



全国高等院校“十二五”特色精品课程建设成果

# 工程材料及热处理

(第2版)

主编 胡凤翠 于德雨



GONGCHENG CAILIAO  
JI RECHULI

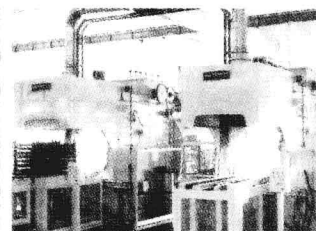


全国高等院校“十二五”特色精品课



# 工程材料及热处理

(第2版)



◎主 编	胡凤翔	子艳丽
◎副主编	吴德亭	舒翔
◎参 编	戴勇新	罗建军

张国军

## 内 容 简 介

本书内容包括:金属力学性能、金属学基本知识、钢的热处理、金属材料、工程材料的选用。各章后面附有思考题与作业题。

本书比较全面系统地介绍了金属力学性能、金属与合金的基本结构与性能、金属的凝固、相图和固态相变、塑性变形、钢在加热及冷却过程中的相变原理以及钢的热处理工艺、碳钢、合金钢、铸铁、有色金属、工程材料的选用等知识。

本书可作为冶金、机械、石油化工、矿山、电力等专业的专业教材,也可作为高等院校的教材,还可作为从事金属材料及相关专业的工程技术人员重要的参考用书。

**版权专有 侵权必究**

---

### 图书在版编目(CIP)数据

工程材料及热处理/胡凤翔,于艳丽主编. —2版. —北京:北京理工大学出版社,2012.8

ISBN 978-7-5640-6638-3

I. ①工… II. ①胡… ②于… III. ①工程材料②热处理 IV. ①TB3②TG15

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第192702号

---

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京市通州富达印刷厂

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/15.75

字 数/358千字

版 次/2012年8月第2版 2012年8月第1次印刷

印 数/1~1000册

定 价/39.50元

责任校对/陈玉梅

责任印制/王美丽

---

图书出现印装质量问题,本社负责调换



## 出版说明 >>>>>

北京理工大学出版社为了顺应国家对机电专业技术人才的培养要求，满足企业对毕业生的技能需求，以服务教学、立足岗位、面向就业为方向，经过多年的大力发展，开发了30多个系列500多个品种的高等教育机电类产品，覆盖了机械设计与制造、材料成型与控制技术、数控技术、模具设计与制造、机电一体化技术、焊接技术及自动化等30多个制造类专业。

为了进一步服务全国机电类高等教育的发展，北京理工大学出版社特邀请一批国内知名行业专业、高等院校骨干教师、企业专家和相关作者，根据高等教育教材改革的发展趋势，从业已出版的机电类教材中，精心挑选一批质量高、销量好、院校覆盖面广的作品，集中研讨、分别针对每本书提出修改意见，修订出版了该高等院校“十二五”特色精品课程建设成果系列教材。

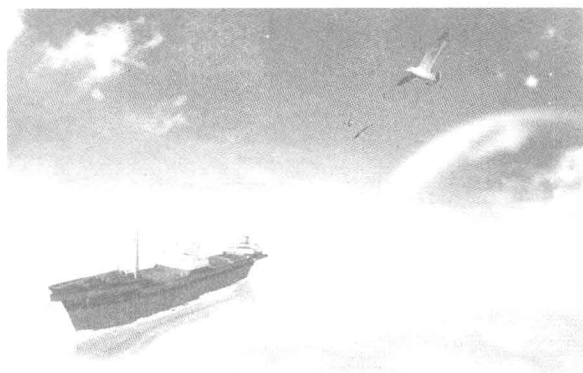
本系列教材立足于完整的专业课程体系，结构严整，同时又不失灵活性，配有大量的插图、表格和案例资料。作者结合已出版教材在各个院校的实际使用情况，本着“实用、适用、先进”的修订原则和“通俗、精炼、可操作”的编写风格，力求提高学生的实际操作能力，使学生更好地适应社会需求。

本系列教材在开发过程中，为了更适宜于教学，特开发配套立体资源包，包括如下内容：

- 教材使用说明；
- 电子教案，并附有课程说明、教学大纲、教学重难点及课时安排等；
- 教学课件，包括：PPT 课件及教学实训演示视频等；
- 教学拓展资源，包括：教学素材、教学案例及网络资源等；

- ▶ 教学题库及答案，包括：同步测试题及答案、阶段测试题及答案等；
- ▶ 教材交流支持平台。

北京理工大学出版社



# Qianyan

## 前言 >>>>>

本书是根据《高等教育基础课程教学基本要求》，围绕培养高等应用型人才的目标而编写的。

高等教育正处于全面提升质量与内涵建设的重要阶段，本着突出高等教育的特色为原则。编写过程中，汲取了各高等院校近年来机械工程材料（金属工艺学）课程改革的成功经验，并汲取其他同类教材的优点。教材内容侧重于应用理论、应用技术和材料的选用；强调理论联系实际，强调对学生的实践训练；贯彻以应用为目的，以掌握概念、强化应用为教学重点，以必需、够用为度的原则。

本书适应于高等教育机械类和近机类有关专业，也可供相应专业的工程技术人员参考。

本书由胡凤翔、于艳丽、吴德昌、舒翔、戴勇新、罗建军和张国军共同编写。胡凤翔、于艳丽任主编，吴德昌、舒翔任副主编，戴勇新、罗建军、张国军参编。

本书名词、术语、牌号、均采用了最新国家标准，使用了法定计量单位。为了方便读者学习，各章均配有思考题与练习题。

由于编者水平有限，编写时间短促，书中不妥之处恳请批评指正。

编者



# 目 录

绪论..... 1

## 模块一 工程材料基础

<b>项目一 工程材料的力学性能</b> ..... 5	<b>项目二 金属材料基础知识</b> ..... 18
1.1 静载荷下材料的力学性能 ..... 5	2.1 金属与合金的晶体结构..... 18
1.2 动载荷下材料的力学性能..... 13	2.2 金属与合金的结晶..... 25
1.3 项目小结..... 16	2.3 金属的塑性变形与再结晶..... 30
思考题与练习题 ..... 16	2.4 项目小结..... 36
	思考题与练习题 ..... 37
	拓展知识：工程材料的其他性能 ... 38

## 模块二 金属学热处理

<b>项目三 二元合金相图</b> ..... 45	4.2 钢的普通热处理..... 73
3.1 二元合金相图的建立..... 45	4.3 钢的表面热处理..... 85
3.2 铁碳合金相图..... 48	4.4 热处理技术要求标注、工序 位置安排与工艺分析..... 90
3.3 项目小结..... 60	4.5 项目小结..... 94
思考题与练习题 ..... 60	思考题与练习题 ..... 95
<b>项目四 钢的热处理</b> ..... 62	拓展知识：热处理新技术与 新工艺 ..... 96
4.1 钢热处理时的组织转变..... 63	

## 模块三 金属材料及非金属材料

<b>项目五 工业用钢</b> ..... 103	<b>项目六 铸铁</b> ..... 158
5.1 碳钢 ..... 103	6.1 铸铁的石墨化 ..... 159
5.2 合金钢 ..... 111	6.2 灰铸铁 ..... 161
5.3 项目小结 ..... 154	6.3 球墨铸铁 ..... 165
思考题与练习题..... 156	6.4 其他铸铁 ..... 169

6.5 项目小结 .....	173	<b>项目八 非金属材料</b> .....	193
思考题与练习题.....	174	8.1 高分子材料 .....	193
<b>项目七 有色金属及粉末冶金材料</b> .....	175	8.2 陶瓷材料 .....	200
7.1 铝及铝合金 .....	176	8.3 复合材料 .....	203
7.2 铜及铜合金 .....	181	8.4 项目小结 .....	205
7.3 轴承合金 .....	185	思考题与练习题.....	205
7.4 粉末冶金材料 .....	187	拓展知识：新型材料及功能	
7.5 项目小结 .....	191	材料.....	205
思考题与练习题.....	192		

## 模块四 工程材料的选用

<b>项目九 机械零件的选择</b> .....	215	10.2 工程材料的应用举例.....	231
9.1 机械零件的失效与分析 .....	215	10.3 项目小结.....	234
9.2 工程材料选择的基本原则 .....	219	思考题与练习题.....	235
9.3 项目小结 .....	221	拓展知识：零件毛坯成型方法	
思考题与练习题.....	221	简介.....	236
<b>项目十 典型零件及工具的</b>		<b>参考文献</b> .....	241
<b>选材分析</b> .....	222		
10.1 典型零件及工具的选材 .....	222		



# 绪 论

工程材料是机械产品制造所必须的物质基础，是工业的“粮食”。工程材料的使用与人类进步密切相关，标志着人类文明的发展水平。所以，历史学家将人类的历史按使用材料的种类划分成了石器时代、陶器、铜器时代和铁器时代等。早在公元前 2000 年左右的青铜器时代，人类就开始了对工程材料的冶炼和加工制造。公元前 2000 多年的夏代，我国就掌握了青铜冶炼术，到距今 3000 多年前的殷商、西周时期，技术达到当时世界高峰，用青铜制造的生产工具、生活用具、兵器和马饰，得到普遍应用。河南安阳武官村发掘出来的重达 875 kg 的祭器司母戊大方鼎，不仅体积庞大，而且花纹精巧，造型美观。湖北江陵楚墓中发现的埋藏 2000 多年的越王勾践的宝剑仍金光闪闪，说明人们已掌握了锻造和热处理技术。春秋战国时期，我国开始大量使用铁器，白口铸铁、灰铸铁、可锻铸铁相继出现。公元 1368 年，明代科学家宋应星编著了闻名世界的《天工开物》，详细记载了冶铁、铸造、锻铁、淬火等各种金属加工制造方法，是最早涉及工程材料及成形技术的著作之一。在陶瓷及天然高分子材料（如丝绸）方面，我国也曾远销欧亚诸国，踏出了举世闻名的丝绸之路，为世界文明史添上了光辉的一页。19 世纪以来，工程材料获得了高速发展，到 20 世纪中期，金属材料的使用达到鼎盛时期，由钢铁材料所制造的产品约占机械产品的 95%。今后的发展趋势是传统材料不断扩大品种规模，不断提高质量并降低成本，新材料特别是人工合成材料等将得到快速发展，从而形成金属、高分子、陶瓷及复合材料三分天下的新时代。另外，功能材料、纳米材料等高科技材料将加速研究，逐渐成熟并获得应用。工程材料业已成为所有科技进步的核心。

材料的种类很多，其中用于机械制造的各种材料，称为机械工程材料。生产中用来制作机械工程结构、零件和工具的机械工程固体材料，分为金属材料、非金属材料、复合材料等。

目前金属材料仍是最主要的材料。它包括铁和以铁为基的合金（俗称黑色金属），如钢、铸铁和铁合金等；非铁金属材料（俗称有色金属），如铜及铜合金、铝及铝合金等。金属材料的性能与其化学成分、显微组织及加工工艺之间有着密切的关系，了解它们之间的关系，掌握它们之间的一些变化规律，是有效使用材料所必需的。本书在概括地阐述合金的一般规律基础上，以最常用的金属材料——钢为实例，较详细地介绍了钢的性能与化学成分、显微组织和热处理工艺之间的关系。

当今，机械工业正向着高速、自动、精密方向快速发展，机械工程材料的使用量越来越大，在产品的设计与制造过程中，所遇到的有关机械工程材料和热处理方面的问题日益增

多。实践证明,生产中往往由于选材不当或热处理不妥,机械零件的使用性能不能达到规定的技术要求,从而导致零件在使用中因发生过量变形、过早磨损或断裂等而早期失效。所以,在生产中合理选用材料和热处理方法,正确制定工艺路线,对充分发挥材料本身的性能潜力,保证材料具有良好的加工性能、获得理想的使用性能、提高产品质量、节约材料、降低成本等都起着重大作用。

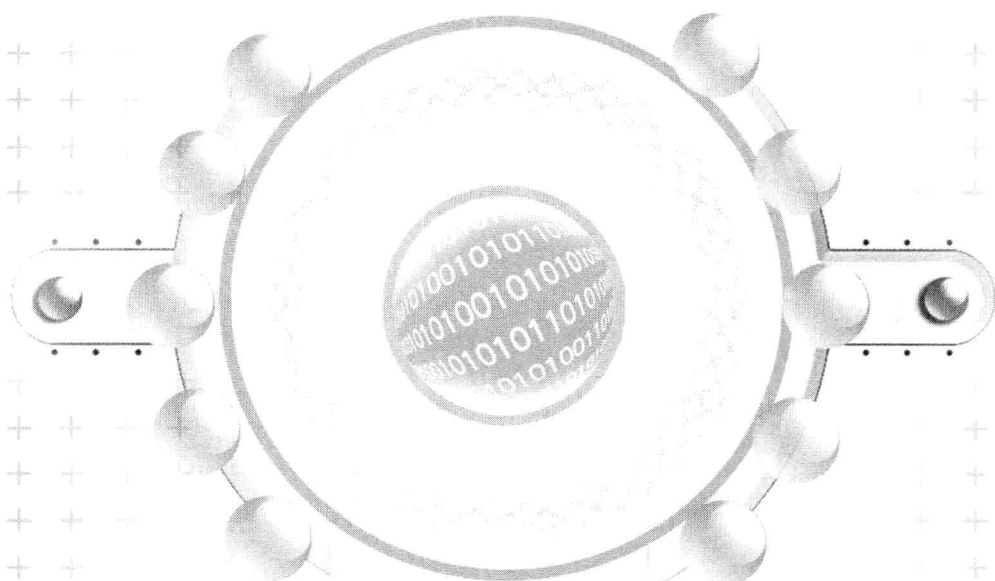
本课程的主要内容由金属的力学性能、金属学基础知识、钢的热处理、常用金属材料、非金属材料、复合材料,以及工程材料的选用等部分组成。

《工程材料及热处理》是机械类专业必修的技术基础课。其教学目的和任务是使学生获得常用机械工程材料的基础知识,为学习其他有关课程和将来从事生产技术工作奠定必要的基础。

学完本课程后应达到下列基本要求:

1. 熟悉常用机械工程材料的成分,组织结构、加工工艺与性能之间的关系及变化规律。
2. 掌握常用机械工程材料的性能与应用,具有选用常用机械工程材料和改变材料性能方法的初步能力。
3. 了解与课程有关的新材料、新技术、新工艺及其发展概况。

本课程的实践性和实用性都很强,为保证教学质量,本课程应安排在金工实习后学习。教材中热处理方法的选择及确定热处理工序位置、工程材料的选用等内容,尚需在有关后续课、课程设计和毕业设计等中反复练习、巩固与提高,才能达到基本掌握与应用的要求。



## 模块一 工程材料基础

工程材料主要是指机械、船舶、建筑、化工、交通运输、航空航天等各项工程中经常使用的各类材料。其中，金属材料因其优良的使用性能和加工工艺性能，成为机械行业中使用最广泛的材料。



## 项目一 工程材料的力学性能

### 知识目标

- (1) 掌握金属力学性能的基本概念及其指标。
- (2) 认识拉伸曲线图，掌握强度、塑性的衡量指标及其意义。
- (3) 掌握常用硬度的测试方法及适用范围。
- (4) 了解韧性、疲劳试验的工作原理，掌握冲击韧度、疲劳强度的衡量指标及其意义。

### 能力目标

- (1) 能根据拉伸曲线图比较不同金属材料的强度、塑性。
- (2) 能根据材料及其热处理状态，正确选用硬度测试方法。
- (3) 能根据力学性能指标合理选用金属材料。

### 引言

2001年11月12日，纽约一架美国航空客机从肯尼迪机场起飞不到几分钟，因飞机方向舵与机身脱离而解体，机上265名人员全部罹难；2004年10月4日12时30分左右，河北省青龙满族自治县境内的祖山风景区画廊谷观光索道突然发生迂回轮主轴断裂事故，致使索道无法正常运行，造成部分游客滞留在索道吊厢内，无法返回到索道站；公路上正常行驶的汽车刹车系统突然失灵；铁制大桥突然坍塌……这些事故发生的原因究竟是什么？为什么会在没有任何征兆的情况下突然发生？

其实这些事故和零件破坏现象都可以用材料的相关力学性能知识来加以解释。

## 1.1 静载荷下材料的力学性能

金属材料具有许多良好的性能，因此被广泛地应用于制造各种构件、机械零件、日常生活用具。生产实践中，往往由于选材不当而造成设备、零件达不到使用要求或过早失效，因此了解和熟悉材料的性能成为合理选材、充分发挥工程材料内在性能潜力的主要依据。

金属材料的性能包括工艺性能和使用性能。工艺性能是指在制造机器零件过程中,金属材料适应各种冷、热加工工艺要求的能力,包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能和热处理工艺性能等;使用性能是指为保证机械零件能正常工作,金属材料应具备的性能,包括力学性能和物理性能(如热学性能、电学性能、磁学性能等)、化学性能(如耐腐蚀性、抗氧化性等)。

机械零件在加工及使用过程中都要受到载荷的作用。根据载荷作用性质的不同,可分为静载荷、冲击载荷、疲劳载荷等。其中静载荷为大小不变或变动很慢的载荷,如车床主轴箱对床身的压力;冲击载荷为加载速度很快而作用时间很短的突发性载荷,如空气锤锤头下落时锤杆所承受的载荷;疲劳载荷为大小和方向随时间作周期性变化的载荷,如弹簧在使用过程中所承受的载荷。

金属材料在各种载荷作用下所表现出的性能,称为力学性能,包括强度、硬度、塑性、冲击韧度、疲劳强度等。材料的力学性能是零件设计、材料选择及工艺评定的重要依据。

### 1.1.1 强度与塑性

#### 1. 拉伸试验

金属材料的强度、塑性是依据国家标准 GB/T 228—2002 通过静拉伸试验测定的,它是把一定尺寸和形状的试样装夹在拉伸试验机(图 1-1 所示)上,然后对试样逐渐施加拉伸载荷,直至把试样拉断为止。

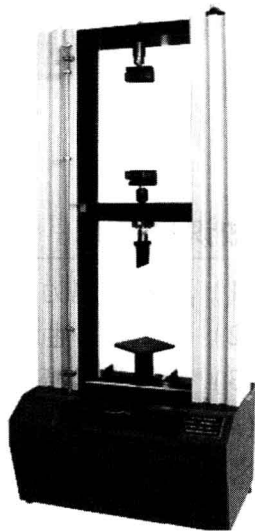


图 1-1 拉伸试验机

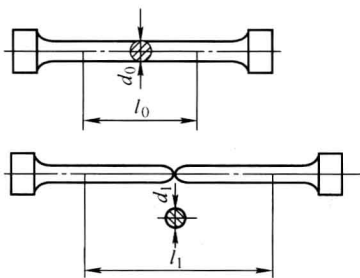


图 1-2 拉伸试样

#### (1) 拉伸试样

国标对试样的形状、尺寸及加工要求均有规定。标准试样的截面有圆形和矩形两种,圆形试样用的较多,圆形试样有短试样( $l_0 = 5d_0$ )和长试样( $l_0 = 10d_0$ )。拉伸前后的试样如图 1-2 所示(图中  $d_0$  为试样直径,  $l_0$  为原始标距)。

#### (2) 力-伸长曲线

在拉伸试验过程中,试验机可自动记录载荷与伸长量之间的关系,并得出以载荷为纵坐标、伸长量为横坐标的图形,即力-伸长曲线。如图 1-3 所示为退火后的低碳钢力-伸长曲线。

由图可看出,低碳钢在拉伸过程中,其载荷与伸长量关系可分为以下几个阶段:

① 弹性变形阶段( $Oe$ 段)。此阶段试样的伸长量与载荷成正比例增加,试样随载荷的增大而均匀伸长,此时若卸除载荷,试样能完全恢复到原来的形状和尺寸,属于弹性变形阶段。

② 微量塑性变形阶段( $es$ 段)。当载荷超过  $F_e$  后,试样将继续伸长。但此时若卸除载荷,试样将有少量变形而不能完全恢复到原来的尺寸。这种不能恢复的变形称为塑性变形或永久变形。由于此阶段塑性变形量较少,故称为微量塑性变形阶段。

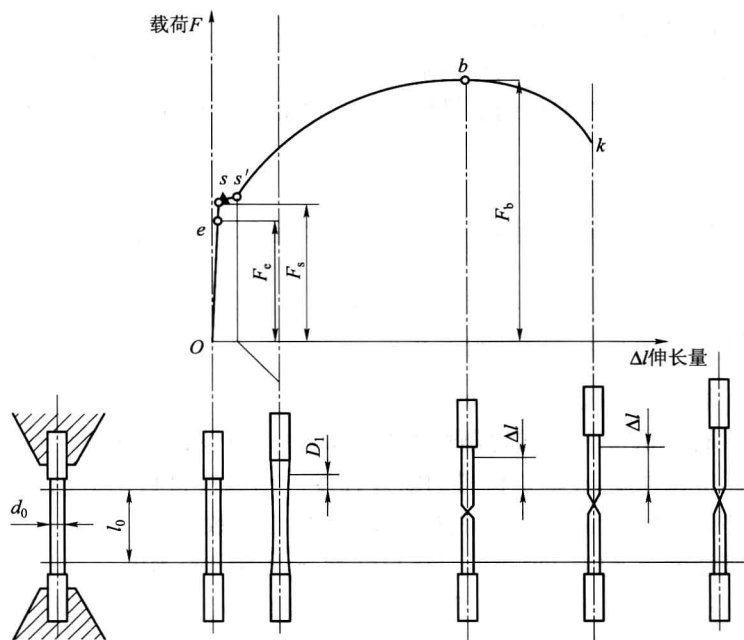


图 1-3 低碳钢力—伸长曲线

③ 屈服阶段 ( $ss'$ 段)。当载荷增大到  $F_s$  时, 曲线上出现水平 (或锯齿形) 线段, 即表示载荷不增加, 试样却继续伸长, 此现象称为“屈服”。

④ 均匀塑性变形阶段 ( $s'b$ 段)。当载荷超过  $F_s$  时, 载荷的增加量不大, 而试样的伸长量却很大, 表明当载荷超过  $F_s$  后试样已开始产生大量的塑性变形。并且当载荷增加到  $F_b$  时, 试样的局部截面缩小, 产生颈缩现象。

⑤ 局部塑性变形及断裂阶段 ( $bk$ 段)。当试样发生颈缩现象后, 以后的变形就局限在缩颈部分, 故载荷会逐渐减小, 当达到曲线上的  $k$  点时, 试样被拉断。

## 2. 强度

### (1) 屈服点与屈服强度

金属材料开始产生屈服现象时的最低应力值称屈服点, 用符号  $\sigma_s$  表示。

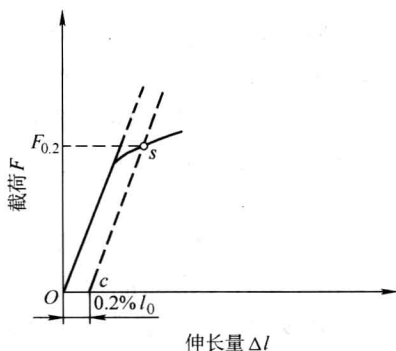


图 1-4 屈服强度的测定

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0}$$

式中  $F_s$ ——试样发生屈服现象时的载荷 (N);

$A_0$ ——试样的原始横截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

有些金属材料在拉伸时没有明显的屈服现象, 无法测定其屈服点  $\sigma_s$ , 按 GB/T 228—2002 规定, 可用屈服强度  $\sigma_{0.2}$  来表示该材料开始产生塑性变形时的最低应力值。如图 1-4 所示。

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{A_0}$$

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

$A_0$ ——试样的原始横截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

$\sigma_s$  和  $\sigma_{0.2}$  是表示材料抵抗塑性变形的能力。零件工作时一般不允许产生塑性变形, 否则会因塑性变形丧失尺寸和公差的控制而导致失效。因此,  $\sigma_s$  和  $\sigma_{0.2}$  是机械零件设计和选材的依据。

### (2) 抗拉强度

金属材料在断裂前所能承受的最大应力称为抗拉强度, 用符号  $\sigma_b$  表示。

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0}$$

式中  $F_b$ ——试样在断裂前所承受的最大载荷 (N);

$A_0$ ——试样的原始横截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

$\sigma_b$  是表示塑性材料抵抗大量均匀塑性变形的能力, 脆性材料在拉伸过程中, 一般不产生颈缩现象, 因此抗拉强度  $\sigma_b$  就是材料的断裂强度。用脆性材料制造机器零件或工程构件时, 常以  $\sigma_b$  作为选材和设计的依据, 并选用适当的安全系数。

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

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, 不至于立即断裂。但如果屈强比太小, 则材料强度的有效利用率就会很低。

### 3. 塑性

金属材料在载荷作用下, 断裂前产生不可逆永久变形的能力称为塑性。塑性的大小用伸长率  $\delta$  和断面收缩率  $\varphi$  表示。

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

$$\varphi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

式中  $L_0$ ——试样原始标距 (mm);

$L_1$ ——试样拉断后标距 (mm);

$A_0$ ——试样的原始横截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

$A_1$ ——试样拉断后颈缩处最小横截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

应该指出, 伸长率的大小与试样尺寸有关。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 ( $\delta_5$ ) 在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。比较不同材料的伸长率时, 应采用尺寸规格一样的试样。通常, 试验时优先选取短试样。

金属材料的塑性好坏对零件的加工和使用都具有重要的意义。塑性好的材料不仅能顺利进行锻压、轧制等成形工艺, 而且在使用时万一超载, 也会由于塑性变形而能避免突然断裂, 从而提高材料使用的安全可靠。所以, 大多数机器零件除要求具有足够的强度外, 还必须具有一定的塑性。一般说来, 伸长率达 5% 或断面收缩率达 10% 的材料, 即可满足绝大多数零件的要求。



### 1.1.2 硬度

硬度是指金属材料抵抗局部变形，特别是塑性变形、压痕或划痕的能力。它是衡量金属软硬程度的判据。通常，材料的硬度越高，其耐磨性越好，故常将硬度值作为衡量材料耐磨性的重要指标之一。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，其中常用的测定法是压入法，它是用一定的静载荷，把规定的压头压入金属材料表层，然后根据压痕的面积或深度确定其硬度值。根据压头和压力不同，常用的硬度指标有布氏硬度 HBW、洛氏硬度（HRA、HRB、HRC）和维氏硬度 HV。

#### 1. 布氏硬度

##### (1) 试验原理

试验原理如图 1-5 所示，布氏硬度计如图 1-6 所示。用直径为  $D$  的硬质合金球，在规定试验力下压入试样表面，保持规定的时间后卸除试验力，在试样表面留下球形压痕。用球面压痕单位面积上所承受的平均压力表示布氏硬度值。布氏硬度用符号 HBW 表示。

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

式中  $F$ ——试验力 (N)；  
 $A$ ——压痕表面积 ( $\text{mm}^2$ )；  
 $d$ ——压痕平均直径 (mm)；  
 $D$ ——硬质合金球直径 (mm)。

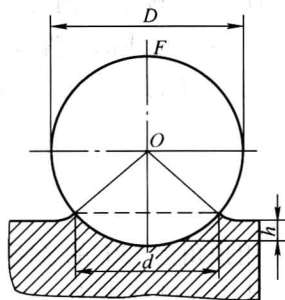


图 1-5 布氏硬度试验原理图

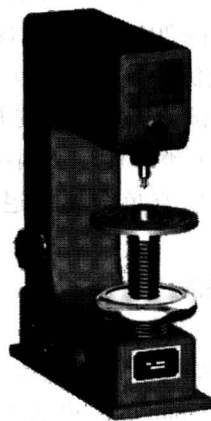


图 1-6 布氏硬度计

布氏硬度试验时，应根据被测金属材料的种类和试件厚度，选用不同直径的压头、试验力及试验力保持时间。按 GB/T 231.1—2002 规定，压头有四种（10 mm、5 mm、2.5 mm 和 1 mm）； $F/D^2$  的比值有六种（30、15、10、5、2.5 和 1），可根据金属材料种类和布氏硬度范围选定，见表 1-1。试验力保持时间钢铁材料为 10~15 s，有色金属为 30 s，布氏硬度值小于 35 时为 60 s。