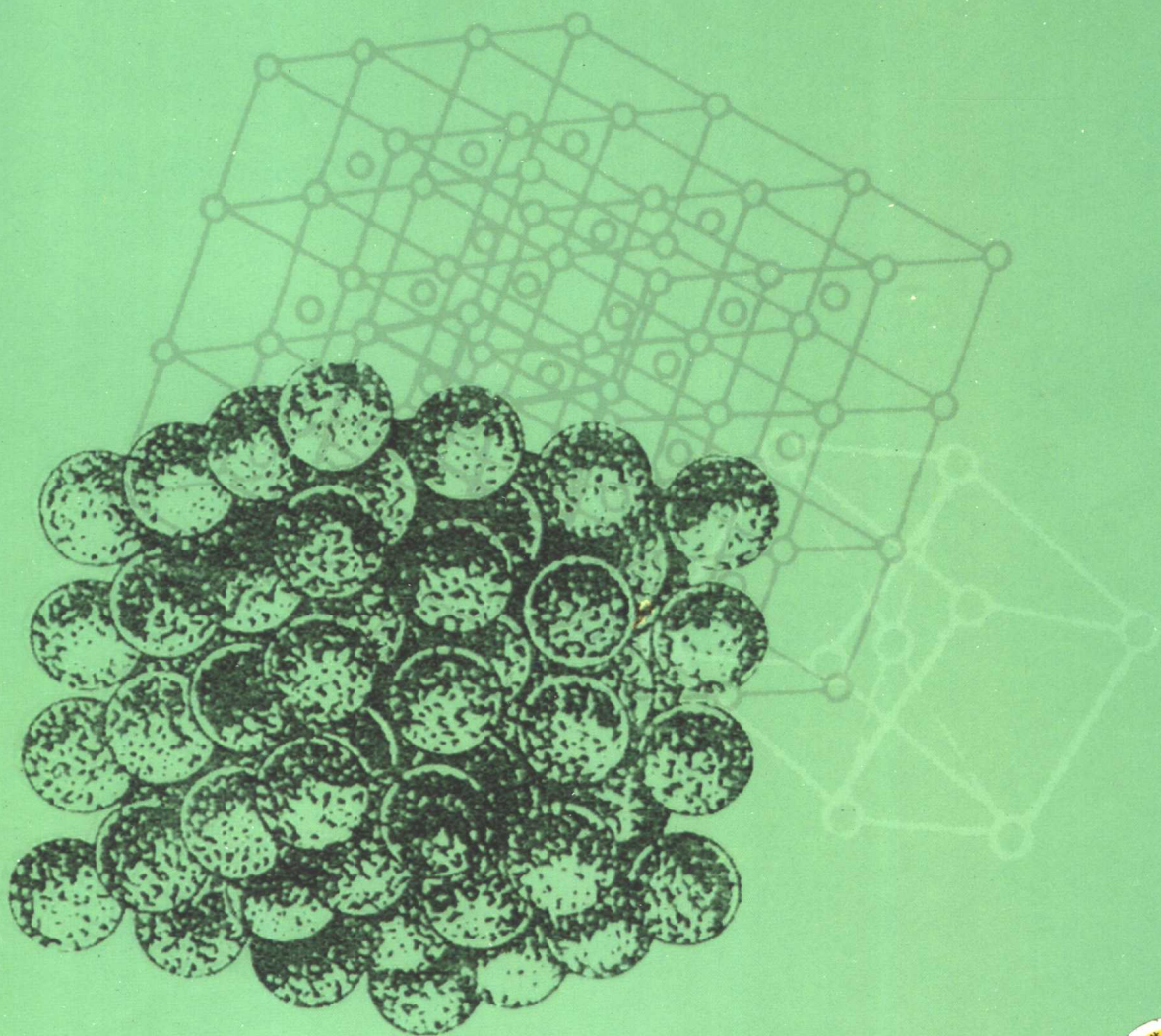


高职高专规划教材

金属学与热处理

国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会 组编
丁建生 主编



高职高专规划教材

金属学与热处理

国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会 组编

主 编 丁建生

副主编 苏海清

参 编 张万涛 李清禄 曹瑜强

肖 峰 赵旭春 华东升

主 审 杨 川



机械工业出版社

本书是为机械类热加工专业编写的一本新教材。全书共分为四大部分：第一部分为金属学，包括金属的晶体结构、纯金属的结晶、二元合金的相结构与结晶、铁碳合金、三元合金相图、金属塑性变形与再结晶；第二部分为钢的热处理；第三部分为金属材料，包括合金钢、铸铁、非铁合金；第四部分为实验指导书，包括6个实验。

本教材所用标准新，深度适宜，文字简洁流畅，深入浅出，注重工程应用，强调职业特色。适用于职业技术学院、成人高校、普通中专、成人中专等热加工类专业学生使用，也可供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属学与热处理/丁建生主编. —北京：机械工业出版社，2004.1
高职高专规划教材
ISBN 7-111-13560-1

I. 金... II. 丁... III. ①金属学—高等学校：技术学校—教材②热处理—高等学校：技术学校—教材 IV. TG1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 112269 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：张祖凤

责任编辑：何月秋 崔世荣 版式设计：张世琴 责任校对：张 媛

封面设计：陈 沛 责任印制：路 琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm $1/16$ ·15.25 印张·373 千字

定价：21.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

根据全国机械职业教育专业教学指导委员会关于“深化高等职业技术教育人才的改革,加强高职教材建设”的精神,结合市场需要,于2002年8月我们与机械工业出版社共同邀请了全国十几所开办焊接专业的高职院校召开了这套教材的启动会,在会上大家就焊接专业的课程体系、教材的编写目的和要求、教材书目,以及编写人员的分工进行了研讨,最终达成共识。

高等职业技术教育是我国高等教育的重要组成部分,是培养适应生产、建设、管理、服务于第一线需要的高等技术应用性专门人才的摇篮。高职学生应具有基础理论知识适度、技术应用能力强、知识面较宽、素质高等特点。我们应以“应用”为主旨和特征构建课程和教学内容体系,突出应用性、实践性的原则重组课程结构、更新教学内容。高职教学内容要突出基础理论知识的应用和实践能力的培养,基础理论教学要以应用为目的,以“必需、够用”为度;专业课教学要加强针对性和实用性。在此共识的基础上,我们组织广西机电职业技术学院、内蒙古工业大学、内蒙古机电职业技术学院、四川工程职业技术学院、包头职业技术学院、承德石油高等专科学校、沈阳职业技术学院、陕西工业职业技术学院、渤海船舶职业技术学院、湖南张家界航空工业职业技术学院、新疆机电职业技术学院等十余所高职院校编写了这套高职高专焊接专业规划教材。此套教材首批包括:《金属学与热处理》、《焊接结构生产》、《焊接方法与设备》、《焊接生产管理与检测》、《金属熔焊原理》、《金属材料焊接》、《焊接技能实训》、《热加工专业英语》。

本套教材根据2001年国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会和2002年4月、8月的高职高专焊接专业规划教材的专题会议精神,于2002年4月成立了教材编写委员会,2003年年初由各教材的主编、主审统稿,并进行初审,同年8月聘请了西南交通大学、内蒙古工业大学、沈阳工业大学、四川工程职业技术学院等院校的专家教授对此套教材进行了全面审核、定稿。

本套教材的编写以突出应用性、实践性的原则重组课程结构,破除原有各种课程的学科化倾向,删除与岗位群职业能力关系不大的内容,增加与职业能力关系有关的新技术、新工艺、新设备、新材料。课程内容紧紧扣住培养学生现场工艺实施的职业能力来阐述,将必需的理论知识点溶于能力培养过程中,注重实践教学,注重操作技能培养。本套教材深度适宜,文字简洁、流畅,深入浅出,非常适合高职学生学习。为与国际接轨,体现教材的先进性,本套教材采用了最新国家标准和国家施行的国际单位制。

本套教材在编写和审稿过程中,得到了各参编参审学校和许多兄弟院校领导及同仁的大力支持与热情帮助,在此一并表示衷心的感谢。

国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会

编者的话

本教材是根据国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会的要求,组织部分高职高专院校长期从事金属学与热处理教学的教师,总结近几年教学经验,结合高职教育特色编写而成的。全书规定为4~5学分,它是高职高专热加工类专业的专业基础教材。本书从2001年开始筹划,2002年8月通过了编写提纲,2003年通过了全书初稿的审查,并定于2004年春季作为规划教材出版。

本书以合金的成分为基础,合金的组织为主线,性能为关键,主要阐述合金的成分、组织、性能之间的关系及其变化规律;合金的成分、组织、性能与加工处理条件之间的关系。根据职业技术教育的特点,强调重要的概念,降低理论深度、难度,注重分析实用结果,加强针对性;采用最新国家标准和名词术语;注意追踪新技术、新材料、新工艺。全书共有10章、6个实验指导书,主要内容有:金属、合金的结构与结晶规律及其相应组织、性能;基本类型相图及其特征,金属的塑性变形与再结晶,钢的热处理;常用金属材料、非铁合金以及实验指导书等。

本书的第一、六章由华东升编写,第二、十章由赵旭春编写,第三、五章由丁建生编写,第四章第一~五节由李清录编写,第七章由苏海清编写,第八章和第四章的第六节由肖峰编写,第九章由曹瑜强编写,实验指导书由张万涛编写。全书由丁建生任主编,苏海清任副主编,由杨川教授任主审。

在教材编写过程中,借鉴和参考了有关金属学、热处理和其他学科书籍的内容,并汲取了许多精萃,在此谨向原作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,经验不多,书中难免有缺点和错误,敬请读者批评指正。

编者

目 录

前言

编者的话

第一章 金属的晶体结构 1

第一节 金属 1

一、金属的特性 1

二、金属的原子结构特点 1

三、金属原子间的结合方式(金属键) ... 2

第二节 金属的晶体结构 2

一、晶体的基本概念 2

二、金属的典型晶格 4

三、典型晶格的其他参数 5

四、不同晶面和晶向原子排列的差异 8

五、晶体的各向异性 9

第三节 金属的实际晶体结构 10

一、点缺陷 10

二、线缺陷 11

三、面缺陷 13

思考题与练习题 14

第二章 纯金属的结晶 15

第一节 金属结晶的现象 15

一、金属结晶的过冷现象 15

二、纯金属的结晶过程 16

第二节 金属结晶的条件 16

一、金属结晶的能量条件 16

二、金属结晶的结构条件 17

第三节 形核的规律 18

一、自发形核(均质形核) 18

二、非自发形核(异质形核) 20

第四节 晶核长大的规律 20

一、晶核长大的机理 20

二、晶核长大的方式 21

第五节 晶粒大小的控制 23

一、晶粒大小对性能的影响 23

二、影响晶粒大小的因素 23

三、控制晶粒大小的方法 24

思考题与练习题 24

第三章 二元合金的相结构与结晶 26

第一节 基本概念 26

第二节 合金的相结构 27

一、固溶体 27

二、金属化合物 30

三、机械混合物 31

第三节 二元合金相图的建立 31

一、二元合金相图的表示方法 32

二、二元合金相图的测定方法 32

第四节 二元匀晶相图 33

一、相图分析 33

二、固溶体的平衡结晶及其组织 34

三、杠杆定律的应用 35

四、固溶体的不平衡结晶及其组织 36

五、固溶体合金的性能和相图的关系 38

第五节 共晶相图 39

一、相图分析 39

二、典型合金的平衡结晶及其组织 40

三、初晶和共晶组织的形态 42

四、共晶合金性能与成分的关系 43

第六节 包晶相图 45

一、相图分析 45

二、典型合金的平衡结晶及其组织 46

第七节 其他类型的相图 48

一、形成金属间化合物的相图 48

二、具有固态相变的相图 49

第八节 二元合金相图的分析法 50

一、二元合金相图的分析方法 50

二、复杂二元合金相图的分析举例 51

思考题与练习题 52

第四章 铁碳合金	53	第五章 三元合金相图	82
第一节 铁碳合金的组元及其基		第一节 三元合金相图基础	82
本相	53	第二节 三元匀晶相图	84
一、金属的同素异构转变	53	一、相图分析	84
二、铁碳合金的基本相	54	二、等温截面图	84
第二节 Fe—Fe₃C 合金相图分析	56	三、变温截面图	84
一、铁碳合金相图中的特性点	57	第三节 三元共晶相图	85
二、铁碳合金相图中的特性线	58	一、相图分析	86
三、铁碳合金相图中的相区	59	二、等温截面图	87
第三节 典型合金的结晶过程及		三、变温截面图	87
其组织	60	思考题与练习题	89
一、工业纯铁的结晶过程及组织转变	60	第六章 金属塑性变形与再结晶	90
二、共析钢的结晶过程及组织转变	61	第一节 金属的塑性变形	90
三、亚共析钢的结晶过程及组织转		一、单晶体的塑性变形	91
变	62	二、多晶体的塑性变形	94
四、过共析钢的结晶过程及组织转		三、合金的塑性变形	96
变	64	四、塑性变形对金属组织和性能的	
五、共晶白口铸铁的结晶过程及组		影响	97
织转变	64	第二节 冷变形金属在加热时的	
六、亚共晶白口铸铁的结晶过程及		变化	99
组织转变	65	一、回复	99
七、过共晶白口铸铁的结晶过程及		二、再结晶	100
组织转变	66	三、晶粒长大	101
第四节 含碳量对铁碳合金平衡		第三节 热变形加工特点及组织	
组织和性能的影响	67	和性能的变化	102
一、含碳量对平衡组织的影响	67	一、压力加工时变形的分类	102
二、含碳量对性能的影响	68	二、热变形加工及其优缺点	102
第五节 铁—碳合金相图的应用	69	三、热变形加工时组织和性能的变化	103
一、在选材方面的应用	69	思考题与练习题	104
二、在铸造生产方面的应用	69	第七章 钢的热处理	105
三、在压力加工工艺方面的应用	69	第一节 钢在加热时的转变（奥氏	
四、在热处理方面的应用	70	体化）	105
五、在焊接工艺方面的应用	70	一、奥氏体的形成过程	106
第六节 碳素钢	70	二、奥氏体晶粒的长大及其影响因素	106
一、钢中杂质元素对钢性能的影响	70	第二节 钢在冷却时的转变	108
二、碳素钢的分类	72	一、过冷奥氏体的等温冷却转变	108
三、我国钢铁产品牌号表示方法及		二、过冷奥氏体的连续冷却转变	111
原则	73	三、连续冷却转变图与等温冷却转	
四、碳素钢的牌号、性能和用途	74		
思考题与练习题	80		

变图的比较和应用	113	第九章 铸铁	165
第三节 钢的普通热处理	113	第一节 铸铁的石墨化过程	165
一、钢的退火	113	一、铁—碳合金双重相图及石墨化过 程	165
二、钢的正火	115	二、铸铁的分类	167
三、钢的淬火	115	第二节 灰铸铁	168
四、钢的淬透性	118	一、灰铸铁的化学成分、组织和性能	168
五、钢的回火	119	二、影响灰铸铁组织与性能的因素	171
第四节 钢的表面淬火与化学热 处理	120	三、灰铸铁的孕育处理	173
一、钢的表面淬火	121	四、灰铸铁的热处理	173
二、钢的化学热处理	122	第三节 球墨铸铁	174
第五节 热处理新技术简介	123	一、球墨铸铁的化学成分、组织、性 能及用途	174
第六节 热处理与其他冷、热加 工工艺的关系	124	三、球墨铸铁的热处理	176
一、热处理的技术条件	125	第四节 蠕墨铸铁	178
二、热处理工序位置的确定	126	一、蠕墨铸铁的金相组织特点	178
三、常见热处理缺陷及其预防	127	二、蠕墨铸铁的性能特点	179
四、热处理零件结构的工艺性	128	第五节 可锻铸铁	180
思考题与练习题	129	一、可锻铸铁的成分、组织	180
第八章 合金钢	130	二、可锻铸铁的性能及用途	181
第一节 合金元素在钢中的作用	130	第六节 特殊性能铸铁	182
一、合金钢的分类	130	一、耐磨铸铁	182
二、合金元素在钢中的作用	131	二、耐热铸铁	183
第二节 合金结构钢	137	三、耐蚀铸铁	184
一、低合金高强度结构钢	137	思考题与练习题	185
二、合金结构钢	140	第十章 非铁合金	186
三、高耐候性结构钢和焊接结构用 耐候钢	143	第一节 铝及其合金	186
四、易切削结构钢	144	一、工业纯铝	186
五、表面硬化钢	146	二、铝合金概述	186
六、弹簧钢	148	第二节 铜及其合金	192
七、滚动轴承钢	149	一、工业纯铜	192
第三节 合金工具钢	150	二、黄铜	192
一、刃具钢	150	三、青铜	194
二、模具钢	153	第三节 滑动轴承合金	197
三、量具钢	155	一、轴承合金的工作条件及要求	197
第四节 特殊钢	156	二、常用的轴承合金	198
一、不锈钢	156	第四节 其他非铁合金	199
二、耐热钢及耐热合金	160	一、钛及其合金	199
三、耐磨钢	163	二、镁及其合金	200
思考题与练习题	163		

三、锌及其合金	200
第五节 新材料介绍	201
一、新型结构材料	201
二、新型功能材料	202
三、材料科学技术的若干热点	203
思考题与练习题	204
实验指导书	205

实验一 盐类结晶过程的观察	205
实验二 显微试样的制备	207
实验三 铁—碳合金平衡组织的观察	215
实验四 钢的热处理	220
实验五 钢的不平衡组织观察	224
实验六 铸铁及非铁合金组织观察	227
参考文献	233

第一章 金属的晶体结构

第一节 金 属

一、金属的特性

对于金属，大家都很熟悉，像铁、铜、锡、铝等都是金属。在已发现的 100 余种元素中，金属元素约占 3/4。常温下，除了汞（水银）为液态外，其余均为固态。

在固态下，金属有许多与非金属不同的特性，主要表现在：不透明；有特殊光泽；有可锻性；有良好的导电性和导热性；且具有正的电阻温度系数等。所谓正的电阻温度系数，是指金属具有电阻随温度的升高而增大这一特点。而非金属的电阻随温度升高而减小，即具有负的电阻温度系数。金属和非金属的电阻与温度的关系，如图 1-1 所示。事实证明，金属锑是不可锻的，其粉末也无金属光泽；金属铋和锰的导电性与非金属碳的导电性又相差甚微。但是从电阻与温度的关系上，却可以把金属和非金属从根本上区别开来。这已成为鉴定金属和非金属的依据。

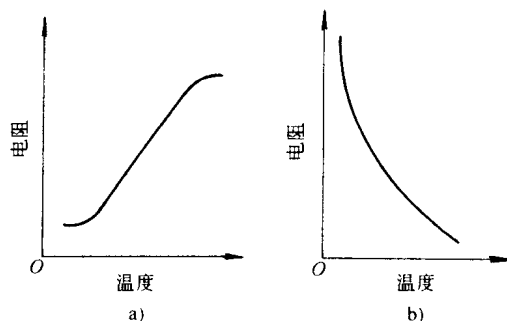


图 1-1 金属和非金属的电阻与温度间关系示意图
a) 金属 b) 非金属

金属的上述特性，是由金属原子的结构特点和原子结合方式决定的。

二、金属的原子结构特点

根据近代原子构造理论，各种元素的原子都是由原子核和围绕原子核运动的电子构成的，而且每个电子都在原子核外一定的轨道上运动，形成不同的电子层。电子数等于该元素的原子序数，并且其原子核所带正电荷数与其电子所带负电荷数相等，所以原子是电中性。

在各种元素的原子结构中，最外层的电子（价电子）数目决定了该元素的主要物理和化学性能。金属原子结构特点是它们的最外层电子数很少，一般只有 1~2 个，而且这些外层电子与原子核的结合力较弱，很容易脱离所属原子核的束缚，成为能绕该金属所有原子核运动的电子，这种电子称为自由电子。金属原子失去外层电子而成为正离子。这些正离子（亦可能还有少数原子）按一定的几何规律排列起来，并以一定的平衡位置为中心作三维热振动。所有的自由电子在各离子之间自由运动，形成所谓的“电子云”。

由于金属原子结构的这一特点，决定了金属原子间的结合方式。

三、金属原子间的结合方式（金属键）

当大量金属原子结合在一起而构成金属晶体时，绝大部分金属原子都将失去其价电子而成为正离子，脱离原子核束缚的自由电子，在各正离子间自由运动，自由电子在某瞬间也可能和某些正离子结合为中性原子，所以实际的固体金属并不是所有都变成正离子，而是绝大部分原子处于离子状态。

金属晶体正是依靠各正离子和自由电子间的相互作用（吸力和斥力平衡），使金属原子间结合起来，这种结合方式就是金属键。金属键的示意图如图 1-2 所示。

根据金属键，就可以解释金属的一些主要特性。

金属具有不透明性和金属光泽。是因为金属中的自由电子能吸收可见光的能量，所以即使是很薄的金属片也是不透明的。吸收可见光的能量而激发到较高能级上的电子，处于不稳定状态，当它重新跳回到低能级时，又把吸收的可见光能量以电磁波的形式辐射出来，使金属具有特殊光泽。

金属具有良好的可锻性。由金属键结合的晶体中，金属正离子周围都充满着自由电子，在各个方向上结合力相同，即金属键没有方向性；而且，金属键相互结合时，又不受价电子数目的限制，所以金属键没有饱和性。因此金属在一定外力作用下，两层相邻的正离子之间发生了相对位移，位移后的两层正离子之间，仍能依靠与自由电子的相互作用力而结合在一起，即始终保持着金属键的结合方式，宏观上显示出良好的可锻性。

金属具有良好的导电性。是由于金属中的自由电子在外加电场的作用下，沿着电场方向作定向加速运动而成为电子流，所以金属具有良好的导电性。

金属具有良好的导热性。是因为金属除了依靠正离子振动传递热能外，其自由电子从高温区向低温区的运动也能传递热能，而非金属无自由电子传递热量，故金属要比非金属的导热性好。

金属具有正的电阻温度系数。当金属温度升高时，正离子的三维热振动的频率和振幅增大，自由电子定向运动的阻力增加，电阻升高。所以，金属的电阻随温度的升高而增大，即金属具有正的电阻温度系数。

总之，金属的主要特性及其晶体结构特点，都是和金属键这种结合方式密切相关的。

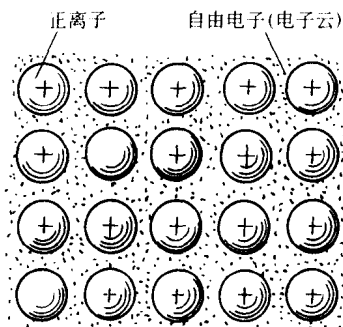


图 1-2 金属键示意图

第二节 金属的晶体结构

金属的晶体结构，即是指金属原子排列的规律性及其特征。研究金属的晶体结构，有助于从本质上揭示金属的性能。

一、晶体的基本概念

1. 晶体与非晶体

自然界中的一切固态物质，根据其内部原子或分子的聚集状态，可分为晶体和非晶体两

大类。总的来说,凡是内部原子或分子在三维空间内,按照一定几何规律作周期性的重复排列的物质称为晶体。如雪花、食盐、固态金属等都是晶体。凡是内部原子或分子呈无规则堆积的物质称为非晶体。如普通玻璃、松香、赛璐珞等,均为非晶体。两者的定义,即阐明了两者的根本区别。

晶体具有下列特点:

(1) 具有规则的外形 晶体在一般情况下应具有规则的外形,如天然金刚石、水晶、食盐等。但有时外形也不一定是规则的,这与晶体的形成条件有关。所以不能仅从外形来判断是否是晶体,而应该从其内部原子或分子的排列情况来确定。

(2) 具有固定的熔点 任何一种晶体物质,当加热到一定温度,就要熔化。各种晶体物质,都有各自的熔点。例如:铁的熔点为 1538°C ;铜的熔点为 1084.5°C ;铝的熔点为 660.4°C 等。而非晶体则没有固定的熔点。

(3) 具有各向异性 在同一种晶体物质的不同方向上具有不同的性能,称为各向异性。而非晶体是各向同性的。

(4) 晶体与晶体性能差异很大 晶体即使是由相同元素组成的,如其排列方式不同,即晶体结构不同,它们的性能往往也有很大差异。如金刚石和石墨,虽然都是由碳原子组成的,可是由于两者的原子排列方式不同,它们的性能却相差很大。金刚石很硬,而石墨却很软。

晶体和非晶体虽然有上述的区别,但在一定条件下也是可以相互转化的。如非晶体玻璃在高温下,长时间加热可以变为晶态玻璃,即钢化玻璃。而有些金属如从液态快速冷却,也可以制成非晶态金属。和晶态金属相比,非晶态金属有很高的强度和韧性等。

2. 晶格

为了便于描述和理解晶体中原子(严格说应是正离子)在三维空间排列的规律性,可以近似地把原子看成是处在其振动中心固定不动的刚性小球,在三维空间有规则的排列而没有缺陷,此时不再分成正离子和自由电子来分析了,如图 1-3 所示。此图虽然直观易懂,但不易看清内部原子排列的规律性。为此,通常把刚性小球抽象为几何的点,这些点称为结点或阵点。如果把这些点用平行直线连接起来,就构成几何空间格架,各原子振动中心就在空间格架的结点上。这种抽象地用于描述原子在晶体中排列方式的空间格架,就称为结晶格子,简称晶格,如图 1-4a 所示。

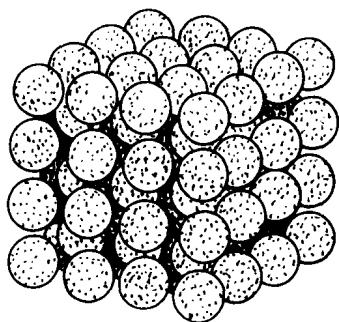


图 1-3 金属原子排列的模型

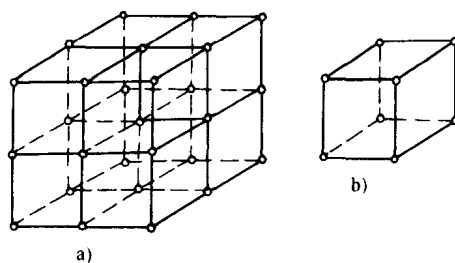


图 1-4 晶格和晶胞

a) 晶格 b) 晶胞

显然,某一晶格中的各结点在空间的位置是一定的,而通过结点所作的空间格架(即晶格),则因直线的取向不同可有多种形式。因此,必须强调指出:结点是构成晶格的基本要

素。

3. 晶胞

为了便于说明原子在空间排列的特点, 根据晶体中原子排列规律性和周期性的特点, 通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, 以表示晶格中原子排列的规律性。这个最小几何单元就称为晶胞, 如图 1-4b 所示。不难看出, 整个晶格实际上是由许多大小、形状和位向都相同的晶胞在三维空间重复堆积而成的。

4. 晶格参数

为了研究晶体结构, 通常取晶胞角上的某一结点作为原点, 沿其三条棱边作三个坐标轴 X 、 Y 、 Z , 且称为晶轴。规定坐标原点的前、右和上方为轴的正方向, 反之为负方向。而且常以晶胞棱边的长度 a 、 b 、 c 和棱边之间夹角 α 、 β 、 γ 等六个参数作为晶格参数, 表示晶胞的几何形状和大小, 如图 1-5 所示。其中 a 、 b 、 c 称为晶格常数, 单位为 10^{-10}m 。而 α 、 β 、 γ 称为晶轴间夹角, 单位为度 ($^{\circ}$)。

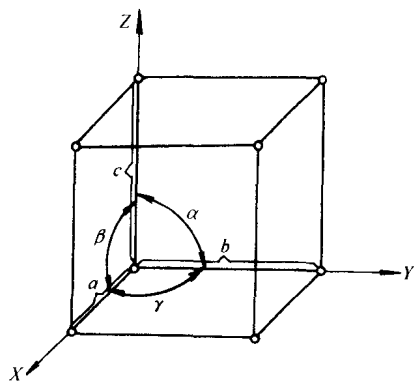


图 1-5 晶格参数表示法

二、金属的典型晶格

由于金属原子的结合方式, 使金属晶体中的原子呈现规则而紧密的排列。因此, 在各种金属元素中, 除少数金属具有复杂的晶格外, 大多数金属都具有简单的晶格。如体心立方、面心立方和密排六方晶格等类型。

1. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞是一个立方体, 如图 1-6 所示。晶格常数 $a = b = c$, 晶轴间夹角 $\alpha = \beta = \gamma = 90^{\circ}$, 所以通常只用一个晶格常数 a 表示即可。在体心立方晶胞的八个顶角和立方体的中心各有一个原子。

具有体心立方晶格的常见金属有 $\alpha\text{-Fe}$ (铁)、 Cr (铬)、 Mo (钼)、 W (钨)、 V (钒)、 Nb (铌) 等。

2. 面心立方晶格

它的晶胞也是一个立方体, 如图 1-7 所示。晶格常数也只用一个常数 a 表示。在面心立方晶胞的八个顶角和六个面的中心各有一个原子。

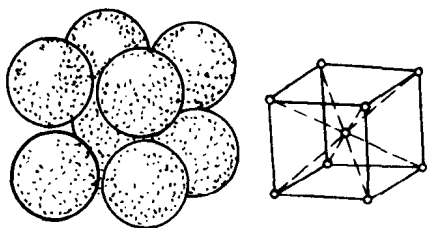


图 1-6 体心立方晶胞

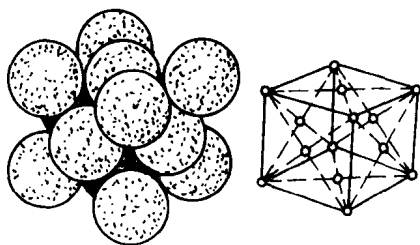


图 1-7 面心立方晶胞

具有面心立方晶格的常见金属有 γ -Fe (铁)、Al (铝)、Cu (铜)、Ni (镍)、Au (金)、Ag (银) 和 Pb (铅) 等。

3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞是一个正六棱柱体, 如图 1-8 所示。正六棱柱体是由六个长方形的侧面和与侧面相垂直的两个等六边形的底面构成的, 因此需要用两个晶格常数来表示, 即正六棱柱体底面的边长 a 和柱体的高度 c 来表示。

在密排六方晶胞中, 除了正六棱柱体的十二个顶角和上下两底面中心各有一个原子外, 在柱体中间还有三个原子。

具有密排六方晶格的常见金属有 Mg (镁)、Zn (锌)、Cd (镉)、Be (铍) 等。

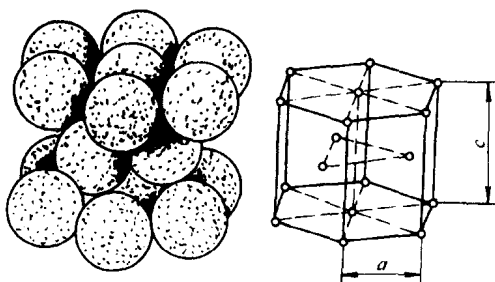


图 1-8 密排六方晶胞

三、典型晶格的其他参数

除用晶格常数和晶轴间夹角表示晶胞特征外, 还用晶胞的原子数、原子半径、配位数和致密度等来表示。

1. 晶胞的原子数

(1) 体心立方晶格 由于晶格是由许多晶胞重复堆积而成的, 因此体心立方晶胞八个顶角上的每个原子, 都是与其相邻的八个晶胞所共有的, 每个晶胞实际上只占有 $1/8$ 个原子, 而立方体中心的原子却为每个晶胞所独有, 如图 1-9a 所示。所以, 每个体心立方晶胞的原子数为

$$1/8 \times 8 + 1 = 2$$

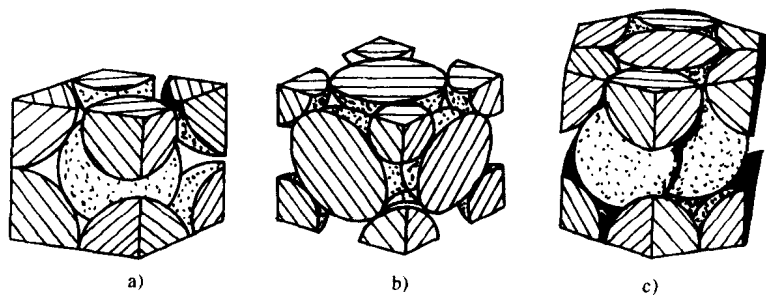


图 1-9 三种典型晶胞的原子数计算示意图

(2) 面心立方晶格 与体心立方晶格一样, 其晶胞顶角上的每个原子也同时由相邻的八个晶胞所共有, 而六个面心原子却同时由与该面相邻的两个晶胞所共有, 如图 1-9b 所示。所以, 面心立方晶胞的原子数为

$$1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$$

(3) 密排六方晶格 密排六方晶胞中十二个角上的每个原子, 都是由六个相邻晶胞所共有, 上下底面中心的原子, 都是由相邻两个晶胞所共有, 只有正六棱柱体中间的三个原子为

每个晶胞所独有，如图 1-9c 所示。所以，密排六方晶胞的原子数为

$$1/6 \times 12 + 1/2 \times 2 + 3 = 6$$

2. 原子半径 如果将晶体中的金属原子近似地看成是具有一定大小的刚性球，则原子半径可以认为是相互接触的两原子中心距离之半。据此，就不难根据晶格常数的数据推算出原子半径。

(1) 体心立方晶格 在体心立方晶胞中，只有立方体对角线上的原子是相互接触的。因此，原子半径 r 和晶格常数 a 的关系，可以根据图 1-10a 所示的几何关系中求出

$$r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$$

(2) 面心立方晶格 在面心立方晶胞中，只有面对角线上的原子是相互接触的。因此，其原子半径 r 和晶格常数 a 的关系，可以根据图 1-10b 所示的几何关系中求出

$$r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$$

(3) 密排六方晶格 在密排六方晶胞中，若底面上原子间距离为 a ，正六棱柱体的高度为 c ，则底面原子和上下邻近原子之间距离 $2r$ 和晶格常数 a 、 c 的关系，可以从图 1-10c 所示的几何关系中求出。

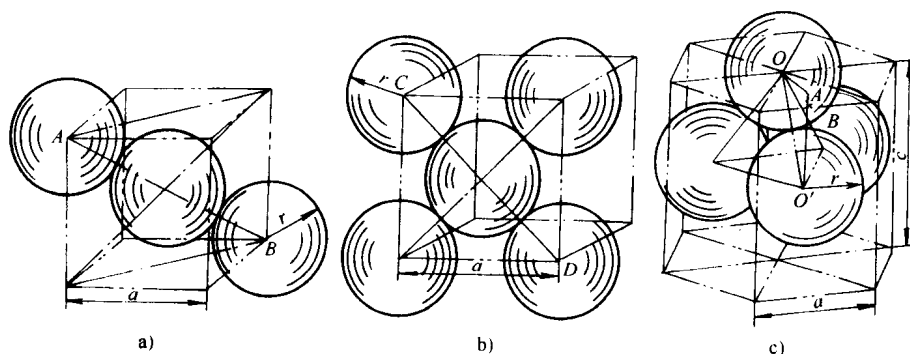


图 1-10 常见三种晶格中原子半径计算示意图

a) 体心立方 b) 面心立方 c) 密排六方

在理想密排的情况下，轴比 $c/a \approx 1.633$ 时， $r = a/2$ ，即底面上原子间距和上下层原子间距相等，无论从哪一间距计算，原子半径都是 $r = a/2$ 。

3. 配位数 为了定性地评定晶体中原子排列的紧密程度，常用配位数来表示。所谓配位数，是指晶格中与任一原子最近邻、等距离的原子数目。显然，配位数越大，晶体中原子排列越紧密。

(1) 体心立方晶格 以立方体中心的原子为参照物来分析，与其最近邻等距离的原子是位于八个顶角上的原子，而其他原子都不与其最近邻，所以体心立方晶格的配位数为 8，如图 1-11a 所示。

(2) 面心立方晶格 以立方体中任意一个面心原子为参照物来分析，与其最近邻等距离的原子，应该是参照原子所在平面的四个顶角原子。但通过这个参照原子中心而相互垂直的平面有三个，而且每个平面上的原子排列和距离都相等，所以与参照原子最近邻等距离的原子数为 12 个，故面心立方晶格的配位数为 12，如图 1-11b 所示。

(3) 密排六方晶格 以六棱柱体底面的中心原子为参照原子来分析, 与其最近邻等距离的原子是其周围六个顶角上的原子, 严格地讲, 其配位数应为 6, 如果考虑到底面上下各有三个次近邻的原子, 配位数可写成 $6+6$ 。对于理想密排六方晶格, 则这十二个原子均与底面中心原子最近邻且等距离, 所以, 理想密排六方晶格的配位数是 12, 如图 1-11c 所示。

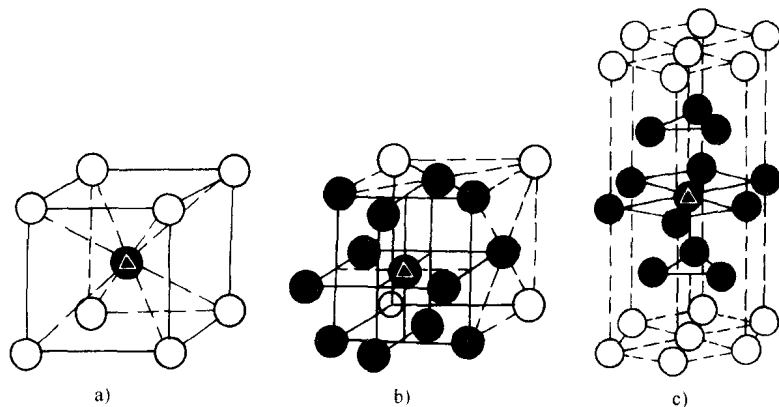


图 1-11 常见三种晶格配位数示意图

a) 体心立方 b) 面心立方 c) 密排六方

4. 致密度

配位数虽然是表示晶体中原子排列紧密程度的参数, 但它只能作定性的评定, 若对晶体中原子排列的紧密程度进行定量比较时, 则要引用致密度这个参数。

致密度是指晶胞中原子所占有的总体积和晶胞体积之比。可用下式表示:

$$K = nU/V$$

式中 K ——晶体的致密度;

n ——一个晶胞实际包含的原子数;

U ——一个原子 (被看成是刚性球) 的体积。其值为 $4/3\pi r^3$ (r 是该原子半径);

V ——一个晶胞的体积。

(1) 体心立方晶格 由于它的 $n=2$, $V=a^3$, $r=\frac{\sqrt{3}}{4}a$ 。所以体心立方晶格的致密度 $K_{\text{体}}$ 应为

$$K_{\text{体}} = nU/V = 0.68$$

这表明, 体心立方晶格中, 原子占有的体积只有晶胞体积的 68%, 其余 32% 的体积为晶胞中的空隙。可见, 原子是不能将整个晶格体积填满的。

(2) 面心立方晶格 由于它的 $n=4$, $r=\frac{\sqrt{2}}{4}a$, $V=a^3$ 。所以面心立方晶格的致密度 $K_{\text{面}}$ 应为

$$K_{\text{面}} = nU/V = 0.74$$

这表明, 在面心立方晶格中, 原子占有晶胞体积的 74%, 其余 26% 是晶胞中的空隙体积。

(3) 密排六方晶格 同理, 可以计算出理想密排六方晶格的致密度 $K_{\text{六}}$ 为 0.74。

应当指出, 金属在加热或冷却时, 由于配位数或致密度的大小不同, 晶体结构发生变化

将会伴随体积变化,这是导致金属变形或形成裂纹的原因之一,在后续课程的学习和生产实际中经常会遇到,一定要引起高度重视。

为了便于对比,将上述三种典型金属晶体的几个参数归纳成表,见表 1-1。

表 1-1 三种典型金属晶体的几何参数

晶格类型	原子个数	原子半径	配位数	致密度
体心立方	2	$\frac{\sqrt{3}}{4}a$	8	0.68
面心立方	4	$\frac{\sqrt{2}}{4}a$	12	0.74
理想密排六方	6	$1/2$	12	0.74

四、不同晶面和晶向原子排列的差异

理想密排六方晶格和面心立方晶格的配位数、致密度虽然相同,可是这两种类型的晶体,在某些性能上却存在着明显的差别。如具有面心立方晶格的铝(Al)、铜(Cu)、银(Ag)及高温下的铁(Fe)等金属的塑性都很好,而具有密排六方晶格的镁(Mg)、锌(Zn)的塑性则较差。这主要是和晶体的不同晶面和晶向上的原子排列方式、原子密度和原子间结合力大小有关。例如,在图 1-12 中,两个画有影线的晶面上原子排列情况是不同的,在 Oa 、 Ob 、 Oc 三个晶向上,原子的线密度也是不同的。

在晶格中,通过一系列原子中心所构成的平面称为晶面。通过任意两个原子中心并指示出方向的直线,称为晶向,晶向能代表晶体中一个原子列在空间的位向。

为了便于对各种晶面和晶向进行分析,有必要给予它们一定的符号加以区别。标志晶面的符号叫晶面指数,标志晶向的符号叫晶向指数。由于晶面和晶向指数的确定较为复杂,在此通过图形分析不同晶面和晶向原子排列的差异。

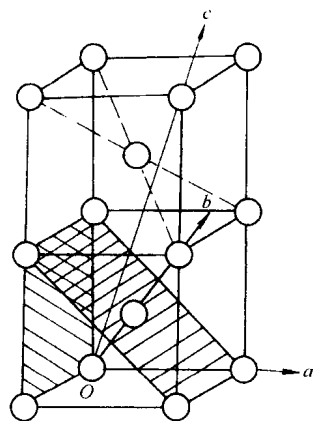


图 1-12 晶体中不同晶面和晶向上原子排列示意图

1. 立方晶格的晶面

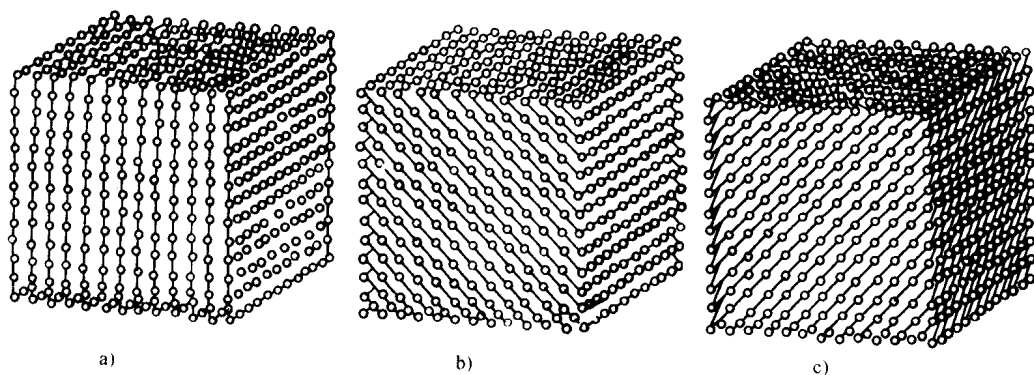


图 1-13 几种不同方位的晶面示意图