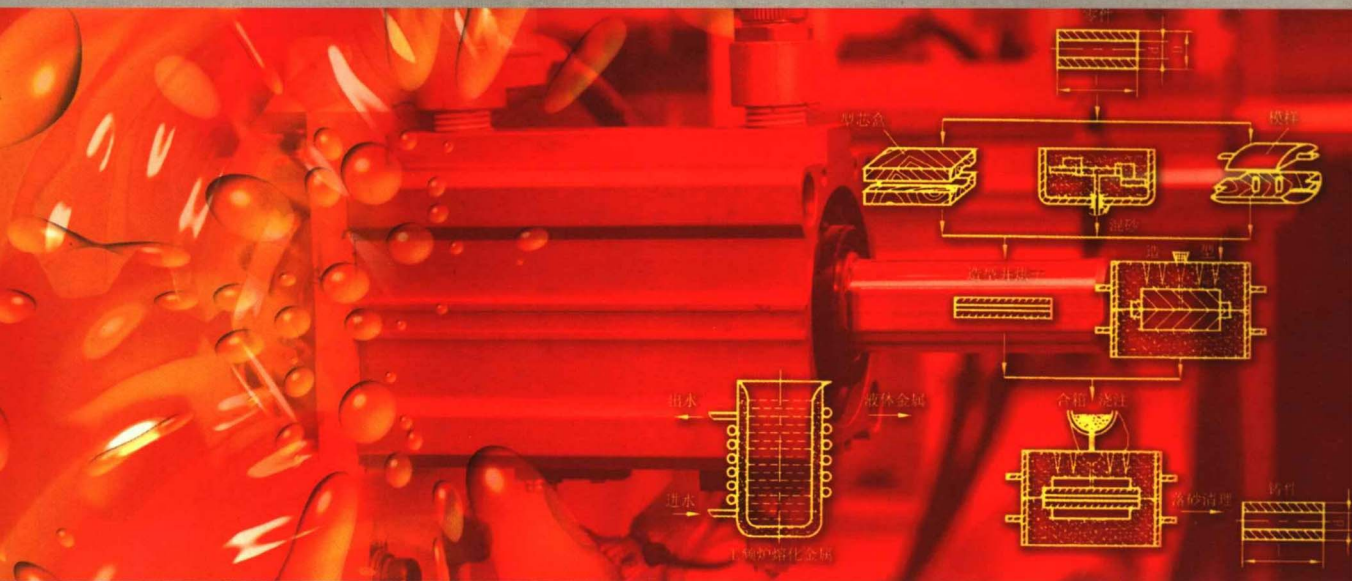


21

21 世纪全国高校应用人才培养机械类规划教材



# 工程材料 与热成型工艺

梁红英 梁红玉 编著



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

TB3  
121

21 世纪全国高校应用人才培养机械类规划教材

# 工程材料与热成型工艺

梁红英 梁红玉 编著



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书是根据对应用型人才教育的基本要求编写的教材,全书共分两部分。第一部分为工程材料,分为9章,主要介绍金属与合金的晶体结构、合金的结晶与二元相图、铁碳合金相图、钢的热处理及工程上应用的各种材料:金属材料如钢、铸铁、有色金属及其合金;高分子材料;陶瓷材料;复合材料及新型材料。第二部分为热成型工艺,介绍了常用工程材料的主要热成型工艺,包括铸造、塑性成型加工、焊接等。

本教材可作为各类普通本科院校及职业技术学院机械类和近机类专业的教材,也可供一般技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程材料与热成型工艺/梁红英,梁红玉编著. —北京:北京大学出版社,2005.7  
(21世纪全国高校应用人才培养机械类规划教材)  
ISBN 7-301-09130-3

I. 工… II. ①梁… ②梁… III. ①工程材料—高等学校:技术学校—教材②热加工—高等学校:技术学校—教材 IV. ①TB3 ②TG

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第069430号

书 名: 工程材料与热成型工艺  
著作责任者: 梁红英 梁红玉 编著  
责任编辑: 黄庆生 吕冬明  
标准书号: ISBN 7-301-09130-3/TH·0023  
出 版 者: 北京大学出版社  
地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871  
电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765013  
网 址: <http://cbs.pku.edu.cn>  
电子信箱: [xxjs@pup.pku.edu.cn](mailto:xxjs@pup.pku.edu.cn)  
印 刷 者: 北京飞达印刷有限责任公司  
发 行 者: 北京大学出版社  
经 销 者: 新华书店  
787毫米×1092毫米 16开本 15印张 327千字  
2005年7月第1版 2005年7月第1次印刷  
定 价: 24.00元

# 前 言

《工程材料与热成型工艺》是机械类、近机类专业的一门重要的技术基础课。近年来随着社会和经济的不断发展，对各类型人才的培养提出了更高层次的要求，培养生产、建设、管理、服务第一线的高等技术应用型专门人才是适应时代发展的重要举措。“应用型”人才的培养是现代职业教育最鲜明的特色。本书在编写过程中，充分把握实践和应用的特点，在保证基础知识和基本理论“必需”、“够用”的前提下，去掉了复杂难懂的公式和理论的推导、证明，应用简洁明了的语言给出基本的概念、理论和方法，同时应用了大量的图形、表格加以说明使读者一目了然。在同生产实际结合紧密的章节本书还给出了许多的实例。

本书按知识体系可分为四个部分：金属学、钢的热处理、工程材料、热成型工艺。金属学包括第1章的金属和合金的晶体结构和第2章的铁碳合金相图；第3章为钢的热处理；工程材料部分包括第4、5、6、7、8、9章，主要介绍了工程上常用的金属材料、高分子材料、陶瓷材料、复合材料及新型材料。把前面三个部分简称为“工程材料”。通过这部分内容的学习，希望读者能够运用金属学与热处理的基本知识，认识和了解金属材料的内在特点和规律，并能结合工程材料的内容了解常用材料的成分、性能特点、热处理工艺及其用途，做到正确的选材和合理的制定工艺。第四部分热成型工艺主要包括第10、11、12章，主要介绍常用材料的成型工艺方法，如铸造、塑性成型加工、焊接。通过这部分内容的教学，旨在使读者了解和掌握成型工艺方法的选择。

本书由梁红英，梁红玉担任主编，参加本书编写的有中北大学分校梁红英（第2、3、4、5、10、11章）、梁红玉（第6章）、娄菊红（第1章）、刘嘉（第7、8、9章）和太原高级技校任萱（第12章）。在本书编写过程中娄菊红老师在图形的处理方面作了大量的工作，同时王文平老师、太原理工大学杨永珍博士也提出了宝贵的意见和建议，在此谨向他们表示衷心的感谢！

本书作为一种教材，广泛吸取了国内众多专家学者的研究成果，编写的主要参考书目附后，未及一一注明，在此谨表谢意，并请谅解。由于成书时间仓促，同时限于水平，本书存在着种种不足和缺点，恳切希望得到大家的批评指正。

编 者

2005年3月

# 目 录

<b>第 1 章 金属与合金的晶体结构</b> .....	1
1.1 金属的晶体结构.....	1
1.1.1 晶体与非晶体.....	1
1.1.2 晶格、晶胞和晶格常数.....	1
1.1.3 常见的金属晶体结构.....	2
1.1.4 晶向指数和晶面指数.....	5
1.1.5 晶体的各向异性.....	6
1.2 合金的晶体结构.....	7
1.2.1 基本概念.....	7
1.2.2 合金的相结构.....	7
1.3 实际金属中的晶体缺陷.....	9
1.3.1 点缺陷.....	9
1.3.2 线缺陷.....	10
1.3.3 面缺陷.....	11
1.4 思考题.....	11
<b>第 2 章 铁碳合金相图</b> .....	13
2.1 二元合金相图的建立与杠杆定律.....	13
2.1.1 相图的建立.....	13
2.1.2 基本相图.....	14
2.1.3 杠杆定律.....	15
2.2 铁碳合金.....	15
2.2.1 铁碳合金的基本组元.....	15
2.2.2 铁碳合金的基本相.....	16
2.2.3 铁碳合金相图分析.....	17
2.2.4 铁碳合金的分类.....	19
2.2.5 典型合金的平衡结晶过程及组织.....	19
2.2.6 铁碳合金的含碳量与组织和性能间的关系.....	22

2.2.7	铁碳合金相图的应用.....	23
2.3	思考题.....	24
<b>第3章</b>	<b>钢的热处理.....</b>	<b>25</b>
3.1	钢在加热时的转变.....	26
3.1.1	奥氏体的形成过程.....	26
3.1.2	影响奥氏体化的因素.....	28
3.1.3	奥氏体的晶粒大小及控制.....	28
3.2	钢在冷却时的转变.....	30
3.2.1	冷却方式.....	30
3.2.2	过冷奥氏体的等温转变.....	30
3.2.3	过冷奥氏体连续冷却曲线(CCT图).....	34
3.3	退火与正火.....	36
3.3.1	退火.....	36
3.3.2	正火.....	37
3.4	淬火.....	37
3.4.1	淬火加热温度的选择.....	37
3.4.2	淬火冷却介质.....	38
3.4.3	常用的淬火方法.....	38
3.4.4	钢的淬透性.....	39
3.5	回火.....	42
3.5.1	回火的目的.....	42
3.5.2	淬火钢的回火转变过程及性能变化.....	42
3.5.3	回火脆性.....	43
3.5.4	回火种类.....	44
3.6	表面淬火.....	44
3.6.1	感应加热表面淬火的基本原理.....	44
3.6.2	感应加热表面淬火的分类.....	45
3.6.3	感应加热表面淬火的特点.....	45
3.6.4	感应加热表面淬火用钢.....	45
3.7	化学热处理.....	45
3.7.1	化学热处理的过程.....	46
3.7.2	渗碳.....	46
3.7.3	渗氮.....	48
3.7.4	碳氮共渗.....	48

3.8 热处理技术条件的标注.....	49
3.9 思考题.....	50
<b>第4章 钢</b> .....	<b>51</b>
4.1 杂质元素对钢性能的影响.....	51
4.1.1 锰的影响.....	51
4.1.2 硅的影响.....	51
4.1.3 硫的影响.....	52
4.1.4 磷的影响.....	52
4.2 碳钢.....	52
4.2.1 碳钢的分类.....	52
4.2.2 碳钢的牌号表示方法.....	53
4.2.3 碳素结构钢.....	53
4.2.4 优质碳素结构钢.....	54
4.2.5 碳素工具钢.....	55
4.3 合金钢.....	56
4.3.1 合金元素在钢中的作用.....	57
4.3.2 合金钢的分类.....	60
4.3.3 合金钢牌号的表示方法.....	61
4.3.4 合金结构钢.....	61
4.3.5 合金工具钢.....	70
4.3.6 特殊性能钢.....	75
4.4 思考题.....	78
<b>第5章 铸铁</b> .....	<b>80</b>
5.1 铸铁的石墨化及其分类.....	80
5.1.1 铸铁的石墨化.....	80
5.1.2 铸铁的分类.....	82
5.2 灰铸铁.....	83
5.2.1 灰铸铁的成分、组织及性能.....	83
5.2.2 灰铸铁的孕育处理及热处理.....	84
5.2.3 灰铸铁的牌号及用途.....	84
5.3 球墨铸铁.....	85
5.3.1 球墨铸铁的成分、组织及性能.....	86
5.3.2 球墨铸铁的热处理.....	87

5.3.3	球墨铸铁的牌号及用途.....	88
5.4	可锻铸铁.....	89
5.4.1	可锻铸铁的成分、组织及性能.....	89
5.4.2	可锻铸铁的牌号及用途.....	90
5.5	合金铸铁.....	90
5.5.1	耐磨铸铁.....	90
5.5.2	耐热铸铁.....	91
5.5.3	耐蚀铸铁.....	91
5.6	思考题.....	92
<b>第6章</b>	<b>有色金属及其合金.....</b>	<b>93</b>
6.1	铝及其合金.....	93
6.1.1	工业纯铝.....	93
6.1.2	铝合金的分类.....	93
6.1.3	变形铝合金.....	94
6.1.4	铸造铝合金.....	96
6.2	铜及其合金.....	97
6.2.1	工业纯铜.....	97
6.2.2	铜合金的分类及牌号的表示方法.....	97
6.2.3	黄铜.....	98
6.2.4	青铜.....	99
6.3	钛及其合金.....	101
6.3.1	纯钛.....	101
6.3.2	钛合金.....	102
6.4	镁及其合金.....	103
6.4.1	纯镁.....	103
6.4.2	镁合金.....	103
6.5	滑动轴承合金.....	104
6.5.1	轴承合金.....	105
6.6	思考题.....	106
<b>第7章</b>	<b>高分子材料.....</b>	<b>107</b>
7.1	高分子材料概述.....	107
7.1.1	高分子化合物.....	107
7.1.2	高分子材料的性能特点.....	109



7.2	工程塑料.....	110
7.2.1	塑料的组成.....	110
7.2.2	塑料的分类.....	111
7.2.3	常用的工程塑料及应用.....	111
7.3	橡胶材料.....	114
7.3.1	橡胶的分类和橡胶制品的组成.....	115
7.3.2	常用合成橡胶.....	115
7.4	思考题.....	117
<b>第8章</b>	<b>工程陶瓷材料.....</b>	<b>118</b>
8.1	陶瓷材料概述.....	118
8.1.1	陶瓷的概念.....	118
8.1.2	陶瓷的分类.....	118
8.1.3	陶瓷的组织结构.....	119
8.1.4	陶瓷的性能.....	120
8.1.5	陶瓷的粉体.....	120
8.1.6	陶瓷的制备.....	121
8.2	常用工程陶瓷.....	122
8.2.1	氧化铝陶瓷 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) .....	122
8.2.2	氧化锆陶瓷 ( $\text{ZrO}_2$ ) .....	123
8.2.3	氮化硅陶瓷 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) .....	124
8.2.4	碳化硅陶瓷 ( $\text{SiC}$ ) .....	124
<b>第9章</b>	<b>复合材料及新型材料.....</b>	<b>126</b>
9.1	复合材料.....	126
9.1.1	概述.....	126
9.1.2	复合材料的组成及分类.....	127
9.1.3	复合材料性能的影响因素.....	128
9.1.4	常用复合材料及应用.....	129
9.2	新型材料.....	133
9.2.1	纳米材料.....	133
9.2.2	超导材料.....	134
9.2.3	生物材料.....	135
9.3	思考题.....	136

<b>第 10 章 铸造</b> .....	137
10.1 概述.....	137
10.1.1 铸造的概念.....	137
10.1.2 砂型铸造的生产过程.....	137
10.1.3 铸件的组成.....	137
10.2 砂型的制造.....	139
10.2.1 砂型的性能要求和组成.....	139
10.2.2 造型方法.....	140
10.2.3 造芯.....	150
10.3 金属的浇注工作.....	152
10.3.1 浇注工作.....	152
10.3.2 铸件的落砂和清理.....	153
10.4 铸件工艺图的绘制.....	154
10.4.1 分析零件结构工艺的合理性.....	154
10.4.2 浇注位置的选择原则.....	155
10.4.3 分型面的确定.....	156
10.4.4 浇注系统的确定.....	158
10.4.5 铸造工艺参数的确定.....	159
10.5 特种铸造.....	162
10.5.1 熔模铸造.....	162
10.5.2 金属型铸造.....	163
10.5.3 压力铸造.....	164
10.5.4 离心铸造.....	166
10.6 思考题.....	167
<b>第 11 章 金属的塑性成形加工</b> .....	169
11.1 金属的塑性成形.....	169
11.1.1 金属塑性变形的实质.....	169
11.1.2 塑性变形对金属组织和性能的影响.....	170
11.1.3 金属的可锻性.....	172
11.2 金属轧制、挤压、拉拔成形加工.....	173
11.2.1 轧制.....	173
11.2.2 挤压.....	175
11.2.3 拉拔.....	177
11.3 自由锻.....	177

11.3.1	自由锻的基本工序.....	177
11.3.2	自由锻工艺规程的制定.....	180
11.4	模锻.....	182
11.4.1	锤上模锻设备.....	182
11.4.2	锻模.....	182
11.4.3	模锻工艺规程的制定.....	184
11.5	板料冲压.....	186
11.5.1	板料冲压的基本工序.....	187
11.5.2	板料冲压模具.....	188
11.5.3	典型零件冲压工艺举例:.....	189
11.6	塑性成形加工新技术.....	190
11.6.1	超塑性成形.....	190
11.6.2	高速高能成形.....	191
11.7	思考题.....	192
第 12 章	焊接.....	193
12.1	焊接的特点及分类.....	193
12.1.1	概述.....	193
12.1.2	焊接方法分类.....	193
12.1.3	焊接的特点及应用.....	193
12.2	手工电弧焊.....	194
12.2.1	手弧焊焊接过程.....	195
12.2.2	焊接电弧.....	195
12.2.3	熔化焊冶金过程及其特点.....	196
12.2.4	焊条.....	196
12.2.5	熔焊焊接接头组织及性能.....	198
12.3	其他熔焊方法简介.....	199
12.3.1	埋弧自动焊.....	199
12.3.2	气体保护焊.....	202
12.3.3	电渣焊.....	204
12.3.4	气焊与气割.....	205
12.3.5	等离子弧焊与切割.....	207
12.4	压焊、钎焊、堆焊及喷涂.....	208
12.4.1	压焊.....	208
12.4.2	钎焊.....	211

---

12.4.3	堆焊.....	211
12.4.4	喷涂.....	212
12.5	常用金属材料的焊接.....	212
12.5.1	金属材料的焊接性.....	212
12.5.2	碳钢的焊接.....	213
12.5.3	低合金钢的焊接.....	214
12.5.4	有色金属的焊接.....	217
12.5.5	不锈钢的焊接.....	217
12.5.6	铸铁的焊补.....	218
12.6	先进焊接方法简介.....	219
12.6.1	电子束焊.....	219
12.6.2	超声波焊.....	221
12.6.3	激光焊.....	222
12.6.4	扩散焊.....	223
12.6.5	爆炸焊.....	223
12.6.6	焊接机器人.....	224
12.7	思考题.....	224
<b>参考文献.....</b>		<b>226</b>

# 第 1 章 金属与合金的晶体结构

不同的金属材料具有不同的性能，但同一成分的金属材料在不同条件下也会表现出不同的性能。可见，除化学成分外，金属材料的性能还与其内部原子排列情况密切相关。因此，要改善和提高金属材料的性能，首先必须了解金属与合金的晶体结构。

## 1.1 金属的晶体结构

### 1.1.1 晶体与非晶体

固态物质都是由原子（分子或离子）堆积而成的。按照这些原子（分子或离子）在物质内部的堆积方式不同，可以将其分为晶体与非晶体两大类。凡是原子（分子或离子）在三维空间作有规则的周期性重复排列的物质均为晶体，如所有的固态金属、食盐及雪花等。否则为非晶体，如玻璃、塑料以及棉花等。物质内部原子（分子或离子）是否以一定的规律重复排列是晶体与非晶体的本质区别，而与物质的几何外形无关。

由于晶体与非晶体原子堆垛方式的不同，使它们在性能上也有很大区别。晶体具有固定的熔点，它的结晶过程在恒温下进行；而非晶体没有固定的熔点，它的结晶过程需要一定的温度范围。另一方面，晶体在各个方向上的性能（如导电性、导热性等）是不同的，即各向异性；而非晶体在各个方向上的性能则是一样的，即各向同性。

### 1.1.2 晶格、晶胞和晶格常数

为了研究晶体中原子排列的情况，可以把原子假定成固定不动的刚球（刚性小球），然后再用假想的几何直线把这些刚球的中心连接起来，形成一个空间格子。这种用来描述晶体中原子排列规律的空间格架称为晶格，如图 1-1 所示。

由于晶格中原子排列具有周期性，因此为方便讨论，可以从晶格中选取一个能够代表晶格特征的最小几何单元来研究晶格中原子排列的特点。这种能够反映晶格特征的最小几何单元称为晶胞，如图 1-2 所示。

晶胞的尺寸用它的三个棱边长度，即晶格常数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  来表示；晶胞的形状用它的三

个棱边之间的夹角，即棱间夹角  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  来表示，如图 1-3 所示。

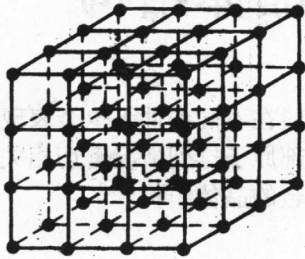


图 1-1 晶格

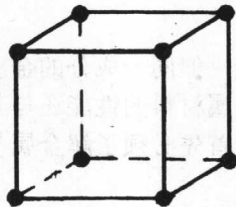


图 1-2 晶胞

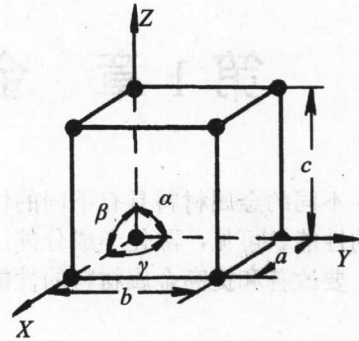


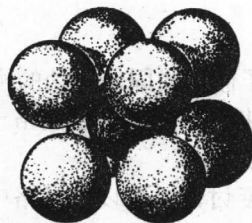
图 1-3 晶格常数及棱间夹角表示法

### 1.1.3 常见的金属晶体结构

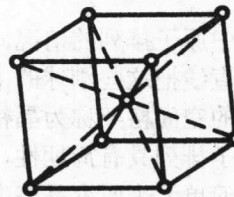
根据晶格常数和棱间夹角之间的关系，金属的晶体结构通常分为 7 个晶系、14 种点阵。但除少数金属具有复杂的晶体结构以外，大部分金属都具有比较简单的晶体结构。其中最常见的是属于立方晶系的体心立方晶格和面心立方晶格以及属于六方晶系的密排六方晶格。

#### 1. 体心立方晶格

体心立方晶格的刚球模型与质点模型分别如图 1-4 a 和 1-4 b 所示。它的晶格常数  $a=b=c$ ，棱间夹角  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ，构成一个立方体。在晶胞的中心和八个角上各有一个原子，其中晶胞中心的原子完全属于这个晶胞，而八个角上的原子与它相邻的 8 个晶胞所共有。故晶胞中实际拥有的原子数为  $\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$  个。属于这种晶体结构的金属有  $\alpha$ -Fe、Cr、Mo、W 等。



a 刚球模型



b 质点模型

图 1-4 体心立方晶格

## (1) 原子半径

如果将晶体中的原子假设为刚性球，则原子半径是相切的两个球球心距的一半，即最近的两个原子之间间距的一半。由图 1-4 可知：在体心立方晶胞中，沿体对角线原子排列最紧密。设晶格常数为  $a$ ，则体对角线长  $\sqrt{3}a$ ，相等于 4 个原子半径，由此可以计算出原子半径  $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ 。

## (2) 配位数

配位数是指晶格中与任一原子最近邻、等距离的原子数目。在体心立方晶格中，以体心原子为例，与它最近邻等距离的原子是该立方体 8 个角上的原子，体心立方晶格的配位数是 8。

## (3) 致密度

致密度是指晶胞中原子所占体积与整个晶胞所占体积之比，可用下式表示：

$$K = \frac{nv}{V}$$

式中： $K$ ——晶胞的致密度；

$n$ ——一个晶胞中实际拥有的原子数；

$v$ ——一个原子的体积；

$V$ ——晶胞的体积。

由此可以计算出体心立方晶格的致密度为  $K = \frac{nv}{V} = \frac{2 \times \frac{4}{3}\pi r^3}{a^3} = 0.68$ 。

## 2. 面心立方晶格

面心立方晶格的刚球模型与质点模型分别如图 1-5a 和 1-5b 所示。与体心立方晶格一样，它的晶格常数  $a=b=c$ ，棱间夹角  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ，也构成一个立方体。在晶胞的八个角上和六个面的面心各有一个原子，其中六个面面心的原子为相邻两个晶胞所共有，而八个角上的原子与它相邻的 8 个晶胞所共有，故晶胞中实际拥有的原子数为  $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$  个。属于这种晶体结构的金属有  $\gamma$ -Fe、Al、Ag、Ni 等。

(1) 原子半径。由图 1-5 可知：在面心立方晶胞中，沿面对角线原子排列最紧密。设晶格常数为  $a$ ，则面对角线长  $\sqrt{2}a$ ，相等于 4 个原子半径，由此可以计算出原子半径  $r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$ 。

(2) 配位数。如图 1-5c 所示，以面心原子为例，与它最近邻等距离的原子数为 12，所以面心立方晶格的配位数是 12。

(3) 致密度。同体心立方晶格一样，由晶胞中实际拥有的原子数与原子半径可计算出面心立方晶格的致密度  $K=0.74$ 。

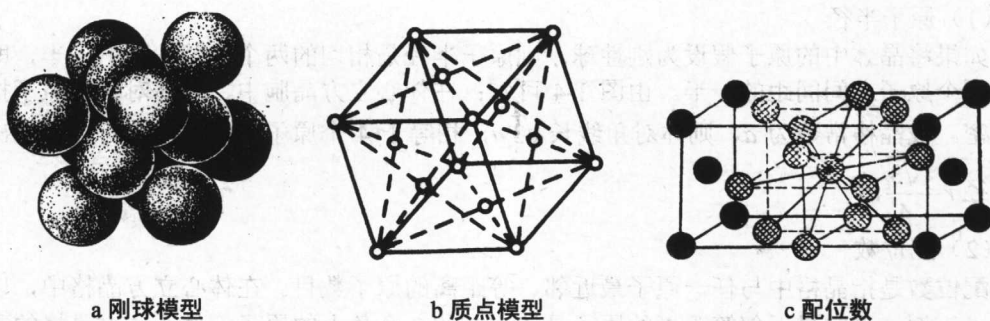


图 1-5 面心立方晶格

### 3. 密排六方晶格

密排六方晶格的刚球模型与质点模型分别如图 1-6 a 和 1-6 b 所示。可以看出：它是一个六方柱体，有底面边长  $a$  和棱柱的高  $c$  两个晶格常数，其中  $\frac{c}{a} \approx 1.633$ 。在六方柱体的 12 个角上与上下底面中心各有一个原子，晶胞的中心还有三个原子，其中 12 个角的原子为相邻六个晶胞所共有，上下底面中心的原子为两个晶胞所共有，而晶胞中心的三个原子完全属于这个晶胞，故晶胞中实际拥有的原子数为  $\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$  个。属于这种晶体结构的金属有 Zn、Mg、Cd、 $\alpha$ -Ti 等。

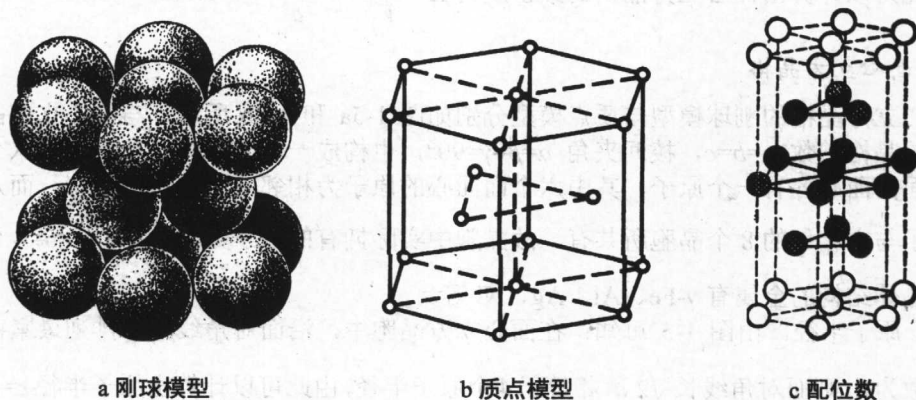


图 1-6 密排六方晶格

(1) 原子半径。由图 1-6 可知：在密排六方晶胞中，上下底面中心的原子与它相邻角



上的原子紧密接触。设棱柱底面正六边形的边长为  $a$ ，则可以计算出原子半径  $r = \frac{1}{2}a$ 。

(2) 配位数。如图 1-6c 所示，以底面中心的原子为例，与它最近邻等距离的原子数为 12，所以密排六方晶格的配位数是 12。

(3) 致密度。同理，由晶胞中实际拥有的原子数与原子半径可计算出密排六方晶格的致密度  $K=0.74$ 。

由表 1-1 可以看出，晶格类型改变时致密度可能发生变化，因此带来体积的收缩或膨胀。例如，铁在  $912^{\circ}\text{C}$  由体心立方的  $\alpha\text{-Fe}$  向面心立方的  $\gamma\text{-Fe}$  发生转化时，体积要缩小。其中面心立方与密排六方致密度相同，说明它们原子排列的紧密程度相同，但原子排列方式不同。

表 1-1 典型金属晶体结构的常用数据

晶格类型	晶胞中实际原子数	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
密排六方	6	$\frac{1}{2}a$	12	0.74

### 1.1.4 晶向指数和晶面指数

金属晶体中，由若干个原子所组成的平面称为晶面。通过任意两个或两个以上原子连成直线，它们所指的方向称为晶向。为便于研究，晶面和晶向都需要用一定的符号来表示，分别称为晶面指数和晶向指数。

#### 1. 晶面指数

晶面指数确定方法如下：

(1) 以晶胞的三个相互垂直的棱边为坐标轴  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ，晶格常数为度量单位，建立空间坐标系（坐标原点  $O$  应位于所求晶面之外）。

(2) 分别求出待定晶面在各坐标轴上截距的倒数。

(3) 将所求各截距的倒数化为最小简单整数，依次放入圆括号内，即得所求的晶面指数  $(hkl)$ 。如果截距是负数，则在相应的指数上加一负号“-”。例如，图 1-7 所示的晶面指数为  $(111)$ 。

由此可以看出， $(hkl)$  不只是表示一个晶面，而是表示原子排列相同的一系列平行平