

高等学校教材

# 金属材料及热处理

武汉水利电力学院 王希琳 主编



## 内 容 提 要

本书是根据水利电力系统高等学校机械类专业《金属材料及热处理》教学大纲编写的,内容包括金属学基础理论、钢的热处理、常用金属材料、金属材料的强化与零件失效分析、典型零件选材与工艺分析等五个方面,共十章。

本书可作为高等工科院校、职工大学、函授大学机械类各专业的教材,也可供机械工程技术人員阅读参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

金属材料及热处理/王希琳主编.-北京:中国电力出版社,(1998重印)

高等学校教材

ISBN 7-80125-614-X

I. 金… II. 王… III. ①金属材料-高等学校-教材②热处理-高等学校-教材 IV. TG15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 28723 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京鑫正大印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

\*

1992 年 12 月第一版 1998 年 9 月北京第三次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 367 千字

印数 5551—7600 册 定价 15.30 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

# 前 言

本书是根据1987年4月水利电力部直属高等学校金属材料课程教学协作组会议制订的高等学校机械设计、机械制造、起重运输与工程机械等机械类专业《金属材料及热处理》教学大纲编写的。

本书从教学大纲要求出发,注重基础知识和基本理论,同时适当增加了反映新理论新技术的内容,力图使学生掌握金属学与热处理的基本原理,常用金属材料的组织、性能和应用特点;了解金属强化的途径和应用;掌握机械零件和工程构件的选材、热处理工艺分析以及失效分析的基本方法。本书还注重结合能源部水利电力机械系统的实际,对内燃机和起重运输机械典型零件的选材、热处理工艺和失效进行了分析,力求使学生在机械设计、制造、运行和维修工作中,具备对机械零件和工程构件正确选材和合理安排零件加工工艺路线的能力以及进行失效分析的初步能力。

本书是高等学校工科机械类专业《金属材料与热处理》课程的教材,也可作为有关专业师生和从事机械设计与制造、运行和维修方面工作的工程技术人员的参考书和自学用书。

本书由武汉水利电力学院王希琳编写绪论和第一、二、四、九章,王贞炳编写第七、八章;葛洲坝水电工程学院范钟明编写第三、五、六章,游敏编写第十章。全书由武汉水利电力学院王希琳主编,华中理工大学陶曾毅教授主审。

在本书的编写过程中,得到华北电力学院齐纪渝老师的许多帮助,在此表示衷心感谢。教材中部分内容参考了有关文献,顺此致谢。

由于编者水平有限,错误和不妥之处恳请读者批评指正。

编 者

1991年11月

# 目 录

## 前 言

绪论	( 1 )
第一章 纯金属的晶体结构与结晶	( 3 )
第一节 金属及其特性	( 3 )
一、金属特性(3) 二、金属原子的结合方式——金属键(3)	
第二节 纯金属的晶体结构	( 4 )
一、晶体结构概念(4) 二、常见金属的晶体结构(5) 三、立方晶格的晶面、晶向及其表示方法(7)	
四、金属的同素异构现象(9)	
第三节 实际金属的晶体结构	( 10 )
一、单晶体与多晶体(10) 二、实际金属中的晶体缺陷(10)	
第四节 纯金属的结晶	( 13 )
一、金属的结晶过程(13) 二、金属结晶的能量条件(14) 三、晶核的形成与长大(15) 四、金属结晶后的晶粒大小(16)	
第五节 铸锭结构	( 17 )
一、铸锭的组织及性能(17) 二、铸锭的缺陷(18)	
习题与思考题	( 19 )
第二章 合金的结构与二元合金相图	( 20 )
第一节 合金及其相结构	( 20 )
一、合金(20) 二、合金的相结构(20)	
第二节 二元合金相图	( 24 )
一、合金相图及其建立(24) 二、二元合金相图的基本类型(26)	
第三节 相图与合金性能的关系	( 34 )
一、相图与合金的机械性能和物理性能的关系(34) 二、相图与合金工艺性能的关系(34)	
习题与思考题	( 35 )
第三章 铁碳合金相图及碳钢	( 37 )
第一节 铁碳合金中的组元和组成相	( 37 )
一、组元(37) 二、组成相(38)	
第二节 铁—渗碳体相图分析	( 39 )
第三节 典型合金的平衡结晶过程及组织	( 42 )
一、共析钢(43) 二、亚共析钢(44) 三、过共析钢(46) 四、共晶白口铸铁(47) 五、亚共晶白口铸铁(48) 六、过共晶白口铸铁(49)	
第四节 含碳量对铁碳合金组织和性能的影响	( 50 )
一、相组成物相对量对机械性能的影响(51) 二、组织组成物的相对量和形态对机械性能的影响(51)	
第五节 铁碳合金相图的应用	( 52 )
一、选材方面的应用(52) 二、制定热加工工艺方面的应用(52) 三、铁碳合金相图应用的局限性(53)	
第六节 碳钢	( 53 )

一、常存杂质元素对碳钢性能的影响(53)	二、碳钢的分类、编号和用途(54)	
习题与思考题		( 58 )
<b>第四章 金属的塑性变形与再结晶</b>		( 60 )
<b>第一节 金属的塑性变形</b>		( 61 )
一、单晶体的塑性变形(61)	二、多晶体的塑性变形(66)	
<b>第二节 金属塑性变形后的组织和性能</b>		( 67 )
一、塑性变形后的组织(67)	二、塑性变形后的性能(69)	三、内应力(70)
<b>第三节 变形金属加热时的回复与再结晶</b>		( 70 )
一、回复(70)	二、再结晶(71)	三、晶粒长大及影响再结晶后晶粒大小的因素(72)
<b>第四节 金属的热加工</b>		( 73 )
一、热加工与冷加工的区别( 73 )	二、热加工的特点及其应用(73)	
<b>第五节 金属的断裂</b>		( 74 )
习题与思考题		( 75 )
<b>第五章 钢的热处理</b>		( 77 )
<b>第一节 钢在加热时的转变</b>		( 78 )
一、钢在加热或冷却时的相变温度(78)	二、奥氏体的形成(79)	三、奥氏体晶粒的长大及其影响因素(81)
<b>第二节 钢在冷却时的转变</b>		( 83 )
一、过冷奥氏体等温转变曲线(C曲线或TTT曲线)(84)	二、过冷奥氏体转变产物的形成过程、形态和性能(86)	三、C曲线的应用(96)
四、过冷奥氏体连续冷却转变曲线(CCT曲线)(97)		
<b>第三节 钢的退火与正火</b>		(100)
一、钢的退火(100)	二、钢的正火(102)	
<b>第四节 钢的淬火与回火</b>		(103)
一、钢的淬火(103)	二、钢的回火(107)	
<b>第五节 钢的淬透性</b>		(111)
一、淬透性的概念(111)	二、淬透性对工件机械性能的影响(112)	三、淬透性的测定和表示方法(112)
四、影响淬透性的因素(114)	五、淬透性曲线的应用(115)	
<b>第六节 钢的表面热处理</b>		(116)
一、表面淬火(116)	二、化学热处理(120)	
习题与思考题		(126)
<b>第六章 工业用钢</b>		(130)
<b>第一节 钢的分类和编号</b>		(130)
一、钢的分类(130)	二、合金钢的编号(131)	
<b>第二节 合金元素在钢中的作用</b>		(132)
一、合金元素在钢中存在的形式(132)	二、合金元素对铁碳相图的影响(134)	三、合金元素对钢中相变的影响(135)
<b>第三节 工程结构用钢</b>		(137)
一、普通碳素结构钢(137)	二、普通低合金结构钢(138)	
<b>第四节 调质钢</b>		(140)
一、调质件的一般特点及调质钢的涵义(140)	二、调质钢的化学成分及其主要作用(140)	三、常用调质钢的性能特点及用途(141)
<b>第五节 表面硬化用钢</b>		(144)
一、渗碳钢(144)	二、氮化钢(145)	三、碳氮共渗用钢(147)
四、表面淬火用钢(148)	五、低	

淬透性钢(148)	
第六节 专用结构钢 .....	(149)
一、弹簧钢(150) 二、滚动轴承钢(152) 三、易切钢(154) 四、冷冲压用钢(155) 五、铸钢(156)	
第七节 工具钢 .....	(158)
一、刀具钢(158) 二、模具钢(165) 三、量具钢(168)	
第八节 特殊性能钢 .....	(169)
一、不锈钢(169) 二、耐热钢(172) 三、耐磨钢(177)	
习题与思考题 .....	(178)
第七章 铸铁 .....	(180)
第一节 铸铁的成分、组织及性能特点 .....	(180)
一、铸铁的化学成分及组织特点(180) 二、铸铁的分类(181) 三、铸铁的性能特点(182)	
第二节 铸铁的石墨化 .....	(184)
一、铸铁的石墨化过程(184) 二、影响铸铁石墨化的因素(185)	
第三节 灰铸铁 .....	(187)
一、灰铸铁的组织 and 性能(187) 二、灰铸铁的牌号与机械性能指标(188) 三、提高灰铸铁机械性能的途径(188)	
第四节 球墨铸铁 .....	(190)
一、球墨铸铁的化学成分及其处理过程(190) 二、球墨铸铁的组织、性能、牌号及用途(190)	
第五节 蠕墨铸铁 .....	(192)
一、蠕墨铸铁的组织 and 性能特点(192) 二、蠕墨铸铁的制备(192)	
第六节 可锻铸铁 .....	(193)
一、可锻铸铁的牌号、性能和用途(193) 二、可锻铸铁的制造(193)	
第七节 合金铸铁 .....	(194)
一、耐磨铸铁(194) 二、耐蚀铸铁(195) 三、耐热铸铁(196)	
第八节 铸铁热处理 .....	(197)
一、铸铁热处理的特点(197) 二、铸铁热处理工艺(198)	
习题与思考题 .....	(199)
第八章 有色金属及其合金 .....	(200)
第一节 铝及其合金 .....	(200)
一、工业纯铝(200) 二、铝的合金化及铝合金的分类(200) 三、铝合金的热处理(201) 四、形变铝合金(203) 五、铸造铝合金(205)	
第二节 铜及其合金 .....	(207)
一、纯铜(207) 二、铜的合金化(208) 三、黄铜(208) 四、青铜(210) 五、白铜(213) 六、选择铜合金的原则(214)	
第三节 滑动轴承合金 .....	(215)
一、锡基轴承合金(215) 二、铅基轴承合金(216) 三、铜基轴承合金(216) 四、铝-石墨复合材料(216)	
习题与思考题 .....	(217)
第九章 金属材料的强化 .....	(218)
第一节 金属强度与强化的概念 .....	(218)
第二节 金属的强化机制 .....	(218)
一、变形强化(218) 二、固溶强化(220) 三、细晶强化(222) 四、第二相强化(223)	

第三节	金属的强度与塑性、韧性的配合 .....	(224)
一、	材料的强韧性概念(224) 二、断裂韧性 $K_{Ic}$ 与低应力脆断(225)	
第四节	强化机制的应用 .....	(226)
一、	低合金高强度钢(HSLA钢)(226) 二、低碳马氏体钢(227) 三、钢的形变热处理(227)	
四、	马氏体时效钢(227)	
第五节	金属的表面强化 .....	(228)
一、	概述(228) 二、提高金属耐磨性能的表面强化(229) 三、提高金属抗疲劳性能的表面强化(230)	
四、	金属材料的表面强化技术(232)	
习题与思考题	.....	(234)
第十章	零件的失效分析、选材及热处理工艺分析 .....	(235)
第一节	零件的失效形式、分析方法及实例 .....	(235)
一、	机械零件的失效形式(235) 二、失效分析的一般方法(236) 三、零件失效分析的实例(237)	
第二节	机械零件的选材 .....	(239)
一、	根据使用性能选材(239) 二、根据工艺性能选材(240) 三、成本选材法(241)	
第三节	热处理工艺的选择 .....	(242)
一、	从强度要求出发选择热处理工艺(242) 二、从疲劳强度出发选择热处理工艺(242) 三、为改善冲击韧性选择热处理工艺(242)	
四、	为提高耐磨性选择热处理工艺(242)	
第四节	零件的热处理技术条件和冷、热加工工艺路线安排 .....	(243)
一、	零件热处理技术条件的制定(243) 二、热处理技术条件在图纸上的标注(243) 三、零件冷、热加工工艺路线的安排(244)	
第五节	典型零件选材及热处理工艺分析 .....	(244)
一、	轴类零件的选材及热处理工艺(244) 二、齿轮类零件的选材及热处理工艺(247) 三、内燃机的连杆及重要螺栓的选材及热处理工艺(249)	
四、	工程机械一般易损件的选材及热处理工艺(251)	
习题与思考题	.....	(252)

# 绪 论

材料是人类生产的物质基础，是现代科学技术发展的三大支柱之一。材料的品种、数量和质量是衡量一个国家科学技术和国民经济水平的重要标志。

机械工业是基础工业，它为各行各业提供机械装置。而所有的机械都是由许多不同性能的材料加工成各种零件组装而成的。现代工业的发展，要求各种机械设备技术功能优异、产品质量高、工作寿命长。而优异的机械装置，必须通过高水平的设计(包括选材)、合理的加工制造才能获得，通过正确的使用，才能发挥其优异的技术功能。大量事实证明，设计、加工制造和使用中的许多材料问题，是影响机械产品质量的主要原因之一。因此，从事机械设计、制造和运行的工程技术人员，必须掌握近代材料科学和材料工程知识。

工程材料按其化学组成为金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料四大类；按其使用性能分为结构材料和功能材料两大类。所谓结构材料，是指主要要求强度、硬度、塑性、韧性等机械性能，用来制造机器零件和工程构件的材料。功能材料是指具有电、热、光、声、磁等特殊功能和效应的材料。当前世界上已经注册的材料品种有25万种之多。近几十年来，虽然高分子材料和陶瓷材料发展极快，但是在结构材料中，金属材料仍占主要地位，尤其是钢铁材料的用量约占80%以上。全世界钢材的品种规格约有10万多种，钢号6千多个。面对如此浩瀚的材料世界，如何正确地选用材料，充分发挥材料的潜力，做到经济合理，是材料科学研究的重要课题，也是机械设计与制造工程师的一项重要任务。

图0-1为一般机械设计过程示意图。在进行设计时，首先根据机构和零件的服役条件和可能的失效形式，确定整机和主要零部件的形状和尺寸，画出总装图和零件图。与此同时，还要选定每个零件所用的材料。从应用材料的角度，最关心的是材料的机械性能和某些物理、化学性能。材料的性能取决于它的化学成分和内部的组织结构，而组织结构又与各加工工艺密切相关。因此，每个零件选用什么材料，经过哪些制造加工工艺，使用状态的组织结构是什么，能否在规定期限内正常服役等，这些问题处理得如何，与设计者的材料科学知识水平有很大关系。

《金属材料及热处理》是介绍金属材料的成分、内部组织结构与性能之间关系及其变化规律的一门课程，也是机械类专业一门重要的技术基础课程。其目的是使学生了解和掌握金属材料的基本原理、主要性能和用途，以及

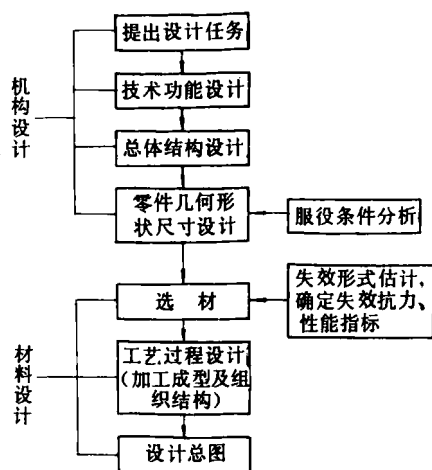
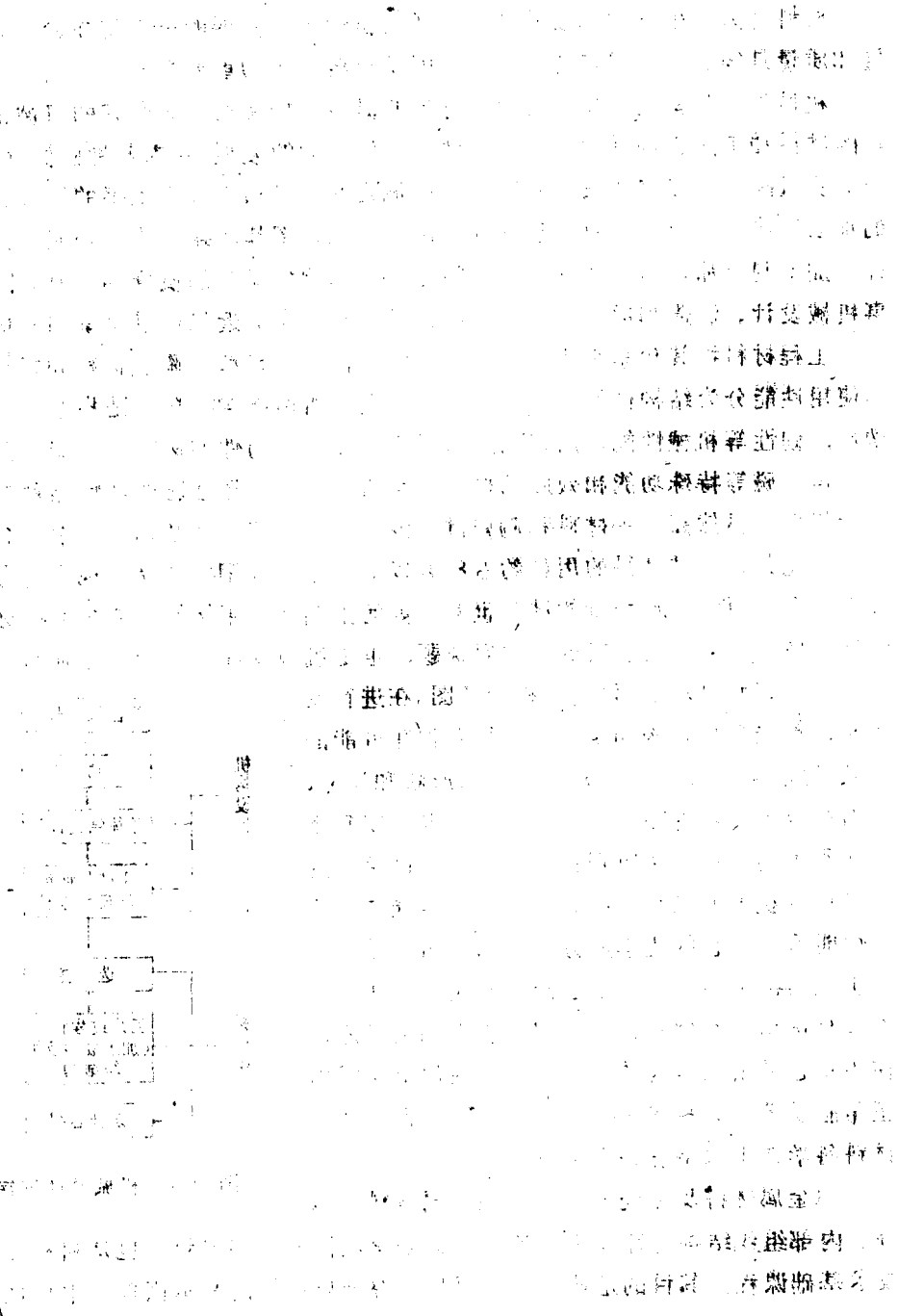


图 0-1 机械设计过程示意图



决定和影响性能的主要因素、提高材料性能的途径等方面的知识，力求使学生具备根据零件的受力情况、工作环境和失效形式合理选择和正确使用金属材料的能力。

本课程是一门理论性、系统性较强的课程。学习中应紧紧抓住材料成分—组织结构—性能这条主线，及时复习，注意名词概念和内容的连贯性，在理解的基础上加强记忆。同时，还必须重视实验课，深入理解实验内容，掌握一定的实验技术，通过实验加深对基本理论的理解。



# 第一章 纯金属的晶体结构与结晶

## 第一节 金属及其特性

### 一、金属的特性

在已发现的百余种化学元素中，金属元素有80多种，约占3/4。

金属是指具有一定金属特性的物质。金属特性，包括良好的导电性、导热性；较好的反光能力和特有的金属光泽。此外，大多数金属具有较高的强度和良好的塑性。正因为金属材料具有这些优良的使用性能和工艺性能，所以得到了十分广泛的应用。

固体物质分为两大类，即晶体和非晶体。晶体是内部原子（离子和分子）呈规则排列的物质，非晶体则相反。固态金属通常都是晶体。

金属的特性，只有在金属材料中才能显示出来。即当大量的金属原子结合成晶体后才具有上述特性。可见，金属的特性是由它的原子构造特点和金属原子之间的结合方式决定的。

### 二、金属原子的结合方式——金属键

组成物质的原子都是由带正电荷的原子核，和绕原子核运动的带负电荷的电子所组成。电子数目等于该元素的原子序数。核外电子按一定规律分布在各电子层上，原子最外层的电子（即价电子）的数目决定元素的主要物理性能和化学性能。金属原子构造的特点是它的价电子数目少，一般只有1~2个，而且价电子与原子核的结合力较弱。因此，当大量金属原子聚合在一起，结合成晶体时，金属原子将失去价电子而变成正离子。正离子按一定的几何形式规则地排列，并在固定的位置上作高频率的振动；脱离原子核束缚的价电子成为自由电子，在各正离子之间不停地作穿梭运动，为整个金属所共有，形成“电子气”。金属晶体就是依靠这些自由电子与正离子之间的静电引力和正离子与正离子、自由电子与自由电子之间的斥力相平衡，使金属原子结合成一整体。金属原子的这种结合方式，称为“金属键”。图1-1为金属键结合示意图。

金属的特性，用金属键结合方式可以得到满意的解释。

由于金属晶体中的自由电子，在很小的外加电场作用下就会沿着电场方向运动，形成电流。所以，金属具有优良的导电性。金属正离子热振动的振幅随着温度的升高而增大，因而对自由电子定向运动的阻碍作用增加，所以，金属的电阻随温度的升高而增大，这种关系称为正的电阻温度系数，如图1-2(a)所示。与此相反，非金属的电阻随温度的升高而减小，如图1-2(b)所示。电阻随温度变化的关系，是区别金属与非金属的重要标志。因此，可以对金属作如下定义：金属是具有正的电阻温度系数的物质。

由于金属晶体中存在正离子和自由电子的运动，而自由电子是金属所独有的。当金属的一端受热时，正离子和自由电子的热运动加剧，并通过彼此碰撞将热量传递到另一端。

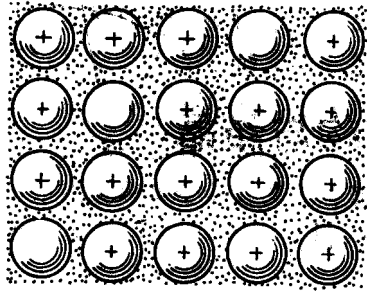


图 1-1 金属键示意图

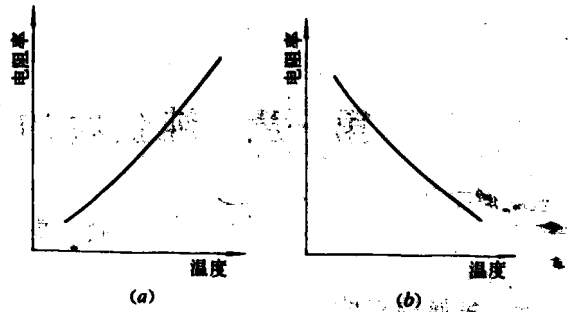


图 1-2 金属和非金属的电阻与温度的关系

(a) 金属; (b) 非金属

所以，金属具有比非金属好的导热性。

金属晶体中的自由电子，可以吸收可见光的能量，被激发到更高的能量状态。当它们从较高的能量状态返回到较低的能量状态时，因辐射使金属具有不同的光泽。

## 第二节 纯金属的晶体结构

### 一、晶体结构概念

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球紧密堆积的模型表示，如图 1-3(a) 所示。晶体中所有原子都在三维空间按一定的几何形式规律地重复排列。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 1-3(b) 所示。晶格的结点即为原子的平衡位置。

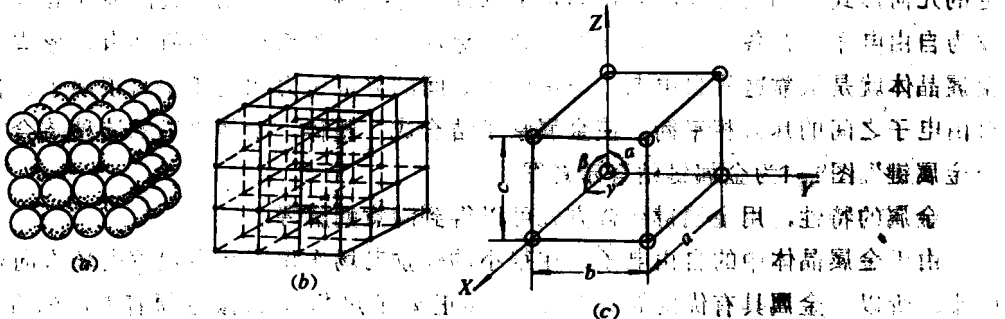


图 1-3 晶体、晶格、晶胞示意图

(a) 晶体; (b) 晶格; (c) 晶胞

由于晶体中的原子在三维空间是有规律地重复排列，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 1-3(c) 所示。晶胞各边的长用  $a$ 、 $b$ 、 $c$  表示，称为晶格常数，以纳米 (nm) 作为度量单位， $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ 。棱边间的夹角分别

以  $a$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  表示。常用晶胞各棱边的长度和夹角的大小来表示晶胞的几何形状和尺寸，并依此对晶体进行分类。图 1-3(c) 所示的晶胞， $a = b = c$ ， $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，这种晶胞称为简单立方晶胞。

## 二、常见金属的晶体结构

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。

### (一) 体心立方晶格

图 1-4 为体心立方晶格。它由 8 个原子构成一个立方体，在立方体的中心还有一个原子。立方晶胞的尺寸大小仅以晶格常数  $a$  表示。

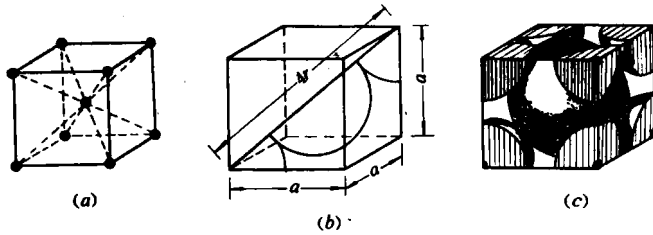


图 1-4 体心立方晶格

(a) 晶胞；(b) 原子半径；(c) 晶胞原子数

#### 1. 晶胞中的原子数

由图 1-4(c) 可知，在体心立方晶胞中，角顶上的每个原子为相邻的 8 个晶胞所共有，属于一个晶胞的只有  $1/8$ ，位于立方体中心的那个原子为一个晶胞所独有。因此，每个体心立方晶胞中的原子数  $n = \frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$  (个)。

#### 2. 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。由图 1-4(b) 可知，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相切，距离最近。因此，原子半径  $r = \sqrt{3} a/4$ 。

#### 3. 配位数与致密度

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 (CN)。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 (K)，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  $K$ ——致密度；

$n$ ——晶胞中的原子数；

$v$ ——一个原子刚球的体积；

$V$ ——晶胞体积。

体心立方晶格的致密度  $K = 0.68$ ，表明在体心立方晶格中，68% 的体积被原子所占据，

其余32%是空隙。

具有体心立方晶格的金属有 $\alpha$ -Fe、Cr、Mo、W、V、Nb等，约30余种。

(二) 面心立方晶格

图1-5为面心立方晶格。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。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  $n = \frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$  (个)。由图1-5(b)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  $r = \sqrt{2} a / 4$ 。

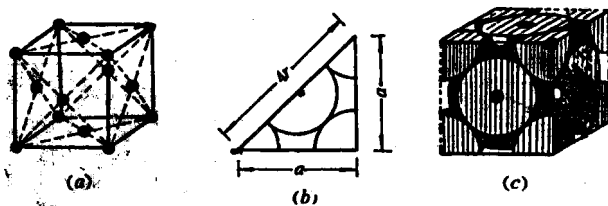


图 1-5 面心立方晶格

(a)晶胞；(b)原子半径；(c)晶胞原子数

由图1-6可以看出，在面心立方晶胞中，每一个表面中心的原子，都同时处于三个不同方位的面心位置，到三个面的角顶的距离均为 $\sqrt{2} a / 2$ ，因此，面心立方晶格的配位数等于12。致密度  $K = 0.74$ 。

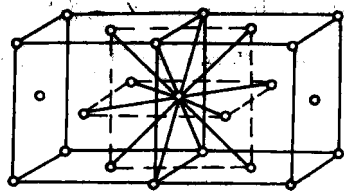


图 1-6 面心立方晶格的最近邻原子

具有面心立方晶格的金属有 $\gamma$ -Fe、Al、Cu、Ni、Ag、Au、Pb等20余种。

(三) 密排六方晶格

图1-7为密排六方晶格，由12个原子构成一个正六方柱体，在其上、下底面的中心各有一个原子，在正六方柱体的中心还有三个原子。密排六方晶格的晶格常数，以六方底面的边长 $a$ 和六方柱体的高度 $c$ 表示。 $c/a$ 为轴比。按刚球堆砌模型计算，密排六方晶格的轴比 $c/a \approx 1.633$ 。实际测定密排六方金属的轴比，一般在1.57~1.64之间。

密排六方晶格的晶胞原子数  $n = \frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$  (个)，原子半径  $r = a / 2$ ，配位

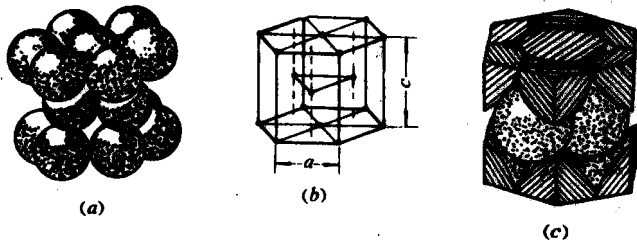


图 1-7 密排六方晶格

(a)刚球模型；(b)晶胞；(c)晶胞原子数

数等于12，致密度等于0.74。

表1-1列出了一些金属晶体的原子半径。

具有密排六方晶格的金属有Mg、Zn、Be、 $\alpha$ -Ti、 $\alpha$ -Zr等。

表 1-1 一些金属晶体的原子半径 (nm)

金 属	Cu	Ag	Au	$\alpha$ -Fe	V	Nb	$\gamma$ -Fe
原子半径	0.128	0.144	0.144	0.127	0.133	0.144	0.124

### 三、立方晶格的晶面、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。图1-8是几种不同位向的晶面和晶向的示意图。由图

可知，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。

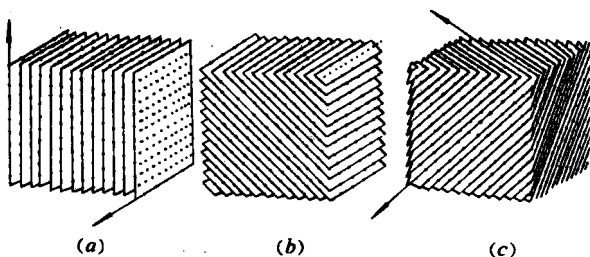


图 1-8 晶面、晶向示意图

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。

#### (一) 晶面指数

立方晶格晶面指数的确定方法是：

(1) 选定坐标系。在晶格中，以待定晶面外的某一个原子为坐标原点，晶胞的三个棱边为坐标轴  $OX$ 、 $OY$ 、 $OZ$ 。

(2) 求待定晶面的截距。以晶格常数  $a$  为度量单位，求出待定晶面在三个坐标轴上的截距。

(3) 取截距的倒数。

(4) 将截距的倒数化为最简单的整数，去掉逗号，把它们放在圆括号内。

例如，求图1-9所示有阴影线晶面的晶面指数。该面在三个轴上的截距分别为  $1$ 、 $\infty$ 、 $\infty$ ；截距的倒数为  $1$ 、 $1/\infty$ 、 $1/\infty$ ；最简整数为  $1$ ， $0$ ， $0$ ；所以该晶面的晶面指数为  $(100)$ 。

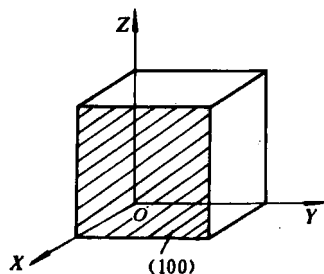


图 1-9 晶面指数确定法

同理，可以求出立方晶格的  $(010)$ 、 $(001)$ 、 $(110)$  和  $(111)$  晶面，如图1-10(a)、(b)、(c)所示。

晶面指数的一般表达式为  $(hkl)$ ，如果所求晶面在坐标轴上的截距为负值，则在相应

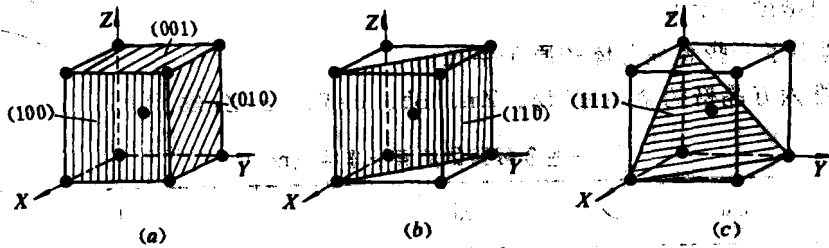


图 1-10 立方晶格中三种典型晶面  
(a) (100)晶面; (b) (110)晶面; (c) (111)晶面

的指数上方加上负号, 如 $(\bar{h}kl)$ 、 $(h\bar{k}l)$ 等。立方晶胞中的 $(100)$ 、 $(010)$ 、 $(001)$ 和 $(\bar{1}00)$ 、 $(0\bar{1}0)$ 、 $(00\bar{1})$ 晶面, 虽然它们分别处于坐标轴两边, 或者位向不同, 但是它们的原子排列方式、原子密度和晶面间距完全一样。它们代表着性质相同的一类晶面, 将其归为一个晶面族, 用 $\{100\}$ 表示。 $\{100\}$ 、 $\{110\}$ 、 $\{111\}$ 晶面是立方晶格中重要的晶面。

在同一晶体中, 晶面指数不同的晶面原子排列不同。例如图1-11面心立方晶格,  $(111)$ 晶面上原子密度最大(图c), 每个原子周围有六个原子与其相切;  $(100)$ 面(图a)次之;  $(110)$ 面(图b)密度最小。

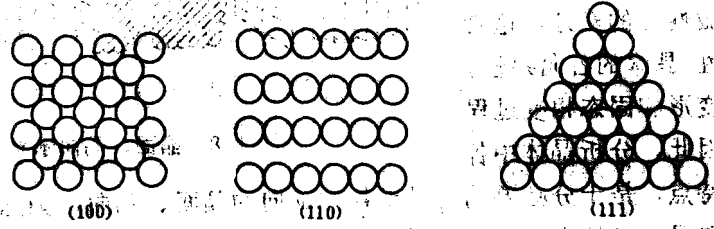


图 1-11 面心立方晶格中三种晶面上原子排列密度示意图  
(a) (100)晶面; (b) (110)晶面; (c) (111)晶面

### (二) 晶向指数

晶体中的晶向可以用矢量的方向表示。矢量的方向由矢量箭头坐标位置和箭尾的坐标位置来确定。具体方法如下:

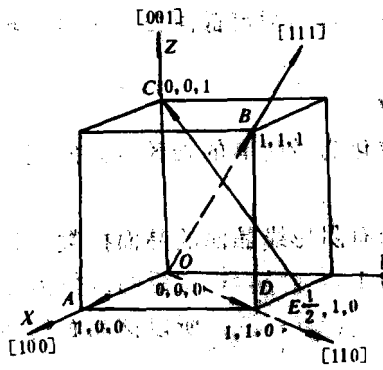


图 1-12 晶向指数确定法

(1) 选取坐标系, 在晶胞内作出待定向的矢量;

(2) 求出矢量箭头坐标值与箭尾坐标值的差数;

(3) 将此差数化为最简单的整数, 去掉标点, 加上方括号, 即为所求晶向的晶向指数。

例如, 确定图1-12中OA、OB、OC三个晶向的晶向指数:

(1) 箭头坐标1, 0, 0; 箭尾坐标0, 0, 0;

(2) 箭头坐标与箭尾坐标之差为:  $1-0, 0-0, 0-0=1, 0, 0$ ;

(3) 晶向OA的晶向指数即为  $[100]$ 。

晶向 $OB$ ：箭头坐标  $1, 1, 1$ ；箭尾坐标  $0, 0, 0$ ；二者之差为： $1-0, 1-0, 1-0=1, 1, 1$ ；所以， $OB$ 的晶向指数为  $[111]$ 。

晶向 $EC$ ：箭头坐标  $0, 0, 1$ ；箭尾坐标  $\frac{1}{2}, 1, 0$ ；二者之差为： $0-\frac{1}{2}, 0-1, 1-0=-\frac{1}{2}, -1, 1$ ；化为最简整数，即  $2 \times (-\frac{1}{2}, -1, 1) = -1, -2, 2$ 。所以， $EC$ 的晶向指数即为  $[\bar{1}\bar{2}2]$ 。

图1-12中 $OD$ 的晶向指数为  $[110]$ 。

晶向指数的一般表达形式为  $[uvw]$ 。

同一晶向指数，表示所有相互平行，方向一致的晶向；指数的绝对值相同，符号相反，则表示相互平行，方向相反的晶向，如  $[\bar{1}\bar{2}2]$  和  $[122]$ 。绝对值相等的各组晶向归纳为一个晶向族，用尖括号  $\langle uvw \rangle$  表示。例如立方晶格中的  $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$  和  $[\bar{1}00]$ 、 $[0\bar{1}0]$ 、 $[00\bar{1}]$  为一个晶向族，以  $\langle 100 \rangle$  表示。不同的晶向，原子排列情况不同。在面心立方晶格中， $[110]$ 晶向上原子密度最大， $[100]$ 次之， $[111]$ 最小。另外，由于立方晶格的对称关系，指数相同的晶面与晶向相互垂直。例如  $(11\bar{1})$  与  $[111]$  相互垂直。

#### 四、金属的同素异构现象

某些金属（如铁、钴、钛、锰、锆、锡等），在固态下不同温度（或压力）时，具有不同的晶体结构。金属的这种性质，称为同素异构现象。当外界条件改变时，金属从一种晶体结构转变为另一种晶体结构的过程，称为同素异构转变。由于同素异构转变所得到的不同晶格类型的晶体，称为同素异构体。

铁在固态下发生两次同素异构转变，形成三种同素异构体。纯铁的冷却曲线及晶体结构的变化如图1-13所示。温度在  $912^\circ\text{C}$  以下时，具有体心立方晶格，称为  $\alpha\text{-Fe}$ ；在  $912^\circ\text{C}$  至  $1394^\circ\text{C}$  之间时，具有面心立方晶格，称为  $\gamma\text{-Fe}$ ； $1394^\circ\text{C}$  以上时，又转变为体心立方晶格，称为  $\delta\text{-Fe}$ 。由于不同的晶体结构，原子排列的方式和密度不同，因此，金属发生同素异构转变时，也会引起某些物理的和机械性能的突然变化。图1-14为纯铁加热时的膨胀曲线。由于

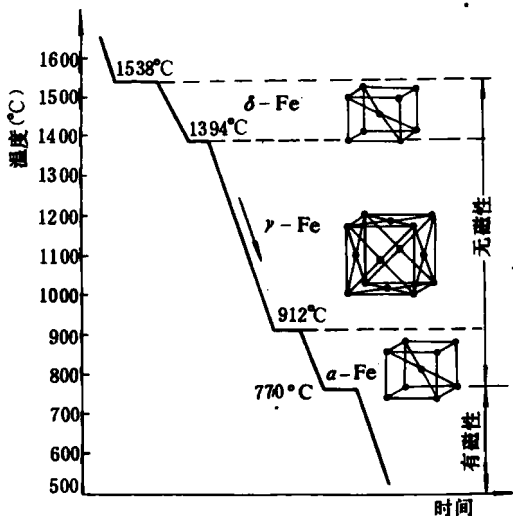


图 1-13 纯铁的冷却曲线及晶体结构

$\gamma\text{-Fe}$ 的比容比  $\alpha\text{-Fe}$ 小，所以，当加热到  $912^\circ\text{C}$  时，体积突然收缩，说明由  $\alpha\text{-Fe}$  变成  $\gamma\text{-Fe}$ 。继续加热到  $1394^\circ\text{C}$  时，由  $\gamma\text{-Fe}$  变为  $\delta\text{-Fe}$ ，体积膨胀。 $912^\circ\text{C}$  和  $1394^\circ\text{C}$  为铁的同素异构转变温度。

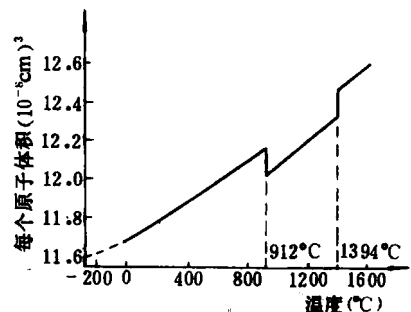


图 1-14 纯铁的热膨胀曲线



### 第三节 实际金属的晶体结构

#### 一、单晶体与多晶体

晶体中原子排列规律相同，晶格位向一致的晶体，称为单晶体。单晶体金属较少用作结构材料。工程上所使用的金属材料，几乎都是多晶体结构。

将一小块纯铁的表面磨平抛光，再用硝酸酒精溶液稍加腐蚀，而后放在金相显微镜下观察，便能看到如图1-15(a)所示的结构，即纯铁是由许多外形不规则的小颗粒所组成。这些小颗粒，称为晶粒。在晶粒内部，晶格位向基本一致，相邻晶粒晶格位向存在一定差异，晶粒与晶粒之间的界面，称为晶粒间界，简称晶界，它是不同位向晶粒之间的过渡区。实际金属就是由许多晶格位向不同的晶粒所组成，称为多晶体结构。在显微镜下所看到的金属内部的情景，称为显微组织或称为金相组织。它表征金属内部各晶粒的形状、大小和分布。图1-15是纯铁的内部结构示意图，图(a)为金相显微组织，图(b)为晶体结构，图(c)为晶格，图(d)为晶胞。

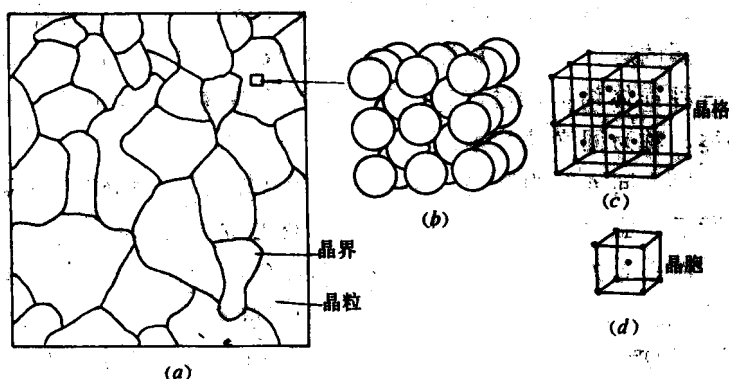


图 1-15 纯铁的内部结构示意图

(a)显微组织；(b)晶体结构；(c)晶格；(d)晶胞

单晶体物质呈现各向异性，而多晶体物质各个方向的性能基本相同，称为伪各向同性。例如，实验测得单晶体 $\alpha$ 铁的弹性模量 $E$ 在 $[111]$ 方向上为 $290000\text{MN/m}^2$ ，在 $[100]$ 方向上为 $135000\text{MN/m}^2$ ；然而，实际工业纯铁的弹性模量在任何方向上均为 $210000\text{MN/m}^2$ 。

#### 二、实际金属中的晶体缺陷

在晶体中，晶格的每一个结点上都占据一个原子，其他间隙处都没有原子。原子排列规则整齐，这种晶体称为理想晶体。然而，在实际晶体中，由于原子热振动，杂质原子的掺入，以及其他外界因素的影响，原子排列并非那样完整无缺，而是存在着各种各样的、偏离规则排列的不完整区域。通常，称这些不完整区域为晶体缺陷。晶体缺陷对金属的性能会产生很大影响。

按照晶体缺陷的几何特征，把它们分为三类，即点缺陷、线缺陷和面缺陷。