



高职高专“十一五”规划教材

# 机械制造基础

第二版

李森林 主编



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

# 机械制造基础

第二版

李森林 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是根据全国高职高专课程指导委员会制订的《机械制造基础》课程的基本要求,并遵循“拓宽基础、强化能力、立足应用、激发创新”的原则编写的,着重培养学生机械制造工程技术能力,另外,为拓宽学生视野,介绍了装备制造业特种加工技术。

该书共分三篇、十六章,主要讲述了金属材料的力学性能,金属的结晶机理、铁碳合金状态图及碳钢和铸铁,钢的退火、正火、淬火、回火、表面热处理及其新技术,合金钢的类型及应用,铝、铜及锡基、铅基轴承合金,粉末冶金材料、高分子材料、陶瓷材料及复合材料,机械工程材料的选用,砂型铸造及特种铸造,自由锻、模锻、板料冲压及特种模锻,手工电弧焊、埋弧焊等焊接方法,机械零件毛坯选择,切削刀具及切削过程,机床及零件表面加工,工艺规程及典型零件加工工艺过程,先进制造技术,特种加工简介。

本书的内容已制作成用于多媒体教学的 PPT 课件,并配有课后习题答案,将免费提供给采用本书作为教材的院校使用。如有需要,请发电子邮件至 [cipedu@163.com](mailto:cipedu@163.com) 获取,或登录 [www.cipedu.com.cn](http://www.cipedu.com.cn) 免费下载。

本书可作为高职高专机械专业教材,也可作为职工大学、电视大学和其他院校机电类专业教材或教学参考书,还可供机械制造技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

机械制造基础/李森林主编. —2 版. —北京: 化学工业出版社, 2010. 6  
高职高专“十一五”规划教材  
ISBN 978-7-122-08304-3

I. 机… II. 李… III. 机械制造-高等学校: 技术学院-教材 IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 071809 号

---

责任编辑: 高 钰  
责任校对: 陶燕华

装帧设计: 史利平

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)  
印 装: 三河市延风印装厂  
787mm×1092mm 1/16 印张 17¼ 字数 425 千字 2011 年 6 月北京第 2 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899  
网 址: <http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

## 第二版前言

本书于2004年4月第一版发行,经多次印刷,被全国多所高校有关专业采用。许多教师通过教学实践后,给我们提出了很多宝贵意见,使我们受到了较大的鼓舞和极深的教益,在此表示深深的谢意。

本书修订遵循以下主要原则:

1. 针对性。第二版以课程编写大纲为依据,并结合高职高专学生的特点,突出重点内容、分解难点内容,力争全书层次清晰、语言精准、通俗易懂。

2. 工程性和应用性。“机械制造基础”是一门工程性和应用性较强的课程,在修订过程中,以工程技术和培养学生工程意识、工程能力为主线,并注重基本概念、知识点及制造技术的应用。

3. 先进性。本书介绍了机械制造中所涉及的新材料、新设备、新工艺及先进的制造技术。

根据同行专家提出的宝贵意见和我们五年来的教学实践,并考虑到机械制造技术的发展,对第一版进行了较全面认真的修订,修订的主要内容如下:

1. 对第一~六章的内容进行了较大量修订和重新编写,对金属材料及热处理的理论进行整合,并进行大量的删减,以了解和应用为教学目的。

2. 为方便教学,我们制作了多媒体教学的PPT课件,并配有习题解答或提示,并将免费提供给采用本书作为教材的院校使用。如有需要,请发电子邮件至 [cipedu@163.com](mailto:cipedu@163.com) 获取或登录 [www.cipedu.com.cn](http://www.cipedu.com.cn) 免费下载。

参加第二版修订的有丛娟(第一、二、三、四、五、六、七、十一、十五、十六章)、高淑杰(第八、九、十、十二、十三、十四章),课件由丛娟和高淑杰共同完成,李森林任主编,负责全书修订的组织和最后定稿工作。

修改后的本书有较明显的改进和提高,但也不可避免地存在不足,敬请读者或同行予以批评指正。

编者

2010年3月

# 第一版前言

本书根据全国高职高专冶金机械课程组 2002 年教材编写会议精神制定的编写大纲编写，在 2003 年高职高专规划教材审稿会上，八所院校的专家们对本书的内容提出了许多宝贵的意见并作了修改。

本书共分三篇十六章，主要讲述金属材料及其他材料、铸造、锻压及焊接、切削刀具、切削过程、零件表面加工及先进制造技术、特种加工技术等内容。

本书可作为高职高专、职工大学、电视大学机械类专业教材或教学参考书，并可供机械制造技术人员参考。

本书由李森林教授主编，丛娟、高淑杰、胡笛川任副主编。参加本书编写的有：邓英剑（第一章）、邓根清（第二章）、李莲珍（第三章）、邹莉（第四章）、胡笛川（第五、六、七章）、张兆刚（第八章）、宁晓霞（第九章）、李森林（第十章）、丛娟（第十一、十五、十六章）、李金刚（第十二章）、高淑杰〔第十三章（除第三节外）〕、于维纳（第十三章第三节、第十四章）。

本书承蒙闫林洲副教授审阅，并对初稿提出了许多宝贵意见，在此表示深切的谢意。在本书编写过程中，编者参考了很多国内外相关资料和书籍，在此向其编者表示感谢。

由于作者的水平有限，加之时间仓促，书中错误之处在所难免，殷切希望广大读者批评指正。

编者

2004 年 4 月

# 目 录

## 第一篇 工程材料

|                    |    |
|--------------------|----|
| 第一章 金属材料的力学性能      | 1  |
| 第一节 强度与塑性          | 1  |
| 第二节 硬度             | 4  |
| 第三节 冲击吸收功          | 5  |
| 第四节 疲劳极限与断裂韧性      | 6  |
| 第二章 铁碳合金           | 9  |
| 第一节 金属的晶体结构与结晶     | 9  |
| 第二节 铁碳合金状态图        | 12 |
| 第三节 碳钢、铸铁          | 20 |
| 第三章 钢的热处理          | 27 |
| 第一节 钢在加热时的组织转变     | 27 |
| 第二节 钢在冷却时的转变       | 29 |
| 第三节 热处理工艺          | 35 |
| 第四节 钢的表面热处理        | 39 |
| 第五节 其他热处理及热处理新技术简介 | 44 |
| 第四章 合金钢            | 47 |
| 第一节 概述             | 47 |
| 第二节 合金元素在钢中的作用     | 48 |
| 第三节 合金结构钢          | 50 |
| 第四节 合金工具钢          | 56 |
| 第五节 特殊性能钢          | 60 |
| 第五章 有色金属           | 65 |
| 第一节 铝及其合金          | 65 |
| 第二节 铜及其合金          | 69 |
| 第三节 滑动轴承合金         | 72 |
| 第六章 其他材料           | 75 |
| 第一节 粉末冶金材料         | 75 |
| 第二节 高分子材料          | 77 |
| 第三节 陶瓷材料           | 84 |
| 第四节 复合材料           | 86 |
| 第七章 机械工程材料的选用      | 90 |
| 第一节 选用材料原则         | 90 |

|                   |    |
|-------------------|----|
| 第二节 典型零件的选材 ..... | 92 |
|-------------------|----|

## 第二篇 毛坯成形方法

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第八章 铸造 .....         | 99  |
| 第一节 金属的铸造性能 .....    | 99  |
| 第二节 砂型铸造 .....       | 101 |
| 第三节 特种铸造 .....       | 107 |
| 第四节 液态成形技术的发展 .....  | 112 |
| 第五节 铸件结构设计 .....     | 116 |
| 第九章 锻压 .....         | 120 |
| 第一节 锻压工艺基础 .....     | 120 |
| 第二节 自由锻 .....        | 125 |
| 第三节 模锻 .....         | 131 |
| 第四节 板料冲压 .....       | 139 |
| 第五节 锻压件结构设计 .....    | 142 |
| 第六节 其他压力加工方法简介 ..... | 144 |
| 第十章 焊接 .....         | 148 |
| 第一节 焊接的特点及分类 .....   | 148 |
| 第二节 手工电弧焊 .....      | 149 |
| 第三节 其他焊接方法 .....     | 154 |
| 第四节 金属的焊接性 .....     | 157 |
| 第五节 焊接结构举例 .....     | 158 |
| 第六节 焊接质量检查 .....     | 160 |
| 第七节 焊接新技术 .....      | 162 |
| 第十一章 机械零件毛坯的选择 ..... | 165 |
| 第一节 常用毛坯的种类 .....    | 165 |
| 第二节 毛坯选择的原则 .....    | 166 |
| 第三节 典型零件的毛坯选择 .....  | 167 |

## 第三篇 切削加工

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第十二章 切削加工基础知识 .....  | 170 |
| 第一节 切削运动及切削要素 .....  | 170 |
| 第二节 金属切削刀具 .....     | 173 |
| 第三节 切削过程中的物理现象 ..... | 178 |
| 第四节 工件材料的切削加工性 ..... | 183 |
| 第十三章 零件表面的加工 .....   | 185 |
| 第一节 金属切削机床 .....     | 185 |
| 第二节 外圆表面加工 .....     | 189 |
| 第三节 内圆表面加工 .....     | 195 |
| 第四节 平面加工 .....       | 201 |

|      |                    |     |
|------|--------------------|-----|
| 第五节  | 螺纹加工.....          | 205 |
| 第六节  | 齿轮的齿形加工.....       | 207 |
| 第七节  | 光整加工.....          | 214 |
| 第十四章 | 机械加工工艺流程.....      | 217 |
| 第一节  | 机械加工工艺流程的基本知识..... | 217 |
| 第二节  | 工艺规程的制订.....       | 230 |
| 第三节  | 典型零件加工工艺流程举例.....  | 236 |
| 第十五章 | 先进制造技术.....        | 244 |
| 第一节  | 数控加工技术.....        | 244 |
| 第二节  | 成组技术.....          | 250 |
| 第三节  | 柔性制造系统.....        | 252 |
| 第四节  | 计算机集成制造系统.....     | 255 |
| 第十六章 | 特种加工.....          | 259 |
| 第一节  | 电火花加工.....         | 259 |
| 第二节  | 电解加工.....          | 261 |
| 第三节  | 激光加工.....          | 262 |
| 第四节  | 超声加工.....          | 263 |
| 参考文献 | .....              | 266 |

# 第一篇 工程材料

## 第一章 金属材料的力学性能

金属材料是现代工业中最重要的一种工程材料。广泛应用于工农业和国防工业等部门。为了合理地使用金属材料，必须了解和熟悉金属材料的性能。

金属材料的性能包括使用性能和工艺性能。使用性能是指金属材料在使用过程中所表现出来的性能，它决定了金属材料的应用范围、可靠性和使用寿命，它又分为物理性能、化学性能和力学性能。其中物理性能包括材料的密度、熔点、热膨胀性、导电性、导热性及磁性等；化学性能是指材料在不同条件下抵抗各种化学作用的性能，如化学稳定性、抗氧化性、耐蚀性等；力学性能是指材料在各种载荷（外力）的作用下表现出来的性能，常用的力学性能有强度、塑性、硬度、韧性和疲劳强度等。工艺性能是指材料对某种加工工艺的适应性，是决定是否易于加工或如何进行加工的重要因素，包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理性能和切削加工性能等。

### 第一节 强度与塑性

#### 一、强度

金属材料在外力作用下都会发生一定的变形，甚至引起破坏。其抵抗塑性变形和断裂的能力称为强度。根据外力的作用方式不同，强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度和抗扭强度等。通常多以抗拉强度作为基本的强度指标。

#### （一）拉伸试验及拉伸曲线

测定强度的最基本的方法是拉伸试验。所谓拉伸试验是指用静拉伸力（对材料缓慢施加力，使材料相对变形速度较小，一般小于  $10^{-2}$  mm/s）对标准拉伸试样（见 GB 228—1987）进行缓慢的轴向拉伸，直至拉断的一种试验方法。试验前，首先将金属材料制成一定形状和尺寸的标准试样，标准拉伸试样可制成圆形试样和板形试样两种。由于圆形试样夹紧时易于对中，故应优先使用。图 1-1 所示为圆形拉伸试样，图中  $L_0$  为试样的原始标距长度（mm）， $d_0$  为试样的原始直径（mm）。通常取  $L_0=10d_0$  或  $L_0=5d_0$ ，前者称为长试样，后者称为短试样。一般  $L_0$  取 100mm 或 50mm。然后，将试样装夹在拉伸试验机上，并对其两端缓慢地施加轴向静拉力  $F$ 。随着拉力逐渐加大，试样沿轴向伸长，而径向缩小，直至试样拉断。若将试样从开始拉伸直到断裂前所受的拉力  $F$  与其对应的伸长  $\Delta L$  绘成曲线，则得到拉伸曲线。拉伸曲线可以反映金属材料在拉伸过程中的弹性变形、塑性变形直到断裂的全部力学特

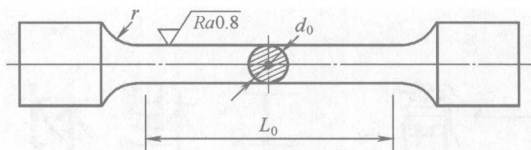


图 1-1 圆形拉伸试样

征。该图一般可由材料试验机自动绘制。

图 1-2 为退火低碳钢的拉伸曲线图，图中横坐标表示绝对伸长  $\Delta L$ （单位为 mm），纵坐标表示力  $F$ （单位为 N）。从图可知，在载荷较小（不超过  $F_e$ ）的  $Oe$  段，拉伸曲线  $Oe$  为直线，即试样的伸长量与载荷成正比。如果卸除载荷，试样将恢复到原状，即试样的变形完全消失，这一阶段属于弹性变形阶段。当载荷超过  $F_e$  后，试样将进一步伸长，除发生弹性变形外，还发生不能回复的变形（塑性变形），这时若去除载荷，试样不能完全恢复到原状。当载荷达到  $F_s$  时， $s$  点附近的曲线近似于水平状态，表明载荷基本不变时，试样仍继续变形，这种现象称为“屈服”。过屈服阶段后，试样又随载荷的增加而伸长，产生比较均匀的塑性变形，称为均匀塑性变形阶段（ $sb$  段），由于较大的塑性变形伴随着冷变形强化（加工硬化）现象，故又称强化阶段。当载荷继续

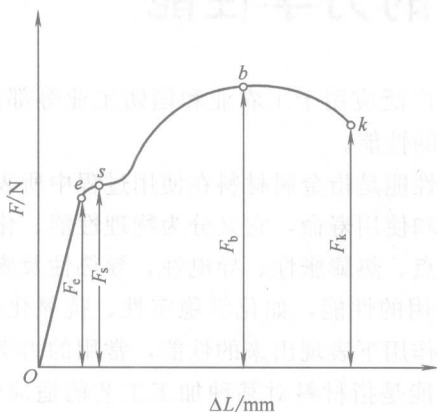


图 1-2 退火低碳钢的拉伸曲线

增加到  $F_b$  时，试样出现局部截面缩小，产生所谓的“缩颈”现象。之后，试样变形集中出现在缩颈附近，由于试样局部截面的逐渐缩小，故载荷也逐渐降低，当载荷达到  $F_k$  时，试样在缩颈处随即断裂。

用  $\epsilon$  代替横坐标  $\Delta L$  ( $\epsilon = \Delta L / L_0$ )，用  $\sigma$  代替纵坐标  $F$  ( $\sigma = F / S_0$ ， $S_0$  为试件原始横截面积)，得到工程应力-应变 ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) 曲线。

## (二) 强度指标

常用的强度指标有弹性极限、屈服强度和抗拉强度。

### 1. 弹性极限

弹性极限指金属材料能保持弹性变形的最大应力值，用  $\sigma_e$  ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) 表示。

$$\sigma_e = F_e / S_0 \quad (1-1)$$

式中  $F_e$ ——弹性变形范围内的最大载荷，N；

$S_0$ ——试样原始横截面积， $\text{m}^2$ 。

### 2. 屈服强度

使材料产生屈服现象时的最小应力值，用符号  $\sigma_s$  ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) 表示。

$$\sigma_s = F_s / S_0 \quad (1-2)$$

式中， $F_s$ ——使材料产生屈服的最小载荷，N。

有些金属材料（如铸铁、高碳钢等）在拉伸试验中没有明显的屈服现象，因此测定  $\sigma_r$ 。



很困难。有关国标中规定,此种试样的塑性变形量为试样标距长度的0.2%时的应力为屈服强度,用符号 $\sigma_{0.2}$ (N/mm<sup>2</sup>)表示。

$$\sigma_{0.2} = F_{0.2} / S_0 \quad (1-3)$$

式中, $F_{0.2}$ ——试样塑性变形量为标距长度的0.2%时的载荷,N。

### 3. 抗拉强度

材料被拉断前所能承受的最大应力值,用符号 $\sigma_b$ (N/mm<sup>2</sup>)表示。

$$\sigma_b = F_b / S_0 \quad (1-4)$$

式中, $F_b$ ——试样断裂前所承受的最大载荷,N。

上述各式中,强度的单位为帕(Pa)或兆帕(MPa),1MPa=1×10<sup>6</sup>Pa。

金属材料的强度在机械设计中具有重要意义。设计弹簧和弹性零件时,材料的许用应力不应超过其弹性极限,即 $\sigma_{\text{许}} < \sigma_e$ ;采用韧性材料制造机械零件时,材料的许用应力不应超过其屈服点,即 $\sigma_{\text{许}} < \sigma_s$ ;采用脆性材料制造机械零件时,其许用应力不应超过抗拉强度,即 $\sigma_{\text{许}} < \sigma_b$ 。违反了这些规则,机械零件就不能正常使用。

## 二、塑性

金属材料在外力作用下,产生永久变形而不破坏的能力,称为塑性,即断裂前金属发生塑性变形的能力。

金属材料的塑性值也是通过拉伸试验测得的。常用塑性值指标有断后伸长率 $\delta$ 和断面收缩率 $\psi$ 。

### 1. 断后伸长率

断后伸长率是试样被拉断时,标距长度的伸长量与标距长度的百分比,用符号 $\delta$ 表示,即

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中  $L_1$ ——试样拉断后的标距长度,m;

$L_0$ ——试样原始标距长度,m。

### 2. 断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断后,试样缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比,用符号 $\psi$ 表示,即

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中  $S_0$ ——试样原始横截面积,m<sup>2</sup>;

$S_1$ ——试样断裂后缩颈处的最小横截面积,m<sup>2</sup>。

试样的尺寸对 $\delta$ 是有影响的。试样长短不同,测得的伸长率不同。长、短试样的伸长率分别用 $\delta_{10}$ 和 $\delta_5$ 表示,对同一材料 $\delta_5 > \delta_{10}$ ,两者不能直接比较。

$\delta$ 和 $\psi$ 是材料的重要性能指标。它们的数值越大,则材料的塑性越好。

金属材料只有具备足够的塑性才能承受各种变形加工,例如轧制、锻造、冲压等。



## 第二节 硬 度

硬度是衡量金属材料软硬程度的指标,是指金属表面上局部体积内抵抗弹性变形、塑性变形或抵抗破坏的能力。它是金属材料的重要性能之一,也是检验机械零件质量的一项重要指标。由于测定硬度的试验设备比较简单,操作方便、迅速,故在生产上和科研中应用都十分广泛。

测定硬度的方法比较多,主要有压入法(如布氏硬度)、划痕法(如莫氏硬度)、回跳法(如肖氏硬度)等。目前在机械制造生产中主要采用压入法。

常用的硬度测试方法有布氏硬度(HB)、洛氏硬度(HR)和维氏硬度(HV)等,它们均属于压入法,即用一定的压力将压头压入被测材料表层,然后根据压力的大小、压痕面积或深度确定其硬度值的大小。

### 一、布氏硬度

布氏硬度的测定原理如图 1-3 所示。它是用一定大小的试验力  $F(N)$ ,将直径为  $D(mm)$  的淬火钢球或硬质合金球压入被测金属表面,保持规定时间后卸除试验力,随即在金属表面出现一个压坑(压痕),以压痕单位面积上所承受试验力的大小,确定被测金属材料的硬度值,用符号  $HB$  表示。

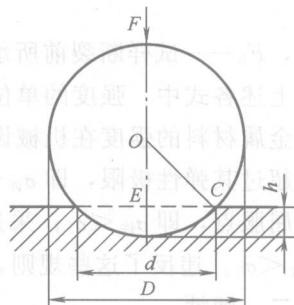


图 1-3 布氏硬度测定原理示意

$$HB = 0.102 \frac{F}{S} = 0.102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-7)$$

式中  $F$ ——试验力, N;

$S$ ——金属表面压痕的面积,  $mm^2$ ;

$D$ ——压头直径, mm;

$d$ ——压痕平均直径, mm。

淬火钢球作压头测得的硬度值以符号  $HBS$  表示,用硬质合金球作压头测得的硬度值以符号  $HBW$  表示。符号  $HBS$  和  $HBW$  之前的数字为硬度值,符号后面依次用相应数值注明压头球体直径(mm)、试验力(0.102N)、试验力保持时间(s)(10~15s 不标注)。

例如:500HBW5/750 表示用直径 5mm 硬质合金球在 7355N 试验力作用下保持 10~15s 测得的布氏硬度值为 500;120HBS10/1000/30 表示用直径 10mm 的钢球压头在 9807N 试验力作用下保持 30s 测得的布氏硬度值为 120。

由于金属材料有硬有软,被测工件有厚有薄,有大有小,如果只采用一种标准的试验力  $F$  和压头直径  $D$ ,就会出现对某些材料和工件不适应的现象。因此在生产中进行布氏硬度试验时,要求根据实际情况使用大小不同的试验力  $F$  和压头直径  $D$  及保持时间。

布氏硬度试验适用于测量退火钢、正火钢及常见铸铁和有色金属等较软材料。其优点是测定的数据准确、稳定,数据重复性较好,但操作较繁琐,压痕较大,易损坏成品的表面,不能测定太薄的试样硬度。

### 二、洛氏硬度

当材料的硬度较高或试样过小时,可用洛氏硬度计进行硬度测试。洛氏硬度是采用直接



测量压痕深度来确定硬度值的。

洛氏硬度试验原理如图 1-4 所示。它是用顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥体或直径为  $1.588\text{mm}$  ( $1/16$  英寸) 的淬火钢球作压头, 先施加初试验力  $F_1$  ( $98\text{N}$ ), 再加上主试验力  $F_2$ , 其总试验力  $F = F_1 + F_2$ ,  $F$  分别为  $588\text{N}$ ,  $980\text{N}$ ,  $1471\text{N}$  三种。图中 0-0 为压头没有和试样接触时的位置; 1-1 为压头受到初试验力  $F_1$  后压入试样的位置; 2-2 为压头受到总试验力  $F$  后压入试样的位置; 经规定的保持时间, 卸除主试验力  $F_2$ , 保留初试验力  $F_1$  后, 试样弹性变形的恢复使压头上升到 3-3 的位置。此时压头受主试验力作用压入的深度为  $h$  ( $\text{mm}$ ), 即 1-1 位置至 3-3 位置。材料越硬,  $h$  便越小。为适应人们习惯上数值越大硬度越高的观念, 故人为地规定一常数  $K$  减去压痕深度  $h$  的值作为洛氏硬度指标, 并规定每  $0.002\text{mm}$  为一个洛氏硬度单位, 用符号  $HR$  表示, 则洛氏硬度值为

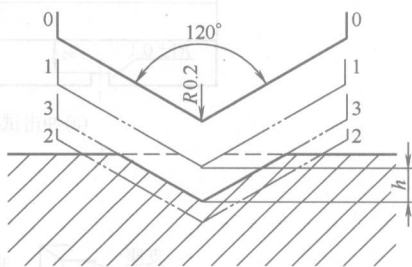


图 1-4 洛氏硬度试验原理示意

$$HR = \frac{K - h}{0.002} \quad (1-8)$$

使用金刚石压头时,  $K = 0.2$ ; 使用钢球压头时,  $K = 0.26$ 。

淬火钢球压头适用于退火件、有色金属等较软材料的硬度测定; 金刚石压头适用于淬火钢等较硬材料的硬度测定。

洛氏硬度试验测试方便, 操作简捷, 试验压痕较小, 测试硬度值范围较宽, 可测试硬度较高的材料。但其精确性较差, 硬度值的重复性差, 必须进行多点测试, 取平均值作为材料的硬度。

### 第三节 冲击吸收功

有些机械零部件在工作过程中不仅受到静载荷或变动载荷作用, 而且受到不同程度的冲击载荷作用, 如锻锤、冲床、铆钉枪等。在设计和制造受冲击载荷的零件和工具时, 必须考虑所用材料的冲击吸收功或冲击韧度。

目前最常用的冲击试验方法是摆锤式一次冲击试验, 其试验原理如图 1-5 所示。

先将欲测定的材料加工成标准试样, 标准试样尺寸为  $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 55\text{mm}$ 。可分为无缺口、V 形缺口、U 形缺口三种。对于脆性材料, 如铸铁等, 试样一般不开缺口。然后放在试验机的机架上, 试样缺口背向摆锤冲击方向 [见图 1-5 (b)], 将具有一定重力  $G$  的摆锤举至一定高度  $H_1$ , 然后摆锤落下冲击试样, 试样断裂后摆锤上摆到  $H_2$  高度, 在忽略摩擦和阻尼等因素下, 摆锤冲断试样所做的功, 称为冲击吸收功, 以  $A_K$  表示, 则有

$$A_K = GH_1 - GH_2 = G(H_1 - H_2)$$

用试样的断口处截面积  $A_0$  去除  $A_K$ , 即得到冲击韧度, 用  $\alpha_K$  表示, 单位为  $\text{J}/\text{cm}^2$ 。冲击韧度指材料抵抗冲击载荷而不破坏的能力。

$$\alpha_K = A_K / A_0 \quad (1-9)$$

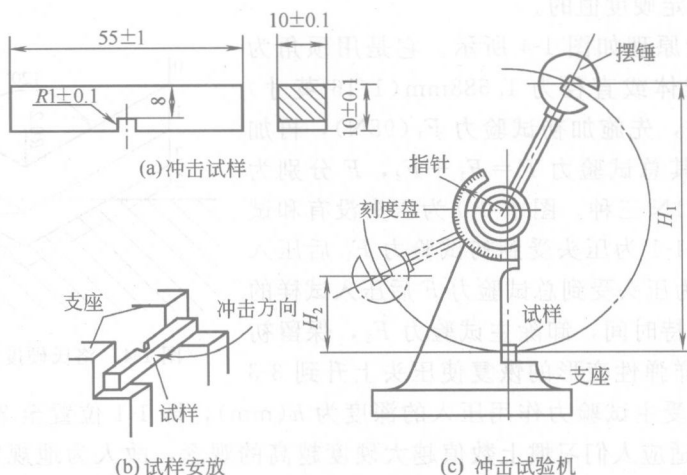


图 1-5 摆锤式冲击试验示意

$\alpha_K$  值越大, 材料的冲击韧性越好, 断口处则会发生较大的塑性变形, 断口呈灰色纤维状。 $\alpha_K$  值越小, 材料的冲击韧性越差, 断口处无明显的塑性变形, 断口具有金属光泽而较为平整。

$\alpha_K$  的大小与很多因素有关, 除了冲击高度和冲击速度外, 试样的形状和尺寸、缺口的形式、表面粗糙度、内部组织等都有影响, 而且温度对它的影响也非常显著。因此, 冲击韧性一般不作为选择材料的参考, 不直接用于强度计算。

还应指出, 长期的生产实践证明,  $A_K$  或  $\alpha_K$  值对材料的组织缺陷十分敏感, 能够灵敏地反映出材料品质、宏观缺陷和显微组织方面的微小变化, 因而冲击试验是生产上用来检验冶炼和热加工质量的有效办法之一。

常温下钢材的冲击试验主要按 GB/T 229—1994《金属夏比缺口冲击试验方法》和 GB/T 12778—1991《金属夏比冲击断口测定方法》的规定进行。金属低温和高温冲击试验具体要求参见 GB 4159—1984 和 GB 5775—1986。

## 第四节 疲劳极限与断裂韧性

### 一、疲劳极限

许多机械零件(如机床主轴、齿轮、连杆、弹簧等)和工程结构件是在交变应力下工作的。所谓交变应力, 是指零件所受应力的方向和大小随时间作周期性变化。例如受力发生弯曲的轴, 在转动时材料要反复受到拉应力和压应力, 属于对称交变应力循环。零件在交变应力作用下, 当交变应力远低于材料的屈服强度时, 经一定循环次数后产生裂纹或突然发生完全断裂的过程称为材料的疲劳。

疲劳失效与静载荷下的失效不同, 断裂前没有明显的塑性变形, 发生断裂也较突然。这种断裂具有很大的危险性, 常常造成严重的事故。据统计, 大部分机械零件的失效是由金属疲劳造成的。

在交变载荷下, 金属材料承受的交变应力  $\sigma$  和断裂时应力循环次数  $N$  之间的关系, 通常用疲劳曲线来描述, 如图 1-6 所示。金属材料承受的最大交变应力  $\sigma$  越大, 则断裂时应力

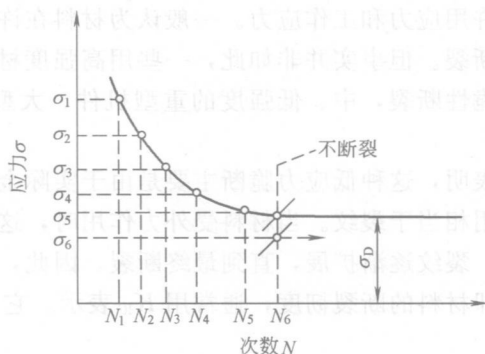


图 1-6 疲劳曲线示意

循环次数  $N$  越小, 反之  $\sigma$  越小, 则  $N$  越大。金属材料在经受无数次重复或交变载荷作用而不发生疲劳破坏 (断裂) 时的最大应力, 称为材料的疲劳极限 (疲劳强度), 以  $\sigma_D$  表示。常用钢铁材料的疲劳曲线 [见图 1-7 (a)] 有明显的水平部分, 其他大多数金属材料的疲劳曲线 [见图 1-7 (b)] 上没有水平部分, 在这种情况下, 规定某一循环次数  $N_0$  断裂时所对应的应力作为条件疲劳极限, 以  $\sigma_N$  表示。

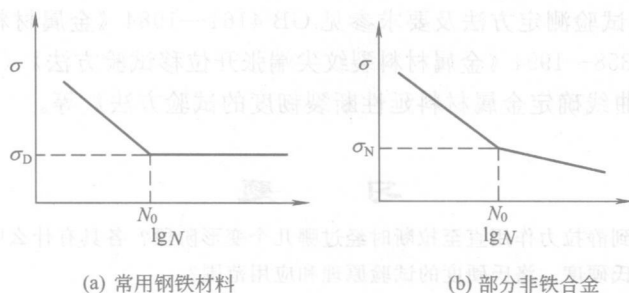


图 1-7 两种类型疲劳曲线

通常材料疲劳性能的测定是在旋转弯曲疲劳试验机上进行的。具体试验方法请参阅 GB 4337—1984 《金属旋转弯曲疲劳试验方法》。试验规范规定了各种金属材料的指定寿命 (循环基数)  $N_0$ 。(如合金钢为  $10^7$ , 低碳钢为  $5 \times 10^6$ ), 应力循环次数达到  $N_0$  次仍不发生疲劳破坏, 此时的最大应力可作为疲劳极限。通常纯弯曲疲劳极限用  $\sigma_{-1}$  表示。

一般认为, 产生疲劳破坏的原因是材料存在某些缺陷, 如夹杂物、气孔和微观裂纹。交变应力下, 缺陷处首先形成微小裂纹, 裂纹逐步扩展, 导致零件的受力截面减小, 以致突然产生破坏。零件表面的机械加工刀痕和构件截面突然变化部位, 均会产生应力集中。交变应力下, 应力集中处易于产生显微裂纹, 也是产生疲劳破坏的重要原因。

为了提高零件的疲劳抗力, 防止疲劳断裂事故的发生, 在进行零件设计和加工时, 应选择合理的结构形状 (如避免尖角), 防止表面损伤, 避免应力集中。由于金属表面是疲劳裂纹易于产生的地方, 而实际零件大部分都承受交变弯曲或交变扭转载荷, 表面处应力最大。因此, 表面强化处理 (如表面淬火、化学热处理、喷丸、滚压) 是提高疲劳极限的有效途径。

## 二、断裂韧性

按传统力学方法对机械零件进行强度设计时, 是以材料的屈服强度  $\sigma_s$  为依据, 考虑了



安全系数之后确定零件的许用应力和工作应力。一般认为材料在许用应力之下工作就不会产生塑性变形,更不会产生断裂。但事实并非如此,一些用高强度材料制造的零件常常在远低于屈服强度的状态下发生脆性断裂,中、低强度的重型机件、大型结构件也有类似的实例,这就是低应力脆断。

大量事实和实验研究表明,这种低应力脆断主要是由于实际金属材料中存在的各种宏观缺陷,它们在材料中的作用相当于裂纹。当材料受外力作用时,这些裂纹的尖端附近便出现应力集中,应力不断增加,裂纹逐渐扩展,直到最终断裂。因此,很有必要给出材料抵抗裂纹扩展的力学性能指标,即材料的断裂韧性,通常用  $K_{IC}$  表示。它的物理意义就是材料抵抗裂纹失稳扩展的能力。

断裂韧度和冲击韧度一样,综合地反映了材料的强度和塑性。它是材料本身的特性,只和材料的成分、组织结构有关,而与裂纹的大小、形状无关,也与外加载荷及试样尺寸无关。因此,适当调整成分,通过合理的冶炼、加工和热处理以获得最佳的组织,就能大幅度提高材料的断裂韧性,从而也就提高了含裂纹构件的承载能力。

断裂韧度测定是把试验材料制成一定形状和尺寸的试样。在试样上预制出能反映实际情况的疲劳裂纹,然后施加载荷。试验中用仪器自动记录并绘出外力和裂纹扩展的关系曲线,经过计算和分析,确定断裂韧度。能够反映材料抵抗裂纹失稳扩展的性能指标及其试验测定的方法有多种,具体试验测定方法及要求参见 GB 4161—1984《金属材料平面应变断裂韧度  $K_{IC}$  试验方法》、GB 2358—1994《金属材料裂纹尖端张开位移试验方法》(CTOD)、GB 2038—1991《利用  $J_R$  阻力曲线确定金属材料延性断裂韧度的试验方法》等。

## 习 题

1. 退火低碳钢试样在受到静拉力作用直至拉断时经过哪几个变形阶段?各具有什么明显特征?
2. 什么是硬度?简述布氏硬度、洛氏硬度的试验原理和应用范围?
3. 在生产中冲击试验有何重要作用?
4. 什么叫疲劳极限?采用什么办法可有效地提高材料的疲劳极限?

## 第二章 铁 碳 合 金

对同一成分的钢铁材料可以通过改变材料的内部组织结构的方法改变其性能。因此，了解材料的结构是掌握材料性能的基础。

本章讲述了金属晶体结构及晶体缺陷对金属材料的物理力学性能的影响；铁碳合金相图及铁碳合金的平衡结晶过程；铁碳合金状态图的应用；钢中杂质的影响；碳钢及铸铁的种类、牌号、成分及用途。

通过本章的学习，要求大家熟悉铁碳合金相图中基本相及一些特性点及其含义，了解铁碳合金的成分、组织、性能之间的关系，并能运用铁碳合金相图进行材料的选择，制订毛坯的热轧、热锻工艺及热处理工艺。

### 第一节 金属的晶体结构与结晶

金属是呈规则排列的原子聚合体，金属在固态时具有一些共同的物理特性，如：导电性、导热性、密度大、强度高及良好的塑性变形等特性。由于金属的性能还受其组成原子的本性及其原子的排列方式的影响，这就决定了不同金属具有不同的力学性能，甚至即使是成分相同的金属经过不同的加工工艺和热处理工艺后，金属性能也会有很大差异。

#### 一、金属的晶体结构

##### (一) 金属晶体结构的基本概念

根据金属离子不存在方向性，也不存在结合的饱和性的特点，将其假想为一个圆球，那么晶体中原子（或离子）在空间呈规则排列可用图 2-1 (a) 表示。这种规则的排列方式称为晶体的结构。为了便于研究晶体结构，假设将每个原子看作一个几何质点，通过质点的中心画出许多空间直线，便形成由这些直线组成的空间格架。这种假想的用于描述原子在晶体中的排列方式的空间几何格架在晶体学上称作晶格如图 2-1 (b) 所示。晶格的节点为原子（离子）平衡中心的位置。晶格的最小几何组成单元称为晶胞如图 2-1 (c) 所示。不难看出

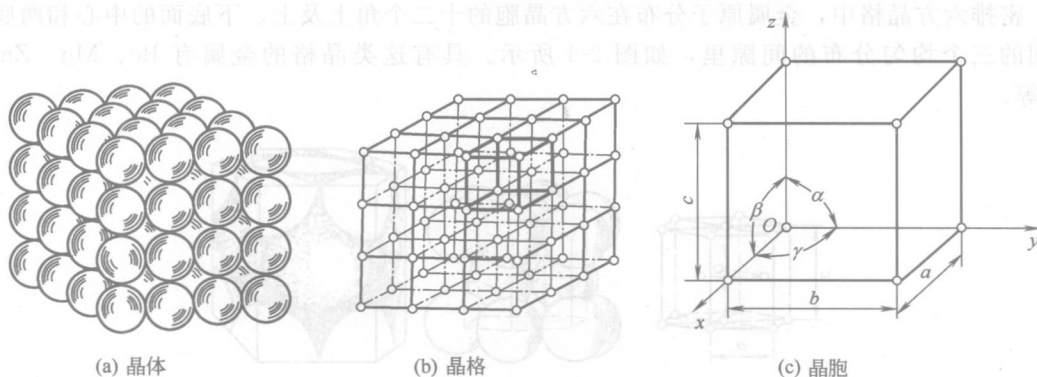


图 2-1 晶体、晶格和晶胞示意