



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

世纪高等教育精品大系·机械工程系列

# 机械工程导论

● 姚建华 主编

浙江科学技术出版社

# 前 言

本书主要介绍机械工程学科中的基本概念、基础知识及发展概况,内容包括工程材料、机械制造基础、先进制造技术概论三个部分。新版本在原版本的基础上主要突出体现现代机械工业生产的系统性、科学性、先进性和实用性,大幅度删减了过时的工艺知识,各章节增加了有关工程新技术、新工艺、新材料等最新成果,尤其是先进制造技术、管理以及应用方面的新进展,如非传统加工技术、快速与精密制造技术、现代设计方法概论、先进管理技术等,目的是让读者了解更多的新知识,适应时代发展的要求,满足现代人才培养模式下的知识结构要求。

本教材在编写过程中总结了国内各院校进行教学改革和课程建设的实践经验,并吸取了国内外同类教材的优点。教材的内容力求贯彻拓宽、先进、应用的原则,充分注重学生创新精神和创新能力的培养。

本书适用于工程非机类专业(经济、管理、信息、生物、化工、环境等)的学习和教学,旨在使学生了解机械工程中的各类基本知识;结合各专业特点,知识覆盖面广、通俗易懂;较深的专业理论知识不列入编写内容;编写时考虑了适合多媒体教学。

本书还适用于工程机类专业学生拓展知识面,了解机械工程学科领域科学、技术、工程等问题,旨在向广大学生展示机械工程学科对人类社会发展与进步的重要推动作用以及该学科的基本知识、最新发展与未来,让他们了解机械工程科技人员所需的专业知识和技能,激发他们对机械工程专业兴趣,展望机械工程领域的美好前景。

本书可供高等院校各工程专业教学使用,适合各工程机类以及非机类专业使用,亦可供大专、高职、技校学生以及工程技术人员使用。

本书由姚建华担任主编,参加本书编写工作的人员还有:浙江理工大学居毅、郭绍义;浙江工业大学马晓春、陈莉;杭州电子科技大学全小平、潘玉良;中国计量学院王晓林。全书最后由姚建华统稿。

由于编者水平所限,书中难免有不妥和错误之处,深望广大读者给予批评指正。

编著者  
2009年6月

# 目 录

## Contents

### 第一编 工程材料

第一章 金属材料结构与性能 .....	1
第一节 概 述 .....	1
第二节 金属材料的结构 .....	1
第三节 金属材料的机械性能 .....	4
复习思考题 .....	8
第二章 铁碳合金 .....	9
第一节 概 述 .....	9
第二节 铁碳合金基本组织和性能 .....	10
第三节 铁碳合金状态图的分析 .....	10
第四节 碳 钢 .....	14
第五节 铸 铁 .....	21
复习思考题 .....	26
第三章 钢的热处理 .....	27
第一节 概 述 .....	27
第二节 钢的热处理基本原理 .....	27
第三节 钢的普通热处理工艺 .....	30
第四节 钢的热处理新技术 .....	33
复习思考题 .....	35
第四章 合金钢与有色金属 .....	36
第一节 概 述 .....	36
第二节 合金结构钢 .....	38
第三节 合金工具钢 .....	40

第四节	特殊性能钢 .....	42
第五节	有色金属 .....	43
	<b>复习思考题</b> .....	48
<b>第五章</b>	<b>非金属材料</b> .....	49
第一节	高分子材料 .....	49
第二节	陶瓷材料 .....	56
第三节	复合材料 .....	58
	<b>复习思考题</b> .....	60
<b>第六章</b>	<b>材料的选用</b> .....	62
第一节	概 述 .....	62
第二节	工程材料选用原则 .....	62
第三节	典型零件的选材 .....	66
	<b>复习思考题</b> .....	69
<b>第七章</b>	<b>材料新进展</b> .....	71
第一节	概 述 .....	71
第二节	新型金属材料 .....	72
第三节	纳米材料 .....	79
第四节	复合材料及其发展 .....	82
	<b>复习思考题</b> .....	85

---

## 第二编   机械制造基础

---

<b>第八章</b>	<b>液态成形</b> .....	86
第一节	概 述 .....	86
第二节	砂型铸造 .....	87
第三节	特种铸造 .....	96
第四节	铸件质量分析 .....	98
	<b>复习思考题</b> .....	99
<b>第九章</b>	<b>锻压成形</b> .....	101
第一节	锻压基础知识 .....	101

第二节	锻    造	105
第三节	板料冲压	108
第四节	其他压力加工方法	110
	<b>复习思考题</b>	115
<b>第十章</b>	<b>焊接成形</b>	116
第一节	概    述	116
第二节	熔焊基础	117
第三节	常见焊接方法	122
第四节	焊接缺陷与检验	126
	<b>复习思考题</b>	129
<b>第十一章</b>	<b>切削加工</b>	130
第一节	概    述	130
第二节	切削加工基本知识	130
第三节	车削加工	137
第四节	铣、刨、拉、钻、镗、磨削加工	142
第五节	常见表面加工方法	152
第六节	典型零件的工艺流程	154
	<b>复习思考题</b>	157

---

## 第三编    先进制造技术概论

---

<b>第十二章</b>	<b>先进制造技术的内涵及特点</b>	160
第一节	概    述	160
第二节	先进制造技术的内涵与特点	161
第三节	先进制造技术的发展趋势	162
	<b>复习思考题</b>	164
<b>第十三章</b>	<b>机械制造自动化概论</b>	165
第一节	概    述	165
第二节	自动生产线	166
第三节	数控加工	168

第四节	工业机器人 .....	171
第五节	柔性制造系统 .....	174
第六节	集成制造系统 .....	177
	<b>复习思考题</b> .....	180
<b>第十四章</b>	<b>非传统加工技术</b> .....	181
第一节	概    述 .....	181
第二节	电火花加工 .....	181
第三节	激光加工 .....	184
第四节	超声波加工 .....	186
第五节	射流加工 .....	187
第六节	复合加工 .....	188
	<b>复习思考题</b> .....	190
<b>第十五章</b>	<b>快速与精密制造技术</b> .....	192
第一节	概    述 .....	192
第二节	快速原型制造技术 .....	193
第三节	精密和超精密加工技术 .....	196
	<b>复习思考题</b> .....	201
<b>第十六章</b>	<b>现代设计方法概论</b> .....	202
第一节	概    述 .....	202
第二节	现代设计的特征 .....	202
第三节	现代设计方法简介 .....	205
第四节	现代设计方法的发展趋势 .....	206
	<b>复习思考题</b> .....	207
<b>第十七章</b>	<b>先进生产管理技术</b> .....	208
第一节	概    述 .....	208
第二节	物料需求计划和制造资源计划 .....	209
第三节	企业资源计划 .....	213
	<b>复习思考题</b> .....	215
	<b>参考文献</b> .....	216

# 第一编 工程材料

## 第一章 金属材料结构与性能

### 第一节 概述

工程金属材料包括纯金属与合金。所谓合金是由两种或两种以上的金属元素(或金属元素与非金属元素)组成的具有金属特性的材料。

金属材料具有较高的强度,良好的塑性,高的导电性、导热性以及金属光泽等特性。

金属材料除具有上述共同特性外,本身的性能亦具有多样性和多变性。不同化学成分的材料可以具有不同的性能;即使同一种金属材料其性能也可以发生改变,可以通过不同的加工和处理使金属材料得到所需要的性能。

所谓金属材料性能的提高,可以是硬度、强度的强化,亦可以是为提高加工工艺性能而提高塑性,使材料软化。对大多数机械零件而言,在使用条件下一般均要求强化,材料强化后可以使零件和部件结构轻巧,可靠性和耐磨性提高,使用寿命延长。

金属材料的性能不仅与其化学成分有关,还与其内部组织和状态有关。为了能正确选择零件材料,提出适当的强化指标,制定合理的技术要求,就必须掌握有关材料的成分、处理、组织与其性能之间关系的知识。其中,“成分”是改变性能的基础,“处理”是改变性能的手段,而“组织”是性能变化的根据。

### 第二节 金属材料的结构

#### 一、金属的结晶

所有的纯金属及合金均属于晶体。原子在空间有规则地排列是晶体的特征。

金属从液态到固态的凝固是一个结晶过程,这一过程对金属凝固后的组织和性能有很大影响。纯金属与合金的结晶过程有很多共同的特点,如图 1-1 所示为纯金属的冷却曲线,它通过实验记录了金属结晶过程中温度随时间变化的规律。

纯金属从液态转变为固态时,有其一定的理论结晶温度

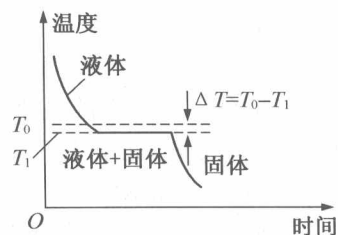


图 1-1 纯金属的冷却曲线

$T_0$ ，亦即纯金属的熔点。但实际上，液态金属只有过冷到温度低于  $T_0$  时才可能结晶，因此实际结晶温度  $T_1$  总是低于  $T_0$ 。图中， $\Delta T$  为理论结晶温度  $T_0$  与实际温度  $T_1$  之差，称为过冷度。过冷度  $\Delta T$  的大小主要与冷却速度有关，冷却速度越大，则过冷度越大。当冷却速度极其缓慢时，过冷度很小， $T_1$  接近于  $T_0$ 。高于  $T_1$  温度时金属为液体，随着周围环境的吸热，金属的温度不断下降，待下降至  $T_1$  温度以下时，液体金属开始凝固，由于凝固过程中放出的潜热使结晶温度保持恒定，故直至完全凝固后温度才继续下降。

结晶过程是一个晶体形核和成长的过程。根据实验观察，液体金属开始结晶时，液体中某些区域会形成一些规则排列的微小晶核，如图 1-2(a) 所示，随着凝固过程的继续，已形成的晶核各自按不同的结晶方向成长，同时，在未凝固的液体中又形成一些新的晶核，如图 1-2(b) 所示，直至各晶核长大后相互接触，液体完全消失为止，如图 1-2(c) 所示。由于各个晶粒成长时的方向不一致，在两颗晶粒处将形成晶界，如图 1-3 所示。晶界上的原子排列不规则，这就是晶界与晶粒内部的性能不一致的原因。一般金属材料都是由许多晶粒组成的多晶体。

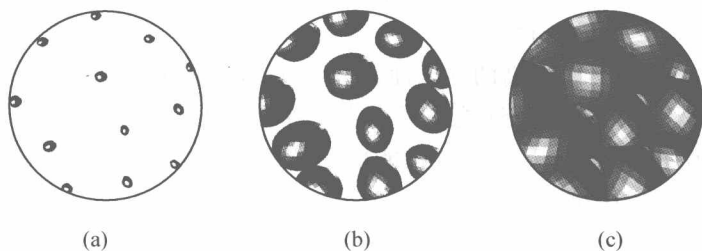


图 1-2 结晶过程

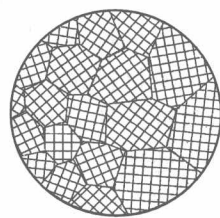


图 1-3 晶界示意图

金属凝固后的晶粒大小与凝固过程中形核的多少及晶核的成长速度有关，形成的晶核越多、晶核的成长速度越慢，则凝固后的晶粒越细。晶粒细化除使金属材料的强度、硬度提高外，还能使金属的塑性和韧性有较大的改善，因此人们总是力图得到具有细晶粒组织的金属材料。通过细化晶粒以强化金属的方法称为晶粒细化强化。

## 二、金属的晶体结构

所谓晶体结构，是指晶体中原子排列的方式，如图 1-4(a) 所示是原子规则排列的一种方式。为了描述原子在空间规则排列的方式，可以假想用直线将原子的中心联结起来，这样就构成了空间格子，简称晶格，如图 1-4(b) 所示。晶格中各假想直线的交点称为结点。

由于原子排列具有周期性特征，因此只需取出一个能完全代表晶格的最小单元，就可分析晶体中原子的排列方式，此最小的几何单元称为晶胞，如图 1-4(a) 所示。晶胞的各个边长称为晶格常数，其度量单位为埃( $\text{\AA}$ )。

工业上常用的金属除少数具有复杂的晶体结构外，绝大多数具有比较简单的晶体结构。最常见的晶体结构有 3 种：体心立方晶格(见图 1-5)、面心立方晶格(见图 1-6)和密排六

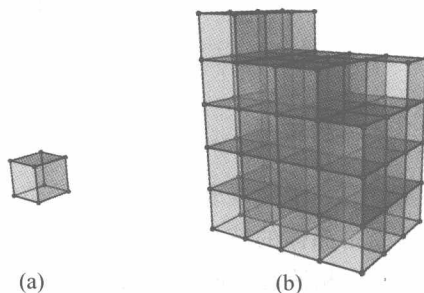


图 1-4 原子排列示意图



方晶格(见图 1-7)。例如,纯铁常温下为体心立方晶格,当温度升至 910~1400℃ 范围内时就变为面心立方晶格了。

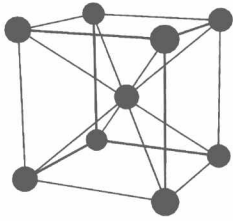


图 1-5 体心立方晶格

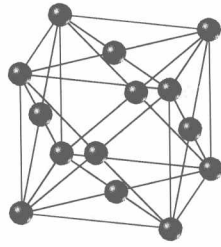


图 1-6 面心立方晶格

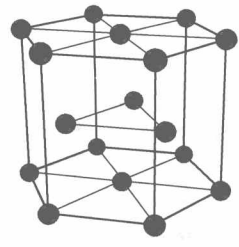


图 1-7 密排六方晶格

以上讨论晶体结构时认为所有原子均严格按一定的几何规则在空间作周期性的排列,每个结点均被原子所填满,这是一种理想的晶体结构。具有这种结点的晶体称为理想晶体。而实际金属晶体中,虽原子排列基本上是有规则的,但在局部区域总是存在着各种不同的缺陷。晶体缺陷对金属材料的性能有很大影响,且金属中发生的许多物理、化学现象亦与晶体缺陷有密切关系。

缺陷的种类很多,如空位和间隙原子(见图 1-8)、位错和晶界等。空位和间隙原子是点状分布的缺陷,由于某些原子具有较大的能量,在做热振动时脱离了原有的结点位置而形成空位和间隙原子。

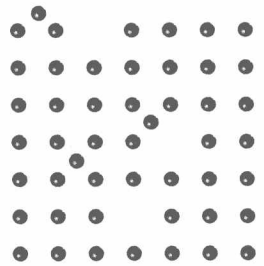


图 1-8 晶体缺陷

### 三、合金的晶体结构

纯金属一般都具有良好的导电性和导热性,但强度、硬度均很低,而且价格贵。而合金可以通过不同元素的搭配及元素含量的变化,使合金的性能在较宽的范围内变动,从而满足工业上的广泛需要。合金的种类虽然很多,但其晶体结构可归纳为 3 类,即固溶体、金属化合物和机械混合物。

#### 1. 固溶体

合金在固态下溶质原子溶入溶剂,仍保持溶剂晶格的叫固溶体。

按溶质原子在溶剂晶格中所占据的位置来分,固溶体可分为置换固溶体和间隙固溶体两种。置换固溶体中溶质原子置换了溶剂晶格的部分原子;间隙固溶体中溶质原子则嵌在溶剂原子间的某些空隙中,如图 1-9 所示。

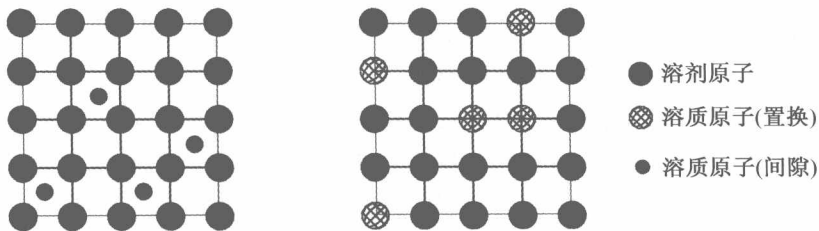


图 1-9 间隙固溶体与置换固溶体

由于置换固溶体中溶剂原子与溶质原子的尺寸不同,以及间隙固溶体中溶质原子一般均比溶剂晶格的空隙尺寸大,因而引起固溶体的晶格畸变,如图 1-10 所示。晶格畸变将使合金的强度、硬度和电阻值升高,而塑性、韧性下降。这种由于溶质原子的溶入,使基体金属(溶剂)的强度、硬度升高的现象,叫做固溶强化。

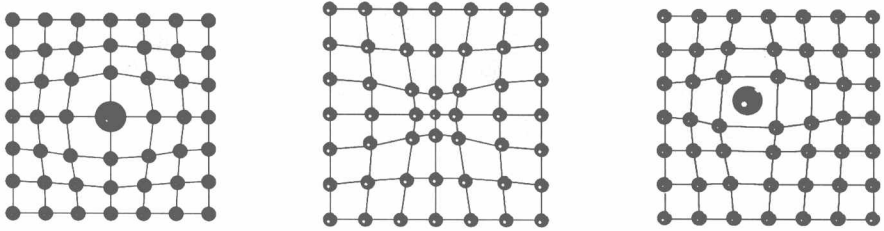


图 1-10 固溶体的晶格畸变

## 2. 金属化合物

组成合金的元素相互化合形成一种新的晶格组成金属化合物。这种化合物可用分子式表示。有些符合正常价规律,如  $Mg_2Si$ , 有些不符合正常价规律,如  $CuZn$ 、 $Cu_2Al$ 、 $Fe_3C$  等。

金属化合物的特点是熔点高、硬度高、脆性大。

## 3. 机械混合物

由两种或两种以上的组元或固溶体组成,或者由固溶体与金属化合物组成的合金,称为机械混合物。其中,组元、固溶体或金属化合物均保持各自的晶格类型。在显微镜下可以分辨出不同的组成部分。机械混合物的性能决定于各自组成部分的性能和相对数量,还决定于它们的大小、形状和分布。

# 第三节 金属材料的机械性能

为了合理地使用和加工金属材料,必须了解其使用性能与工艺性能。使用性能中包括材料的机械性能、物理性能和化学性能。若零件的材料不能满足使用中要求的某项性能时,零件就不能正常地工作,称为“失效”。

在机械零件设计中选择材料时,往往以其机械性能为主要依据。材料的机械性能又称力学性能,即材料在外力作用下所显示的性能,常用的如强度、硬度、塑性和韧性等。

## 一、静载荷下材料的机械性能

静载荷下材料的机械性能主要包括刚度、强度、弹性、塑性和硬度。除硬度可用硬度计等仪器测试外,其余皆可通过静拉伸试验测得。

材料拉伸试验是指将标准试棒在拉伸试验机上拉伸,试样受力从零开始,随着载荷逐步增大,试棒有规律地伸长,直至被拉断,如图 1-11 所示。利用拉力和试棒伸长的数值变化可绘制出力-伸长图,如图 1-12 所示。当外力低于  $P_s$  时,变形与拉力成正比,属弹性变形范围;当外力达到  $P_s$  时,变形大大增加,而外力并无明显变化,此阶段称为屈服;以后产生的

变形为塑性变形,而且变形量与外力不成正比关系;当外力达到  $P_b$  即最大负载时,试样局部截面上直径缩小,称为缩颈,由于缩颈部位明显地伸长,总拉力开始下降,直至缩颈区断裂。

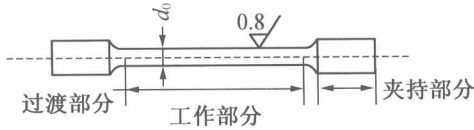


图 1-11 拉伸试样

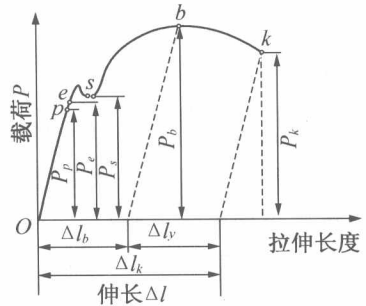


图 1-12 低碳钢拉伸曲线

### 1. 应力-应变曲线

试棒在拉伸过程中截面随载荷而变化,为排除试棒的尺寸因素,取单位截面上受力(即应力  $\sigma$ )的大小与单位长度上伸长量(即应变  $\epsilon$ )的相应变化绘制应力-应变曲线,如图 1-13 所示。

应力  $\sigma$  可从下式求得:

$$\sigma = \frac{P}{F_0} \text{ (MPa)}$$

式中:  $F_0$ ——试棒拉伸的原始截面积( $\text{mm}^2$ );

$P$ ——拉伸的载荷(N)。

应变  $\epsilon$  可从下式求得:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{L_0} \times 100\%$$

式中:  $L_0$ ——试棒的原始标距长度(mm);

$\Delta l$ ——试样拉伸后的总伸长量(mm)。

### 2. 弹性与刚度

材料在弹性范围内应力与应变成正比关系,服从虎克定律。其比值  $E$  称作弹性模量,由下式求得:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

弹性模量  $E$  也可理解为应力与应变的比值,它是衡量材料抵抗弹性变形能力的一项重要指标。

零件抵抗弹性变形的能力也称零件的刚度。零件的刚度决定于零件的形状、尺寸和材料的弹性模量  $E$ 。

弹性是材料产生弹性变形的能力。对应于弹性极限  $\sigma_e$  的应变值  $\epsilon_e$  是衡量材料弹性的指标之一。

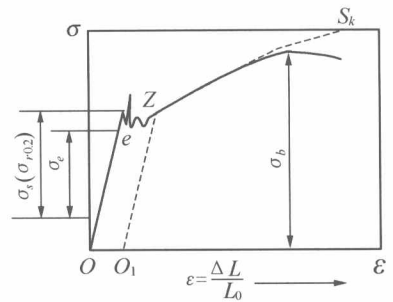


图 1-13 应力-应变曲线

### 3. 强度

强度是金属材料在外力作用下抵抗塑性变形和断裂的能力。材料抵抗少量塑性变形的能力称屈服极限或屈服强度,即图 1-13 中的  $\sigma_s$ 。

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} (\text{MPa})$$

有些金属材料的屈服现象不明显(如高强度钢等),所以工程上规定以材料拉伸试棒塑性应变变量达到 0.2% 时的应力作为屈服强度值,用  $\sigma_{0.2}$  表示。

当试棒拉伸超过屈服点后,必须增加外力才能使试棒继续变形。若在中途任一点 Z 卸除外力,  $\sigma-\varepsilon$  曲线将沿平行与  $eO$  线的  $ZO_1$  降低至  $O_1$  点。当再次增加外力时,  $\sigma-\varepsilon$  又沿  $O_1Z$  线上升,在应力到达  $\sigma_Z$  以前一直为弹性变形,直到应力超过  $\sigma_Z$  后,才再次出现塑性变形。材料经过 Z 点以前这段塑性变形后,屈服强度从原来的  $\sigma_s$  提高到  $\sigma_Z$ ,这种现象称为形变强化,它是工业生产中常用的材料强化方法。

试棒被拉断前所能承受的最大应力  $\sigma_b$  代表材料的强度极限,称为抗拉强度,也是材料对大量塑性变形的抗力。

$\sigma_s$  和  $\sigma_b$  都是材料的强度指标,对于塑性材料的零件设计,应以屈服强度  $\sigma_s$  作为强度依据,在零件正常使用中不允许产生明显的塑性变形,而抗拉强度  $\sigma_b$  只能作为脆性材料的零件设计依据。

### 4. 塑性

塑性是材料在外力作用下断裂前产生塑性变形的能力。塑性指标用试棒拉伸过程中的延伸率  $\delta$  及截面收缩率  $\psi$  来表示。延伸率是指试棒拉断后标距长度范围的伸长量  $\Delta l$  与标距间原始长度  $L_0$  比值的百分率。

$$\delta_s = \frac{\Delta l}{L_0} \times 100\% = \frac{L_K - L_0}{L_0} \times 100\%$$

$\delta_s$  指试棒标距长度  $L_0$  为试棒直径  $d_0$  的 5 倍。

截面收缩率是试棒拉断处横截面的减缩量  $\Delta F$  与原始横截面积  $F_0$  比值的百分率。

$$\psi = \frac{\Delta F}{F_0} \times 100\% = \frac{F_0 - F_K}{F_0} \times 100\%$$

### 5. 硬度

硬度是材料被更硬的物体压入时表现出的抵抗能力。压痕深度或压痕单位面积上所承受的载荷可作为衡量硬度的指标。实际常用的硬度指标布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度 3 种。

(1) 布氏硬度。布氏硬度指用规定的载荷  $P$  把直径为  $D$  的淬硬钢球压入试样表面,保持一定时间再卸除载荷后,以压痕单位球面积上所承受的压力表示材料的硬度,用符号 HBS(W) 表示,单位为  $\text{kgf}/\text{mm}^2$ ,但不需要标出。

$$\text{HBS}(W) = \frac{P}{F}$$

式中:  $F$ ——压痕球面积。

应根据被测金属的种类、性质和厚度按标准选择钢球与载荷的规格。通过用读数放大

镜测量压痕直径,从硬度换算表上可查得硬度值。

(2) 洛氏硬度。洛氏硬度用压痕深度表示。常用的两类压头是  $120^\circ$  锥角的金刚石和直径为 1.588mm 的淬硬钢球。广泛应用的洛氏硬度测试法有 HRA、HRB 和 HRC 三种。

洛氏硬度测试的原理可用图 1-14 来说明。先加预载荷  $P_1$ ,使压头与试样表面紧密接触,并压入到  $h_0$  的位置,作为衡量压入深度的起点;后加主载荷  $P_2$ ,使压头继续压入到深度  $h_1$ ;然后卸除  $P_2$  而保留  $P_1$ , $h_2$  是试样弹性变形的恢复高度, $h$  则是压头在主载荷作用下压入金属表面的深度。因此, $h$  值的大小即可以衡量材料对局部表面塑性变形的抗力,即材料的硬度。 $h$  值越小,材料越硬。

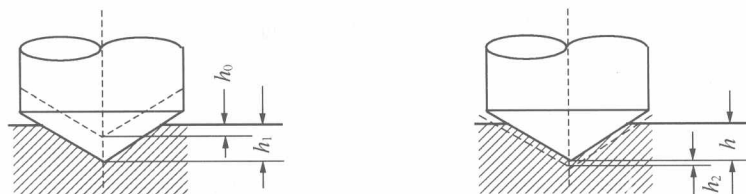


图 1-14 洛氏硬度测试原理

(3) 维氏硬度。维氏硬度测试的基本原理与布氏硬度相近,也是以压痕单位面积上的载荷计量硬度值。但维氏硬度采用锥面夹角  $136^\circ$  的金刚石正四棱锥体作为压头。载荷  $P$  除以四方锥形表面积  $F$ ,即为维氏硬度值。

$$HV = \frac{P}{F} (\text{kg} \cdot \text{f}/\text{mm}^2)$$

用读数放大镜测出压痕两条对角线的平均长度,就可从硬度换算表中查得试样的维氏硬度值。维氏硬度的特点是载荷小,压入深度浅,适用于成品和薄层检验。

## 二、动载荷下的机械性能

动载荷作用下材料失效的现象更复杂。常见的动载荷机械性能有冲击韧性和抗疲劳性能等。

工程上常以材料破裂前所吸收的能量来表示其受冲击载荷的能力,称为冲击韧性。冲击韧性用摆锤式冲击试验法测定,其试验方法和原理如图 1-15 所示。

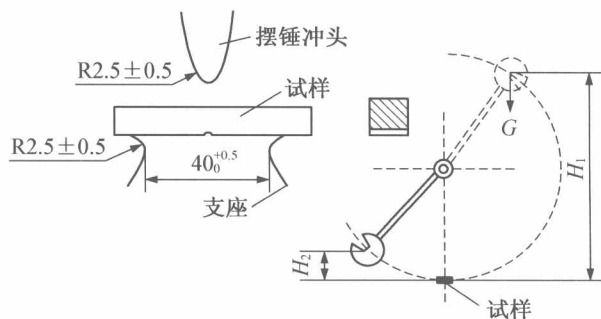


图 1-15 冲击试验

测试时试样放在摆锤冲击试验机的支座上,将重量为  $G$  的摆锤举至  $H_1$  的高度,然后释放落下,冲断试样,并摆过支座回升到  $H_2$  的高度,其位能的损失即为冲断试样所做的功,称为冲击功  $A_k$ 。

$$A_k = GH_1 - GH_2 (\text{kJ})$$

$A_k$  值除以断口截面积  $F$ ,即为冲击值  $a_k$ 。

$$a_k = \frac{A_k}{F} = \frac{GH_1 - GH_2}{F} (\text{kJ/m}^2 \text{ 或 } \text{J/cm}^2)$$

式中,冲击值  $a_k$  即为材料冲击韧性的指标,它作为材料抵抗冲击载荷的性能指标,用来评定材料的韧性程度与金属零件在冲击载荷下使用时的可靠性。

### 复习思考题

1. 金属晶格的常见类型有哪 3 种? 试画出它们的晶胞示意图。
2. 试述纯金属的结晶过程。
3. 何谓过冷度? 影响过冷度大小的因素是什么?
4. 固溶体有哪两种类型? 碳溶入铁中形成的固溶体一般属于哪一类?
5. 绘出低碳钢应力-伸长曲线,并指出拉伸时的几个阶段。
6. 何谓强度? 强度的主要指标有哪几种? 写出它们的符号和单位。
7. 何谓塑性? 材料的塑性指标有哪几种? 写出它们的符号。
8. 何谓硬度? 硬度试验方法主要有哪几种?
9. 何谓冲击韧性? 写出冲击韧性的符号及单位。
10. 简述提高金属强度的方法。

## 第二章 铁碳合金

### 第一节 概述

钢和生铁都是铁碳合金,含碳小于 2.11% 的铁碳合金称为钢,大于 2.11% 的则称为生铁。由于它们的机械性能好,且铁矿储量大,冶炼也较方便,因此钢和生铁是工业中应用最广的合金。为了对钢和生铁的内部组织及其变化规律进行系统地了解,以便更好地利用它们,并且为制定热处理、压力加工等工艺规程打下基础,必须首先研究铁碳合金状态图。

铁碳合金状态图如图 2-1 所示。图中左上角已经简化,因为该部分在实际应用中意义不大。此外,该图是含碳在 6.67% 以下的部分。因为含碳 5% 以上的铁碳合金性能很脆,没有实用价值,而且  $\text{Fe}_3\text{C}$  中的含碳量是 6.67%,  $\text{Fe}_3\text{C}$  是一个稳定的化合物,可以看作一个组元。因此,这里所研究的铁碳合金状态图实际上是 Fe 与  $\text{Fe}_3\text{C}$  两组元所构成的状态图。

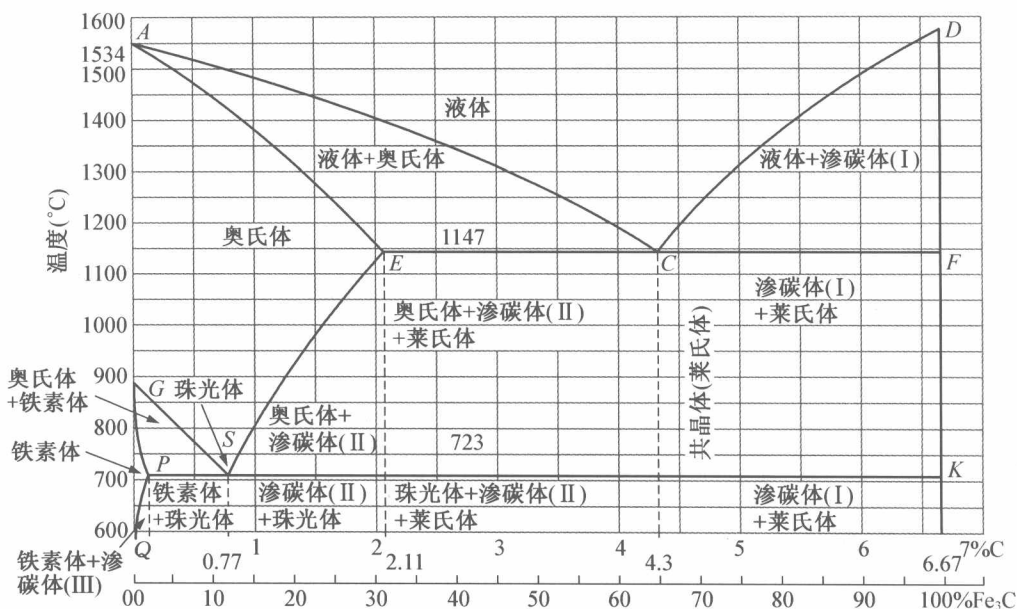


图 2-1 铁碳合金状态图

一、铁(Fe)

根据铁的同素异晶转变可知,在 910℃ 以下铁呈体心立方晶格  $\alpha$ -Fe,在 910~1390℃ 之间呈面心立方晶格  $\gamma$ -Fe。碳既溶于  $\alpha$ -Fe,也溶于  $\gamma$ -Fe 形成有限固液体。

碳溶于  $\alpha$ -Fe 中的固溶体称为铁素体。由于  $\alpha$ -Fe 中能溶解的碳很少(0.008%~0.02%),因此铁素体的性质与纯铁相近,强度、硬度较低,塑性很好( $\sigma_b=250\text{MPa}$ ,HBS=80, $\delta=50\%$ )。

碳溶于  $\gamma$ -Fe 中的固溶体称为奥氏体。碳在  $\gamma$ -Fe 中的溶解度为 0.77%~2.11%,随温度降低而降低,1147℃ 时为 2.11%,723℃ 时降至 0.77%。奥氏体无磁性,塑性高。

二、渗碳体( $\text{Fe}_3\text{C}$ )

渗碳体的晶格很复杂,硬度很高(HBS=800),塑性极低( $\delta\approx 0$ )。 $\text{Fe}_3\text{C}$  在一定的条件下可以分解为铁和石墨。

根据组元分析可知,在铁碳合金状态图中存在液相以及铁素体、奥氏体和渗碳体 3 个固相,图中其他组织是由这 4 个相变化而成的。

为了方便起见,将状态图分成两部分来研究。

首先研究其初次结晶过程,即由液态到固态的结晶过程。为此,将状态图的上半部单独绘出,如图 2-2 所示。

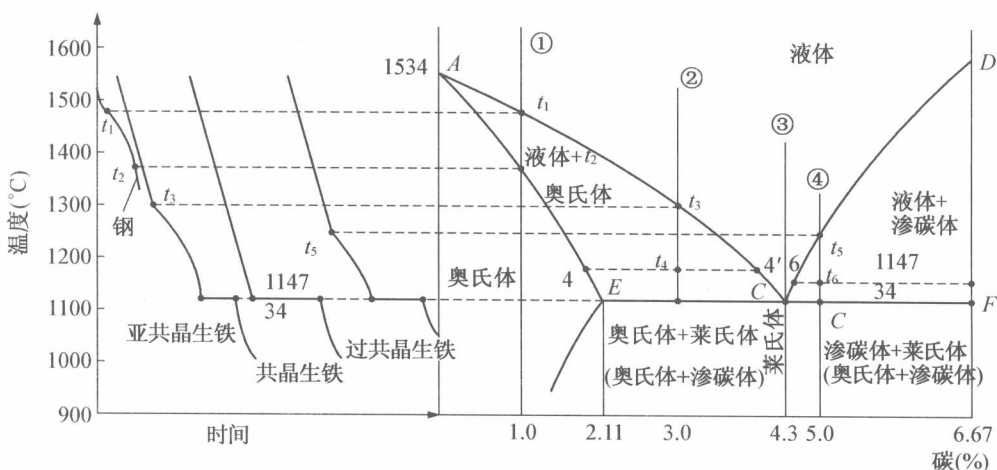


图 2-2 铁碳合金状态图的初次结晶部分



图中,  $ACD$  线为液相线,  $AECF$  线为固相线。  $A$  点为纯铁的熔点 ( $1534^{\circ}\text{C}$ ),  $D$  点为  $\text{Fe}_3\text{C}$  的熔点,  $C$  点称为共晶点。所谓共晶, 是指合金在一定的条件(温度、成分)下, 由液体合金中同时结晶出两种不同的晶体, 形成一种特殊的共晶体组织的过程。铁碳合金中, 共晶点的温度是  $1147^{\circ}\text{C}$ , 共晶点的成分是  $4.3\%$  的碳  $C$ 。即含碳量为  $4.3\%$  的铁碳合金在  $1147^{\circ}\text{C}$  时, 从液体合金中同时结晶出渗碳体晶体和奥氏体晶体(此时奥氏体的含碳量为  $2.11\%$ , 即  $E$  点的含碳量), 形成一种称为莱氏体的共晶体组织。

其反应式可写成:



共晶转变同纯金属的结晶过程一样是在恒温下进行的, 因此在冷却曲线上也形成一段水平线(图 2-2 中左侧共晶生铁的冷却曲线)。

共晶体是一种机械混合物, 它的熔点低, 铸造性能好, 但塑性低。

现选择含碳量为  $1\%$ 、 $3\%$  和  $5\%$  这 3 种成分的铁碳合金来分析它们的结晶过程。

含碳量为  $1\%$  的合金①的结晶过程与铜镍合金相似。在  $t_1$  温度时开始结晶, 从液体中结晶出奥氏体的晶体。随着温度的下降, 奥氏体逐渐增多, 液体逐渐减少。奥氏体与液体的成分各沿着固相线  $AE$  和液相线  $AC$  变化。温度降至  $t_2$  时结晶结束, 凝固后的合金组织仅由奥氏体晶体组成。

含碳量小于  $2.11\%$  的铁碳合金(钢)的初次结晶过程与上述相似, 且凝固后均由单相奥氏体组成。

含碳量为  $3\%$  的合金②在  $t_3$  温度时开始结晶, 从液体中结晶出奥氏体。随着温度的下降, 奥氏体不断增加, 液体不断减少。根据上述可知, 奥氏体的成分沿固相线向  $E$  点变化, 液体的成分沿液相线向  $C$  点变化。例如, 在  $t_4$  温度时, 奥氏体的成分由点 4 决定, 液体的成分由点 4' 决定。当温度降至  $EC$  线的温度, 即  $1147^{\circ}\text{C}$  时, 奥氏体具有  $E$  点成分(含碳量为  $2.11\%$ ), 而液体成分则具有共晶成分(含碳量为  $4.3\%$ ), 此时剩余的液体必将发生共晶转变, 生成共晶体—莱氏体。因此, 合金②凝固后的内部组织由在共晶温度以上形成的奥氏体和共晶温度时形成的莱氏体组成。

所有含碳量在  $2.11\% \sim 4.3\%$  之间的铁碳合金(亚共晶生铁), 其结晶过程皆与此相似, 只是奥氏体和莱氏体的相对量不同而已。含碳量愈接近共晶成分, 莱氏体愈多, 奥氏体愈少。

含碳量为  $4.3\%$  的铁碳合金(共晶生铁)是在恒温下( $1147^{\circ}\text{C}$ )进行结晶的, 凝固后全部形成莱氏体。

含碳量为  $5\%$  的合金④在  $t_5$  温度时开始结晶, 从液体中先结晶出渗碳体的晶体, 液体的成分沿液相线  $DC$  向  $C$  点变化。例如, 在  $t_6$  温度时, 作水平线交  $DC$  于点 6, 则点 6 代表在  $t_6$  温度时液体的成分。当温度降至共晶温度  $1147^{\circ}\text{C}$  时, 剩余液体也具有共晶成分, 因而也发生共晶转变, 生成莱氏体。因此, 合金④凝固后由在共晶温度以上形成的渗碳体和共晶温度时形成的莱氏体组成。

所有含碳量大于  $4.3\%$  的铁碳合金(过共晶生铁), 其结晶过程皆与此相似。

综上所述, 含碳量大于  $2.11\%$  的铁碳合金(生铁)当温度降至  $ECF$  线, 即降至  $1147^{\circ}\text{C}$  时, 都将发生共晶转变, 生成共晶体—莱氏体。因此,  $ECF$  线又称共晶线。而含碳量小于