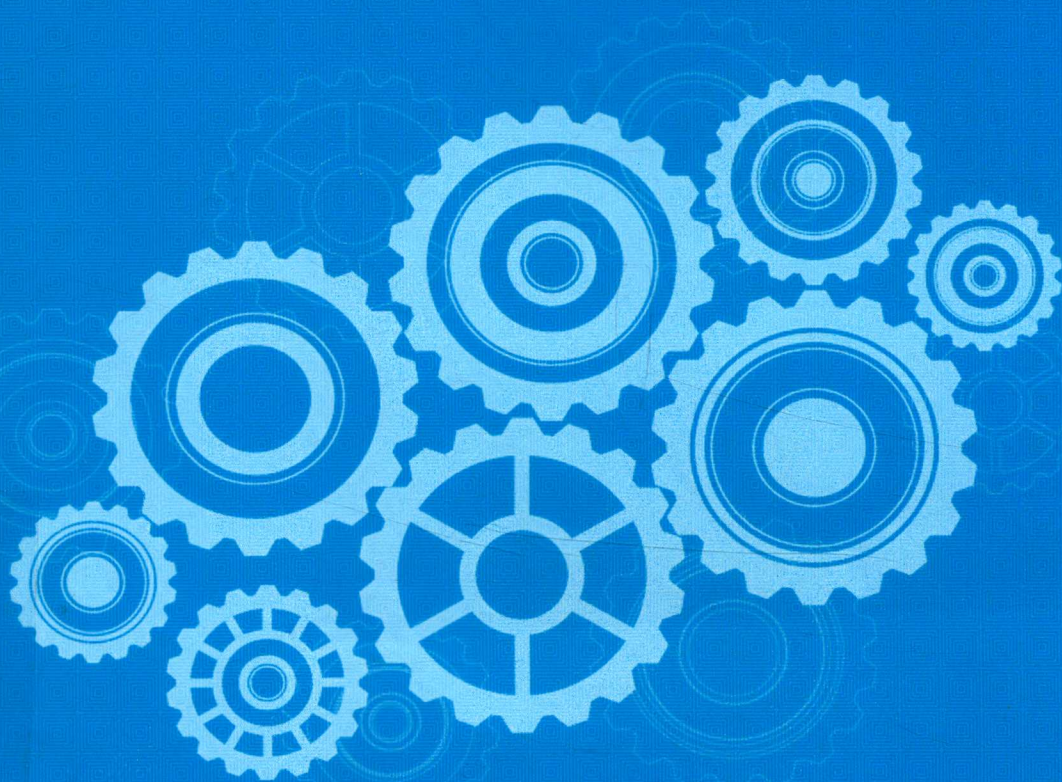


机械制造与自动化应用研究

雷子山 曹伟 刘晓超 著



机械制造与自动化应用研究

雷子山 曹 伟 刘晓超 著



九州出版社
JIUZHOU PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

机械制造与自动化应用研究 / 雷子山, 曹伟, 刘晓超著. — 北京: 九州出版社, 2017. 10
ISBN 978-7-5108-6264-9

I. ①机… II. ①雷… ②曹… ③刘… III. ①机械制造—自动化技术—研究 IV. ①TH164

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 259505 号

机械制造与自动化应用研究

作 者: 雷子山 曹 伟 刘晓超 著

出版发行: 九州出版社

地 址: 北京市西城区阜外大街甲 35 号 (100037)

发行电话: (010)68992190/3/5/6

网 址: www.jiuzhoupress.com

电子信箱: jiuzhou@jiuzhoupress.com

印 刷: 北京朗翔印刷有限公司

开 本: 710 毫米×1000 毫米 16 开

印 张: 28.5

字 数: 450 千字

版 次: 2018 年 6 月第 1 版

印 次: 2018 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5108-6264-9

定 价: 98.00 元

★版权所有 侵权必究★

前言

为了适应 21 世纪高级工程技术人才培养的要求以及深化改革高等工程教育课程体系,近几年来,我们对机械制造基础课进行了一系列的教学研究、探索和实践,积累了一些经验和成果,因此编写了这本书。

制造自动化是人类在长期的生产生活中不断追求的主要目标之一。制造自动化的概念最早由美国人 D.S.Harder 于 1936 年提出,其内容仅仅包括制造过程搬运自动化。在经历了一段时间的研究和发展之后,制造自动化实现了从毛坯投入生产到产品零件全过程的自动化。进 30 年来,随着可持续技术的不断进步,尤其是制造技术、计算机技术、控制技术、信息技术和管理技术的发展,制造自动化技术的内容也在不断地丰富和完善,它不仅包括传统意义上的加工过程自动化,而且还包括对制造全过程的运行规划、管理、控制与协调化等自动化。

机械制造自动化技术是一门跨学科的内容体系,它不仅包括机械领域的设计和制造内容,而且还包括控制、检测、管理和信息处理等方面的内容,同时机械制造自动化技术又是一门不断发展的学科。因此,本书在内容的编排上,既注重与工程应用相结合,又注重与当前科技发展的前沿相结合,着力做到各章节内容的独立与相互衔接,以利于读者了解和掌握其基本概念和应用常识,逐步培养学生解决工程实际问题的能力。

本书共二十一章,合计 45 万字。由来自广州市技师学院的雷子山担任第一主编,负责第一章至第二章、第六章至第九章的内容,合计 15 万字以上。由来自河南工业和信息化职业学院的曹伟担任第二主编,负责第十章至第十五章的内容,合计 10 万字以上。由来自河南工业和信息化职业学院的刘晓超担任第三主编,负责第十六章至第二十一章的内容,合计 12 万字以上。由来自山西运城民星机械设备有限公司的张荣臻担任副主编,负责第三章至第五章的内容,合计 3 万字以上。

本书作为高等工科院校机械类、机电类及近机类专业教材,也供有关工程技术人员参考。由于编者水平有限,书中难免有欠妥之处,敬请读者指正。

目 录

第一章 工程材料基础.....	1
第一节 金属材料的性能	2
第二节 金属和合金的晶体结构与结晶	5
第三节 铁碳合金.....	17
第四节 钢的热处理基本知识	22
第五节 常用金属材料	31
第六节 非金属材料	64
第七节 新型材料.....	70
第二章 铸造成型	75
第一节 概述	75
第二节 铸造成型工艺基础.....	76
第三节 铁碳合金.....	92
第四节 铸造工艺设计	94
第五节 铸件结构工艺性	98
第六节 特种铸造.....	101
第七节 铸造新技术	106
第三章 锻压成形	108
第一节 概述	108
第二节 金属的塑性变形	110
第三节 锻造	114
第四节 板料冲压.....	116
第五节 锻压件的结构工艺性	121
第六节 锻压新技术.....	123
第四章 焊接成形	127
第一节 概述	127
第二节 手工电弧焊	128
第三节 其他常用焊接方法.....	131
第四节 常用金属材料的焊接	136
第五节 焊接结构设计	139
第六节 焊接新技术	141
第五章 非金属材料成型	144
第一节 塑料成型.....	144

第二节 橡胶成型.....	147
第三节 陶瓷成型.....	148
第四节 复合材料成型.....	150
第六章 金属切削过程及控制	153
第一节 切削运动与切削要素.....	153
第二节 刀具的几何参数	156
第三节 刀具材料.....	158
第四节 金属切削机床的基本知识	160
第五节 金属切削过程	162
第六节 金属切削过程的主要物理现象及规律.....	163
第七节 影响金属切削加工的主要因素.....	165
第八节 磨削过程及磨削机理.....	168
第七章 典型表面加工工艺	171
第一节 平面加工.....	171
第二节 外圆加工.....	174
第三节 内圆加工.....	178
第四节 螺纹加工.....	181
第五节 齿形加工.....	184
第六节 成形表面加工	187
第八章 精密与超精密加工	189
第一节 精密和超精密切削加工	189
第二节 精密和超精密磨削加工	191
第三节 精密和超精密加工的特点及发展	195
第九章 特种加工	198
第一节 概述	198
第二节 电火花及线切割加工	199
第三节 电解加工.....	203
第四节 超声波加工	205
第五节 其他特种加工	206
第十章 数控加工	212
第一节 概述	212
第二节 数控加工程序	216
第十一章 机械加工质量分析及其控制	221
第一节 概述	221

第二节 影响加工精度的因素	223
第三节 加工误差的统计分析	232
第四节 机械加工表面质量	237
第五节 提高机械加工质量的途径与方法	245
第十二章 机械加工工艺规程设计	249
第一节 概述	249
第二节 机械加工工艺规程编制准备工作	253
第三节 机械加工工艺路线的拟定	255
第四节 工序设定	261
第五节 工艺方案的技术经济分析	266
第六节 提高机械加工生产率的工艺措施	269
第十三章 机器装配工艺基础	272
第一节 装配工作的基本内容	272
第二节 装配工艺的规程制定	275
第三节 机器结构的装配工艺性	278
第四节 装配尺寸链	280
第五节 保证装配精度的装配方法	282
第十四章 机械制造新技术	286
第一节 现代机械制造技术的发展	286
第二节 机械制造系统自动化	292
第三节 计算辅助制造	297
第四节 先进生产模式	301
第五节 快速成形	309
第十五章 机械制造自动化	312
第一节 机械制造自动化的基本概念	312
第二节 机械制造自动化的内容和意义	315
第三节 机械制造自动化的途径	317
第四节 机械制造自动化的构成	320
第五节 机械制造自动化的现状及发展	326
第十六章 自动化制造系统技术方案	332
第一节 自动化制造系统技术方案的制定	332
第二节 自动化加工工艺方案设计的主要问题	335
第三节 工艺方案的技术经济分析	339
第四节 自动化加工设备的选择与布局	342

第十七章 自动化加工设备	345
第一节 加工设备自动化的意义及分类	345
第二节 自动化加工设备的特殊要求及实现方法	348
第三节 单机自动化方案	355
第四节 数控机床加工中心	358
第五节 机械加工自动化生产线	366
第六节 柔性制造单元	369
第七节 柔性制造系统	372
第八节 自动线的辅助设备	378
第十八章 物料供输自动化	383
第一节 概述	383
第二节 刚性自动化的无聊储运系统	385
第三节 自动线输送系统	386
第十九章 自动化加工刀具	390
第一节 自动化刀具的特点、类型及调整	390
第二节 自动化刀具的换刀装置	395
第三节 排屑自动化	398
第二十章 检测过程自动化	404
第一节 概述	404
第二节 工件加工尺寸的自动测量	409
第三节 刀具磨损的检测与监控	416
第二十一章 装配过程自动化	421
第一节 概述	421
第二节 自动装配工艺过程分析和设计	427
第三节 自动装配机的部件	434
第四节 自动装配机械	436
第五节 自动装配线	439
第六节 柔性装配系统	440
第七节 微型机器人装配系统	442
参考文献	446

第一章 工程材料基础

用于制造工程结构、机械零件和工具等的固体材料，统称为工程材料（engineering material）。

材料是现代文明的三大支柱之一，也是发展国民经济和机械工业的重要物质基础。20 世纪前半叶，应用于机械、航空、建筑等领域的工程材料，均是基于应力、应变为代表的 $3\text{m} \sim 10\text{m}$ 以上的宏观材料，材料科学发展比较缓慢。20 世纪 50 年代后，固体物理学的发展与冶金科学的结合，形成了新的材料科学。到了 20 世纪 70 年代，又发展为“材料科学与工程”的新兴学科，材料工程进入了宏观与微观共同发展的新时期。1984 年，德国科学家 H. Gleiter 制成了第一块纳米材料——纳米微晶体块。IBM 前首席科学家 John Armstrong 指出：“我相信纳米科学和技术将会是下一个信息时代中心，就像在 20 世纪 70 年代的微米引起的革命一样。”纳米科学和技术将会改变人造物体的特性，这种材料技术的巨大进步和生产范例的改变将产生工业革命。

进入 21 世纪，材料科学蓬勃发展，新材料、新技术层出不穷，极大地推动了科学技术和国民经济的发展。适当地了解现代材料的发展方向对于工科学生具有极其重要的意义。

工程材料包括金属材料（metallic materials）和非金属材料（non-metallic material）两大类，金属材料可分为黑色金属和有色金属两大类，黑色金属（ferrous metal）材料又有钢和铸铁之分，除了黑色金属以外的其他金属材料统称为有色金属（non-ferrous metal）。由于金属材料具有优良的使用性能和工艺性能，所以它不仅是传统的工程材料，而且目前仍然是最重要的工程材料。非金属材料包括高分子材料、陶瓷材料和复合材料等。随着科学技术的进步，非金属材料的发展异常迅速，尤其是塑料工业更引人注目，且已在国民经济各部门中代替部分金属，特别是代替有色金属和其他贵重金属制造各种零部件。科学家们预言：人类未来的时代将是人工合成材料和复合材料的新时代。所以，本章在着重介绍金属材料基本知识的同时，也对工程用非金属材料以及以纳米材料为代表的新型材料作一些介绍，以求对它们有所认识 and 了解。

第一节 金属材料的性能

金属材料的性能 (property) 分为使用性能和工艺性能。材料在使用过程中适应或抵抗各种外界作用 (机械力、化学作用、辐射、温度、电磁场等) 的能力叫做使用性能。使用性能包括物理性能、化学性能和力学性能 (亦称“机械性能”)。材料适应实际生产工艺要求的能力叫做工艺性能 (亦称“加工性能”)。

一、金属的力学性能

金属的力学性能 (mechanical properties) 是指金属材料在不同环境因素 (温度、介质) 下, 承受外加载荷作用时所表现的行为, 这种行为通常表现为金属的变形和断裂。因此, 金属的力学性能可以理解为金属材料抵抗外加载荷引起的变形和断裂的能力。金属的力学性能包括弹性、刚度、塑性、强度、硬度、韧性等, 这是设计零件时选用金属材料的主要依据。

(一) 弹性与刚度

1. 弹性

金属材料受外力作用时产生变形, 当外力去掉后恢复成原来形状而不产生永久变形的能力, 称为弹性 (elasticity)。其大小用弹性极限 σ_e 表示, 单位为 MPa。弹性极限是金属材料不产生变形时所能承受的最大应力。对于在工作中不允许任何塑性变形的零件, 设计时, 弹性极限就成为该类零件选材的重要依据, 如弹簧须选用弹性限高的材料。

2. 刚度

大多数机械零件在工作过程中是处于弹性状态的, 为防止发生弹性变形失效, 不允许零件有过多的弹性变形。零件抵抗弹性变形的能力, 称为刚度 (rigidity)。工程上常用弹性模数 E 作为衡量材料刚度的指标, E 愈大, 刚度愈好。当材料选定 (即 E 一定) 后, 提高零件刚度的方法只有增加零件的横截面积了。

(二) 塑性

在外力作用下材料产生永久变形而不发生破坏的能力, 称为塑性 (plasticity), 常用指标是延伸率 δ (%) 和断面收缩率 ψ (%)。 δ 和 ψ 愈大, 材料塑性愈好。塑性好的金属材料容易进行锻压、焊接, 能够采用冷变形, 如冷冲压等。好的塑性亦可避免机器零件在使用中万一超载而产生的突然断

裂。

（三）强度

强度(strength)是金属材料在外力作用下,抵抗产生塑性变形或断裂的能力,分为抗拉强度 σ_b 、屈服点(屈服强度) σ_s 、抗压强度 σ_{bc} 、抗弯强度 σ_{bb} 、抗剪强度 σ_t ,单位均为MPa。其中抗拉强度和屈服点是选材的重要依据。机械设计时必须保证零(构)件的最大工作应力不得超过材料的抗拉强度,以免断裂。在汽车、拖拉机的缸盖螺栓选材时,为保证汽缸体与缸盖间的气密性,螺栓不允许产生塑性变形,所选材料的屈服点应不小于其最大的工作应力。

（四）硬度

硬度(hardness)是金属材料抵抗比它更硬的物体压入其表面的能力,也可以说是金属材料对局部塑性变形的抗力,是衡量材料软硬程度的指标。在一般情况下,金属材料的硬度愈高,耐磨性能愈好,而且硬度与强度之间有一定的关系,根据硬度的大小可以大致估算材料的抗拉强度。因此,硬度是金属材料最重要的性能之一。

金属材料的硬度指标是在硬度机上测定的。生产中硬度测定方法有压入硬度实验法(如布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度)、划痕硬度实验法(如莫氏硬度)、回跳硬度法(肖氏硬度)等。其中布氏硬度(HBS、HBW)、洛氏硬度(HR)、维氏硬度(HV)最常用。

（五）冲击韧度

许多机械零件,如活塞销、连杆、锤杆、冲模等在工作中往往要承受冲击载荷的作用,因此在选材时,还必须考虑材料抵抗冲击载荷的能力。金属材料抵抗冲击载荷的能力称为冲击韧度(impact toughness)。目前是以大能量一次冲击值 α_{ku} 、 α_{kv} 作为指标。

冲击韧度是相对指标,其值愈大,材料的韧度愈好,许多国家直接用冲击吸收功 A_k 作为冲击韧度指标,中国也将逐步用 A_k 取代。

工程上承受冲击载荷的机械零件,很少是因一次大能量冲击而遭破坏的,绝大多数是经千百万次小能量多次重复冲击破坏的。因此,用来表示材料的冲击抗力是不符合实际的,一般只作为选材的参考,而不适用于强度计算。

（六）疲劳强度

金属材料在无数次重复交变载荷作用下不发生断裂的最大应力,称为疲

疲劳强度 (fatigue strength)。对称弯曲疲劳强度以 σ_{-1} 表示。

实际上不可能进行无数次试验, 故工程上采用的疲劳强度是指材料在一定的应力循环次数下不发生断裂的最大应力。对钢材而言, 如应力循环次数达 10^7 次仍不发生疲劳断裂, 就认为不会再发生疲劳断裂。有色金属和某些超高强度钢的应力循环基数则常取 10^8 次。

为了提高零件的疲劳强度, 一方面在设计零件时应使零件具有合理的结构形状, 避免产生应力集中; 另一方面要设法提高零件表面的加工质量或采用表面强化的方法, 如表面淬火、化学热处理、喷丸处理和滚压等, 以减小产生微裂纹的倾向。

二、金属的其他性能

(一) 金属的物理性能和化学性能

在机械制作中, 绝大多数机械零件都是以力学性能作为设计计算和选材的主要依据, 但有些机械设备除要求应具备一定的力学性能外, 还要求具备某些特殊的物理性能或化学性能。例如, 飞机零件要选用相对质量分数小的铝合金; 导电元件则要采用导电性好的铜或铜合金; 内燃机的排气门应选用耐热性好的材料; 某些化工设备零件则要求耐腐蚀性好的材料; 等等。

金属材料的主要物理性能 (physical properties) 有相对质量分数、熔点、热膨胀系数、导热性和导电性等。所谓化学性能 (chemical properties) 是金属材料在常温或高温时抵抗各种化学介质作用的能力, 如耐蚀性和耐热性等。

金属材料的物理性能、化学性能对热加工工艺也有一定的影响。例如, 高速钢的导热性较差, 锻造和热处理时都必须用较低的加热速度, 否则会产生裂纹。又如, 铸钢和铸铁因熔点的不同, 其熔炼和浇注工艺也不同。

(二) 金属材料的工艺性能

金属材料的工艺性能 (technological properties) 是保证易于高速地、经济地获得优质制件的必要条件, 它是金属的物理、化学和力学性能的综合。按工艺方法的不同可分为铸造性能、可锻性、弯曲性、可焊性、切削加工性等。材料的工艺性能将在第二章后的有关章节中分别介绍。

第二节 金属和合金的晶体结构与结晶

金属材料包括纯金属和合金，在一般情况下，纯金属和合金（alloy）都是晶体（crystal）。纯金属虽具有良好的导电性、导热性、塑性等优点，但因其提纯困难，价格昂贵，力学性能较低，满足不了工程技术上高强度、高硬度、耐磨性、耐热性和耐腐蚀性等各种性能的要求，因而工程上使用的大多是合金。

纯金属和合金通过结晶得到的晶体结构决定了金属材料的性能。

一、纯金属的晶体结构与结晶

（一）纯金属的晶体结构

1. 晶格与晶格常数

纯金属的性能不仅取决于原子的本性和原子间结合键的类型，同时也取决于原子规则排列的方式。为了分析晶体内部原子排列的规律，人们将构成晶体的实际质点忽略，而将它们抽象成纯粹的几何点，称之为阵点。这些阵点在三维空间呈周期性规则排列，并且有等同的周围环境的模型称为晶体点阵，亦称为晶格（crystal lattice），见图 1-1。

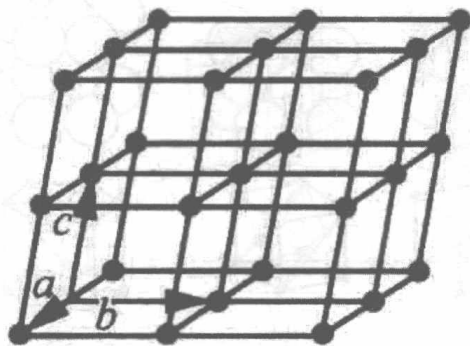


图 1-1 晶体点阵示意图

在晶体点阵中取一单位体积（通常为六面体）作为点阵的最小组成单元，称为晶胞，见图 1-2。晶胞的大小和形状以晶胞的棱边长 a 、 b 、 c 和棱边之间的夹角 α 、 β 、 γ 来表示。其中，棱边的边长 a 、 b 、 c 称为晶格常数（lattice constant）。

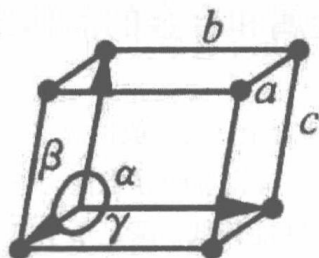


图 1-2 晶胞示意图

2. 晶格类型

最常见的金属晶体结构有三种，即体心立方晶格、面心立方晶格、密排六方晶格。（见图 1-3）

属于体心立方晶格（body-centered cubic lattice）的金属有铬、钨、钼、钒及 α -铁（温度在 912°C 以下的纯铁）等；属于面心立方晶格（face-centered cubic lattice）的金属有铝、铜、镍及 γ -铁（温度在 $912^{\circ}\text{C} \sim 1394^{\circ}\text{C}$ 的纯铁）等；属于密排六方晶格（hexagonal close packed lattice）的金属有镁、锌、铍、铬等。

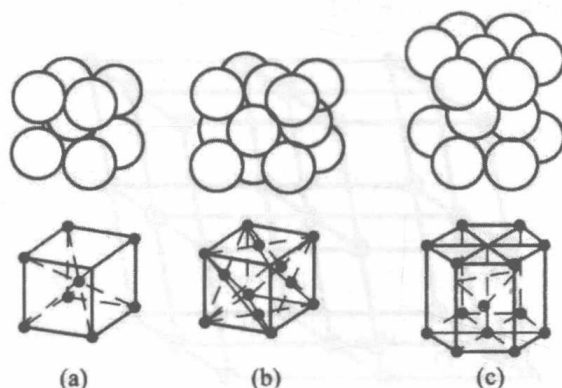


图 1-3 常见金属晶体的晶胞

(a)体心立方 (b)面心立方 (c)密排六方

3. 实际金属结构

实际金属结构都包含着许多小晶体，每个小晶体内的晶格方位是一致的，而小晶体之间彼此方位不同。由于每个小晶体都具有不规则的颗粒外形，故称为晶粒（grain）；晶粒之间的界面叫作晶界（grain boundary）。由于晶界是两相邻晶粒不同晶格方位的过渡区，所以在晶界上原子排列总是不规则的。这种由多晶粒组成的晶体结构称为多晶体（poly crystal）。钢铁材料的晶粒尺寸一

一般为 $10^{-3}\text{mm}\sim 10^{-1}\text{mm}$ 左右, 所以必须在显微镜下才能观察到, 因此也叫显微组织 (microscopic structure)。有色金属的晶粒一般都比较粗大, 有时肉眼可以看见。

在实际晶体中, 或多或少存在偏离理想结构的区域, 称为晶体缺陷 (crystal defect)。晶体缺陷对金属的许多性能有极重要的影响, 与晶体的凝固、固态相变、扩散的过程都有重大关系, 特别是对塑性变形、强度和断裂等方面起着决定性的作用。

在晶体中, 缺陷并不是静止地、稳定不变地存在着, 而是随着各种条件的改变而不断地变动着, 它们可以产生、发展、运动和交互作用, 有时则会合并或消失。

晶体缺陷按几何形状可分为点缺陷 (point defect) (晶格空位、间隙原子和置换原子, 见图 1-4)、线缺陷 (line defect) (晶体中呈线性分布的位错, 图 1-5 为刃型位错) 和面缺陷 (plane defect) (晶界、亚晶界, 见图 1-6) 三类。

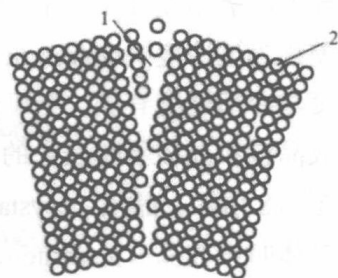
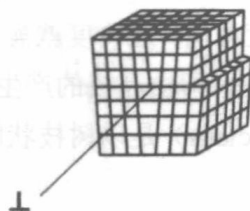
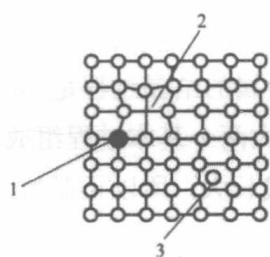


图 1-4 点缺陷示意图

图 1-5 刃型位错结构示意图

图 1-6 晶界、亚晶界示意图

1. 置换原子 2. 空位 3. 间隙原子

1. 晶界 2. 亚晶界

所有这些缺陷都将导致周围的晶格发生晶格明显的畸变, 从而对金属的力学性能、化学性能产生明显的影响。

(二) 纯金属的结晶

1. 金属结晶过程

金属溶液在凝固后一般都以晶态存在, 即内部原子由不规则的排列转变到规则排列。形成晶体的过程, 称为结晶 (crystalline fracture)。结晶形成的组织, 直接影响金属内部的组织与性能。

金属在结晶过程中, 其结晶温度可以用热分析法测定。将液态金属放在炉

中缓慢冷却，在冷却过程中测得温度随时间变化的数据，则得到如图 1-7 所示的冷却曲线 1。由于结晶时放出潜热，补偿了冷却散失的热量，所以冷却曲线出现水平台阶，即结晶在恒温下进行。在无限缓慢冷却条件下的平衡结晶温度 T_0 称为理论结晶温度。

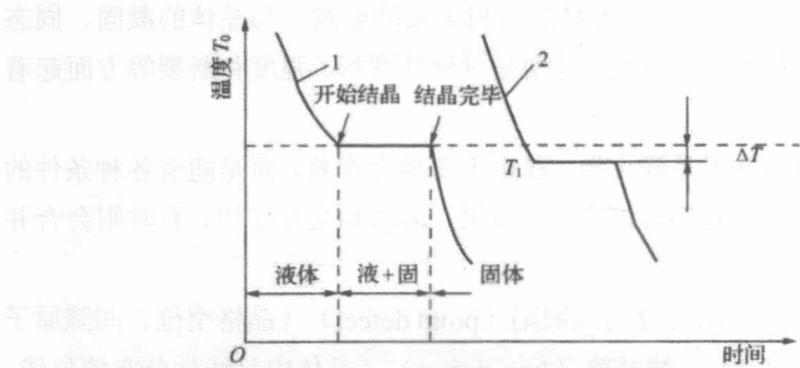


图 1-7 纯金属结晶时的冷却曲线

在实际结晶时，冷却速度不可能无限缓慢，因此实际结晶温度 T_1 总是低于理论结晶温度 T_0 ，如图 1-7 中曲线 2 所示。理论结晶温度与实际结晶温度之差称为过冷度（degree of under cooling），即 $T_0 - T_1 = \Delta T$ 。金属结晶的过冷度与冷却速度有关，冷却速度愈快，过冷度就愈大。金属的结晶过程是不断形成晶核和晶核不断长大的过程，即由晶核的产生和长大两个基本过程组成，如图 1-8 所示。晶核（crystal nucleus）是以树枝状的方式长大，所以正在长大的晶体叫作枝晶（dendrite）。

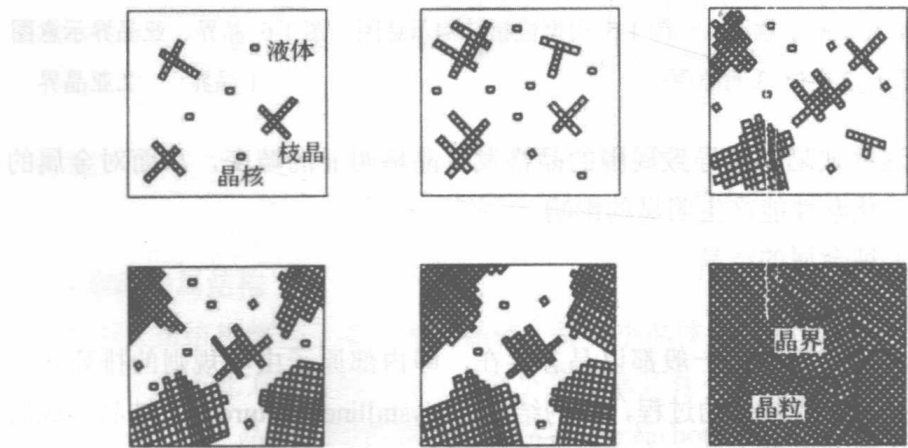


图 1-8 纯金属结晶过程示意图

2. 铸态晶粒的大小

金属结晶后的晶粒愈细小,晶界的面积就愈大。晶界面积愈大,晶体缺陷就愈多,则对金属力学性能影响愈大。一般情况下,细晶粒组织的强度、硬度、塑性和韧性都比粗晶粒组织好。获得细晶粒的方法通常是增加过冷度、变质处理、附加振动及电磁场控制等。

3. 金属的同素异构转变

某些金属在不同温度和应力下呈不同的晶体结构,同一种固态的纯金属(或其他单相物质),在加热或冷却时发生由一种稳定状态转变成另一种晶体结构不同的稳定状态的现象,称为同素异构转变(allomorphism)。此时除体积变化和热效应外,还会发生其他性质改变。例如 Fe、Co、Sn、Mn 等元素都具有同素异构特性。

铁在结晶后继续冷却至室温的过程中,将发生两次晶格转变,其转变过程如图 1-9 所示。铁在 1394°C 以上时具有体心立方晶格,称为 $\delta\text{-Fe}$;冷却至 $912^{\circ}\text{C}\sim 1394^{\circ}\text{C}$ 之间,转变为面心立方晶格,称为 $\gamma\text{-Fe}$;继续冷却至 912°C 以下,又转变为体心立方晶格,称为 $\alpha\text{-Fe}$ 。

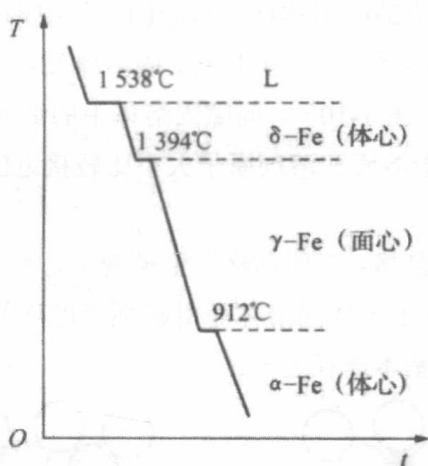


图 1-9 纯铁的同素异构转变

金属的同素异构转变与液态金属的结晶过程类似。转变时遵循结晶的一般规律,如具有一定的转变温度,转变过程包括形核、长大两个阶段等。因此,同素异构转变也可以看作是一种结晶,有时也称为重结晶。通过同素异构转变可以使晶粒得到细化。

二、二元合金的晶体结构与结晶

(一) 二元合金的晶体结构