

高等学校教材

金属学及热处理

慈军 冯泽民 王金山 编

东北工学院出版社

前 言

本书是根据教学大纲要求，为60学时左右的《金属学及热处理》课程需要而编写，内容包括金属学、热处理、合金钢、铸铁、有色合金等部分。内容力求简明扼要和知识的系统性，同时考虑培养学生自学能力和理论与实践相结合的原则，每章后附有复习思考题。学生在学完本书之后能初步掌握金属学、热处理及金属材料等方面的基础理论与应用知识。根据专业要求及学时数不同，应用本书时可适当删减有关章节。

本书1~7章金属学部分由慈军编写，8~9章热处理部分由冯泽民编写，10~12章金属材料部分由王全山编写，全书由慈军主编。

由于编者水平所限，定有错误不妥之处，请读者批评指正。

编 者

1989.4

绪 论

金属及其合金是现代工农业、国防工业及科学技术的重要物质基础。只有掌握有关金属的知识，才能最大限度地发挥金属材料的使用价值，满足社会主义建设的需要。

金属材料不仅具有优良的机械性能及物理、化学性能，而且具有优良的工艺性能。

金属材料的各种性能决定于它的内部组织结构，因此要想正确选用金属材料及合理使用金属材料，就必须掌握金属材料的内部组织结构及其变化规律。

《金属学及热处理》就是研究金属材料成分、内部组织、热处理工艺与性能之间的一门科学。

学习金属学就可以掌握合金成分、组织结构与其性能之间的相互关系和变化规律，为创造新型金属材料提供理论基础，并可掌握金属材料在各种生产工艺过程中发生的组织与性能变化，以及各种生产因素对它们的影响，从而制定出合理的工艺规程，保证生产出优质金属材料，供工业和科研部门使用。

学习热处理知识，可以在不改变金属及其合金的外形和尺寸情况下，通过不同的热处理工艺改变其内部的组织结构，提高或获得各种优良使用性能和工艺性能，从而最大限度地发挥金属材料的潜在能力，以达到合理使用金属材料的目的。

近年来，由于新的测试仪器的发明，使金属的研究进入了一个新阶段，如电子显微镜、X射线衍射、放射性同位素、超声波、声发射等在金属研究中都得到了广泛的应用。

《金属学及热处理》的知识对冶金和金属材料工作者是十分重要的和必不可少的。

《金属学及热处理》是冶金、机械、热加工专业的技术基础课，其主要目的是使学生获得有关金属材料的基本理论知识，并具有合理使用金属材料，正确选用金属材料及制定热处理工艺等方面的知识。

《金属学及热处理》是以物理、化学、材料力学、物理化学、金属工艺学等为基础的一门科学。在学习时应经常联系上述基础科学的有关部分，以加深理解。同时《金属学及热处理》又是金属压力加工、铸造，焊接等热加工专业的基础。

《金属学及热处理》是一门从生产实践中发展起来的，而又直接为生产服务的科学，是一门密切结合实际的科学。学习时，不但要注意学习系统的理论，而且要注意实验室实验以及联系生产实际。

目 录

前 言

绪 论

第一章 金属的晶体结构

§ 1.1 一般概念.....	(1)
一、金属和金属键.....	(1)
二、晶体学的基本知识.....	(2)
§ 1.2 典型的金属晶体结构.....	(5)
一、典型的金属晶体结构的类型.....	(5)
二、晶格结构中的几个重要参数.....	(5)
§ 1.3 晶面和晶向指数的表示方法.....	(8)
一、晶面指数.....	(8)
二、晶向指数.....	(11)
三、六方晶系的晶面和晶向指数.....	(11)
四、晶体的各向异性.....	(12)
§ 1.4 实际金属的晶体结构.....	(13)
一、点缺陷.....	(13)
二、线缺陷.....	(14)
三、面缺陷.....	(15)
四、研究晶体缺陷的实际意义.....	(17)
§ 1.5 固态金属中的扩散.....	(18)
一、概 述.....	(18)
二、扩散机理.....	(19)
三、扩散定律.....	(19)
四、影响扩散的主要因素.....	(20)
复习思考题.....	(21)

第二章 金属的结晶与铸锭组织

§ 2.1 金属结晶的概念.....	(22)
一、结晶的概念.....	(22)
二、结晶的热力学条件.....	(22)
三、过冷度.....	(23)
§ 2.2 金属的结晶过程.....	(24)
一、结晶过程.....	(24)
二、晶核的形成.....	(24)
三、晶体的长大.....	(25)
§ 2.3 晶粒大小.....	(27)
一、晶粒度的概念.....	(27)

二、晶粒度的影响因素	(28)
三、控制晶粒度的方法	(29)
§ 2.4 铸锭的组织及其影响因素	(30)
一、铸锭的典型结晶组织	(30)
二、铸锭的组织与其工艺性能和机械性能的关系	(31)
三、铸锭的缺陷	(31)
复习思考题	(31)

第三章 合金的相结构

§ 3.1 合金相的概念	(32)
§ 3.2 固溶体	(33)
一、概 述	(33)
二、置换固溶体	(33)
三、间隙固溶体	(34)
四、固溶体性能的特点	(34)
§ 3.3 金属化合物	(35)
一、正常价化合物	(35)
二、电子化合物	(35)
三、间隙化合物	(36)
复习思考题	(38)

第四章 二元合金相图

§ 4.1 相图概述	(39)
一、相图概述	(39)
二、二元相图的表示方法	(39)
三、二元合金相图的建立	(40)
四、相 律	(41)
§ 4.2 匀晶相图	(42)
一、相图分析	(42)
二、合金的结晶过程	(42)
三、杠杆定律	(43)
四、枝晶偏析	(44)
§ 4.3 二元共晶相图	(45)
一、相图分析	(45)
二、合金的结晶过程	(45)
§ 4.4 包晶相图	(49)
一、相图分析	(50)
二、典型合金的结晶过程	(50)
§ 4.5 其他相图	(52)
一、形成稳定化合物的相图	(52)
二、共析相图	(52)
§ 4.6 合金的性能与相图的关系	(54)

一、合金的使用性能与相图的关系.....	(54)
二、合金的工艺性能与状态图的关系.....	(54)
复习思考题.....	(55)

第五章 铁碳合金

§ 5.1 铁碳相图.....	(58)
一、铁碳合金的组元.....	(59)
二、铁碳合金中的相.....	(60)
三、相图中的重要点和线.....	(62)
§ 5.2 典型铁碳合金的平衡结晶过程.....	(64)
一、工业纯铁($C \leq 0.0218\%$).....	(64)
二、共析钢 ($C = 0.77\%$).....	(65)
三、亚共析钢($0.0218\% < C < 0.77\%$).....	(66)
四、过共析钢 ($0.77\% < C < 2.11\%$).....	(68)
五、共晶白口铁($C = 4.3\%$).....	(69)
六、亚共晶白口铁($2.11\% < C < 4.3\%$).....	(69)
七、过共晶白口铁 ($4.3\% < C < 6.69\%$).....	(70)
§ 5.3 铁碳合金的成分-组织-性能关系.....	(72)
§ 5.4 Fe-Fe ₃ C相图的应用和其局限性.....	(73)
一、铁碳相图的应用.....	(73)
二、铁碳相图的局限性.....	(74)
§ 5.5 碳 钢.....	(74)
一、碳钢中的常存杂质.....	(74)
二、碳钢的分类.....	(75)
三、碳钢的牌号及用途.....	(76)
复习思考题.....	(79)

第六章 三元合金相图

§ 6.1 三元合金相图的成分表示法.....	(81)
一、成分三角形(浓度三角形).....	(81)
二、直角坐标表示法.....	(83)
§ 6.2 三元系中的杠杆定律及重心法则.....	(84)
一、杠杆定律.....	(84)
二、重心法则.....	(84)
§ 6.3 三元匀晶相图.....	(85)
一、相图分析.....	(85)
二、合金的结晶过程.....	(85)
三、等温截面(水平截面).....	(86)
四、变温截面(垂直截面).....	(87)
五、等温线投影图.....	(88)
§ 6.4 三元共晶相图.....	(89)

一、相图分析.....	(89)
二、合金的结晶过程.....	(90)
三、等温截面(水平截面).....	(91)
四、变温截面(垂直截面).....	(92)
§ 6.5 三元相图应用举例.....	(93)
一、液相及固相等温投影图的应用.....	(93)
二、垂直截面的分析和应用.....	(93)
三、水平截面的分析和应用.....	(95)
复习思考题.....	(96)

第七章 金属的塑性变形与再结晶

§ 7.1 金属的塑性变形.....	(98)
一、金属变形的三个阶段.....	(98)
二、金属塑性变形的的基本方式.....	(99)
三、滑移机理.....	(103)
四、实际金属的塑性变形.....	(104)
§ 7.2 塑性变形对金属组织与性能的影响.....	(106)
一、晶粒变形和亚结构的形成.....	(106)
二、加工硬化.....	(107)
三、形变织构.....	(108)
四、残余内应力.....	(109)
§ 7.3 变形金属在加热时组织与性能的变化.....	(109)
一、加热时组织和性能的变化.....	(110)
二、再结晶温度.....	(113)
三、再结晶退火后的晶粒度.....	(114)
§ 7.4 金属的热加工.....	(116)
一、热加工与冷加工的区别.....	(115)
二、热加工对金属组织与性能的影响.....	(115)
复习思考题.....	(117)

第八章 钢的热处理原理

§ 8.1 钢在加热时的转变.....	(118)
一、奥氏体的形成温度.....	(118)
二、奥氏体的形成.....	(119)
三、影响奥氏体形成的因素.....	(120)
四、奥氏体晶粒.....	(121)
§ 8.2 钢在冷却时的转变.....	(123)
一、过冷奥氏体等温转变曲线(C-曲线).....	(124)
二、过冷奥氏体在连续冷却中的转变.....	(127)
§ 8.3 过冷奥氏体转变产物的组织形态与性能.....	(129)
一、珠光体类型组织形态与性能.....	(129)

二、马氏体组织形态和性能	(131)
三、贝氏体类型组织形态与性能	(134)
§ 8.4 过冷奥氏体转变产物的形成过程	(136)
一、珠光体的形成过程	(136)
二、贝氏体的形成过程	(138)
三、马氏体形成特点	(139)
复习思考题	(140)

第九章 钢的热处理工艺

§ 9.1 钢的正火与退火	(142)
一、钢的退火	(142)
二、钢的正火	(146)
§ 9.2 钢的淬火	(147)
一、淬火的目的是	(147)
二、淬火工艺参数的确定	(147)
三、淬火介质	(148)
四、常用的淬火方法	(150)
§ 9.3 钢的淬透性	(152)
一、淬透性的意义	(152)
二、淬透性的测定及表示方法	(154)
§ 9.4 钢的回火转变和钢的回火	(155)
一、淬火钢回火时的组织转变	(155)
二、淬火钢回火后机械性能的变化	(157)
三、回火的种类及应用	(159)
§ 9.5 钢的表面热处理	(160)
一、概 述	(160)
二、感应加热表面淬火	(160)
三、火焰加热表面淬火	(162)
§ 9.6 钢的化学热处理	(162)
一、钢的渗碳	(163)
二、钢的氮化	(166)
三、钢的碳氮共渗	(167)
四、离子氮化法	(169)
复习思考题	(171)

第十章 合金钢

§ 10.1 合金钢的分类及编号	(173)
一、合金钢的分类	(173)
二、合金钢的编号	(174)
§ 10.2 合金元素在钢中的作用	(175)
一、合金元素与钢中铁和碳的作用及对铁碳相图的影响	(175)

二、合金元素在钢中的分布	(178)
三、合金元素对钢在热处理时组织转变的影响	(179)
四、合金元素对钢的机械性能和工艺性能的影响	(182)
§ 10.3 合金钢的冶金缺陷	(185)
一、白点	(185)
二、不正常断口	(187)
三、带状组织	(187)
§ 10.4 合金结构钢	(188)
一、普通低合金钢	(188)
二、合金调质钢	(189)
三、氮化钢	(193)
四、渗碳钢	(194)
五、弹簧钢	(196)
§ 10.5 合金工具钢	(198)
一、刃具钢	(198)
二、模具钢	(204)
三、量具钢	(206)
§ 10.6 滚动轴承钢	(207)
一、工作条件及性能要求	(207)
二、轴承钢的冶金质量要求	(207)
三、轴承钢的化学成分	(207)
四、轴承钢的热处理	(208)
§ 10.7 特殊性能钢	(209)
一、不锈钢耐酸钢	(209)
二、耐热钢	(212)
三、耐磨钢	(213)
复习思考题	(215)

第十一章 铸 铁

§ 11.1 灰口铸铁	(217)
一、灰口铸铁的组织 and 性能	(217)
二、灰口铸铁组织的形成过程	(218)
三、影响灰口铸铁组织的因素	(219)
四、灰口铸铁的变质处理	(220)
五、灰口铸铁的牌号及其应用	(220)
六、灰口铸铁的热处理	(221)
§ 11.2 可锻铸铁	(221)
一、可锻铸铁的组织、性能及牌号	(221)
二、黑心可锻铸铁的退火处理	(222)
§ 11.3 球墨铸铁	(223)
一、球墨铸铁的组织、性能及用途	(223)
二、球墨铸铁的热处理	(224)

§ 11.4 蠕墨铸铁.....	(225)
§ 11.5 合金铸铁.....	(225)
一、耐磨合金铸铁.....	(226)
二、耐热合金铸铁.....	(226)
三、耐酸合金铸铁.....	(226)
复习思考题.....	(227)

第十二章 非铁金属及其合金

§ 12.1 铝及其合金	(228)
一、纯 铝.....	(228)
二、铝合金概述.....	(228)
三、铸造铝合金.....	(230)
四、变形铝合金.....	(232)
§ 12.2 铜及其合金	(234)
一、纯 铜.....	(234)
二、黄 铜.....	(235)
三、青 铜.....	(236)
复习思考题.....	(238)
附 录	(239)

第一章 金属的晶体结构

§1.1 一般概念

一、金属和金属键

(一) 金属是晶体

自然界中，除少数物质，如普通玻璃、松香、赛璐珞等外，绝大多数固体状态下的无机物都是晶体。晶体的特点是：①晶体中的原子（离子或分子）呈一定几何形状的规则排列，因此，晶体一般具有规则的外形；②具有固定熔点；③各向异性，即在不同方向上具有不同的性能。在这三点中，原子规则排列是决定其它两个特点的。由于在非晶体中原子无规则排列，至多有些局部的短程规则排列，因此非晶体无固定的熔点，也没有各向异性，而是各向同性。近代的研究方法（例如：X射线晶体结构分析法等）证明：金属和合金在固态下绝大多数是晶体。但由于结晶条件的限制金属晶体一般没有规则的外形。

有些特殊成分的合金，由固态激冷可以制成非晶态金属，属于另一学科领域，本书不予赘述。

晶体的最大特点是内部原子的规则排列，因此，研究金属的晶体结构，就是研究金属晶体内部原子排列的规律性。

(二) 金属键

各种元素的原子都是由带正电荷的原子核和绕核运动的带负电荷的一定数目的电子所构成的。金属原子的结构特点是价电子少（一般是1~2个，不超过4个），而且它们与原子核的结合较弱，容易摆脱原子核的束缚而变成自由电子。因此，当大量金属原子聚合在一起构成金属晶体时，绝大部分金属原子都将失去其价电子变成正离子，正离子按着一定的几何规律加以排列，并在各自固定的位置上做微弱的热振动，而所有的价电子则都呈自由电子的形式在各离子间自由地作穿梭运动，为整个金属中的原子所共有，形成所谓“电子云”（又称电子气）。因此，在金属晶体中存在着自由电子与正离子之间的引力，同时这种引力与离子和离子之间、电子和电子之间的相互排斥力平衡，金属晶体的这种结合方式称为金属键，如图1-1所示。

正是因为金属的结合方式是金属键，即金属晶体中存在着大量自由电子，因此金属晶体具有一系列与非金属晶体不同的特点，如：较高的强度，良好的塑性，高的导电性、导热性、正的电阻温度系数，以及具有金属光泽等；同时，也正是由于这种坚强的金属键存在，金属晶体大都有趋于紧密排列的倾向，以致原子排列组合形式的数目大为减少，而只具有少数几种高对称性的晶格形式的特点，而非金属晶体一般则大都具有比较复杂的晶格，对称性较低。

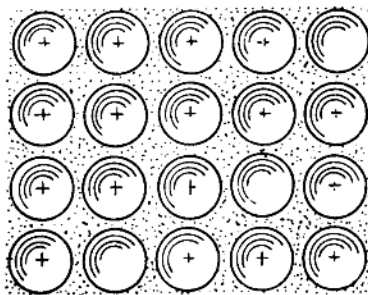


图 1-1 金属键示意图

二、晶体学的基本知识

晶体中的各类质点（包括离子、电子等）虽然都是在不停的运动着，但是，通常在讨论晶体的一般结构时，作为简化分析，是从“静态”出发，把构成晶体的原子都看成是一个个固定的小球，而不再把它们细分为离子与电子，认为晶体是由一个个原子的小球按一定的几何形式排列起来的，如图 1-2(a)所示。

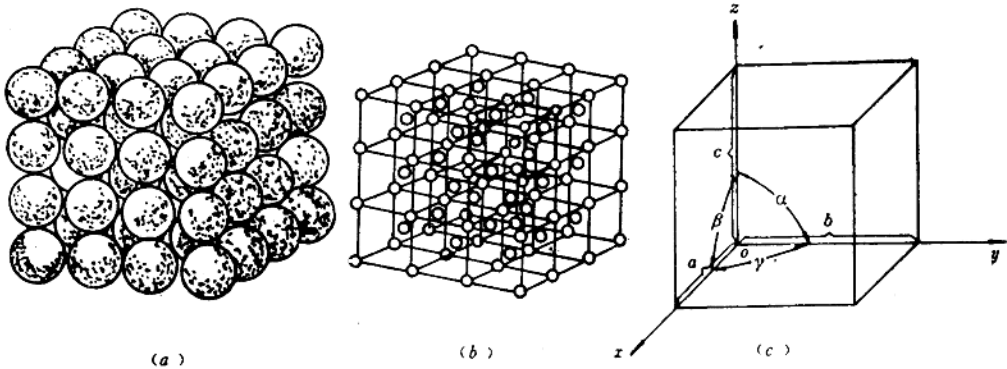


图 1-2 晶体、晶格和晶胞的示意图
(a) 晶体； (b) 晶格； (c) 晶胞

晶格 晶体中各原子都是有规则的，紧密堆积在一起的，并且不同的晶体有不同的排列方式。可用一些假想的几何线条将各原子的中心连接起来，并将每个原子视为一个几何质点，这样就得到了一个抽象化了的几何空间格架。此时，各原子均位于空间格架的各个“结点”上，这种抽象地、假想地、用于描述原子在晶体中排列形式的几何空间格架（见图 1-2(b)），就叫做结晶格子，简称晶格。晶格的结点是原子（离子）平衡中心的位置。

晶胞 由于晶体中原子的排列具有周期性的特点，因此，为了简便起见，通常只从晶格中选取一个能够完全反映晶格特征的，最小的几何单元来分析晶体中原子排列规律，这个最小的几何单元称为“晶胞”，如图 1-2(c)。不难看出，整个晶格实际上是由许多大小、形状和位向相同的晶胞在空间重复堆砌而成的。所以，研究晶胞的特征，也就是研究了晶体结构。

如图 1-2(c)所示，晶胞的大小和形状常以晶胞的棱边长度 a, b, c 及棱间夹角 α, β, γ 来表示。图中沿晶胞三条相交于一点的棱边设置三个坐标轴 x, y, z ，习惯上，以原点 O 的前、右、上方为轴的正方向，反之为负方向。

晶格常数是晶胞的棱边长度。其度量单位为 nm ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$)。

根据 $a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$, 6 个参数组合的可能方式或根据晶胞自身的对称性，可将晶体结构分为 7 个晶系（见表 1-1）。布拉格证明，在 7 个晶系中，存在 7 种简单晶胞（晶胞原子数为 1）和 7 种复合晶胞（晶胞原子数为 2），共 14 种晶胞，如图 1-3。表 1-2 为在元素周期中给出了各元素的晶体结构等。

表 1-1

晶体结构的 7 种晶系和晶胞

晶系	晶胞	轴(棱边)之间的夹角
三斜	简单三斜	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$
单斜	简单单斜 底心单斜	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
正交	简单正交 底心正交 体心正交 面心正交	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
六方	简单六方	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
菱方	简单菱方	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
正方	简单正方 体心正方	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
立方	简单立方 体心立方 面心立方	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

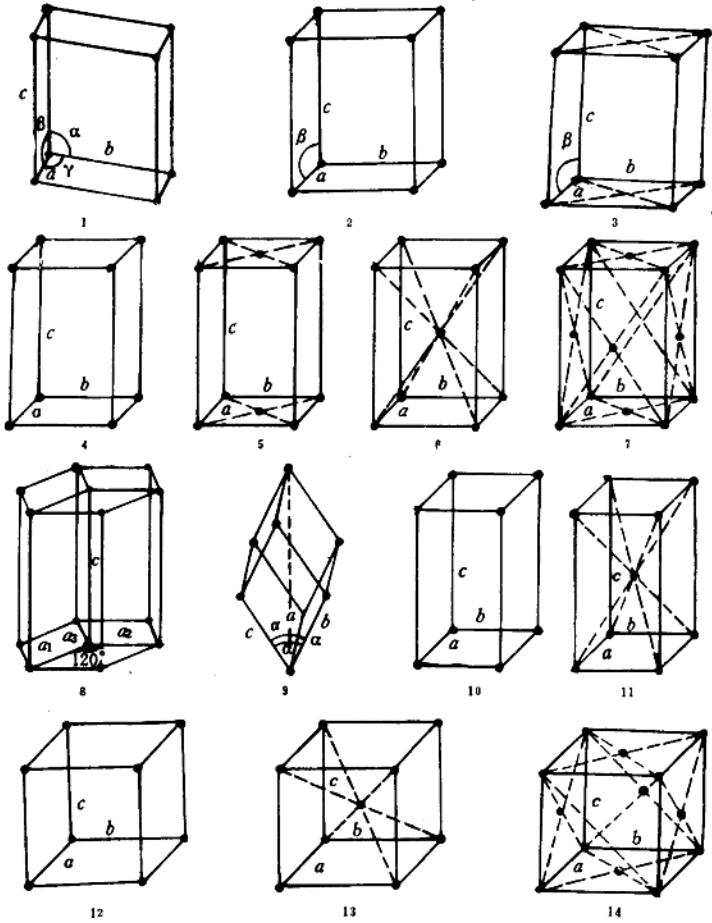


图 1-3 14 种晶胞示意图

1. 简单三斜; 2. 简单单斜; 3. 底心单斜; 4. 简单正交; 5. 底心正交; 6. 体心正交; 7. 面心正交;
8. 简单六方; 9. 简单菱方; 10. 简单正方; 11. 体心正方; 12. 简单立方; 13. 体心立方; 14. 面心立方

表 1.2

同周期中部分元素的晶体结构、原子直径及核外电子分布总表

周期	I A	II A	III B	IV B	V B	VIB	VII B	VIII B	IB	IIB	IVA	VA	VIA																	
1	H 1 0.92 氢 1s ¹	He 2 2.25 氦 2s ²	Li 3 3.13 锂 2s ²	Be 4 2.25 铍 2s ²	B 5 1.94 硼 2s ² 2p ¹	C 6 1.54 碳 2s ² 2p ²	N 7 1.42 氮 2s ² 2p ³	O 8 1.20 氧 2s ² 2p ⁴	Na 11 3.83 钠 3s ¹	Mg 12 3.20 镁 3s ²	Al 13 2.85 铝 3s ² 3p ¹	Si 14 2.67 硅 3s ² 3p ²	P 15 2.2 磷 3s ² 3p ³	S 16 2.08 硫 3s ² 3p ⁴																
2	Na 11 3.83 钠 3s ¹	Mg 12 3.20 镁 3s ²	Al 13 2.85 铝 3s ² 3p ¹	Si 14 2.67 硅 3s ² 3p ²	P 15 2.2 磷 3s ² 3p ³	S 16 2.08 硫 3s ² 3p ⁴	Cl 17 1.99 氯 3s ² 3p ⁵	Ar 18 1.91 氩 3s ² 3p ⁶	K 19 4.76 钾 4s ¹	Ca 20 3.93 钙 4s ²	Sc 21 3.27 钪 3d ¹ 4s ²	Ti 22 2.93 钛 3d ² 4s ²	V 23 2.71 钒 3d ³ 4s ²	Cr 24 2.57 铬 3d ⁵ 4s ¹	Mn 25 3.86 锰 3d ⁵ 4s ²	Fe 26 2.54 铁 3d ⁶ 4s ²	Co 27 2.5 钴 3d ⁷ 4s ²	Ni 28 2.49 镍 3d ⁸ 4s ²	Cu 29 2.55 铜 3d ¹⁰ 4s ¹	Zn 30 2.75 锌 3d ¹⁰ 4s ²	Ga 31 2.7 镓 4s ² 4p ¹	Ge 32 2.79 锗 4s ² 4p ²	As 33 2.7 砷 4s ² 4p ³	Se 34 2.7 硒 4s ² 4p ⁴						
3	K 19 4.76 钾 4s ¹	Ca 20 3.93 钙 4s ²	Sc 21 3.27 钪 3d ¹ 4s ²	Ti 22 2.93 钛 3d ² 4s ²	V 23 2.71 钒 3d ³ 4s ²	Cr 24 2.57 铬 3d ⁵ 4s ¹	Mn 25 3.86 锰 3d ⁵ 4s ²	Fe 26 2.54 铁 3d ⁶ 4s ²	Co 27 2.5 钴 3d ⁷ 4s ²	Ni 28 2.49 镍 3d ⁸ 4s ²	Cu 29 2.55 铜 3d ¹⁰ 4s ¹	Zn 30 2.75 锌 3d ¹⁰ 4s ²	Ga 31 2.7 镓 4s ² 4p ¹	Ge 32 2.79 锗 4s ² 4p ²	As 33 2.7 砷 4s ² 4p ³	Se 34 2.7 硒 4s ² 4p ⁴	Br 35 2.8 溴 4s ² 4p ⁵	Kr 36 2.97 氪 4s ² 4p ⁶	Rb 37 4.95 铷 5s ¹	Sr 38 4.26 锶 5s ²	Y 39 3.69 钇 4d ¹ 5s ²	Zr 40 3.19 锆 4d ² 5s ²	Nb 41 2.94 铌 4d ⁴ 5s ¹	Ta 73 2.94 钽 5d ³ 6s ²	Hf 72 2.94 铪 5d ² 6s ²	La~Lu 镧系	104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118			
4	Rb 37 4.95 铷 5s ¹	Sr 38 4.26 锶 5s ²	Y 39 3.69 钇 4d ¹ 5s ²	Zr 40 3.19 锆 4d ² 5s ²	Nb 41 2.94 铌 4d ⁴ 5s ¹	Ta 73 2.94 钽 5d ³ 6s ²	Hf 72 2.94 铪 5d ² 6s ²	La~Lu 镧系	104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118	Mo 42 2.86 钼 4d ⁵ 5s ¹	Tc 43 2.71 锝 4d ⁵ 5s ²	Ru 44 2.67 钌 4d ⁷ 5s ¹	Rh 45 2.68 铑 4d ⁸ 5s ¹	Pd 46 2.69 钯 4d ¹⁰ 5s ⁰	Ag 47 2.88 银 4d ¹⁰ 5s ¹	Cd 48 3.04 镉 4d ¹⁰ 5s ²	In 49 3.14 铟 5s ² 5p ¹	Sn 50 3.16 锡 5s ² 5p ²	Sb 51 3.23 锑 5s ² 5p ³	Te 52 3.23 碲 5s ² 5p ⁴	Ba 56 3.22 钡 6s ²	La~Lu 镧系	104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118	Pb 82 3.49 铅 6s ² 6p ²	Bi 83 3.64 铋 6s ² 6p ³	Po 84 3.64 钋 6s ² 6p ⁴	At 85 3.64 砹 6s ² 6p ⁵	Fr 87 3.64 钫 6s ² 6p ⁶	Ra 88 3.64 镭 6s ² 6p ⁶	Ac~Lr 锕系
5	Fr 87 3.64 钫 6s ² 6p ⁶	Ra 88 3.64 镭 6s ² 6p ⁶	Ac~Lr 锕系	104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118	Mo 42 2.86 钼 4d ⁵ 5s ¹	Tc 43 2.71 锝 4d ⁵ 5s ²	Ru 44 2.67 钌 4d ⁷ 5s ¹	Rh 45 2.68 铑 4d ⁸ 5s ¹	Pd 46 2.69 钯 4d ¹⁰ 5s ⁰	Ag 47 2.88 银 4d ¹⁰ 5s ¹	Cd 48 3.04 镉 4d ¹⁰ 5s ²	In 49 3.14 铟 5s ² 5p ¹	Sn 50 3.16 锡 5s ² 5p ²	Sb 51 3.23 锑 5s ² 5p ³	Te 52 3.23 碲 5s ² 5p ⁴	Ba 56 3.22 钡 6s ²	La~Lu 镧系	104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118	Pb 82 3.49 铅 6s ² 6p ²	Bi 83 3.64 铋 6s ² 6p ³	Po 84 3.64 钋 6s ² 6p ⁴	At 85 3.64 砹 6s ² 6p ⁵	Fr 87 3.64 钫 6s ² 6p ⁶	Ra 88 3.64 镭 6s ² 6p ⁶	Ac~Lr 锕系					
6	Fr 87 3.64 钫 6s ² 6p ⁶	Ra 88 3.64 镭 6s ² 6p ⁶	Ac~Lr 锕系	104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118	Mo 42 2.86 钼 4d ⁵ 5s ¹	Tc 43 2.71 锝 4d ⁵ 5s ²	Ru 44 2.67 钌 4d ⁷ 5s ¹	Rh 45 2.68 铑 4d ⁸ 5s ¹	Pd 46 2.69 钯 4d ¹⁰ 5s ⁰	Ag 47 2.88 银 4d ¹⁰ 5s ¹	Cd 48 3.04 镉 4d ¹⁰ 5s ²	In 49 3.14 铟 5s ² 5p ¹	Sn 50 3.16 锡 5s ² 5p ²	Sb 51 3.23 锑 5s ² 5p ³	Te 52 3.23 碲 5s ² 5p ⁴	Ba 56 3.22 钡 6s ²	La~Lu 镧系	104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118	Pb 82 3.49 铅 6s ² 6p ²	Bi 83 3.64 铋 6s ² 6p ³	Po 84 3.64 钋 6s ² 6p ⁴	At 85 3.64 砹 6s ² 6p ⁵	Fr 87 3.64 钫 6s ² 6p ⁶	Ra 88 3.64 镭 6s ² 6p ⁶	Ac~Lr 锕系					
7	Fr 87 3.64 钫 6s ² 6p ⁶	Ra 88 3.64 镭 6s ² 6p ⁶	Ac~Lr 锕系	104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118	Mo 42 2.86 钼 4d ⁵ 5s ¹	Tc 43 2.71 锝 4d ⁵ 5s ²	Ru 44 2.67 钌 4d ⁷ 5s ¹	Rh 45 2.68 铑 4d ⁸ 5s ¹	Pd 46 2.69 钯 4d ¹⁰ 5s ⁰	Ag 47 2.88 银 4d ¹⁰ 5s ¹	Cd 48 3.04 镉 4d ¹⁰ 5s ²	In 49 3.14 铟 5s ² 5p ¹	Sn 50 3.16 锡 5s ² 5p ²	Sb 51 3.23 锑 5s ² 5p ³	Te 52 3.23 碲 5s ² 5p ⁴	Ba 56 3.22 钡 6s ²	La~Lu 镧系	104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118	Pb 82 3.49 铅 6s ² 6p ²	Bi 83 3.64 铋 6s ² 6p ³	Po 84 3.64 钋 6s ² 6p ⁴	At 85 3.64 砹 6s ² 6p ⁵	Fr 87 3.64 钫 6s ² 6p ⁶	Ra 88 3.64 镭 6s ² 6p ⁶	Ac~Lr 锕系					

元素晶格代表符号

原子序数 — 26 — 元素符号 — Fe — 原子直径

晶体结构 — 铁 — 核外电子的分布

面心立方 □ 体心立方 □ 金刚石型立方 □ 复杂立方 □ 正文 □ 六方 ○

密排六方 ◇ 正方 □ 菱形 □ 单斜 □

§1.2 典型的金属晶体结构

在已知的 80 余种金属元素中，除少数十几种金属具有复杂的晶体结构之外，大多数金属具有比较简单的晶体结构。其中最典型、最常见的金属晶体结构有三种，就是体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。

一、典型的金属晶体结构的类型

(一) 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞（图 1-4）除 8 个角上有原子外，在晶胞的中心也有一个原子，其晶格常数 $a = b = c$ ，故通常用一个常数 a 表示。在立方体的对角线上原子是紧密排列的。具有体心立方晶格的常用金属有 α -Fe, α -Cr, Mo, W, V, Nb, Ta, β -Ti, Li 等。

(二) 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞（图 1-5），在晶胞的每个角上有一个原子，并且在 6 个面的中心也有一个原子。具有面心立方晶格的常用金属有 Cu, Al, Ni, Ag, γ -Fe, β -Co, Au, Pt 等。

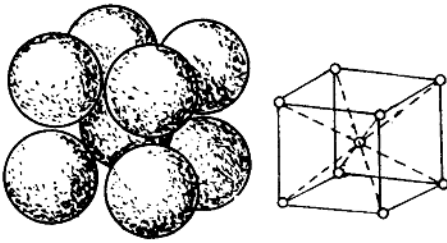


图 1-4 体心立方晶胞

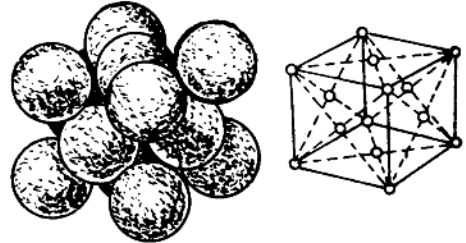


图 1-5 面心立方晶胞

(三) 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞（图 1-6），在六方柱体的 12 个角上各有一个原子，上、下六角形底面中心各有一个原子，在晶胞中间还有 3 个原子。属于密排六方晶格的金属有 Zn, Mg, Be, α -Ti, α -Zr, α -Co, Cd 等。

除以上三种晶格以外，少数金属还具有其他类型的晶格，但一般很少遇到。

二、晶格结构中的几个重要参数

(一) 晶胞中的原子数

1. 体心立方晶胞

由于晶体是由许多晶胞堆砌而

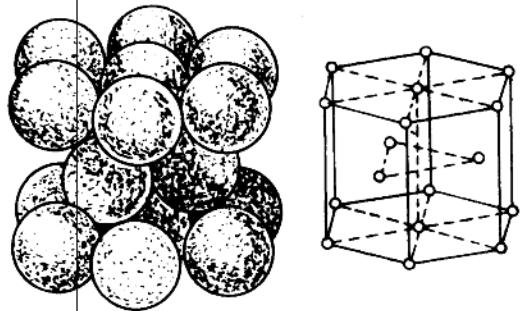


图 1-6 密排六方晶胞

成，因此，体心立方晶胞 8 个角上的原子是同属于与其相邻的 8 个晶胞所共有，每个晶胞实际上只占有 $1/8$ 个原子（图 1-7(a)）；但立方体中心那个原子却为每个晶胞所独有，所以，每个晶胞中的原子数为：

$$\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2 \text{ (个)}$$

2. 面心立方晶胞

和体心立方结构一样，其晶胞角上的原子也为 8 个相邻的晶胞所共有，但 6 个面中心的原子则只属于两个晶胞所共有（图 1-7(b)），因此，每个晶胞中的原子数为：

$$\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4 \text{ (个)}$$

3. 密排六方晶胞

六方柱体 12 个角上的原子为 6 个相邻的晶胞所共有，晶胞中间的 3 个原子为每个晶胞所独有，上下底面中心的原子为两个晶胞所共有（图 1-7(c)），因此，每个晶胞的原子数为：

$$\frac{1}{6} \times 12 + 3 + \frac{1}{2} \times 2 = 6 \text{ (个)}$$

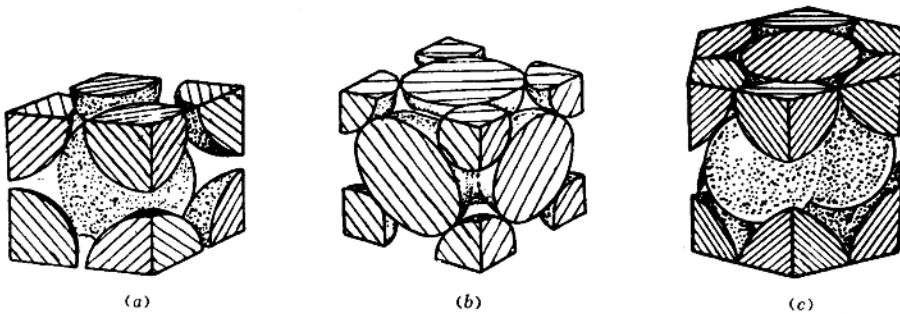


图 1-7 三种典型晶胞原子数计算示意图
(a) 体心立方晶胞；(b) 面心立方晶胞；(c) 密排六方晶胞

(二) 晶格常数

体心立方和面心立方晶胞的各棱边长度相等，且 3 个晶轴互相垂直，因此其晶格常数 $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，故用一个常数 a 便足以表征其晶胞大小。

密排六方的晶胞需有 2 个晶格常数才能衡量其尺寸大小。通常用六角底面的边长 a 和上、下两底面的间距 c 来表示， c 与 a 之比称为轴比。 $c/a = 1.633$ 时为最紧密排列。

(三) 原子半径

原子半径(r) 通常是指晶胞中原子密度最大的方向上相邻两原子中心距离的一半，或晶胞中相距最近的两个原子中心距离的一半。它与晶格常数有一定的关系，是金属原子行为的一个重要参数。体心立方晶胞中原子相距最近的方向是体对角线，所以原子半径 $r = \frac{\sqrt{3}}{4} a$ ；面心立方晶胞中原子相距最近的方向是面对角线，所以原子半径 $r = \frac{\sqrt{2}}{4} a$ ；密排六方晶胞

中原子相距最近的方向是上、下底面的对角线，所以原子半径 $r = \frac{1}{2}a$ 。

应当指出，原子半径并不是一成不变的，即使是同一金属元素，也随结合键的类型不同和配位数的大小而改变。因此，当使用各元素的原子半径数据时，应予以注意。

(四) 配位数

金属晶体中原子排列的致密程度（即晶格中原子所占有的体积），可以用晶格的配位数来描述。配位数为晶格中与任一原子处于相等距离并相距最近的原子数目。配位数愈大，则原子排列的紧密程度愈高，由图 1-8 可见，在体心立方晶格中，原子间的最近距离 $d = \frac{\sqrt{3}}{2}a$ ，距任意原子为 d 的相邻原子数为 8。所以体心立方晶格的配位数是 8。同样，从图中可以看出，面心立方晶格和密排六方晶格的配位数都是 12。面心立方和密排六方晶格中的原子是最紧密排列的。

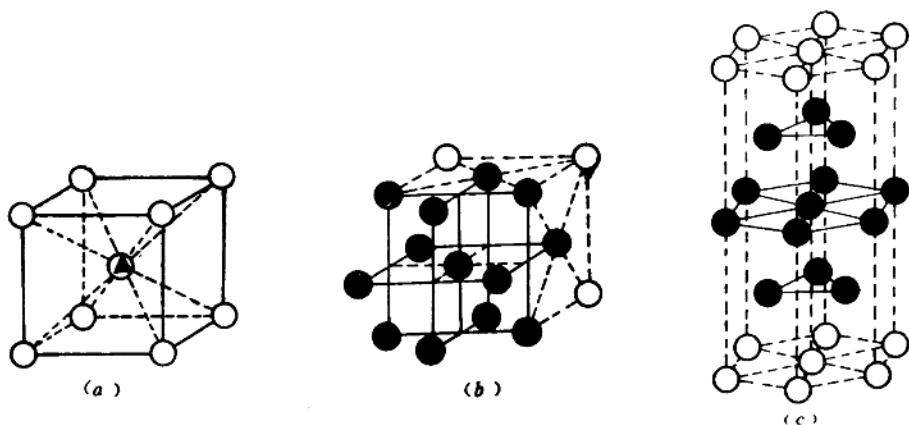


图 1-8 3 种典型晶格配位数示意图
(a) 体心立方； (b) 面心立方； (c) 密排六方

(五) 致密度

晶胞中原子本身所占有的体积百分数称为晶格的致密度（或称密排系数），即

$$\text{致密度} = \frac{\text{晶胞中原子所占有的体积}}{\text{晶胞的体积}} = \frac{\text{晶胞中原子数} \times \text{每一原子体积}}{\text{晶胞的体积}}$$

因此，对于体心立方晶格

$$\text{致密度} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{a^3} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{4} a\right)^3}{a^3} \approx 0.68 = 68\%$$

对于面心立方晶格

$$\text{致密度} = \frac{4 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{a^3} = \frac{4 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{2}}{4} a\right)^3}{a^3} \approx 0.74 = 74\%$$

对于密排六方晶格