

教育部推荐教材

# 工程材料及热处理

主 编 朱 明 王晓刚  
副主编 王志华 尹孝辉

 北京师范大学出版集团  
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP  
北京师范大学出版社

TB3  
100

教育部推荐教材

# 工程材料及热处理

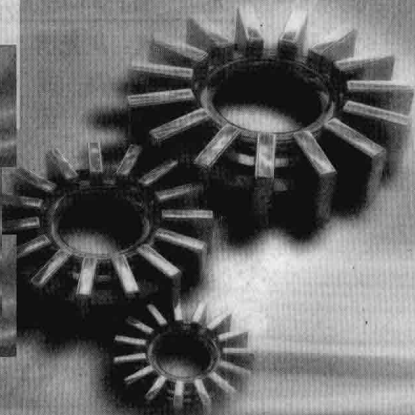
主 编 朱 明 王晓刚

副主编 王志华 尹孝辉

参 编 多树旺 李 超 赵龙志 彭龙贵



北京师范大学出版集团  
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP  
北京师范大学出版社



---

图书在版编目(CIP)数据

工程材料及热处理 / 朱明, 王晓刚主编. —北京: 北京师范大学出版社, 2010.8  
ISBN 978-7-303-10998-2

I. ①工… II. ①朱…②王… III. ①工程材料②热处理  
IV. ①TB3②TC15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 083969 号

---

---

出版发行: 北京师范大学出版社 [www.bnup.com.cn](http://www.bnup.com.cn)  
北京新街口外大街 19 号  
邮政编码: 100875

印 刷: 北京嘉实印刷有限公司  
经 销: 全国新华书店  
开 本: 184 mm × 260 mm  
印 张: 21  
字 数: 458 千字  
版 次: 2010 年 8 月第 1 版  
印 次: 2010 年 8 月第 1 次印刷  
定 价: 33.00 元

---

策划编辑: 周光明	责任编辑: 周光明
美术编辑: 高 霞	装帧设计: 华鲁印联
责任校对: 李 茵	责任印制: 李 啸

**版权所有 侵权必究**

反盗版、侵权举报电话: 010-58800697

北京读者服务部电话: 010-58808104

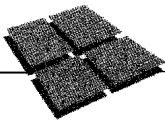
外埠邮购电话: 010-58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-58800825

# 目 录

<b>绪 论</b> .....	(1)
0.1.1 材料科学概要 .....	(1)
0.1.2 热处理技术的发展 .....	(3)
0.1.3 工程材料的分类 .....	(3)
<b>第 1 章 金属学基本知识</b> .....	(5)
1.1 金属的特性 .....	(5)
1.2 金属的晶体结构 .....	(6)
1.3 金属的结晶过程 .....	(17)
1.4 铸锭的结构 .....	(21)
1.5 金属的塑性变形 .....	(22)
<b>第 2 章 二元合金相图</b> .....	(31)
2.1 合金中的相 .....	(31)
2.2 二元合金相图的建立 .....	(36)
2.3 匀晶相图 .....	(39)
2.4 二元共晶相图 .....	(41)
2.5 包晶相图 .....	(45)
2.6 其他相图 .....	(47)
2.7 二元合金相图的分析与使用 .....	(48)
<b>第 3 章 铁碳合金相图</b> .....	(53)
3.1 铁碳合金的组元和特性 .....	(53)
3.2 铁碳合金中的基本相、基本组织及其性能 .....	(54)
3.3 铁碳合金相图分析 .....	(55)
3.4 典型铁碳合金的结晶过程及其组织 .....	(57)
3.5 碳的质量分数对铁碳合金组织、性能的影响 .....	(63)
3.6 铁碳合金相图的应用和局限性 .....	(64)
<b>第 4 章 钢的热处理</b> .....	(66)
4.1 钢在加热时的转变 .....	(67)



4.2	钢在冷却时的转变 .....	(72)
4.3	钢的退火和正火 .....	(79)
4.4	钢的淬火 .....	(85)
4.5	钢的回火 .....	(93)
4.6	钢的表面热处理 .....	(97)
4.7	钢的热处理新技术 .....	(105)
4.8	热处理技术条件的标注及工序位置的安排 .....	(109)
<b>第5章</b>	<b>碳 钢</b> .....	(114)
5.1	钢中常见杂质元素的影响 .....	(114)
5.2	碳钢的分类、牌号和用途 .....	(116)
<b>第6章</b>	<b>合金钢</b> .....	(123)
6.1	概述 .....	(123)
6.2	合金元素在钢中的作用 .....	(124)
6.3	合金结构钢 .....	(132)
6.4	合金工具钢 .....	(147)
6.5	特殊性能用钢 .....	(154)
<b>第7章</b>	<b>铸铁与铸钢</b> .....	(165)
7.1	概 论 .....	(165)
7.2	灰口铸铁 .....	(172)
7.3	球墨铸铁 .....	(178)
7.4	蠕墨铸铁 .....	(186)
7.5	可锻铸铁 .....	(187)
7.6	特种铸铁 .....	(191)
7.7	铸钢 .....	(194)
<b>第8章</b>	<b>有色金属及其合金</b> .....	(201)
8.1	铝及铝合金 .....	(201)
8.2	铜及铜合金 .....	(211)
8.3	钛及钛合金 .....	(227)
8.4	镁及镁合金 .....	(230)
8.5	轴承合金 .....	(233)
<b>第9章</b>	<b>高分子材料</b> .....	(240)
9.1	高分子的链结构 .....	(240)
9.2	高分子的聚集态结构 .....	(243)
9.3	聚合物的力学性质 .....	(245)

9.4	工程塑料 .....	(250)
9.5	特种塑料 .....	(257)
9.6	橡胶材料 .....	(268)
9.7	工程胶黏剂 .....	(272)
<b>第 10 章</b>	<b>工程陶瓷材料 .....</b>	<b>(280)</b>
10.1	陶瓷材料概述 .....	(280)
10.2	常用工程陶瓷 .....	(282)
<b>第 11 章</b>	<b>复合材料 .....</b>	<b>(296)</b>
11.1	复合材料概述 .....	(296)
11.2	金属基复合材料 .....	(300)
11.3	陶瓷基复合材料 .....	(306)
11.4	聚合物基复合材料 .....	(309)
<b>第 12 章</b>	<b>机器零件的失效与选材 .....</b>	<b>(313)</b>
12.1	零件的失效 .....	(313)
12.2	零件选材的原则 .....	(314)
12.3	典型零件的选材 .....	(318)
<b>参考文献</b>	.....	<b>(326)</b>

## 绪 论

### 0.1.1 材料科学概要

材料是人类用于制造物品、器件、构件、机器或其他产品的那些物质，是人类赖以生存的基础。20世纪70年代，人们把信息、物质和能量誉为当代文明的三大支柱。80年代以高技术群为代表的新技术革命，又把新材料、信息技术和生物技术并列为新技术革命的重要标志。这主要是因为材料与国民经济建设、国防建设和人民生活密切相关。

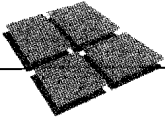
人类发展的历史证明，材料是社会进步的物质基础，是人类进步程度的主要标志，所以人类社会的进步以材料作为里程碑。纵观人类发现材料和利用材料的历史，每一种重要材料的发现和广泛利用，都会把人类支配和改造自然的能力提高到一个新的水平，给社会生产力和人类生活水平带来巨大的影响，把人类的物质文明和精神文明向前推进一步。

早在一百万年以前，人类就开始用石头做工具，进入旧石器时代。大约一万年以前，人类学会了对石头进行加工，使之成为精致的器皿或工具，从而迈入新石器时代。在新石器时代，人类开始用皮毛遮身。8000年前中国就开始用蚕丝做衣服，4500年前印度人开始种植棉花，这些都证明了人类使用材料促进文明进步。在新石器时代，人类已知道使用自然铜和天然金，但这些自然金属毕竟数量有限，分散细小，没有对人类社会产生重要影响。

大约在8000~9000年前，人类还处于新石器时代，就已发明了用粘土成型，再火烧固化而成为陶器。陶器不但用于器皿，而且成为装饰品，是对精神文明的一大促进，历史上虽无“陶器时代”这一名称，但其对人类文明的贡献是不可估量的。在烧制陶器过程中，人们偶然发现了金属铜和锡，当然那时还不明白这是铜、锡的氧化物在高温下被碳还原的产物，进而又生产出色泽鲜艳且能浇铸成型的青铜，从而使人类进入青铜时代。这是人类较大量利用金属的开始，也是人类文明发展的重要里程碑。世界各地进入青铜时代的时间各不相同。希腊约在公元前3000年，埃及约在公元前2500年，巴比伦约在公元前19世纪中叶，印度约在公元前3000年，已广泛使用青铜器。中国的青铜器在公元前2700年已经出现了，至今约有5000年的历史，到商周(公元前17世纪—公元前3世纪)进入了鼎盛时期，如河南安阳出土的达875kg的司母戊大方鼎、湖北随县的编钟、西安兵马俑青铜车马都充分反映了当时中国冶金技术水平和制造工艺的高超。

由使用青铜器过渡到使用铁器是生产工具的重大发展。在公元前13—14世纪时，人类已开始使用铁器，3000年前，铁工具比青铜工具更为普遍，人类开始进入了铁器时代。我国早在周代就开始冶炼铁，这比欧洲要早2000年。到春秋战国时期(公元前770—前221年)，开始大量使用铁器。从兴隆战国铁器遗址中挖掘的浇铸农具的铁模说明当时的冶铸技术已由泥沙造型阶段进入了金属造型的高级阶段。在西汉时期，炼铁技术又有了很大发展，采用煤作为炼铁燃料，这比欧洲要早1700多年。此外，在采





用先炼铁后炼钢的两步法炼钢技术方面，我国要比其他国家早 1600 多年。相应地，在金属加工技术方面，我国古代也有高度的发展，留下了大量的文物和历史文献。在 17 世纪以前，在材料的生产、加工和使用方面，我国一直处于世界领先地位。我们勤劳智慧的祖先为材料科学的发展做出了巨大的贡献。

公元前 1000 年以后，铁器逐渐从亚洲大陆传到了文明古国巴比伦、埃及和希腊，并得到了广泛的应用。炼铁技术经过许多个世纪的传播和发展，在西欧和俄国创造了不少冶炼技术，使以钢铁为代表的材料生产和应用跨入了一个新的阶段。但是人们对材料的认识仍然是表面的、非理性的，仍然停留在工匠、艺人的经验水平上。

随着世界文明的进步，18 世纪发明了蒸汽机，19 世纪发明了电动机，对金属材料提出了更高的要求，同时，对钢铁冶金技术产生了更大的推动作用。1854 年和 1864 年先后发明了转炉和平炉炼钢，使世界钢产量有一个飞跃。例如，1850 年世界钢产量为 6 万吨，1890 年达 2 800 万吨，大大促进了机械制造、铁道交通及纺织工业的发展。电炉冶炼随之出现，不同类型的特殊钢相继问世，如 1887 年的高锰钢、1900 年的 18-4-1 ( $W_{18}Cr_4V$ ) 高速钢、1903 年的硅钢及 1910 年的奥氏体镍铬 ( $Cr_{18}Ni_8$ ) 不锈钢，把人类带进了文明时代。在此前后，铜、铝也得到大量应用，而后，镁、钛和很多稀有金属都相继出现，从而使金属材料在整个 20 世纪占据了结构材料的主导地位。

随着现代科学技术和生产水平的飞速发展，传统的金属材料已经不能满足日益增长的要求，因而促进了非金属材料的迅猛发展，并使非金属材料得到了广泛的应用。20 世纪初人工合成有机高分子材料相继问世，如 1909 年的酚醛树脂(电木)、1920 年的聚苯乙烯、1931 年的聚氯乙烯及 1941 年的尼龙等，因其具有性能优异，资源丰富、建设投资少、收效快等优点而得到迅速发展。目前世界三大有机合成材料(树脂、纤维和橡胶)年产量逾亿吨。而且有机材料的性能不断提高，附加值大幅度增加，特别是特种聚合物正向功能材料的各个领域进军，显示出了其巨大的潜力。陶瓷本来用作建筑材料、容器或装饰品等，但由于其具有资源丰富、密度小、高模量、高硬度、耐腐蚀、膨胀系数小、耐高温、耐磨等特点，到了 20 世纪中叶，通过合成及其他制备方法，做出各种类型的先进陶瓷(如  $Si_3N_4$ 、 $SiC$ 、 $ZrO_2$  等)，成为近几十年来材料科学中非常活跃的研究领域。不过，由于其脆性问题难以解决，且价格过高，作为结构材料没有得到如钢铁或高分子材料一样的广泛应用。

金属、陶瓷、聚合物等材料虽然仍在不断地发展，但是，以上这些材料由于其各自固有的局限性而不能满足现代科学技术发展的需要。例如，金属材料的强度、模量和高温性能等几乎已开发到了极限；陶瓷的脆性、有机高分子材料的低模量、低熔点等固有的缺点极大地限制了其应用。这些都促使人们研究开发并按预定性能设计新型材料，也就是复合材料。复合材料综合了金属、陶瓷和高分子材料的优点。例如，玻璃纤维增强的环氧树脂(俗称玻璃钢)的强度、刚度和耐蚀性已经超过很多普通钢铁材料。人们曾经预言，复合材料有可能成为 21 世纪的“钢”。但目前只有树脂基复合材料得到了较为广泛的应用，而金属基与陶瓷基复合材料则因其成本过高、制备工艺复杂，仅在宇航、航空、军事等领域有重要的应用。

目前，在工程上应用最广泛的仍然是金属材料，特别是钢铁材料。这不仅是由于金属材料的来源丰富、生产成本相对较低，而且性能优良，尤其是它具有较好的综合



力学性能,即具有较高的强度、硬度和足够的塑性、韧性。它强度大、硬度高,在较大的外力作用下不易变形和断裂,也不易磨损;而且塑性和韧性好,脆性小,不易突然断裂或破坏,安全可靠。

随着材料科学的发展,金属、陶瓷、高分子材料之间的界限将会越来越模糊。未来材料的发展趋势将是三者之间相互渗透、复合并相互促进。

### 0.1.2 热处理技术的发展

金属热处理是冶金、机械、航空、兵器等工业部门不可缺少的技术,是提高产品质量和寿命的关键工序,是发挥金属材料潜力,实现金属零部件轻量化的重要手段,也是近代材料科学的重要分支之一。

早在公元前 770—前 222 年,中国人在生产实践中就已发现,铜铁的性能会随温度和加压变形的影响而变化。例如,白口铸铁的柔化处理就是制造农具的重要工艺。公元前 6 世纪,钢铁兵器逐渐被采用,为了提高钢的硬度,淬火工艺得到迅速发展。中国河北省易县燕下都出土的两把剑和一把戟,其显微组织中都有马氏体存在,说明是经过淬火的。随着淬火技术的发展,人们逐渐发现了淬冷剂对淬火质量的影响。三国蜀人蒲元曾在今陕西斜谷为诸葛亮打制 3000 把刀,相传是派人到成都取水淬火的。这说明中国古代就注意到不同水质的冷却能力了,同时也注意到了油和尿的冷却能力。中国出土的西汉(公元前 206—公元 25 年)中山靖王墓中的宝剑,心部含碳量为 0.15%~0.4%,而表面含碳量却达 0.6%以上,说明已应用了渗碳工艺。但当时作为个人“手艺”的秘密,不肯外传,因而发展很慢。

1863 年,英国金相学家和地质学家展示了钢铁在显微镜下的 6 种不同的金相组织,证明了钢在加热和冷却时,内部组织会发生改变,钢中高温相在急冷时转变为一种较硬的相。法国人奥斯蒙德确立的铁的同素异构理论,以及英国人奥斯汀最早制定的铁碳相图,为现代热处理工艺初步奠定了理论基础。与此同时,人们还研究了在金属热处理的加热过程中对金属的保护方法,目的是避免加热过程中金属的氧化和脱碳等。

1850—1880 年,对于应用各种气体(诸如氢气、煤气、一氧化碳等)进行保护加热曾有一系列专利。1889—1890 年,英国人莱克获得了多种金属光亮热处理的专利。1901—1925 年,在工业生产中应用转筒炉进行气体渗碳;20 世纪 30 年代出现了露点电位差计,使炉内气氛的碳势可控,以后又研究出了用二氧化碳红外仪、氧探头等进一步控制炉内气氛碳势的方法。

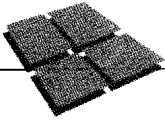
20 世纪 60 年代以来,热处理技术运用等离子场,发展了离子渗氮、渗碳工艺;同时,激光、电子束技术的应用,又使金属获得了新的表面热处理和化学热处理方法。

### 0.1.3 工程材料的分类

所谓的工程材料指的是用于工程制造的材料。工程材料的性能是影响产品或设备使用性能的重要因素,因此在现代工程技术的各个领域,工程材料一直受到人们的重视。

工程材料的分类方法有很多种。比较科学的方法是按照化学成分、结合键的特点来分类。一般而言,工程材料分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料四大类。

金属材料是以金属键为主要键合的材料,在工业上应用最为广泛。一般将金属材



料分为两类：第一类是黑色金属材料，它包括铁、锰、铬及其合金。需要说明的是，黑色金属都不黑，纯铁是银白色的，锰是银白色的，铬是灰白色的。因为铁的表面常常生锈，盖着一层黑色的四氧化三铁与棕褐色的三氧化二铁的混合物，所以看去是黑色的。常说的“黑色冶金工业”，主要是指钢铁工业。又因为最常见的合金钢是锰钢与铬钢，这样，人们就把锰与铬也算成是“黑色金属”了。第二类是有色金属，是指除黑色金属以外的所有金属及其合金。按照性能特点，有色金属可分为轻有色金属(铝、镁等)、重有色金属(铜、镍)，以及稀有金属等多种。

高分子材料是指主要是由分子量特别大的高分子化合物所组成的有机合成材料，其主要成分是碳和氢，按照用途可分为塑料、橡胶和合成纤维。塑料是以合成树脂或化学改性的天然高分子为主要成分，再加入填料、增塑剂和其他添加剂制得的。其分子间次价力、模量和形变量等介于橡胶和纤维之间。通常按合成树脂的特性分为热固性塑料和热塑性塑料。橡胶是一类线型柔性高分子聚合物。其分子链间次价力小、分子链柔性好，在外力作用下可产生较大形变，除去外力后能迅速恢复原状。橡胶分为天然橡胶和合成橡胶两种。合成纤维以天然高分子或合成高分子为原料，经过纺丝和后处理制得。纤维的次价力大、形变能力小、模量高，一般为结晶聚合物。

陶瓷材料属于无机非金属材料，也就是说它是不含碳、氢的化合物，主要由金属氧化物和金属非氧化物组成。按照成分和用途可分为普通陶瓷、特种陶瓷和金属陶瓷。

复合材料是由两种或两种以上不同种类的材料复合组成的。它不仅保留了组成材料各自的优点，而且具有单一材料所不具备的优异性能。

工程材料也可以按照它的功能进行分类。可分为结构材料、功能材料两大类。结构材料本身不具有什么特殊的功能，只是起到一个结构的作用。作为功能材料，除了结构本身之外，还有特殊的功能，比如磁性材料，是一块东西，但是同时又具有磁性，又比如发光材料、液晶材料等。

# 第1章 金属学基本知识

金属材料在性能方面所能表现出的多样性、多变性和特殊性使它具有远比其他材料优越的性能,这种优越性是其固有的内在因素在一定外在条件下的综合反映。不同成分的金属具有不同的组织结构,因而其表现出的性能各不相同;即使成分相同的金属,当其由液态转变为固态的结晶条件不同时,所形成的内部组织也不尽相同,因而表现出来的性能也各有差异。所以,要了解金属材料的特性,必须从本质上了解金属的组织结构和金属的结晶过程,掌握其规律,才能更好地控制其性能,正确选用材料,并指导人们开发新型材料。

## 1.1 金属的特性

### 1.1.1 金属键

元素周期表中 I、II、III 族元素的原子在满壳层外有一个或几个价电子。满壳层在带正电荷的原子核和价电子之间起屏蔽作用,原子核对外面轨道上的价电子吸引力不大,所以原子很容易丢失其价电子而成为正离子。当大量这样的原子相互接近并聚集为固体时,其中大部或全部原子都会丢失其价电子。同离子键或共价键不一样,这里被丢失的价电子不为某个或某两个原子所专有或共有,而是为全体原子所公有。这些公有化的电子叫做自由电子,它们在正离子之间自由运动,形成所谓的电子气。正离子则沉浸在电子气中。在理想情况下,价电子从原子上脱落而形成对称的正离子,其核外的电子云呈球状且高度对称的规则分布。正离子与电子气之间产生强烈的静电吸引力,使正离子按一定的几何形式在空间规则地结合起来,并各自在其所占的位置上作微小的热振动。这种使金属正离子按一定方式牢固地结合成一个整体的结合力叫做金属键,由金属键结合起来的晶体叫金属晶体,如图 1-1 所示。

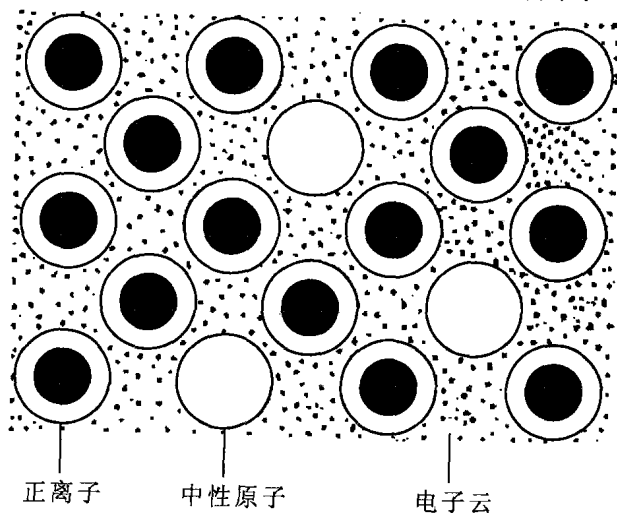
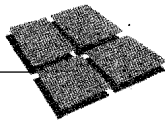


图 1-1 金属键模型



在金属晶体中，价电子弥漫在整个体积内，所有的金属离子皆处于相同的环境中，全部离子(或原子)均可被看成是具有一定体积的圆球，所以金属键无所谓饱和性和方向性。

### 1.1.2 金属的特性

材料的性能取决于材料的结构。金属具有不同于非金属的特性也是由金属本身的结构，尤其是金属键所决定的。金属在固态下以及部分金属在液态下具有下列特性。

(1)良好的导电性和导热性。金属键中有大量自由电子存在，当金属的两端存在有电势差或外加电场时，电子可定向地、加速地通过金属，使金属表现出优良的导电性。金属的导热性好是离子的热振动和自由电子热运动二者的联合贡献所致，比单纯的离子热振动所产生的导热效果好。

(2)不透明、良好的反射能力、形成金属光泽。金属中存在的自由电子能够吸收可见光波段的光量子的能量，使金属变得不透明。同时，自由电子吸收了光量子的能量后，被激发到较高的能量状态，当它返回原来的低能量状态时，就会产生一定波长的辐射，使金属呈现不同颜色的光泽。

(3)一般具有较高的强度、良好的塑性。金属键使金属正离子之间产生紧密堆积的结合，从而使金属具有较高的强度。金属键没有方向性，对原子也没有选择性，所以在受外力作用而发生原子相对移动时，金属键不会受到破坏，表现出良好的塑性。

(4)除汞外，常温下均为固体，能相互熔合。在常温下，金属键使大多数金属都采取最紧密堆积的原子排列，一般呈长程有序的固体晶体存在。液态时结合力减弱呈短程有序排列，不同金属原子(离子)能相互滑动、混合，由于金属键的无方向性和结合的随意性，因此冷却时相互熔合的金属又能重新规则地排列起来。

(5)有正的电阻温度系数，很多金属具有超导性。金属加热时，正离子的振动增强，金属中的空位增多，原子排列的规则性受到干扰，电子运动受限，因而电阻增大，所以有正的电阻温度系数。对于许多金属，在极低的温度( $<20\text{K}$ )下，由于自由电子之间结合成两个电子相反自旋的电子对，不易遭受散射，因此电阻率趋向于零，产生超导现象。

上述特性明确地反映了金属的本质，因此在工程中，常常把金属理解为有特殊光泽、优良导电导热性能和良好塑性的固体物质。非金属也可能有上述特性中的一种或几种，但不会同时具有全部特性，即使具有某些特性也达不到金属那样高的水平。

## 1.2 金属的晶体结构

### 1.2.1 晶体与非晶体

物质是由原子构成的，根据原子在物质内部排列方式的不同，通常可将固态物质分为晶体与非晶体两大类。凡内部原子或分子呈规则排列的物质称为晶体，如所有固态金属都是晶体；凡内部原子或分子呈无规则排列的物质称为非晶体，如松香、玻璃、沥青等都是非晶体；晶体与非晶体的不同点在于，晶体具有一定的熔点(如纯铁的熔点为 $1538^{\circ}\text{C}$ )，其性能具有各向异性的特点；非晶体没有一定的熔点，它的性能在各个方向上是相同的(即具有各同向性)。

### 1.2.2 晶体结构与空间点阵

金属中原子的排列是有规则的，而不是杂乱无章的。金属的性能不仅取决于其组成原子的本性和原子间结合键的类型，同时也取决于原子的排列方式。原子的排列规律不同，则其性能也不同，因而必须研究金属的晶体结构，即原子的实际排列情况。为了方便起见，首先把晶体当做没有缺陷的理想晶体来研究。

晶体中原子(或离子)在空间呈规则排列。规则排列的方式即称为晶体结构。研究金属晶体结构时，为了讨论方便，通常把在晶体中不停振动的原子看成是一个个在平衡位置上静止不动的小刚球。于是，金属的晶体结构便可以用许多小钢球紧密堆垛的模型来表示，如图 1-2(a)所示。晶体中所有原子都在三维空间按一定的几何形式作有规则地重复排列。为了进一步清晰地描述原子排列的几何规律，设想用一些直线穿过原子中心将它们连接起来，抽象为一个空间格架。这种描述原子排列规律的空间格架，称为结晶格子，简称晶格，如图 1-2(b)所示。晶格的节点即为原子的平衡位置。

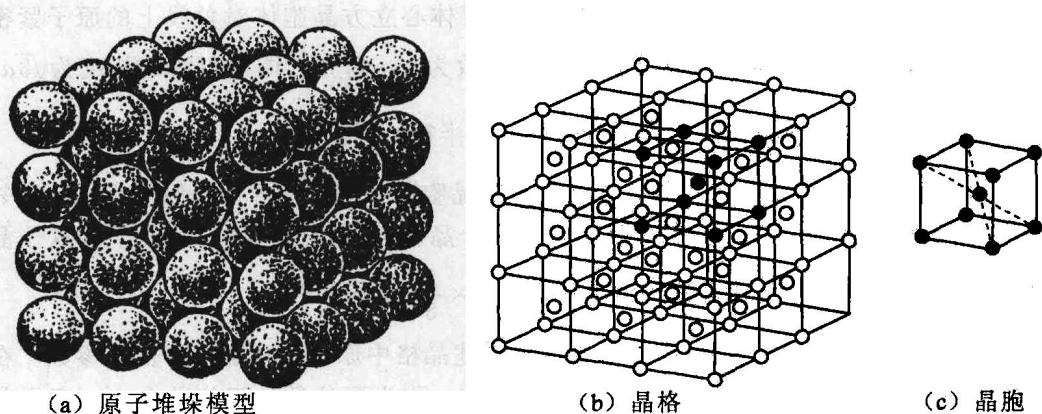


图 1-2 晶体中原子排列示意图

由于晶体中的原子在三维空间作有规律的重复排列，因此，只要在晶格中取出一个能够代表原子排列规律的最小几何单元，就可以表示晶体结构的几何特征。这种表示晶体中原子排列规律的最小几何单元，称为晶胞，如图 1-2(c)所示。晶胞的大小和形状常以晶胞的棱边长度  $a$ 、 $b$ 、 $c$  及棱边夹角  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  表示，如图 1-3 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(或晶轴) $x$ 、 $y$ 、 $z$ 。习惯上，以原点前、右、上方定为轴的正方向，反之为负方向。晶胞的棱边长度一般称为晶格常数或点阵常数，在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上分别以  $a$ 、 $b$ 、 $c$  表示。晶胞的棱间夹角又称为轴间夹角，通常  $y-z$  轴、 $z-x$  轴和  $x-y$  轴的夹角分别用  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  表示。

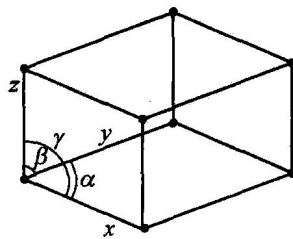


图 1-3 晶胞的大小及形状表示法

### 1.2.3 三种典型的金属晶体结构

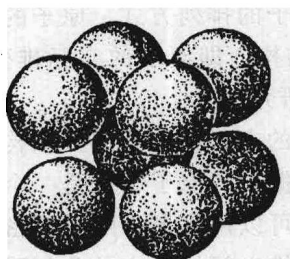
金属元素有 80 多种，但是常见的金属晶格类型只有三种，即体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。

#### 1. 体心立方晶格

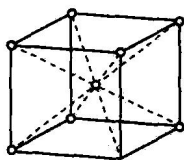
体心立方晶格的晶胞模型如图 1-4 所示。晶胞的三个棱边长度相等，三个轴间夹角



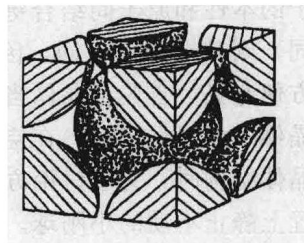
均为  $90^\circ$ ，构成立方体。除了在晶胞的八个角上各有一个原子外，在立方体的中心还有一个原子。具有体心立方结构的金属有  $\alpha$ -Fe、Cr、V、Nb、Mo、W 等 30 多种。



(a) 刚球模型



(b) 质点模型



(c) 晶胞原子数

图 1-4 体心立方晶胞

(1) 原子半径。在金属学中，定义最近邻的两原子间距离的一半为原子半径。体心立方晶胞中，棱边上的原子彼此互不接触，只有体心立方晶胞体对角线上的原子紧密地接触着，如图 1-4(a) 所示。设晶胞的点阵常数为  $a$ ，则立方体对角线的长度为  $\sqrt{3}a$ 。

等于 4 个原子半径，所以体心立方晶胞中的原子半径  $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ 。

(2) 原子数。由图 1-4(b) 可知，在体心立方晶胞中，角顶上的每个原子为与其相邻的 8 个晶胞所共有，故只有  $1/8$  个原子属于这个晶胞，晶胞中心的那个原子为这个晶胞所独有，所以，体心立方晶胞中的原子数为  $8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$  (个)。

(3) 配位数和致密度。配位数与致密度是描述晶格中原子排列紧密程度的参数。在晶体中，任一原子周围最近邻的等距离的原子数，称为配位数。配位数愈大，表示晶体中原子排列愈紧密。由图 1-4(c) 可知，体心立方晶格的配位数为 8。致密度是指晶胞中原子所占体积与晶胞体积之比，可用下式表示：

$$K = \frac{nv}{V}$$

式中， $K$  为晶体的致密度； $n$  为一个晶胞实际包含的原子数； $v$  为一个原子的体积； $V$  为晶胞的体积。

体心立方晶格的晶胞中包含有 2 个原子，晶胞的晶格常数为  $a$ ，原子半径为  $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ ，其致密度为

$$K = \frac{nv}{V} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{a^3} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4}a\right)^3}{a^3} \approx 0.68$$

此值表明，在体心立方晶格中，有 68% 的体积为原子所占据，其余 32% 为间隙体积。

## 2. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞如图 1-5 所示。除由 8 个原子构成立方体外，在立方体 6 个表面的中心还各有一个原子。 $\gamma$ -Fe、Cu、Ni、Al、Ag 等约 20 种金属具有这种晶体结构。

面心立方晶胞中，每个表面中心的原子为相邻两个晶胞所共有，因此，面心立方

晶胞的原子数  $n=8\times\frac{1}{8}+6\times\frac{1}{2}=4$ (个)。由图 1-5(c)可知,在面心立方晶胞中,面对角线上的原子彼此相切,排列最紧密,因此,原子半径  $r=\frac{\sqrt{2}}{4}a$ 。

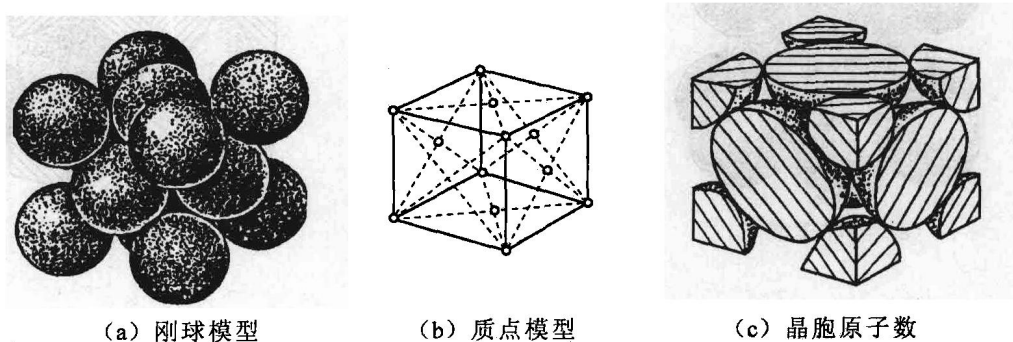


图 1-5 面心立方晶胞

从图 1-6 中可以看出,以面中心那个原子为例,与之最近邻的是它周围顶角上的 4 个原子,这 5 个原子构成了一个平面,这样的平面共有 3 个,这 3 个面彼此相互垂直,结构形式相同,所以与该原子最近邻、等距离的原子共有  $4\times 3=12$ (个),因此面心立方晶格的配位数为 12。

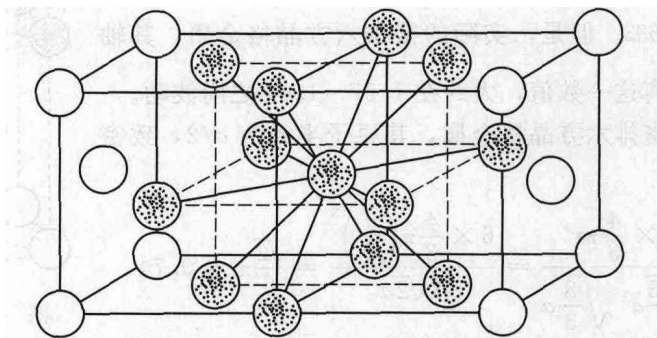


图 1-6 面心立方晶格的配位数

由于面心立方晶胞中的原子数和原子半径是已知的,因此可以计算出它的致密度

$$K = \frac{mV}{V} = \frac{4 \times \frac{4}{3}\pi r^3}{a^3} = \frac{4 \times \frac{4}{3}\pi \left(\frac{\sqrt{2}}{4}a\right)^3}{a^3} \approx 0.74$$

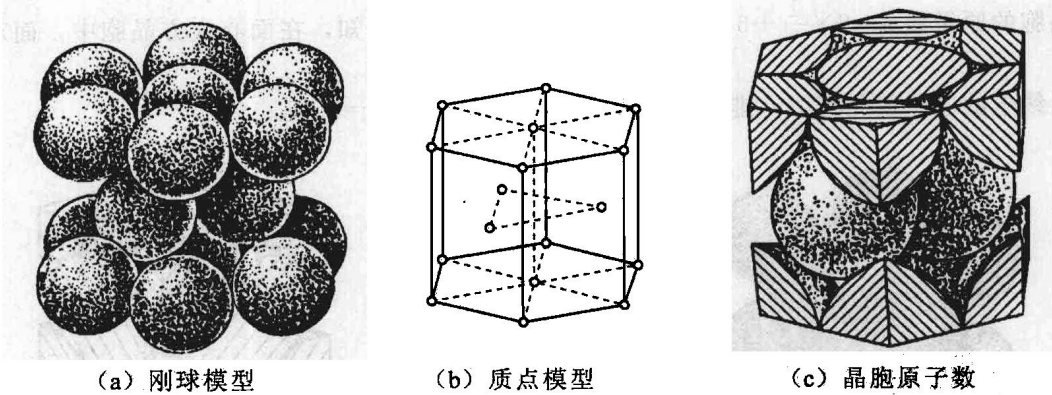
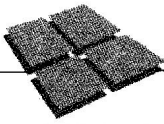
此值表明,在面心立方晶格中,有 74% 的体积为原子所占据,其余 26% 为间隙体积。

### 3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞如图 1-7 所示。由 12 个原子构成一个正六方柱体,在其上、下底面的中心各有 1 个原子,在正六方柱体的中心还有 3 个原子。具有密排六方晶格的金属有 Zn、Mg、Be、 $\alpha$ -Ti、 $\alpha$ -Co、Cd 等。

晶胞中的原子数可参照图 1-7(c)计算如下:六方柱每个角上的原子均属 6 个晶胞所共有,上、下底面中心的原子同时为两个晶胞所共有,再加上晶胞内的 3 个原子,故晶胞中的原子数为:  $\frac{1}{6}\times 12 + \frac{1}{2}\times 2 + 3 = 6$ 。





(a) 刚球模型

(b) 质点模型

(c) 晶胞原子数

图 1-7 密排六方晶胞

密排六方晶格的晶格常数有两个：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  $c/a$  称为轴比。在典型的密排六方晶格中，原子刚球十分紧密地堆垛排列，如晶胞上底面中心的原子，它不仅与周围 6 个角上的原子相接触，而且与其下面的 3 个位于晶胞之内的原子以及与其上相邻晶胞内的 3 个原子相接触(见图 1-8)，故配位数为 12，此时的轴比  $c/a = \sqrt{\frac{8}{3}} \approx 1.633$ 。但是，实际的密排六方晶格金属，其轴比或大或小地偏离这一数值，大约在 1.57~1.64 之间波动。

对于典型的密排六方晶格金属，其原子半径为  $a/2$ ，致密度为

$$K = \frac{nv}{V} = \frac{6 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{\frac{3\sqrt{3}}{2} a^2 \sqrt{\frac{8}{3}} a} = \frac{6 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{a}{2}\right)^3}{3\sqrt{2} a} = \frac{\sqrt{2}}{6} \pi \approx 0.74$$

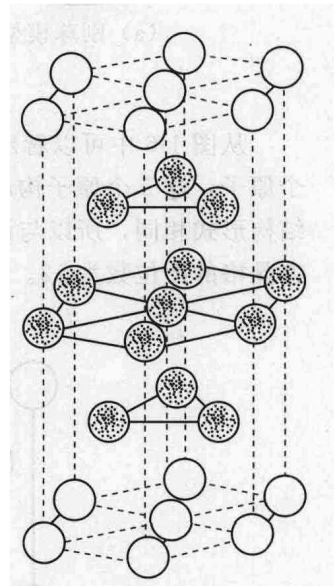


图 1-8 密排六方晶格的配位数

密排六方晶格的配位数和致密度均与面心立方晶格相同，这说明这两种晶格晶胞中原子的紧密排列程度相同。

#### 4. 晶格的晶面、晶向及其表示方法

在晶体中，由一系列原子所组成的平面，称为晶面；通过任意两个原子中心的直线所指的方向，称为晶向。于是，可以把晶体看成是由一层层的晶面堆砌而成的。在同一晶体中，不同的晶面和晶向上的原子排列方式和原子密度各不相同，从而造成晶体不同方向上的物理、化学、机械性能的差异，这种现象称为各向异性。晶体的各向异性对于金属的塑性变形和固态相变过程都会产生影响。因此，分析晶体中各种晶面和晶向的特点是十分有必要的。对于各种位向的晶面、晶向，国际上采用统一的符号，即晶面指数和晶向指数来表示。

##### (1) 晶向指数

晶向指数的确定步骤如下。

第一步：选定任一节点为空间坐标系的原点。以晶格的三条棱边为空间坐标轴

$OX$ 、 $OY$ 、 $OZ$ ;

第二步：过坐标原点作一平行于欲求晶向的直线；

第三步：求出该直线上任一节点的空间坐标值；

第四步：将空间坐标的三个值按比例化为最小整数；

第五步：将化好的整数记在方括号内，不用标点分开。

通常以 $[uvw]$ 表示晶向指数的普遍形式，若晶向指向坐标的负方向时，则坐标值中出现负值，这时在晶向指数的这一数字之上冠以负号。

现以图 1-9 中  $AB$  方向的晶向为例来说明。通过坐标原点引一平行于特定晶向  $AB$  的直线  $OB'$ ，点  $B'$  的坐标值为  $(-1, 1, 0)$ ，故其晶向指数为 $[\bar{1}10]$

应当指出，从晶向指数的确定步骤可以看出，晶向指数所表示的不仅仅是一条直线的位向，而是一族平行线的位向，即所有相互平行的位向，都具有相同的晶向指数。

立方晶胞中一些常用的晶向指数如图 1-10 所示，现加以扼要说明。如  $x$  轴方向，其晶向指数可用点  $A$  的坐标来确定，点  $A$  坐标为  $(1, 0, 0)$ ，所以  $x$  轴的晶向指数为 $[100]$ 。同理， $y$  轴的晶向指数为 $[010]$ ， $z$  轴的晶向指数为 $[001]$ 。点  $D$  的坐标为  $(1, 1, 0)$ ，所以  $OD$  方向的晶向指数为 $[110]$ 。点  $F$  的坐标为  $(1, 1, 1)$ ，所以  $OF$  方向的晶向指数为 $[111]$ 。点  $H$  的坐标为  $(1, \frac{1}{2}, 0)$ ，所以  $OH$  方向的晶向指数为 $[210]$ 。

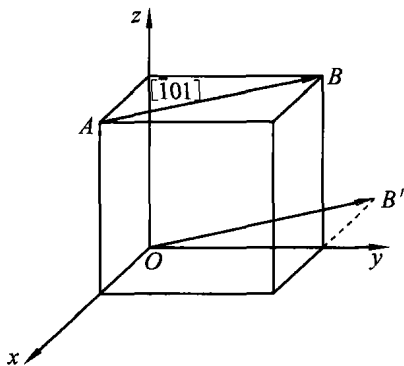


图 1-9 确定晶向指数的示意图

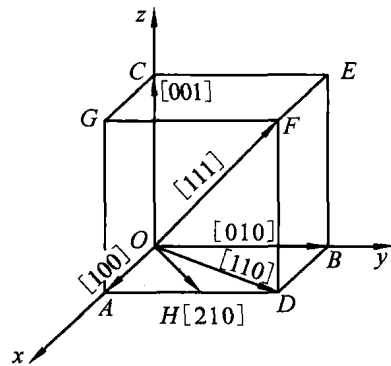


图 1-10 立方晶系中一些常用的晶向指数

同一直线有相反的两个方向，其晶向指数的数字和顺序完全相同，只是符号相反，它相当于用  $-1$  乘以晶向指数中的三个数字，如 $[123]$ 与 $[\bar{1}\bar{2}\bar{3}]$ 方向相反，等等。

原子排列相同但空间位向不同的所有晶向称为晶向族。在立方晶系中， $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 以及方向与之相反的 $[\bar{1}00]$ 、 $[0\bar{1}0]$ 、 $[00\bar{1}]$ 共 6 个晶向上的原子排列完全相同，只是空间位向不同，属于同一晶向族，用 $\langle 100 \rangle$ 表示。同样， $\langle 110 \rangle$ 晶向族包括 $[110]$ 、 $[101]$ 、 $[011]$ 、 $[\bar{1}10]$ 、 $[\bar{1}01]$ 、 $[0\bar{1}1]$ 以及方向与之相反的晶向 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 、 $[\bar{1}0\bar{1}]$ 、 $[0\bar{1}\bar{1}]$ 、 $[1\bar{1}0]$ 、 $[10\bar{1}]$ 、 $[01\bar{1}]$ 共 12 个晶向。

应当指出，只有对于立方结构的晶体，改变晶向指数的顺序，所表示的晶向上的原子排列情况才完全相同，这种方法对于其他结构的晶体则不一定适用。

## (2) 晶面指数

晶面指数的确定步骤如下。

第一步：选定不在欲定晶面上的晶格中的任一节点为空间坐标系的原点，以晶格