

# 工程材料及成形技术

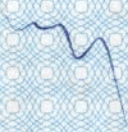
(机械类各专业用)

王爱珍 主 编



郑州轻工业学院

二〇〇二年七月



## 前 言

本书是在郑州轻工业学院金工教研室 1994 年至 1996 年教学内容和课程体系改革探索的基础上,根据新世纪科技发展对人才能力培养的要求及学科系统化和整体化发展的趋势,结合作者二十多年来的教学实践和科研成果,以及联合郑州五所高校几次座谈研讨后编写而成的。

本书吸取总结了国内外同类及相关教材改革的实践经验和优点,将机械制造中使用的工程材料及毛坯零件成型技术,采用工艺形态学体系,以“工程材料、成形、改性工艺等过程及其工艺和结构设计”为主线,较为系统地介绍了工程材料的性能、组织结构、牌号及用途、改性方法、成型方法及结构工艺性等,尤其是重点介绍了工程材料坯件各种成形工艺设计及结构设计。全书在编写过程中,既注意了与金工实习教材内容的配合、拓宽和加深,又注重了能力培养和实用工艺设计参考,力求深广度适中,多增加实际生产应用的图表、资料、经验公式和设计实例。还注重了应用于机械制造中的新材料、新技术和新工艺方法,形成了自己的编写特色。

本书主要用作高等工业院校机械类各专业学习本课程时的通用教材,也可供有关工程技术人员参考。

参加本书编写的作者及其编写内容,以及对本书作出贡献的有关人员在以后正式出版时,再一一写明。

编 者  
2002 年 7 月

3/27/15  
机设 54/2  
李朝日  
机设 01-520/2  
227.11

1/27/2002

# 目 录

## 第一篇 金属材料

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第一章 金属材料的主要性能           | 1  |
| § 1.1 金属材料的力学性能         | 1  |
| 一、强度                    | 1  |
| 二、塑性                    | 4  |
| 三、硬度                    | 4  |
| 四、冲击韧性                  | 6  |
| § 1.2 金属材料的物理、化学性能及工艺性能 | 7  |
| 一、金属材料的物理和化学性能          | 7  |
| 二、金属材料的工艺性能             | 8  |
| 思考练习题                   | 8  |
| 第二章 金属材料的组织结构           | 10 |
| § 2.1 金属的晶体结构及结晶        | 10 |
| 一、金属的晶体结构               | 10 |
| 二、纯金属的结晶                | 13 |
| 三、金属的同素异构转变             | 16 |
| § 2.2 合金的晶体结构及结晶        | 17 |
| 一、固态合金的相结构              | 17 |
| 二、二元合金相图                | 19 |
| § 2.3 铁碳合金的结构及相图        | 25 |
| 一、铁碳合金组织结构              | 25 |
| 二、铁碳合金的相图               | 27 |
| 三、铁碳合金相图的应用             | 32 |
| 思考练习题                   | 33 |
| 第三章 钢的改性处理              | 35 |
| § 3.1 钢的热处理原理           | 35 |
| 一、钢在加热及冷却时的转变温度         | 35 |
| 二、钢在加热时的组织转变            | 36 |
| 三、钢在冷却时的组织转变            | 37 |
| § 3.2 钢的普通热处理           | 42 |
| 一、钢的退火                  | 42 |
| 二、钢的正火                  | 43 |
| 三、钢的淬火                  | 44 |
| 四、钢的回火                  | 48 |
| § 3.3 钢的表面热处理           | 50 |
| 一、钢的表面淬火                | 50 |
| 二、钢的表面化学热处理             | 51 |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| § 3.4 钢的表面强化处理    | 53  |
| 一、喷涂覆层            | 54  |
| 二、气相沉积法           | 54  |
| 三、高能束强化           | 55  |
| § 3.5 钢的表面防护处理    | 57  |
| 一、钢铁腐蚀与防护         | 58  |
| 二、钢铁电镀与化学镀        | 59  |
| 三、钢铁氧化(发蓝)和磷化     | 60  |
| 四、钢铁着色装饰处理        | 61  |
| 思考练习题             | 62  |
| 第四章 黑色金属材料        | 64  |
| § 4.1 碳素钢         | 64  |
| 一、常用杂质元素对碳素钢性能的影响 | 64  |
| 二、常用碳素钢的分类        | 64  |
| 三、碳素钢的牌号、性能及用途    | 64  |
| § 4.2 合金钢         | 67  |
| 一、合金元素在钢中的作用      | 67  |
| 二、合金钢的分类和牌号       | 70  |
| 三、合金结构钢的性能和应用     | 70  |
| 四、合金工具钢           | 74  |
| 五、特殊性能钢           | 78  |
| § 4.3 铸铁          | 87  |
| 一、铸铁的石墨化          | 87  |
| 二、常用铸铁的分类及应用      | 88  |
| 思考练习题             | 95  |
| 第五章 有色金属材料        | 96  |
| § 5.1 铝及其合金       | 96  |
| 一、纯铝              | 96  |
| 二、铝及铝合金           | 96  |
| § 5.2 铜及其合金       | 98  |
| 一、纯铜              | 98  |
| 二、铜及铜合金           | 98  |
| § 5.3 轴承合金        | 100 |
| 一、对轴承合金性能的要求      | 100 |
| 二、对轴承合金组织的要求      | 100 |
| 三、常用轴承合金          | 101 |
| 四、对轴承合金组织的要求      | 100 |
| 思考练习题             | 101 |
| 第六章 新型金属材料        | 102 |
| § 6.1 形状记忆合金      | 102 |
| 一、形状记忆合金的分类       | 102 |

|               |     |
|---------------|-----|
| 二、形状记忆合金的用途   | 102 |
| § 6.2 减振合金    | 103 |
| 一、减振合金的类型及其机理 | 103 |
| 二、减振合金的应用及发展  | 104 |
| § 6.3 纳米材料    | 104 |
| 一、纳米微粒        | 104 |
| 二、纳米材料结构      | 105 |
| § 6.4 磁性材料    | 105 |
| 一、软磁材料        | 105 |
| 二、硬磁材料        | 105 |

## 第二篇 金属材料成形

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 第七章 金属材料成形工艺基础      | 106 |
| § 7.1 金属材料件液态成形     | 106 |
| 一、金属液态成形原理          | 106 |
| 二、砂型铸造              | 113 |
| 三、特种铸造              | 115 |
| § 7.2 金属材料件塑性成形     | 119 |
| 一、金属塑性成形原理          | 120 |
| 二、金属锻造成形            | 125 |
| 三、冲压成形              | 129 |
| 四、塑性成形新技术           | 133 |
| § 7.3 金属材料件焊接成形     | 135 |
| 一、熔化焊接原理及方法         | 135 |
| 二、常用熔化焊接方法          | 146 |
| 三、熔化焊接成形新技术         | 149 |
| 四、常用压力焊接成形方法        | 152 |
| 五、钎焊方法              | 153 |
| 思考练习题               | 154 |
| 第八章 金属材料件成形工艺设计     | 157 |
| § 8.1 金属材料件液态成形工艺设计 | 157 |
| 一、铸造工艺方案的确定         | 157 |
| 二、铸造工艺参数的确定         | 162 |
| 三、浇注系统及冒口设计         | 165 |
| 四、铸造工艺图及工艺卡片的绘制     | 167 |
| 五、综合分析举例            | 168 |
| § 8.2 金属材料件塑性成形工艺设计 | 172 |
| 一、自由锻件工艺设计          | 173 |
| 二、模锻件工艺设计           | 188 |
| 三、冲压件工艺设计           | 194 |
| § 8.3 金属材料件焊接成形工艺设计 | 201 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 一、焊缝及接头形式的确定 .....        | 201 |
| 二、焊接方法的选择 .....           | 204 |
| 三、焊接材料的选择 .....           | 206 |
| 四、焊接工艺参数的确定 .....         | 209 |
| 五、焊接热处理规范及尺寸精度确定 .....    | 212 |
| 六、焊接结构件工艺设计举例 .....       | 213 |
| § 8.4 金属材料改性处理工艺设计 .....  | 217 |
| 一、改性处理的选择 .....           | 217 |
| 二、改性处理参数的确定 .....         | 219 |
| 三、改性处理工艺规范的制定 .....       | 221 |
| 四、典型零件改性处理工艺设计 .....      | 225 |
| 思考练习题 .....               | 227 |
| 第九章 金属材料结构设计 .....        | 231 |
| § 9.1 金属材料液态成形件结构设计 ..... | 231 |
| 一、铸件结构应使铸造工艺过程简化 .....    | 231 |
| 二、铸件结构应与合金的铸造性能相适应 .....  | 235 |
| 三、铸件结构与铸造方法相适应 .....      | 239 |
| 四、组合铸件的设计 .....           | 241 |
| § 9.2 金属材料塑性成形件结构设计 ..... | 242 |
| 一、锻造方法对结构设计的要求 .....      | 242 |
| 二、冲压方法对结构设计的要求 .....      | 243 |
| 三、锻造性能对结构设计的要求 .....      | 248 |
| § 9.3 金属材料焊接成形件结构设计 ..... | 248 |
| 一、焊接结构件材料的选择 .....        | 248 |
| 二、焊缝位置的设计 .....           | 250 |
| 三、焊接接头的设计 .....           | 253 |
| 四、焊接结构的设计 .....           | 256 |
| § 9.4 金属材料改性处理件结构设计 ..... | 261 |
| 一、避免尖角和棱角 .....           | 261 |
| 二、避免厚薄悬殊 .....            | 261 |
| 三、采取封闭和对称结构 .....         | 262 |
| 思考练习题 .....               | 263 |

### 第三篇 非金属材料及其成形

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第十章 高分子材料及其成形 .....   | 267 |
| § 10.1 工程塑料及其成形 ..... | 267 |
| 一、工程塑料的组成 .....       | 267 |
| 二、工程塑料的性能 .....       | 268 |
| 三、常用工程塑料 .....        | 270 |
| 四、常用工程塑料的成形方法 .....   | 272 |
| § 10.2 橡胶及其成形 .....   | 278 |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 一、工业橡胶的组成及性能       | 278 |
| 二、常用工业橡胶           | 279 |
| 三、橡胶的成形方法          | 280 |
| 第十一章 工业陶瓷及其成形      | 281 |
| § 11.1 陶瓷结构        | 281 |
| 一、晶相               | 281 |
| 二、玻璃相              | 282 |
| 三、气相               | 282 |
| § 11.2 陶瓷的性能       | 283 |
| 一、陶瓷的力学性能          | 283 |
| 二、陶瓷的热物理性能         | 283 |
| 三、陶瓷的化学性能          | 283 |
| § 11.3 常用工业陶瓷      | 283 |
| 一、普通陶瓷             | 283 |
| 二、氧化铝陶瓷            | 284 |
| 三、氮化硅陶瓷            | 284 |
| 四、碳化硅陶瓷            | 284 |
| 五、氮化硼陶瓷            | 284 |
| § 11.4 陶瓷成形工艺方法及工艺 | 284 |
| 一、可塑法成形            | 284 |
| 二、注浆法成形            | 285 |
| 三、压制法成形            | 285 |
| 第十二章 复合材料及其成形      | 286 |
| § 12.1 复合材料性能      | 286 |
| 一、力学性能             | 286 |
| 二、高温性能             | 286 |
| § 12.2 常用复合材料      | 287 |
| 一、纤维增强复合材料         | 287 |
| 二、颗粒增强复合材料         | 288 |
| 三、层合复合材料           | 289 |
| § 12.3 复合材料成形方法    | 289 |
| 一、手糊成形法            | 289 |
| 二、缠绕成形法            | 289 |
| 三、喷射成形法            | 289 |
| 四、模压成形法            | 290 |
| 五、树脂转移模成形法         | 290 |
| 思考练习题              | 290 |

## 第四篇 工程材料及其成形技术选择

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 第十三章 工程材料及坯件的选择 | 291 |
| § 13.1 工程材料的选择  | 291 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 一、选材的基本原则              | 291 |
| 二、典型零件的选材              | 293 |
| § 13.2 坯件的选择           | 294 |
| 一、坯件类型的比较              | 294 |
| 二、坯件类型选择               | 294 |
| 三、典型零件毛坯选择             | 296 |
| 第十四章 综合举例分析            | 299 |
| § 14.1 V带轮成形的设计方案      | 299 |
| 一、直径小于 100mm 的小带轮设计    | 299 |
| 二、直径约 300mm 的中型或大型带轮设计 | 299 |
| § 14.2 圆柱齿轮的成形设计方案     | 300 |
| 一、直径小于 100mm 的小齿轮设计    | 300 |
| 二、直径约 200mm 的小齿轮设计     | 301 |
| 三、直径为 400~1000mm 的齿轮设计 | 301 |
| § 14.3 小型汽油发动机的成形设计方案  | 302 |
| 一、发动机结构及工作原理           | 302 |
| 二、发动机零件材料及成形设计         | 302 |
| § 14.4 承压油缸的成形设计方案     | 303 |
| 一、技术分析                 | 303 |
| 二、成形设计方案比较及选择          | 303 |
| 思考题                    | 305 |

# 第一篇 金属材料

## 第一章 金属材料的主要性能

工程材料包括金属材料、非金属材料、复合材料等。了解和掌握这些材料的使用性能和工艺性能,是进行设计、选材和制订各种加工工艺的重要依据。本章简要论述金属材料的主要性能。

### § 1.1 金属材料的力学性能

金属材料的性能包括力学性能、物理性能、化学性能及工艺性能。它们既决定金属材料的应用范围、使用性能和寿命,又决定金属材料的各种加工方法。

由金属材料制成的各种零件或构件,在制造和使用过程中,都会受到各种形式的外力作用,如轴类零件受弯曲力和扭力的作用等。

金属材料在外力作用下表现出来的特性称为力学性能,分为弹性、塑性、强度、硬度和冲击韧性等。金属材料的力学性能指标可通过各种试验测出。常用的试验方法有拉伸试验、硬度试验和冲击试验等。

#### 一、强度

金属材料在外力作用下抵抗永久变形和断裂的能力称为强度。按外力作用的性质不同,主要有屈服强度、抗拉强度、抗压强度、抗弯强度等,工程上常用的是屈服强度和抗拉强度,这两个强度指标可通过拉伸试验测出。

##### 1. 拉伸试验

先将被测材料按 GB6397-86 规定制成标准试样(图 1-1a),再将它安装在拉伸试验机的上下夹头间,然后缓慢地对试样两端施加轴向拉力 $F$ ,观察并测定由所加拉力引起的长度变化,直到试样拉断为止。所测低碳钢试样的拉力与试样伸长量的对应关系曲线如图 1-2 所示。

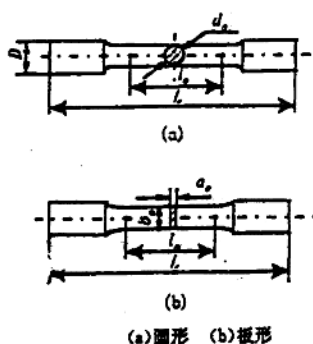


图 1-1 标准拉伸试样

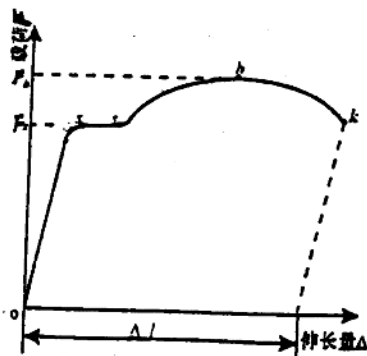


图 1-2 低碳钢拉伸曲线

由图 1-2 可知,当拉力较小时,试样的伸长量与拉力成正比增加,保持直线关系。拉力除去后试样恢复原状,这种变形称为弹性变形。当拉力超过 $F_s$ 点后则进入“弹-塑”性变形阶段,在这一阶段若除去拉力,试样不能完全恢复原状,产生永久变形,即塑性变形。

当拉力增加到 $F_s$ ,拉伸曲线上出现平台,即拉力虽不增加,但试样还继续产生塑性变形而伸长,这种现象称为屈服, $s$ 点被称为屈服点。金属材料屈服后,开始产生均匀的塑

性变形，且随拉力的增大而增大。当拉力达到最大值  $F_b$  后，变形集中在试样某段并产生局部缩颈现象，随后试样继续伸长直至在缩颈处断裂。试样在拉伸过程中，材料受到拉力  $F$  作用时，其单位面积上的拉力用应力“ $\sigma$ ”来表示，即

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

式中  $\sigma$  ——应力，Pa（帕斯卡，简称帕），

$$1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2;$$

与工程制单位换算关系：

$$1\text{Kgf/mm}^2 = 10^7\text{Pa} = 10\text{MPa};$$

$F$  —— 拉力（或压缩力），N（牛顿）；

$S$  —— 试样的横截面积， $\text{mm}^2$

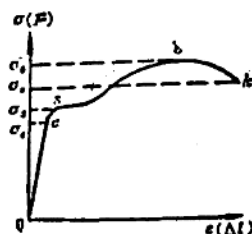


图 1-3 低碳钢拉伸时的应力-应变曲线

通常，可将图 1-2 所示的  $F-\Delta L$  拉伸曲线转换成  $\sigma-\epsilon$  应力-应变曲线（图 1-3），将图 1-2 横坐标  $\Delta L$  变换成试样单位长度上的变形量，即应变  $\epsilon = \Delta L/L$ ，纵坐标  $F$  变换成试样单位横截面积上的力，即应力  $\sigma = F/S$ 。这样才能真实反映材料的力学性能。

## 2. 拉伸时的强度指标

（1）常温强度 在常温（约  $20^\circ\text{C}$ ）下做上述试验所测得的强度指标称为常温强度。常温强度指标有弹性极限、屈服极限和强度极限。

1) 弹性极限 如图 1-2 所示，试验材料产生最大弹性应变时的应力，以  $\sigma_e$  表示，其计算公式为：

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (\text{MPa})$$

式中  $F_e$  —— 产生弹性极限时的最大拉力，N；

$S_0$  —— 试样原始截面积， $\text{mm}^2$ 。

在弹性范围内，应力与应变的比值称为材料的弹性模量  $E$ ，它相当于产生单位弹性应变所需要的应力值，即

$$E = \frac{\sigma_e}{\epsilon_e} \quad (\text{MPa})$$

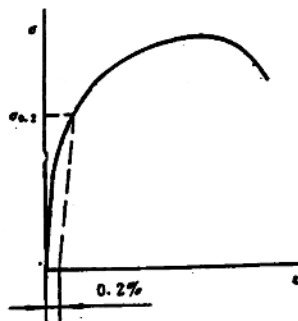


图 1-4 某些材料的条件屈服强度

弹性模量  $E$  是衡量材料产生弹性变形难易程度的指标， $E$  值愈大，则使其产生一定量弹性变形的应力也应愈大。因此，工程上常把它叫做材料的刚度。 $E$  值愈大，材料的刚度愈大，说明材料抵抗产生弹性变形的能力愈强，愈不容易产生弹性变形。

弹性模量  $E$  主要决定于材料本身，是金属材料最稳定的性能之一，合金化、热处理和冷热加工对它的影响很小。在室温下，钢的弹性模量  $E$  大都在  $190,000 \sim 220,000\text{MPa}$  之间。 $E$  随温度的升高而逐渐降低。

2) 屈服极限（屈服强度） 试验材料开始产生屈服现象时的应力，以  $\sigma_s$  表示，其计

算公式为:

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0} \quad (\text{MPa})$$

式中  $F_s$  为产生屈服现象时的拉力, N。

金属材料中只有低碳钢和中碳钢等少数金属有屈服现象, 大多数金属材料都没有明显的屈服点。因此, 对这些金属材料, 规定以产生 0.2% 残余伸长的应力作为屈服强度, 又称为条件屈服强度, 以  $\sigma_{0.2}$  表示 (图 1-4)。

屈服强度是材料在外力作用下开始产生塑性变形的最低应力值, 当材料的实际工作应力大于其屈服强度时, 就有可能产生过量塑性变形而失效, 因此  $\sigma_s$  是绝大多数机械零件设计时的重要参数, 是材料最重要的力学性能指标之一。

然而, 灰铸铁等脆性材料拉伸时几乎不发生塑性变形, 将发生突然断裂, 其最大外力就是断裂外力。所以, 灰铸铁在常用的工程材料手册中没有屈服强度指标, 仅有抗拉强度指标。

3) 强度极限 (抗拉强度) 试验材料在拉断前所能承受的最大应力, 以  $\sigma_b$  表示, 其计算公式为:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} \quad (\text{MPa})$$

式中  $F_b$  为试样拉断前的最大外力, 单位为 N。

抗拉强度反映试样最大的均匀变形的抗力, 也是设计机械零件和选择金属材料的主要参数之一, 所以它也是评价金属材料的主要指标。

4) 断裂极限 (断裂强度) 试样在断裂时的应力, 以  $\sigma_k$  表示, 其实际意义不大, 很少应用。

$\sigma_s$  与  $\sigma_b$  的比值叫做屈强比, 屈强比愈小, 工程构件的可靠性愈高, 但屈强比太小, 则材料强度的有效利用率太低。合金化、热处理、冷热加工对材料的  $\sigma_s$ 、 $\sigma_b$  数值会产生很大的影响。

(2) 高温强度 当零件在较高温度下工作时, 应做高温拉伸试验, 测定其高温强度。高温强度包括高温瞬时强度、高温持久强度和高温蠕变强度。

通常, 在高温下短时间工作的零件, 用高温瞬时强度作为其强度指标, 在规定的试验温度下, 按照一般加载速度作拉伸试验; 而在高温下长时期工作的零件, 尽管所受应力值很小 (即使小于其  $\sigma_s$ ) 也会随着时间的延长, 持续而缓慢地产生塑性变形, 即高温蠕变。因此, 在规定试验温度 (略高于最高工作温度) 和时间 (如 100000 h) 内, 试样所产生的蠕变变形量不超过规定值 (如 1%) 时的最大应力, 即为高温蠕变强度。如果温度升高, 材料的蠕变强度就会大大降低。

普通钢材在 350℃ 以上温度工作时就能观察到蠕变现象, 在 400℃ 时蠕变强度为 800MPa, 在 500℃ 时降为 200MPa, 至于温度、时间和变形量的数值, 应根据零件的工作条件来规定。

高温持久强度用来衡量材料在高温下长期承受外力作用时, 抵抗变形和破坏的能力。

(3) 疲劳强度 金属材料抵抗无数次重复交变外力作用而不破坏的能力, 称为疲劳强度。机械产品中许多诸如曲轴、连杆、齿轮、弹簧等零件在工作过程中受到重复交变应力的长期作用, 会在远小于强度极限  $\sigma_b$ , 甚至远小于屈服强度  $\sigma_s$  的应力作用下断裂, 这种断裂称为疲劳断裂。无论是塑性材料还是脆性材料, 断裂时都不产生明显的塑性变形, 而是突然发生, 具有很大的危险性, 有相当多零件的破坏属于疲劳破坏, 对此必须引起足够的重视。

当循环应力逐渐降至某一定值后, 应力循环无限次增加仍不发生疲劳断裂, 此应力就是疲劳强度或疲劳极限, 如图 1-5 所示。随着应力循环次数  $N$  不断增大, 材料所能承受的最大交变应力  $\sigma_m$  不断减小, 当交变应力循环次数  $N$  达到无限次时, 材料仍不发生破坏 (对碳素钢  $N=1 \times 10^7$ , 高强度钢  $N=1 \times 10^8$  时零件仍不断裂) 的应力即可确定为其疲劳强度, 以  $\sigma_r$  表示, 下标  $r$  表示交变应力循环系数, 若为交变对称应力循环, 其疲劳强度以  $\sigma_{-1}$  表示。

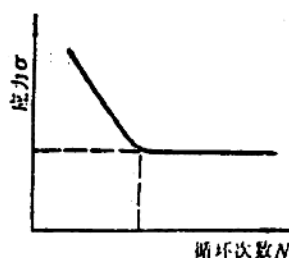


图 1-5 金属的疲劳曲线

## 二、塑性

金属材料在外力作用下产生塑性变形而不破坏的能力称为塑性。许多零件或毛坯是通过塑性变形而形成的, 要求材料有较高的塑性, 并且为防止零件工作时脆断, 也要求材料有一定程度的塑性。因此, 塑性也是金属材料的主要力学性能指标之一。

通过上述拉伸试验, 也可测定金属的塑性指标。常用的塑性指标有断后伸长率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad \psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$$

式中,  $L_0$  和  $L_1$  分别为试样的原始长度和拉断时的长度 (mm);  $S_0$  和  $S_1$  分别为试样原横断面积和拉断后断口处的横断面积 ( $\text{mm}^2$ ), 见图 1-1 所示。

由于  $\delta$  值与试样尺寸有关, 一般规定  $L_0=5d_0$  或  $L_0=10d_0$  ( $d_0$  为试样原始直径), 当试样的长径比  $L_0/d_0=5$  时, 断后伸长率用  $\delta_5$  表示,  $L_0/d_0=10$  时用  $\delta_{10}$  表示。试样长径比确定后,  $\delta$  和  $\psi$  的数值愈大, 表示金属材料的塑性愈好, 一般把  $\delta \geq 5\%$  的材料称为塑性材料, 而把  $\delta < 5\%$  的材料称为脆性材料, 如铸铁是典型的脆性材料, 低碳钢是黑色金属中塑性最好的材料, 其良好的塑性既能保证压力加工的顺利进行, 又能保证零件工作时的安全可靠, 防止突然断裂。

## 三、硬度

金属材料局部抵抗硬物压入其表面的能力称为硬度, 用专门的硬度试验机测定, 常用的硬度测定方法有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等测试方法。

### 1. 布氏硬度测试法

通常以一定的试验力  $F$ ，将直径为  $D$  的淬火钢球或硬质合金钢球压入被测金属表面（图 1-6），并保持一定时间后卸去试验力，即得到直径为  $d$  的压痕，将试验力除以压痕表面积所得之值即为布氏硬度，以 HB 表示，即：

$$HB = \frac{F}{S_{压}}$$

$$= 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (N/mm^2)$$

式中  $F$  —— 试验力，N；

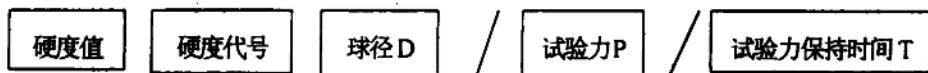
$S_{压}$  —— 压痕表面积， $mm^2$ ；

$D$  —— 钢球直径，mm； $d$  —— 压痕直径，mm。

在测定布氏硬度时，由于试验力  $F$  和直径  $D$  都是定值，实际上并不需要进行上述计算，只要先测得压痕直径  $d$ ，再根据  $d$  值查有关表格即可确定 HB 值。

按照 GB231-84 规定的布氏硬度符号，硬度机压头为淬火钢球时用 HBS 表示，适用于硬度较低 ( $HB < 450$ ) 的材料；硬度机压头为硬质合金钢球时用 HBW 表示，适用于硬度较高 ( $450 \leq HB \leq 650$ ) 的材料。由于布氏硬度压痕较深且面积大，故不适宜测试太薄的试样和成品零件的硬度。

生产中常用布氏硬度法测定经退火、正火和调质的钢件，以及铸铁、有色金属、低合金结构钢等毛坯或半成品的硬度。标注布氏硬度时，符号“HBS”或“HBW”之前写硬度值，符号后面用数值按顺序依次表示球体直径、试验力和试验力保持时间（10~15s 不标注），并用斜分线分别隔开。硬度值在图纸资料中的标注方法如下：



例如：170HBS10/3000/30，表示用直径 10mm 的淬火钢球压头，在 3000Kgf 试验力作用下，保持 30s，测得的布氏硬度值为 170；500HBW5/750，表示用直径 5mm 的硬质合金球在 750N 试验力作用下，保持 10~15s 测得的布氏硬度值为 500。

## 2. 洛氏硬度测试法

用一定的试验力  $F$ ，将顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥体或直径为 1.588mm 的淬火钢球压入被测金属表面（图 1-7），然后根据压痕的深度确定被测金属材料的硬度值的方法称洛氏硬度测试法。一般洛氏硬度计不需直接测量压痕深度，其值可由刻度盘上的指针指示出来。

根据所加试验力的大小和压头类型的不同，洛氏硬度又可分为 HRA、HRB、HRC 和 HRD 四种，它们的测量

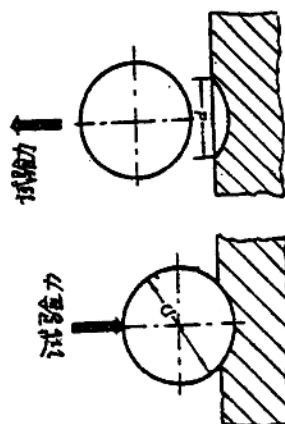


图 1-6 布氏硬度试验

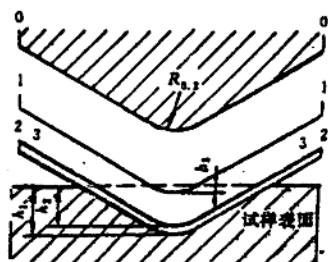


图 1-7 洛氏硬度试验示意图

范围和应用范围也不同（见表 1-1）。

洛氏硬度的标注方法比布氏硬度简单，但仍是硬度值在硬度代号的前面，如 60HRC 表示用 120° 金刚石圆锥压头，试验力为 150kgf 所测得的硬度值为 60。

洛氏硬度压痕小，可测较薄材料和硬材料，但不如布氏硬度法准确。一般生产中，以 HRC 用得最多，与 HB 的关系（当 HB > 220 时）约为 1:10。

通过试验发现，布氏硬度值 HBS 与强度极限  $\sigma_b$  之间有近似关系，即碳素钢、低合金钢和调质结构钢的  $\sigma_b \approx 3.5\text{HBS (MPa)}$ ；冷变形黄铜及青铜的  $\sigma_b \approx 4.0\text{HBS (MPa)}$ ；铝铸件的  $\sigma_b \approx 2.6\text{HBS (MPa)}$ ；而硬铝的  $\sigma_b \approx 3.7\text{HBS (MPa)}$ 。硬度反映材料的耐磨性，也是金属材料的一项重要性能指标。

表 1-1 洛氏硬度试验力及应用范围 (GB230-83)

| 符 号 | 应用范围      | 压头类型         | 总载荷 kgf | 适用的材料           |
|-----|-----------|--------------|---------|-----------------|
| HRA | 60~85HRA  | 120° 金刚石圆锥   | 60      | 硬质合金、表面淬硬层或渗碳层  |
| HRB | 25~100HRB | 1.588mm 直径钢球 | 100     | 有色金属或退火、正火钢等    |
| HRC | 20~67HRC  | 120° 金刚石圆锥   | 150     | 调质钢、淬火钢等        |
| HRD | 40 ~77HRD | 120° 金刚石圆锥   | 100     | 薄钢板、中等厚度的表面硬化零件 |

### 3. 维氏硬度测试法

用一定的试验力 F，将金刚石的正四棱锥体在被测金属表面压出一个四方锥形的压痕（图 1-8），测量出压痕对角线长度 d，就可以计算出压痕的表面积 S，将试验力除以压痕表面积即得维氏硬度值，用 HV 表示，即：

$$\text{HV} = \frac{F}{S}$$

维氏硬度的测试方法和技术条件可参阅 GB4340-84，其同于布氏和洛氏硬度的标注方法。维氏硬度试验既没有布氏硬度试验的钢球变形问题，也没有洛氏的各种硬度不能统一问题，因用对角线长度计量，精确可靠，故比洛氏硬度试验更适于测量极薄试样的硬度，但效率低，不宜用于成批生产的常规检验。

### 四、冲击韧性

金属材料抵抗冲击载荷的能力称为冲击韧性，简称为韧性。不少机器零件如火车挂钩、锻锤锤头、冲床连杆和曲轴等，在工作时要承受冲击载荷，且冲击所引起的变形和应力比静载时大得多，如果仍只用静载荷作用下的强度极限来设计计算，就不能保证零件工作时的安全性，因此必须同时考虑金属材料的韧性。目前，工程上一般用摆锤冲击试验来测定金属材料的韧性值  $a_K$ 。

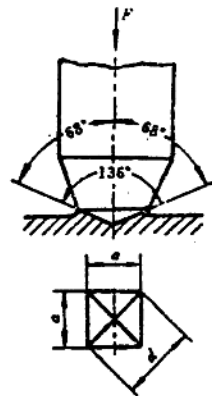


图 1-8 维氏硬度试验示意图

冲击试验是先将被测的金属材料制成一定形状和尺寸的试样（图 1-9a，见 GB228-87），安放在冲击试验机上，把具有一定重量  $G$  的摆锤提到  $H$  高度后，使摆锤自由下落（图 1-9 b），冲断试样后，落至  $h$  高度，其位能的变化值即为摆锤对试样所做的冲击功，即：

$$A_k = G (H - h) (J)。$$

冲击功除以试样断口处截面积即为冲击韧性  $a_k$ ，即：

$$\alpha_k = \frac{A_k}{S} \quad (J/cm^2)$$

式中  $a_k$  ——冲击韧性， $J/cm^2$ ；

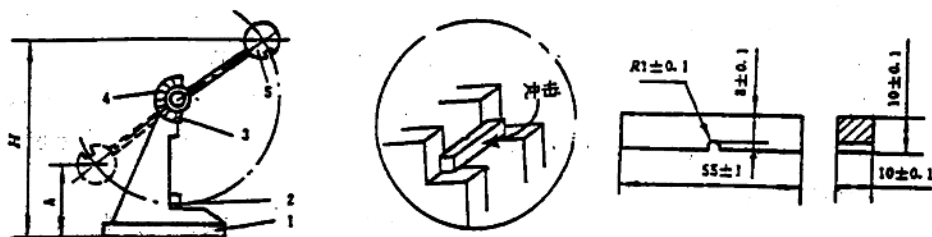
$A_k$  ——冲击功， $J$ ；

$S$  ——试样断口处截面积， $cm^2$ 。

$$1 J = 1 N \cdot m = 0.1 kgf \cdot m$$

$a_k$  值越大，金属材料的韧性越好，对于重要零件，要求  $a_k > 50 J/cm^2$ 。实践中往往是零件要经过小能量多次重复冲击才被冲断，因此  $a_k$  值一般只作为设计计算的参考。

综上所述，金属材料的各种力学性能之间有一定联系。一般提高金属的强度、硬度往往会降低其塑性、韧性；反之，提高塑性、韧性，则又会削弱其强度。不同的金属材料具有不同的力学性能，即使同一种金属材料，改变其内部组织也会改变其力学性能，在提出或选定一项力学性能指标时要兼顾其它性能的变化。



1. 试验机； 2. 试样； 3. 指针； 4. 刻度盘； 5. 摆锤

图 1-9 冲击试验示意图

§ 1.2

## § 1.2 金属材料的物理、化学性能及工艺性能

### 一、金属材料的物理和化学性能

#### (一) 物理性能

金属的物理性能主要指密度、熔点、导热性、导电性、磁性及热胀冷缩性等。涉及到金属加工的主要性能有：

#### 1. 密度及熔点

金属的密度就是单位体积金属的质量，符号为 $\rho$ ，单位是 $\text{g/cm}^3$ 。

金属的熔点用温度( $^{\circ}\text{C}$ 或 $\text{K}$ )来衡量，不同用途的机器零件，对金属材料的密度和熔点要求也不同。如飞机和汽车上的许多零件和构件，要选用密度比较小的铝、镁合金来制造。而重型机器上的许多构件，则必须选用密度较大的钢铁材料来制造。又如铸钢、铸铁和铸造铝合金的熔点各不相同，在铸造时三者的熔炼工艺就有很大的差别。

## 2. 导热性

金属传导热的性能称为导热性，一般用导热系数 $\lambda$ 来衡量金属导热性的好坏，其单位是 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ 。 $\lambda$ 值越大，导热性越好。在热加工时，若金属的导热性很差，在加热或冷却时，尤其以较快的速度加热或冷却时，会在金属中产生较大的温度差而引起较大的热应力，从而导致工件变形甚至产生裂纹。因而对导热性差的材料，应减慢其加热或冷却速度。例如高速钢的导热性较差，在锻造时就应该用很低的速度进行加热，否则易产生裂纹。

## 3. 热膨胀性

金属在温度升高时体积胀大的现象称为热膨胀性，用线膨胀系数 $\alpha$ 表示，其单位是 $1/^{\circ}\text{C}$ 或 $1/\text{K}$ ，即每当温度升高以 $1^{\circ}\text{C}$ ，其单位长度膨胀收缩量。 $\alpha$ 值越大，金属的尺寸或体积随温度变化而变化的程度就越大。它不仅对零件在工作时的尺寸精度有很大影响，而且对其成形过程有很大影响。例如铸造和焊接时，金属液温度愈高，冷凝时收缩就愈大， $\alpha$ 值也愈大，若不采取适当的工艺措施，极易产生缩孔和内应力，导致工件变形或开裂。

### (二) 化学性能

金属的化学性能是指金属在室温或高温下抵抗各种介质化学作用的能力，主要有抗氧化性和抗腐蚀性，即化学稳定性。

由于金属的氧化和腐蚀不仅破坏零件的表面质量，而且也降低零件的精度，严重的局部腐蚀和应力共同作用，还会使零件产生破坏。因此对处于高温或有腐蚀性介质中的工件，首先要考虑的是它们的化学稳定性。如在高温环境中的电炉丝、炉底板、炉罐等可采用耐热钢；化工设备、医疗器械等应采用不锈钢、工程塑料、陶瓷材料及复合材料等来制造。

## 二、金属材料的工艺性能

金属材料的工艺性能是指金属材料适应加工工艺要求的能力。按加工方法的不同，可分为铸造性能、锻压性能、焊接性能、切削加工性能及热处理工艺性能等。在设计机械零件和选择加工方法时，都要考虑金属材料的工艺性能，如灰铸铁具有优良的铸造性能和切削性能，常用来铸造机械零件；但其锻造性能差，不能锻造；焊接性能也较差。低碳钢的锻造性能和焊接性能都很好。热处理是作为改善切削加工性能和使零件得到所要求的性能而安排在有关工序之间的工艺。

## 思考练习题

1. 测定强度上 $\sigma_s$ 和 $\sigma_{0.2}$ 有什么不同？
2. 设计刚度好的零件，应根据何种指标选择材料？采用何种材料为宜？材料的 $E$ 越大，其塑性越差，这种说法是否正确？为什么？
3. 同一材料用不同的硬度测定方法所测得的硬度值有无确定的对应关系？为什么？有

两种材料的硬度分别为 45HRC 和 200HBS，问哪一种材料硬？

4. 下列说法是否准确？若不准确，应如何改正？

(1) 机器中的零件在工作时，材料强度高的不会变形，材料强度低的一定会产生变形。

(2) 材料的强度高，其塑性就低；材料的硬度高，其塑性就大。

(3) 材料的弹性极限高，所产生的弹性变形量就较大。

5. 硬度和抗拉强度之间有没有一定的关系？为什么？