


21世纪高等院校规划教材

工程材料及成形工艺

王爱珍 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本教材是根据当前高等学校机械类各专业学科内容及课堂学时的调整以及课程教学的基本要求而编写,并以广用材料和毛坯成形工艺为主,以必需和够用为度,精简教材内容体系,重点突出金属材料组织及力学性能、热处理原理及工艺、金属材料及新材料、金属材料坯件的液固成形方法、工艺拟定及结构设计。

本书主要内容包括金属结构及性能、金属结晶及相图、金属热处理原理及工艺、钢铁材料及性能、非铁金属及非金属材料、金属铸造成形、金属锻压成形、金属焊接成形、零件坯料及工艺选择共九章,各章前设有重点、难点和要点内容导读,章后附有以培养技能为主的思考练习题,并另配有电子教案供参考。

本教材可作为高等工科院校机械类各专业本科通用教材,也可作为高等职业技术学院或工业专科院校机械类各专业教材,还可供教师及机械类工程技术人员与职业技能培训参考教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料及成形工艺/王爱珍编著. —北京:机械工业出版社, 2010.9
21世纪高等院校规划教材
ISBN 978-7-111-32024-1

I. ①工… II. ①王… III. ①工程材料-成型-工艺 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 188578 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑:侯宪国 责任编辑:侯宪国 版式设计:张世琴
责任校对:李秋荣 封面设计:路恩中 责任印制:乔宇
北京机工印刷厂印刷 (兴文装订厂装订)
2011年1月第1版第1次印刷
184mm × 260mm · 20.25 印张 · 498 千字
0 001—3 000 册
标准书号:ISBN 978-7-111-32024-1
定价:39.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

前 言

随着科学技术的快速发展和各行业对高技能创新人才的急需，结合高校机械类各专业学时压缩的现状，以广用材料和毛坯成形工艺为主，以必需和够用为度，精简教材内容体系，重点突出金属材料组织及力学性能、金属热处理原理及工艺、常用金属材料及新材料、金属材料坯件液固成形方法、工艺拟定及结构设计。

在编写过程中立足目前机械类各专业少学时、宽口径、重技能的教学要求，侧重于应用技术，由浅入深、循序渐进、突出重点，以掌握基本概念、强化应用、扩大知识面为教学重点，以注重能力培养为宗旨，尽量多列举常见的典型机械零件选材及工艺为例，并增加实际生产所用的图表资料等，以便于查阅使用。

同时在各个工艺环节编写中，既注意增加生产中急需解决的实际问题，又注意拓宽并加深解决问题的思路与方法，还注意新材料、先进技术的应用与发展趋势，以便培养学生对新技术的兴趣，从而提高其科技创新能力。

本书包括金属结构及性能、金属结晶及相图、金属热处理原理及工艺、钢铁材料及性能、非铁金属及非金属、金属铸造成形、金属锻压成形、金属焊接成形、零件坯料及工艺选择等内容，各章前设有重点、难点和要点内容导读，章后附有以培养技能为主的思考练习题，并另配有电子教案，以方便教学需要。

本书可作为高等工科院校机械类各专业本科通用教材，也可作为民办高校机械类或近机械类专业本科教材及高等工业专科学校机械类各专业教材，还可供教师及机械类工程技术人员与职业技能培训参考教材。

本书由郑州轻工业学院王爱珍教授编著，在编写过程中参考了诸多国内外相关教材，得到了有关企业提供的多种实例，同时还采纳了李烁、刘翔、王兵、王静、郑冰丽、王世军、李明清、郑兵岩、王莹、李维海、王世杰、李俊霞等帮助绘制的图表，在此一并表示感谢。

本书在编写过程中，尽管征求了有关同仁的见解和建议，但由于编者水平有限，编写时间仓促，难免有不妥之处，敬请广大读者和专家批评指教，不胜感谢。

编 者

目 录

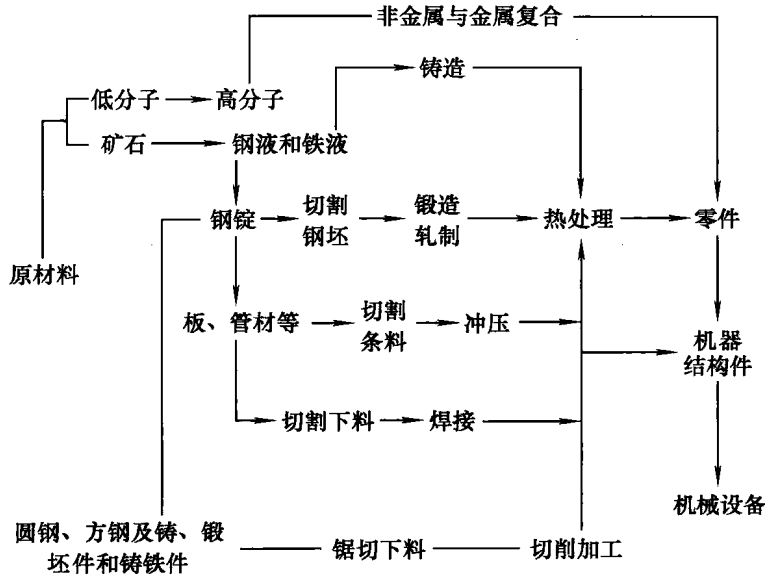
| | |
|-----------------------|------------|
| 前言 | |
| 绪论 | 1 |
| 第1章 金属结构及性能 | 3 |
| 1.1 金属的晶体结构 | 3 |
| 1.1.1 单晶体的晶格结构 | 3 |
| 1.1.2 多晶体的晶体缺陷 | 7 |
| 1.1.3 合金组成及相结构 | 8 |
| 1.2 金属的力学性能 | 13 |
| 1.2.1 强度与刚度 | 13 |
| 1.2.2 塑性与韧性 | 17 |
| 1.2.3 硬度与耐磨性 | 19 |
| 1.3 金属的其他性能 | 22 |
| 1.3.1 金属的物理性能 | 22 |
| 1.3.2 金属的化学性能 | 25 |
| 1.3.3 金属的加工性能 | 25 |
| 思考练习题 | 27 |
| 第2章 金属结晶及相图 | 28 |
| 2.1 金属结晶及相变 | 28 |
| 2.1.1 纯金属的结晶组织 | 28 |
| 2.1.2 晶粒细化的途径 | 31 |
| 2.1.3 金属同素异构转变 | 33 |
| 2.2 合金结晶及相图 | 34 |
| 2.2.1 相图概念及建立方法 | 34 |
| 2.2.2 二元合金相图的类型 | 35 |
| 2.2.3 相图与合金性能的关系 | 42 |
| 2.3 铁碳合金及其相图 | 43 |
| 2.3.1 铁碳合金组成 | 44 |
| 2.3.2 铁碳合金相图 | 46 |
| 2.3.3 相图在机制中的应用 | 53 |
| 思考练习题 | 56 |
| 第3章 金属热处理及工艺 | 58 |
| 3.1 热处理基本原理 | 58 |
| 3.1.1 钢在加热时的组织转变 | 58 |
| 3.1.2 钢在冷却时的过冷组织 | 61 |
| 3.1.3 过冷奥氏体的等温转变 | 62 |
| 3.1.4 过冷奥氏体的连续转变 | 68 |
| 3.2 热处理工艺方法 | 69 |
| 3.2.1 钢的普通热处理 | 69 |
| 3.2.2 钢的表面淬火处理 | 81 |
| 3.2.3 钢的表面扩渗处理 | 85 |
| 3.3 热处理新技术及应用 | 93 |
| 3.3.1 热处理新技术方法 | 93 |
| 3.3.2 计算机辅助热处理 | 97 |
| 3.3.3 热处理图样标注方法 | 97 |
| 思考练习题 | 100 |
| 第4章 钢铁材料及性能 | 103 |
| 4.1 碳素钢及其性能 | 103 |
| 4.1.1 碳素钢成分及影响 | 103 |
| 4.1.2 碳素钢分类及牌号 | 104 |
| 4.1.3 碳素钢牌号及用途 | 106 |
| 4.2 合金钢及其性能 | 108 |
| 4.2.1 合金元素在钢中的作用 | 108 |
| 4.2.2 合金钢分类及牌号 | 112 |
| 4.2.3 合金结构钢及性能 | 114 |
| 4.3 铸铁合金及性能 | 125 |
| 4.3.1 铸铁石墨化及组织 | 125 |
| 4.3.2 常用铸铁及性能 | 129 |
| 4.3.3 合金铸铁及性能 | 135 |
| 思考练习题 | 137 |
| 第5章 非铁金属与非金属材料 | 138 |
| 5.1 非铁金属及性能 | 138 |
| 5.1.1 铝及铝合金 | 138 |
| 5.1.2 铜及铜合金 | 143 |
| 5.1.3 轴承合金及类型 | 148 |
| 5.2 非金属材料及性能 | 150 |
| 5.2.1 工程塑料 | 150 |
| 5.2.2 工业橡胶 | 155 |
| 5.2.3 工业陶瓷 | 157 |
| 5.3 复合材料及新材料 | 159 |
| 5.3.1 复合材料 | 159 |
| 5.3.2 新型材料 | 162 |
| 思考练习题 | 167 |

| | | | |
|---------------------------|-----|--------------------------------|-----|
| 第 6 章 金属铸造成形 | 168 | 8.1 焊接成形方法 | 247 |
| 6.1 铸造工艺方法 | 168 | 8.1.1 常用熔焊方法 | 247 |
| 6.1.1 砂型铸造 | 168 | 8.1.2 高能束熔焊方法 | 254 |
| 6.1.2 特种铸造 | 172 | 8.1.3 压焊与钎焊方法 | 257 |
| 6.1.3 新型铸造 | 176 | 8.2 熔焊工艺基础 | 262 |
| 6.2 铸造工艺原理 | 179 | 8.2.1 熔焊冶金与质量 | 262 |
| 6.2.1 液态金属流动性 | 179 | 8.2.2 熔焊组织与性能 | 263 |
| 6.2.2 凝固金属收缩性 | 182 | 8.2.3 熔焊应力与变形 | 265 |
| 6.2.3 铸造应力及其危害 | 184 | 8.2.4 焊接材料与性能 | 268 |
| 6.2.4 常用金属件的铸造 | 187 | 8.3 焊接工艺拟定 | 273 |
| 6.3 砂型铸造工艺 | 192 | 8.3.1 接头形式确定 | 273 |
| 6.3.1 铸造工艺方案拟定 | 192 | 8.3.2 焊接方法选择 | 274 |
| 6.3.2 铸造工艺参数确定 | 197 | 8.3.3 焊接材料选择 | 276 |
| 6.3.3 铸造工艺文件编制 | 199 | 8.3.4 焊接参数确定 | 277 |
| 6.4 铸件结构设计 | 201 | 8.4 焊接结构设计 | 280 |
| 6.4.1 铸造工艺对铸件结构的要求 | 201 | 8.4.1 焊件材料选择 | 280 |
| 6.4.2 铸造性能对铸件结构的要求 | 205 | 8.4.2 焊缝位置设计 | 281 |
| 6.4.3 组合铸件的结构设计 | 209 | 8.4.3 焊接接头设计 | 284 |
| 思考练习题 | 210 | 8.4.4 机械焊接结构 | 289 |
| 第 7 章 金属锻压成形 | 212 | 思考练习题 | 292 |
| 7.1 锻压成形原理 | 212 | 第 9 章 机械零件材料及工艺选择 | 293 |
| 7.1.1 金属形变基本理论 | 212 | 9.1 零件种类及材料选择 | 293 |
| 7.1.2 金属形变组织和性能 | 213 | 9.1.1 零件毛坯种类及分析 | 293 |
| 7.1.3 金属的可变形性能 | 217 | 9.1.2 零件选材原则及依据 | 296 |
| 7.2 自由锻成形 | 219 | 9.1.3 各类零件的坯料选择 | 300 |
| 7.2.1 自由锻方法及应用 | 219 | 9.2 典型零件材料及工艺选择 | 303 |
| 7.2.2 自由锻件工艺拟定 | 220 | 9.2.1 带轮材料及工艺 | 303 |
| 7.2.3 自由锻件结构设计 | 227 | 9.2.2 圆柱齿轮材料及工艺 | 305 |
| 7.3 模锻成形 | 229 | 9.3 零件热处理工艺拟定 | 307 |
| 7.3.1 模锻方法及锻模 | 229 | 9.3.1 热处理工序确定 | 307 |
| 7.3.2 模锻件工艺拟定 | 234 | 9.3.2 改性工艺路线确定 | 309 |
| 7.3.3 模锻件结构设计 | 240 | 9.4 常用机器零件材料及工艺 | |
| 7.4 锻压新技术 | 242 | 选择 | 311 |
| 7.4.1 模锻新工艺 | 242 | 9.4.1 螺旋起重器零件材料及工艺 | 311 |
| 7.4.2 高速锤锻造 | 243 | 9.4.2 汽油发动机零件材料及工艺 | 312 |
| 7.4.3 超塑性锻压 | 244 | 9.4.3 承压液压缸缸体材料及工艺 | 313 |
| 思考练习题 | 245 | 思考练习题 | 314 |
| 第 8 章 金属焊接成形 | 247 | 参考文献 | 316 |

绪 论

1 本课程在工业生产中的地位

工程材料主要包括金属材料、非金属材料和复合材料等，其中金属材料是国民经济和现代制造机械的支柱材料，也是构成各种机械设备、化工设备、机动车辆、建筑框架、电器仪表、轻纺设备等的基础。成形工艺主要包括金属材料的铸造工艺、锻造工艺、热处理工艺和焊接工艺等，一般机械制造工艺流程如下框图所示。



工程材料的性能包括使用性能和工艺性能，使用性能包括力学性能、物理性能和化学性能，其中力学性能主要取决于材料的微观结构及组织状态，例如，金属微粒呈规则排列为晶体以呈现各向异性，而金刚石、石蜡等微粒则呈无序堆积为非晶体而呈现各向同性。因此只有首先认识材料组织、成分和性能差异，才能合理选择材料及改性工艺、合理制定毛坯成形工艺，以保证获得优质机械零件。

其次，还必须了解材料的成形工艺性能，即铸造性能、锻造性能、热处理性能和焊接性能。由于成形工艺是机械制造生产过程的重要组成部分，机械制造就是将各种原材料经过各种成形、改性、拼接等工艺转变为机器的过程，机器类型不同，零件尺寸及要求不同，选择相应材料和工艺过程也不同。

本课程既论述了主要金属材料的结构及性能、结晶组织及细化工艺措施、改性处理工艺及性能、常用金属材料成分组织性能及型号、高分子和复合材料的性能等，又论述了金属毛坯件的各种成形工艺方法及坯件结构工艺性。因此，本课程是研究各种机器设备选材、设计和改性处理的一门重要技术课。

2 本课程在培养人才中的地位

工程材料及成形工艺是机械类各专业一门重要的综合性技术学科。对于从事机械工程的技术人员而言,无论是设计、制造、运行、维护等都必然要面对机械零件的材料选择、改性工艺拟定及坯件成形结构工艺性等问题,因此掌握工程材料尤其是钢铁材料的组织性能、改性及成形是工程岗位要求所不可缺少的必要知识。

在工程设计过程中,不仅要确定各种零部件的结构形状,还必须确定材料、工艺及成形方法,在设计、选材、制造三者间拟定多种方案,经分析比较择优确定。由于每种结构均需选择相应成分的材料来满足性能要求,而每种材料的性能又取决于其组织结构和成形方法,因此结构设计、选材及改性、选择毛坯及成形方法,不仅成了相互关联的综合技术问题,还是机械设计的重要基础。

在机械制造过程中,由于工艺过程十分复杂,加工工序繁多,不仅有液态成形、塑变成形、熔接成形,还有切削加工及穿插各种热处理等工艺。因此合理选择成形方法及工艺路线,是保证获得优质机械零件的重要依据。

3 本课程体系重点及主导思想

本课程体系是建立在材料科学基础上,以“材料成分、组织及性能、成形方法、工艺设计、结构设计”为主线,系统概述了机械毛坯制造全过程,关联性地描述了金属晶体结构、使用性能及工艺性能、结晶相图及组织、热处理及性能、液态成形、塑性成形、连接成形等工艺,精选传统经典内容并吸收新知识,既有利于深化学者对材料及多种成形本质以及相互内在联系的认识,又起到触类旁通作用。

本课程较清楚地表达了各种工程材料及成形工艺以及各工艺环节间的相互联系。为学习机械制造技术者提供了必要的基础知识及工艺方法以及新材料和新工艺,可使学者掌握工程材料类型及成分、组织及性能、改性及成形方法,又可初步具有选材、选方法、分析制定工艺及设计零件结构的能力,以适应现代化机械工程发展的需要。

本课程的教学主导思想是紧抓课程主线,围绕典型重点材料和工艺,如常用钢、铁、铜、铝等材料的组织性能、用途、改性处理及毛坯成形方法,讲透本质及内在联系,并重点介绍各种常用型号、特点及应用范围,这也是本教材相比同类教材的独到之处,特别适用于机械类、化工类专业学生学习使用。

4 本课程主要特点及教学方法

针对本课程技术性强、实践性强、实用性强等特点,注意密切联系实际,尽量联系实验和生产,多列举大多企业常生产产品及常用材料型号,以便进行多样化教学。在编写过程中,注意总结国内重点院校教改实践经验,同时吸取国外同类教材的优点,既注意提高课程实用性,特意增加生产所用图表资料,以拓宽和加深课程内容而便于查用,又着重能力培养,重点突出选材、工艺方法及结构设计等。

本教材中通过大量图表、附表、框图、流程图等对各种材料及工艺作系统性、原理性、纵横向分析比较,使学生对各种材料作出合理评价和选择,对各种工艺可能性与局限性作出正确判断,以便选出最佳材料及工艺。同时还注意先进技术应用与发展趋势,从而培养学生对新材料、新工艺的研究兴趣,提高学生科技创新能力。

另外,针对本课程学术名词和基本概念多、综合性强、技术含量高、工艺方法多且路线繁杂等特点,特在每章前面设有导读、每章后面安排有思考训练习题,并在教学中利用 CAI 课件及开放型实验配合直观教学。

第 1 章 金属结构及性能

导读 本章主要介绍纯金属的晶体结构，合金的相结构，金属的各种力学性能指标、拉伸实验、硬度及冲击试验等测定方法，以及金属的物理化学性能及冷热加工工艺性能等。

本章重点是金属及其合金的微观结构状态和金属材料的弹性、塑性、强度、刚度、硬度及韧性等力学性能指标，难点是金属的晶体结构及合金的相结构，要点是常见的三种晶体结构及金属的力学性能指标。

1.1 金属的晶体结构

金属的晶体结构均由一种或多种元素结晶而成，在不同的条件下具有气态、液态、固态等不同形式的聚合状态，并且可以随条件的改变而互相转化，不仅具有固定熔点、结晶规律及组织相变，还具有典型的晶格结构、晶体缺陷及性能。

1.1.1 单晶体的晶格结构

1.1.1.1 理想晶体的基本概念

(1) 晶体及点阵 金属晶体是由无数个金属原子或离子，在空间按一定几何规则有序排列而成（见图 1-1a），如钢、铁、铜、铝等材料，反之则为非晶体，如玻璃、沥青、石蜡或松香等。

为了便于研究各种晶体内部原子排列的规律及几何形状，可以将每一个原子抽象为原子中心的一个阵点，则原子排列的方式可由这些阵点在空间分布的规律表现出来，这种空间点的排列方式就称为晶体点阵。

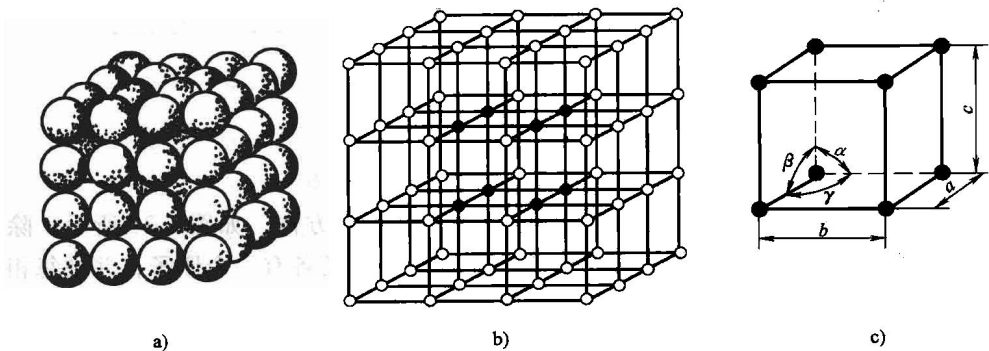


图 1-1 晶格结构示意图

a) 晶体模型 b) 晶格 c) 晶胞

(2) 晶格与晶胞 抽象地用直线连接各阵点所形成的空间立体格子称为晶格（见图 1-1b），晶格的最小几何单元称为晶胞（见图 1-1c），连接各阵点所形成的平面称为晶面，阵点组成的任一直线均能代表晶体空间的一个方向称为晶向。

晶体是由许多个晶胞堆积而成，晶胞各棱边长度 a 、 b 、 c 称为晶格常数或点阵常数，以 \AA 为计量单位 ($1\text{\AA} = 1 \times 10^{-8} \text{cm}$)，且各棱边夹角用 α 、 β 、 γ 表示 (见图 1-1c)。大多数金属晶胞的几何形状为立方体，且 $a = b = c$ ， $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。

晶胞中原子排列的规律能完全代表整个晶格，晶胞是构成晶格的细胞，可反映晶体中原子排列的规律性及其不同结构所具有的不同性能。相同晶胞类型若有不同的晶格常数，也使金属具有不同的性能。

1.1.1.2 单晶体的晶格形式

单晶体晶格是指金属原子具有紧密排列趋向，并构成少数几种具有高对称性和简单几何形状的晶体结构。大约 90% 以上的金属晶体均具有常见的体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格三种形式。

(1) 体心立方晶格 体心立方晶格的每个晶胞均是一个正立方体 (见图 1-2a)，八个顶点上均有一个原子同时被相邻八个晶胞所共有，且每个晶胞实际上只占有 $1/8$ 个原子，而立方体中心还有一个原子却为每个晶胞所独有 (见图 1-2b)，即每个晶胞的原子数为

$$\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$$

体心立方晶胞的各棱边长度相等且三个晶轴互相垂直，即晶格常数 $a = b = c$ ，轴间夹角 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，故常用一个常数 a 表示，如图 1-2c 所示。

常用金属中具有体心立方晶格结构的有 α -Fe (912℃ 以下的纯铁)、 α -Cr、 β -Ti、Mo、W、V、Nb 等二十余种。

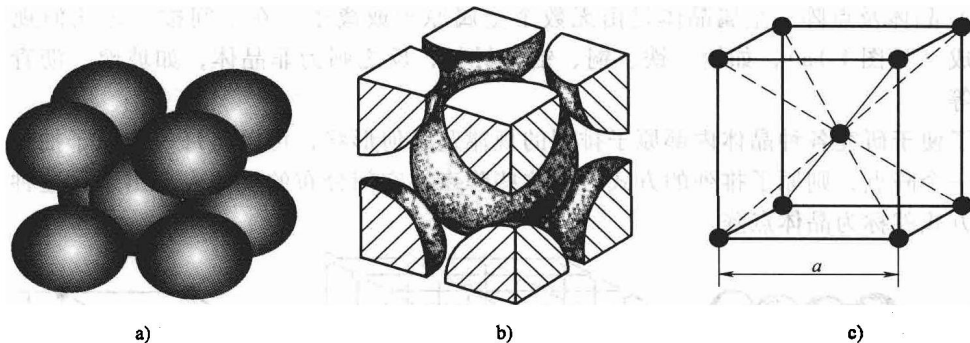


图 1-2 体心立方晶格及参数

a) 晶胞形式 b) 晶胞原子数 c) 晶格常数

(2) 面心立方晶格 面心立方晶格的晶胞仍是一个正立方体，如图 1-3a 所示，除与体心立方相同的八个顶点上均有一个原子外，在六个面的中心还各有一个原子，并被每相邻两个晶胞所共有 (见图 1-3b)，故每个晶胞的实际原子数为

$$\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$$

面心立方晶胞的晶格常数和轴间夹角与体心立方晶胞相同 (见图 1-3c)。但同一种固态金属在不同温度下，具有体心和面心晶格结构时，晶格常数值并不相等。晶格常数并非是原子间最近距离，但原子半径是最近原子间距的一半 (见表 1-1)。

例如工业纯铁，在 912℃ 以下的 α -Fe 晶格常数 $a = 2.8664\text{\AA}$ ，但在 912℃ 以上的 γ -Fe 晶

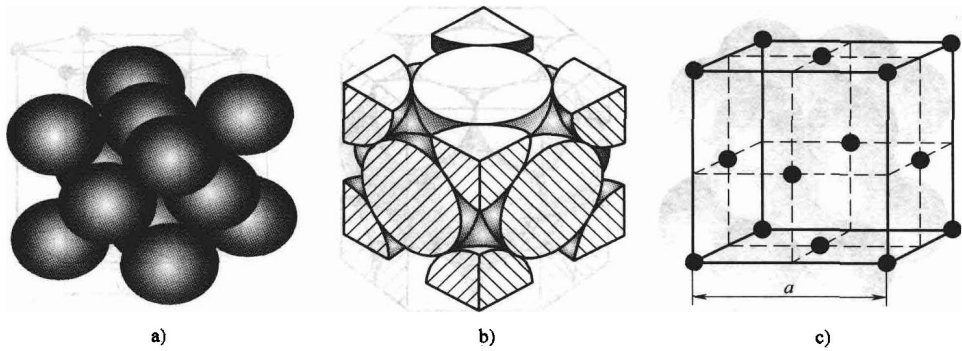


图 1-3 面心立方晶格及参数

a) 晶胞形式 b) 晶胞原子数 c) 晶格常数

格常数 $a = 3.6468 \text{ \AA}$ ，且最近原子间距 $d = 2.482 \text{ \AA}$ ，相比晶格常数数值差别很大。

常见金属中，具有面心立方结构的有 $\gamma\text{-Fe}$ (912 ~ 1394℃之间的纯铁)、 $\gamma\text{-Mn}$ 、Al、Cu、Ni、Au、Ag、Pb、 $\beta\text{-Co}$ 等二十余种，它们大多具有较高的塑性。

表 1-1 三种典型金属晶格的有关参数

| 晶格类型 | 原子数/个 | 原子最近间距/ \AA | 原子半径/mm | 配位数 ^① /个 | 致密度 ^② /mm |
|------|-------|---------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|
| 体心立方 | 2 | $d = \frac{\sqrt{3}}{2}a$ | $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ | 8 | 0.681 |
| 面心立方 | 4 | $d = \frac{\sqrt{2}}{2}a$ | $r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$ | 12 | 0.7401 |
| 密排六方 | 6 | $d = a$ | $r = \frac{1}{2}a$ | 12 | 0.7401 |

① 配位数是指晶体结构中 与任一原子最近邻、等距离的原子数目。

② 致密度是晶胞中原子排列的紧密程度。

(3) 密排六方晶格 密排六方晶格的晶胞是个六棱柱体，如图 1-4a 所示，在六棱柱体十二个角上各有一个原子并被相邻六个晶胞所共有，但在上下底面中心各有一个原子而被相邻两个晶胞所共有，同时在晶胞中间还有三个原子却被每个晶胞所独有（见图 1-4b），因此每个晶胞的原子数为

$$\frac{1}{6} \times 12 + 3 + \frac{1}{2} \times 3 = 6$$

密排六方晶格的晶胞需要二个晶格常数才能衡量其尺寸大小，如图 1-4c 所示，通常用六边底面的边长 a 和上下两底面的间距 c （即晶胞高度）表示晶格常数， c 与 a 之比称为轴比，即

$$\frac{c}{a} = \sqrt{\frac{8}{3}} \approx 1.633$$

若轴比介于 1.57 ~ 1.64 之间时，其上下两底面的原子才与中心三个原子紧密接触，才是真正的密排六方结构见表 1-2。

常见金属中具有密排六方结构的有 Mg、Zn、Be、 $\alpha\text{-Ti}$ 、 $\alpha\text{-Co}$ 、 $\beta\text{-Cr}$ 、Cd 等 30 余种，它们大多具有较大的脆性，塑性较差。

上述三种晶体结构中，Al、Cu、Pb、Zn、Au、Ag 等金属在固态只具有一种晶体结构，

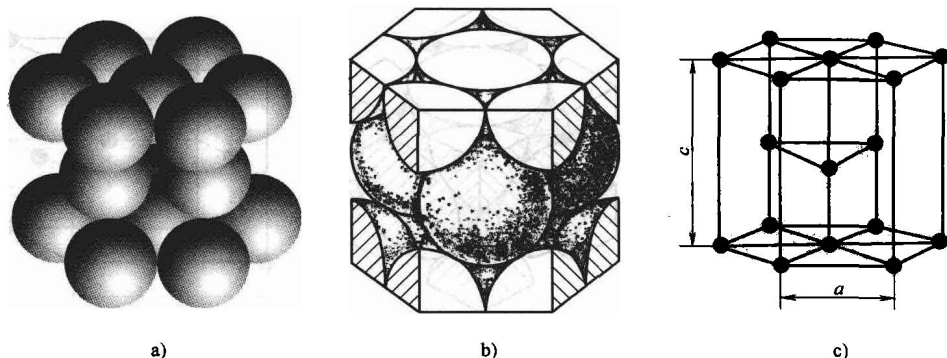


图 1-4 密排六方晶格及参数

a) 晶胞形式 b) 晶胞原子数 c) 晶格常数

而 Fe、Mn、Ti、Co、Sn 等金属则在不同温度或压力下，会呈现不同的晶体结构。

表 1-2 某些密排六方结构金属的轴比

| 金属 | | Be | α -Ti | α -Zr | α -Co | Mg | β -Cr | Zn | Cd |
|--------------------|-----|--------|--------------|--------------|--------------|--------|-------------|--------|--------|
| 晶格常数/ \AA | a | 2.2856 | 2.9506 | 3.2312 | 2.506 | 3.2094 | 3.988 | 2.6649 | 2.9788 |
| | c | 3.5832 | 4.6788 | 5.1477 | 4.069 | 5.2105 | 6.533 | 4.9468 | 5.6167 |
| c/a | | 1.5682 | 1.5873 | 1.592 | 1.623 | 1.6235 | 1.638 | 1.8563 | 1.8858 |

1.1.1.3 单晶体与多晶体

(1) 单晶体及其性能 原子排列规律相同、晶格位向完全一致的理想晶体称为单晶体，如图 1-5a 所示，单晶体具有各向异性的特征，即在同一晶体各晶面和各晶向上的原子排列密度不同，导致原子间距不同，原子间的作用力强弱也不同，因而在晶体的各个方向上具有不同的物理、化学和力学性能。

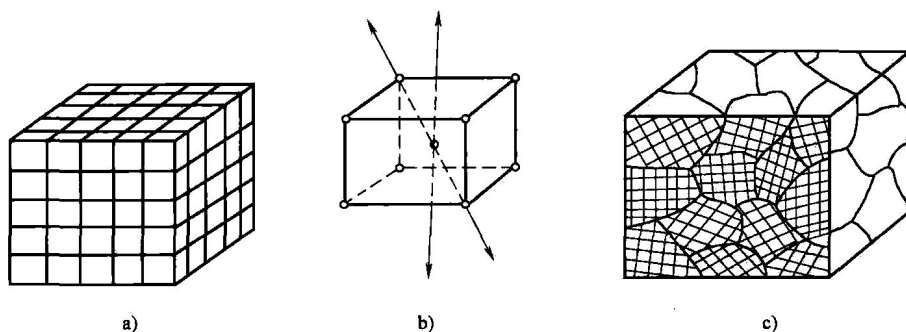


图 1-5 单晶体与多晶体

a) 单晶体 b) 单晶体各方向上弹性模量 c) 多晶体

各向异性是区别晶体与非晶体的重要特征之一。例如， α -Fe 的理想单晶体，由于不同晶向上的原子密度和结合力不同，则弹性模量 E 也不同，在体对角线方向上 $E = 290000\text{MPa}$ ，而沿立方体一边方向上 $E = 135000\text{MPa}$ ，如图 1-5b 所示。

单晶体还具有较高的强度、耐蚀性、导电性和其他性能，目前已在半导体元件、磁性材料、高温合金材料等方面得到开发和应用，并且单晶体金属材料是今后新型金属材料的发展

方向之一。

(2) 多晶体及其性能 实际金属晶体中均包含着许多单晶体，每个单晶体内的晶格方位一致，但各单晶体间的彼此方位却不同。每个单晶体均具有不规则颗粒状外形，通称为“晶粒”且直径为 $0.001 \sim 1.0\text{mm}$ ，如图 1-5c 所示。

晶粒与晶粒间的界面称为晶界，晶界为两相邻晶粒间不同晶格位向的过渡区且原子排列不规则。因此实际金属晶体均是由多晶粒、多晶界和许多偏离理想晶体的微观区域等组成的多晶体结构。

在实际生产中，除专门制作材料是单晶体结构外，应用的大多金属材料均属于多晶体结构，一般不具有各向异性的特征。例如， $\alpha\text{-Fe}$ 的多晶体结构，从其任何方向上取样测定，其弹性模量 E 均为 210000MPa 。

1.1.2 多晶体的晶体缺陷

多晶体金属中各个晶粒位向紊乱，一般不显示各向异性而呈现各向同性，并在晶界和微观处存在有原子排列不完整性，即为晶体缺陷。通常按晶体缺陷的几何形态分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三类。

1.1.2.1 点缺陷

点缺陷是晶格中三维空间各方向上尺寸都很小的缺陷，包括空位、置换原子和间隙原子等，空位是未被原子占有的晶格结点，置换原子是占据晶格结点的异类原子，间隙原子是处于晶格间隙的原子，如图 1-6 所示。

点缺陷形成是由于个别原子或异类原子在热运动过程中具有较高能量，能摆脱晶格束缚脱离平衡位置，而跳跃到晶格结点上形成置换原子，或跳跃到晶格间隙处形成间隙原子，并在原来位置上形成空位。

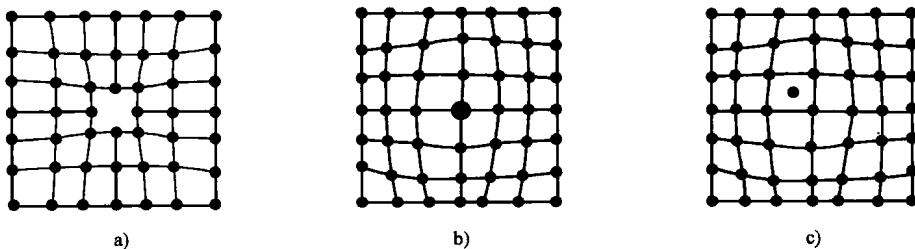


图 1-6 点缺陷示意图

a) 空位 b) 置换原子 c) 间隙原子

点缺陷的数目会随温度升高、原子跳动加剧、塑性加工或离子轰击等因素而增加，如铝在室温时， 1cm^2 中有 8×10^{10} 个空位，当温度升高到 600°C 时，其空位可剧增至 8×10^{19} 个。点缺陷使晶格发生畸变，并使金属强度及硬度升高，电阻增大。

1.1.2.2 线缺陷

线缺陷是指晶体三维尺寸上某一方向尺寸较大，而另两方向尺寸均很小并呈线状分布的缺陷，如图 1-7a 所示。晶体中某个晶面的上下两部分原子排列数目不等，如同沿着某个晶面插入一个多余的原子面，使上下两部分原子发生相对滑动而错排，故称为“刃型位错”。位错附近区域产生晶格畸变而使金属强度升高。

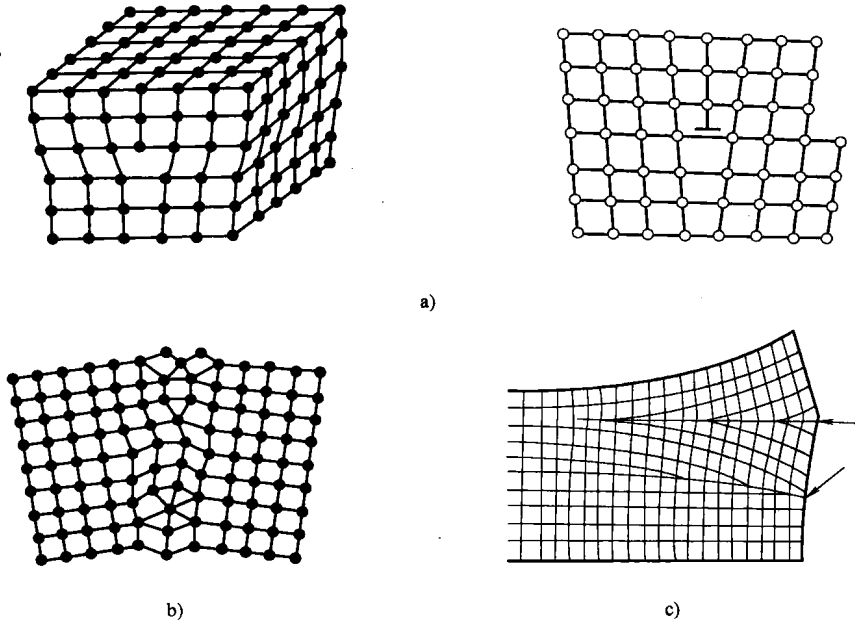


图 1-7 线缺陷与面缺陷示意图
a) 刃型位错 b) 晶界 c) 亚晶界

1.1.2.3 面缺陷

面缺陷主要是指金属中的晶界和亚晶界。晶界区域的原子排列不规则整齐而偏离其平衡位置，并产生晶格畸变，从而使多数晶粒间存在有一定的位向差，如图 1-7b 所示。

在晶体中每个晶粒内部的原子排列只是大体上整齐一致，实际上晶粒内还存在许多小尺寸、小位向差（一般几十分到 $1 \sim 2^\circ$ ）的镶嵌晶块，即称为“亚晶粒”，两个相邻亚晶粒间的边界即为“亚晶界”，如图 1-7c 所示。

亚晶界的原子排列也不规则，也产生晶格畸变。因此，晶界和亚晶界的存在均会使金属强度提高，同时还使塑性、韧性改善，称为细晶强化。

1.1.3 合金组成及相结构

合金是由两种或两种以上的金属元素或金属与非金属元素相互熔合，并结晶而成具有一定金属特性的物质体系。例如，黄铜是由铜与锌相互结晶成的铜合金，钢和铸铁是由铁与碳等相互结晶成的铁碳合金。

1.1.3.1 相结构的基本概念

(1) 体系与组元 体系是指所研究对象的物质总和，例如，研究铁和碳的合金即为 Fe-C 合金系，研究铁、碳、铬合金即为 Fe-C-Cr 合金系。

组元是指组成合金体系的各个独立的最基本的元素或化合物，简称为元。给定组元可以按不同配比制成一系列不同成分的合金，构成一个合金系，例如，Fe-Fe₃C 系中，给定组元 Fe 和 Fe₃C 的配比，即可组成 Fe-Fe₃C 系。

由两种组元构成的合金系，称为二元合金，如 Pb-Sn 系、Cu-Ni 系等；由三种组元构成的合金系，称为三元合金等，如 Fe-C-Cr 系、Al-Si-Mg 系等，以此类推。

(2) 相及其结构 合金的相是指合金体系中具有相同化学成分、晶体结构、液体或固体状态、性质并与周围物质以明显界面分开组成的均匀部分。

纯金属在熔点时呈固态和液态并存，但固态和液态各是一个相，即液相与固相并存，两相被相界面分开，并具有不同的晶体结构。合金因各元素间相互作用不同，在固态时既可相互溶解，形成固溶体结构，又可相互反应，形成金属化合物结构，还可以两种或几种晶体混合在一起形成混合物结构。

液态合金通常都是单相，而固态合金则由一个以上的相组成，由一个相组成的合金称为单相合金，由两个以上的相组成的合金称为两相合金或多相合金。

(3) 相平衡与相变 相平衡是指体系内各组成相的性质处于平衡且不随时间而变化的状态，但当合金由一相转变为另一相时，化学成分、内部结构和性能均将随温度发生突变，即液态结晶为固态，固态转变为另一固态，统称为相变。

例如，工业纯铁，若被加热到 912°C 以上时，将由体心立方晶格的 $\alpha\text{-Fe}$ 转变为面心立方晶格的 $\gamma\text{-Fe}$ ；若再被加热到 1394°C 以上时，将由面心立方晶格的 $\gamma\text{-Fe}$ 再转变为体心立方晶格的 $\delta\text{-Fe}$ 。

(4) 合金形成状态与组织 合金形成状态是指合金在某种条件下以哪几个相存在，其状态比纯金属复杂得多，例如，碳的质量分数为 0.45% 的碳素钢在 850°C 以上以单相奥氏体存在，在 727°C 以下则以双相铁素体和珠光体混合在一起存在。

组织是合金的微观形态并由合金中各相的形态所构成。当材料成分一定时，相同的相在不同处理条件下形成大小、方向、排列状况等各种不同的形态，从而构成不同的显微组织，且一个相可构成一种或一种以上的组织。

工业生产中通常采用改变处理条件而获得不同的组织，以改善材料的力学、物理和化学性能，并采用金相显微镜观察法，分析金属内各晶粒相的大小、方向、形状、排列状况及显微组织缺陷等组成关系与构造情况。

1.1.3.2 固溶体与固溶强化

(1) 固溶体及其分类 当合金由液态结晶为固态时，组成元素之间像液态合金一样相互溶解，形成一种与合金中某一组元晶格结构相同的新相称为固溶体。固溶体中晶格结构保持不变的组元称为溶剂，晶格结构消失的组元称为溶质。

溶质原子溶入固溶体的量称为固溶体的浓度，一般用质量百分比或原子百分比表示，在一定条件下，溶质元素在固溶体中的极限浓度称为溶解度，其大小主要取决于溶质与溶剂的晶格类型、原子直径及其在元素周期表中的相互位置。

根据溶质原子在溶剂晶格结构中所占位置的不同，分为置换固溶体与间隙固溶体。按溶质原子溶入溶剂晶格结构中的溶解度不同，又分为有限固溶体（溶质原子的浓度有一定限度）和无限固溶体（溶质原子能以任意比例溶入）。

(2) 置换固溶体 置换固溶体是指溶质原子取代部分溶剂原子而占据溶剂晶格结点位置所形成的固溶体（见图 1-8a），一般在溶剂晶格中呈任意、无规则分布，有时在特定情况下也会占据溶剂晶格的一定位置。

溶质原子 Mn、Ni、Cr、Si、Mo 等元素，均可与溶剂 Fe 原子形成置换固溶体。一般溶剂和溶质原子半径差别越小，溶解度越大。

若溶剂和溶质元素晶格类型相同，原子半径相近，在元素周期表中的位置越靠近，则溶

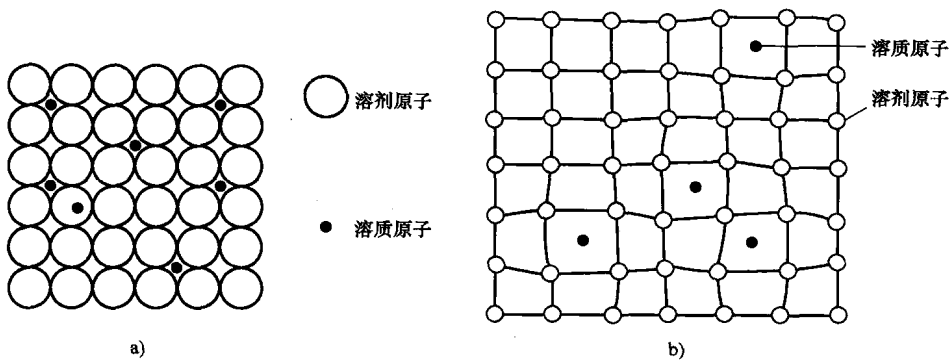


图 1-9 间隙固溶体结构及畸变

a) 间隙固溶体结构 b) 间隙固溶体晶格畸变

作用形成一种不同于任一组元晶格的新物质，称为金属化合物。金属化合物按形成条件及结构特点，可分为正常价化合物、电子化合物和间隙化合物。

正常价化合物是指符合一般化合物原子价规律的化合物，通常由金属元素与周期表中第 IV、V、VI 族非金属元素或类金属元素组成，成分固定且能弥散分布于固溶体中起强化相作用而使合金强化，并具有很高的硬度和脆性。这类化合物可用化学式表示，如 Al-Mg-Si 等合金中的强化相 Mg_2Si 、 Mg_2Sn 、 Mg_2Pb 等。

电子化合物是由第一族或过渡族元素与第 II 至第 V 族元素形成的化合物，它们不遵循原子价规律，是因为形成这类化合物的主导因素是合金具有一定的电子浓度（化合物中价电子数与原子数之比），如 CuZn、 Cu_3Al 、 Cu_3Sn 等。

电子化合物可溶解一定量的组元而形成以电子化合物为基、金属键结合的固溶体，熔点和硬度很高，塑性差。但晶体结构与电子浓度有一定对应关系（见表 1-3），且成分可在一定范围内变动，如 Cu-Zn 合金中 Zn 的质量分数可从 36.8% 变动到 56.5%。

表 1-3 电子化合物及其结构

| 合金系 | 电子浓度 | | |
|--------|------------|---------------|--------------|
| | 3/2, 21/14 | 21/13 | 7/4, 21/12 |
| | β 相 | γ 相 | ϵ 相 |
| | 晶体结构 | | |
| 体心立方晶格 | 复杂立方晶格 | 密排六方晶格 | |
| Cu-Zn | CuZn | Cu_5Zn_8 | $CuZn_3$ |
| Cu-Sn | Cu_5Sn | $Cu_{31}Sn_8$ | Cu_3Sn |
| Cu-Al | Cu_3Al | Cu_9Al_4 | Cu_5Al_3 |
| Cu-Si | Cu_5Si | $Cu_{31}Si_8$ | Cu_3Si |

(2) 间隙化合物及结构 间隙化合物是由过渡族金属元素与原子半径较小的 C、N、H、B 等非金属元素形成的化合物。当非金属原子半径与金属原子半径的比值小于 0.59 时，将形成具有简单晶格的间隙化合物，称为间隙相。

间隙相成分可在一定范围内变化，一般可用分子式表示组成，但不符合化合价规律，如

VC、 W_2C 、 Nb_4C 等均具有简单晶体结构（见图 1-10a），并具有很高的熔点和硬度（见表 1-4），但韧性差，很少单独使用。

当非金属原子半径与金属原子半径的比值大于 0.59 时，可形成具有复杂结构的间隙化合物，如 Fe_3C 、 Mo_3C 、 $Cr_{23}C_6$ 等。其中 Fe_3C 是钢铁中一种最重要的间隙化合物，又称为渗碳体，具有复杂的斜方晶格，如图 1-10b 所示。

表 1-4 钢中常见碳化物的硬度和熔点

| 类别 | 间隙相 | | | | | | | 复杂结构的间隙化合物 | |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|---------|
| | TiC | ZrC | VC | NbC | TaC | WC | MoC | $Cr_{23}C_6$ | Fe_3C |
| 成分 | TiC | ZrC | VC | NbC | TaC | WC | MoC | $Cr_{23}C_6$ | Fe_3C |
| 硬度 HV | 2850 | 2840 | 2.10 | 2.50 | 1550 | 1730 | 1480 | 1650 | 860 |
| 熔点/°C | 3410 | 3472 | 3023 | 3770 | 4150 | 2876 | 2960 | 1577 | 1227 |

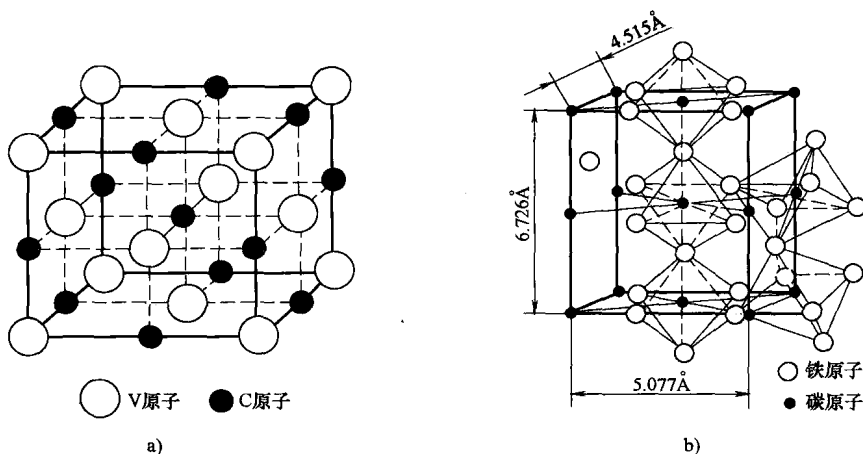


图 1-10 金属化合物晶体结构示意图

a) VC 的间隙相结构 b) Fe_3C 的斜方晶格结构(图中, $1\text{Å} = 1\text{nm}$)

(3) 金属化合物的弥散强化 金属化合物是高合金工具钢的重要组成相，如斜方晶格的渗碳体中铁原子可部分被其他金属原子所置换，形成以渗碳体为基的固溶体，如 $(Fe, Mn)_3C$ 、 $(Fe, Cr)_3C$ 等，这类化合物称为合金渗碳体。

生产中常利用将金属化合物相分布在固溶体相的基体上来提高合金的强度、硬度，从而达到强化金属材料的目的，称为第二相强化，其效果主要取决于化合物的大小、形状、分布状况等形态。

若化合物分布在固溶体晶界上呈不连续或连续的网状，其强度、塑性和韧性均大大降低。若化合物在固溶体晶粒内呈片状或层状分布，可明显提高合金材料的强度和硬度，而塑性和韧性有所下降，如钢中的片状珠光体组织。

若化合物在固溶体晶粒内呈弥散质点或粒状分布，则既可显著提高合金强度和硬度，又可使塑性和韧性下降不大，并且颗粒越细小，越呈弥散均匀分布，强化效果越好，故工程上常对合金材料进行“弥散强化”或“颗粒强化”。