



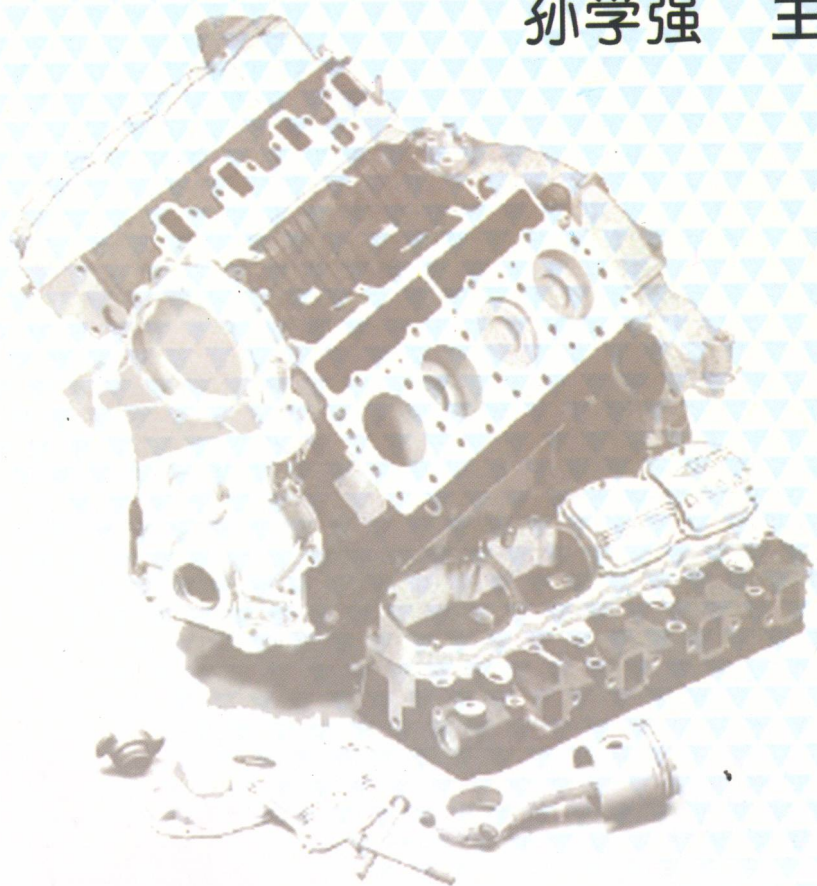
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
2008年度普通高等教育国家精品教材  
机械工业出版社精品教材

# 机械制造基础

J I X I E Z H I Z A O J I C H U

第2版

孙学强 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

配电子教案

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
2008年度普通高等教育国家精品教材  
机械工业出版社精品教材

# 机械制造基础

第2版

主 编 孙学强  
副主编 钱建辉  
参 编 宋新书 陈长生 雷兴碧  
      张蔚波 邹志强  
主 审 朱正心



机械工业出版社

本书共 15 章, 主要包括金属材料的力学性能、金属与合金的晶体结构、金属与合金的结晶、铁碳合金、钢的热处理、合金钢、铸铁、有色金属及其合金、非金属材料、铸造、锻压、焊接与热切割、金属切削加工基础和特种加工与数控加工等内容。为便于教学, 各章均编写了教学要求和小结。教学要求中将学生对所学知识掌握的程度分为了解、理解、熟悉、掌握; 小结则对重点、难点内容进行了总结, 以指导学生在课后进一步自学。

本书以培养技术应用型人才为目标, 注重培养学生的工程能力和创新思维, 注重对学生应用所学理论知识分析和解决实际工程技术问题的能力培养。

本书可作为应用型本科院校、专科学校机械类、近机类各专业的教学用书, 也可供电视大学、业余大学有关专业使用, 并可供有关工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

机械制造基础/孙学强主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2008.2 (2011.8 重印)  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材 2008 年度普通高等教育国家精品教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 07104 - 4

I. 机… II. 孙… III. 机械制造 - 高等学校 - 教材 IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 206430 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 王海峰 责任校对: 申春香

封面设计: 王奕文 责任印制: 乔宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2011 年 8 月第 2 版第 12 次印刷

184mm × 260mm · 17.75 印张 · 434 千字

50001 - 54000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-07104-4

定价: 32.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

策划编辑: (010) 88379733

社服务中心: (010) 88361066

网络服务

销售一部: (010) 68326294

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者服务部: (010) 88379203

封面防伪标均为盗版

## 第 2 版前言

本书是教育部确定的普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书初版于 2001 年 2 月，为贯彻《教育部关于印发普通高等教育“十一五”国家级教材规划选题的通知》精神，这次作了全面修订。

本书包括金属材料及热处理、非金属材料、铸造、锻压、焊接与热切割、金属切削加工基础和特种加工与数控加工等内容。为便于教学，各章均编写了教学要求和小结。教学要求中将学生对所学知识掌握的程度分为了解、理解、熟悉、掌握；小结则对重点、难点内容进行了总结，以指导学生在课后进一步自学。

在本书的编写过程中，作者从培养技术应用型人才的需要出发，拓宽了学科的技术基础，打破了学科知识严格的逻辑演进序列，在加强基础理论的同时，更加注重理论知识在生产中的应用性或可操作性，并根据这一思路建立了整体优化的教学内容体系，便于使学生对机械设计制造的技术基础有一个整体的认识。本教材遵循教育教学规律，加强了理论与实际的联系，使教学内容能学以致用，适应了专业教学改革和课程建设的发展，因此教学效率高。

本教材介绍的内容既是机械类专业的重要技术基础，又是可独立应用的技术，作者在编写本书时力图处理好这两者的关系，但作为教材不可能面面俱到。读者若在生产中应用本书介绍的内容时，还应参考相关的技术手册。

全书共分 15 章。第一章、第二章和第三章由邹志强编写；第四章和第五章由雷兴碧编写；第六章、第九章和第十四章由钱建辉编写；第七章和第十章由陈长生编写；第十一章和第十二章由宋新书编写；第八章和第十三章由张蔚波编写；第十五章和各章的教学要求、小结由孙学强编写。

本书由昆明学院孙学强任主编并负责修订工作，邢台职业技术学院钱建辉任副主编。全书由湖南工程学院朱正心任主审。

为了方便使用本书的教师授课，我们同时还制作了《机械制造基础电子教案》（光盘），有需要的教师可向机械工业出版社索取，也可向昆明学院孙学强老师索取。机械工业出版社电子邮箱是 [cmpgaozhi@sina.com](mailto:cmpgaozhi@sina.com)，孙学强老师的电子邮箱是：[sunxq288@yahoo.cn](mailto:sunxq288@yahoo.cn)。

在本书的编写和修订过程中，得到了原机械工业部机电类教材编委会和机械工业出版社的热情帮助和指导，并得到了参编学校领导的支持，参考并引用了一些参考文献的内容和插图，邢台职业技术学院的刘兵群老师为本书提供了部分金相照片，昆明学院的杨云春和李屏老师为制作本书的电子文稿付出了辛勤的劳动，编者在此向他们表示衷心的感谢。

培养应用型人才是教育教学改革一项艰巨的系统工程，教材建设更是首当其冲，由于编者水平有限，本书难免仍有漏误及不当之处，欢迎同仁和读者批评指正。

编 者

# 目 录

第2版前言	
第一章 金属材料的力学性能	1
第一节 强度和塑性	1
第二节 硬度	4
第三节 冲击韧度	8
第四节 疲劳强度	9
小结	9
习题	10
第二章 金属与合金的晶体结构	11
第一节 纯金属的晶体结构	11
第二节 合金的晶体结构	13
第三节 实际金属的晶体结构	15
小结	17
习题	17
第三章 金属与合金的结晶	19
第一节 纯金属的结晶	19
第二节 合金的结晶	22
小结	27
习题	27
第四章 铁碳合金	28
第一节 铁碳合金的基本相	28
第二节 Fe-Fe <sub>3</sub> C相图	29
第三节 碳素钢	38
小结	44
习题	44
第五章 钢的热处理	45
第一节 概述	45
第二节 钢在加热时的组织转变	45
第三节 钢在冷却时的组织转变	48
第四节 钢的退火与正火	54
第五节 钢的淬火	57
第六节 淬火钢的回火	61
第七节 钢的表面热处理	62
第八节 热处理零件的结构工艺性	68
小结	69
习题	69
第六章 合金钢	71
第一节 概述	71
第二节 合金元素在钢中的作用	72
第三节 合金结构钢	75
第四节 合金工具钢	79
第五节 特殊性能钢	85
小结	90
习题	90
第七章 铸铁	91
第一节 概述	91
第二节 铸铁的石墨化	91
第三节 常用铸铁	93
小结	102
习题	103
第八章 有色金属及其合金	104
第一节 铝及铝合金	104
第二节 铜及铜合金	107
第三节 滑动轴承合金	111
第四节 粉末冶金与硬质合金	113
小结	115
习题	116
第九章 非金属材料	117
第一节 高分子材料	117
第二节 其他非金属材料	124
小结	126
习题	126
第十章 铸造	127
第一节 概述	127
第二节 砂型铸造	128
第三节 合金的铸造性能	138
第四节 铸造工艺设计的基本内容	143
第五节 铸件的结构工艺性	149
第六节 特种铸造简介	153
小结	157
习题	157
第十一章 锻压	160
第一节 概述	160
第二节 金属的塑性变形	161

第三节	锻造工艺过程	166	小结	249
第四节	自由锻造	168	习题	249
第五节	模锻	174	第十四章	零件选材与加工工艺
第六节	板料冲压	181	分析	251
第七节	其他锻压方法简介	190	第一节	零件的失效形式和选材原则
小结		193	第二节	零件毛坯的选择
习题		193	第三节	零件热处理的技术条件 和工序位置
第十二章	焊接与热切割	195	第四节	典型零件材料和毛坯的选择及 加工工艺分析
第一节	概述	195	小结	263
第二节	焊条电弧焊	196	习题	263
第三节	其他焊接方法	205	第十五章	特种加工及数控加工
第四节	常用金属材料的焊接	212	第一节	概述
第五节	焊接结构工艺性	216	第二节	电火花加工
第六节	常见的焊接缺陷及产生原因	221	第三节	电火花线切割加工
第七节	热切割	222	第四节	激光加工
小结		224	第五节	超声波加工
习题		224	第六节	数控加工
第十三章	金属切削加工基础	226	小结	273
第一节	金属切削加工的基础知识	226	习题	274
第二节	金属切削机床的基本知识	234	参考文献	275
第三节	车削加工	237		
第四节	钻、镗削加工	240		
第五节	刨、插、拉削和铣削加工	243		
第六节	磨削加工	246		

# 第一章 金属材料的力学性能

**教学要求：**通过学习，学生应掌握金属材料的力学性能指标和测试方法，以及各个指标的物理意义。在设计机械零件和选择材料时要根据零件的工作环境、零件所承受的载荷情况重点考虑某些力学性能指标。

机器上由金属材料制成的零、部件，在工作过程中都要承受外力（或称载荷）作用。载荷作用的结果将引起零、部件形状和尺寸的改变，这种改变称为变形。由于所加载荷的大小、速度和形式的不同，所引起金属变形的方式也不同。常见的变形方式有：拉伸、压缩、弯曲、扭转、剪切等。金属材料在各种不同形式的载荷作用下所表现出来的特性叫做力学性能，通常用试验来测定。常用的试验方法有拉伸试验、硬度试验、冲击试验等。力学性能的主要指标有强度、塑性、硬度、冲击韧度等。

## 第一节 强度和塑性

若载荷的大小不变或变动很慢，则称为静载荷。金属材料的强度、塑性是在静载荷作用下测定的。

### 一、强度

所谓强度，是指金属材料在静载荷作用下抵抗变形和断裂的能力。由于所受载荷的形式不同，金属材料的强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗扭强度、抗剪强度等，各种强度之间有一定的联系。一般情况下多以抗拉强度作为判别金属材料强度高低的指标。

抗拉强度是通过拉伸试验测定的。拉伸试验的方法是用静拉伸力对标准试样进行轴向拉伸，同时连续测量力和相应的伸长，直至断裂。根据测得的数据，即可求出有关的力学性能。

#### 1. 拉伸试样

为了使金属材料的力学性能指标在测试时能排除因试样形状、尺寸的不同而造成的影响，并便于分析比较，试验时应先将被测金属材料制成标准试样。图 1-1 所示为圆形拉伸试样。

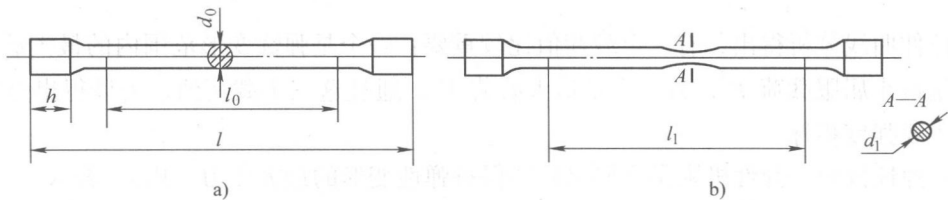


图 1-1 圆形拉伸试样  
a) 拉伸前 b) 拉伸后

图中， $d_0$  为试样的直径， $l_0$  为标距长度。根据标距长度与直径之间的关系，试样可分为长试样 ( $l_0 = 10d_0$ ) 和短试样 ( $l_0 = 5d_0$ ) 两种。

## 2. 力 - 伸长曲线

拉伸试验中记录的拉伸力与伸长的关系曲线叫做力 - 伸长曲线，也称拉伸图。图 1-2 是低碳钢的力 - 伸长曲线。图中纵坐标表示力  $F$ ，单位为 N；横坐标表示绝对伸长  $\Delta l$ ，单位为 mm。

由图可见，低碳钢在拉伸过程中，其载荷与变形关系有以下几个阶段：

当载荷不超过  $F_e$  时，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，试样仍能恢复到原来的尺寸，即试样的变形完全消失。这种随载荷消失而消失的变形叫弹性变形。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，此时若卸除载荷，弹性变形消失，而另一部分变形却不能消失，即试样不能恢复到原来的尺寸，这种载荷消失后仍继续保留的变形叫塑性变形。

当载荷达到  $F_s$  时，拉伸曲线出现了水平或锯齿形线段，这表明在载荷基本不变的情况下，试样却继续变形，这种现象称为“屈服”。引起试样屈服的载荷称为屈服载荷。

当载荷超过  $F_s$  后，试样的伸长量与载荷以曲线关系上升，但曲线的斜率比  $Oe$  段的斜率小，即载荷的增加量不大，而试样的伸长量却很大。当载荷继续增加到某一最大值  $F_b$  时，试样的局部截面缩小，产生所谓的“缩颈”现象。由于试样局部截面的逐渐缩小，故载荷也逐渐降低，当达到拉伸曲线上  $k$  点时，试样随即断裂。 $F_k$  为试样断裂时的载荷。

在试样产生缩颈以前，由载荷所引起试样的伸长，基本上是沿着整个试样标距长度内发生的，属于均匀变形；缩颈后，试样的伸长主要发生在颈部的一段长度内，属于集中变形。

## 3. 强度指标

强度指标是用应力值来表示的。根据力学原理，试样受到载荷作用时，则内部产生大小与载荷相等而方向相反的抗力（即内力）。单位截面积上的内力，称为应力，用符号  $\sigma$  表示。

从拉伸曲线分析得出，有三个载荷值比较重要：一个是弹性变形范围内的最大载荷  $F_e$ ，第二个是最小屈服载荷  $F_s$ ，另一个是最大载荷  $F_b$ ，通过这三个载荷值，可以得出金属材料的三个主要强度指标。

(1) 弹性极限。弹性极限是金属材料能保持弹性变形的最大应力，用  $\sigma_e$  表示。

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0}$$

式中  $F_e$  —— 弹性变形范围内的最大载荷 (N)；

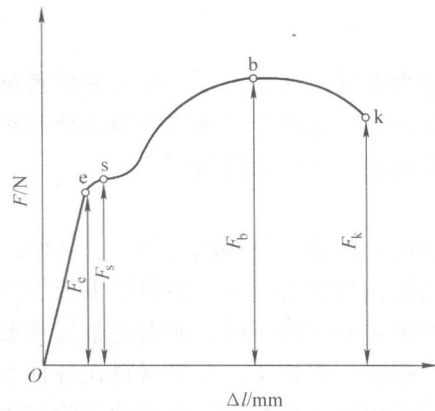


图 1-2 低碳钢的力 - 伸长曲线



$S_0$  ——试样原始横截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

(2) 屈服点与屈服强度。屈服点是使材料产生屈服现象时的最小应力，用  $\sigma_s$  表示。

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0}$$

式中  $F_s$  ——使材料产生屈服的最小载荷 (N)；

$S_0$  ——试样的原始横截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

对于低塑性材料或脆性材料，由于屈服现象不明显，因此这类材料的屈服点常以产生一定的微量塑性变形（一般用变形量为试样长度的 0.2% 表示）的应力来表示，称为屈服强度，用  $\sigma_{0.2}$  表示，即

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0}$$

式中  $F_{0.2}$  ——塑性变形量为试样长度的 0.2% 时的载荷 (N)；

$S_0$  ——试样原始横截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

(3) 抗拉强度。试样断裂前能够承受的最大应力，称为抗拉强度，用  $\sigma_b$  表示。

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0}$$

式中  $F_b$  ——试样断裂前所能承受的最大载荷 (N)；

$S_0$  ——试样的原始横截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

低碳钢的屈服点  $\sigma_s$  约为 240MPa，抗拉强度  $\sigma_b$  约为 400MPa。

工程上所用的金属材料，不仅希望具有较高的  $\sigma_s$ ，还希望具有一定的屈强比 ( $\sigma_s/\sigma_b$ )。屈强比越小，结构零件的可靠性越高，万一超载也能由于塑性变形而使金属的强度提高，不致于立即断裂。但如果屈强比太小，则材料强度的有效利用率就会太低。

## 二、塑性

金属发生塑性变形但不破坏的能力称为塑性。在拉伸时它们分别为伸长率和断面收缩率。

### 1. 伸长率

伸长率是指试样拉断后的标距伸长量与原始标距的百分比，用符号  $\delta$  表示，即

$$\delta = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\% = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中  $l_0$  ——试样的原始标距长度 (mm)；

$l_1$  ——试样拉断后的标距长度 (mm)。

### 2. 断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断处横截面积的缩减量与原始横截面积的百分比，用符号  $\psi$  表示，即

$$\psi = \frac{\Delta S}{S_0} \times 100\% = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$$

式中  $S_0$  ——试样原始横截面积 ( $\text{mm}^2$ );  
 $S_1$  ——试样断裂处的横截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

必须说明, 伸长率的大小与试样的尺寸有关。试样长短不同, 测得的伸长率是不同的。长、短试样的伸长率分别用  $\delta_{10}$  和  $\delta_5$  表示, 习惯上,  $\delta_{10}$  也常写成  $\delta$ 。对于同一材料而言, 短试样所测得的伸长率 ( $\delta_5$ ) 要比长试样测得的伸长率 ( $\delta_{10}$ ) 大一些, 两者不能直接进行比较。

$\delta$  和  $\psi$  是材料的重要性能指标。它们的数值越大, 材料的塑性就越好。金属材料的塑性好坏, 对零件的加工和使用有十分重要的意义。例如, 低碳钢的塑性较好, 故可以进行压力加工; 普通铸铁的塑性差, 因而不能进行压力加工, 只能进行铸造。同时, 由于材料具有一定的塑性, 故能够保证材料不致因稍有超载而突然断裂, 这就增加了材料使用的安全可靠性能。

## 第二节 硬 度

硬度是衡量金属材料软硬程度的指标, 是指金属抵抗局部弹性变形、塑性变形、压痕或划痕的能力。它是金属材料的重要性能之一, 也是检验工、模具和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, 又属无损检验, 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, 其中常用的硬度测定法是压入法, 它用一定的静载荷 (压力) 把压头压在金属表面上, 然后通过测定压痕的面积或深度来确定其硬度。常用的硬度试验方法有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度三种。

### 一、布氏硬度

布氏硬度的测定原理是用规定的试验力  $F$ , 把直径为  $D$  的硬质合金球压入被测金属表面, 保持一定时间后卸除载荷, 在放大镜下测量被测试金属表面的压痕直径  $d$ , 由此计算压痕的球缺面积  $S$ , 然后再求出压痕的单位面积所承受的平均压力 ( $F/S$ ), 以此作为被测试金属的布氏硬度值, 如图 1-3 所示。

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

式中  $D$  ——球体直径 (mm);

$F$  ——试验力 (N);

$d$  ——压痕平均直径 (mm)。

布氏硬度用符号 HBW 表示, 习惯上只写明硬度的数值而不标出单位。一般硬度符号 HBW 前面的数值为硬度值, 符号后面的数值表示试验条件的指标, 依次为球体直径、试验力大小及试验力保持时间 (10~15s 时不标注)。例如: 600HBW1/30/20 表示用直径为 1mm 的硬质合金球, 在 294N (30kgf) 的试验力作用下保持 20s, 测得的布氏硬度值为 600。

在进行布氏硬度试验时, 应根据被测试金属材料的种类和试样厚度, 选择不同大小的球

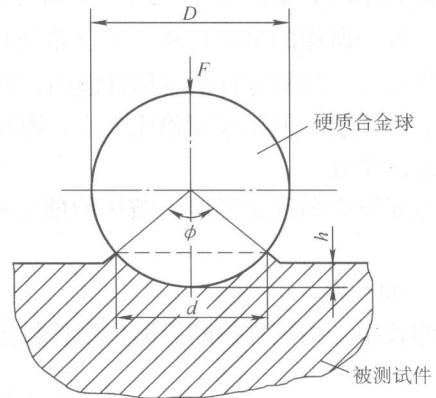


图 1-3 布氏硬度试验原理

体直径  $D$ 、试验载荷  $F$  和载荷保持时间。按 GB/T 231.1—2002 规定，球体直径有 10mm、5mm、2.5mm 和 1mm 四种；试验力（单位  $\text{kgf}^{\text{①}}$ ）与球体直径平方的比值（ $F/D^2$ ）有 30、15、10、5、2.5 和 1 共 6 种（可根据金属材料的种类和布氏硬度范围，按表 1-1 选定  $0.102F/D^2$ ）；试验力的保持时间为 10~15s。对于要求试验力保持较长时间的材料，试验力保持时间允许误差为  $\pm 2s$ 。

表 1-1 布氏硬度试验的  $F/D^2$  值的选定

材 料	布氏硬度 HBW	$F/D^2$ <sup>①</sup>
钢、镍合金、钛合金		30
铸铁	< 140	10
	> 140	30
铜及铜合金	< 35	5
	35 ~ 200	10
	> 200	30
轻金属及其合金	< 35	2.5
	35 ~ 80	10 (或 5、10) 10 (或 15)
	> 80	
铅、锡		1

① 实验条件允许时，应尽量选用 10mm 球和无括号的  $F/D^2$  值。

当试验力  $F$  与球体直径  $D$  选定后，硬度值只与压痕直径  $d$  有关。 $d$  越大，则布氏硬度值越小；反之， $d$  越小，则硬度值越大。实际测量时，用刻度放大镜测出压痕直径  $d$ ，然后根据  $d$  值查表，即可求出所测的硬度值。

布氏硬度试验法因压痕面积较大，能反映出较大范围内被测金属的平均硬度，故试验结果较精确。但因压痕较大，所以不宜用于测试成品或薄片金属的硬度。

## 二、洛氏硬度

当材料的硬度较高或试样过小时，需要用洛氏硬度计进行硬度测试。

洛氏硬度试验，是用顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥或直径为 1.588mm (1/16") 的淬火钢球或硬质合金球作压头，在初试验力  $F_0$  及总试验力  $F$ （初试验力  $F_0$  与主试验力  $F_1$  之和）分别作用下压入金属表面，然后卸除主试验力  $F_1$ ，在初试验力  $F_0$  下测定残余压入深度，用深度的大小来表示材料的洛氏硬度值，并规定每压入 0.002mm 为一个硬度单位。洛氏硬度试验原理如图 1-4 所示。图中 0-0 为金刚石圆锥压头没有和试样接触时的

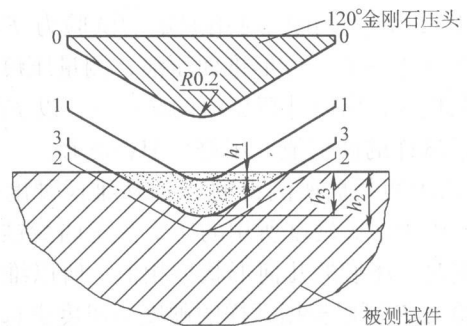


图 1-4 洛氏硬度试验原理

①  $\text{kgf}$  为非法定计量单位，此处暂保留， $1\text{kgf} = 9.8\text{N}$ 。

位置，1-1 为压头在初试验力（100N）作用下，压头压入深度为  $h_1$  时的位置；2-2 为在总试验力作用下，压头压入深度为  $h_2$  时的位置；3-3 为卸除主试验力保留初试验力后压头的位置  $h_3$ 。这样，压痕的深度  $h = h_3 - h_1$ ，洛氏硬度的计算公式为

$$\text{洛氏硬度} = N - \frac{h}{0.002}$$

式中  $h$  ——压痕深度；

$N$  ——给定标尺的数值，A、C 标尺为 100；B 标尺为 130。

材料越硬， $h$  便越小，而所测得的洛氏硬度值越大。

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。洛氏硬度所加载荷根据被测材料本身硬度不同而作不同规定，组成不同的洛氏硬度标尺，其中最常用的是 A、B、C 三种标尺，其试验规范见表 1-2（GB/T 230.1—2004）。

表 1-2 洛氏硬度试验规范

标尺	硬度符号	所用压头	总试验力/N	适用范围 HR <sup>①</sup>	应用举例
A	HRA	金刚石圆锥	588.4	70~88	碳化物、硬质合金、淬火工具钢、浅层表面硬化钢等
B	HRB	1/16" ( $\phi 1.588\text{mm}$ ) 钢球	980.7	25~100	软钢、铜合金、铝合金、可锻铸铁
C	HRC	金刚石圆锥	1471.0	20~67	淬火钢、调质钢、深层表面硬化钢

① HRA、HRC 所用刻度盘满刻度为 100，HRB 为 130。

洛氏硬度试验的优点是操作迅速、简便，可从表盘上直接读出硬度值，不必查表或计算，而且压痕小，可测量较薄工件的硬度。其缺点是精确性较差，硬度值重复性差，通常需要在材料的不同部位测试数次，取其平均值来代表材料的硬度。

### 三、维氏硬度

维氏硬度的测定原理基本上和布氏硬度相同，也是以单位压痕面积的力作为硬度值计量。所不同的是所用压头为锥面夹角为  $136^\circ$  的金刚石正四棱锥体，如图 1-5 所示。试验时用规定的试验力  $F$ ，在试样表面上压出一个正方形锥面压痕，测量压痕对角线的平均长度  $d$ ，借以计算压痕的面积  $S$ ，以  $F/S$  的数值来表示试样的硬度值，用符号 HV 表示。

HV 可根据所测得的  $d$  值从维氏硬度表中直接查出。由于维氏硬度所用的压头为正四棱锥，当试验力改变时，压痕的几何形状恒相似，所以维氏硬度所用试验力  $F$  可以根据试样的硬度与厚度来选择。常用的试验力有 49.03N、98.07N、196.1N、294.2N、490.3N、980.7N 等几种。一般在试样厚度允许的情况下尽可能选用较大的试验力，以获得较大的压痕，提高测量精度。

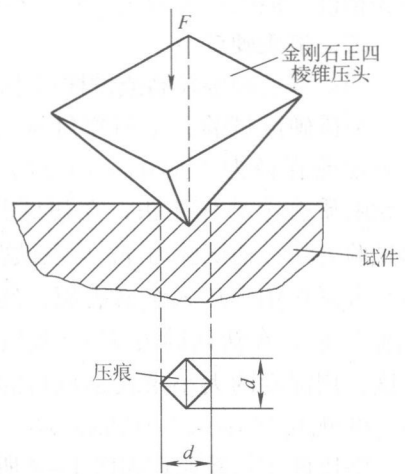


图 1-5 维氏硬度试验原理

维氏硬度标注时，在符号 HV 前面标出硬度值，在 HV 后面的数值依次表示试验力值和试验力保持时间（保持时间为 10~15s 时不标出）。例如：640HV30 表示在试验力为 294.2N 下，保持 10~15s 测得的维氏硬度为 640；640HV30/20 表示在试验力为 294.2N 下，保持 20s 测得的维氏硬度值为 640。

在实际测量时，用装在机体上的测量显微镜，测出压痕投影的两对角线的平均长度  $d$ ，然后根据  $d$  的大小查表（GB/T 4340—1999），即可求得所测的硬度。

维氏硬度可测软、硬金属，尤其是极薄零件和渗碳层、渗氮层的硬度，它测得的压痕轮廓清晰，数值较准确。但是其硬度值需要测量压痕对角线，然后经计算或查表才能获得，效率不如洛氏硬度试验高，所以不宜用于成批零件的常规检验。

由于各种硬度试验的条件不同，因此相互间没有理论的换算关系。但根据试验结果，可获得粗略换算公式如下：

当硬度在 200~600HBW 范围内  $HRC \approx 1/10HBW$

当硬度小于 450HBW 时  $HBW \approx HV$

也可以参考表 1-3 所列的各种硬度对照值。

表 1-3 洛氏硬度 HRC 与其他硬度换算表

洛氏硬度		布氏硬度 HBW	维氏硬度	强度（近似值）	洛氏硬度		布氏硬度 HBW	维氏硬度	强度（近似值）
HRC	HRA	10/3000	HV	$\sigma_b/MPa$	HRC	HRA	10/3000	HV	$\sigma_b/MPa$
65	83.6	—	798	—	36	(68.5)	331	339	1140
64	83.1	—	774	—	35	(68.0)	322	329	1115
63	82.6	—	751	—	34	(67.5)	314	321	1085
62	82.1	—	730	—	33	(67.0)	306	312	1060
61	81.5	—	708	—	32	(66.4)	298	304	1030
60	81.0	—	687	2675	31	(65.9)	291	296	1005
59	80.5	—	666	2555	30	(65.4)	284	289	985
58	80.0	—	645	2435	29	(64.9)	277	281	960
57	79.5	—	625	2315	28	(64.4)	270	274	935
56	78.9	—	605	2210	27	(63.8)	263	267	915
55	78.4	538	587	2115	26	(63.3)	257	260	895
54	77.9	526	659	2030	25	(62.8)	251	254	875
53	77.4	515	551	1945	24	(62.3)	246	247	845
52	76.9	503	535	1875	23	(61.7)	240	241	825
51	76.3	492	520	1805	22	(61.2)	235	235	805
50	75.8	480	504	1745	21	(60.7)	230	229	795
49	75.3	469	489	1685	20	(60.2)	225	224	775
48	74.8	457	457	1635	(19)	(59.7)	221	218	755
47	74.2	445	461	1580	(18)	(59.1)	216	213	740
46	73.7	433	448	1530	(17)	(58.6)	212	208	725
45	73.2	422	435	1480	(16)	(58.1)	208	203	710
44	72.7	411	432	1440	(15)	(57.6)	204	198	690
43	72.2	400	411	1390	(14)	(57.1)	200	193	675
42	71.7	390	400	1350	(13)	(56.5)	196	189	660
41	71.1	379	389	1310	(12)	(56.0)	192	184	645
40	70.6	369	378	1275	(11)	(55.5)	188	180	625
39	70.1	359	368	1235	(10)	(55.0)	185	176	615
38	(69.6)	349	358	1200	(9)	(54.5)	181	172	600
37	(69.0)	340	348	1170	(8)	(53.9)	177	168	590

### 第三节 冲击韧度

许多机械零件在工作中，往往要受到冲击载荷的作用，如活塞销、锤杆、冲模、锻模、凿岩机零件等。制造这些零件的材料，其性能不能单纯用静载荷作用下的指标来衡量，而必须考虑材料抵抗冲击载荷的能力。冲击载荷是指加载速度很快而作用时间很短的突发性载荷。

金属材料在冲击载荷作用下，抵抗破坏的能力称为冲击韧度。为了评定金属材料的冲击韧度，需要进行一次冲击试验。冲击试验是一种动载荷试验，它包括冲击弯曲、冲击拉伸、冲击扭转等几种试验方法。目前常用一次摆锤冲击弯曲试验来测定金属材料的韧度，其试验原理如图 1-6 所示。

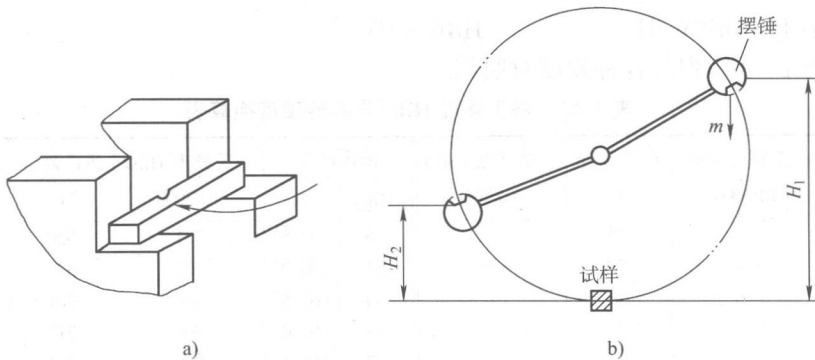


图 1-6 冲击试验原理

a) 试样安装位置 b) 冲击示意图

试验时，把按规定制作的标准冲击试样的缺口（脆性材料不开缺口）背向摆锤方向放在冲击试验机上（图 1-6a），将摆锤（质量为  $m$ ）扬起到规定高度  $H_1$ ，然后自由落下，将试样冲断。由于惯性，摆锤冲断试样后会继续上升到某一高度  $H_2$ 。根据功能原理可知：摆锤冲断试样所消耗的功为  $A_K = mg(H_1 - H_2)$ 。 $A_K$  称做冲击吸收功，可从冲击试验机上直接读出，单位为焦耳（J）。用试样缺口处的横截面积  $S$  去除  $A_K$  所得的商即为该材料的冲击韧度值，用符号  $\alpha_K$  表示，单位为焦耳/厘米<sup>2</sup>（J/cm<sup>2</sup>），即

$$\alpha_K = \frac{A_K}{S}$$

试样缺口有 U 形和 V 形两种，冲击韧度值分别以  $\alpha_{KU}$  和  $\alpha_{KV}$  表示。

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

一般来说，强度、塑性两者均好的材料， $\alpha_{KV}$  值也高。材料的冲击韧度除了取决于其化学成分和显微组织外，还与加载速度、温度、试样的表面质量（如缺口、表面粗糙度等）、材料的冶金质量等有关。加载速度越快，温度越低，表面及冶金质量越差，则  $\alpha_{KV}$  值越低。

在一次冲断条件下测得的冲击韧度值  $\alpha_{KV}$ ，对于判别材料抵抗大能量冲击能力，有一定的意义。而绝大多数机件在工作中所承受的多是小能量多次冲击，机件在使用过程中承受这种冲击有上万次或数十万次。对于材料承受多次冲击的问题，如果冲击能量低、冲击周次较多时，材料的冲击韧度主要取决于材料的强度，材料的强度高则冲击韧度较好；如果冲击能量高时，则主要取决于材料的塑性，材料的塑性越高则冲击韧度越大。因此冲击韧度值  $\alpha_{KV}$  一般可作设计和选材的参考。

## 第四节 疲劳强度

有许多零件（如齿轮、弹簧等）是在交变应力（指大小和方向随时间作用周期性变化）下工作的，零件工作时所承受的应力通常都低于材料的屈服强度。零件在这种交变载荷作用下经过长时间工作也会发生破坏，通常这种破坏现象叫做金属的疲劳断裂。

金属的疲劳断裂是在交变载荷作用下，经过一定的循环周次之后突然出现的。图 1-7 是某材料的疲劳曲线，横坐标表示循环周次，纵坐标表示交变应力。从该曲线可以看出，材料承受的交变应力越大，疲劳破坏前能循环工作的周次越少；当循环交变应力减少到某一数值时，曲线接近水平，即表示当应力低于此值时，材料可经受无数次应力循环而不破坏。我们把材料在无数次交变载荷作用下而不破坏的最大应力值称为疲劳强度。通常光滑试样在对称弯曲循环载荷作用下的疲劳强度用  $\sigma_{-1}$  表示。对钢材来说，当循环次数  $N$  达到  $10^7$  周次时，曲线便出现水平线，所以我们把经受  $10^7$  周次或更多周次而不破坏的最大应力定为疲劳强度。对于有色金属，一般则需规定应力循环次数在  $10^8$  或更多周次，才能确定其疲劳强度。

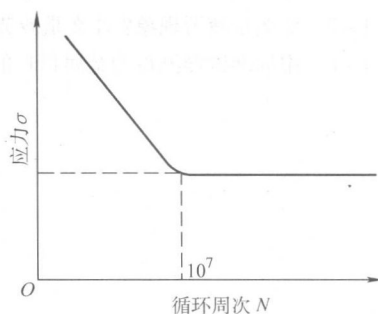


图 1-7 金属的疲劳曲线

影响疲劳强度的因素很多，其中主要有循环应力、温度、材料的化学成分及显微组织、表面质量和残余应力等。

应该注意：上述力学性能指标，都是用小尺寸的光滑试样或标准试样，在规定性质的载荷作用下测得的。实践证明，它们不能直接代表材料制成零件后的性能。因为实际零件尺寸往往很大，尺寸增大后，材料中出现的缺陷（如孔洞、夹杂物、表面损伤等）的可能性也增大；而且零件在实际工作中所受的载荷往往是复杂的，零件的形状、表面粗糙度值等也与试样差异很大，这些将在以后课程中讨论。

## 小 结

金属材料的力学性能是指材料在不同形式的载荷作用下所表现出来的特性。由于载荷的形式不同，材料可表现出不同的力学性能，如强度、塑性、硬度、韧度和疲劳强度等。

强度是指金属材料在静载荷作用下抵抗变形和断裂的能力；通常以抗拉强度作为判别材料强度高低的指标。通过静拉伸试验可测得强度和塑性。硬度也是在静载荷作用下测试的，常用的有布氏硬度和洛氏硬度。冲击韧度在一次冲击载荷下测试。疲劳强度是在交变应力作

用下测试。

金属材料的各种力学性能之间有一定的联系。一般提高金属的强度和硬度，往往会降低其塑性和韧性；反之，若提高塑性和韧性，则会削弱其强度。

## 习 题

- 1-1 什么是金属的力学性能？根据载荷形式的不同，力学性能主要包括哪些指标？
- 1-2 什么是强度？什么是塑性？衡量这两种性能的指标有哪些？各用什么符号表示？
- 1-3 低碳钢做成的  $d_0 = 10\text{mm}$  的圆形短试样经拉伸试验，得到如下数据：  
 $F_s = 21100\text{N}$ ,  $F_b = 34500\text{N}$ ,  $l_1 = 65\text{mm}$ ,  $d_0 = 6\text{mm}$ 。试求低碳钢的  $\sigma_s$ 、 $\sigma_b$ 、 $\delta_5$ 、 $\psi$ 。
- 1-4 什么是硬度？HBW、HRA、HRB、HRC 各代表什么方法测出的硬度？
- 1-5 下列硬度要求和写法是否正确？  
 HBW150 HRC40N HR00 HRB10 478HV HRA79 474HBW
- 1-6 什么是冲击韧性？ $A_K$  和  $\alpha_{KV}$  各代表什么？
- 1-7 什么是疲劳现象？什么是疲劳强度？
- 1-8 用标准试样测得的金属材料的力学性能能否直接代表该材料制成零件的力学性能？为什么？



## 第二章 金属与合金的晶体结构

**教学要求：**通过学习，学生应了解和掌握金属与合金的晶体结构、晶体缺陷以及合金的相结构，为以后的学习奠定基础。

一切元素的原子都是由带正电荷的原子核及带负电荷的电子所组成的。金属原子结构的特点是它的最外层只有数量很少的电子，一般只有1~2个，并且这些外层电子因与原子核的结合力较弱而容易变成自由电子。金属原子失去外层电子后，只剩下带正电荷的原子部分，即金属正离子。这些正离子与自由电子相互作用，使金属原子有规则地结合起来。这种结合方式称为金属键。金属的性能是由它的内部组织结构决定的，因此了解金属的内部组织结构，对掌握金属材料的性能是非常重要的。

### 第一节 纯金属的晶体结构

#### 一、晶体结构的基本知识

##### 1. 晶体与非晶体

固态物质按其原子（或分子）的聚集状态不同分为两大类，即晶体与非晶体。在自然界中，除少数固态物质（如松香、普通玻璃、沥青等）是非晶体外，绝大多数固态无机物都是晶体。晶体是指原子具有规则排列的物质，而非晶体其内部原子不具有规则排列。对两者进行比较可以看出，晶体具有如下三大特征：

(1) 在晶体中，原子（或分子）在三维空间作有规则的周期性的重复排列，因此晶体一般具有规则的外形。

(2) 从液态转变成晶态固体（晶体）的转变是在一定温度下进行的，即晶体具有固定的熔点（如铁为1538℃、铝为660℃）。

(3) 沿着一个晶体的不同方向所测得的性能不相同，出现或大或小的差异，即晶体具有各向异性。

常见固态金属都是晶体。金属晶体除有着上述晶体所共有的特征外，还具有金属光泽、良好的导电性、导热性和塑性，尤其是金属晶体还具有正的电阻温度系数，这是金属晶体与非金属晶体的根本区别。

##### 2. 晶格和晶胞

既然金属都是晶体，为了研究金属原子（或离子）在空间排列的情况，我们要作一些假设。首先，将金属原子（或离子）视为一个个“静止的刚性小球”，这样，金属晶体即是由这些小球按一定的规律在空间紧紧地排列而成的，如图2-1所示。

如果将这些“原子小球”看成是一个个点，这样的点则代表着原子振动的中心，再把这些点用假想的直线连接起来，这样，金属原子在空间排列就可以用一抽象化的模型——空间格子表示。这种空间格子称为晶格，如图2-2所示。每个点称为结点。