

机电工程系列教材



# 机械材料

● 梁耀能 主编

华南理工大学出版社

# 编辑委员会

顾 问：刘正义 李元元 黄石生 谢存禧

陈统坚 郑时雄

主 任：朱 敏

副主任：曾志新 梁耀能 林 颖

委 员：夏 伟 李杞仪 朱文坚 黄 平

邹日荣 李尚周 曾美琴 肖晓玲

刘桂雄 王丹平 张 铁 汤 勇

黄镇昌 阮 锋 许 纪

策划编辑：赖淑华 吴兆强

# 出版说明

为了适应高等学校专业调整后教学改革的需要，我社在华南理工大学机电工程系的协助下，组织出版了这套“机电工程类系列教材”。根据教育部新实施的引导性专业目录，按照拓宽专业口径、增强适应性的原则，采用重组、整合、交叉、优化等手段，对本系列教材的课程体系、教学内容、教学方法进行了改革和探索，重构 21 世纪机电类专业人才应具备的能力与知识结构，以适应社会主义市场经济和科学技术发展的需要。

首批出版的教材有：

《机器人学》（张铁主编）

《机械工程材料》（梁耀能主编）

《机械原理》（李杞仪主编）

《机械设计》（朱文坚主编）

《机械设计基础》（黄平主编）

《创新思维与实践》（李杞仪主编）

《ISO9000 族系列标准与实施》（李杞仪主编）

《机械控制工程基础》（许纪、汤勇主编）

《互换性与测量技术》（黄镇昌主编）

《几何量公差设计与检测》

华南理工大学出版社

2001 年 4 月

机电工程系列教材

# 机械工程材料

主编 梁耀能  
参编 梁思祖 李伯林  
      罗堪昌  
主审 黄拿灿

华南理工大学出版社

·广州·

## 内 容 简 介

本书主要包括：金属学基本知识、热处理基本原理及工艺、机械工程常用金属材料、无机非金属材料及有机高分子材料、机械零件选材及工艺路线分析等。

本教材主要面向机械冷加工，兼顾机械热加工；常用工程材料以金属材料为主，注重工程应用，注意内容更新，反映材料领域的新发展。采用最新的国家标准。对广东地区使用较多的外国材料也作了介绍。本教材适用于“机械工程及自动化”、“材料成型及控制工程”、“机械电子工程”等专业使用，也可作为相关技术人员参考。本教材参考教学学时为 48 2 64 学时。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

机械工程材料/梁耀能主编. —广州：华南理工大学出版社，2002.2

(机电工程系列教材)

ISBN 7-5623-1783-6

1. 机... I. 梁... S. 机械工程材料-高等学校教材 O. TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 003796 号

总 发 行：华南理工大学出版社 (广州五山华南理工大学 17 号楼，邮编 510640)

发行电话：020-87113487 87111048 (传真)

E-mail：[scut202@scut.edu.cn](mailto:scut202@scut.edu.cn)

<http://www2.scut.edu.cn/press>

责任编辑：吴兆强

印 刷 者：广州市新明光印刷有限公司

开 本：787×1092 1/16 印张：18.5 字数：462 千

版 次：2002 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

印 数：1—3000 册

定 价：29.50 元

版权所有 盗版必究

## 前 言

根据 1998 年教育部颁布的本科引导性专业目录，“机械工程及自动化”专业涵盖了“机械设计制造及其自动化”、“材料成型及控制工程”、“机械电子工程”等专业，是一个机电结合、冷热加工结合的机械类大专业。

《机械工程材料》是“机械工程及自动化”专业的主干课程之一。针对该专业的特点，本课程在阐述材料科学基本理论及热处理基本原理的同时，着重研究材料的成分、组织结构与性能之间的相互关系及其变化规律，指出材料强韧化的途径，使学生能根据机械零件、工程构件和工模具的使用条件及性能要求，合理选用材料，合理制订热处理技术要求，选定热处理工艺方法，正确安排冷热加工工艺路线，并为从事机械设计与制造、材料加工、机械产品质量控制以及后继课程的学习奠定必要的基础。

本教材的定位是：主要面向机械冷加工，兼顾机械热加工；常用工程材料以金属材料为主，注重工程应用。本教材注意内容的更新，反映材料领域的新发展，在介绍常用金属材料分类与编号时，采用了最新的国家标准，并附上新旧钢号对照表，便于读者对照，同时对近年来广东地区使用较多的外国材料也作了介绍。书中收集了一些常用材料的基本数据，对常用工模具钢的金相标准也作简要介绍，供专业人员参考。

本书共 11 章。其中第一、二、三、四、五章由梁耀能编写；第六、十章由李伯林编写；第七章由罗堪昌编写；第八、九、十一章由梁思祖编写；全书由曾美琴校对，广东工业大学黄拿灿教授主审。

限于编者水平，书中如存在某些缺点与错误，敬请读者批评指正。

编 者

2001 年 12 月

# 目 录

绪论.....	(1)
第一章 金属的晶体结构.....	(3)
第一节 金属的晶体结构.....	(3)
第二节 实际金属的晶体结构 .....	(12)
第二章 纯金属的结晶 .....	(21)
第一节 纯金属的结晶 .....	(21)
第二节 铸锭的组织与缺陷 .....	(28)
第三章 金属的塑性变形与再结晶 .....	(31)
第一节 金属的变形特性和常用力学性能指标 .....	(31)
第二节 金属的塑性变形 .....	(38)
第三节 塑性变形对组织和性能的影响 .....	(43)
第四节 回复与再结晶 .....	(45)
第五节 金属的热加工 .....	(49)
第四章 合金的相结构与二元合金相图 .....	(52)
第一节 合金的相结构 .....	(52)
第二节 二元合金相图的建立 .....	(56)
第三节 匀晶相图 .....	(59)
第四节 共晶相图 .....	(62)
第五节 包晶相图 .....	(67)
第六节 形成稳定化合物的相图 .....	(69)
第七节 合金的性能与相图的关系 .....	(70)
第五章 铁碳合金 .....	(72)
第一节 铁碳合金的组元及基本相 .....	(72)
第二节 Fe-Fe <sub>3</sub> C 相图分析 .....	(74)
第三节 铁碳合金的平衡结晶过程及组织 .....	(77)
第四节 含碳量对铁碳合金平衡组织和性能的影响 .....	(85)
第五节 碳钢 .....	(87)
第六章 钢的热处理 .....	(95)
第一节 钢在加热时的组织转变 .....	(97)
第二节 钢在冷却时的组织转变.....	(101)
第三节 钢的退火与正火.....	(114)
第四节 钢的淬火.....	(117)

第五节	钢的回火.....	(125)
第六节	钢的表面淬火.....	(129)
第七节	钢的化学热处理.....	(132)
第八节	其他热处理工艺简介.....	(139)
第七章	合金钢.....	(144)
第一节	概述.....	(144)
第二节	合金元素在钢中的作用.....	(145)
第三节	合金结构钢.....	(150)
第四节	轴承钢.....	(162)
第五节	合金工具钢.....	(164)
第六节	不锈钢和耐热钢.....	(184)
第七节	粉末冶金材料.....	(194)
第八章	铸铁.....	(202)
第一节	概述.....	(202)
第二节	普通灰铸铁.....	(207)
第三节	可锻铸铁.....	(210)
第四节	球墨铸铁.....	(212)
第五节	蠕墨铸铁.....	(216)
第六节	特殊性能铸铁.....	(219)
第九章	有色金属及其合金.....	(222)
第一节	铝及其合金.....	(222)
第二节	铜及其合金.....	(229)
第三节	轴承合金.....	(234)
第十章	机械工程非金属材料.....	(239)
第一节	概述.....	(239)
第二节	高分子材料.....	(239)
第三节	陶瓷材料.....	(253)
第四节	复合材料.....	(256)
第十一章	机械零件选材及加工路线分析.....	(260)
第一节	机械零件的失效形式.....	(260)
第二节	选材的基本原则.....	(261)
第三节	热处理方案的选择及热理技术条件的标注.....	(266)
第四节	预防和控制热处理变形的方法及措施.....	(268)
第五节	典型零件选材与工艺分析.....	(271)
附表 1	国内外常用钢号近似对照表.....	(281)
附表 2	洛氏、布氏、维氏硬度及强度对照表.....	(285)
参考文献	.....	(286)

# 绪 论

材料是人类赖以生活和生产的物质基础。生产技术的进步是和新材料的应用密切相关的，历史学家往往用制造工具的原材料来作为社会发展的标志。从原始社会以来，人类经历了石器时代、青铜器时代、铁器时代。如今，我们已经跨进按照人们的需要设计材料、合成材料的新时代。

工程材料通常可按成分特点分为金属材料、无机非金属材料和高分子材料三大类。复合材料则是由两种或两种以上的基本材料组成。按性能特点，工程材料可分为结构材料和功能材料两大类。结构材料以力学性能为主，兼有一定的物理、化学性能；功能材料以特殊的物理、化学性能为主，如超导、激光、半导体、形状记忆和能量转换等材料。工程材料的研究对象主要是结构材料。在各种机械设备中，目前应用最广、最多的仍然是金属材料，约占整个材料的 80% 2 90%，这是由于金属材料具有比其他材料远为优越的使用性能和工艺性能。无机非金属材料 and 有机高分子材料用于机械工程也越来越多，并逐步显示出广阔的发展前景。本书主要研究金属材料，并对无机非金属材料 and 有机高分子材料作简要介绍。

金属材料在工程上表现出来的力学性能，是由金属内部的组织、结构所决定的。在金属学中，组织是指用肉眼或借助各种不同放大倍数的显微镜所观察到的金属材料内部的情景，包括晶粒的大小、形状、种类以及各种晶粒之间的相对数量和相对分布。习惯上用放大几十倍的放大镜或用肉眼所观察到的组织，称为低倍组织或宏观组织；用放大 100 2 2000 倍的光学显微镜所观察到的组织，称为显微组织；用放大几千倍到几十万倍的电子显微镜观察到的组织，称为电镜组织或精细组织。而结构是指原子集合体中各原子的具体组合方式。

生产实践告诉我们：不同化学成分的金属材料，性能迥然不同。例如，低碳钢软而韧，高碳钢硬而脆。金相分析表明，这是由于它们的组织不同所致。相同化学成分的金属材料，经过不同的加工过程，其性能也有很大差别。通过合理的加工方法来进一步提高金属材料的性能，是充分发挥金属材料潜力的重要方法之一。

机械产品（或系统）从构思到实现要经历设计和制造两个阶段。机械工程科学是研究机械产品（或系统）的性能、设计和制造的基础理论和技术的科学。机械冷加工和机械热加工是机械制造学科的两大大分支。机械冷加工主要是指利用切削的原理使工件成形而达到预定的设计要求的方法，这种方法能获得很高的精度和很低的粗糙度。机械热加工则是利用熔化、结晶、塑性变形、扩散、相变等各种物理化学变化使工件成形而达到预定的设计要求。从加工方法来说，热加工可分为铸造、塑性加工、焊接、热处理、表面改性等。

铸造是指将材料（包括金属、合金以及复合材料）熔化成液体，浇注于具有一定型腔的模具内，凝固成形。

塑性加工是指将钢锭或棒材、板材在一定温度下，通过锻压机械施加压力使之成形。

锻压工艺也包括在室温下使棒料或板料成形。

焊接是指将几个零件拼接成大的复杂的零件或构件。通过零件连接处的局部熔化或相互扩散，使零件紧密结合成一个整体。

热处理是指通过不同的加热和冷却方式使零件内部组织结构发生变化，从而得到所需的各种力学、物理及化学性能，它的特点是只改变或提高零件的性能而尽量避免改变零件的形状。

表面改性技术是改变零件表面的成分或组织结构，以提高机器零件的性能，包括化学热处理，物理、化学气相沉积，热喷涂等。

21 世纪机械制造业中，高效益及市场快速反应将是一个发展趋势。热加工方法具有少、无切削的优点，容易实现快速制造，因而仍是一个很有发展前景的学科领域。

机械产品的质量和可靠性与零件的材料成分、组织与制造质量密切相关。机械产品的失效往往是由其中某零件的失效引起的。工程设计人员在设计时，除进行结构设计和计算外，还应考虑选用何种材料，具备何种组织。零件在制造过程中会穿插多种冷热加工工序，这些加工工艺过程直接影响零件的表面质量（如尺寸精度、形状精度和粗糙度）和内在质量（如显微组织、力学性能、显微缺陷、残余应力、微裂纹等）。

《机械工程材料》是机械类各专业的重要技术基础课，本课程的任务就是：学习金属学及热处理的理论基础；掌握常用工程材料的成分、组织结构、性能及用途；学会根据零件的工作条件和失效形式，合理选材，制订热处理技术要求和正确安排冷热加工工艺路线；通过本课程的学习，为从事机械设计与制造、机械产品质量控制以及后续课程的学习奠定必要的基础。

学习本课程前，学生应先学完材料力学，参加过金工实习，对机械工程材料的加工过程及其应用有一定的感性认识。学习时要注意理论联系实际，特别要重视综合实验与生产实践。

# 第一章 金属的晶体结构

## 第一节 金属的晶体结构

### 一、金属原子间的结合

结构是决定金属材料性能的内在基本因素之一。要了解金属和合金的性能，必须先了解固态金属和合金中原子的聚集状态和分布规律、原子间的相互作用和结合方式，以及原子结合体的结构。

#### 1. 金属键

金属原子构造的特点是：其最外层电子数目很少，一般为 1~2 个，最多不超过 4 个，且与原子核结合力较弱，很容易脱离原子核的束缚变成自由电子，带负电荷。失去外层电子的金属称为正离子，带正电荷。在固态金属中，正离子按一定的规律在空间排列着，自由电子则在各离子之间自由地运动，为整个金属共有，形成所谓“电子气”。由于正离子和自由电子间的正负电荷产生吸引力，使金属原子结合成整体的金属晶体。金属原子的这种结合方式叫“金属键”结合（图 1-1）。

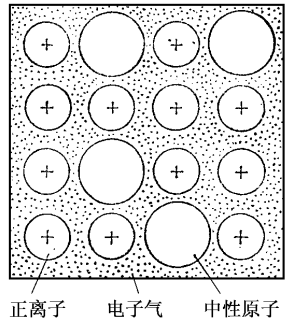


图 1-1 金属键的模型

根据金属键的本质，可解释金属的一些特性。例如，由于金属中自由电子的存在，在外加电场作用下，自由电子能够沿着电场方向作定向运动，形成电流，从而显示出良好的导电性。温度升高时，金属中离子的热振动加剧，阻碍着自由电子的流动，所以随着温度的升高，金属的电阻增大，表现为正的温度系数，这是金属所固有的一种特性。自由电子的运动和正离子本身的热振动，使金属具有较大的导热率。由于金属键没有饱和性和方向性，所以在外力作用下金属的两部分发生相对移动时，正离子仍和自由电子保持着金属键结合，这样，金属就能经受变形而不断裂，使其具有良好的塑性。

#### 2. 结合力与结合能

如上所述，在固态金属中，原子依靠金属键牢固地结合在一起，原子（或正离子）按一定规律规则地排列。下面从原子间的结合力与结合能来说明，沉浸于电子云中的金属原子（或正离子）为什么会像图 1-1 那样有规则地排列着，并往往趋于紧密的排列。

为简便起见，首先分析两个原子之间的相互作用情况（即双原子作用模型）。当两个

原子相距很远时，它们之间实际上不发生相互作用，但当它们相互逐渐靠近时，其间的作用力就会随之显示出来。分析表明，固态金属中两原子之间的相互作用力包括：①正离子与自由电子之间的引力（图 1-2）；②正离子之间各自内部已满额的电子层间的斥力；③正离子之间的斥力。吸引力力图使两原子靠近，而排斥力却力图使两原子分开。如图 1-3 所示，上图为 A 原子对 B 原子的吸引力和排斥力曲线，两原子的结合力为吸引力与排斥力的代数和。吸引力是一种长程力，排斥力是一种近程力，当两原子间距较大时吸引力大于排斥力，两原子自动靠近。原子靠近到一定距离以后，排斥力急剧增长，当原子过分靠近时，排斥力大于吸引力，原子便互相排斥，自动离开。当原子间距为  $D_0$  时，吸引力与排斥力恰好相等而平衡，原子既不会自动靠近，也不会自动离开，恰好处于平衡位置。在固态金属中，绝大多数原子都处于这种平衡位置。如果原子偏离平衡位置，不论向哪个方向偏离，立刻会受到一个力的作用，促使它回到原来的位置。然而事实上，原子的热运动永远不会停止，原子不会静止在平衡位置上，而是围绕平衡位置进行着无序的热振动。值得注意的是，在点  $D_0$  附近，结合力与距离的关系接近直线关系，这是虎克定律的物理本质。

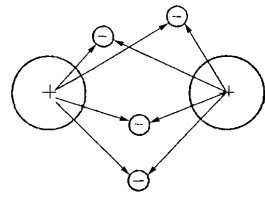


图 1-2 正离子与自由电子之间的吸引力

图 1-3 的下半部分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。当原子处于平衡距离  $D_0$  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。

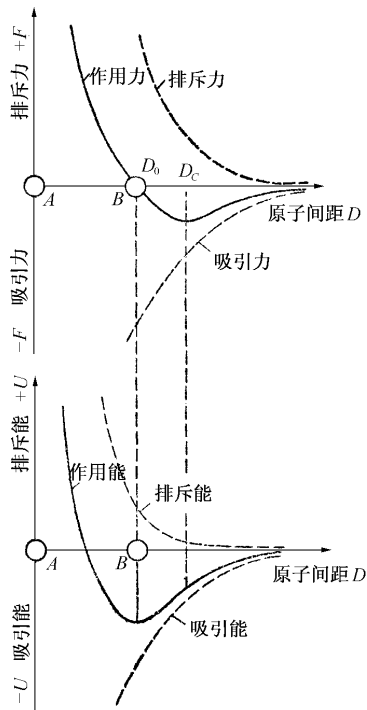


图 1-3 双原子作用模型

将上述双原子作用模型加以推广，不难理解，当大量金属原子结合成固体时，为使固态金属具有最低的能量，以保持其稳定状态，大量原子之间也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原因。

图 1-4 是三原子作用模型，分别绘出 A 原子和 C 原子对 B 原子的作用能曲线  $U_A$  和  $U_C$ ，以及由它们合成的总作用能曲线  $U_{A+C}$ 。由图可见，由于两侧原子的共同作用，使

$B$  原子处于一个对称的势能谷中，而且能谷更深了。如果  $B$  原子周围最近邻的原子数越多，原子间的结合能就越低。能量最低的状态是最稳定的状态，而任何系统都有自发地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的排列。

当原子间以离子键或共价键结合时，原子达不到紧密排列状态，这是由于这些结合方式对周围的原子数有一定的限制之故。

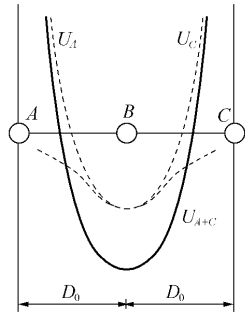


图 1-4 三原子作用模型

从双原子作用模型可知，金属中原子的排列是有规则的，而不是杂乱无章的。人们把这种原子在三维空间作有规则的周期性重复排列的物质称为晶体。像食盐、冬天下的雪花、水凝成的冰块，以及金属和合金都是晶体。而在非晶体中，原子则是紊乱地分布着，至多有些局部地方呈现规则排列，像玻璃、松香、木材等是非晶体。

## 1. 晶体的特性

由于晶体中的原子呈一定规则重复排列着，这就使晶体在性能上存在区别于非晶体的一些重要特点。首先，晶体具有一定的熔点，非晶体则没有。在熔点以上，晶体变成液体，处于非结晶状态；在熔点以下，液体又变成晶体，处于结晶状态。从晶体至液体或从液体至晶体的转变是突变的。

晶体的性能（如强度、弹性模量、导电性、热膨胀性等）在不同方向上具有不同的数值，即具有各向异性。而非晶体则是各向同性。另外，许多晶体的天然外形呈现出规则的几何外形，保持一定的晶面角，具有一定的对称性，例如天然金刚石、水晶、结晶盐等，而非晶体则没有这个特点。

## 2. 晶格与晶胞

在晶体中，原子排列的规律不同，则其性能也不同。为了研究原子的排列规律，假定理想晶体中的原子都是固定不动的刚球，那么晶体即由这些刚球堆垛而成，图 1-5 a 即为这种原子堆垛模型，从中可以看出，原子在各个方向的排列都是很规则的。这种模型的优点是立体感强，很直观；缺点是每个刚球密密麻麻地堆集在一起，很难看清内部排列的规律和特点，不便于研究。

为了清楚地表明原子在空间排列的规律性，常常将构成晶体的实际质点（原子、分子或离子）忽略，而将它们抽象为纯粹的几何点，称之为阵点或结点。这些阵点可以是原子或分子的中心，也可以是彼此等同的原子群或分子群的中心，但各个阵点的周围环境都必须相同。为使观察方便，可作许多平行的直线将这些阵点连接起来，构成一个三维的空间格架，如图 1-5 b 所示，这种用以描述晶体中原子（离子或分子）排列规则的空间格架称为空间点阵，简称点阵或晶格。

由于晶格具有周期性的特点，因此，可以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的规律性，这个最小的几何单元称为晶胞（图 1-5c）。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  $\alpha, \beta, \gamma$  表示。晶胞

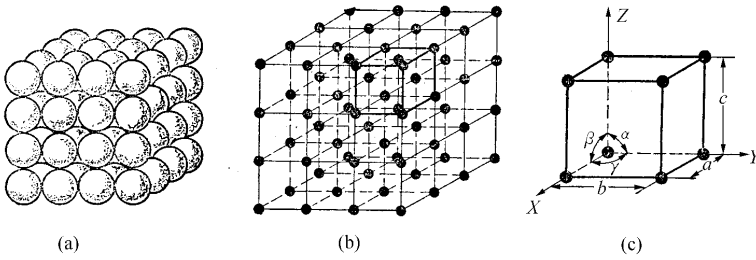


图 1-5 简单立方晶体(a)、晶格(b)及晶胞(c)的示意图

的棱边长度一般称为晶格常数或点阵常数，晶胞的棱边夹角称为晶轴间夹角。

### 三、三种常见的金属晶体结构

自然界中的晶体有成千上万种，它们的晶体结构各不相同。但根据“每个阵点周围具有相同的环境”的要求，用数学的方法可推出空间点阵共有 14 种，而且也只能有 14 种。在晶体学中，根据晶胞棱边长度  $a, b, c$  是否相等、晶轴间夹角  $\alpha, \beta, \gamma$  是否相等、是否为直角等因素，又可以把这 14 种空间点阵归纳为七大晶系，即三斜晶系 ( $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ )、单斜晶系 ( $a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$ )、正交晶系 ( $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ )、六方晶系 ( $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ )、菱方晶系 ( $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ )、正方晶系 ( $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ )、立方晶系 ( $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ )。

由于金属原子趋向于紧密排列，所以工业上使用的金属元素中，除了少数具有复杂的晶体结构外，绝大多数都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类型，即体心立方、面心立方和密排六方结构，前两种属于立方晶系，后一种属于六方晶系。

#### 1. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞如图 1-6 所示。晶胞的八个角上各有一个原子，在立方体的中心还有一个原子，因其晶格常数  $a = b = c$ ，故通常只用一个常数  $a$  即可表示。

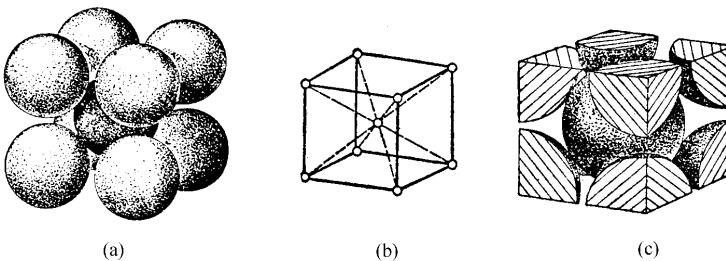


图 1-6 体心立方晶胞

(a) 刚球模型；(b) 质点模型；(c) 晶胞原子数（示意图）

由图 1-6 可见，在体心立方晶胞的立方体对角线上，原子是彼此紧密相接触排列的，相邻原子的中心距恰好等于原子直径。立方体对角线的长度是 $\sqrt{3}a$ ，等于 4 个原子半径，所以体心立方晶胞的原子半径为 $\frac{\sqrt{3}}{4}a$ 。

在立方晶胞中，每个顶点上的原子同时属于八个晶胞所共有，故只有 1/8 个原子属于这个晶胞。晶胞中心的原子完全属于这个晶胞，所以体心立方晶胞中的原子数为： $8 \times 1/8 + 1 = 2$ 。

晶胞中原子排列的紧密程度可以用两个参数来反映，一个是配位数，一个是致密度。所谓配位数是指晶体结构中，与任一原子最近邻且等距离的原子数目。显然，配位数越大，原子排列便越紧密。在体心立方晶格中，以立方体中心的原子来看，与其最近邻且等距离的原子数有 8 个，所以体心立方晶格的配位数为 8 (图 1-7a)。

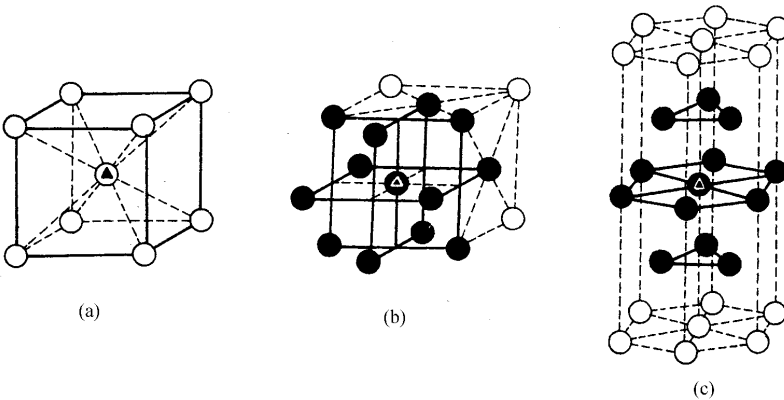


图 1-7 三种晶体结构配位数示意图  
(a) 体心立方晶体结构；(b) 面心立方晶体结构；(c) 密排六方晶体结构

由于原子是球体，所以，即使是一个挨一个地最紧密排列着，原子之间仍有空隙。致密度就是晶胞中原子所占体积与晶胞体积之比。体心立方晶胞含有两个原子，原子半径  $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ ，晶胞体积为  $a^3$ ，故体心立方晶格的致密度为：

$$A \times \frac{4}{3} \pi r^3 / a^3 \quad C \quad A \times \frac{4}{3} \left( \frac{\sqrt{3}}{4} a \right)^3 / a^3 \quad C \quad 0.68$$

即晶格中有 68% 的体积被原子所占据，其余为空隙。

属于体心立方晶格的金属有 Fe、Cr、Mo、W、V 等。

## 2. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞如图 1-8 所示。在晶胞的八个角上各有一个原子，构成立方体，在立方体六个面的中心各有一个原子。而位于面心位置的原子同时属于两个晶胞所共有，因此，面心立方晶胞中的原子数为  $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ 。

在面心立方晶胞中，每个面的对角线上原子彼此相互接触，而对角线的长度为 $\sqrt{2}a$ ，等于 4 个原子半径，所以面心立方晶胞的原子半径  $r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$ 。

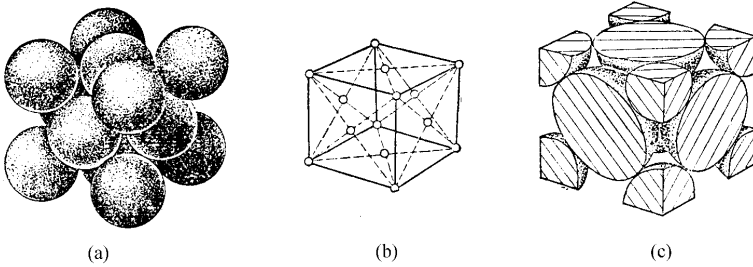


图 1-8 面心立方晶胞  
(a) 刚球模型；(b) 质点模型；(c) 晶胞中原子数示意图

从图 1-7b 可以看出，晶胞中每个原子周围都有 12 个最近邻原子，所以面心立方晶胞的配位数是 12。

面心立方晶胞的致密度为  $4 \times \frac{4}{3}\pi r^3 / a^3 = 4 \times \frac{4}{3} \left( \frac{\sqrt{2}}{4}a \right)^3 / a^3 = 0.74$ ，即有 74% 的体积为原子所占据，其余 26% 为间隙体积。

属于面心立方晶格的金属有 C-Fe、Cu、Al、Ag、Ni 等。

### 3. 密排六方结构

密排六方结构的晶胞如图 1-9 所示。晶胞的 12 个角上各有一个原子，构成六方柱体，上下底面的中心各有一个原子，晶胞内还有 3 个原子。

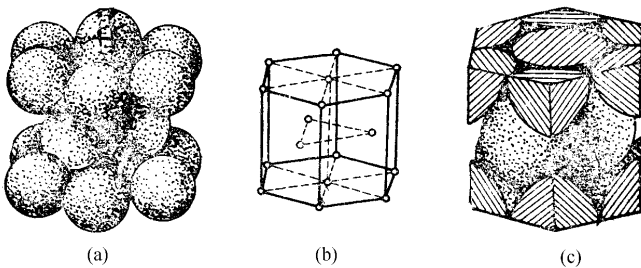


图 1-9 密排六方晶胞  
(a) 刚球模型；(b) 质点模型；(c) 晶胞原子数

密排六方晶胞的晶格常数有两个：一是正六边形的边长  $a$ ，另一个是上下两底面之间的距离  $c$ ， $c$  与  $a$  之比  $c/a \approx 1.63$ ，此时原子半径为  $\frac{1}{2}a$ 。晶胞原子数为  $\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$ ，配位数为 12，致密度为 0.74。

属于密排六方晶格的金属有  $Zn$ 、 $Mg$ 、 $6-Ti$  等。

可见，密排六方结构的致密度和配位数与面心立方完全相同，两者都是最紧密的排列方式，所不同的是两种晶格中的最密排面的堆垛次序不同。

致密度不同的结构互相转变时，会造成体积的膨胀或收缩。

#### 四、晶向指数和晶面指数

在晶格中，由一系列原子所组成的平面称为晶面。任意两个原子之间连线所指的方向称为晶向。在研究金属晶体结构的细节及其性能时，往往需要分析它们的各种晶面和晶向中原子分布的特点，因此有必要给各种晶面和晶向定出一定的符号，以便于分析。晶面和晶向的这种符号分别叫“晶面指数”和“晶向指数”。

##### 1. 晶向指数

晶向指数的确定步骤如下：

(1) 以晶胞的三条棱边为坐标轴  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ，以棱边长度（即晶格常数）作为坐标轴的量度单位。从坐标轴的原点引一有向直线平行于待定晶向；

(2) 在所引的有向直线上任取一点（为方便起见，通常取距原点最近的阵点），求出该点在三个坐标轴的坐标值。

(3) 将三个坐标值按比例化为最小简单整数，并加上方括号 [ ]，即为所求的晶向指数。

例如，确定图 1-10 中的  $AB$  的晶向指数。从坐标原点  $O$  引  $AB$  平行线，交顶面于  $C$  点， $C$  点的坐标是  $\frac{1}{2}$ ， $\frac{1}{2}$ ， $1$ ，按比例化为最小整数则为  $1, 1, 2$ ，所以  $AB$  的晶向指数为  $[1\ 1\ 2]$ 。

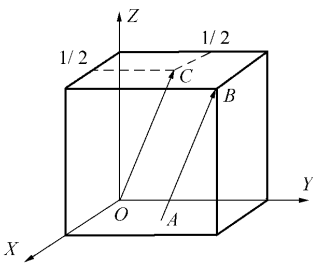


图 1-10 确定晶向指数的示意图

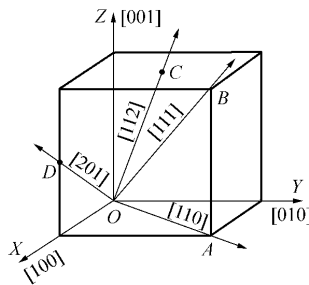


图 1-11 立方晶胞中最常用的晶向指数

在立方晶胞中，通常以  $[u\ v\ w]$  作为晶向指数的通式。图 1-11 示出立方晶胞中最常用的晶向指数， $X$  轴方向为  $[1\ 0\ 0]$ ， $Y$  轴方向为  $[0\ 1\ 0]$ ， $Z$  轴方向为  $[0\ 0\ 1]$ ，面对角线  $OA$  方向为  $[1\ 1\ 0]$ ，立方体对角线  $OB$  方向为  $[1\ 1\ 1]$ ，原点至面心  $C$  的  $OC$  方向为  $[1\ 1\ 2]$ 。

由晶向指数确定步骤的第一步可知，所有互相平行且同向的晶向，都具有相同的晶向指数。同一直线有相反两个方向，其晶向指数的数字和顺序都相同，只是符号完全相反。