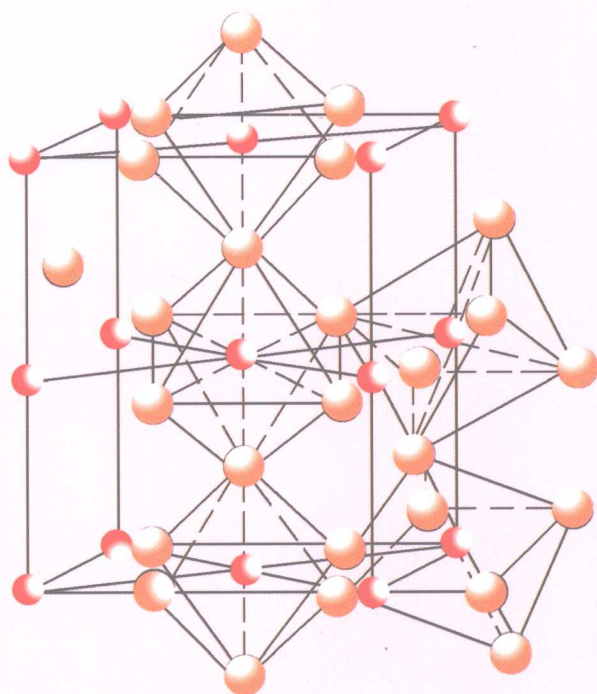


高等学校规划教材

GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

金属学与热处理

陈惠芬 主编



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

高等学校规划教材

金属学与热处理

主 编 陈惠芬

副主编 马亚芹 刘克家 范培耕

北 京
冶金工业出版社
2009

内 容 提 要

本书内容分为金属学基础、热处理和金属材料三大模块,共 11 章。金属学基础模块深入浅出地介绍了金属的晶体结构、纯金属的结晶、二元合金相图、铁碳合金相图、三元合金相图、金属及合金的塑性变形与再结晶、金属与合金中的扩散等内容。热处理模块除介绍常规的热处理工艺以外,将渗透和强化具体的可控气氛热处理和表面热处理的原理也作了介绍。金属材料模块介绍工业用钢、铸铁、有色金属及合金。教材内容贴近当今国内外生产,更具实用性。各章后均附有习题。

本书主要作为本科生教学用书,也可供相关专业的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属学与热处理/陈惠芬主编. —北京:冶金工业出版社,
2009. 2

高等学校规划教材

ISBN 978-7-5024-4623-9

I. 金… II. 陈… III. ①金属学-高等学校-教材
②热处理-高等学校-教材 IV. TG1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 192036 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmp. com. cn

责任编辑 李枝梅 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4623-9

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009 年 2 月第 1 版,2009 年 2 月第 1 次印刷

787 mm × 1092 mm 1/16;19.75 印张;528 千字;303 页;1-3000 册

39.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

本教材是根据工科类应用型本科院校冶金工程专业和金属材料成形专业教学计划编写的。“金属学与热处理”是冶金、金属成形专业的一门专业基础课，分为三个模块：金属学、热处理原理及工艺、金属材料，总共 11 章。

使用本教材之前，应用型本科院校的学生首先应选修“物理化学”和“工程力学”课程；其次已经完成金工实习这一实践环节，对冶金、金属材料成形和热处理等生产环节具有一定的感性认识。

本教材的第 1、2、3、4 章由贵州师范大学材料与建筑工程学院马亚芹老师编写，第 5 章和第 8 章由上海应用技术学院材料工程系刘克家老师编写，第 6、7、11 章由重庆科技学院冶金与材料工程系范培耕老师编写，第 9、10 章由上海应用技术学院材料工程系陈惠芬老师编写。全书由陈惠芬担任主编，上海应用技术学院张红英老师对本教材的部分章节进行了审阅。此外，本教材的编写还得到了上海应用技术学院陈锬老师的大力支持和帮助以及“上海市高等学校——《材料加工》本科教育高地建设”的资助，在此表示衷心感谢！

本教材内容可适合 60~80 学时的课程教学。为了方便读者加深对课程内容的理解，每章后都附有一定量的练习题。

由于编者水平有限，且时间仓促，若有不妥之处，希望读者提出宝贵意见。

编 者
2008 年 5 月

目 录

1 金属的晶体结构	1
1.1 金属	1
1.1.1 金属键	1
1.1.2 金属的特性	1
1.1.3 金属原子的排列规则	2
1.2 金属的晶体结构	3
1.2.1 晶体与非晶体	3
1.2.2 空间点阵	3
1.2.3 常见的金属晶体结构	5
1.3 晶体学概念	7
1.3.1 晶胞中的原子数	7
1.3.2 原子半径	7
1.3.3 配位数和致密度	7
1.3.4 晶体中原子的堆垛方式	8
1.3.5 晶体结构中的间隙	9
1.3.6 同素异晶转变	11
1.3.7 晶面指数和晶向指数	11
1.4 合金的相结构	14
1.4.1 主要名词概念	14
1.4.2 合金的相结构	15
1.5 实际金属的结构	20
1.5.1 点缺陷	20
1.5.2 线缺陷	22
1.5.3 面缺陷	25
习题	27
2 纯金属的结晶	29
2.1 金属结晶的规律	29
2.1.1 过冷现象及过冷度	29
2.1.2 结晶的热力学条件	30
2.2 纯金属的结晶过程	31
2.2.1 液态金属的结构	31
2.2.2 金属的结晶过程	31

2.2.3 形核规律	31
2.3 晶核长大	36
2.3.1 液-固界面的微观结构	36
2.3.2 晶核的长大	37
2.3.3 固-液界面前沿液体中的温度梯度	38
2.3.4 纯金属的生长形态	38
2.4 晶粒大小的控制	39
2.4.1 晶粒大小对金属力学性能的影响	39
2.4.2 过冷度对晶粒大小的影响	40
2.4.3 变质处理对晶粒大小的影响	40
2.4.4 振动、搅拌对晶粒大小的影响	41
2.5 结晶理论的应用	41
2.5.1 定向凝固技术	41
2.5.2 单晶体的制备	42
2.5.3 急冷凝固技术	43
习题	44
3 二元合金相图	45
3.1 二元合金相图	45
3.1.1 二元合金相图的建立	45
3.1.2 相律及杠杆定律	47
3.2 二元匀晶相图	48
3.2.1 Cu-Ni 相图分析	48
3.2.2 固溶体合金的结晶过程及组织	48
3.3 二元共晶相图	50
3.3.1 Pb-Sn 相图分析	50
3.3.2 典型合金的平衡结晶过程及组织	51
3.4 包晶相图及其合金的结晶	57
3.4.1 Pt-Ag 合金相图分析	57
3.4.2 典型合金的平衡结晶过程及组织	58
3.4.3 具有包晶转变的合金的不平衡凝固	59
3.5 其他类型的二元合金相图	59
3.5.1 形成稳定化合物的相图	59
3.5.2 具有固态相变的相图	60
3.6 合金的性能与相图之间的关系	61
3.6.1 力学、物理性能与相图的关系	61
3.6.2 合金工艺性能与相图的关系	61
3.7 金属铸锭的组织与缺陷	62
3.7.1 铸锭三晶区的形成	62

3.7.2 铸锭缺陷	64
习题	65
4 铁碳合金相图	66
4.1 铁碳合金的基本相	66
4.1.1 纯铁	66
4.1.2 铁素体与奥氏体	67
4.1.3 渗碳体	68
4.2 Fe-Fe ₃ C 相图分析	68
4.2.1 相图中的点、线、区	68
4.2.2 三条水平线相变	69
4.2.3 四条重要的特性曲线	70
4.3 典型铁碳合金的平衡结晶过程及组织	70
4.3.1 工业纯铁	71
4.3.2 共析钢	72
4.3.3 亚共析钢	72
4.3.4 过共析钢	74
4.3.5 共晶白口铁	74
4.3.6 亚共晶白口铁	75
4.3.7 过共晶白口铁	76
4.4 含碳量对铁碳合金平衡组织和性能的影响	77
4.4.1 对平衡组织的影响	77
4.4.2 对力学性能的影响	78
4.4.3 对工艺性能的影响	79
4.5 钢中的杂质元素对组织性能的影响	80
4.5.1 锰的影响	80
4.5.2 硅的影响	81
4.5.3 硫的影响	81
4.5.4 磷的影响	81
4.5.5 氮的影响	82
4.5.6 氢的影响	82
4.5.7 氧及其他非金属夹杂物的影响	82
习题	83
5 三元合金相图	84
5.1 概述	84
5.2 三元系统基本原理	85
5.2.1 三元合金相图的表示方法	85
5.2.2 三元系平衡相的定量法则	87

5.2.3 三元系统相图的构成要素	89
5.3 三元相图的基本类型	90
5.3.1 三元匀晶相图	90
5.3.2 三元共晶相图(三元低共熔点相图)	92
5.3.3 具有包晶转变的三元相图	97
5.3.4 生成化合物的三元相图	98
习题	100
6 金属及合金的塑性变形与再结晶	102
6.1 金属的变形特性	102
6.1.1 应力-应变曲线	102
6.1.2 真应力-真应变曲线	103
6.1.3 金属与合金的弹性变形	104
6.2 单晶体的塑性变形	106
6.2.1 滑移	106
6.2.2 孪生	114
6.3 多晶体的塑性变形	115
6.3.1 多晶体的塑性变形过程	116
6.3.2 晶粒大小对塑性变形的影响	117
6.4 合金的塑性变形	117
6.4.1 单相固溶体的塑性变形	118
6.4.2 多相合金的塑性变形	118
6.5 塑性变形对金属组织和性能的影响	120
6.5.1 塑性变形对组织结构的影响	120
6.5.2 塑性变形对金属性能的影响	123
6.6 金属及合金的回复与再结晶	125
6.6.1 形变金属与合金在退火过程中的变化	125
6.6.2 回复	127
6.6.3 再结晶	130
6.6.4 晶粒长大	134
6.7 金属的加工	139
6.7.1 金属的热加工与冷加工	139
6.7.2 动态回复与动态再结晶	140
6.7.3 热加工后的组织与性能	141
习题	143
7 金属与合金中的扩散	144
7.1 概述	144
7.1.1 扩散现象和本质	144

7.1.2 扩散机理	145
7.1.3 固态金属扩散的条件	147
7.1.4 固态扩散的分类	148
7.2 扩散定律	149
7.2.1 菲克第一定律	149
7.2.2 菲克第二定律	150
7.2.3 扩散应用举例	151
7.3 影响扩散的因素	154
7.3.1 温度	154
7.3.2 晶体结构	154
7.3.3 固溶体类型	155
7.3.4 晶体缺陷	155
7.3.5 化学成分	156
习题	157
8 钢的热处理原理	158
8.1 概述	158
8.1.1 热处理的作用	158
8.1.2 热处理与相图	158
8.2 钢在加热时的组织转变	159
8.2.1 奥氏体的特性	159
8.2.2 奥氏体形成的热力学条件	160
8.2.3 奥氏体的形成过程	160
8.2.4 奥氏体等温形成动力学	162
8.2.5 奥氏体晶体长大及控制	164
8.3 钢在冷却时的组织转变	168
8.3.1 概述	168
8.3.2 过冷奥氏体等温转变图	168
8.3.3 珠光体转变	171
8.3.4 马氏体转变	176
8.3.5 贝氏体转变	183
8.4 过冷奥氏体连续冷却转变图及其应用	190
8.4.1 过冷奥氏体连续冷却转变图的建立	190
8.4.2 CCT图与TTT图的比较	191
8.4.3 过冷奥氏体连续冷却转变图的应用	192
8.5 钢在回火时的转变	193
8.5.1 淬火碳钢回火时转变的分类	193
8.5.2 碳钢回火时的组织转变过程	193
8.5.3 回火的各种组织及其力学性能的变化	195

8.6 钢的热处理工艺	199
8.6.1 钢的退火与正火	199
8.6.2 钢的淬火	202
8.6.3 钢的回火	208
8.6.4 钢的化学热处理	210
8.6.5 钢的特种热处理技术	213
习题	218
9 工业用钢	219
9.1 钢中的合金元素及作用	219
9.1.1 合金元素在钢中存在的形式	219
9.1.2 合金元素对铁碳相图的影响	223
9.2 钢的分类及牌号	227
9.2.1 钢的分类	228
9.2.2 钢的牌号	228
9.3 工程结构用钢	230
9.3.1 碳素结构钢	231
9.3.2 普通低合金结构钢	231
9.4 机械零件用钢	232
9.4.1 调质钢	233
9.4.2 渗碳钢	235
9.4.3 弹簧钢	237
9.4.4 滚动轴承钢	239
9.5 工具钢	242
9.5.1 刀具钢	242
9.5.2 模具钢	248
9.5.3 量具钢	250
9.6 特殊性能钢	251
9.6.1 不锈钢	251
9.6.2 耐热钢	256
9.6.3 耐磨钢	257
习题	258
10 铸铁	259
10.1 铸铁的石墨化过程及分类	259
10.1.1 铸铁的石墨化过程	259
10.1.2 铸铁的分类	260
10.2 灰口铸铁	261
10.2.1 灰口铸铁的化学成分、组织和性能	261
10.2.2 灰口铸铁的牌号和用途	262

10.2.3	影响灰口铸铁组织与性能的因素	262
10.2.4	灰口铸铁的孕育处理	263
10.2.5	灰口铸铁的热处理	264
10.3	球墨铸铁	264
10.3.1	球墨铸铁的化学成分、组织和性能	264
10.3.2	球墨铸铁的牌号和用途	265
10.3.3	球墨铸铁的热处理	266
10.4	蠕墨铸铁	267
10.4.1	蠕墨铸铁的化学成分与金相组织	267
10.4.2	蠕墨铸铁的牌号、性能与用途	267
10.5	可锻铸铁	268
10.5.1	可锻铸铁的化学成分、组织及石墨化退火	268
10.5.2	可锻铸铁的牌号、性能及用途	268
10.6	特殊性能铸铁	269
10.6.1	耐磨铸铁	269
10.6.2	耐热铸铁	269
10.6.3	耐蚀铸铁	270
	习题	270
11	有色金属合金	272
11.1	铝及铝合金	272
11.1.1	纯铝	272
11.1.2	铝合金的分类	272
11.1.3	铝及铝合金的强化	273
11.1.4	变形铝合金	276
11.1.5	铸造铝合金	280
11.1.6	耐热铝合金	283
11.2	铜及铜合金	285
11.2.1	纯铜(紫铜)	285
11.2.2	黄铜	286
11.2.3	青铜	288
11.3	钛及钛合金	289
11.3.1	纯钛	290
11.3.2	钛的合金化	290
11.3.3	工业用钛合金	291
11.3.4	钛合金的热处理	294
	习题	296
	附 录	297
	参考文献	303

1 金属的晶体结构

1.1 金属

金属是由原子(确切地说是离子)以某种聚集状态组成的材料,它具有特殊的性质:高的导电性和导热性,一般不透明,有金属光泽,一定的强度和韧性,正的电阻温度系数等。上述固态金属的特性,取决于组成金属的原子结构特点及由此而决定的结合方式。

1.1.1 金属键

金属原子是由带正电的原子核和带负电的核外电子组成的。核外的电子被原子核吸引,各电子间相互排斥并靠一种离心力保持着与核的距离,不同的电子在一系列轨道或壳层上绕核转动。内层电子的能量低,最为稳定。最外层的电子能量高,与核结合力弱,最不稳定。金属原子的结构特点是,其最外层的电子数很少,通常只有1~2个,由于这些外层电子与原子核的结合力弱,所以很容易脱离原子核的束缚而变成自由电子,这些最外层的电子即为价电子。

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,为全体所共有。共有化的电子(称之为自由电子或电子云)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自由运动着。原子失去电子后则变成正离子,共有化的自由电子和正离子以静电引力而结合起来,这种结合方式叫做金属键,它没有饱和性和方向性。图1-1示意地绘出了金属键模型。在固态金属中,并非所有原子都变为正离子,只是绝大部分处于正离子状态,仍有少部分原子处于中性原子状态。

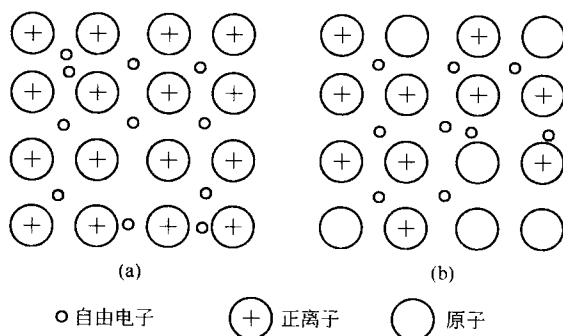


图1-1 金属键模型示意图

1.1.2 金属的特性

金属主要是由金属键结合而成。根据金属键的本质,可以解释固态金属的一些特性。在外加电场作用下,金属中的自由电子能够沿着电场方向定向运动,形成电流,从而显示出良好的导电性。这种运动为金属所特有,自由电子的运动和正离子的振动能传递热能,使金属具有良好的导热性。

由于金属键没有饱和性和方向性,所以当金属原子作相对位移时,金属的正离子始终被包围在电子云中,从而保持着金属键结合。这样,金属就能经受变形而不断裂,具有塑性。

由于金属中的自由电子很容易吸收可见光的能量,而被激发到较高的能级,当它跳回到原来的能级时,就把吸收的可见光能量重新辐射出来,从而使金属不透明,具有金属光泽。

在外电场作用下,加速运动的自由电子与偏离平衡位置的金属正离子发生碰撞,使电子的运动速度降低,宏观上就表现为电阻。随着温度的升高,离子或原子本身振动的振幅加大,可阻碍电子的通过,使电阻升高,因而金属具有正的电阻温度系数。

金属材料的化学成分不同,其性能也不同。例如金、铜、铝的塑性很好,可以顺利进行压力加工,甚至可以碾成金属箔,而镁、铍难以进行压力加工。但是对于同一种成分金属材料,通过不同的加工处理工艺,改变材料内部的组织结构,也可以使其性能发生极大的变化。由此可以看出,除化学成分外,金属晶体结构不同,即原子的排列方式不同,是决定金属材料性能的重要因素。

1.1.3 金属原子的排列规则

在固态金属中,原子依靠金属键牢固地结合在一起,且往往趋于紧密规则排列,这可从原子间的结合力和结合能来说明。

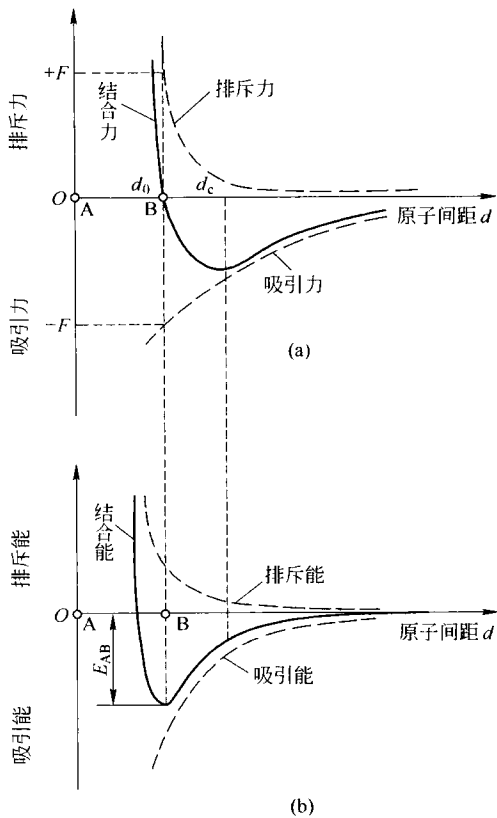


图 1-2 双原子作用模型

上,与金属的理论抗拉强度相对应。金属不同,则原子的最大结合力值也不同。图 1-2b 是吸引能和排斥能与原子间距离的关系曲线,结合能是吸引能与排斥能的代数和。形成的原子集团比

固态金属中两原子之间相互作用力包括:正离子与周围自由电子间的吸引力,正离子与正离子以及电子与电子之间的排斥力。吸引力力图使两原子靠近,而排斥力力图使两原子分开,它们的大小都随原子间距离的变化而变化,如图 1-2 所示。图 1-2a 为 A、B 两原子间的吸引力和排斥力曲线,两原子的结合力为吸引力和排斥力的代数和。吸引力是一种长程力,排斥力是一种短程力,当两原子间距较大时,吸引力大于排斥力,两原子自动靠近。当两原子靠近,致使其电子层发生重叠时,排斥力便急剧增大,一直到两原子距离为 d_0 时,吸引力与排斥力相等,原子间结合力为零,原子处于平衡位置,既不会自动靠近,也不会自动离开。任何对平衡位置的偏离,都将会受到一个力的作用,促使其回到平衡位置。例如:当距离小于 d_0 时,排斥力大于吸引力,两原子要相互排斥;当距离大于 d_0 时,吸引力大于排斥力,两原子要相互吸引。如果把 B 原子拉开,远离其平衡位置,则必须施加外力,以克服原子间的吸引力。当把 B 原子拉至 d_c 位置时,外力达到原子结合力曲线上的最大值,超过 d_c 之后,所需的外力就越来越小。原子间的最大结合力出现在 d_c 位置

孤立的自由原子更稳定,即势能更低时,在吸引力的作用下把远处的原子移近所做的功使原子的势能降低,所以吸引能是负值。相反,排斥能是正值。当原子移至平衡距离 d_0 时,其结合能达到最低值,即此时原子的势能最低、最稳定。任何对 d_0 的偏离,都会使原子的势能增加。从而使原子处于不稳定状态,原子就有力图回到低能状态,即恢复到平衡距离的倾向。这里 E_{AB} 称为原子间的结合能或键能。同样,金属不同,则其结合能的大小也不同。

将双原子作用模型推广到大量金属原子结合成的固体时,为使固态金属具有最低的能量,以保持其稳定状态,原子之间也必须保持一定的平衡距离,这便是固态金属中的原子趋于规则排列的重要原因。如果试图从固态金属中把某个原子从平衡位置拿走,就必须对它做功,以克服周围原子对它的作用力,显然,这个要被拿走的原子周围邻近的原子数越多,原子间的结合能(势能)就越低。能量最低的状态是最稳定的状态,而任何系统都有自发从高能状态向低能状态转化的趋势。

因此,常见金属中的原子总是自发地趋于紧密地排列,以保持最稳定的状态,所以在固态金属中,原子往往趋于紧密规则排列。

1.2 金属的晶体结构

1.2.1 晶体与非晶体

金属中原子的排列是有规则的,而不是杂乱无章的。这种原子在三维空间中有规则的周期性重复排列的物质称为晶体。金属一般均为晶体。

常见晶体如钻石、各种晶莹剔透的宝石,以及呈立方体形结晶的食盐(NaCl),呈八面体形结晶的明矾 $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 等,往往都具有规则的几何外形,而各种金属制品,如汽车、火车和飞机上的各种金属构件等,虽然不具有规则的几何外形,但它们也是晶体。可见,晶体与非晶体的区别不在外表,主要在于内部的原子(或离子、分子)的排列情况,凡是原子(或离子、分子)在三维空间按一定规律呈周期性排列的固体,均是晶体;而非晶体则不呈这种周期性的规则排列,如玻璃、棉花、木材等就是非晶体。液态金属的原子排列无周期规则性,不为晶体。当凝固成固体后,原子呈周期性规则排列,则变成晶体,在极快冷却的条件下,一些金属可获得固态非晶体,即将液态的原子排列方式保留至固态中。

晶体与非晶体由于原子排列方式不同,导致在性能上的区别主要有两点:

其一,晶体熔化时具有固定的熔点,而非晶体却是存在一个软化温度范围,没有明显的熔点,固态非晶体是液体冷却时未转变成晶体就凝固了,它实质是一种过冷液体,故非晶体又称为“过冷液体”或“玻璃体”。

其二,晶体具有各向异性,即晶体中各个不同的方向上,晶体的强度、硬度及弹性模量、电导率、光折射率等力学性能和物理性能不同。晶体的这种特性也是由于在晶体内部原子的周期性排列结构中,不同方向上原子或分子的排列情况不同,因而反映出物理性质具有各向异性。而非晶体却为各向同性。

1.2.2 空间点阵

为了清楚地表明原子在三维空间的排列规律,通常把原子当成一个刚性球,并把不停热振动的原子看成是在其平衡位置上静止不动的,晶体即由这些刚性球堆垛而成,图1-3a为这种原子堆垛模型。从图中可以看出,原子在各个方向的排列都是很规则的。为了清楚地看清内部原子排列的规律和特点,常常将构成晶体的实际质点的物质性忽略,而将它们抽象为纯粹的几何点,

称之为阵点或结点,这些阵点或结点可以是原子(离子、分子)的中心,也可以是彼此等同的原子群或分子群的中心,各个阵点的周围环境都相同。这种阵点有规则地周期性重复排列所形成的空间几何图形即称为空间点阵。为了方便起见,常人为地将阵点用直线连接起来形成空间格子,称之为晶格(见图 1-3b)。由于晶格中阵点排列具有周期性的特点,因此,为了简便起见,可以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称为晶胞(见图 1-3c)。晶胞在三维空间作重复堆砌就构成空间点阵。

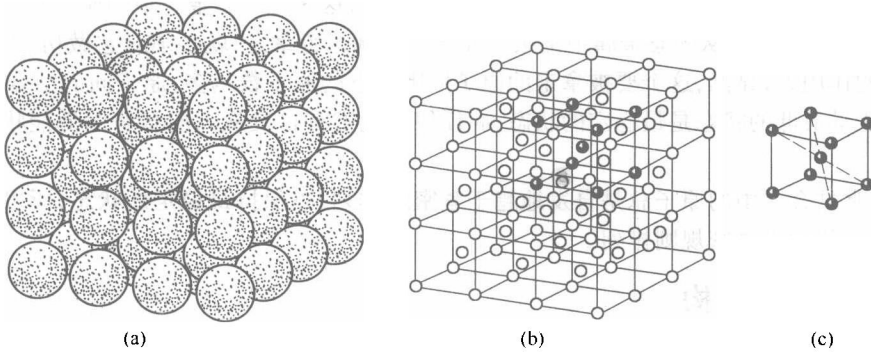


图 1-3 晶体中原子排列示意图
(a) 原子堆垛模型;(b) 晶格;(c) 晶胞

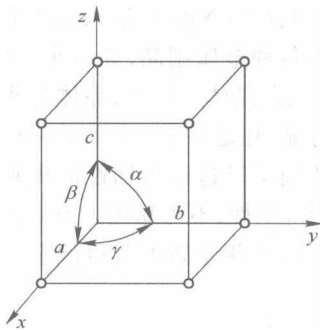


图 1-4 晶格常数

晶胞的大小和形状常以晶胞的棱边长度 a, b, c 及棱边夹角 α, β, γ 表示,如图 1-4 所示。图中沿晶胞三条相交于一点的棱边设置了三个坐标轴(称为晶轴) x, y, z 。晶胞的棱边长度一般称为晶胞的晶格常数或点阵常数,在 x, y, z 轴上分别以 a, b, c 表示。晶胞的棱间夹角分别用 α, β, γ 表示。

组成晶体的物质质点不同,排列的规则不同,或者周期性不同,就可以形成各种各样的晶体结构,但根据晶胞的三个晶格常数和三个轴间夹角的相互关系,布拉非(A. Bravais)在 1948 年从“各个阵点的周围环境都相同”出发,用数学分析法证明空间点阵只有 14 种类型,进一步根据晶体的对称程度的高低和对称特点,又可将 14 种空间点阵归属 7 个晶系,如表 1-1 所示。空间点阵虽然只有 14 种类型,但晶体结构却是无限多,因为每个阵点可以是原子(离子、分子)的中心,也可以是彼此等同的原子群或分子群的中心,是任意的,故晶体结构是无限多的。

表 1-1 7 个晶系和 14 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				

续表 1-1

晶系和实例	点阵类型			
	简单	底心	体心	面心
单斜晶系 $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \gamma \neq 90^\circ \neq \beta$ β -S				
正交晶系 $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ α -S, Fe ₃ C				
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 $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ β -Sa, TiO ₂				
立方晶系 $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ Fe, Cr, Ca, Ag				

1.2.3 常见的金属晶体结构

由于金属原子趋向于紧密排列,在已知的 80 多种金属元素中,除了少数具有复杂的晶体结构外,大多数具有简单的、紧密排列的晶体结构,最常见的晶体结构有三种类型,体心立方结构、面心立方结构和密排六方结构。

1.2.3.1 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞模型见图 1-5。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。除了在晶胞的八个角上各有一个原子外,在立方体的中心还有一个原子。具有体心立方结构的金属有 α -Fe、Cr、V、Nb、Mo、W 等 30 多种。

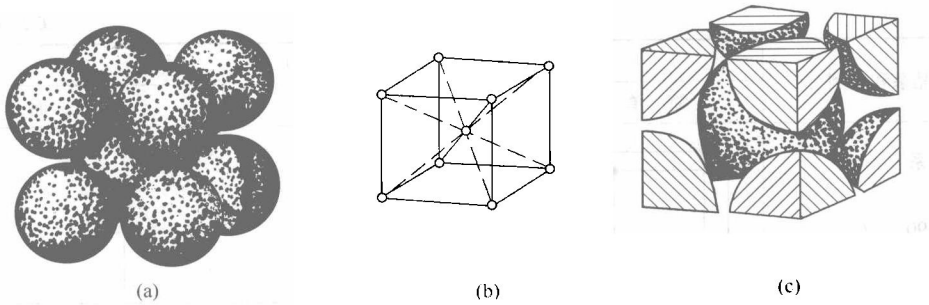


图 1-5 体心立方晶胞
(a) 刚球模型; (b) 质点模型; (c) 晶胞原子数

1.2.3.2 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞如图 1-6 所示。在晶胞的 8 个角上各有 1 个原子, 构成立方体, 在立方体 6 个面的中心各有 1 个原子。 γ -Fe、Cu、Ni、Al、Ag 等约 20 多种金属具有这种晶体结构。

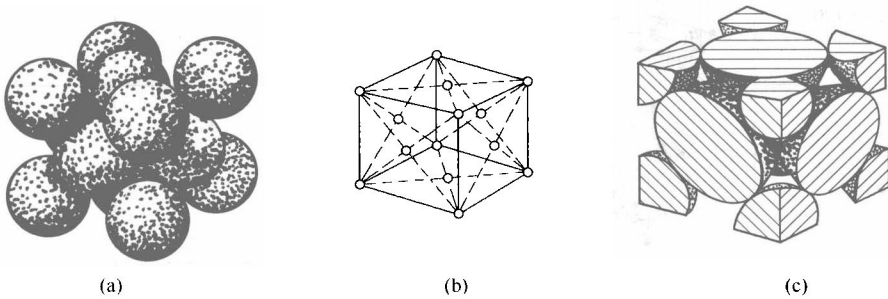


图 1-6 面心立方晶胞
(a) 刚球模型; (b) 质点模型; (c) 晶胞原子数

1.2.3.3 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞如图 1-7 所示。在晶胞的 12 个角上各有 1 个原子, 构成六方柱体, 上底面和下底面的中心各有 1 个原子, 晶胞内还有 3 个原子。具有密排六方晶格的金属有 Zn、Mg、Be、 α -Ti、 α -Co、Cd 等。

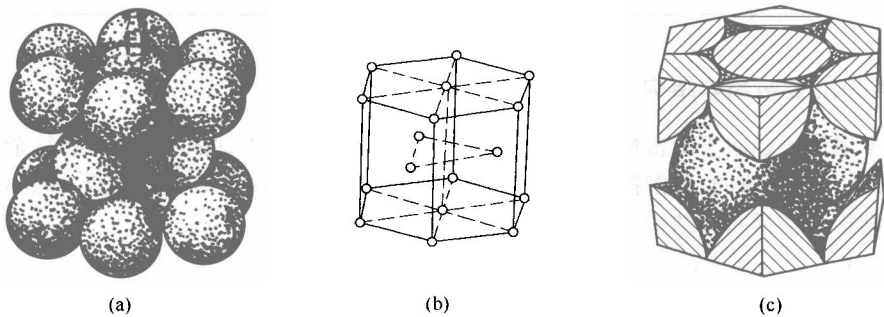


图 1-7 密排六方晶胞
(a) 刚球模型; (b) 质点模型; (c) 晶胞原子数