



21世纪高等院校创新型项目成果

# 金属材料与热处理

Jinshu Cailiao yu Rechuli

◎主编 吴广河 沈景祥 庄 蕾

◎主审 翟 建



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

21 世纪高等院校创新型项目成果

# 金属材料与热处理

主 编 吴广河 沈景祥 庄 蕾  
副主编 李祥福 李凡国 范开原  
主 审 翟 建

# 前 言

本书贯彻了高等教育“必须、够用”的指导原则，在保证基础知识和基本理论的前提下对知识内容进行了简化，结合岗位要求，突出教学内容的针对性、实用性，培养学生分析问题、解决问题的能力，达到会选材料、会选工艺方法的目的。本书介绍了新技术、新工艺、新方法，可开阔学生视野。本书可供高等教育机械类、机电类、近机电类专业使用，也可作为成人教育、职工教育的教学用书。

本书具有以下特点：第一，注重在理论知识、素质、能力、技能等方面对学生进行全面的培养；第二，注重吸取现有相关教材的优点，充实新知识、新工艺、新技术等内容，并采用最新标准；第三，做到图解直观形象，尽量联系现场实际；第四，紧密结合生产实际，突出知识应用；第五，语言文字叙述精练，通俗易懂，总结归纳提纲挈领。

本书由吴广河、沈景祥、庄蕾任主编，李祥福、李凡国、范开原任副主编。具体编写分工为：吴广河编写第七、八、九章，沈景祥编写第五、六章，庄蕾编写第十、十二章，李祥福编写第一、二章，李凡国编写第三、四章，范开原编写第十一章。本书由翟建审稿。本书在编写过程中得到了领导和同行们的大力支持和帮助，以及有关科研单位、企业的支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第一章 材料的力学性能 .....      | 1   |
| 第一节 概述 .....           | 1   |
| 第二节 材料的力学性能指标 .....    | 1   |
| 思考题 .....              | 9   |
| 第二章 金属的晶体构造与结晶 .....   | 12  |
| 第一节 金属的理想晶体结构 .....    | 12  |
| 第二节 金属晶体的实际构造 .....    | 15  |
| 第三节 纯金属的结晶过程 .....     | 19  |
| 第四节 铸锭组织 .....         | 23  |
| 思考题 .....              | 24  |
| 第三章 合金的结构与二元合金相图 ..... | 26  |
| 第一节 合金的结构和组织 .....     | 26  |
| 第二节 二元合金相图 .....       | 30  |
| 第三节 合金的性能与相图之间关系 ..... | 35  |
| 思考题 .....              | 38  |
| 第四章 铁碳合金及碳钢 .....      | 41  |
| 第一节 铁碳合金相图 .....       | 41  |
| 第二节 碳钢 .....           | 54  |
| 思考题 .....              | 62  |
| 第五章 钢的热处理 .....        | 65  |
| 第一节 钢在加热时的组织转变 .....   | 65  |
| 第二节 钢在冷却时的组织转变 .....   | 67  |
| 第三节 钢的热处理工艺 .....      | 71  |
| 第四节 钢的表面热处理 .....      | 80  |
| 第五节 其他热处理工艺简介 .....    | 86  |
| 第六节 热处理零件的结构工艺性 .....  | 87  |
| 思考题 .....              | 90  |
| 第六章 合金钢 .....          | 94  |
| 第一节 概述 .....           | 94  |
| 第二节 合金元素在钢中的作用 .....   | 95  |
| 第三节 合金结构钢 .....        | 102 |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 第四节 合金工具钢 .....     | 107 |
| 第五节 特殊性能钢 .....     | 114 |
| 思考题 .....           | 118 |
| 第七章 铸铁 .....        | 121 |
| 第一节 铸铁的分类 .....     | 121 |
| 第二节 铸铁的石墨化 .....    | 122 |
| 第三节 灰铸铁 .....       | 126 |
| 第四节 可锻铸铁 .....      | 128 |
| 第五节 球墨铸铁 .....      | 130 |
| 第六节 合金铸铁简介 .....    | 134 |
| 思考题 .....           | 135 |
| 第八章 有色金属及其合金 .....  | 137 |
| 第一节 铝及铝合金 .....     | 137 |
| 第二节 铜及铜合金 .....     | 144 |
| 第三节 轴承合金 .....      | 148 |
| 第四节 粉末冶金与硬质合金 ..... | 150 |
| 思考题 .....           | 151 |
| 第九章 铸造 .....        | 153 |
| 第一节 概述 .....        | 153 |
| 第二节 砂型铸造 .....      | 154 |
| 第三节 铸造工艺的基本内容 ..... | 163 |
| 第四节 铸造合金 .....      | 168 |
| 第五节 特种铸造简介 .....    | 171 |
| 思考题 .....           | 175 |
| 第十章 锻压 .....        | 177 |
| 第一节 金属的塑性变形 .....   | 178 |
| 第二节 自由锻造 .....      | 181 |
| 第三节 模型锻造 .....      | 184 |
| 第四节 板料冲压 .....      | 188 |
| 第五节 其他锻压方法简介 .....  | 195 |
| 思考题 .....           | 197 |
| 第十一章 焊接 .....       | 199 |
| 第一节 手工电弧焊 .....     | 199 |
| 第二节 气焊与气割 .....     | 206 |
| 第三节 其他焊接方法 .....    | 208 |
| 第四节 焊接应力与变形 .....   | 211 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 第五节 常用金属材料的焊接 .....           | 214        |
| 第六节 焊接结构设计 .....              | 216        |
| 第七节 常见的焊接缺陷及其产生原因 .....       | 218        |
| 思考题 .....                     | 219        |
| <b>第十二章 零件选材及加工工艺分析 .....</b> | <b>220</b> |
| 第一节 零件的失效形式和选材原则 .....        | 220        |
| 第二节 零件毛坯的选择 .....             | 223        |
| 第三节 零件热处理的技术条件和工序位置 .....     | 227        |
| 第四节 典型零件材料和毛坯的选择及加工工艺分析 ..... | 230        |
| 思考题 .....                     | 233        |
| <b>附录 .....</b>               | <b>235</b> |
| 附录一 《金属材料与热处理》实验指导书 .....     | 235        |
| 实验一 布氏硬度试验 .....              | 235        |
| 实验二 洛氏硬度试验 .....              | 239        |
| 实验三 金相实验 .....                | 242        |
| 附录二 硬度换算表 .....               | 245        |
| <b>参考文献 .....</b>             | <b>247</b> |

# 第一章 材料的力学性能

## 第一节 概 述

为研究材料的成分、组织、性能之间的关系，合理选择和使用材料，应首先了解材料的各种性能。

材料的性能分使用性能和工艺性能两种。使用性能是指材料在使用时所表现出的各种性能，它包括物理性能（如密度、熔点、导热性、导电性、磁性、热膨胀性等），化学性能（如耐蚀性、抗氧化性等）和力学性能（如强度、塑性、韧性、硬度、疲劳强度等）。工艺性能是指材料在加工制造时所表现出的性能，根据制造工艺的不同，分为铸造性、可锻性、焊接性、热处理性能及切削加工性等。由于机械零件的用途不同，对材料性能的要求也有所不同。如设计电机、电器零件时要考虑材料的导电性，设计化工设备、医疗器械时要考虑材料的耐蚀性。大量的机械零件主要是在受力情况下工作的，因此选材时应首先考虑材料的力学性能。

每种材料的性能各不相同，为了在设计和制造机械零件时，比较和选用材料，对材料的各种性能常采用一定的指标作为评定标准，并定出统一的测试方法来测定各种性能指标。

## 第二节 材料的力学性能指标

材料的力学性能是材料抵抗外力作用的能力，常用的力学性能指标有强度、硬度、塑性、韧性和疲劳强度等。

### 一、强度和塑性

强度是材料抵抗变形和断裂的能力，塑性是材料产生塑性变形而又不被破坏的性能，它们是通过拉伸试验来测定的。拉伸试验能测出材料的静载荷（指缓慢增加的载荷）作用下的一系列基本性能指标，如弹性极限、屈服强度、抗拉强度和塑性等。进行拉伸试验时，先将材料加工成一定形状和尺寸的标准试样，如图 1-1 所示。然后在拉伸试验机上将试样夹紧，施加缓慢增加的拉力（载荷），一直到试样被拉断为止。在此过程中，试验机能自动绘制出载荷  $F$  和试样变形量  $\Delta l$  的关系曲线，此曲线叫做拉伸曲线。

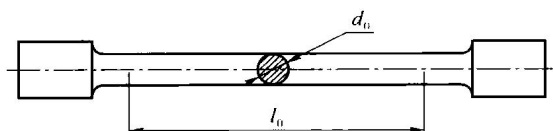


图 1-1 圆形拉伸试样

图 1-2 为低碳钢的拉伸曲线，图中的纵坐标是载荷  $F$ ，单位为 N（牛顿）；横坐标是伸长量  $\Delta l$ ，单位为 mm（毫米）。由图可见，当试样由零开始受载荷到  $F_e$  点以前，试样只产生弹性变形。此时去掉载荷，试样能恢复原来的形状。当载荷超过  $F_e$  点后，试样开始塑性变形，此时去掉载荷，试样已不能完全恢复原状，而出现一部分残留伸长。载荷消失后不能恢复的变形称为塑性（或永久）变形。当载荷达到  $F_s$  点时，图上出现水平线段，这表示载荷虽然不增加，变形却继续增大，这种现象叫做屈服现象。此时若继续加大载荷，试样将发生明显变形伸长。当载荷增至  $F_b$  点时，试样最弱的某一部截面开始急剧缩小，出现缩颈现象。由于试样截面缩小，载荷逐渐降低，当到达  $k$  点时，试样便在缩颈处拉断。

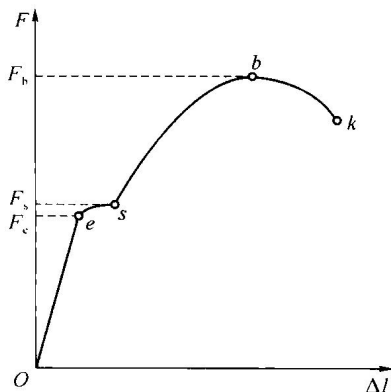


图 1-2 低碳钢拉伸曲线图

### （一）强度指标

金属材料的强度指标有弹性极限、屈服点和强度极限，用应力表示。材料受到外力（载荷）作用时，在材料内部会产生一个与外力大小相等、方向相反的抵抗力（又称内力），单位面积上的内力称为应力，用符号  $\sigma$  表示。

#### 1. 弹性极限

弹性极限（弹性强度）是材料所能承受的、不产生永久变形的最大应力，用符号  $\sigma_e$ （MPa）表示。

$$\sigma_e = F_e / S_0$$

式中  $F_e$ ——试样不产生塑性变形的最大载荷（N）；

$S_0$ ——试样原始截面积（ $\text{mm}^2$ ）。

## 2. 屈服点 (屈服强度)

屈服点是材料开始产生明显塑性变形 (即屈服) 时的应力, 用符号  $\sigma_s$  (MPa) 表示。

$$\sigma_s = F_s / S_0$$

式中  $F_s$ ——试样发生屈服现象时的载荷 (N);

$S_0$ ——试样原始截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

有些材料 (如高碳钢) 在拉伸曲线上没有明显的屈服现象, 它的屈服点很难测定。在这种情况下, 工程技术上把试样产生 0.2% 残留变形的应力值作为屈服点, 又称条件屈服点, 用符号  $\sigma_{0.2}$  表示。

机械零件在工作中一般不允许发生塑性变形, 所以屈服点是衡量材料强度的重要力学性能指标, 是设计和选材的主要依据之一。

## 3. 强度极限 (抗拉强度)

强度极限是材料在断裂前所能承受的最大应力, 用符号  $\sigma_b$  (MPa) 表示。

$$\sigma_b = F_b / S_0$$

式中  $F_b$ ——试样在断裂前的最大载荷 (N);

$S_0$ ——试样原始截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

强度极限反映材料最大均匀变形的抗力, 是材料在拉伸条件下所能承受的最大载荷的应力值。它是设计和选材的主要依据, 也是衡量材料性能的主要指标。当机械零件工作中承受的应力大于材料的抗拉强度时, 零件就会产生断裂。所以  $\sigma_b$  表征材料抵抗断裂的能力。 $\sigma_b$  越大, 则材料的破断抗力越大。零件不可能在接近  $\sigma_b$  的应力状态下工作, 因为在这样大的应力下, 材料已经产生了大量的塑性变形, 但从保证零件不产生断裂的安全角度出发, 同时考虑测量  $\sigma_b$  最简便, 测得的数据比较准确 (特别是脆性材料), 所以有许多设计中直接用  $\sigma_b$  作为设计依据, 但要采用更大的安全系数。

## 4. 弹性模量 (刚度)

弹性模量  $E$  是指材料在弹性状态下的应力与应变的比值, 即

$$E = \sigma / \varepsilon$$

式中  $\sigma$ ——应力 (MPa);

$\varepsilon$ ——应变, 即单位长度的伸长量  $\varepsilon = \Delta L / L$ 。

弹性模量  $E$  表征材料产生单位弹性变形所需要的应力, 反映了材料产生弹性变形的难易程度, 在工程上称为材料的刚度。弹性模量  $E$  值愈大, 材料的刚度愈大, 材料抵抗弹性变形的能力就愈大。

绝大多数的机械零件都是在弹性状态下进行工作的, 对其刚度都有一定的要求。提高零件刚度的办法除改变零件的截面尺寸或结构外, 从金属材料性能上考虑, 就必须增加其弹性模量  $E$ 。弹性模量  $E$  的大小, 主要取决于材料的本性, 而

合金化、热处理、冷变形等对它的影响很小。通常过渡族金属如铁、镍等具有较高的弹性模量。所以从刚度出发,选用一般的钢材即可,不必选用合金钢。一些金属的弹性模量见表 1-1。

表 1-1 常用金属弹性模量

| 金属     | $E/\text{MPa}$ | $G/\text{MPa}$ | 金属     | $E/\text{MPa}$ | $G/\text{MPa}$ |
|--------|----------------|----------------|--------|----------------|----------------|
| 铝 (Al) | 72 000         | 27 000         | 铁 (Fe) | 214 000        | 84 000         |
| 铜 (Cu) | 121 000        | 44 000         | 镍 (Ni) | 121 000        | 84 000         |
| 银 (Ag) | 80 000         | 27 000         | 钛 (Ti) | 118 010        | 44 670         |

## (二) 塑性指标

塑性是反映材料在载荷(外力)作用下,产生塑性变形而不发生破坏的能力。材料塑性的好坏,用伸长率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$  来衡量。

伸长率  $\delta$  是指试样拉断后的伸长量与试样原长度比值的百分数,即

$$\delta = (L_1 - L_0) / L_0 \times 100\%$$

式中  $L_1$ ——试样拉断后的标距长度 (mm);

$L_0$ ——试样原来的标距长度 (mm)。

应当指出,在材料手册中常可以看到  $\delta_5$  和  $\delta_{10}$  两种符号,它分别表示用  $L_0 = 5d$  和  $L_0 = 10d$  ( $d$  为试棒直径) 两种不同长度试棒测定的伸长率。 $L_1$  是试棒的均匀伸长和产生细颈后伸长的总和,相对来说短试棒中细颈的伸长量所占的比例大。故同一材料所测得的  $\delta_5$  和  $\delta_{10}$  值是不同的,  $\delta_5$  的值较大,如钢材的  $\delta_5$  大约为  $\delta_{10}$  的 1.2 倍。所以相同符号的伸长率才能进行相互比较。

断面收缩率  $\psi$  是指试样拉断处的横截面积的收缩量与试样原横截面积之比的百分数,即

$$\psi = (S_0 - S_1) / S_0 \times 100\%$$

式中  $S_1$ ——试样拉断处的最小横截面积 (mm<sup>2</sup>);

$S_0$ ——试样原横截面积 (mm<sup>2</sup>)。

断面收缩率不受试棒标距长度的影响,因此能更可靠地反映材料的塑性。

材料的伸长率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$  的数值越大,则材料的塑性越好。由于断面收缩率比伸长率能更真实地反映材料的塑性,所以用断面收缩率比伸长率更为合理。

塑性是材料很重要的性能之一,它反映了材料的变形工艺性,塑性好的材料,易于冲压、拉深、冷弯、成形等。在零件设计时,往往要求材料具有一定的塑性,零件使用过程中偶然过载时,由于能发生一定的塑性变形而不至于突然破坏。同时,在零件的应力集中处,塑性能起着削减应力峰(即局部的最大应力)的作用,从而使得零件不至于早期断裂,这就是大多数零件除要求高强度外,还要求具有一定塑性的原因。但塑性指标不能直接用于设计计算,选材的塑性要求一般是根据经验。

## 二、硬度指标

硬度是指材料表面抵抗其他更硬物体压入的能力。它反映了材料局部的塑性变形抗力,硬度愈高,材料抵抗塑性变形的抗力愈大,塑性变形愈困难。因此,硬度指标和强度指标之间有一定的对应关系。

硬度试验的方法简单方便,又无损于零件,因此在生产和科研中得到普遍应用。

硬度也是材料重要的力学性能指标。常用的硬度有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等。

### (一) 布氏硬度

布氏硬度是用布氏硬度计测定的。其原理是在一定载荷的作用下,将一定直径的淬火钢球(或硬质合金钢圆球)压入材料表面,并保持载荷至规定的时间后卸载,然后测得压痕的直径,根据所用载荷的大小和所得压痕面积,算出压痕表面所承受的平均应力值。这个应力值就是布氏硬度。布氏硬度用符号 HBS (或 HBW) 表示,即

$$\text{布氏硬度} = \frac{F}{S} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中  $F$ ——载荷 ( $\text{kgf}^{①}$ );

$S$ ——压痕凹印表面积 ( $\text{mm}^2$ );

$D$ ——钢球直径 ( $\text{mm}$ );

$d$ ——压痕直径 ( $\text{mm}$ )。

若  $F$  的单位为  $\text{N}$ ,  $D$ 、 $d$  单位为  $\text{mm}$ , 则

$$\text{布氏硬度 (MPa)} = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

国标 (GB231—1984 “金属布氏硬度试验方法”) 规定,布氏硬度值在 450 以下用淬火钢球压头,用 HBS 表示,硬度值在 450 以上 (含 450) 选用硬质合金钢球压头,并用 HBW 表示,硬度试验原理示意图如图 1-3 所示。

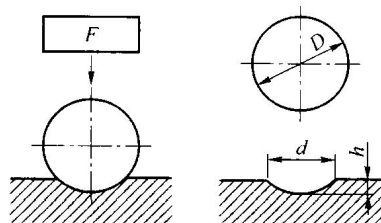


图 1-3 布氏硬度试验原理示意图

①  $1 \text{ kgf} = 9.80665 \text{ N}$ 。

在进行硬度试验时, 钢球直径  $D$ 、施加载荷  $F$  与载荷保持时间, 应根据测试材料的种类和硬度范围, 按照表 1-2 布氏硬度试验规范进行选择。

表 1-2 布氏硬度试验规范

| 材料种类        | 布氏硬度<br>使用范围 | 球直径<br>D/mm | $F/D^2$<br>( $0.102F/D^2$ ) | 实验载荷<br>F/kgf (N) | 实验载荷<br>保持时间<br>t/s | 其他                                                      |
|-------------|--------------|-------------|-----------------------------|-------------------|---------------------|---------------------------------------------------------|
| 钢, 铸铁       | $\geq 140$   | 10          | 30                          | 3 000 (29 420)    | 10                  | 压痕中心距试样边缘距离不应小于压痕平均直径的 2.5 倍, 两相邻压痕中心距离不应小于压痕平均直径的 4 倍。 |
|             |              | 5           |                             | 750 (7 355)       |                     |                                                         |
|             |              | 2.5         |                             | 187.5 (1 839)     |                     |                                                         |
|             | < 140        | 10          | 10                          | 1 000 (9 807)     | 10 ~ 15             |                                                         |
|             |              | 5           |                             | 250 (2 452)       |                     |                                                         |
|             |              | 2.5         |                             | 62.5 (612.9)      |                     |                                                         |
| 铜及<br>铜合金   | $\geq 130$   | 10          | 30                          | 3 000 (29 420)    | 30                  |                                                         |
|             |              | 5           |                             | 750 (7 355)       |                     |                                                         |
|             |              | 2.5         |                             | 187.5 (1 839)     |                     |                                                         |
|             | 35 ~ 100     | 10          | 10                          | 1 000 (9 807)     | 30                  |                                                         |
|             |              | 5           |                             | 250 (2 452)       |                     |                                                         |
|             |              | 2.5         |                             | 62.5 (612.9)      |                     |                                                         |
| 轻金属及<br>其合金 | < 35         | 10          | 2.5                         | 250 (2 452)       | 60                  |                                                         |
|             |              | 5           |                             | 62.5 (612.9)      |                     |                                                         |
|             |              | 2.5         |                             | 15.625 (153.2)    |                     |                                                         |

注: 1. 试样厚度至少应为压痕深度的 10 倍。试验后, 试样支撑面应无可见变形痕迹。

2. 括号中的数字单位为 N。

试验后只要用放大镜测得压痕直径, 便可直接查表得到布氏硬度值。标注时只需标注其符号和数值而不标注单位, 如 200HBS、400HBS 等。

布氏硬度的优点是测量的数据较准确, 此外还可以根据布氏硬度近似地估算出金属材料的强度极限, 其经验换算关系为:

低碳钢  $\sigma_b = 0.36\text{HBS}$ ; 高碳钢  $\sigma_b = 0.34\text{HBS}$ ; 调质合金钢  $\sigma_b = 0.325\text{HBS}$ ; 灰铸铁  $\sigma_b \approx 0.1\text{HBS}$ 。

布氏硬度常用于测量退火、正火、调质钢件和铸铁及有色金属的硬度, 其缺点是压痕较大, 易损坏成品表面和不能测量较薄的试样。

## (二) 洛氏硬度

洛氏硬度是以顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥体或直径为 1.588 mm 的钢球作为压头, 载荷分两次施加 (初载荷为 100 N) 的硬度试验法。洛氏硬度试验原理如图 1-4 所示。其硬度值是以压痕深度  $h$  来衡量, 但如果直接用压痕深度来计量指标, 则会出现材料越硬, 压痕的深度愈小, 硬度读数越小的状况, 这与通常习惯

的表示方法相矛盾。因此，洛氏硬度采用某个选定的常数  $k$  减去压痕深度值  $h$ ，并规定压痕深度  $0.002\text{ mm}$  为  $1^\circ$ ，则

$$\text{洛氏硬度} = k - h/0.002$$

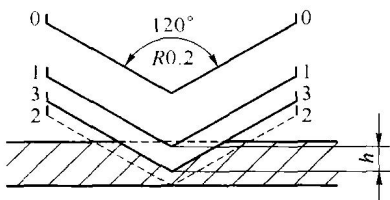


图 1-4 洛氏硬度试验原理示意图

此值在硬度计上可直接读出。根据所用压头种类和所加载荷的不同，洛氏硬度分为 HRA、HRB、HRC 三种级别。三种级别的试验范围见表 1-3。

表 1-3 常用的三种洛氏硬度试验范围

| 符号  | 压头                 | 总负荷/N | 硬度值有效范围     | 使用范围             |
|-----|--------------------|-------|-------------|------------------|
| HRA | 120°金刚石圆锥          | 588   | 60 ~ 85HRA  | 测量硬质合金，表面淬硬层或渗碳层 |
| HRB | $\frac{1}{16}$ "钢球 | 980   | 25 ~ 100HRB | 测量有色金属或退火、正火钢等   |
| HRC | 120°金刚石圆锥          | 1 470 | 20 ~ 67HRC  | 测量调质钢、淬火钢等       |

洛氏硬度操作简便、压痕小，不损伤工件表面，可以测量从较软到较硬的厚度较薄曲面积较小的材料的硬度，故洛氏硬度广泛应用于工厂热处理车间的质量检验。

（三）维氏硬度

维氏硬度用符号 HV 表示，它的测定原理基本上和布氏硬度的相同，根据压痕单位面积上所承受的载荷大小来测量硬度值，不同的是维氏硬度采用锥面夹角  $136^\circ$  的金刚石四棱锥体作为压头。它适用于测量零件表面硬化层及经化学热处理的表面层（如渗氮层）的硬度。

此外，还有其他类型的硬度试验方法，例如测定大而笨的零件的硬度，常用弹性回跳法的肖氏硬度试验方法来测定，其硬度值称为肖氏硬度，用符号 HS 表示。

三、韧性指标

材料抵抗冲击载荷的能力称为冲击韧性，其大小用冲击韧度表示，可用一次冲击试验法来测定。将材料首先制成标准试样，放在冲击试验机的支座上，试样的缺口背向摆锤的冲击方向，如图 1-5（a）所示。将摆锤举到一定高度，如图 1-5（b）所示，让摆锤自由落下，冲击试样。这时，试验机表盘上指针即指出

试样折断时所吸收的功  $A_{ku}$ ， $A_{ku}$  值即代表材料冲击韧度的高低。但习惯是采用冲击韧度值  $\alpha_{ku}$  来表示材料的冲击韧性。冲击韧度值是用击断试样所吸收的功除以试样缺口处的截面积表示。即

$$\alpha_{ku} = A_{ku} / S$$

式中  $\alpha_{ku}$ ——冲击韧度值 ( $J/cm^2$ )；  
 $A_{ku}$ ——试样折断时所吸收的功 (J)；  
 $S$ ——试样缺口处的截面积 ( $cm^2$ )。

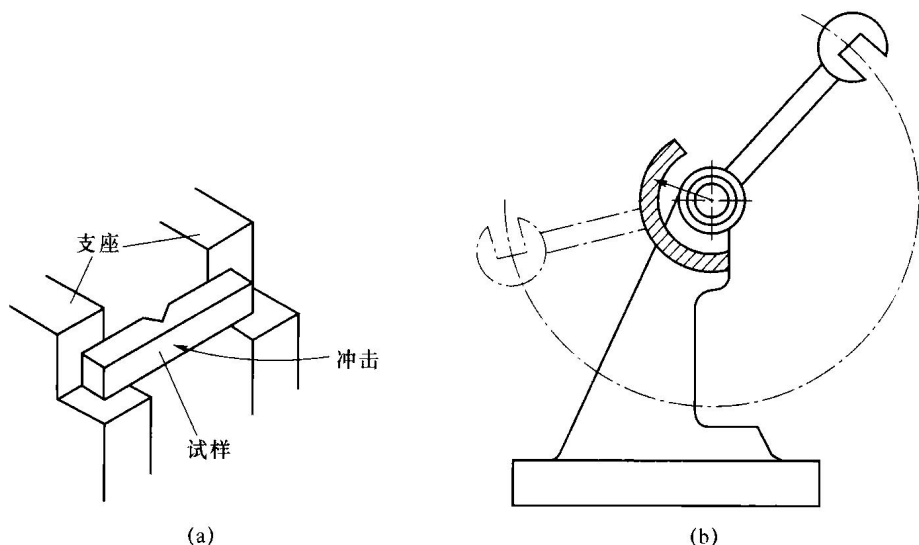


图 1-5 摆锤式冲击试验原理示意图

(a) 试样安放位置；(b) 摆锤式冲击试验机

冲击韧度值与试验的温度有关，有些材料在室温时并不显示脆性，而在较低温度下则可能发生脆断。为了确定材料（特别是低温使用的材料）由塑性状态向脆性状态转化的倾向，可在不同温度下测定冲击韧度值，并绘制成曲线，如图 1-6 所示。由图可见， $\alpha_{ku}$  值随温度的降低而减小。在某一温度范围时， $\alpha_{ku}$  值突然下降。冲击韧度值发生突然下降时所对应的温度范围称为材料的脆性转变温度范围（又称冷脆转变温度）。此温度越低，材料的低温冲击韧性越好。在低温和严寒地区工作的构件（如储气罐、船体、桥梁、输送管道等）或零件，要对脆性转化温度及在最低使用温度下应具有的最高韧性值做出规定。

冲击韧度值还与试样的尺寸、形状、表面粗糙度、内部组织等有关。因此，冲击韧度值一般只作为选择材料的参考。

一次冲击试验测定的冲击韧度，是判断材料在大能量冲击下的性能数据，而实际工作中的零件很多只承受小能量多次冲击。对于承受多次冲击的零件，如果冲击能量低、冲击次数较多，材料多冲抗力主要取决于材料的强度；如果冲击能

量较高时,材料的多冲抗力主要取决于材料的塑性。

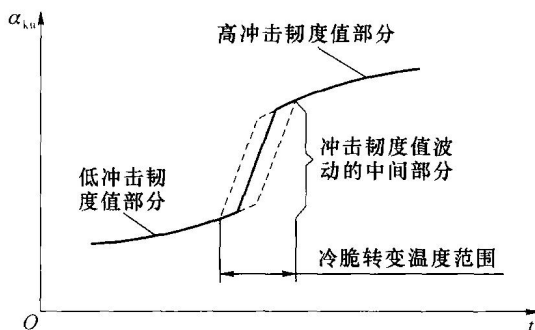


图 1-6 温度对冲击韧度的影响

#### 四、材料的疲劳强度（疲劳极限）

某些机械零件在工作时要承受交变载荷,其应力大小、方向是周期性变化的,如轴、齿轮、连杆、弹簧等。这些承受交变载荷的零件在发生断裂时的应力远低于该材料的屈服点,这种现象叫做疲劳破坏。不论是韧性材料还是脆性材料,疲劳破坏总是发生在多次的应力循环之后,并且总是呈脆性断裂。据统计,零件疲劳破坏占失效事例的 70% 以上,为此,疲劳破坏已引起人们的极大关注。

金属材料抗疲劳的能力用疲劳强度  $\sigma_{-1}$  来表示。疲劳强度是材料在无数次重复交变载荷的作用下不致引起断裂的最大应力。因实际上不可能进行无数次试验,故一般给各种材料规定一个应力循环基数。对钢材来说,如应力循环次数  $N$  达  $10^7$  仍不发生疲劳破坏,就认为不会再生疲劳破坏,所以钢以  $10^7$  为基数。有色金属和超高强度钢则常取  $10^8$  为基数。

产生疲劳破坏的原因很多,一般由于材料有夹杂、表面划痕及其他能引起应力集中的缺陷,从而导致微裂纹的产生,这种微裂纹又随应力循环次数的增加而逐渐扩展,致使零件的有效截面不断减小,最后承受不住所加载荷而突然破坏。

为了提高零件的疲劳强度,除改善其结构形状、避免应力集中外,还可以通过降低零件表面粗糙度及对零件表面进行强化处理来达到,如喷丸处理、表面淬火及化学热处理等。



#### 思考题

##### 一、判断题

1. 导热性差的金属在加热和冷却时会产生较大的内外温度差,导致内外金属不同的膨胀或收缩,产生较大的内应力,从而使金属变形,甚至产生开裂。

( )

2. 塑性变形能随载荷的去除而消失。 ( )
3. 所有金属材料在拉伸试验时都会出现显著的屈服现象。 ( )
4. 金属材料的硬度是指材料在常温、静载下抵抗产生塑性变形或断裂的能力。 ( )
5. 硬度是金属材料的一个综合机械性能指标, 它和其他性能指标之间有一定内在联系。 ( )
6. 断面收缩率  $\psi$  的数值与作用试样尺寸的关系很大。 ( )
7. 金属材料的疲劳强度是指金属材料在指定循环基数下不产生疲劳断裂所能承受的最大应力。 ( )
8. 材料的  $\alpha$  值大小, 可以在一定程度上反映材料的耐冲击能力。 ( )
9. 小能量多次冲击抗力的大小主要取决于材料的强度高低。 ( )
10. 在设计机械零件时, 如果要求零件刚度大时, 应选用具有较高弹性模量的材料。 ( )
11. 断后伸长率  $\delta$  的数值与作用试样尺寸的关系很大。 ( )
12. 金属在外力作用下产生的变形都不能恢复。 ( )
13. 所有金属在拉伸试验过程中都会产生“屈服”现象和“颈缩”现象。 ( )
14. 一般低碳钢的塑性优于高碳钢, 而硬度低于高碳钢。 ( )
15. 低碳钢、变形铝合金等塑性良好的金属适合于各种塑性加工。 ( )
16. 布氏硬度试验法适合于成品的硬度测量。 ( )
17. 硬度试验测量简便, 属非破坏性试验, 且能反映其他力学性能, 因此是生产中最常见的力学性能测量法。 ( )
18. 材料韧性的主要判据是冲击吸收功。 ( )
19. 一般金属材料在低温时比高温时脆性大。 ( )
20. 机械零件所受的应力小于屈服点时, 是不可能发生断裂的。 ( )
21. 钢具有良好的力学性能, 适宜制造航天飞机机身等结构件。 ( )
22. 金属的工艺性能好, 表明加工容易, 加工质量容易保证, 加工成本也较低。 ( )

## 二、简答题

1. 画出低碳钢力-伸长曲线, 并简述拉伸变形的几个阶段。

2. 下列硬度标注方法是否正确? 如何改正?

(1) HBW210 ~ 240

(2) 450 ~ 480HBW

(3) HRC15 ~ 20

(4) HV30

3. 采用布氏硬度试验测取材料的硬度值有哪些优缺点?
4. 有一钢试样, 其直径为 10 mm, 标距长度为 50 mm, 当载荷达到 18 840 N 时试样产生屈服现象; 载荷加至 36 110 N 时, 试样产生缩颈现象, 然后被拉断; 拉断后标距长度为 73 mm, 断裂处直径为 6.7 mm, 求试样的  $\sigma_s$ 、 $\sigma_b$ 、 $\delta$  和  $\psi$ 。
5. 什么叫材料的使用性能? 什么叫工艺性能?
6. 什么叫强度? 强度有哪些常用的判据?
7. 为什么零件在强度设计时主要参考依据采用  $\sigma_s$ ?
8. 常用的硬度测量方法有哪些? 为什么硬度试验是最常用的力学性能试验法?
9. 金属的疲劳断裂是怎样产生的?
10. 下列材料各宜采用何种硬度试验方法来测定其硬度值?  
供应态碳钢 淬火钢 铸铁 铝合金 硬质合金