	2	6
配位数		12	8	12
致密度		0.74	0.68	0.74
间隙	四面体间隙	数量	8	12
		大小	$0.225r$	$0.291r$
	四面体间隙	数量	4	6
		大小	$0.414r$	$0.154r \langle 100 \rangle$ $0.633r \langle 110 \rangle$

二、合金相的晶体结构

由两种或两种以上的金属或金属与非金属,经熔炼、烧结或其他方法组合而成并具有金属特性的物质叫合金。工业上使用的金属材料大多数是合金,如黄铜是由铜和锌,碳钢是由铁和碳所组成的合金。

组成合金最基本的、独立的物质称为组元,简称元。一般说,组元就是组成合金的元素或是稳定的化合物。当不同的组元组成合金时,这些组元之间由于物理的和化学的相互作用,形成具有一定晶体结构和一定成分的相。相是指合金中结构相同、成分和性能均一,并以相界面相互分开的组成部分。由一种固相组成的合金叫单相合金,由几种不同的相组成的合金称为多相合金。不同的相具有不同的晶体结构,合金按相的晶体特点可分为固溶体和金属化合物两大类。

(一) 固溶体

合金的组元之间以不同的比例相互混合,混合后形成的固相晶体结构与组成合金的某一组元相同,这种固相就叫固溶体。这一组元称为溶剂,而其他组元称为溶质。固溶体有置换固

溶体和间隙固溶体两大类。

1. 置换固溶体

置换固溶体是指溶质原子位于溶剂晶格的某些格点位置上所形成的固溶体,犹如这些结点上的溶剂原子被溶质原子所置换一样,所以叫置换固溶体。如图1-9(a)所示。

金属元素彼此之间一般都能形成置换固溶体。但由于固溶度的大小往往相差很大,所以有的溶质组元在固溶体中的浓度(固溶度)有一定的限制,这种固溶体就叫有限固溶体。有的溶质却能以任意比例溶入溶剂,其溶解度可达100%,这种固溶体称无限固溶体。

影响固溶度的主要因素有:

- (1) 原子尺寸,组元间的原子半径越相近,固溶体的溶解度越大;
- (2) 电负性,组元间的电负性差小,则其固溶度较大,相差很大时,固溶度就较小;
- (3) 电子浓度;
- (4) 晶体结构,晶体结构类型相同,溶质原子能够连续不断地置换溶剂晶格中的原子,直到溶剂原子完全被溶质原子置换完毕,如果组元的晶格类型不同,则组元间的固溶度只能是有限的,形成有限固溶体。

2. 间隙固溶体

一些原子半径很小的溶质原子溶入溶剂中时,不是占据溶剂晶格的正常结点位置,而是填入到溶剂晶格的间隙中,形成间隙固溶体,其结构如图1-9(b)所示。形成间隙固溶体的溶质元素,都是属于半径 $<0.1\text{nm}$ 的非金属元素,如H、O、N、C、B,而溶剂元素都是过渡族元素。

溶质原子溶入溶剂后,将使溶剂的晶格常数改变,并使晶格发生畸变。溶入的溶质原子越多,溶剂晶格畸变也越大。当溶质原子较小时,溶剂晶格畸变也较小。由于溶剂晶格中的间隙是有一定限度的,所以间隙固溶体都是有限固溶体。

(二) 金属化合物

合金中的另一类相是金属化合物,它是合金组元间发生相互作用而形成的一种新相,又叫中间相。其晶格类型和性能均不同于任何一组元,一般可以用分子式大致表示其组成。因为在这些化合物中,除了有离子键、共价键外,金属键也参与作用,使它们具有一定的金属性质,所以,称为金属间化合物。 Fe_3C (碳钢中)、 CuZn (黄铜中)、 CuAl_2 (铝合金中)等都是金属化合物。

金属化合物的类型很多,主要有正常价化合物、电子化合物和间隙化合物。

(1) 正常价化合物通常由金属元素和周期表中第IV、V、VI族元素所组成。它们的成分符合原子价规律,具有严格的化合比,成分固定不变,可用化学式表示。这类化合物具有较高的硬度和脆性,其中一部分具有半导体性质。 Mg_2Si 、 Mg_2Zn 、 MnS 等都是属于此类金属化合物。

(2) 电子化合物是由第I族或过度族金属元素与第II至第V族金属元素形成的金属化合物。它不遵守原子价规律,而是按照一定电子浓度的比值形成化合物。电子浓度不同,所形成的金属化合物的晶体结构也不同。电子化合物可以用化学式表示,但其成分可以在一定的范围内变化。因此,可以把它看成是以化合物为基的固溶体。电子化合物具有很高的熔点和硬度,脆性大。

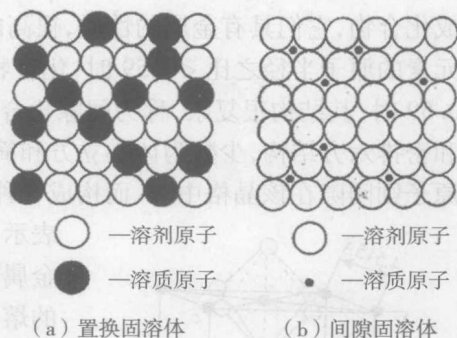


图1-9 两种类型的固溶体

(3) 间隙相和间隙化合物。原子半径甚小的非金属元素,如 H、N、C、B 与过度族金属能形成化合物,它们具有金属的性质,很高的熔点和极高的硬度。当非金属元素的原子半径与金属元素的原子半径之比 < 0.59 时,化合物具有比较简单的晶体结构,称为间隙相。当比值超过 0.59 时,其结构很复杂,称为间隙化合物。间隙相具有比较简单的晶体结构,多数为面心立方和密排六方结构,少数为体心立方和简单六方结构。金属原子位于晶格的正常位置上,非金属原子则间隙在该晶格中,从而构成一种新的晶体结构。间隙相的化学成分可用简单的分子式表示,如 M_4X , M_2X , MX 或 MX_2 (M 表示金属原子, X 表示非金属原子),但其成分可在一定范围内变化。间隙相有极高的熔点和硬度,但很脆。间隙化合物一般具有复杂的晶体结构。合金钢中常遇到的间隙化合物有 M_3C 型(如 Fe_3C), M_7C_3 型(如 Cr_7C_3), $M_{23}C_6$ 型(如 $Cr_{23}C_6$), M_6C 型(如 Fe_4W_2C), 式中: M 可表示一种金属元素,也可以表示几种金属元素固溶在内。

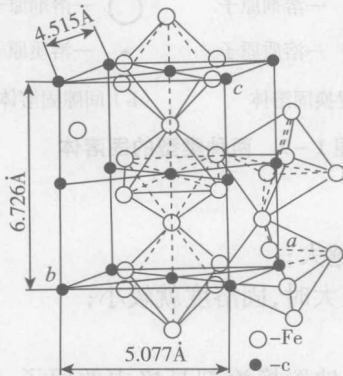


图 1-10 Fe_3C 晶体结构

Fe_3C 是 $Fe-C$ 合金中的一种常见相,是结构比较复杂的金属化合物。 Fe_3C 具有复杂的斜方结构,性质硬而脆,晶体构造如图 1-10 所示。在不锈钢或耐热合金中,也经常会出现硬而脆的 σ 相。 σ 相也是一种金属化合物,性质脆而硬,多呈针状形态分布,严重影响材料的性能。

Fe_3C 是 $Fe-C$ 合金中的一种常见相,是结构比较复杂的金属化合物。 Fe_3C 具有复杂的斜方结构,性质硬而脆,晶体构造如图 1-10 所示。在不锈钢或耐热合金中,也经常会出现硬而脆的 σ 相。 σ 相也是一种金属化合物,性质脆而硬,多呈针状形态分布,严重影响材料的性能。

第二节 纯金属及合金的结晶

一、纯金属的结晶

金属由液态转变为固态的过程称为凝固。凝固后的固态金属一般都是晶体,所以,又将这一过程称为结晶。液相向固相的转变是一个十分复杂的相变过程。结晶后所形成的组织,如晶粒形状、大小和分布,将大大地影响金属的加工性能和使用性能。因此,结晶也是一个十分重要的过程。

图 1-11 为纯金属结晶时的冷却曲线示意图。可见金属在结晶之前,温度连续下降,当液态金属冷却至熔点 T_m (理论结晶温度)时,并不开始结晶,而是需要继续冷却到 T_n 以下某一温度 T_n , 液态金属才开始结晶。金属的实际结晶温度 T_n 与理论结晶温度 T_m 之差称为过冷度,用 ΔT 表示, $\Delta T = T_m - T_n$ 。过冷度越大,则实际结晶温度越低。

金属结晶时从液相转变为固相是放热反应过程,放出热量。而从固相变为液相则为吸热反应过程,吸收热量。前者称为结晶潜热,后者称为熔化潜热。当液态金属冷到 T_n 时,由于结晶潜热的释放,补偿了散失到周围环境的热量,所以在冷却曲线上出现平台。平台延续的时间就是结晶过程所用的时间。结晶过程结束,结晶潜热释放完毕,冷却曲线便又继续下降。所以冷却曲线上的第一转折点对应着结晶过程的开始,第二转折点则对应结晶过程的结束。

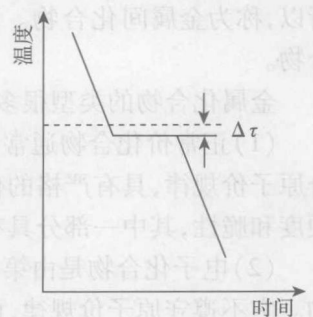


图 1-11 纯金属结晶时的冷却曲线示意图

(一) 纯金属的结晶过程

研究发现,结晶过程是由形核与长大两个过程所组成。结晶时,首先在液体中形成具有某一尺寸(临界尺寸)的晶核,然后这些晶核不断凝聚液体中的原子而长大。形核过程和长大过程紧密联系但又有所区别,图 1-12 为纯金属结晶过程示意图。

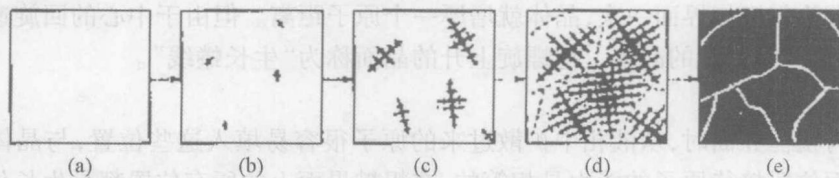


图 1-12 纯金属结晶过程示意图

当液态金属过冷至实际结晶温度时,晶核并未立即形成,而是经过一定时间后才开始出现第一批晶核。结晶开始前的这一停留时间称为孕育期。随着时间的推移,已形成的晶核不断长大,与此同时,液态金属中又产生第二批晶核。依次类推,原有的晶核不断长大,同时又不间断生出新的晶核。液态金属中不断形核,不断长大,液态金属就越来越少,直到各个晶体相互接触,液态金属消耗完毕,结晶过程也就结束。由一个晶核长成的晶体就是一个晶粒。由于各个晶核是随机形成的,其位向各不相同,所以晶粒的位向也不相同,这样就形成一块多晶体金属。如果在结晶过程中,只有一个晶核形成并长大,那么就形成一块单晶体金属。

(二) 晶核的形成

在过冷液体中形成固态晶核有两种方法,一种叫均匀形核,又称均质形核或自发形核。另一种是非均匀形核,又叫异质形核或非自发形核。当液相中各个区域出现新相晶核的概率相同,晶核由液相中的一些原子团直接形成,不受杂质粒子或外来表面的影响,这种形核叫均匀形核。若新相优先在母相某些区域中存在的异质处形核,即依附于液相中的杂质或外来表面形核,则称为非均匀形核。实际金属多是以非均匀形核方式进行结晶的。

晶体熔化后的液态结构是长程无序的,但在短程范围内却存在着不稳定的接近于有序的原子集团,它们此消彼长,出现结构起伏或叫相起伏。当温度降到结晶温度时,这些原子集团就可能成为均匀形核的“胚芽”,称为晶胚,其原子呈晶态的规则排列。这就是晶核。

(三) 晶体的长大

每一个单个晶粒的稳定晶核出现后,晶体马上进行长大。晶体的长大从宏观上看,是晶体的界面向液相逐步推进的过程。但从微观上看,是依靠原子逐个由液相中扩散到晶体表面上,并按晶体点阵规律的要求,逐个占据适当的位置而与晶体稳定、牢靠地结合起来的。由于固-液界面的微观结构不同,因此,其接纳液相中迁移过来的原子能力也不同。所以,晶体长大机制也不同。晶体长大机制主要有:二维晶核长大、螺旋位错长大和垂直长大。

1. 二维晶核长大机制

当固-液界面为光滑界面时,为了使整个体系的自由能下降,只有具有一定大小的原子集团几乎同时降落到光滑界面上形成具有一个原子厚度并有一定宽度的平面原子集团,才能使晶粒长大,并形成一个大于临界晶核半径的晶核,此晶核即为二维晶核。二维晶核形成后,它的四周就出现了台阶,后迁移来的液相原子一个个填充到这些台阶处,直到整个界面铺满了一层原子后又变成了光滑界面,这时又必须重新进行二维晶核的形成并再次长大。

2. 螺旋位错长大机制

当光滑界面出现螺型位错露头时,露头处存在台阶,这时液相原子一个个地堆砌到这些台