

普通高等教育规划教材

# 工业生产技术基础

刘群山 张双杰 主编



普通高等教育规划教材

# 工业生产技术基础

主编 刘群山 张双杰

主审 董 方



机械工业出版社

本着加强基础、拓宽知识、培养学生综合素质和创新思维能力的原则,在压缩传统《金属工艺学》基础上,重点增加了新材料、新技术、新工艺、企业管理、环境保护和部分前沿科技内容。

全书共分十三章,包括材料学基础、钢的热处理、机械工程材料、表面处理、铸造、金属塑性成形、焊接、塑料和陶瓷成型技术、金属切削加工基本知识、各种表面的加工方法、机械加工工艺过程、先进加工技术、企业管理与环境保护。每章后附有复习思考题。

本书可作为高等院校理工科和经管类各专业学生的课堂用教材,也可作为有关工程技术人员和工业企业管理干部的学习参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

工业生产技术基础/刘群山等主编. —北京:机械工业出版社, 2004.1

普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-13567-9

I. 工… II. 刘… III. 工业技术—高等学校—教材 IV. T

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 112223 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张祖凤 责任编辑:董连仁 版式设计:张世琴

责任校对:吴美英 封面设计:陈沛 责任印制:闫焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·10.25 印张·399 千字

定价:24.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本书是根据原国家教委 1995 年颁布的《工程材料及机械制造基础课程教学基本要求》，参考了 1997 年颁布的《重点高等工科院校金工系列课程改革指南》，并结合各高校课程改革的经验和实践编写的。

本书是一部在原传统《金属工艺学》基础上，把传统与先进制造技术结合在一起，建立起的更为综合性的技术基础课教材。不仅注重学生获取知识能力的培养，而且注重学生综合素质和创新思维的培养。书中内容进行了精心选取，在适当压缩传统内容的同时，吸收了新材料、新技术、新工艺、企业管理、环境保护和部分前沿科技内容。全书采用了最新国家标准，章后附有复习思考题。

参加本书编写的人员及分工：刘群山（第一、十二章）；魏胜辉（第二、三章）；张忠诚（第四、五章）；张双杰（第六、八章）；李志勇（第七、十三章）；林兵（第九章）；幺春霞（第十、十一章）。全书由刘群山、张双杰任主编，董方任主审。

本书编写过程中，参考了大量的有关教材、手册和论文，所用主要参考文献列于书后，并对有关出版社和作者表示衷心感谢。书中不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2003 年 10 月于河北科技大学

# 目 录

## 前言

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第一章 材料学基础 .....         | 1  |
| 第一节 材料的性能 .....         | 1  |
| 第二节 金属的结构与结晶 .....      | 8  |
| 第三节 合金的结构及二元合金相图 .....  | 16 |
| 第四节 铁碳合金相图 .....        | 21 |
| 复习思考题 .....             | 32 |
| 第二章 钢的热处理 .....         | 34 |
| 第一节 热处理基本原理 .....       | 35 |
| 第二节 钢的整体热处理 .....       | 41 |
| 第三节 钢的表面热处理与化学热处理 ..... | 46 |
| 第四节 热处理新技术简介 .....      | 49 |
| 复习思考题 .....             | 51 |
| 第三章 机械工程材料 .....        | 52 |
| 第一节 工业用钢 .....          | 52 |
| 第二节 铸铁 .....            | 66 |
| 第三节 有色金属材料 .....        | 74 |
| 第四节 非金属材料与复合材料 .....    | 80 |
| 第五节 其他新材料简介 .....       | 84 |
| 复习思考题 .....             | 87 |
| 第四章 表面处理 .....          | 88 |
| 第一节 表面处理基础知识 .....      | 88 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 第二节 热喷涂 .....              | 90         |
| 第三节 气相沉积 .....             | 92         |
| 第四节 化学转化膜技术 .....          | 95         |
| 第五节 电镀、电刷镀、热浸镀和化学镀 .....   | 96         |
| 第六节 涂料及涂装方法 .....          | 98         |
| 复习思考题 .....                | 100        |
| <b>第五章 铸造 .....</b>        | <b>101</b> |
| 第一节 砂型铸造 .....             | 102        |
| 第二节 特种铸造 .....             | 109        |
| 第三节 合金的铸造性能 .....          | 117        |
| 第四节 砂型铸造工艺设计 .....         | 125        |
| 第五节 铸件结构工艺性 .....          | 130        |
| 复习思考题 .....                | 136        |
| <b>第六章 金属塑性成形 .....</b>    | <b>138</b> |
| 第一节 金属的塑性变形 .....          | 140        |
| 第二节 锻造工艺 .....             | 145        |
| 第三节 板料冲压 .....             | 157        |
| 第四节 锻造及冲压零件的结构工艺性 .....    | 166        |
| 第五节 塑性成形新工艺简介 .....        | 170        |
| 复习思考题 .....                | 177        |
| <b>第七章 焊接 .....</b>        | <b>180</b> |
| 第一节 焊接基础 .....             | 180        |
| 第二节 熔化焊 .....              | 182        |
| 第三节 压焊与钎焊 .....            | 195        |
| 第四节 常用金属材料的焊接 .....        | 199        |
| 第五节 焊接结构设计 .....           | 201        |
| 第六节 胶接 .....               | 206        |
| 复习思考题 .....                | 210        |
| <b>第八章 塑料和陶瓷成型技术 .....</b> | <b>212</b> |
| 第一节 塑料成型技术 .....           | 212        |
| 第二节 陶瓷成型技术 .....           | 213        |
| 复习思考题 .....                | 219        |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第九章 金属切削加工基本知识</b> ..... | 220 |
| 第一节 金属切削加工的运动要素 .....       | 220 |
| 第二节 刀具材料和角度 .....           | 222 |
| 第三节 金属的切削过程 .....           | 226 |
| 第四节 技术经济分析 .....            | 234 |
| 复习思考题 .....                 | 237 |
| <b>第十章 各种表面的加工方法</b> .....  | 238 |
| 第一节 外圆表面的加工 .....           | 238 |
| 第二节 内圆表面的加工 .....           | 244 |
| 第三节 平面的加工 .....             | 253 |
| 第四节 其他表面加工 (简介) .....       | 258 |
| 复习思考题 .....                 | 259 |
| <b>第十一章 机械加工工艺过程</b> .....  | 260 |
| 第一节 工艺过程的制订 .....           | 260 |
| 第二节 机床夹具 .....              | 274 |
| 第三节 零件的结构工艺性 .....          | 276 |
| 复习思考题 .....                 | 282 |
| <b>第十二章 先进加工技术</b> .....    | 284 |
| 第一节 特种加工技术 .....            | 284 |
| 第二节 数控加工技术 .....            | 289 |
| 第三节 快速原型制造技术 .....          | 297 |
| 复习思考题 .....                 | 301 |
| <b>第十三章 企业管理与环境保护</b> ..... | 302 |
| 第一节 企业管理基础 .....            | 302 |
| 第二节 成本与利润 .....             | 306 |
| 第三节 新产品的开发与生产 .....         | 311 |
| 第四节 ISO 质量认证 .....          | 316 |
| 第五节 环境保护 .....              | 318 |
| 复习思考题 .....                 | 321 |
| <b>参考文献</b> .....           | 322 |

# 第一章 材料学基础

材料是人类赖以生存的物质基础，其种类繁多、性能各异、价格不同。工业生产中所使用的材料属于工程材料，主要包括金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料和复合材料四大类。其中，应用最广泛的是金属材料。本章主要阐述金属材料的基础知识。

## 第一节 材料的性能

金属材料具有一定的力学性能、物理性能、化学性能和工艺性能，可以满足不同使用条件下对零件的要求，在结构、机件、工具和物理功能器件的制造中广为应用。

### 一、金属材料的力学性能

金属材料的力学性能是指金属材料在受外力作用时所反映出来的性能。它是衡量金属材料性能的极其重要的指标，是选择、使用金属材料的重要依据。金属材料的力学性能主要有：强度、塑性、硬度、冲击韧度、疲劳强度等。

#### 1. 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。按照作用力性质的不同，强度可分为屈服点（屈服强度）、抗拉强度、抗压强度、抗弯强度等。工程上常用的强度指标是屈服点和抗拉强度，它们都由拉伸试验测定。

拉伸试验是将金属材料按国家标准制成标准试样（图 1-1a）装夹在材料试验机上，对其两端施加轴向静拉力，试样产生变形。随着拉力的增大变形量增加，直至把试样拉断（图 1-1b）。在试验过程中，试验机自动绘制出拉力  $F$  与其相对应的变形量  $\Delta L$  之间的关系曲线（图 1-2），称为力-伸长曲线。

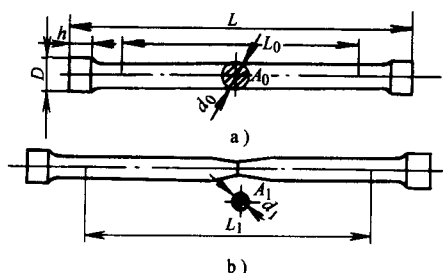


图 1-1 拉伸试样

a) 标准拉伸试样 b) 拉断后

由图可见，在  $oe$  段，变形与外力成正比，试样只产生弹性变形，即当外力去除后，试样就恢复到原始长度。超过  $e$  点，试样就会产生塑性变形，即使去掉外力，试样也不能恢复到原始长度。通常，材料在弹性范围内所能承受的最大应

力称为弹性极限, 用  $\sigma_e$  表示。在新的国家标准中, 弹性极限用材料产生 0.01% 塑性变形量时的应力值来表示。

金属材料在外力作用下抵抗弹性变形的能力称为刚度。在弹性范围内, 应力 (单位横截面积上受的力) 与应变 (单位长度上的变形量) 的比值称为弹性模量, 用  $E$  表示。它是衡量金属材料刚度大小的指标, 反映了材料弹性变形的难易程度。在相同的外力作用下, 材料的  $E$  越大, 则弹性变形越小;  $E$  越小, 则弹性变形越大。弹性模量  $E$  的大小, 与材料原子之间的作用力强弱有密切的关系, 而与其内部组织的变化关系不大。对于一个机械零件来说, 其刚度除与所用材料的  $E$  有关外, 还与该零件的形状和尺寸有关。

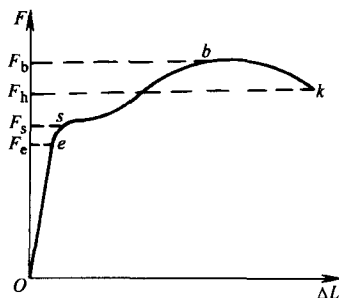


图 1-2 低碳钢力-伸长曲线

当载荷继续增大到  $F_s$  时, 力-伸长曲线出现了小锯齿状平台。其特点是试样所承受的载荷几乎不变, 但却产生了不断增加的塑性变形, 这种现象称为屈服。材料产生屈服现象时的应力称为屈服点, 用  $\sigma_s$  表示, 单位为 Pa, 即

$$\sigma_s = F_s / A_0$$

式中  $F_s$ ——屈服载荷 (N);

$A_0$ ——试样原始横截面积 ( $\text{m}^2$ )。

有些金属材料, 如高碳钢、铸铁、铜、铝等, 没有明显的屈服现象, 力-伸长曲线上没有小锯齿状平台, 通常规定产生 0.2% 塑性变形时的应力作为其名义屈服点, 用  $\sigma_{0.2}$  表示。

屈服点表征了材料抵抗微量塑性变形的能力。屈服以后, 材料产生明显的塑性变形。载荷再继续增大时, 塑性变形量显著增大。当载荷增大到  $F_b$  时, 试样的某一横截面开始急剧减小, 出现“缩颈”。由于承载面积减小, 试样很快被拉断。金属材料在拉断前所能承受的最大应力称为抗拉强度, 用  $\sigma_b$  表示, 即

$$\sigma_b = F_b / A_0$$

式中  $F_b$ ——最大载荷 (N);

$A_0$ ——试样原始横截面积 ( $\text{m}^2$ )。

屈服点和抗拉强度是设计机械零件时评定、选择金属材料的重要依据。因为, 多数机械零件工作时不允许出现塑性变形, 其材料所受的应力不能超过  $\sigma_s$ 。机械零件更不能在超过其材料  $\sigma_b$  的条件下工作, 否则将导致机件的破坏。

## 2. 塑性

金属材料在外力作用下, 断裂前发生不可逆永久变形的能力称为塑性。通常

用伸长率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$  来表示, 即

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

$$\psi = (A_0 - A_1) / A_0 \times 100\%$$

式中  $L_0$ ——试样的原始长度 (mm);

$L_1$ ——试样拉断后的长度 (mm);

$A_0$ ——试样的原始横截面积 ( $\text{mm}^2$ );

$A_1$ ——试样拉断后断口处的截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

$\delta$  或  $\psi$  越大, 材料的塑性越好。良好的塑性是金属材料进行塑性成形的必要条件。

### 3. 硬度

硬度是金属材料抵抗其他更硬的物体压入其内的能力。它表示了金属材料在一个小的体积范围内抵抗变形和断裂的能力, 是一个重要的综合力学性能指标。

金属材料的硬度是在专门的硬度计上测定的。常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度等。

(1) 布氏硬度 布氏硬度测定时, 通常用一定直径的淬火钢球或硬质合金球作压头, 在一定的静载荷下压入试件表面 (图 1-3), 保持压力至规定的时间后卸载。根据所加载荷的大小和所得压痕表面积来计算压痕表面上的平均应力值。此平均应力值即定义为布氏硬度, 并用 HBS 或 HBW 表示, 即

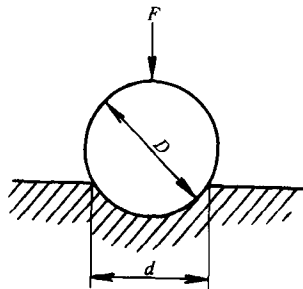


图 1-3 布氏硬度试验示意图

$$\text{HBS (HBW)} = \frac{F}{A_R} = 0.102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中  $F$ ——所加载荷 (N);

$A_R$ ——压痕表面积 ( $\text{mm}^2$ );

$D$ ——球体直径 (mm);

$d$ ——压痕平均直径 (mm)。

在实际测定中,  $F$  和  $D$  是根据被测材料按国家标准选定的, 只需用刻度放大镜测量出压痕直径  $d$ , 然后直接查表即可求得硬度值。实际上, 布氏硬度仍沿用  $\text{kgf/mm}^2$  作为单位, 但习惯上不予标出。例如 120HBS10/1000/30, 表示用  $\phi 10\text{mm}$  淬火钢球, 在 9806.7N (1000kgf) 载荷下, 保持 30s 测得的布氏硬度值为 120。

由于布氏硬度测量时压痕面积较大, 能反映较大范围内金属各组成物的平均性能, 且试验数据的重复性好, 因此广泛用于测定铸铁、有色金属、退火钢等小

于 450HBS 的金属材料。当被测金属材料的布氏硬度大于 450HBS 时，由于淬火钢球本身发生变形而影响测定结果的准确性，故不能测定太硬的材料。布氏硬度试验规范见表 1-1。

表 1-1 布氏硬度试验规范

| 材 料   | 布氏硬度值 HBS | 试样厚度/mm | F/D  | D/mm | F/N     | 载荷保持时间/s |
|-------|-----------|---------|------|------|---------|----------|
| 钢及铸铁  | 140~450   | >6      | ≈300 | 10.0 | 29420.0 | 10~15    |
|       |           | 6~3     |      | 5.0  | 7355.0  |          |
|       |           | <3      |      | 2.5  | 1838.7  |          |
|       | <140      | >6      | ≈100 | 10.0 | 9806.7  | 10~15    |
|       |           | 6~3     |      | 5.0  | 2451.7  |          |
|       |           | <3      |      | 2.5  | 612.9   |          |
| 铜及其合金 | >130      | >6      | ≈300 | 10.0 | 29420.0 | 30       |
|       |           | 6~3     |      | 5.0  | 7355.0  |          |
|       |           | <3      |      | 2.5  | 1838.7  |          |
|       | 35~130    | >6      | ≈100 | 10.0 | 9806.7  | 30       |
|       |           | 6~3     |      | 5.0  | 2451.7  |          |
|       |           | <3      |      | 2.5  | 612.9   |          |
|       | <35       | >6      | ≈50  | 10.0 | 4903.3  | 60       |
|       |           | 6~3     |      | 5.0  | 1225.8  |          |
|       |           | <3      |      | 2.5  | 306.5   |          |

由于硬度和强度以不同形式反映了材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力，故二者之间有一定的关系，其经验换算关系为：

低碳钢  $\sigma_b \approx 3.6\text{HBS}$

高碳钢  $\sigma_b \approx 3.4\text{HBS}$

调质合金钢  $\sigma_b \approx 3.25\text{HBS}$

灰铸铁  $\sigma_b \approx 1\text{HBS}$

上述关系式中， $\sigma_b$  的单位为 MPa。

当布氏硬度大于 450HBS 测定时，可以用一定直径的硬质合金球作压头，据压痕直径查表得出材料的硬度，其符号是 HBW。例如 500HBW5/750/15，表示用直径 5mm 的硬质合金球，在 7355N (750kgf) 载荷下保持 15s 测得的布氏硬度值为 500。这种硬质合金球压头可用于测布氏硬度值在 650 以下的材料。

(2) 洛氏硬度 洛氏硬度与布氏硬度的测定原理基本相同，所不同的是，它不测压痕的面积大小，而是根据压痕的深度来衡量硬度。洛氏硬度试验是用顶角为 120° 的金刚石圆锥或直径为 1.588mm 的淬火钢球作压头，根据被测材料的软硬不同来选择。当用 120° 金刚石圆锥作压头时 (图 1-4)，先加初载荷 98.07N

(10kgf), 使压头压入  $b$  处, 与试件的表面良好地接触。以  $b$  处作为衡量压入深度的起点。然后, 再加上主载荷使压头压入到  $c$  处, 停留一定时间后, 将主载荷卸除。由于材料弹性变形的恢复, 压头回升到  $d$  处, 以此时的压痕深度  $h$  作为测量的硬度。

金属越硬, 压痕深度越小; 金属越软, 压痕深度越大。为了与习惯上“数值越大硬度越高”的概念相一致, 采用一常数  $K$  减去  $h$  的差值来表示硬度值。又为简便起见, 规定每压入 0.002mm 深度作为一个硬度单位 (即洛氏硬度计刻度盘上一小格)。洛氏硬度用符号 HR 表示, 其值为:

$$HR = (K - h) / 0.002$$

式中  $K$ ——常数, 采用金刚石圆锥作压头时  $K = 0.2$ ; 采用淬火钢球作压头时  $K = 0.26$ 。

据所用压头和载荷的不同, 洛氏硬度可分为 HRA、HRB、HRC、HRD 等几种标度, 分别适用于测定不同的材料, 见表 1-2。

表 1-2 洛氏硬度试验规范

| 标度  | 压 头         | 初载荷 /N | 主载荷 /N  | 总载荷 /N | 硬度范围   | 适 用 的 材 料       |
|-----|-------------|--------|---------|--------|--------|-----------------|
| HRA | 120°金刚石圆锥   | 98.07  | 490.33  | 588.4  | 70~85  | 硬质合金、表面淬火的钢等    |
| HRB | φ1.588mm 钢球 | 98.07  | 882.63  | 980.7  | 25~100 | 软钢、退火钢、铜合金等     |
| HRC | 120°金刚石圆锥   | 98.07  | 1372.93 | 1471.0 | 20~67  | 淬火钢、调质钢等        |
| HRD | 120°金刚石圆锥   | 98.07  | 882.63  | 980.7  | 49~77  | 薄钢板、中等厚度的表面硬化零件 |

洛氏硬度测定法操作简单, 并能直接从硬度计的表盘上读出硬度值; 被测试件表面压痕小, 几乎不损伤成品件表面; 又由于所加载荷较小, 适宜于较薄工件的硬度测定。尤其是 HRC 可用于测定硬度很高的材料, 在热处理质量检查中应用非常广泛。但由于压痕较小, 对内部组织和硬度不均匀的材料, 测得的结果不够准确, 通常需要在试件的不同部位测定三点以上, 取其平均值。

硬度高低对材料的切削加工性和零件的耐磨性具有至关重要的影响。通常, 材料的硬度越高, 其耐磨性越好。金属材料的硬度约为 300HBS 左右时, 具有较好的切削加工性。硬度过低或过高, 都不利于切削加工。

#### 4. 冲击韧度

金属材料抵抗冲击载荷作用而不破坏的能力称为冲击韧性。它通常以试样缺口底部单位横截面上的冲击吸收功来衡量, 即称为冲击韧度。

许多机械零件是在冲击载荷下工作的, 如锻锤的锤杆、柴油机的曲轴、冲床

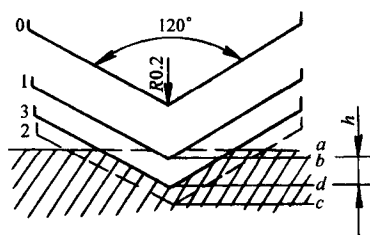


图 1-4 洛氏硬度试验原理

的冲头等。由于瞬时的冲击力作用所引起的变形和应力，比静载荷的大得多，对零件的破坏程度更严重，因此，设计这些承受冲击载荷的零件时，必须考虑所用材料的冲击韧度。

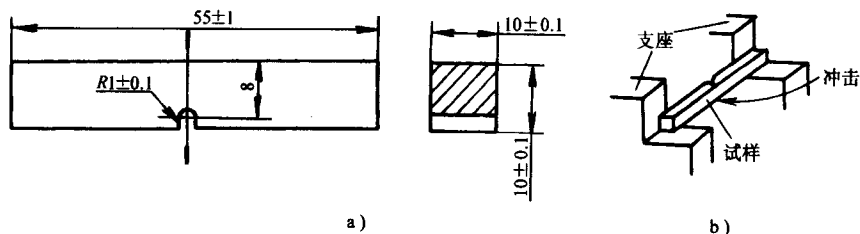


图 1-5 冲击试验的试样

a) 标准试样 b) 试样安放

金属材料的冲击韧度可用摆锤冲击试验来测定：首先，将金属材料制成标准冲击试样，图 1-5a 为 U 形缺口冲击试样。然后，将试样按图 1-5b 安放在试验机上。摆锤冲击试验原理如图 1-6 所示。试验时，将重力为  $G$  的摆锤提升到  $H_1$  的高度，使其获得位能  $GH_1$ ，然后使摆锤下落，其位能变成动能，冲断试样消耗了一部分能量，剩余的能量使摆锤继续向前升到  $H_2$  的高度，此时摆锤的位能为  $GH_2$ 。摆锤冲断试样所做的冲击吸收功  $A_K = G(H_1 - H_2)$ 。试样缺口处单位横截面积上的冲击吸收功，即冲击韧度值  $a_K$  为：

$$a_K = A_K / A_0$$

式中  $A_K$ ——试样在一次冲击下折断时所吸收的功 (J)；

$A_0$ ——试样缺口处的横截面积 ( $\text{cm}^2$ )。

$a_K$  值越大，材料的韧性越好，受到冲击时不易断裂。 $a_K$  值的大小与很多因素有关，不仅受试样形状、表面粗糙度、内部组织等因素的影响，还与试验时的环境温度有关，因而重复性较差。另外，在冲击载荷下工作的机械零件，很少是受大能量一次冲击而破坏的，往往是在较小能量多次重复冲击下而破坏。研究表明，在冲击能量相对不太大的情况下，金属材料承受多次重复冲击的能力，主要取决于强度，而不是要求过高的冲击韧度，即冲击韧度较低而强度较高的材料寿命较长。因此，用  $a_K$  值来衡量和设计这些机械零件是不太合适的，一般只用  $a_K$

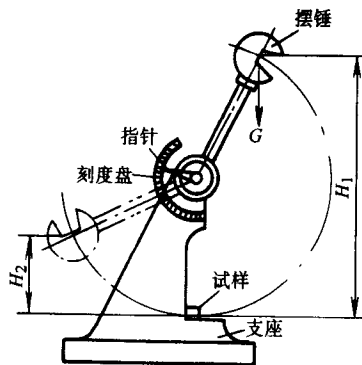


图 1-6 摆锤冲击试验原理

值作为选择材料的参考。

### 5. 疲劳强度

许多机械零件,如曲轴、齿轮、连杆、弹簧等,是在大小或方向反复改变的交变载荷下工作的。虽然零件所受的应力远低于材料的抗拉强度,甚至远低于屈服点,但在使用中往往会发生突然断裂,这种现象称为疲劳破坏。据统计,约有80%的机械零件的失效是属于疲劳造成的。

产生疲劳破坏的原因,一般认为是由于材料有杂质、表面划痕及其他能引起应力集中的缺陷,而导致微裂纹的产生。这种微裂纹随应力循环次数的增加而逐渐扩展,致使零件不能承受所加载荷而突然断裂。

金属材料在无数次重复交变载荷作用下不致引起断裂的最大应力称为疲劳强度。实际上,不可能进行无数次重复交变载荷试验来测定材料的疲劳强度,故各种金属材料应有一定的应力循环基数,如钢材以 $10^7$ 为基数,即钢材承受的载荷交变次数达到 $10^7$ 次仍不发生疲劳破坏的最大应力,就定为该钢的疲劳强度。有色金属和某些超高强度钢则取 $10^8$ 为基数。

机械零件的疲劳强度与所用材料的材质、零件表面状况、结构形状及承受的载荷性质等许多因素有关。生产中可通过改善零件结构形状来避免应力集中、减小表面粗糙度数值和强化表面(如表面淬火、喷丸处理)等来提高疲劳强度。

## 二、金属材料的物理、化学及工艺性能

### 1. 物理性能

金属材料的物理性能主要有密度、熔点、热膨胀性、导电性和导热性等。由于机械零件的用途不同,对其物理性能的要求也有所不同,例如飞机零件要选用密度小的铝合金来制造;制造内燃机活塞的金属材料应具备较小的热膨胀系数;设计电机电器的零件时,常要考虑金属材料的导电性等。

金属材料的一些物理性能,对于热加工也有一定的影响。例如高速钢的导热性较差,在热处理和锻造时就应该用较低的速度进行加热,否则会产生裂纹;又如铸铝、铸铁和铸钢的熔点不同,在铸造时三者的熔炼工艺就有较大的差别。

### 2. 化学性能

金属材料的化学性能是指其抵抗各种化学作用的能力,主要是抵抗活泼介质的化学侵蚀能力,如耐酸性、耐碱性等。

对于在腐蚀介质中或在高温下工作的零件,比在空气中或室温下的腐蚀更为强烈。设计这类零件时,应选用化学稳定性好的金属材料,如化工设备、食品机械、医疗器具等可采用不锈钢来制造。

### 3. 工艺性能

工艺性能是物理、化学、力学性能的综合。按工艺方法的不同,可分为铸造性能、可锻性、焊接性和切削加工性等。如果某种材料的工艺性好,就意味着能

用简单的工艺加工成高质量、低成本的零件或毛坯。因此，设计机械零件和选择工艺方法时，都要考虑金属材料的工艺性能。各种工艺性能将在以后有关章节中分别介绍。

## 第二节 金属的结构与结晶

### 一、晶体与晶格

#### 1. 晶体与晶格的概念

固态物质按其原子的排列情况不同，可分为晶体和非晶体两大类。非晶体的特点是原子的排列不规则，如玻璃、沥青、松香等都是非晶体；晶体的特点是它们的原子都按一定的次序作规则的排列，如金刚石、石墨和固态下的金属及合金都属于晶体。

金属的原子结构中，最外层的电子数目少，与原子核的结合力较弱，容易摆脱原子核的束缚变成自由电子。当大量金属原子聚集在一起构成金属晶体时，绝大部分金属原子都将失去其最外层的电子变成正离子。这些正离子按照一定的规律排列，并在各自的位置上作微弱的热振动。而自由电子则在各正离子间穿梭运动，为整个金属中的原子所共有，称为自由电子。金属晶体就是靠正离子与公有化的自由电子之间的相互作用而结合起来的，这种结合方式称为金属键。图 1-7a 是金属原子在空间堆积的立体模型。

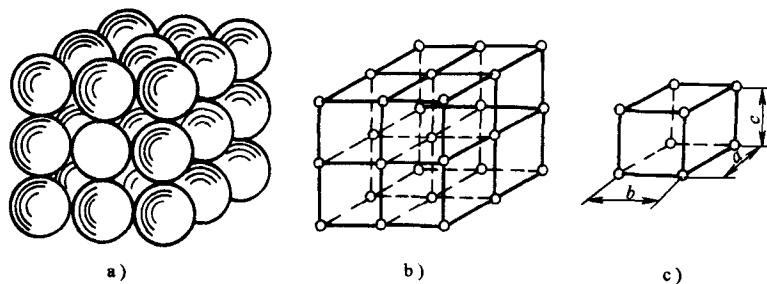


图 1-7 简单立方晶格与晶胞的示意图

a) 晶体中的原子排列 b) 晶格 c) 晶胞

为了便于表明原子的排列规律，假设原子静止，并缩小成位于其中心的一个质点，用直线将这些质点连接起来，组成空间格子（图 1-7b）称为晶格。晶格中的每个点称为结点。能够完全代表晶格中原子排列规律的最小几何单元称为晶胞（图 1-7c）。整个晶格就是由大小、形状和位向相同的晶胞在空间重复堆积而成的。晶胞中各棱边的长度  $a$ 、 $b$ 、 $c$  叫晶格常数，其大小通常用  $\text{\AA}$  来度量（ $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$ ）。

## 2. 晶格类型

研究表明, 大多数的金属都具有比较简单的晶体结构, 最常见的晶格类型有以下三种:

(1) 体心立方晶格 在体心立方晶格的晶胞(图 1-8a)中, 八个角上各有一个原子, 构成立方体。在立方体中心还有一个原子, 故称为体心立方晶格。其晶格常数  $a = b = c$ , 用  $a$  表示。属于这种晶格的金属有 Cr、W、V、Mo、 $\alpha$ -Fe 等。

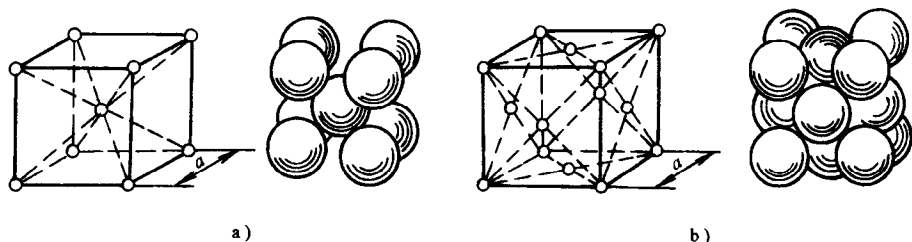


图 1-8 体心立方晶胞和面心立方晶胞

由图 1-8a 可知, 体心立方晶胞中对角线方向上的原子是彼此紧密相接触排列着的。该对角线的长度为  $\sqrt{3}a$ , 恰好是两个原子间距, 所以, 原子半径为  $r = \sqrt{3}a/4$ 。

在体心立方晶胞中, 每个角上的原子是与相邻的另七个晶胞所共有, 属于这个晶胞的只有  $1/8$ ; 而体中心的原子只属于这个晶胞。所以, 体心立方晶胞中仅包含有:  $(1/8) \times 8 + 1 = 2$  个原子。

由图 1-8a 可知, 晶胞棱边上和表面中心等处原子不能接触, 存在间隙。通常把原子排列的紧密程度称为致密度, 它是晶胞中所包含的原子占有的体积与该晶胞体积之比。体心立方晶格的致密度为:

$$\frac{\text{晶胞拥有的原子数} \times \text{单个原子体积}}{\text{晶胞的体积}} = \frac{2 \times \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right)}{a^3} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi \left( \frac{\sqrt{3}}{4} a \right)^3}{a^3} = 0.68$$

可见, 致密度是一个与原子大小、晶胞大小无关的数。就是说, 只要金属的原子排列成体心立方这种晶体结构, 就会有 68% 的体积被金属原子占据, 其余为空隙。

(2) 面心立方晶格 在面心立方晶格的晶胞(图 1-8b)中, 八个角上各有一个原子, 构成立方体。在立方体的每个表面的中心各有一个原子, 故称为面心立方晶格。晶格常数  $a = b = c$ , 也用  $a$  来表示。属于这种晶格的金属有 Al、Cu、Ni、Pb、 $\gamma$ -Fe 等。

由图 1-8b 可知, 面心立方晶胞中, 每个面的对角线上各原子彼此相互接触, 这个对角线的长度是  $\sqrt{a^2 + a^2} = \sqrt{2}a$ , 恰好是两个原子间距, 所以原子半径  $r = \sqrt{2}a/4$ 。

同样, 每个角上的原子是与相邻的另七个晶胞所共有, 属于这个晶胞的只有  $1/8$ ; 而每一面心位置上的原子同时属于两个晶胞共有, 属于这个晶胞的只有  $1/2$ 。所以, 面心立方晶胞中含有:  $(1/8) \times 8 + (1/2) \times 6 = 4$  个原子。

面心立方晶胞的棱边上和中心等处存在间隙, 它的致密度为:

$$\frac{4 \times \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right)}{a^3} = \frac{4 \times \frac{4}{3} \pi \left( \frac{\sqrt{2}}{4} a \right)^3}{a^3} = 0.74$$

可见, 面心立方晶格的致密度比体心立方晶格大, 原子排列得较紧密。

(3) 密排六方晶格 在密排六方晶格的晶胞 (图 1-9) 中, 六方体的十二个角上各有一个原子, 上下两个正六边形表面的中心也各有一个原子, 在六方体的中间还规则地分布着三个原子。属于这种晶格的金属有 Be、Mg、Zn、 $\alpha$ -Ti 等。

在密排六方晶格的晶胞中, 每个角上的原子与相邻的另五个晶胞所共有, 属于这个晶胞的只占  $1/6$ ; 上下两个正六边形表面中心的原子分别与相邻的晶胞共有, 属于这个晶胞的是  $1/2$ ; 而中间的三个原子只属于这个晶胞。所以, 密排六方晶胞中含有:  $(1/6) \times 12 + (1/2) \times 2 + 3 = 6$  个原子。

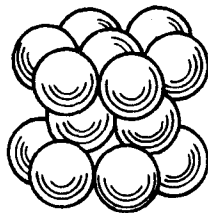
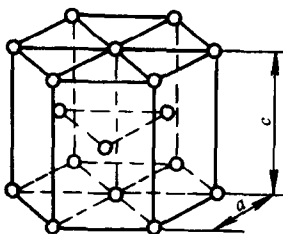


图 1-9 密排六方晶胞

密排六方晶胞的晶格常数用  $a$  (正六边形的边长) 和  $c$  (六方体的高) 来表示。  $c$  与  $a$  之比称为轴比, 一般  $c/a = \sqrt{8}/\sqrt{3}$ 。正六边形边上的原子紧密接触,  $a$  正好是一个原子间距。所以,  $r = a/2$ 。

由数学可知, 正六边形面积为  $\frac{3\sqrt{3}}{2}a^2$ ; 六方体的体积为  $\frac{3\sqrt{3}}{2}a^2c$ ; 每个原子的体积为  $\frac{4\pi}{3}r^3 = \frac{4\pi}{3}\left(\frac{a}{2}\right)^3 = \frac{\pi}{6}a^3$ 。所以, 密排六方晶格的致密度为:

$$\frac{6 \times \frac{\pi}{6} a^3}{\frac{3\sqrt{3}}{2} a^2 c} = \frac{\pi a^3}{\frac{3\sqrt{3}}{2} a^2 \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{3}} a} = 0.74$$

可见, 密排六方晶格也是一种紧密排列, 并由此而得名。