

机械工程材料学

JIXIEGONGCHENGCAILIAOXUE

河南科学技术出版社

机械工程材料学

乔明俊 柏斯森 编
李建明 刘圣明
责任编辑 孟庆云

河南科学技术出版社出版
河南第一新华印刷厂印刷
河南省新华书店发行

787×1092毫米 16开本 17.75印张 394千字

1983年11月第1版 1983年11月第1次印刷

印数：1—9,600册

统一书号15245·31 定价2.00元

内 容 简 介

本书共分三篇。第一篇阐明了机械工程材料的基本理论。第二篇叙述了机械工程材料及钢铁的热处理。第三篇介绍了机械工程材料的选用。

本书的主要特点是重点叙述了金属学以及金属材料的基本内容，同时还结合我国目前的实际情况介绍了工程塑料、橡胶、有机粘结剂、陶瓷及复合材料等的基本知识。

本书可作为工科大专院校机械设计、机器制造、汽车、拖拉机、内燃机、精密机械及重型机械等专业的教学用书，也可供机械工程技术人员和科研人员进行参考。

前 言

1980年教育部制订的教学计划规定,机械制造工艺及设备专业要开设《工程材料与热处理》课程。机械工业部部属院校《金属材料及热处理》课程协作组1980年度会议纪要和另两次协作组会议都提出,要逐步把这门课程改造为《工程材料学》。根据上述精神,我们共同编写了这本书。

参加编写本书的同志有:湖南大学乔明俊(第一章第七章第三、四节)、太原重型机械学院柏斯森(第二、八、九章)、湖南大学李建明(第三、五章,第七章第一、二节及附录)、合肥工业大学刘圣明(第四、六章)。全书由乔明俊、李建明汇总整理,国防科技大学胡振渭教授主审,还经太原机械学院袁荣春副教授、国防科技大学赵清海、张书城、时明三位副教授、张家春老师以及湖南大学唐熏、谢建国二位老师审阅。本书插图由湖南大学刘林、刘凤祥等同志绘制,合肥工业大学刘圣明、湖南大学熊哨海等同志也参加了部分图稿工作。在编写过程中,承蒙湖南大学夏宗禹、王大洪、方国雄、高香山、陈献军等同志的热情协助,还得到有关单位的大力支持,在此一并致以衷心地谢意。

由于我们水平有限,经验不足,难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

绪 论	(1)
-----------	-------

第一篇 机械工程材料的基本理论

第一章 机械工程材料的结构和凝固	(3)
第一节 固体材料的晶体结构	(3)
一、晶体结构的基本概念	(3)
二、几种常见元素的晶体结构	(4)
三、晶面和晶向	(10)
四、晶体缺陷	(13)
第二节 机械工程材料的凝固及在生产中的应用	(16)
一、溶液的凝固条件	(17)
二、形核与长大	(18)
三、晶粒大小	(20)
四、凝固理论在生产上的应用	(21)
第三节 机械工程材料的组成相	(25)
一、固溶体	(26)
二、金属间的化合物	(29)
三、陶瓷中的化合物	(31)
第二章 相图	(32)
第一节 相图的建立	(33)
一、相图的表示方法	(33)
二、相图的测定方法	(34)
第二节 二元合金相图的基本类型	(35)
第三节 匀晶相图	(36)
一、相图的分析	(36)
二、固溶体的结晶及平衡组织	(37)
三、杠杆定律及应用	(37)
四、固溶体合金中的不平衡组织	(38)
第四节 铁碳合金相图	(40)
一、铁碳合金的基本组元及性能	(40)
二、Fe—Fe ₃ C相图分析	(41)
三、碳含量对铁碳合金组织和性能的影响	(50)
四、合金的性能和相图的关系	(51)

五、Fe—Fe ₃ C相图的应用	(52)
第五节 陶瓷材料的相图	(53)
第三章 塑性变形和强化	(54)
第一节 单晶体的塑性变形	(55)
一、滑移	(55)
二、化合物中的滑移	(58)
三、孪生	(59)
第二节 多晶体的塑性变形及细晶强化	(60)
第三节 塑性变形金属的组织 and 加工硬化	(62)
一、塑性变形金属的组织	(62)
二、加工硬化	(64)
第四节 回复和再结晶	(65)
一、回复	(66)
二、再结晶及晶粒长大	(67)
第五节 高温变形	(69)
第六节 强化材料的其它方法	(71)
一、固溶强化	(71)
二、复相强化	(72)

第二篇 常用的机械工程材料及钢铁热处理

第四章 钢的热处理	(76)
第一节 概述	(76)
第二节 钢在加热时的转变	(76)
一、奥氏体的形成	(77)
二、奥氏体晶粒的长大	(78)
第三节 钢在冷却时的转变	(80)
一、过冷奥氏体的等温转变	(81)
二、过冷奥氏体的连续冷却转变	(93)
三、过冷奥氏体转变图的实际意义	(95)
第四节 钢的退火与正火	(95)
一、退火	(95)
二、正火	(97)
第五节 钢的淬火	(97)
一、淬火温度的选择	(97)
二、淬火冷却介质	(98)
三、淬火冷却方法	(99)
四、钢的淬透性	(100)
五、淬火缺陷	(104)
第六节 钢的回火	(105)

一、回火时的组织变化	(105)
二、回火时的性能变化	(107)
三、回火脆性	(108)
四、回火的种类及应用	(109)
第七节 钢的表面淬火	(110)
一、感应加热表面淬火	(110)
二、火焰加热表面淬火	(112)
三、电接触加热表面淬火	(113)
第八节 钢的化学热处理	(113)
一、化学热处理的基本过程	(114)
二、钢的渗碳	(114)
三、钢的氮化	(118)
四、钢的碳氮共渗	(120)
第五章 钢铁材料	(122)
第一节 钢中的杂质及合金元素	(124)
一、钢中的杂质	(124)
二、合金元素在钢中的作用	(125)
第二节 碳钢的牌号和应用	(132)
一、普通碳素结构钢	(133)
二、优质碳素结构钢	(134)
三、碳素工具钢	(134)
四、铸钢	(135)
第三节 普通低合金钢	(136)
第四节 合金结构钢	(137)
一、调质结构钢	(137)
二、表面硬化钢	(141)
三、易切削钢和冷冲用钢	(144)
四、弹簧钢	(146)
五、滚动轴承钢	(148)
第五节 合金工具钢	(150)
一、刀具钢	(151)
二、模具钢	(158)
三、量具钢	(160)
四、硬质合金	(162)
第六节 特殊性能钢	(164)
一、耐蚀钢	(164)
二、耐热钢	(168)
三、耐磨钢	(169)

第七节 铸铁	(170)
一、铸铁的组织	(170)
二、灰口铸铁	(172)
三、可锻铸铁	(176)
四、球墨铸铁	(178)
五、特殊性能铸铁	(184)
第六章 有色金属材料	(186)
第一节 铝及其合金	(186)
一、纯铝的性质与用途	(186)
二、铝合金的分类及热处理	(186)
三、形变铝合金	(189)
四、铸造铝合金	(191)
第二节 铜及其合金	(194)
一、纯铜的性质及用途	(194)
二、黄铜	(194)
三、青铜	(196)
第三节 滑动轴承合金	(198)
一、滑动轴承合金的工作条件及性能要求	(198)
二、锡基及铅基轴承合金	(199)
三、铝基轴承合金	(199)
第七章 聚合物、陶瓷及复合材料	(200)
第一节 高聚物的结构	(200)
一、基本概念	(200)
二、聚合反应	(203)
三、高聚物的结构	(206)
四、结晶性	(208)
五、高聚物的凝固	(209)
第二节 高聚物的性能及其在机械工程中的应用	(210)
一、温度对高聚物状态的影响	(210)
二、工程塑料	(211)
三、橡胶	(217)
四、有机胶粘剂	(219)
第三节 陶瓷	(221)
一、陶瓷的性能及其在生产上的应用	(222)
二、陶瓷材料的显微结构	(224)
三、高铝瓷的显微结构分析	(226)
第四节 复合材料	(227)
一、无机纤维增强塑料的复合材料	(228)

二、无机纤维增强金属的复合材料	(229)
三、无机纤维增强陶瓷的复合材料	(229)
第三篇 机械工程材料的应用	
第八章 机械工程材料的选用	(230)
第一节 机械工程设计中对选材的一般要求	(230)
一、金属零件的选材原则	(230)
二、非金属零件的选材原则	(232)
第二节 典型零件的选材及应用实例	(234)
一、金属零件的选材及应用实例	(234)
二、非金属零件的选材及应用实例	(240)
第九章 热处理与零件结构设计及加工工艺的关系	(254)
第一节 零件结构形状的热处理工艺性	(255)
一、合理设计零件结构形状	(255)
二、正确选用材料	(256)
三、合理制定热处理技术条件	(256)
第二节 热处理与其它加工工艺之间的关系	(258)
一、预先热处理工艺	(258)
二、热处理工艺方案的选择	(259)
三、热处理在工艺路线中的位置	(260)
附录 I 本书采用的符号及计量单位	(263)
附录 II 机械工程材料分类表	(264)
附录 III 硬度及硬度换算表	(265)
附录 IV 几个主要产钢国钢号编号法及与我国钢号对照	(269)
一、苏联钢号编号法	(269)
二、美国钢号编号法	(270)
三、德国钢号编号法	(270)
四、日本钢号编号法	(271)
附录 V 图纸上标注的热处理工艺符号的含义	(273)

绪 论

材料、能源和信息已被列为现代科学技术的三大支柱。作为支柱之一的材料通常可分为金属、无机非金属和有机高分子材料三大类。它们广泛地应用于工业、农业、国防和科学技术的各个方面，是我国发展国民经济的重要物质基础。

在机械工业生产中，大量使用的各种各样设备，如各种机床、重型及精密机械设备、汽车、内燃机等机械产品，无不与材料发生密切关系。这些材料的成分不同，性能各异。这里所说的性能主要是指使用性能，如机械性能、物理性能、化学性能等。而常说的工艺性能则是指铸造性能、压力加工性能、焊接性能、热处理性能、切削加工性能等。作为机械产品，除了对材料的性能有要求外，还希望生产效率高、成本低。为达到上述目的，合理地选用材料，正确地制定加工工艺路线是非常重要的。因此，了解材料的成分、性能、组织结构及加工工艺之间的关系是十分必要的。

机械工程材料学是材料科学中的一个分支，着重研究机械工程材料的成分、组织结构和性能之间的关系，即研究机械工程材料的分子或原子结构，微观及宏观组织和性能之间的关系，以及加工制造工艺等方面的内容。与此同时，也涉及设计中的选材原则及零件加工工艺等方面的知识。

目前，机械工业生产中应用最广的仍是金属材料。我国使用金属材料的历史，最早可以追溯到公元前十七世纪的殷商时代。在以后的漫长岁月里，金属的生产和使用不断发展进步，到明代就已对金属的冶炼、制造加工（包括热处理）及检验技术有了较详细的记载。至于我国古代的陶瓷及天然高分子材料如丝绸，在世界文明史上更占有光辉的一页。但是，长期的封建统治及近百年来帝国主义的侵略、压榨，使我国的工业农业停滞不前。解放前夕，我国钢的年产量只有十几万吨。塑料、合成橡胶等材料的生产和应用处于极端落后的状态。解放后，随着社会主义建设事业的发展，各种材料的生产和研制工作也有了迅猛发展，为我国的工业、农业、国防和科学技术的发展，提供了重要的物质基础。到1981年我国钢产量已达3560万吨，各种塑料的年产量也达916万吨，橡胶、陶瓷等非金属材料的产量也有了大幅度增长。并且为国防尖端武器和发射人造地球卫星提供了特殊性能的新型材料。

但是，随着现代科学技术的飞速发展，对材料的性能、使用效率和寿命提出了越来越高的要求。因而在材料的应用和研究上出现了一些新的趋势。主要表现在以下几方面：一是材料的应用上，以非金属代替部分金属材料，在金属材料中以非铁金属代替部分钢铁材料，以硅锰合金钢代替铬镍合金钢等。第二，材料的使用效率不断提高。如民航材料的消耗，在五十年代平均每小时每旅客每哩为2.7磅（波音同温层飞机），到七十年代仅为1.1磅（协和机）。材料消耗的减少主要是由于科技工作者进行了优化设计、合理选材和制订了正确的制造加工工艺等，因而提高了材料的使用效率和寿命。第三，

不断地提高结构材料的强度和韧性。

为适应材料和材料科学的迅速发展，近年来国内外一些高等院校相继设置材料科学系或材料科学与工程专业。这些院校的机械工程类专业中已经或准备开设《工程材料》或《机械工程材料学》课程。这本《机械工程材料学》便是为满足目前教学形势的需要而编写的。

《机械工程材料学》是机械工程类专业的技术基础课。由于现在机械工业生产中大量使用的仍是金属材料，所以本书以金属材料及热处理的内容为主，适当的添加了工程塑料、陶瓷等方面的内容。在金属材料、无机非金属材料及有机高分子材料中，尽管有不少共性，但它们各有其特殊性。因此，本书辟以独立章节专门叙述它们的特殊性，而对其共性则归并一起介绍。

学习完本书，学生应获得有关机械工程材料和金属热处理的基本理论知识；掌握机械工程材料的组成、结构和性能之间的一般关系；了解金属热处理的各种工艺及用途，并应初步具备合理选用机械工程材料，制定热处理工艺以及安排加工工艺路线的能力，具备工程师、工艺师应当有的机械工程材料的基本知识。机械工程类各专业学生对本书第一篇机械工程材料的基本理论部分是均应掌握的。对第二、三篇则可根据各专业的特点，在材料、工艺及应用几个方面各有侧重。本书也可供机械工程技术人员参考。

第一篇 机械工程材料的基本理论

第一章 机械工程材料的结构和凝固

机械工程材料应用极为广泛。主要是由于它们具有良好的机械性能、物理性能、化学性能和工艺性能等，而材料的性能又取决于材料的组成和结构，也就是说与其内部组成原子（离子或分子）的性质、聚集状态以及分布规律等因素有密切关系。因此了解机械工程材料的结构以及这些材料是怎样从液态凝固成固态的有关理论和应用是机械工程材料学的最基本内容。

本章研究金属及无机非金属材料的结构和凝固，有机材料的这方面内容在第七章介绍。

第一节 固体材料的晶体结构

本节阐述固体材料晶体结构的基本概念及机械工程材料中几种常见元素的晶体结构。

自然界的物质按原子（离子或分子）的聚集状态可以分为两类：晶态固体（即晶体）和非晶态固体（即非晶体，又叫玻璃态或无定形结构）。机械工程材料也分为这两类：晶态固体材料，如钢铁、铜、铝、金刚石、硅酸盐、氯化钠等；非晶态固体材料，如玻璃、橡胶、塑料、松香等。晶体与非晶体最本质的区别是：晶体内部的原子（离子或分子）是有规则的排列；而非晶体就不具备这一特点，其内部原子（离子或分子）是无规则排列，最多在局部的短距离范围内有规则排列；其次，液态转变为晶体是突变的，有确定的凝固点和熔点，而液态转变为非晶体，则有一个逐渐过渡的过程，没有明显的凝固点（或熔点）等特性，为什么固体材料会有这样一些特性呢？这就必须了解其内部的结构状况。

一、晶体结构的基本概念

由于晶体中原子（离子或分子）有规则地重复排列，象钢球在空间有规则地堆积一样，如图1-1(a)，很难看清楚其内部原子（离子或分子）排列的规律和特点。晶体学中为了研究原子（离子或分子）内部的聚集状态，描述不同晶体、原子的堆积方式，只画出每个原子（离子或分子）的中心点，用线条把这些中心点连接起来，便能够清楚地看出原子内部排列情况，如图1-1(b)，这种用线条将各个原子中心点连接起来的几何空间格子叫晶格。这些原子中心点叫结点。构成晶格的最基本单元叫单位晶格，又叫晶胞，如图1-1(c)。单位晶格各边的尺寸 a 、 b 、 c 叫做晶格常数，其计量单位为埃

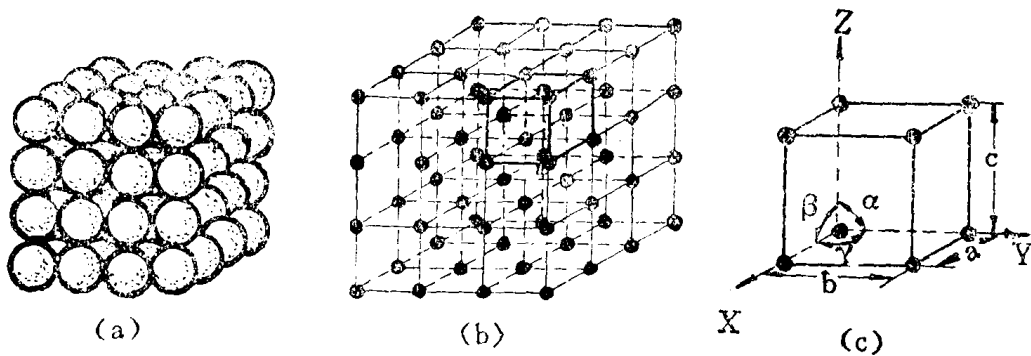


图 1-1 晶体、晶格和晶胞示意图

(a) 刚球模型 (b) 晶格模型 (c) 晶胞示意图

($\text{\AA}$), $1(\text{\AA}) = 1 \times 10^{-8}$ 厘米。晶胞各边之间的相互夹角以 α 、 β 、 γ 表示。为描述晶体结构, 通常都是将坐标原点确定在晶胞的一个角点上, 晶胞的三个棱边在三条坐标轴上, 并以晶格常数为度量单位。晶格常数 $a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 的晶胞叫简单立方晶胞, 也叫简单立方晶格。

必须指出, 晶体的晶格显示了原子(离子或分子)有规则地排列, 图上的结点表示排列的情况; 并代表原子(离子或分子)的重心位置。实际上, 晶体中的原子(离子或分子)是在其平衡位置附近振动的, 故应把结点看作为原子(离子或分子)的平衡中心。

此外, 还应当注意到, 为什么不同物质往往具有不同的结构呢? 这主要是由原子(离子或分子)之间结合力决定的。固体材料中原子(离子或分子)之间结合, 不外乎有金属键、离子键、共价键、分子键四种形式。金属固体中原子的结合方式一般是金属键。非金属固体的原子(离子或分子)间结合方式一般是离子键、共价键和分子键。固体材料中原子(离子或分子)间的结合方式及结合力的大小, 将直接影响到固体材料的性质。所以了解固体材料的内部结构, 区分固体材料中结构类型, 对了解该固体材料所具有的一般性质是十分重要的。以下着重介绍晶态固体材料的晶体结构。

二、几种常见元素的晶体结构

(一) 常见金属元素的晶体结构

为了分析元素的晶体结构, 参照化学元素周期表 1-1 便可明确地看出, 在已知的八十多种金属元素中, 除少数十余种金属具有复杂的晶体结构外, 大多数金属元素的晶体

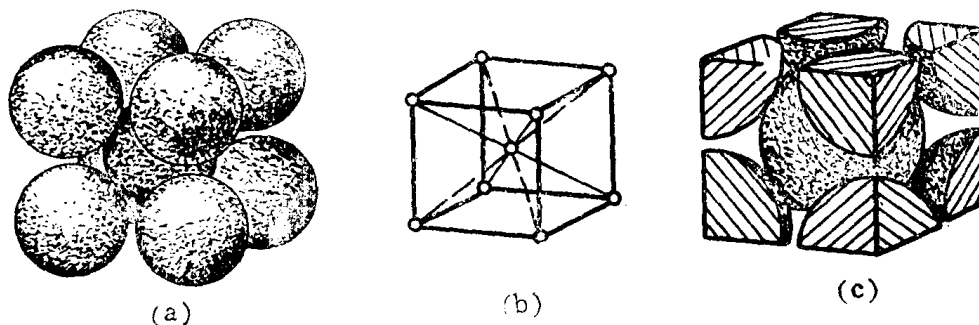


图 1-2 体心立方晶格示意图

(a) 刚球模型 (b) 晶格模型 (c) 晶胞原子数示意图

表 1-1 化学元素周期表

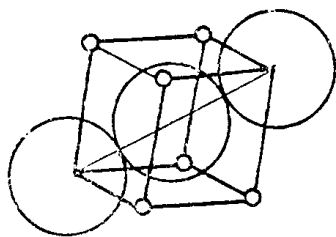
周期	I A	II A	III A	IV A	V A	VI A	VII A	0族	电子层数
1	1. 氢 H 1s ¹ 1.00797	2. 氦 He 1s ² 4.0026						2 氦 He 1s ² 4.0026	0族
2	3. 锂 Li 2s ² 2p ¹ 6.939	4. 铍 Be 2s ² 2p ⁰ 9.0122	5. 硼 B 2s ² 2p ¹ 10.811	6. 碳 C 2s ² 2p ² 12.011	7. 氮 N 2s ² 2p ³ 14.0067	8. 氧 O 2s ² 2p ⁴ 15.9994	9. 氟 F 2s ² 2p ⁵ 18.9984	10. 氖 Ne 2s ² 2p ⁶ 20.179	2 氦 He 1s ² 4.0026
3	11. 钠 Na 3s ¹ 22.9898	12. 镁 Mg 3s ² 24.305	13. 铝 Al 3s ² 3p ¹ 26.9815	14. 硅 Si 3s ² 3p ² 28.086	15. 磷 P 3s ² 3p ³ 30.9738	16. 硫 S 3s ² 3p ⁴ 32.064	17. 氯 Cl 3s ² 3p ⁵ 35.453	18. 氩 Ar 3s ² 3p ⁶ 39.948	3 锂 Li 2s ² 2p ¹ 6.939
4	19. 钾 K 4s ¹ 39.10	20. 钙 Ca 4s ² 40.08	21. 钪 Sc 3d ¹ 4s ² 44.956	22. 钛 Ti 3d ² 4s ² 47.90	23. 钒 V 3d ³ 4s ² 50.941	24. 铬 Cr 3d ⁵ 4s ¹ 51.996	25. 锰 Mn 3d ⁵ 4s ² 54.938	26. 铁 Fe 3d ⁶ 4s ² 55.847	4 铍 Be 2s ² 2p ⁰ 9.0122
5	37. 铷 Rb 5s ¹ 85.467	38. 锶 Sr 5s ² 87.62	39. 钇 Y 4d ¹ 5s ² 88.905	40. 锆 Zr 4d ² 5s ² 91.22	41. 铌 Nb 4d ⁴ 5s ¹ 92.906	42. 钼 Mo 4d ⁵ 5s ¹ 95.94	43. 锝 Tc 4d ⁵ 5s ² (98.9062)	44. 钌 Ru 4d ⁷ 5s ¹ 101.07	5 钠 Na 3s ¹ 22.9898
6	55. 铯 Cs 6s ¹ 132.905	56. 钡 Ba 6s ² 137.34	57~71. 镧系 La~Lu 5d ¹ 6s ² 铜系	72. 铪 Hf 5d ² 6s ² 178.49	73. 钽 Ta 5d ³ 6s ² 180.948	74. 钨 W 5d ⁴ 6s ² 183.85	75. 铼 Re 5d ⁵ 6s ² 186.2	76. 锇 Os 5d ⁶ 6s ² 190.2	6 钙 Ca 4s ² 40.08
7	87. 钫 Fr 7s ¹ (223)	88. 镭 Ra 7s ² (226)	89~103. 锕系 Ac~Lw 6d ¹ 7s ² 铜系	104. 镎 Np 6d ³ 7s ² (237)	105. 钚 Pu 6d ⁴ 7s ² (244)	106. 镅 Am 6d ⁵ 7s ² (251)	107. 锔 Cm 6d ⁶ 7s ² (257)	108. 锿 Es 6d ⁷ 7s ² (261)	7 钾 K 4s ¹ 39.10

57~71 镧系元素	57. 镧 La 5d ¹ 6s ² 138.91	58. 铈 Ce 4f ¹ 5d ¹ 6s ² 140.12	59. 镨 Pr 4f ³ 6s ² 140.907	60. 钕 Nd 4f ⁴ 6s ² 144.24	61. 钷 Pm 4f ⁵ 6s ² (145)	62. 钐 Sm 4f ⁶ 6s ² 150.35	63. 铕 Eu 4f ⁷ 6s ² 151.96	64. 钆 Gd 4f ⁷ 5d ¹ 6s ² 157.25	65. 铽 Tb 4f ⁹ 6s ² 158.9254	66. 镝 Dy 4f ¹⁰ 6s ² 162.50	67. 钬 Ho 4f ¹¹ 6s ² 164.930	68. 铒 Er 4f ¹² 6s ² 167.26	69. 铥 Tm 4f ¹³ 6s ² 168.934	70. 镱 Yb 4f ¹⁴ 6s ² 173.04	71. 镥 Lu 4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ² 174.97
89~103 锕系元素	89. 锕 Ac 6d ¹ 7s ² (227)	90. 钍 Th 6d ² 7s ² (232.038)	91. 镤 Pa 5f ² 6d ¹ 7s ² (231)	92. 铀 U 5f ³ 6d ¹ 7s ² (238.03)	93. 镎 Np 5f ⁴ 6d ¹ 7s ² (237)	94. 钚 Pu 5f ⁶ 7s ² (244)	95. 镅 Am 5f ⁷ 7s ² (251)	96. 锔 Cm 5f ⁷ 6d ¹ 7s ² (257)	97. 锫 Bk 5f ⁹ 7s ² (267)	98. 锿 Cf 5f ¹⁰ 7s ² (281)	99. 镄 Es 5f ¹¹ 7s ² (287)	100. 镅 Fm 5f ¹² 7s ² (289)	101. 镎 Md 5f ¹³ 7s ² (291)	102. 钆 No 5f ¹⁴ 7s ² (289)	103. 镅 Lw 5f ¹⁴ 7s ² (291)

原子序数—12 密六—晶体结构
元素—Mg 3s²—外层电子的构型
元素名称—镁 24.305—原子量
与铁形成连续固溶体的Y相固溶体
与铁形成封闭的Y相区
不溶解于铁的
扩大Y相区
缩小Y相区
粗线区内为在钢中形成碳化物的元素

结构分为三种晶格，即体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。

1. 体心立方晶格



体心立方晶格其晶格常数为 $a=b=c$ ，三个轴间夹角 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ，在晶胞的八个角上各有一个原子，中心处也有一个原子，如图1-2(a)(b)可见。属这个类型晶格的如 $\alpha\text{-Fe}$ 、 $\delta\text{-Fe}$ 、W、Mo、Cr等金属元素。

在体心立方晶胞的空间对角线方向，原子相互相切地排列。空间对角线的长度是 $\sqrt{3}a$ 等于四个原子半径，

图 1-3 体心立方晶胞原子沿空间对角线排列示意图

故体心立方晶胞中的原子半径 $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ ，如图1-3。

每个体心立方晶胞中含有几个原子呢？已知体心立方晶胞每个角上的原子属于8个晶胞共有，所以只有1/8原子属于该晶胞，而晶胞中心的一个原子才属于这个体心立方晶胞所有，故每个体心立方晶格中的原子数为 $1/8 \times 8 + 1 = 2$ 个，见图1-2(c)。

再根据原子的半径，可以得到每个原子的体积，从而可求出单位晶胞体积中的所含原子体积，即所谓的晶体致密度。

$$\text{体心立方晶体的致密度} = \frac{2 \text{ 个原子体积}}{\text{晶胞体积}} = \frac{\frac{4}{3}\pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4}a\right)^3 \times 2}{a^3} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{16}\pi a^3 \times 2}{a^3} = \frac{\sqrt{3}}{8}\pi \approx 0.68。$$

此外，从图1-2(a)可以看出，晶体中原子之间还存在间隙。

体心立方晶格中有两种间隙位置，如图1-4(a)(b)可见到，一种是八面体间隙，而另一种是四面体间隙。图1-4(a)

示由六个原子围成的八面体中间的间隙叫八面体间隙，四个角上的原子中心到间隙中心的距离为 $\frac{\sqrt{2}}{2}a$ ，上下顶点(即

体心立方晶格中心原子)的原子中心到间隙中心的距离为

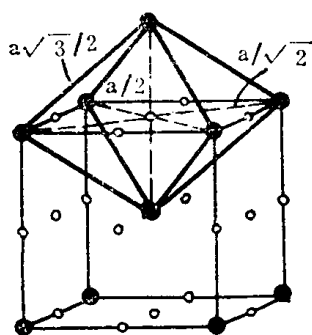
$\frac{a}{2}$ 。间隙的最小半径为顶点的

原子中心到间隙中心的距离减

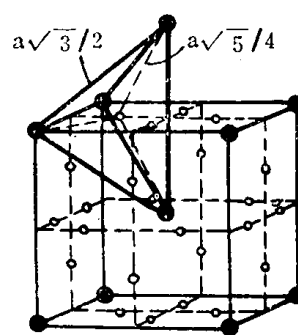
去原子半径，即 $\frac{a}{2} - \frac{\sqrt{3}}{4}a \approx 0.067a$ ，这种八面体间隙的位置分布在各面的中心和各棱

的中点处。

图1-4(b)示由四个原子围成的四面体中间的间隙叫四面体间隙，这些原子中心到间



(a)



(b)

图 1-4 体心立方晶格中的间隙位置

(a)八面体间隙 (b)四面体间隙

隙中心的距离皆为 $\frac{\sqrt{5}}{4}a$ ，它减去原子半径 $\frac{\sqrt{3}}{4}a$ ，就是此四面体间隙的半径，即

$\frac{\sqrt{5}-\sqrt{3}}{4}a=0.126a$ 。可见在体心立方晶格中四面体间隙比八面体间隙要大得多。

2. 面心立方晶格

面心立方晶格，在晶胞八个角上各有一个原子，立方体的六个面中心也各有一个原子，见图1-5(a)、(b)。属这类晶格的金属元素如Al、Cu、Ni、 γ -Fe、Co、Ag等。

面心立方晶胞中的原子数为4。见图1-5(c)。

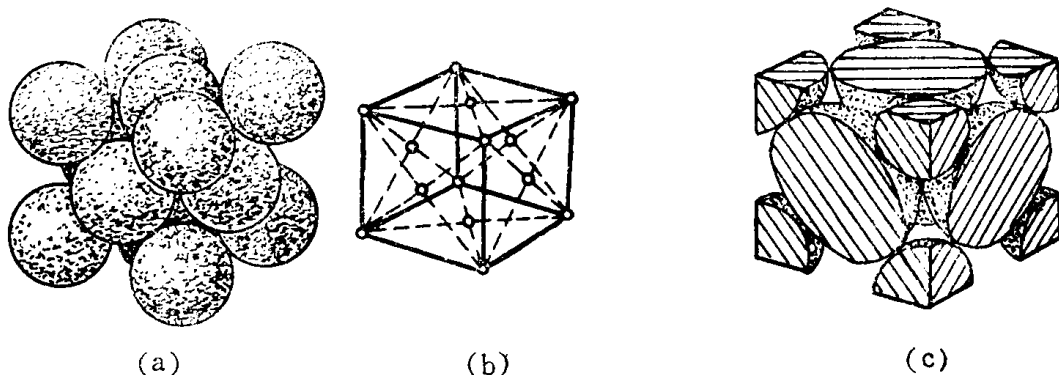


图 1-5 面心立方晶格示意图

(a)刚球模型 (b)晶格模型 (c)晶胞中原子数示意图

沿着晶胞面对角线方向原子互相互切地排列。面对角线的长度为 $\sqrt{2}a=4$ 个原子半径，则面心立方晶胞中原子半径 $r=\frac{\sqrt{2}}{4}a$ ，那么

$$\text{面心立方晶格的致密度} = \frac{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{\sqrt{2}}{4}a\right)^3 \times 4}{a^3} = \frac{\sqrt{2}}{6}\pi \approx 0.74 = 74\%$$

面心立方晶格的间隙有两种位置，一种是八面体间隙如图1-6(a)；另一种是四面体间隙如图1-6(b)。八面体间隙的六个原子中心到间隙中心的距离都是 $a/2$ ，所以为正八面体间隙。间隙的半径为 $0.146a$ 。

四面体间隙的四个原子中心到间隙中心的距离皆为 $\frac{\sqrt{3}}{4}a$ ，间隙半径为

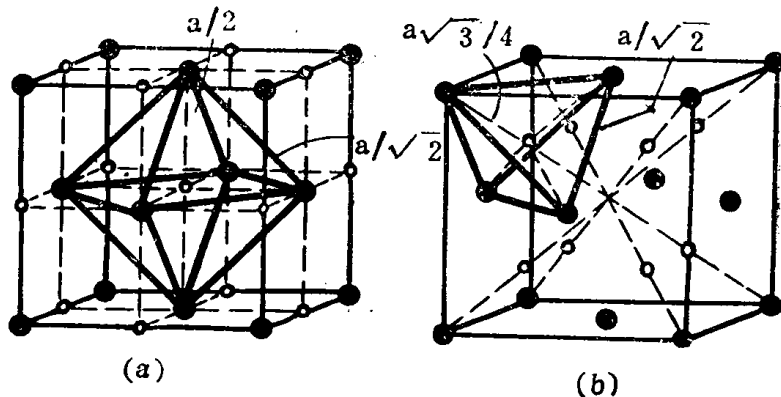


图 1-6 面心立方晶格的间隙位置

(a)八面体间隙 (b)四面体间隙

0.08a, 可见面心立方晶胞中四面体间隙比八面体间隙小得很多。

从上述原子排列模型看到原子与原子之间存在许多间隙。分析这些间隙的数量、位置和间隙的大小等, 对于了解金属的性能、合金的结构以及相变等内容是极为重要的。

3. 密排六方晶格

密排六方晶格见图1-7(a)、(b), 它的 $a=b \neq c$, 晶轴为 a_1 、 a_2 、 a_3 及 c , 轴 a_1 、 a_2 、 a_3 间夹角互为 120° , c 轴垂直于这三个轴, 在六方晶胞的十二个角上各有一个原子, 构成六方柱体。加上上下底面中心各有一个原子以及此晶胞内部还有三个原子, 构成密排六方晶胞。属这类晶格的如Mg、Zn、Cd、Be等金属元素。

密排六方晶胞的原子数是这样组成的: 该晶胞上每个角的原子属六个晶胞共有; 上下底面中心的原子又属于相邻两个晶胞共有; 只有其内部三个原子才完全属于这个晶胞。故密排六方晶胞的原子数为6, 见图1-7(c)。

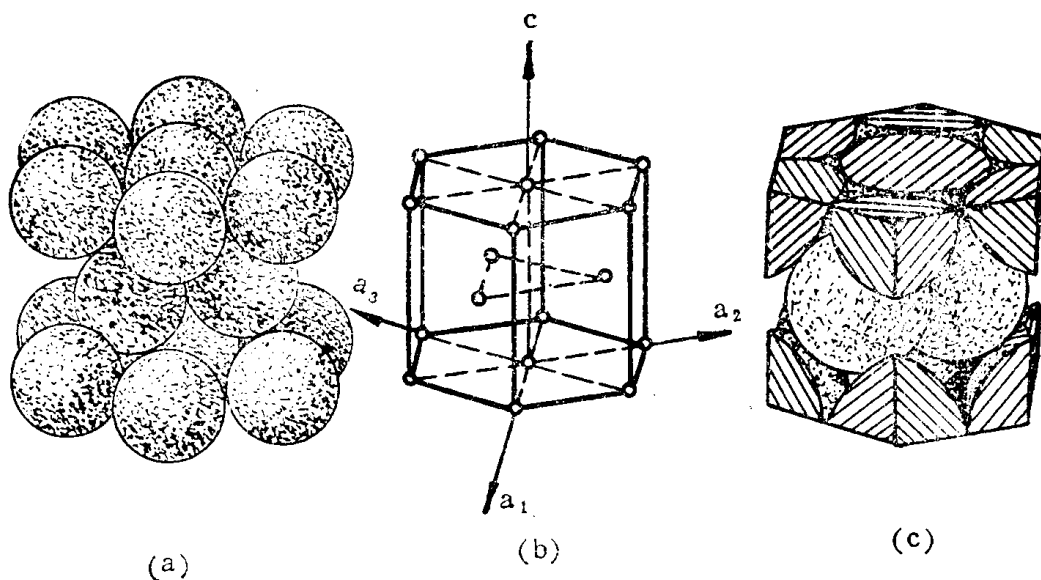


图 1-7 密排六方晶格示意图

(a) 刚球模型 (b) 晶格模型 (c) 晶胞原子数示意图

密排六方晶格中正六边形底面的边长 a 和上下底面间距离 C , 其轴比 $\frac{c}{a} = \sqrt{\frac{8}{3}}$,

原子半径 $r = \frac{a}{2}$, 其体积为 $6 \times \frac{a}{2} \left(\sqrt{a^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{8}{3}} a \right) = 3\sqrt{2} a^3$, 那么

$$\text{密排六方晶体的致密度} = \frac{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{a}{2}\right)^3 \times 6}{3\sqrt{2} a^3} = \frac{\sqrt{2}}{6} \pi \approx 0.74 = 74\%$$

由上述可知, 晶体的致密度为晶胞中所含原子所占有的体积与晶胞体积之比。这是反映晶体中原子排列紧密程度的一个参数; 另一个参数就是配位数, 它是任一个原子与周围最邻近的等距离的原子数目。

现将以上三种晶格结构有关数据列表如下: