



普通高校“十三五”规划教材

余以道 刘平 潘钧颂 肖思文 主编  
胡忠举 郭迎福 主审

# 机械概论

JIXIE GAILUN

(第2版)



北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高校“十三五”规划教材

# 机械概论

(第2版)

余以道 刘平 潘钧颂 肖思文 主 编  
胡忠举 郭迎福 主 审

北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书的主要内容包括金属材料及热处理基础、机械传动基础、液压传动基础、机械制造基础、金属切削加工工艺规程及经济分析基础共五篇内容。书中介绍了金属材料的主要性能特点和热处理基础知识及常用方法;常用机构、常用机械传动装置、轮系和轴系零部件;液压传动的原理与特点,液压泵、液压电动机和液压缸,液压控制阀、液压辅件和液压基本回路;金属热加工和金属切削加工的各种加工方法;金属切削加工工艺基础、工艺规程及其经济分析。

全书内容精炼,编写时注意简化基本理论的叙述,注重联系生产实际,内容尽量采用3D视图表述,每章后面附有练习题。

本书可作为高等院校本科、高职高专的经济类、管理类、电气工程、自动化、数控技术、计算机应用等非机械类专业学生的教材,也可作为有关专业技术人员的自学教材和参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械概论 / 余以道等主编. -- 2版. -- 北京:北京航空航天大学出版社, 2016.3  
ISBN 978-7-5124-2065-6

I. ①机… II. ①余… III. ①机械学—高等学校—教材 IV. ①TH11  
中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第042790号  
版权所有,侵权必究。

### 机械概论(第2版)

余以道 刘平 潘钧颂 肖思文 主编  
胡忠举 郭迎福 主审  
责任编辑 金友泉 蔡喆

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×1092 1/16 印张:12.75 字数:326千字

2016年3月第2版 2016年3月第1次印刷 印数:3000册

ISBN 978-7-5124-2065-6 定价:28.00元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:010-82317024

## 第 2 版前言

机械学科是人类文明发展史上最古老的学科之一,随着科学技术的发展,今天的机械学科已经融入到了国民经济的各个领域。

本书是为高等院校非机械类专业编写的工业技术基础教材,注重基本概念、基本理论、基本方法、基本结构和用途的介绍,课内学时为 40 个左右。使近机械类及非机械类专业学生做到专博结合、一专多能,尽快掌握有关机械基础知识。

本书共 5 篇 14 章,主要内容包括金属材料及热处理基础、机械传动基础、液压传动基础、机械制造基础、金属切削加工工艺规程及经济分析基础。书中介绍了金属材料的主要性能特点,热处理基础知识及常用方法;常用机构,常用机械传动装置,轮系和轴系零部件;液压传动的原理与特点,液压泵、液压电动机和液压缸,液压控制阀,液压辅件,液压基本回路;金属热加工和金属切削加工的各种加工方法;金属切削加工工艺基础,工艺规程及其经济分析。

在教材编写过程中,根据非机械类专业的特点,力求简化理论,突出重点,强调理论与工程实践的结合、技术与经济管理的结合。内容阐述深入浅出,通俗易懂,书中插图采用 3D 视图,便于学生自学理解,着力体现本教材综合性、实践性和可读性的特征。

本书在修订时,改正了第 1 版中的个别错误,修正了个别插图,并增补了一些内容。本书改版后仍可作为高等院校本科、高职高专的经济类、管理类、电气工程、自动化、数控技术、计算机应用等非机械类专业学生的教材,也可作为有关专业技术人员的自学教材和参考书。

参加本教材编写工作的有湖南科技大学余以道(第 4、5、6 章),湖南科技大学刘平(第 10、11 章),湖南科技大学潘钧颂(第 7、8、9 章),湖南科技大学肖思文(第 1、2、3、12、13、14 章),全书由余以道统稿。本书由湖南科技大学胡忠举、郭迎福主审。

本书在编写过程中,参阅和引用了部分院校的教材、有关机械手册和资料的部分内容,谨向相关作者和出版社表示诚挚的谢意。

限于编者水平,书中定有不妥之处,敬请广大读者和有关专家学者不吝批评指正,并将宝贵意见反馈作者。

编 者

2015 年 12 月

# 目 录

## 第一篇 金属材料及热处理基础

第 1 章 金属材料的基本知识	1
1.1 金属材料的主要性能	1
1.2 铁碳合金的结构	6
1.3 钢的热处理方法	9
练习思考题	13
第 2 章 黑色金属材料	14
2.1 碳素钢	14
2.2 合金钢	15
2.3 铸铁	17
练习思考题	18
第 3 章 非铁金属	19
3.1 铝及铝合金	19
3.2 铜及铜合金	19
3.3 硬质合金	20
3.4 滑动轴承合金	21
练习思考题	21

## 第二篇 机械传动基础

第 4 章 常用机构	22
4.1 基本概念	22
4.2 平面连杆机构	25
4.3 凸轮机构	30
4.4 螺旋机构	33
4.5 间歇运动结构	35
练习思考题	37
第 5 章 常用机械传动装置	38
5.1 带传动	38
5.2 链传动	41
5.3 齿轮传动	41
5.4 蜗杆传动	51
练习思考题	52

<b>第6章 轴、轴承、联轴器与离合器</b> .....	53
6.1 轴 .....	53
6.2 轴 承 .....	55
6.3 联轴器与离合器 .....	58
练习思考题 .....	61

### 第三篇 液压传动基础

<b>第7章 液压传动基本知识</b> .....	62
7.1 液压传动的工作原理和组成 .....	62
7.2 液压传动的特点 .....	64
7.3 液压传动的两个基本参数——压力、流量 .....	64
7.4 液压传动用油的选择和使用 .....	67
练习思考题 .....	68
<b>第8章 液压元件</b> .....	69
8.1 动力元件 .....	69
8.2 执行元件 .....	74
8.3 控制元件 .....	77
8.4 辅助元件 .....	91
练习思考题 .....	97
<b>第9章 液压基本回路</b> .....	99
9.1 速度控制回路 .....	99
9.2 压力控制回路 .....	104
9.3 多缸配合动作回路 .....	109
练习思考题 .....	113

### 第四篇 机械制造基础

<b>第10章 金属的成型基础</b> .....	116
10.1 铸造成型 .....	116
10.2 锻压成型 .....	122
10.3 焊接成型 .....	129
练习思考题 .....	134
<b>第11章 金属切削加工</b> .....	135
11.1 切削加工基础 .....	135
11.2 车削加工 .....	141
11.3 铣削加工 .....	144
11.4 刨削加工 .....	146
11.5 钻削加工 .....	148
11.6 磨削加工 .....	151
习题思考题 .....	153

## 第五篇 金属切削加工工艺规程及经济分析基础

<b>第 12 章 概 述</b> .....	154
12.1 工艺过程的概念及组成 .....	154
12.2 生产类型对工艺过程的影响 .....	159
练习思考题 .....	161
<b>第 13 章 金属切削加工工艺过程</b> .....	162
13.1 加工工艺规程及其作用 .....	162
13.2 加工工艺规程的制定 .....	163
13.3 工艺文件 .....	177
13.4 典型零件的工艺过程 .....	180
练习思考题 .....	186
<b>第 14 章 工艺规程的经济分析</b> .....	187
14.1 机械加工的经济性 .....	187
14.2 机械加工的技术经济指标 .....	187
14.3 工艺方案的技术经济分析 .....	189
练习思考题 .....	194

### 参考文献

# 第一篇 金属材料及热处理基础

金属材料由纯金属和合金两部分组成。它是现代工业、农业、国防及科学技术的重要物质基础。生产中各类机器设备、仪器仪表的制造都需要使用大量的金属材料。

本篇将研究金属材料及合金的性能与用途；金属及合金的结构、组织与性能三者之间的关系；改变金属与合金组织及工艺性能的方法等。

## 第 1 章 金属材料的基本知识

### 1.1 金属材料的主要性能

由纯金属元素组成,或以金属元素为主而组成的具有金属特性的物质统称为金属材料。由两种或两种以上金属元素,或金属元素和非金属元素组成的具有金属特性的物质称为合金。比如纯铜是由铜元素组成的金属材料;钢是由铁(Fe)和碳(C)两种元素组成的合金;黄铜是由铜(Cu)和锌(Zn)两种元素组成的合金。因为合金的力学性能和工艺性能比纯金属好,成本比纯金属低,所以,工业上使用的金属材料主要为合金,极少用纯金属。

金属材料的性能包括力学性能、物理性能、化学性能和工艺性能等,它是机械产品选材及机械零件加工工艺方案拟定的依据。金属材料性能的好坏,直接影响着金属零件及其制品的质量、使用寿命和加工成本。当金属材料作为结构材料使用时,主要以其力学性能指标作为选材依据。

#### 1.1.1 金属及合金的力学性能

在外加载荷(外力)作用下,金属材料所表现出来的抵抗变形和破坏的能力称为金属(合金)的力学性能。由于外加载荷(含静载荷、动载荷和交变载荷)的作用形式不同,金属材料抵抗外力的能力也不同。金属材料常用的力学性能有强度、塑性、硬度、冲击韧度及疲劳强度等。

##### 1. 强 度

金属材料在外加载荷作用下,抵抗永久变形和破坏的能力称为强度。金属材料的强度越高,抵抗外力变形和破坏的能力越大。由于载荷作用方式的不同,强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗扭强度和抗剪强度。工程上常用的强度指标为屈服强度和抗拉强度。各种材料之间强度的比较一般用应力来表示,应力是单位面积材料承受的内力,单位为 Pa,实际中常用 MPa(兆帕)表示,1 MPa=10<sup>6</sup> Pa 或 1 MPa=1 N/mm<sup>2</sup>,1 Pa=1 N/m<sup>2</sup>。

##### (1) 屈服强度

材料承受载荷到一定数值后不再增加载荷,而塑性变形仍然继续发生的现象称为屈服,材料产生屈服时的最小应力称为屈服强度  $\sigma_s$  (MPa)。



$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0} \quad (1-1)$$

式中:  $F_s$  为屈服时承受的载荷(N);  $A_0$  为试样原始横截面积( $\text{mm}^2$ )。

对于高碳钢、铸铁等脆性材料,经受载后一般无明显屈服现象,这时屈服点的测量很困难。工程上常用残余伸长为 0.2% 原长时的应力  $\sigma_{0.2}$  值作为屈服强度指标,该指标称为规定残余伸长应力,即

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{A_0} \quad (1-2)$$

## (2) 抗拉强度

试样在被拉断前所能承受的最大应力值称为抗拉强度  $\sigma_b$  (MPa), 即

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0} \quad (1-3)$$

式中:  $F_b$  为试样拉断前承受的最大载荷(N);  $A_0$  为试样原始横截面积( $\text{mm}^2$ )。

一般情况下,机械零件都是在弹性状态下工作的,不允许发生微小的塑性变形,所以要求材料必须在低于  $\sigma_s$  的载荷条件下工作,以免引起零件的塑性变形。当然,材料也不能在超过  $\sigma_b$  的载荷条件下工作,否则容易使机械零件破坏。

## (3) 拉伸曲线

把标准试样装夹在万能试验机上,缓慢加载拉伸,使试样在外加载荷作用下,不断伸长直至拉断,此过程载荷  $F$  与试样伸长量  $\Delta L$  之间形成的曲线称为拉伸曲线。拉伸曲线一般由试验机自动绘出,金属材料的强度指标可通过拉伸试验测定。

图 1-1 为低碳钢(退火状态)的拉伸曲线,图中纵坐标代表载荷  $F$  (N); 横坐标代表绝对伸长量  $\Delta L$  (mm)。从图 1-1 中可以看出,  $F=0$  时,  $\Delta L=0$ ; 缓慢加载使载荷从  $0 \rightarrow F_e$  时,  $\Delta L$  成比例增加,此阶段为弹性变形阶段,若在该阶段卸除载荷,试样能恢复原样。当载荷从  $F_e \rightarrow F_s$  时,  $\Delta L$  不再成比例伸长,该阶段为塑性变形(永久变形)阶段,若此时卸除载荷,试样不能完全恢复原样。当载荷从  $F_s \rightarrow F_d$  时,曲线接近水平,此阶段表示即使不再增加载荷,试样继续伸长,该阶段为屈服阶段。当载荷增至最大值  $F_b$  时,试样伸长量  $\Delta L$  剧增,截面积迅速变小形成“缩颈”,使得缩颈处单位面积承受的载荷大为增加,最后至  $k$  点断裂,所以  $bk$  段为缩颈阶段。

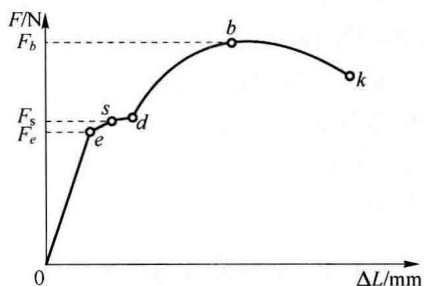


图 1-1 低碳钢(退火状态)拉伸曲线图

当载荷增至最大值  $F_b$  时,试样伸长量  $\Delta L$  剧增,截面积迅速变小形成“缩颈”,使得缩颈处单位面积承受的载荷大为增加,最后至  $k$  点断裂,所以  $bk$  段为缩颈阶段。

## 2. 塑性

金属材料在载荷作用下产生塑性变形而不会断裂的能力称为塑性。常用的塑性指标有断后伸长率和断面收缩率,这两项指标一般通过拉伸实验测定。

### (1) 断后伸长率 $\delta$

试样被拉断后,总伸长量与原始长度比值的百分比称为断后伸长率或延伸率,用符号  $\delta$  表示,即

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中:  $L_0$  指试样原始长度(mm);  $L_1$  指试样拉断后长度(mm)。

试样尺寸不同,  $\delta$  值的大小也不同。实验测定时, 一般采用计算长度等于其直径 5 倍或 10 倍的标准试样, 断后伸长率代号分别用  $\delta_5$  或  $\delta_{10}$  表示。

### (2) 断面收缩率 $\psi$

试样被拉断时, 缩颈处横截面积最大缩减量与原始横截面积比值的百分比称为断面收缩率, 用符号  $\psi$  表示, 即

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中:  $A_0$  指试样原始横截面积( $\text{mm}^2$ );  $A_1$  指试样断口处横截面积( $\text{mm}^2$ )。

一般情况下,  $\delta$  值或  $\psi$  值越大, 金属材料的塑性越好, 零件越能承受大的负荷而不至于突然断裂。比如低碳钢塑性好, 能承受大的负荷, 常用于冷冲压、冷拔和锻打等压力加工; 而高碳钢、铸铁、陶瓷等塑性差, 受力时容易突然断裂, 一般不进行压力加工。

## 3. 硬 度

材料抵抗局部变形、压痕或划痕的能力称为硬度。硬度是衡量材料软硬程度的力学性能指标, 硬度越高, 耐磨性越好。常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度。

### (1) 布氏硬度 HB

测试原理如图 1-2 所示, 采用直径为  $\Phi D$  的淬火钢球或硬质合金球作为压头, 在布氏硬度计上压头规定的载荷  $F$  的作用下, 压入被测金属表面, 保持一定时间后卸除载荷, 计算压痕单位面积上所承受的平均压力, 该值为布氏硬度值, 即

$$HB = \frac{F}{A_{\text{压}}} \quad (1-6)$$

式中:  $F$  指试验力(N);  $A_{\text{压}}$  指压痕表面积( $\text{mm}^2$ )。

当压头为淬火钢球时, 测定的布氏硬度值用 HBS 表示; 当压头为硬质合金球时, 测定的布氏硬度值用 HBW 表示。

实际工作中, 布氏硬度值一般并不需要计算, 只要用放大镜测出压痕直径  $\Phi d$  的大小, 查表得出 HB 值即可。比如测量钢铁(厚度  $> 6 \text{ mm}$ ) 材料硬度时, 通常采用直径  $\Phi 10 \text{ mm}$  的淬火钢球施加  $3 \times 10^4 \text{ N}$  的载荷, 再用放大镜测出压痕直径  $\Phi d$ , 查表得出 HB 值。由于布氏硬度试验留下的压痕较大, 能反映较大范围内金属各组成部分的平均性能, 试验结果较准确。在测定低碳钢、灰铸铁、有色金属及未经淬火的中碳结构钢等材料的硬度时, 一般采用布氏硬度; 但对材料硬度高 ( $HB > 450$ ), 表面要求高或薄壁类零件硬度的测定, 不宜用布氏硬度。

### (2) 洛氏硬度 HR

洛氏硬度通过测量压痕深度大小来衡量材料硬度高低, 压痕越深, 硬度越低。测试原理如图 1-3 所示, 用锥顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥体或  $\Phi 1.588 \text{ mm}$  ( $1/16 \text{ in}$ ) 的淬火钢球作为压头压入金属表面。为保证测量精度, 先要轻施初载荷使压头与试样表面接触良好, 再施加主载荷保持一定时间后卸除, 由压痕深度  $h$  值的大小确定材料的洛氏硬度值。

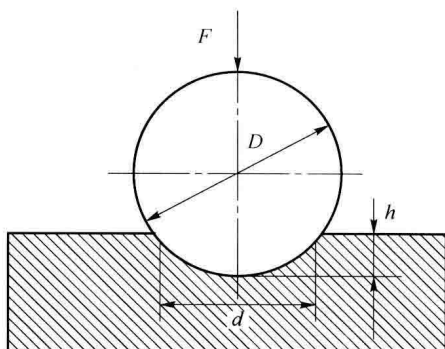


图 1-2 布氏硬度试验法

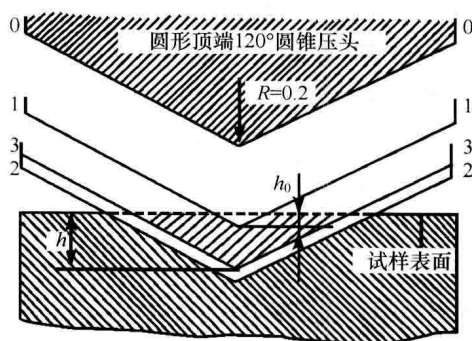


图 1-3 洛氏硬度试验法

洛氏硬度值不用计算,从表盘上直接读出即可。为适应不同材料的不同硬度,洛氏硬度试验机上用 A、B、C 三种标尺分别代表三种载荷值,测得的硬度为 HRA、HRB 和 HRC。A、B、C 三种标尺压头的类型、载荷及应用范围如表 1-1 所列。

表 1-1 洛氏硬度试验条件及应用范围

符 号		压头类型	载荷 $F/N$		应 用
标尺	硬度值		初	总	
A	HRA	120°金刚石圆锥体	100	600	硬质合金、表面淬火、渗碳钢
B	HRB	Φ1.588 mm 钢球	100	1 000	非金属、退火及正火钢、铜合金
C	HRC	120°金刚石圆锥体	100	1 500	淬火钢、调质钢及硬度高的工件

#### 4. 冲击韧度

金属材料抵抗冲击载荷作用而不被破坏的能力称为冲击韧度。机器上的某些零件(如飞机起落架、冷冲模上的冲头、汽车启动和刹车装置等)在工作时经常要承受短时冲击载荷。对这类需要承受冲击载荷的零件和结构,除了要有高的强度和一定的塑性外,还要有足够的冲击韧度。冲击韧度的测定原理如图 1-4 所示,选取带 V 型或 U 型缺口的标准试样一件,放在冲击试验机支座上,由置于一定高度的重锤自由落下并一次冲断试样,冲击韧度值  $\alpha_k$  ( $J/cm^2$ ) 等于试样缺口处单位截面积上所消耗的冲击功,即

$$\alpha_k = \frac{W_k}{A} \quad (1-7)$$

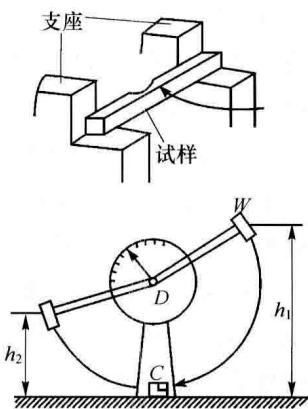


图 1-4 冲击韧度的测定示意图

式中: $W_k$  为冲击功(J); $A$  为试样断口处的横截面积( $cm^2$ )。  $\alpha_k$  值越大,材料的韧性越好,受冲击时越不容易断裂。常用的冲击试验机能直接从刻度盘上读出冲击功,不需要计算。

#### 5. 疲劳强度

机器中的许多零件(比如齿轮、连杆、轴、弹簧等)在工作时经常要承受交变载荷的循环作用。这种交变载荷虽然小于材料的强度极限,但经多次循环后,容易在没有明显塑性变形的情况下突然断裂。金属在交变载荷的循环作用下产生疲劳裂纹并使其扩展而导致的断裂称为疲

劳破坏或疲劳断裂。疲劳破坏是在没有预兆的情况下突然发生的,大部分工作中被损坏的机械零件都属于疲劳破坏。疲劳破坏经常发生且极具危险性,常造成严重事故。

材料在指定的循环基数下不产生断裂时,所能承受的最大应力称为疲劳强度( $\sigma_{-1}$ )。疲劳强度的大小与应力变化次数有关,按照一般的规定,黑色金属材料循环次数为  $10^6 \sim 10^7$  次,有色金属材料循环次数为  $10^8$  次。

疲劳破坏断裂的原因很多,普遍认为,当材料表面有划痕、缺口,材料内部有气孔、夹杂物,或长期处在交变应力的反复作用下时,零件容易出现疲劳断裂。为了提高机械零件的疲劳强度,延长其使用寿命,可通过采取改善零件的内部组织,改变零件的外部结构形状(如避免尖角),以减小和避免应力集中,减少表面碰伤、刀痕,对零件进行表面热处理、表面强化处理等方法来实现。

### 1.1.2 金属及合金的工艺性能

金属材料对不同加工工艺方法的适应能力称为金属材料的工艺性能。金属材料的工艺性能反映了金属材料接受各种加工及处理时难易的适应程度,对零件的制造工艺、产品质量、加工生产率和生产成本等均有极大的影响。不同的加工、成型和处理方法,对金属材料工艺性能的要求也不同,材料的工艺性能必须与之相适应。金属材料常用的工艺性能包括铸造性能、锻造性能、切削加工性能和焊接性能等。

#### 1. 铸造性能

金属及其合金在铸造工艺过程中,获得优良铸件的能力称为铸造性能。衡量铸造性能好坏的主要指标包括流动性、收缩性和偏析倾向。

##### (1) 流动性

金属熔融后的流动能力称为流动性,流动性主要受金属化学成分和浇注温度的影响。金属的流动性越好,越容易充满铸型,越能获得外形完整、尺寸精确、轮廓清晰的铸件。

##### (2) 收缩性

铸件冷却或凝固时,铸件尺寸或体积减少的现象称为收缩性。铸件的收缩轻则影响着尺寸的精度,严重时还会使铸件产生疏松、缩孔、变形、内应力和开裂等缺陷。如图 1-5 所示的圆筒形铸件,其收缩时转角处容易产生缩孔和裂缝。一般来说,金属的收缩率越小,铸造性能越好。

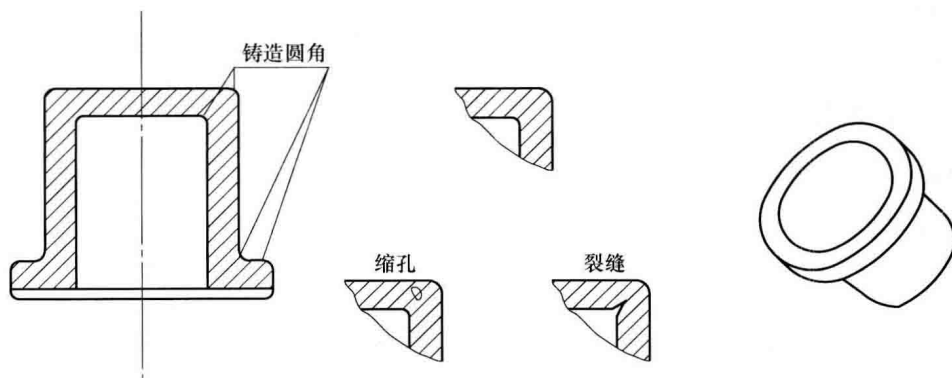


图 1-5 铸件收缩时产生的缩孔、裂缝

### (3) 偏析倾向

金属凝固后,出现内部化学成分及组织不均匀的现象称为偏析。偏析严重时会降低铸件的质量,并使铸件各部分的力学性能产生差异,偏析的存在对大型铸件的危害极大。

### 2. 锻造性能

金属及其合金采用锻压成型的方法,获得优良锻件的难易程度称为锻造性能。锻造性能的好坏取决于金属塑性及变形抗力,塑性越好,变形抗力越小,金属的锻造性能越好。常温下黄铜及铝合金的锻造性能良好,加热状态下的碳钢锻造性能较好,铸件材料则不能进行锻压。

### 3. 切削加工性能

金属材料切削加工的难易程度称为切削加工性能。切削加工性能的好坏取决于工件切削后的表面光洁度以及刀具的使用寿命等。影响金属切削加工的因素很多,主要有工件的化学成分、工件硬度、材料塑性、形变强度和导热性等。通常铸铁的切削加工性能优于钢,普通碳钢的切削加工性能优于高合金钢。工业生产中,常采用适当的热处理方式或改变钢的化学成分的方式来改善钢的切削加工性能。

### 4. 焊接性能

金属材料对焊接加工的适应能力(或在一定的焊接工艺条件下,获得高质量焊接接头的难易程度)称为焊接性能。碳钢及低合金钢的焊接性能取决于碳含量及其化学成分,低碳钢焊接性能良好,高碳钢和铸件的焊接性能较差。

## 1.2 铁碳合金的结构

由铁和碳两种元素为主而组成的金属材料称为铁碳合金。铁碳合金按含碳量多少分为工业纯铁、钢和生铁。工业纯铁含碳量低( $\omega_c < 0.0218\%$ ),塑性好,强度、硬度很低,不耐磨,所以极少用来制造机器零件。在纯铁中加入少量碳元素后变成钢(钢为 $\omega_c = 0.0218\% \sim 2.11\%$ 的铁碳合金),钢的组织 and 性能不同于纯铁,强度和硬度明显提高,在工业生产中被广泛使用。根据含碳量及室温的不同,钢又分为共析钢( $\omega_c = 0.77\%$ )、亚共析钢( $\omega_c < 0.77\%$ )和过共析钢( $\omega_c > 0.77\%$ )三种。当纯铁中碳元素含量继续增大至 $2.11\% < \omega_c < 6.69\%$ 时变成白口铁。白口铁按室温的不同,分为共晶白口铁( $\omega_c = 4.3\%$ )、亚共晶白口铁( $2.11\% < \omega_c < 4.3\%$ )和过共晶白口铁( $4.3\% < \omega_c < 6.69\%$ )。

### 1.2.1 铁碳合金组织

在铁碳合金中,碳可以溶解在铁中形成固溶体(固溶体指溶质原子溶入金属溶剂的晶格中所组成的合金相),或形成化合物与固溶体的机械混合物(机械混合物指由纯金属、固溶体、金属化合物这些合金的基本相按照固定比例构成的组织);碳也可以与铁形成一系列金属化合物(如 $\text{Fe}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_2\text{C}$ 及 $\text{FeC}$ 等)。常用的铁碳合金在固态时的基本组织有:铁素体、奥氏体、渗碳体、珠光体和莱氏体。碳溶于 $\alpha\text{-Fe}$ 中形成的间隙固溶体称为铁素体,用符号F表示。碳溶于 $\gamma\text{-Fe}$ 中形成的间隙固溶体称为奥氏体,用符号A表示;碳与铁形成的具有复杂晶格的金属化合物称为渗碳体,用符号 $\text{Fe}_3\text{C}$ 表示;由软的铁素体片和硬的渗碳体片相间组合而成的机械混合物称为珠光体,用符号P表示;碳的质量分数为 $4.3\%$ 的液态铁碳合金,在冷却到 $1148\text{ }^\circ\text{C}$ 时,由液态中同时结晶出奥氏体和渗碳体的共晶体称为莱氏体,用符号Ld表示。各种基本组

织的形成机理及综合性能如表 1-2 所列。

钢中含碳量越高,渗碳体所占质量密度越大,强度、硬度越高,塑性、韧性越低。渗碳体在一定的条件下,可以分解为铁和自由状态的石墨,即

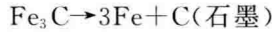


表 1-2 铁碳合金基本组织形成机理与性能

组织名称(代号)	形成机理	综合性能
铁素体(F)	碳溶于 $\alpha$ -Fe中形成的间隙固溶体, $\alpha$ -Fe体心立方结构保持不变,碳溶解度小	含碳量低,强度及硬度低,塑性及韧性好,性能近似工业纯铁
奥氏体(A)	碳溶于 $\gamma$ -Fe中形成的间隙固溶体, $\gamma$ -Fe面心立方结构保持不变,碳溶解度较大	强度及硬度一般,塑性及韧性良好,抗变形能力差,属高温组织
渗碳体( $\text{Fe}_3\text{C}$ )	碳与铁形成的具有复杂晶格的金属化合物	含碳量高( $\omega_{\text{C}}=6.69\%$ ),强度及硬度高,塑性及韧性极低
珠光体(P)	由软的铁素体片和硬的渗碳体片相间组合而成的机械混合物	含碳量高( $\omega_{\text{C}}=0.77\%$ ),有较高的强度和硬度,足够的塑性及韧性
莱氏体(Ld)	$\omega_{\text{C}}=4.3\%$ 的液态铁碳合金,冷却到 $1148^\circ\text{C}$ 时,由液态中同时结晶出奥氏体和渗碳体的共晶体	含碳量 $\omega_{\text{C}}=4.3\%$ ,硬度很高,塑性很差,属白口铸铁的基本组织

### 1.2.2 铁碳合金相图

反映铁碳合金在结晶过程中的温度、合金成分及组织之间关系或状态的图形称为铁碳合金相图,如图 1-6 所示。看图时需注意下列问题:

- ① 铁碳合金相图是在极缓慢冷却(或加热)条件下绘制测定的图形。
- ② 对含碳量高( $\omega_{\text{C}} > 6.69\%$ )的 $\text{Fe}_2\text{C}$ 及 $\text{FeC}$ 来说,因为脆性太大,没有实用价值。所以图 1-6 所示铁碳合金状态图是含碳量为 $0\% \sim 6.69\%$ 的合金部分。
- ③ 当碳的质量分数等于 $6.69\%$ 时,铁元素和碳元素形成的金属化合物 $\text{Fe}_3\text{C}$ 可看成是合金的一个组元,所以铁碳合金相图实际上是 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 的相图。

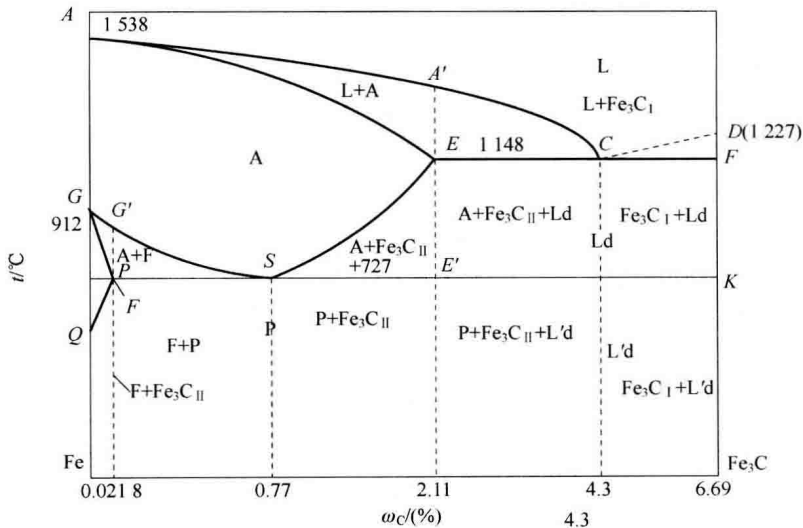


图 1-6 简化的铁碳合金相图

1. Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图分析

铁碳合金相图中,纵坐标代表温度,横坐标代表碳的质量分数。横坐标最左端(坐标原点)碳的质量分数等于零,属纯铁;横坐标最右端碳的质量分数等于 6.69%,是铁碳合金 Fe<sub>3</sub>C。

(1) Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中特性点的含义

铁碳合金相图中用字母标出的点均表示一定特性(成分和温度),这些点称为特性点。各特性点的温度及含义如表 1-3 所列。

表 1-3 铁碳合金相图中的特性点

特性点	$t/^\circ\text{C}$	$\omega_{\text{C}}/(\%)$	含 义
A	1 538	0	纯铁熔点
C	1 148	4.30	共晶点
D	1 227	6.69	渗碳体熔点(按热力学的计算值)
E	1 148	2.11	碳在 $\gamma$ 铁中的最大溶解度
G	912	0	$\alpha$ 铁 $\rightarrow\gamma$ 铁同素异晶转变点
S	727	0.77	共析点
P	727	0.021 8	碳在 $\alpha$ 铁中的最大溶解度
Q	室 温	0.008	室温下碳在 $\alpha$ 铁中的溶解度

(2) Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中图线的含义

铁碳合金相图中各条线实际上是铁碳合金内部组织发生转变时的组织转变线。各线的名称及含义如下:

1) ACD 为液相线 铁碳合金在该线以上温度区域为液态,缓冷至该线时开始结晶。

2) AEC 为固相线 铁碳合金缓冷至该线时,全部结晶为固态,该线以下区域为固态区。简化后的相图中有两条水平线,代表两个等温反应。

① ECF 水平线 该线为共晶转变线(生铁的固相线)。 $\omega_{\text{C}} > 2.11\%$  的液态铁碳合金,缓冷至此线(1 148 $^\circ\text{C}$ )时,均会发生共晶转变,生成莱氏体(Ld),即



② PSK 水平线 该线为共析反应线,又称 A<sub>1</sub> 线。反应产物为珠光体(铁素体和渗碳体的机械混合物)。 $\omega_{\text{C}} > 0.021 8\%$  的铁碳合金,缓冷至此线(727 $^\circ\text{C}$ )时,均发生共析转变,由奥氏体变为珠光体(P),即



3) GS 线 该线是从奥氏体中析出铁素体的开始线,又称 A<sub>3</sub> 线。代表  $\omega_{\text{C}} < 0.77\%$  的铁碳合金,缓冷至此线时开始从奥氏体中析出铁素体;或加热至此线时铁素体即停止转变为奥氏体。

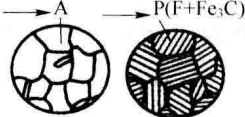
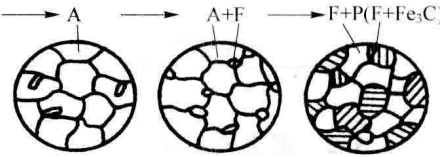
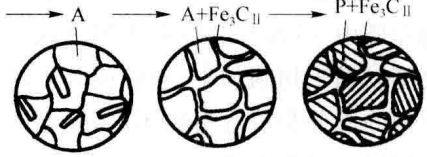
4) ES 线 该线是碳在  $\gamma$  铁中的溶解度曲线,又称 A<sub>cm</sub> 线。表示在 AESG 区域中的奥氏体,随着温度的缓慢下降,组织继续发生改变,至 GS 线时开始析出铁素体,至 ES 线时开始析出二次渗碳体(Fe<sub>3</sub>C<sub>II</sub>),至 ES 与 GS 线的交点 S(727 $^\circ\text{C}$ ,  $\omega_{\text{C}} = 0.77\%$ )点时发生共析反应(S 点为共析点)。通过共析反应,可从奥氏体中同时析出铁素体与二次渗碳体的机械混合物(珠光体)。

5)  $PQ$  线 该线是碳在铁素体中的溶解度曲线。表示铁碳合金从  $727^{\circ}\text{C}$  缓冷至  $600^{\circ}\text{C}$  时, 碳的溶解度  $\omega_{\text{C}}$  从最大的  $0.0218\%$  下降至  $0.008\%$ , 即室温下几乎不溶碳。此时, 铁素体中多余的碳将以渗碳体形式析出, 称为三次渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ )。第一、二、三次渗碳体的成分、晶体结构和性能都相同, 只是渗碳体形成来源、分布、形态不同, 因此对铁碳合金的作用和性能影响有所不同。

## 2. 钢在缓慢冷却中的组织转变

由铁碳合金相图可知, 不管含碳量多少, 当钢液冷却至  $AC$  线时即开始析出奥氏体。随着温度下降, 奥氏体不断增加, 钢液不断减少。当温度降到  $AE$  线时, 结晶完毕成为均匀的奥氏体组织。当温度在  $AE$  线和  $GSE$  线之间时, 奥氏体不发生组织转变。当温度降低至  $GSE$  线时, 含碳量不同的奥氏体会发生三种不同组织的转变。表 1-4 所列为钢在缓慢冷却过程中的组织转变。

表 1-4 钢在缓慢冷却过程中的组织转变

钢的类别	组织转变过程	$PSK$ 线以下组织	组织转变简图
共析钢 $\omega_{\text{C}} = 0.77\%$	奥氏体缓冷至 $S$ 点, 全部变成珠光体	$P$ (珠光体)	
亚共析钢 $0.0218\% < \omega_{\text{C}} < 0.77\%$	自高温缓冷至 $GS$ 线, 奥氏体中开始析出铁素体; 随着温度继续下降, 铁素体不断增加, 当温度降至 $PSK$ 线时, 停止析出铁素体, 碳的质量分数增至 $0.77\%$ , 发生共析反应, 析出珠光体	$P + F$ 机械混合物 (铁素体 + 珠光体)	
过共析钢 $0.77\% < \omega_{\text{C}} \leq 2.11\%$	自高温缓冷至 $ES$ 线时, 奥氏体中开始析出渗碳体; 随着温度下降, 渗碳体不断增加。当温度降至 $PSK$ 线时, 停止析出渗碳体, 碳的质量分数减少至 $0.77\%$ , 发生共析反应, 析出珠光体	$P + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ 机械混合物 (网状渗碳体 + 珠光体)	

## 1.3 钢的热处理方法

### 1.3.1 钢的热处理原理

#### 1. 概述

将固态金属或合金, 采用适当的方式进行加热、保温和冷却, 以获得所需组织结构与性能的工艺称为钢的热处理。

根据热处理目的和工艺方法的不同, 热处理分为普通热处理和表面热处理。普通热处理



又分为退火、正火、淬火和回火;表面热处理分表面淬火和化学热处理,其中表面淬火含火焰加热和感应加热,化学热处理含渗碳和渗氮等。热处理方法虽然很多,但任何一种热处理工艺都是由加热、保温和冷却三个阶段组成。热处理工艺过程可用温度-时间坐标系中的曲线图表示,这种曲线称为热处理工艺曲线,如图1-7所示。

### 2. 钢在加热时的转变

在处理工艺中,当钢被加热到一定温度时,能得到一种为奥氏体的内部组织。该组织强度及硬度高,塑性良好,晶粒大小、晶粒成分及均匀化程度,对钢冷却后的组织和性能有着重要的影响。因此,为了得到细小均匀的奥氏体晶粒,

必须严格控制钢的加热温度和保温时间,确保钢在冷却后获得高性能的组织。

### 3. 钢在冷却时的转变

钢的冷却是热处理的关键工序,成分相同的钢经加热获得奥氏体组织后,以不同的速度冷却时,将获得不同的力学性能,如表1-5所列。

表1-5 冷却速度与力学性能

冷却方法	随炉缓冷	空冷	油冷	水冷
冷却速度	10℃/min	10℃/s	150℃/s	600℃/s
所得硬度(HRC)	12	26	41	63

## 1.3.2 退火与正火

### 1. 退火

将钢加热到合适的温度,保温一定时间,然后缓慢冷却(一般随炉冷却或埋入导热性较差的介质中一段时间)以获得接近相图中常温组织的热处理工艺称为退火。退火能降低零件的硬度以利于切削加工,也能改善组织、细化晶粒、提高零件的机械性能,消除零件的内应力。由于钢的成分和退火目的不同,退火可分为完全退火、球化退火、等温退火、去应力退火、扩散退火和再结晶退火等。

### 2. 正火

将钢件加热到组织转变为奥氏体的临界温度以上使其完全奥氏体化,保温后出炉空冷的热处理工艺称为正火。正火的冷却速度比退火稍快,经正火得到的珠光体组织较细,钢的强度和硬度有所提高。且正火操作简便,采用炉外冷却(空冷、风冷或喷雾冷),能量耗费少,成本较低,生产率较高,所以应用广泛。

## 1.3.3 淬火与回火

### 1. 淬火

将钢加热到组织转变为奥氏体的临界温度以上,以急剧水冷或油冷等方式,快速(超过临界冷却速度)冷却的热处理工艺称为淬火。淬火能使钢获得马氏体组织,提高刀具或量具的硬

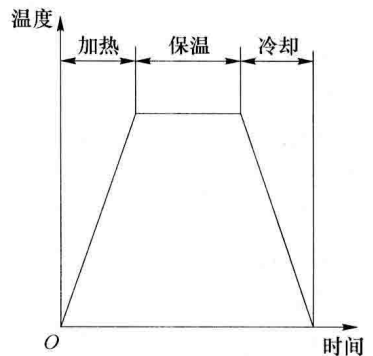


图1-7 热处理工艺曲线示意图