

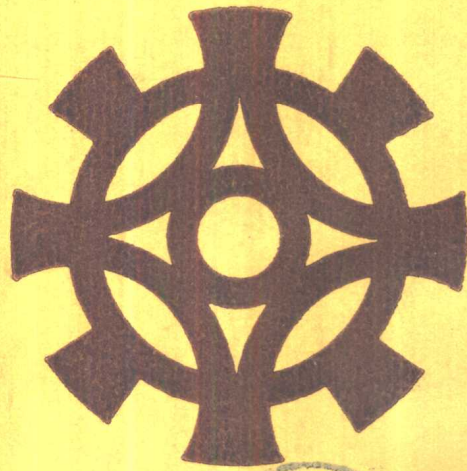
5(8)A

7433

800048

工程材料学

陆漱逸 王于林 主编



4
3

航空工业出版社

工 程 材 料 学

陆 漱 逸 王 于 林 主 编

航 空 工 业 出 版 社

内 容 简 介

本书系统地阐述了金属学、机械性能、金属材料及其热处理、非金属材料(工程聚合物、陶瓷和复合材料)、零件失效分析及材料选择等方面的基本原理、基础知识。内容简明扼要,标题醒目,并注重理论联系实际。各章附有思考题及习题。书末附有材料硬度和强度换算表、部分国内外材料牌号对照表和化学元素周期表。

本书适合作为机械类、近机类设计和工艺专业的教材,亦可作为机械类、近机类技术人员的参考书。

工 程 材 料 学

陆漱逸 王子林 主编

*

航空工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

南京航空学院印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张 17.875⁸ 开插页 1 443.0千字

1987年2月修订版 1987年2月第一次印刷 印数 0001-7.800册

统一书号: 15448·11 定价: 2.95元

前 言

《工程材料学》教材，是在1981年出版的航空院校统编教材《航空金属材料学》的基础上进行改编的，适合于机械类、近机类的教学。

根据材料发展和应用状况，教材中除改编了金属材料学的基本原理、基本知识，并适当加强金属材料性能的本质和性能变化规律外，还增加了非金属材料（包括工程聚合物、陶瓷材料、复合材料）和零件失效分析的基本知识，并力求使其与选材内容结合起来，以拓宽材料教学范围，增强适应性。

鉴于教改精神，教学时数有限，故尽量使篇幅少于原《航空金属材料学》，做到条理清楚、文字通顺，易于自学。同时也考虑到一些教师意见，在教学要求之外，应使读者有一定的参阅余地，故编入部分有“*”号的内容。这部分内容也可作选择性讲解。

为帮助思考、复习、巩固和学习上的引伸，各章后附有思考题及习题，供教学中参考。

本书由南京航空学院陆漱逸、王于林付教授主编。第一至第三章及第十章第一节由陆漱逸编写，绪论、第四、六、十一章及第十章第二、三节由王于林编写，第五、九章由沈阳航空工业学院刘宝文编写，第七、八章由沈阳航空工业学院曾周良编写。最后由西北工业大学杨思品和胡德林付教授主审。

参加本教材定稿的，除编者外，有北京航空学院沈纫秋付教授、南昌航空工业学院许德丰、西安空军工程学院徐培华、马康民等同志。

由于调研不够，业务水平及编写时间有限，难免存在缺点和错误，恳望广大师生和读者批评指正。

编 者 1986.2.15

绪 论

一、材料发展与社会进步

材料发展标志人类社会生产和文化水平。人类生活、生产离不开材料，其重要性使得史学家根据生产工具使用的材料来划分历史时代，即划分为石器、青铜器、铁器时代。这足以说明材料标志着社会的发展和进步。

我们的祖先最早使用的工具材料，是天然石头。到了原始社会的末期，已开始人工制作陶器，由此发展成为以后的瓷器。汉代瓷器发展，已成为中国古文化的象征，对世界文化产生了巨大影响。夏、商、周时代炼制的青铜，在时间上虽不及埃及，但已发展到较高水平。当时生产规模使青铜不仅用于工具、兵器，还用于食物器皿。春秋战国时，已大量使用铁器，到了汉代，“先炼铁后炼钢”的技术已居世界领先地位。作为兵器、工具用材，钢铁性能要比青铜优越得多，对社会生产无疑起着巨大推动作用。在青铜、钢铁材料的发展基础上，18世纪世界工业迅速发展，对材料又提出了新的要求，因而推动了材料的进一步发展。所以当时总结形成了一门新学科“金属学”，以研究金属材料的成分、内部结构和性能之间的关系。

现代工业技术与材料发展关系密切，能源、信息和材料已成为现代技术的三大支柱。现代工、农、交通及国防建设一日千里，不断要求生产出更多、更好的材料，否则现代技术将成为空话。例如，飞机由木质结构过渡到使用铝合金，时速由几十公里增加到几百里。不锈钢和钛合金的使用才有可能使飞机实现超音速。航空发动机功率不断提高，而结构重量却要减小。只有发展、应用高强度、耐高温的结构材料才有可能实现。否则，即使有了先进的设计，发动机也制造不出来。现代航空和宇航技术的发展，要求减轻总体结构重量，除发展高强度高刚度、比重小的金属材料外，还必须迅速发展、应用非金属结构材料，如工程聚合物、陶瓷材料、复合材料。这些材料的特点是适合近代工程、航空和宇航需要，可满足诸如重返大气层的技术要求。

历史上，由使用天然非金属材料发展到使用金属材料，标志着社会进步；而今在发展高性能金属材料的同时，迅速发展和应用高性能的非金属材料，标志现代技术的进步。现今主要材料，已不再只是金属。人类正在进入人工合成非金属和复合材料的时代。因此，“金属学”已不能全面反映现今使用的各类材料的研究、生产和应用中的问题，所以形成了“材料科学”。这门科学研究所有固体材料的成分、内部结构和性能间的关系。

材料的性能，包括使用性能（机械、物理、化学性能）和工艺（铸造、塑性加工、焊接等）性能。“工程材料”涉及的只是材料领域中有关工程结构和机械零件、并且主要要求机械性能的结构材料内容。

二、《工程材料学》的目的与任务

《工程材料学》是研究工程材料成分、内部结构和性能之间关系的课程。其目的是使工

程技术人员了解和掌握有关金属、非金属材料的基本原理、主要性能、决定和影响性能的主要因素，以及材料破坏的行为及其一般分析方法，具备根据零件工作条件合理选择和使用材料的初步能力，并为后继课程的学习作好准备。

本课程的具体任务是学习、了解和掌握：(1) 金属学的基本原理、基础知识和一般生产中常见的金属材料性能和应用特点。(2) 金属材料热处理的基本原理、基础知识及热处理在零件制造过程的位置和作用。(3) 工程聚合物、陶瓷材料和复合材料的基本原理和基础知识。(4) 零件失效分析的基础知识和一般分析方法。(5) 零件设计选材的一般原则。

目 录

绪 论

第一章 纯金属的晶体结构与结晶	(1)
§ 1—1 纯金属的晶体结构.....	(1)
一、金属原子的结合及金属特性	(1)
二、晶体结构的基本概念	(2)
三、常见的金属晶格类型	(2)
四、晶面指数和晶向指数	(5)
五、实际金属的内部结构	(7)
§ 1—2 纯金属的结晶.....	(11)
一、液态金属的结晶	(11)
二、金属结晶的基本规律	(12)
三、晶核的形成与长大	(13)
四、金属凝固后的晶粒大小	(14)
五、铸锭的组织	(15)
六、金属的同素异构转变	(16)
思考题及习题	(17)
第二章 合金的相结构与二元合金相图	(19)
§ 2—1 合金的相结构.....	(19)
一、概述	(19)
二、合金的相结构	(19)
§ 2—2 二元合金相图.....	(23)
一、概述	(23)
二、二元合金相图的制作	(23)
三、匀晶相图	(24)
四、共晶相图	(27)
五、包晶相图*.....	(30)
六、具有稳定化合物的二元合金相图	(32)
§ 2—3 二元相图的应用.....	(33)
一、合金机械性能与相图的关系	(33)
二、合金的工艺性与相图的关系	(33)
思考题与习题	(34)

第三章 金属的塑性变形与再结晶	(37)
§ 3—1 金属的塑性变形.....	(37)
一、概述	(37)
二、单晶体的塑性变形	(37)
三、多晶体的塑性变形	(41)
四、合金的塑性变形与强化	(42)
五、塑性变形对金属组织和性能的影响	(44)
§ 3—2 金属的回复与再结晶.....	(47)
一、回复	(47)
二、再结晶	(48)
三、晶粒长大	(49)
四、影响再结晶后晶粒大小的因素.....	(49)
§ 3—3 金属的热加工.....	(50)
一、热加工与冷加工	(50)
二、热加工对材料组织和性能的影响	(51)
思考题及习题	(52)
第四章 金属的机械性能	(54)
§ 4—1 拉伸强度.....	(54)
一、强度指标	(54)
二、塑性指标	(56)
§ 4—2 硬度.....	(56)
一、布氏硬度 (HB).....	(57)
二、洛氏硬度 (HR)	(57)
三、维氏硬度 (HV)	(58)
§ 4—3 冲击韧性.....	(58)
一、试验原理与方法	(58)
二、冲击韧性分析和应用	(59)
三、小能量多次冲击试验	(60)
§ 4—4 疲劳强度.....	(60)
一、疲劳现象	(60)
二、疲劳抗力指标	(61)
三、提高疲劳强度的措施	(61)
§ 4—5 断裂韧性.....	(62)
一、低应力脆断	(62)
二、裂纹尖端的应力及裂纹扩展型式	(62)
三、断裂韧性 (K_{Ic})	(63)
思考题及习题	(65)

第五章 铁碳合金	(66)
§ 5—1 Fe—Fe ₃ C 相图.....	(66)
一、Fe—Fe ₃ C 相图中的基本相.....	(66)
二、Fe—Fe ₃ C 相图分析.....	(68)
三、典型合金的结晶过程.....	(70)
§ 5—2 碳钢.....	(76)
一、碳与杂质对钢性能的影响.....	(76)
二、碳钢的分类、编号及应用.....	(77)
§ 5—3 铸铁.....	(84)
一、白口铸铁.....	(84)
二、灰口铸铁.....	(84)
三、可锻铸铁*.....	(87)
四、球墨铸铁.....	(88)
第六章 钢的热处理	(91)
§ 6—1 概述.....	(91)
§ 6—2 钢的热处理.....	(91)
一、钢加热时的组织转变.....	(91)
二、钢冷却时的组织转变.....	(94)
§ 6—3 钢的热处理工艺.....	(103)
一、退火.....	(103)
二、正火.....	(104)
三、淬火.....	(105)
四、回火.....	(111)
五、金属的时效*.....	(114)
§ 6—4 表面淬火*.....	(114)
一、高频淬火原理.....	(115)
二、高频淬火的应用.....	(115)
§ 6—5 化学热处理.....	(115)
一、渗碳.....	(116)
二、氮化(渗氮).....	(119)
三、碳氮共渗.....	(121)
四、其他渗入法*.....	(122)
§ 6—6 其他热处理工艺*.....	(122)
一、可控气氛热处理.....	(122)
二、真空热处理.....	(123)
三、形变热处理.....	(123)
四、强韧化处理.....	(125)

五、激光热处理	(125)
思考题及习题	(126)
第七章 合金钢	(130)
§ 7—1 合金钢概述	(130)
一、合金元素的存在形式	(130)
二、合金元素的主要影响	(130)
三、合金钢的分类与编号	(133)
§ 7—2 合金结构钢	(135)
一、渗碳钢	(135)
二、调质钢	(138)
三、超高强度钢	(141)
四、弹簧钢	(142)
五、轴承钢*	(144)
§ 7—3 合金工具钢	(145)
一、刀具钢	(145)
二、模具钢	(151)
三、量具钢	(155)
思考题及习题	(156)
第八章 不锈钢及高温合金	(157)
§ 8—1 不锈钢	(157)
一、概述	(157)
二、马氏体不锈钢	(158)
三、奥氏体不锈钢	(161)
四、过渡型不锈钢*	(164)
§ 8—2 高温合金	(165)
一、概述	(165)
二、变形铁基高温合金	(167)
三、变形镍基高温合金	(171)
四、铸造高温合金	(174)
思考题及习题	(178)
第九章 有色金属	(179)
§ 9—1 铝及铝合金	(179)
一、概述	(179)
二、铝合金的热处理	(183)
三、变形铝合金	(187)
四、铸造铝合金	(191)

§ 9—2 镁及镁合金	(193)
一、概述	(193)
二、变形镁合金	(194)
三、铸造镁合金	(195)
§ 9—3 钛及钛合金	(196)
一、钛及其合金的特性	(196)
二、钛合金的热处理	(198)
三、常用的钛合金	(200)
§ 9—4 铜及铜合金	(202)
一、纯铜	(202)
二、黄铜	(202)
三、青铜	(204)
思考题及习题	(205)
第十章 非金属材料	(206)
§ 10—1 工程聚合物	(206)
一、聚合物的分子组成	(206)
二、人工合成聚合物的方法	(207)
三、线型聚合物	(208)
四、体型聚合物	(211)
五、聚合物的机械性能	(212)
六、常用工程聚合物简介	(213)
§ 10—2 陶瓷材料	(216)
一、陶瓷材料概述	(216)
二、陶瓷材料简介	(219)
§ 10—3 复合材料	(221)
一、复合材料概述	(221)
二、树脂基复合材料的基体类型	(226)
三、增强纤维及纤维树脂基复合材料	(227)
四、金属基复合材料	(234)
思考题及习题	(236)
第十一章 失效分析及材料选用	(238)
§ 11—1 零件的失效分析	(238)
一、概述	(238)
二、零件失效原因和类型	(238)
三、失效分析的一般方法	(240)
四、变形失效	(241)
五、断裂失效	(241)

六、表面损伤失效	(247)
§ 11—2 选材一般原则	(248)
一、材料满足相应的失效抗力	(248)
二、考虑材料的工艺性	(250)
三、注意经济性	(251)
§ 11—3 典型零件选材分析	(251)
一、飞机起落架	(251)
二、发动机涡轮轴	(254)
三、机床齿轮	(256)
四、典型航空零部件复合材料的选用	(258)
思考题及习题	(260)
附录一：黑色金属硬度与强度换算表	
附录二：部分金属材料牌号的国内外对照	
附录三：化学元素周期表	

第一章 纯金属的晶体结构与结晶

§ 1-1 纯金属的晶体结构

固态物质，凡其内部原子（或分子）在三维空间作有规则的周期性重复排列的，均称为晶体。固态金属通常都是晶体。

金属的晶体结构是指金属内部原子在空间的有规则几何排列方式。为什么要研究金属的晶体结构呢？因为金属的性能及其变化都与金属的晶体结构密切相关。例如，铝、铜、金与镁、铋的晶体结构类型不同，前三者为面心立方结构，具有很好的塑性，可顺利地进行压力加工，甚至可辗压成金属箔；后二者为密排六方结构，它们的塑性很差，很难进行压力加工。

这一节只阐述纯金属的晶体结构，下一章再介绍合金的晶体结构。

一、金属原子的结合及金属特性

金属自由原子的构造特点是原子最外层只有1~2个价电子。当金属原子结合成晶体时，由于价电子与原子核的结合力较弱，原子将失去价电子而成为正离子。正离子按一定的几何规则在空间排列，并在各自的平衡位置上作热振动。脱离了原子核束缚的价电子成为自由电子，它们在正离子之间不停地作高速运动，为整个金属晶体所共有，形成了所谓的“电子云”（或称“电子气”）。金属正离子与自由电子之间产生静电引力，使金属原子（正离子）结合成一个整体，这种结合方式称为金属键。但是，事物是复杂的和运动着的。金属晶体中极个别的正离子在某一瞬间可能与自由电子又结合成原子，而这种结合只是暂时的，顷刻间又可能失去价电子，成为正离子。所以金属晶体中绝大多数是正离子在空间作有规则的排列，但也有极个别的金属原子存在。图 1-1 为金属键示意图。

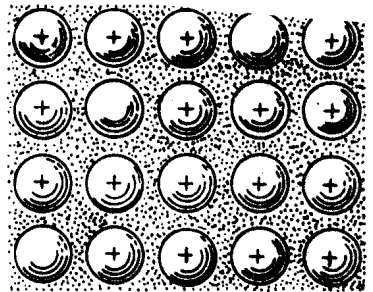


图 1-1 金属键示意图

金属的特性与金属键的本质密切相关。金属在很小的外电场作用下，自由电子即可沿着电场方向流动，形成电流，所以金属具有良好的导电性。正离子的热振动与自由电子的

运动都可以传递热能，故金属具有很好的导热性。金属在足够的外力作用下，晶体中一部分正离子相对于另一部分正离子可作相对的位移（滑移），产生永久变形，即塑性变形。塑性变形时，自由电子也随之移动，并像万能胶那样把正离子结合在一起，故金属可作较大的塑性变形而不致破裂，显示出良好的塑性。

金属键无方向性，所以金属晶体中的原子可在各个方向上等同地堆积，并作尽可能的紧密堆积。

二、晶体结构的基本概念

1. 晶格

在研究金属的晶体结构即晶体中原子（为了简便，以后把离子统称为原子）在空间的几何排列规律时，为了把问题简化，通常将一个原子用一个小刚球来代表，并把不停地振动的原子当作在它的平衡位置上静止不动。这样金属的晶体结构就可用许多小刚球互相紧密地接触堆砌的模型来表示。图 1-2(a) 为 α -Fe 晶体的铁原子刚球堆砌示意图。

这种原子堆砌模型，由于许多刚球紧密地堆积在一起，很难看清楚原子的排列规律。为此，有必要进一步采取适当的办法来清楚地表示原子的排列规律，即用一些假想的平行几何线条在三维空间的方向上通过原子的中心把原子连接起来，并把一个原子视为一个几何质点，这样抽象地构成一个几何空间格架。这种描述原子在空间几何排列规律的空间格架称为结晶格子，简称晶格。空间格架中的几何质点位置称为结点，原子处在结点上，所以有时将这种格架又称为晶体点阵。图 1-2(b) 为 α -Fe 晶体的晶格示意图。

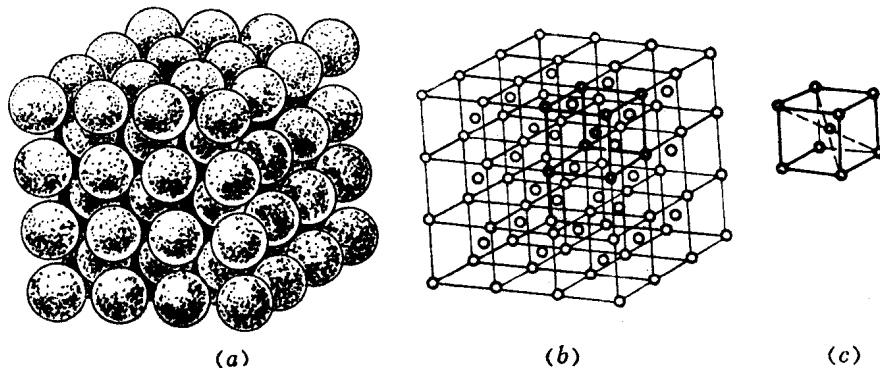


图 1-2 α -Fe 晶体中铁原子排列示意图
a) 原子堆砌模型; b) 晶格; c) 晶胞

2. 晶胞

由于晶体中的原子在三维空间是有规则地重复排列的，所以，我们只要在晶格中选取一个能够代表原子排列规律的最小几何单位，由它来表示原子的排列规律就可以了。这个表示晶体中原子排列规律的最小几何单位称为晶胞。图 1-2(b) α -Fe 晶格中用加重线条表示的最小几何单位就可代表 α -Fe 晶体的铁原子排列规律。图 1-2(c) 是把最小几何单位从晶格中取出来照样画成的一个图，即 α -Fe 的晶胞。用晶胞来表示晶体结构就方便多了。

3. 晶格常数

为了研究晶胞的形状和大小，常用图 1-3 所示晶胞的三个棱边长度 a 、 b 、 c 及棱边间夹角 α 、 β 、 γ 等六个参数来表示。棱边长度 a 、 b 、 c 称为晶格常数，以毫微米 (nm) ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$ ，以前用 \AA 度量， $1\text{\AA}=0.1\text{nm}$) 作为度量单位。立方晶胞的三个棱边长度相等，三个夹角都等于 90° ，因此，它的晶格常数只要用一个棱边长度 a 表示即可。

三、常见的金属晶格类型

附录三为元素周期表，由表中可见金属元素有几十种，但常见的金属晶格类型为下列三种。

1. 体心立方晶格 (bcc)

2

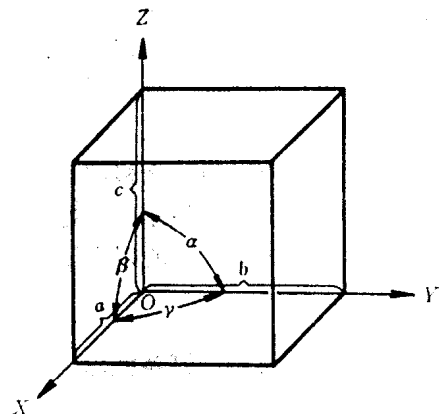


图 1-3 晶格常数表示方法

图 1-4(b) 为体心立方晶格的晶胞。晶胞中的原子数(n)可参照图 1-4(c) 计算如下: 立方体每个角上的原子为相邻的八个晶胞所共有, 属于一个晶胞的为 $1/8$ 个原子, 加上晶胞中心一个原子, 故晶胞的原子数 $n=8 \times 1/8+1=2$ 个。

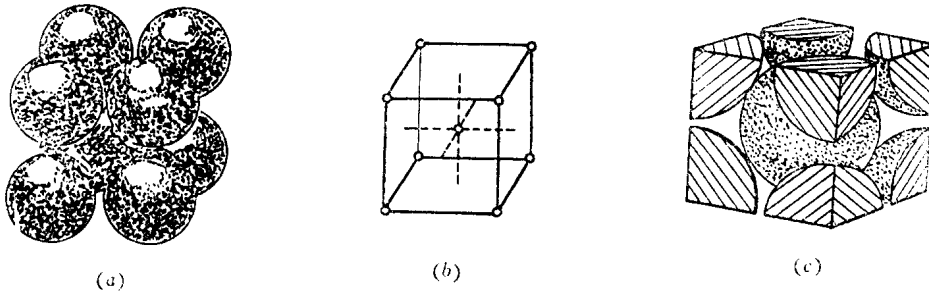


图1-4 体心立方晶格

a) 刚球模型;

b) 质点模型;

c) 晶胞原子数示意图

具有体心立方晶格的金属有 α -Fe、Cr、V、W、Mo、Nb 等约 30 种。它们在一定温度下的晶格常数各不相同 (见表 1-1)。立方晶格的晶格常数以棱边长 a 表示。

由图 1-4(a) 可见, 棱边上的原子刚球并不互相接触, 只有立方体对角线上的原子刚球是相互接触的, 所以最近邻原子间距即原子直径 $d = \frac{\sqrt{3}}{2}a$ 。

晶体中任一原子的最近邻原子数称为配位数。体心立方晶格的配位数为 8, 从中心原子与立方体角上 8 个原子紧密接触即可说明。配位数越大, 表示晶体中原子堆砌得越紧密。晶体中原子排列的紧密程度也可用致密度(K)来衡量。致密度为晶胞中原子刚球所占体积与晶胞体积之比, 即致密度 $K = \frac{nv}{V}$ 。式中: n 为晶胞中原子数; v 为单个原子刚球的体积; V 为晶胞体积。体心立方晶格的致密度

$$K = \frac{nv}{V} = \frac{2 \times \frac{4}{3}\pi \left(\frac{d}{2}\right)^3}{a^3} = \frac{2 \times \frac{\pi}{6} \left(\frac{\sqrt{3}}{2}a\right)^3}{a^3} = 0.68 \text{ 或 } 68\%。$$

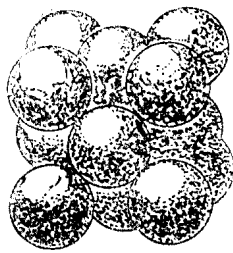
表 1-1 一些体心立方晶格金属的晶格常数*

金 属	α -Fe	Cr	V	W	Mo	Nb	β -Ti	β -Zr	Ta
晶格常数 a (nm)	0.2866	0.2884	0.3028	0.3165	0.3147	0.3301	0.3307 (900°C)	0.3609 (862°C)	0.3303
原子间距 d (nm)	0.2482	0.2498	0.2622 (30°C)	0.2741	0.2725	0.2858	0.2863 (900°C)	0.3125 (862°C)	0.2860

* 表内除注明温度外, 其它均为室温数据。

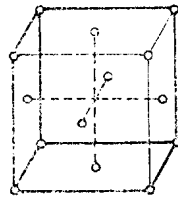
2. 面心立方晶格(fcc)

面心立方晶格的晶胞如图 1-5(b) 所示。晶胞中原子数可参照图 1-5(c) 计算, 除立方体角上 8 个原子只有 $8 \times \frac{1}{8} = 1$ 个原子属于晶胞外, 立方体六个面的中心原子只有 $6 \times \frac{1}{2} = 3$ 个原子属于晶胞, 所以晶胞原子数 $n=4$ 个。



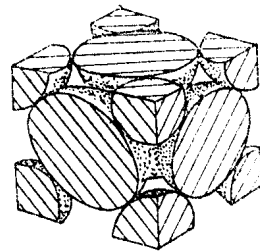
(a)

a) 刚球模型;



(b)

b) 质点模型;



(c)

c) 晶胞原子数

图1-5 面心立方晶格

具有面心立方晶格的金属有 γ -Fe、Al、Cu、Ni、Au、Ag、Pb 等 20 余种。它们的晶格常数见表 1-2。

表1-2 一些面心立方晶格金属的晶格常数*

金属	γ -Fe	Al	Cu	Ni	Au	Ag	Pb	β -Co
晶格常数 a (nm)	0.3647 (916°C)	0.4049	0.3615	0.3524	0.4079	0.4086	0.4948	0.3844
原子间距 d (nm)	0.2579 (916°C)	0.2868	0.2556	0.2492	0.2884	0.2889	0.3499	0.2506

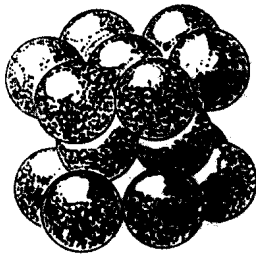
* 表内除注明温度外, 其它均为室温数据。

由图 1-5(a) 可见立方体面对角线上的原子刚球紧密接触, 故最近邻原子间距 (即原子直径) $d = \frac{\sqrt{2}}{2}a$ 。

以立方体面中心原子为原点, 作 x 、 y 、 z 三个坐标轴平行于棱边, 则 $x-y$ 、 $x-z$ 、 $y-z$ 三个平面上各有四个原子与中心原子紧密接触, 故面心立方晶格的配位数为 12。面心立方晶格的致密度 $K = \frac{nv}{V} = \frac{4 \times \frac{4}{3}\pi \left(\frac{\sqrt{2}}{4}a\right)^3}{a^3} = 0.74$ 或 74%。由配位数及致密度都说明面心立方晶格的原子排列比体心立方晶格的紧密。

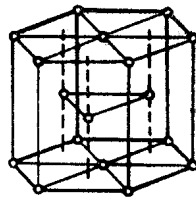
3. 密排六方晶格(hcp)

密排六方晶格的晶胞如图 1-6(b) 所示。参照图 1-6(c), 晶胞原子数可计算如下: 六方柱每个角上的原子为相邻六个晶胞所共有, 上下底面中心原子为相邻两个晶胞所共有, 再加上晶胞内的三个原子, 故晶胞原子数 $n = 12 \times \frac{1}{6} + 2 \times \frac{1}{2} + 3 = 6$ 个。



(a)

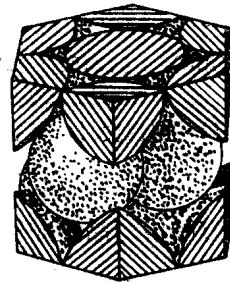
a) 刚球模型;



(b)

图1-6 密排六方晶格

b) 质点模型;



(c)

c) 晶胞原子数

密排六方晶格的晶格常数有二个，即六方底面的边长 a 及上下底面间的间距（即六方柱的高度） c 。 c/a 称为轴比。按刚球堆砌模型计算理想密排六方晶格的 $c/a=1.633$ 。但是，实际测得金属的轴比常偏离此值，一般介于 $1.57\sim 1.64$ 之间。表 1-3 列出某些密排六方晶格金属在室温下的晶格常数及轴比值。

表 1-3 一些密排六方晶格金属的晶格常数

金 属		Be	α -Ti	Mg	Zn	Cd	α -Co	α -Zr
晶格常数 (nm)	a	0.2286	0.2951	0.3209	0.2665	0.2979	0.2506	0.3231
	c	0.3583	0.4679	0.5211	0.4947	0.5617	0.4069	0.5148
轴 比 c/a		1.5677	1.5857	1.6235	1.8563	1.8858	1.624	1.5931

底面正六边形上的原子刚球是紧密接触的，故最近邻原子间距 $d=a$ 。

底面正六边形中心的原子与面上六个原子紧密接触，还与上、下两个晶胞内的三个原子紧密接触，故密排六方晶格的配位数为 12。致密度按理想密排计算：

$$K = \frac{nv}{V} = \frac{6 \times \frac{1}{6} \pi d^3}{6 \times \frac{1}{2} a \times \frac{\sqrt{3}}{2} a \times c} = \frac{\pi a^3}{1.5 \times \sqrt{3} \times 1.633 a^3} = 0.74 \text{ 或 } 74\%$$

无论从配位数或致密度来看，密排六方晶格的原子排列紧密程度与面心立方晶格的相同。

四、晶面指数和晶向指数*

在分析金属的结晶、变形及性能等问题时，常需涉及晶体中某些原子排列的方向（称晶向）和原子构成的某些平面（称晶面）。对各种位向的晶面和晶向通常采用一种统一的标号方法以确定晶面指数和晶向指数。国际上通用的是密勒氏标号法，其标号称为密勒指数。

1. 晶面指数

晶面指数的确定方法如下：

(1) 选定一个结点作为坐标原点，沿晶胞的三个棱边作 x 、 y 、 z 三个坐标轴，以晶胞边长（即晶格常数）作为晶轴长度的度量单位。特别应当注意，坐标原点应选在待定晶面之外。

(2) 求出特定晶面在三个坐标轴上的截距（如果晶面与某一坐标轴平行，则其截距为 ∞ ），设分别为 m 、 n 、 p 。

(3) 求出三个截距的倒数，并把它们化为最小的简单整数，即 $\frac{1}{m}$ 、 $\frac{1}{n}$ 、 $\frac{1}{p}$ 化为 $h = \frac{E}{m}$ 、 $k = \frac{E}{n}$ 、 $l = \frac{E}{p}$ ， E 为最小公倍数。

(4) 将这组最小整数加上圆括号，并且不用标点分开各数，即得晶面指数 (hkl) 。

如果待定晶面在某一坐标轴上的截距为负值，则在相应指数上方加一负号。

现举例说明如下：

图 1-7(a) 中晶面 $a_1 b_1 c_1 d_1$ 及 $a_2 b_2 c_2 d_2$ 为互相平行的两个晶面，在 x 、 y 、 z 坐标轴上的