

高等学校教材

# 热加工工艺基础

(工程材料及机械制造基础II)

任福东 主编

机械工业出版社

高等学校教材

ND21/29  
热加工工艺基础

(工程材料及机械制造基础Ⅱ)

主 编 任福东

副主编 詹 武 陈万卿

参 编 (按章节顺序)

闫爱淑 刘明庚 张存五

郑连义 贺爱军 杨剑秋

主 审



394489



机械工业出版社

## 前 言

工程材料及机械制造基础和“金工实习”是高等工业学校机械类专业必修的技术基础课，是研究零件制造工艺方法的综合技术性学科。它主要研究工程材料的性能及其对加工工艺方法的影响，各种工艺方法本身的规律性及其相互联系与比较，各种加工方法的加工工艺过程和结构工艺性。

根据国家教委高等教育司1995年颁布的高等工科院校“工程材料及机械制造基础课程基本要求”和“金工实习教学基本要求”，我们组织了有关高校长期工作在本学科教学第一线、有丰富教学经验的教师成立了教材编写组，在集体讨论的基础上，分工编写了《工程材料》、《热加工工艺基础》、《机械加工工艺基础》、《金工实习》一套系列教学用书。

《热加工工艺基础》是根据对该课程的基本要求，结合机械类各专业的实际需要，并适应高新技术的发展，本着理论与实践结合、工艺与原理结合的原则，系统阐述各种热加工工艺方法、特点、规律性、应用及结构工艺性，以服务于后续课程和生产实践。本书主要内容有：金属材料及热处理、铸造、锻压、焊接、毛坯选择、塑料的成型和加工、粘接技术等。

本教材具有下列特点：

1. 力求符合高等工科院校对本课程的实际需要，做到内容充实、重点突出、着眼实践，为教学和生产服务。各篇自成体系，适应性强，主要使用对象是机械类各专业的学生，同时也适用于各类相关专业的学生。

2. 将毛坯选择单列一章，使各种热加工工艺与毛坯选择融为一体。可根据毛坯选择原则及对各种热加工工艺特点的了解，为正确选择毛坯材料打下基础。

3. 增设了非金属材料的成型与加工一篇。主要介绍塑料的成型方法与加工和粘接技术，以便在更大范围内选择所用材料和采用更有效的加工方法，以更好地完成产品的制造。

4. 在科学技术飞速发展的今天，对各种加工方法所用的新工艺、新技术给以高度重视，每篇都有相关内容的介绍，使学生了解其发展趋势。

参加本书的编写人员有：（按章节顺序）任福东（内容提要、前言、绪论、第二、四、八、二十二、二十三章）；闫爱淑（第一、三章）；刘明庚（第五章一、二、三节，第十一章）；陈万卿（第五章四节、第六、七、十、十七章）；张存五（第九章）；郑连义（第十二章）；贺爱军（第十三、十四章）；杨剑秋（第十五、十六、十九、二十章）；詹武（第十八、二十一章）。

全书由天津理工学院任福东主编，詹武、陈万卿副主编。天津大学徐允长教授主审。

本书在编写过程中参考了有关的教材、专著、资料，并得到众多同志的支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中难免有错误和不足之处，敬请广大读者批评指正。

编 者  
1996年12月

# 目 录

前言  
绪论

## 第一篇 金属材料及热处理

<b>第一章 金属材料的主要性能</b> .....	3	<b>第三章 铁碳合金</b> .....	14
第一节 金属材料的力学性能 .....	3	第一节 铁碳合金的基本组织 .....	14
第二节 金属材料的物理和化学性能 .....	7	第二节 铁碳合金相图 .....	15
复习思考题 .....	7	第三节 钢的分类及编号 .....	20
<b>第二章 金属及合金的晶体结构</b> .....	8	复习思考题 .....	22
第一节 金属的晶体结构 .....	8	<b>第四章 钢的热处理</b> .....	23
第二节 合金的结构 .....	11	第一节 普通热处理 .....	24
第三节 合金相图的测定 .....	12	第二节 表面热处理 .....	27
复习思考题 .....	13	复习思考题 .....	28

## 第二篇 铸 造

<b>第五章 砂型铸造</b> .....	29	第三节 铸件壁的设计 .....	82
第一节 铸造的基本工艺过程及其特点 .....	29	第四节 组合铸件的设计 .....	86
第二节 造型方法概述 .....	30	复习思考题 .....	87
第三节 铸造工艺图的绘制 .....	34	<b>第九章 特种铸造</b> .....	89
第四节 典型铸件工艺分析 .....	40	第一节 熔模铸造 .....	89
复习思考题 .....	45	第二节 金属型铸造 .....	92
<b>第六章 合金的铸造性能</b> .....	48	第三节 压力铸造 .....	94
第一节 合金的流动性 .....	48	第四节 离心铸造 .....	97
第二节 合金的收缩 .....	51	第五节 低压铸造 .....	98
复习思考题 .....	60	第六节 各种铸造方法的比较 .....	99
<b>第七章 常用合金铸件的生产</b> .....	61	复习思考题 .....	100
第一节 铸铁件生产 .....	61	<b>第十章 铸造新工艺、新技术简介</b> .....	101
第二节 铸钢件生产 .....	72	第一节 陶瓷型铸造 .....	101
第三节 非铁合金铸件生产 .....	74	第二节 磁型铸造 .....	102
复习思考题 .....	76	第三节 真空吸铸 .....	102
<b>第八章 铸件的结构设计</b> .....	77	第四节 连续铸造 .....	104
第一节 铸件外形的设计 .....	77	第五节 计算机在铸造生产中的应用简介 .....	104
第二节 铸件内腔的设计 .....	81	复习思考题 .....	106

### 第三篇 锻 压

<b>第十一章 金属的塑性变形</b> ..... 107	第二节 弯曲..... 142
第一节 金属塑性变形的机理..... 107	第三节 拉深..... 144
第二节 塑性变形对金属组织和性能的影响..... 109	第四节 其它成形工序..... 148
第三节 金属的可锻性..... 111	第五节 冲模的分类与结构..... 150
复习思考题..... 114	复习思考题..... 152
<b>第十二章 锻造</b> ..... 115	<b>第十四章 锻压新工艺、新技术简介</b> ..... 155
第一节 自由锻造..... 115	第一节 超塑性成形..... 155
第二节 模型锻造..... 121	第二节 粉末锻造..... 157
第三节 胎模锻造..... 132	第三节 计算机技术在锻压中的应用简介..... 158
复习思考题..... 134	复习思考题..... 161
<b>第十三章 冲压</b> ..... 136	
第一节 冲裁..... 136	

### 第四篇 焊 接

<b>第十五章 熔焊</b> ..... 163	确定..... 196
第一节 焊接电弧与电源特性..... 163	第五节 焊缝位置的合理布置..... 199
第二节 焊条..... 166	第六节 焊接结构设计实例..... 201
第三节 熔焊焊接接头..... 168	复习思考题..... 203
第四节 焊接应力与变形..... 170	<b>第十九章 焊接检验</b> ..... 206
第五节 常用熔焊方法简介..... 173	第一节 焊缝常见缺陷..... 206
复习思考题..... 177	第二节 焊接检验过程..... 207
<b>第十六章 压焊与钎焊</b> ..... 178	第三节 焊接接头检验方法..... 207
第一节 压焊..... 178	第四节 常用非破坏检验方法..... 207
第二节 钎焊..... 180	复习思考题..... 208
复习思考题..... 180	<b>第二十章 焊接新技术、新工艺简介</b> ..... 209
<b>第十七章 常用金属材料的焊接</b> ..... 181	第一节 特殊焊接方法简介..... 209
第一节 金属材料的焊接性..... 181	第二节 金属切割新工艺..... 211
第二节 碳钢和合金钢的焊接..... 183	第三节 堆焊与喷涂..... 211
第三节 铸铁的焊补..... 185	第四节 计算机在焊接中的应用..... 212
第四节 有色金属的焊接..... 186	复习思考题..... 213
复习思考题..... 188	<b>第二十一章 毛坯选择</b> ..... 214
<b>第十八章 焊接结构设计</b> ..... 190	第一节 毛坯选择的一般原则..... 214
第一节 焊接结构设计的步骤与内容..... 190	第二节 毛坯的加工方法比较..... 217
第二节 焊接结构材料的选择..... 190	第三节 零件的结构分析及毛坯选择..... 221
第三节 焊接方法的选用..... 191	第四节 毛坯选择实例..... 224
第四节 焊接接头及坡口形式的	复习思考题..... 227

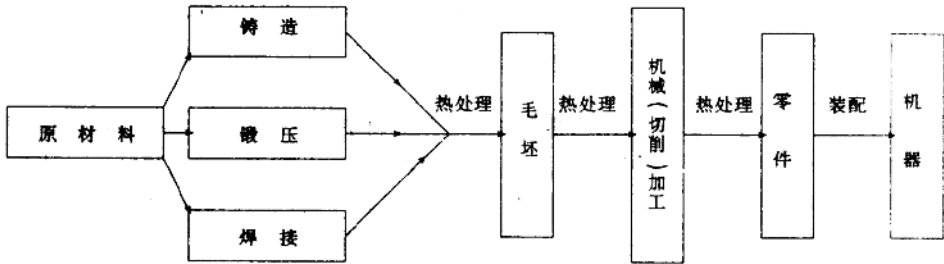
## 第五篇 非金属材料的成型与加工

<b>第二十二章 塑料的成型与加工</b> .....	228	<b>第一节 胶粘剂的组成、分类和</b>	
<b>第一节 塑料的成型</b> .....	228	<b>选用</b> .....	233
<b>第二节 塑料制品的加工</b> .....	231	<b>第二节 胶接工艺</b> .....	236
<b>复习思考题</b> .....	232	<b>复习思考题</b> .....	237
<b>第二十三章 胶接工艺与应用</b> .....	233	<b>参考文献</b> .....	238

## 绪 论

“热加工工艺基础”是“工程材料及机械制造基础”课程的重要组成部分。“工程材料及机械制造基础”是研究机器零件的常用材料和加工方法，即从选择材料、制造毛坯、直到加工出零件的综合性课程。学生在金工实习的基础上，通过对本课程的学习，可获得常用工程材料及零件加工工艺的知识，培养工艺分析的初步能力，并为学习其它有关课程及为以后从事机械设计和加工制造工作奠定必要的基础。

由原材料经各种加工方法制成毛坯，再加工成零件，最后装配成为机器的全过程，一般可由下面框图所示：



从以上框图中可以看出，原材料一般都是通过铸造、锻压和焊接的方法生产出毛坯或半成品，然后经过切削加工后成为零件。通常把前三种加工方法称为热加工工艺，其主要任务是制造毛坯。

“热加工工艺基础”课程就是研究金属材料的性质及铸造、锻压、焊接等热加工工艺的原理、特点、加工的工艺过程、应用情况和结构工艺性。此外还包括非金属材料特殊性能，尤其对高分子材料的空前发展，从机械制造业的实际需要出发，介绍了塑料的成型方法和粘接技术。

材料的使用及加工工艺是在生产实践中逐渐积累和发展起来的。四千多年前，我们的祖先就认识了铜，并冶炼出青铜器。据最近考证我国最早人工冶炼的铁器，要比欧洲国家早约2200年左右。河北和河南等地出土的战国时代的诸多铁制农具，都足以证明当时冶铸技术之高明。

战国时代兵器业的发展也引人注目。据现已出土的利剑分析表明，它是锻造后经渗碳淬火而制成的，可谓既利又韧，削铁如泥的宝剑。西安秦始皇兵马俑出土的铜剑更令人震惊，距今已2300多年仍光彩夺目、锋利如新。经化验它渗入了14种合金元素，表面是一层含铬的氧化物。它不仅显示出铸、锻、焊工艺技术精湛，而且热处理、尤其合金化的水平也令现代人赞叹叫绝。

明朝科学家宋应星所著《天工开物》一书，详细记载了冶铁、炼钢、铸造、热处理等金属加工工艺，它是世界上第一本金属工艺方面的科学巨著。它展现了中国人的聪明才智和所

创造的光辉成就。

回顾历史我们引以为自豪，展望未来我们重任在肩。目前机械制造业正朝着高速、自动、精密方向发展，担负着向国民经济各个工业部门提供高、精、尖产品的任务。随着科学技术的飞速发展，对工业产品的要求日益提高和苛刻，这样就促进了加工技术的发展和提高，也给古老的热加工工艺注入了活力，不断出现了新技术、新工艺。尤其是电子计算机的应用，使热加工工艺展现出美好的发展前景。

铸造生产除现已应用的特种铸造方法外，又出现了陶瓷型铸造、磁型铸造、真空吸铸、连续铸造等新工艺。可以预料在不远的将来，用计算机控制的机械化、自动化的铸造生产将大有发展。

锻压工艺中出现的超塑性成形、粉末热锻、零件的挤压、精密模锻、冷锻等新工艺，展示出这种少切屑或无切削加工方法的强大生命力，随着计算机CAD和CAM技术的开发和应用，锻压生产将会得到更大发展。

现代加工技术发展最快的焊接工艺，其新技术不断出现并得到应用，如氩弧焊、激光焊、等离子弧焊等。而计算机控制系统的引入，将会使焊接生产的自动化和焊接产品的高质量得以保证。

对于机械类各专业，“热加工工艺基础”是一门必修的技术基础课。通过本课程的学习，要求学生掌握铸造、锻压、焊接等主要加工方法的原理和工艺特点、应用和结构设计及其相互之间的联系和综合运用。了解塑料的成型方法和粘接技术的应用。具有选择毛坯、零件加工方法及工艺分析的初步能力；具有综合运用工艺知识、分析零件结构工艺性的初步能力；了解与本课程有关的新工艺、新技术及发展趋势。

本课程是理论与实践相结合的技术学科，要求学生必须在金工实习之后、获得感性知识的基础上学习本课程。在教学过程中，应开设必要的实验，充分运用影视教学手段、教具模型和计算机辅助教学手段。有条件的要组织到工厂参观，以增强感性知识，从而提高教学效果，保证教学质量，完成教学任务，以达到本课程的教学目的和要求。



# 第一篇 金属材料及热处理

金属材料是目前应用最广泛、用量最多的工程材料，是制造机械设备及构件的最主要的材料。之所以获得如此广泛的应用，是因为金属材料能满足机械产品所需要的使用性能，它包括力学性能、物理和化学性能及可被加工成形的良好的工艺性能。

纯金属和合金构成了金属材料。在工业上纯金属用量很少，而主要使用合金，它包括钢铁材料和一些非铁合金。

本篇主要论述金属材料的使用性能；金属和合金的晶体结构；铁碳合金的组织 and 性能；钢的热处理；以确立成分-组织-性能之间的变化规律，从而为后面各篇的学习打下基础。

## 第一章 金属材料的主要性能

金属材料的主要性能包括工艺性能和使用性能。工艺性能是指金属材料使用某种工艺方法进行加工的难易程度。根据工艺方法不同，材料的工艺性能包括铸造性能、锻压性能、焊接性能、切削加工性能及热处理性能。本章主要讨论使用性能，它是指金属材料在正常的工作条件下所表现出来的性能，包括力学性能、物理性能和化学性能。

### 第一节 金属材料的力学性能

力学性能是指材料在外力作用下表现出的性能。其主要指标有强度、硬度、塑性、韧性、疲劳强度等。

#### 一、强度

材料在外力作用下，抵抗塑性变形和断裂的能力称为强度。按外力作用的方式不同，可分为抗拉、抗压、抗弯、抗剪强度等。工程上最常用的金属材料的强度指标有屈服强度和抗拉强度。

材料的强度、塑性指标是通过拉伸实验测定的。图 1-1 为低碳钢拉伸实验测得的拉伸图。实验时将材料做成标准试样，试样在外力作用下，其内部产生一种内力，其数值大小与外力相等，方向相反。材料单位面积上的内力称为应力 (Pa)，以  $\sigma$  表示。可按下式计算

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

式中  $F$  —— 试验时所加的外力 (载荷) (N)；

$A_0$  —— 试样原始横截面积 ( $\text{m}^2$ )。

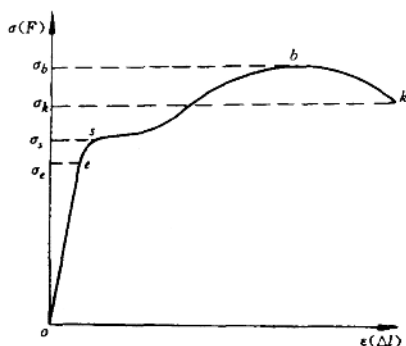


图 1-1 低碳钢的拉伸图

### (一) 屈服强度

在图 1-1 中, 当载荷未达到  $e$  点以前试样仅产生弹性变形, 故  $\sigma_e$  是材料所能承受的不产生永久变形的最大应力, 称为弹性极限。当载荷超过  $e$  点后, 试样开始产生塑性变形, 当载荷继续增大至  $s$  点时, 虽然不再继续增加载荷, 但变形却依然继续, 拉伸图上出现一个平台, 这种现象称为屈服。此时  $s$  点所对应的应力值称为屈服强度, 用  $\sigma_s$  表示。它表示了在外力作用下, 材料开始产生明显塑性变形时的应力值 (Pa), 代表了材料抵抗微量塑性变形的能力。它可按下式计算

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0}$$

式中  $F_s$  —— 试样产生屈服现象时所承受的最大外力 (N)。

需要指出, 大多数金属材料在拉伸时没有明显的屈服现象, 因此将试样产生 0.2% 塑性变形时的应力值, 作为屈服强度指标, 称为条件屈服强度, 用  $\sigma_{0.2}$  表示。

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{A_0}$$

式中  $F_{0.2}$  —— 试样产生 0.2% 塑性变形时的外力 (N)。

### (二) 抗拉强度

在图 1-1 中, 当载荷继续增加至  $b$  点时, 试样横截面出现局部变细的缩颈现象。至  $k$  点时试样被拉断,  $b$  点的应力  $\sigma_b$  是材料在拉断前所承受的最大应力值 (Pa), 称为材料的抗拉强度。它可按下式计算

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0}$$

式中  $F_b$  —— 试样拉断前承受的最大外力 (N)。

显然, 金属材料不能在应力超过  $\sigma_s$  的条件下工作, 否则, 零件会产生塑性变形而失效; 金属材料更不能在应力超过  $\sigma_b$  的条件下工作, 否则会引起零件的破坏。

## 二、塑性

材料受外力作用时产生变形, 当外力去除后能恢复其原来形状的性能称为弹性。这种随外力的消失而消失的变形称为弹性变形。

材料在外力作用下产生永久变形而不破坏的性能称为塑性。这种在外力消失后留下来不可恢复的变形称为塑性变形。通常表示材料的塑性指标是伸长率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$ 。

$$\text{伸长率} \quad \delta = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\%$$

$$\text{断面收缩率} \quad \psi = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\%$$

式中  $L$  —— 试样拉伸断裂后的长度 (mm);

$L_0$  —— 试样原始长度 (mm);

$A$  —— 试样受拉伸断裂处的横截面积 (mm<sup>2</sup>)。

$\delta$  和  $\psi$  值愈大则塑性愈好。金属材料具有一定的塑性是进行塑性加工的必要条件。另外塑性还可以提高零件工作的可靠性, 防止零件突然断裂。

## 三、硬度

硬度是材料抵抗更硬的物体压入其内的能力。它表征材料在一个小的体积范围内抵抗弹

性变形、塑性变形及破坏的能力，是材料性能的一个综合物理量。最常用的硬度指标有布氏硬度和洛氏硬度两种。

### (一) 布氏硬度

布氏硬度试验是将直径为  $D$  的淬火钢球在一定载荷  $F$  的作用下，压入被测金属的表面，如图 1-2 所示。经规定的加载时间后卸除载荷，即可得到直径为  $d$  的压痕。载荷除以压痕表面积的值即为布氏硬度 (MPa)，用 HB 表示。它可按式计算

$$HB = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中  $F$  —— 所加载荷 (N)；

$D$  —— 压头直径 (mm)；

$d$  —— 所得压痕直径 (mm)。

当压头为淬火钢球时布氏硬度用 HBS 表示，适于布氏硬度值在 450 以下的材料，当压头为硬质合金球时用 HBW 表示，适于布氏硬度值为 450~650 的材料。

布氏硬度因压痕的面积较大，故测定的硬度值比较准确。但由于压痕面积较大，不能测定薄片材料，也不宜测定成品。通常主要用于测定较软的金属材料及半成品，如非铁合金、低合金结构钢、灰铸铁等。

### (二) 洛氏硬度

洛氏硬度试验是用一定的载荷，将顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥体压入被测金属，如图 1-3 所示。然后根据压痕的深度，确定其硬度值。用 HR 表示。实际测试时，其硬度值可以直接从硬度计刻度盘上读出。

洛氏硬度有三种标尺：HRA、HRB、HRC，常用的为 HRC。其硬度实验规范如表 1-1 所示。

表 1-1 三种洛氏硬度标尺的试验规范和应用范围

标尺	测量范围	总载荷/N	压头类型
HRA	60~85	588.4	金刚石圆锥体
HRB	25~100	980.7	钢球 (直径为 1.588mm)
HRC	20~67	235.4	金刚石圆锥体

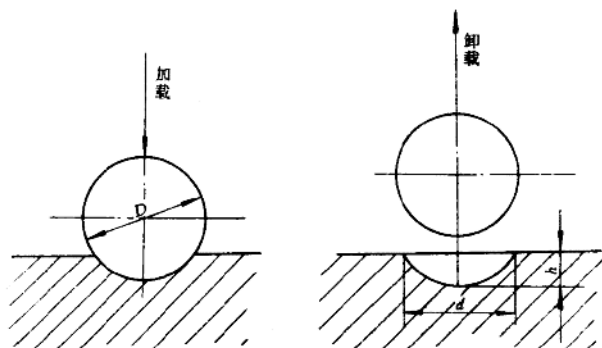


图 1-2 布氏硬度试验原理示意图

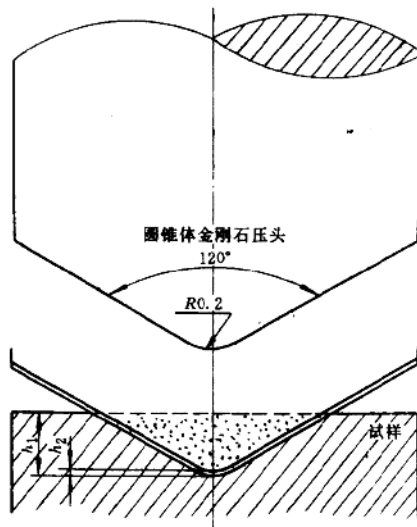


图 1-3 洛氏硬度试验原理示意图

$h_1$  —— 压入深度  $h_2$  —— 弹性变形量

洛氏硬度测量简单迅速，压痕小不损伤工件，可测薄试样和硬材料。

硬度是重要的力学性能指标，与强度一样都反映了材料对塑性变形的抵抗能力。硬度与强度之间有一定的关系，下列经验数据可供参考：

低碳钢	$\sigma_s \approx 0.36\text{HB}$
高碳钢	$\sigma_s \approx 0.34\text{HB}$
调质合金钢	$\sigma_s \approx 0.325\text{HB}$
灰铸铁	$\sigma_s \approx 0.1\text{HB}$

此外测量硬度的方法还有维氏硬度法、肖氏硬度法等。

#### 四、冲击韧度

有些机器零件和工具在使用中常受到冲击载荷的作用。如锻锤的锤杆、内燃机的活塞连杆、火车车厢挂钩等。对这些在动载荷作用下工作的零件，已不能单纯用静力强度指标来衡量，必须考虑所用材料的冲击韧度。

冲击韧度是金属材料抵抗冲击载荷的作用而不破坏的能力。冲击韧度值常用一次摆锤冲击试验进行测定。

一次摆锤冲击试验的原理如图 1-4 所示。首先制成标准试样，然后放在实验机的支座上，再将具有一定质量的摆锤，由一定高度自由落下，测得一次冲断时试样缺口处单位面积所消耗的功，称为冲击韧度 ( $\text{J}/\text{cm}^2$ )，用  $a_k$  表示。

$$a_k = \frac{A_k}{A}$$

式中  $A_k$ ——击断试样所消耗的冲击功 (J)；

$A$ ——试样缺口处的原始横截面积 ( $\text{cm}^2$ )。

应当指出，在冲击载荷作用下工作的零件，实际所受的载荷多是小能量的多次重复冲击，这显然与  $a_k$  值的实验条件不同。对小能量多次冲击研究结果表明：材料承受小能量多次重复冲击的能力主要决定于强度，而无需过高的冲击韧度。

#### 五、疲劳强度

有些机器零件，如汽车上的曲轴、齿轮、弹簧等是在方向、大小反复变化的交变载荷作用下工作的，工作过程中常常在应力低于材料屈服强度的情况下且尚无明显的塑性变形预兆而突然发生断裂，这种现象称为疲劳破坏。

实验测定金属材料承受的交变应力与断裂前的应力循环次数有一定的关系，如图 1-5 所示。当应力降低到一定值时，曲线与横坐标平行，表示材

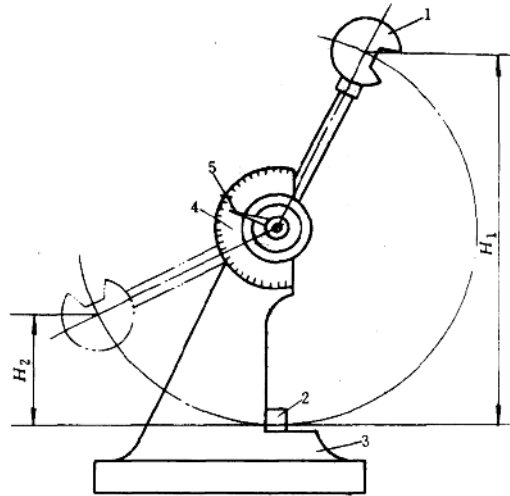


图 1-4 冲击试验原理示意图

1—摆锤 2—试样 3—支座 4—表盘 5—指针

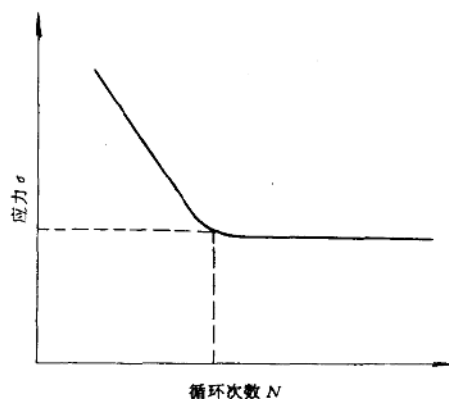


图 1-5 疲劳曲线

料可经受无限次应力循环而不失效。它代表了金属材料经受无数次重复交变应力作用而不致引起断裂的最大应力，此应力称为疲劳强度，用 $\sigma_{-1}$ 表示弯曲疲劳强度。

试验规范规定钢的循环次数以 $10^7$ 为基数，非铁合金或某些超高强度钢取 $10^8$ 为基数。

根据观察分析，疲劳断裂的原因是由于材料内部缺陷，表面伤痕及在工作中零件局部应力集中，导致微裂纹的产生。这些微裂纹在交变应力作用下，随循环次数增加而逐渐扩展，使零件有效截面减小，从而导致突然断裂。

为了提高零件的疲劳强度，在设计时可通过改善零件结构形状，避免应力集中。加工时改善表面粗糙度，采取表面热处理、表面滚压和喷丸处理等措施，以提高材料的疲劳强度。

## 第二节 金属材料的物理和化学性能

### 一、物理性能

金属材料的主要物理性能有密度、熔点、热膨胀性、导电性、导热性、磁性等。机器零件用途不同，对其物理性能的要求也不同。如飞机、导弹零件为减轻自重则选用密度小的合金制造。电器零件要求具有好的导电性。焊锡、熔丝则需要熔点低的铅锡等合金。物理性能对加工工艺也有影响，如导热性差的材料，在经热处理或用锻压工艺加工时加热速度应缓慢些，以防止产生裂纹。铁碳合金的钢与铸铁，熔点不同其浇注温度就有区别，熔点低的金属，铸造性能好，对铸造工艺有利。

### 二、化学性能

金属材料的化学性能是指金属及合金在常温或高温时抵抗各种化学作用的能力。在腐蚀性介质中工作的零件，要选用耐蚀性好的材料，如化工设备，医疗器械可选用不锈钢，锅炉上的承压管道，可选用高温抗氧化性好的耐热钢。

### 复习思考题

1. 常用的力学性能有哪几种？说明它们的代表符号及物理意义。
2. 说明布氏硬度、洛氏硬度试验的原理及优缺点。

## 第二章 金属及合金的晶体结构

我们把工业上广泛应用的金属和合金统称为金属材料。研究金属材料的目的，就是要掌握成分-组织-性能的变化规律。金属材料在固态下通常是晶体，它的组织结构即原子排列的规律决定其性能。为此本章将讨论金属和合金的晶体结构。

### 第一节 金属的晶体结构

#### 一、金属的三种晶格

物质按其原子排列的特征可分为晶体与非晶体。非晶体中的原子杂乱无章地堆积在一起。晶体中的原子按一定次序有规则地排列着，如金刚石、食盐和绝大多数固态的金属都是晶体。为研究金属的晶体结构，现以最简单的晶体为例，来研究晶体中原子的排列规律，如图 2-1 所示。

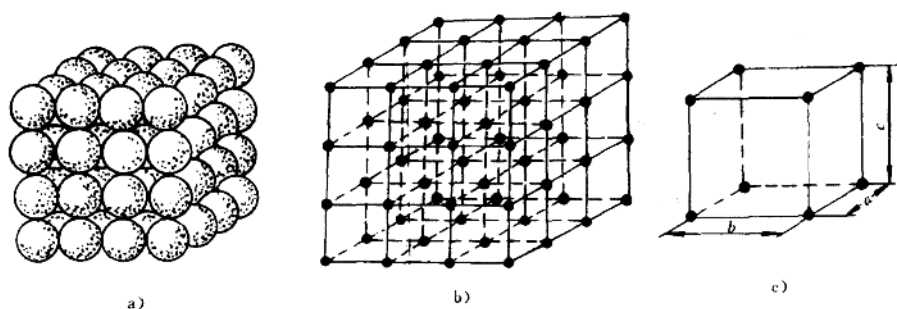


图 2-1 简单立方晶格与晶胞示意图

a) 晶体中的原子排列 b) 晶格 c) 晶胞

图 2-1a 即为该晶体中原子排列的球体模型。它显示了原子排列的真实状态。

#### (一) 晶格及晶胞

为便于研究及清楚地看到晶体中原子排列的规律性，从各原子中心向长、宽、高三个方向连线，这样便构成了一个三维空间中的空间格子，如图 2-1b 所示。表示晶体中原子规则排列的空间格架称做晶格，亦称空间点阵。

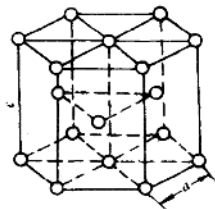
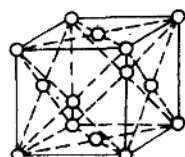
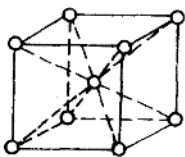
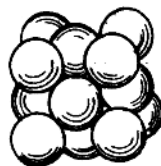
任何晶体其原子都具有重复排列的规律性，即晶格是由若干原子规则排列的单元体所组成的。把代表晶格特征，构成晶格最基本的单元体称做晶胞，如图 2-1c 所示。晶胞就完全代表了这种晶体中原子排列的规律性，所以在研究金属的晶体结构时，一般都取其一个晶胞来讨论。

晶胞的形态由其棱边的长度（亦称晶格常数）及各棱边的夹角来决定。按照这一规则，世界上所有晶体物质可分为七大晶系，14 种晶格形式。这里要指出的是，晶格是为研究需要而假想的连线，实际是不存在的。

## (二) 三种常见金属晶格

在所有金属元素中，约90%以上的金属具有下列三种晶格，尤以前两种晶格为多，现分述如下。

1. 体心立方晶格 如图 2-2a 所示。体心立方晶格的晶胞是一个正六面体。即各棱边相等，各棱边夹角均为  $90^\circ$  的立方体。在立方体的八个顶角上和立方体的中心各有一个原子。而一个晶胞内仅含有 2 个原子。属于这种晶格的金属有铬、钨、钼、钒、 $\alpha$ -Fe (小于  $912^\circ\text{C}$  的纯铁) 等。



a)

b)

c)

图 2-2 常见晶格类型

a) 体心立方晶格 b) 面心立方晶格 c) 密排六方晶格

2. 面心立方晶格 如图 2-2b 所示。面心立方晶格的晶胞也是一个正六面体。在立方体的八个顶角上各有一个原子，且在立方体六个面的中心各有一个原子。而一个晶胞内含有 4 个原子。属于这种晶格的金属有铝、铜、镍、银、 $\gamma$ -Fe ( $912\sim 1394^\circ\text{C}$  的纯铁) 等。

3. 密排六方晶格 如图 2-2c 所示。密排六方晶格的晶胞是一个六方柱体。上下两个六方面的顶角及中心各有一个原子，在两个六方面的中间均匀分布着三个原子。一个晶胞内含有 6 个原子。其晶格常数的比值  $c/a \approx 1.633$ 。属于这种晶格的金属有铍、镁、锌等。

不同晶格形式的金属，其性能各异。如体心立方晶格的金属一般具有较高强度，而面心立方晶格的金属塑性都很好。另外需要指出的是，实际金属都是具有点缺陷、线缺陷、面缺陷等的晶体结构。

## 二、金属的结晶

### (一) 结晶的概念

由液态金属转变为固态晶体的过程称为结晶。其实质是原子从不规则的排列状态过渡到规则排列状态的过程。而一般非晶体由液态向固态的转变则称凝固。

描绘纯金属结晶过程的冷却曲线如图 2-3 所示。我们发现结晶过程中，液态金属的温度随时间延长而降低，但冷却到某一温度时，曲线出现一个平台，其对应的温度即为该金属的实际结晶温度  $T_n$ 。每种金属都有一个平衡结晶温度，也称理论结晶温度，以  $T_0$  表示。由图可见只有金属的实际结晶温度低于理论结晶温度才能结晶，这种现象称为过冷现象。把理论结晶温度与实际温度之差  $\Delta T$  称为过

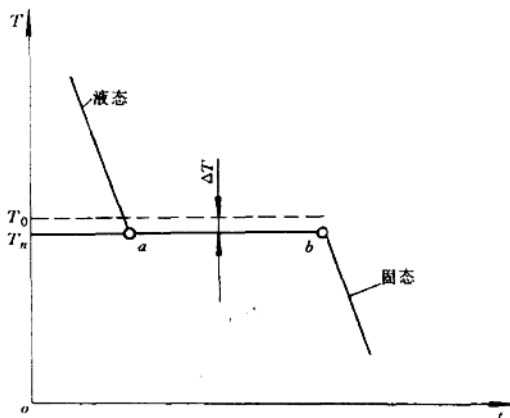


图 2-3 纯金属的冷却曲线

冷现象。把理论结晶温度与实际温度之差  $\Delta T$  称为过

冷度。于是可以得出这样的结论：金属要结晶就必须有过冷度，即过冷度是结晶的必要条件。冷却速度愈快，则过冷度愈大。

### (二) 结晶过程

结晶是在一定过冷度下，从无到有、从小到大的过程。结晶的基本规律是形核和长大。在液态金属中，存在一些短程规则排列的原子团，当温度降到结晶温度以下时，这些原子团便稳定下来，而成为结晶的核心，即成为晶核，称自发形核。液态金属中的某些杂质，在一定条件下也可成为晶核，称非自发形核。结晶的过程如图 2-4 所示。结晶进行时，形核和长大在液态金属内的不同部位同时进行。

随着温度的降低，在液态金属内部形成了一些晶核后，便以晶核为中心，按一定规律添加原子而长大成小晶体。这些小晶体不断长大，起初小晶体按各自方位自由长大，且有规则外形。但当生长着的小晶体彼此碰撞接触后，生长被迫停止，规则外形遭到破坏。当液态金属全部结晶成固体后，便形成了若干不同外形的小晶体。这些外形不规则的小晶体称做晶粒。晶粒之间的分界面叫晶界。由此可见，实际金属是由多个大小、形状、位向不同的晶粒组成的多晶体结构。

### (三) 晶粒细化的方法

金属结晶后晶粒的大小或者说晶粒的粗细，对金属的力学性能影响颇大。晶粒愈细，其强度愈高，塑性和韧性也愈好。为此，一般都希望获得细晶粒组织。通过细化晶粒提高金属力学性能，是当前最重要又最实用的方法之一。在金属的结晶过程中，常采用三种细化晶粒的方法。

(1) 在液态金属结晶时，提高冷却速度，以增大过冷度，来促进自发形核。晶核数量愈多，则晶粒愈细。

(2) 在金属结晶时，有目的地在液态金属中加入某些杂质，做为外来晶核，进行非自发形核，以达到细化晶粒的目的，此方法称为变质处理。这种方法在工业生产中得到了广泛的应用。如铸铁中加入硅、钙等。

(3) 在结晶过程中，采用机械振动、超声波振动、电磁搅拌等，也可使晶粒细化。

### 三、金属的同素异晶转变

在化学上我们知道，有些非金属元素，如金刚石和石墨都由碳元素构成，但其结

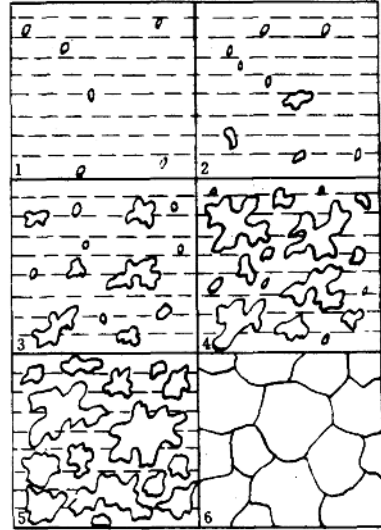


图 2-4 金属结晶过程示意图

实际金属是由多个大小、形状、位向不同的晶粒组成的多晶体结构。

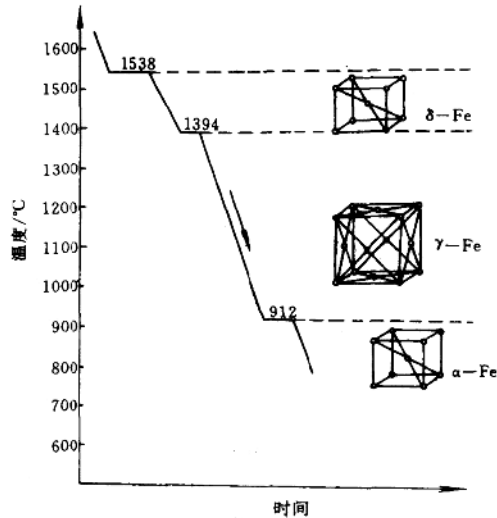


图 2-5 纯铁的冷却曲线



构不同，于是其性能相差悬殊，称它们为同素异构体。某些金属也有类似现象。我们把金属在固态下晶格随温度变化而发生转变的现象叫同素异晶现象。每一次晶格转变都是形核和长大的过程，即发生一次固态下的结晶。具有同素异晶转变的金属有铁、锡、钛、锰等。

现以铁为例说明同素异晶转变，图 2-5 为铁的冷却曲线。纯铁的晶格转变情况是：在 1538 ~ 1394℃ 时为体心立方晶格，称  $\delta$ -Fe；在 1394 ~ 912℃ 时为面心立方晶格，称  $\gamma$ -Fe；在 912℃ 以下时为体心立方晶格，称  $\alpha$ -Fe。晶格改变，其性能随之变化。这就是钢能用热处理方法改变性能的原因所在。

## 第二节 合金的结构

合金是一种金属元素和一种或几种其它元素（金属或者非金属均可）熔合后而组成的具有金属特性的物质。组成合金最基本的、能独立存在的物质称为组元，简称元。绝大多数情况下，组元即是构成合金的元素。但也有将化合物作为组元的，其条件是化合物在所研究的范围内，既不解也不发生任何化学反应。根据组元的数量，可分为二元合金、三元合金或多元合金。如简单黄铜是由铜和锌两种元素组成的二元合金；硬铝是由铝、铜、镁三种元素组成的三元合金。

合金的结构要比纯金属复杂得多。因为合金由两种或多种元素组成，各元素间的相互作用，会形成各种不同的相。我们把在金属和合金中，凡化学成分相同、结构相同并与其它部分有界面分开的均匀组成部分，称之为相。

下面按照这一概念来分析纯金属和合金的结构。纯金属液态时为单相；固态由同一元素、同一晶格构成，故为单相；结晶过程中，既有液相又有固相，即为二相。合金在液态时，其为具有一定化学成分均匀一致的合金液体，为单相。合金由液态转变为固态后，各元素彼此相互溶解可形成固溶体；元素也可能彼此间发生反应而形成金属化合物。固溶体和金属化合物是固态合金的两个基本相。所以合金在固态时，可能是单相组织也可能是多相组织。在分析合金结构时，就是分析其相结构，看其有几种固溶体或金属化合物，即为几相。现将两种基本合金相结构介绍如下。

### 一、固溶体

所谓固溶体是指溶质原子溶入金属溶剂的晶格中所组成的合金相。两组元在液态下互溶，固态也相互溶解，且形成均匀一致的物质。形成固溶体时，含量大者为溶剂，含量少者为溶质；溶剂的晶格即为固溶体的晶格。

#### （一）固溶体的分类

按溶质原子在晶格中的位置不同可分为置换固溶体和间隙固溶体。

1. 置换固溶体 溶质原子占据溶剂晶格中的结点位置而形成的固溶体称置换固溶体。当溶剂和溶质原子直径相差不大，一般在 15% 以内时，易于形成置换固溶体。铜镍二元合金即形成置换固溶体，镍原子可在铜晶格的任意位置替代铜原子。

2. 间隙固溶体 溶质原子分布于溶剂晶格间隙而形成的固溶体称间隙固溶体。间隙固溶体的溶剂是直径较大的过渡族金属，而溶质是直径很小的碳、氢等非金属元素。其形成条件是溶质原子与溶剂原子直径之比必须小于 0.59。如铁碳合金中，铁和碳所形成的固溶体——铁素体和奥氏体，皆为间隙固溶体。