



高等职业教育“十二五”规划教材

# 工程材料及应用

丁文溪 主编

王建勋 主审

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

高等职业



规划教材

# 工程材料及应用

丁文溪 主编  
周龙德 徐晓刚 副主编  
王建勋 主审

中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书是高等职业教育过程装备与控制工程专业“十二五”规划教材。全书以讲清概念、强化应用为教学目的,突出实用性、综合性、科学性、先进性,系统地讲述了过程装备中常用材料的基本知识。本书除绪论外,共分十章,分别是:金属的力学性能,纯金属晶体结构与结晶,金属的塑性变形与再结晶,二元合金与铁碳合金相图,钢的热处理,工业用钢,铸铁,非铁合金与粉末冶金材料,非金属材料与复合材料,典型零件的选材及热处理工艺分析。

本书可作为高等职业教育过程装备与控制工程专业的教材,也可作为企业职工培训教材,还可供相关专业技术人员阅读参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

工程材料及应用 / 丁文溪主编. —北京:中国石化出版社, 2013. 8  
高等职业教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-5114-2284-2

I. ①工… II. ①丁… III. ①工程材料—高等职业教育—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 181688 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

787×1092 毫米 16 开本 17.75 印张 445 千字

2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

定价:35.00 元

# 前 言

《工程材料及应用》是过程装备与控制工程专业的专业基础课。通过该课程学习，学生可以对过程装备与控制工程应用的各种材料有一个较为全面、概括性的了解，为学生学习专业课程和毕业后从事过程装备设计、制造和维修工作奠定基础。

本书在编写过程中，认真贯彻了国家教育部《关于加强高职高专教育人才培养工作的若干意见》文件精神，依据1999年教育部组织制定的《高职高专教育基础课程基本要求》和课程组《高等学校工程专科机械工程材料教学基本要求》，紧紧围绕过程装备与控制工程专业培养目标，结合高职高专教育的特点，以讲清概念、强化应用为主旨，对教材内容进行分析取舍、结构优化，在充分汲取高职高专探索培养技术应用型专门人才方面所取得成功经验的基础上编写而成。

本书主要内容包括：金属的力学性能，纯金属晶体结构与结晶，金属的塑性变形与再结晶，二元合金与铁碳合金相图，钢的热处理，工业用钢，铸铁，非铁合金与粉末冶金材料，非金属材料与复合材料，典型零件的选材及热处理工艺分析等。

本书在编写过程中着力突出少学时、宽口径、重技能的教学要求，侧重于技术应用，由浅入深、循序渐进。以掌握基本概念、强化应用、扩大知识面为教学重点，以注重能力培养为宗旨，尽量多列举常见的典型机械零件选材及工艺实例，并增加实际生产所用的图表资料等，以便于查阅使用；力求做到图解直观形象，尽量联系现场实际，同时精选了八个实训项目，力求培养学生独立思考、分析和解决实际问题的能力及善于探索创新的能力；通过教学活动培养学生的工程意识、经济意识和环保意识；每个单元都配备了思考与应用题，引导学生积极思考，培养学生灵活应用理论知识的能力。

参加本书编写的有丁文溪（绪论、第一章、第五章、附录一、附录二）、周龙德（第二章、第三章、第四章、第六章、第七章）、徐晓刚（第八章、第九章、第十章）。全书由丁文溪任主编，周龙德、徐晓刚任副主编，王建勋教授任主审。

本书可作为高等职业教育过程装备与控制工程专业的教材，也可作为企业职工培训教材，还可供相关专业技术人员阅读参考。

由于编者理论水平和教学经验所限，书中难免有谬误或不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编者

# 目 录

绪论 .....	( 1 )
<b>第一章 金属的力学性能</b> .....	( 3 )
第一节 强度与塑性 .....	( 3 )
第二节 硬度 .....	( 6 )
第三节 韧性与疲劳强度 .....	( 9 )
第四节 金属的蠕变极限与持久强度 .....	( 10 )
思考与应用 .....	( 11 )
<b>第二章 纯金属晶体结构与结晶</b> .....	( 14 )
第一节 纯金属晶体结构 .....	( 14 )
第二节 纯金属结晶 .....	( 18 )
思考与应用 .....	( 21 )
<b>第三章 金属的塑性变形与再结晶</b> .....	( 24 )
第一节 金属的塑性变形 .....	( 24 )
第二节 冷塑性变形对金属组织和性能的影响 .....	( 26 )
第三节 冷塑性变形金属加热时组织和性能的变化 .....	( 28 )
第四节 金属的热变形加工 .....	( 31 )
思考与应用 .....	( 32 )
<b>第四章 二元合金与铁碳合金相图</b> .....	( 34 )
第一节 合金的晶体结构与结晶 .....	( 34 )
第二节 铁碳合金基本组织 .....	( 43 )
第三节 铁碳合金相图 .....	( 44 )
思考与应用 .....	( 52 )
<b>第五章 钢的热处理</b> .....	( 55 )
第一节 钢在加热时的组织转变 .....	( 55 )
第二节 钢在冷却时的组织转变 .....	( 58 )
第三节 钢的退火与正火 .....	( 64 )
第四节 钢的淬火与回火 .....	( 66 )
第五节 钢的表面热处理和化学热处理 .....	( 73 )
第六节 金属材料表面处理新技术 .....	( 78 )
第七节 热处理零件质量分析与工艺分析 .....	( 81 )
思考与应用 .....	( 86 )
<b>第六章 工业用钢</b> .....	( 91 )
第一节 合金元素及杂质元素在钢中的作用 .....	( 91 )
第二节 合金钢的分类与编号 .....	( 95 )
第三节 非合金钢 .....	( 97 )

第四节	低合金钢 .....	(102)
第五节	合金结构钢 .....	(104)
第六节	合金工具钢 .....	(114)
第七节	特殊用途钢 .....	(121)
	思考与应用 .....	(128)
<b>第七章</b>	<b>铸铁 .....</b>	<b>(133)</b>
第一节	概述 .....	(133)
第二节	灰铸铁及热处理 .....	(137)
第三节	球墨铸铁 .....	(141)
第四节	可锻铸铁与蠕墨铸铁 .....	(145)
第五节	合金铸铁 .....	(148)
	思考与应用 .....	(150)
<b>第八章</b>	<b>非铁合金与粉末冶金材料 .....</b>	<b>(152)</b>
第一节	铝及铝合金 .....	(152)
第二节	铜及铜合金 .....	(158)
第三节	其他有色金属及合金 .....	(163)
第四节	轴承合金 .....	(167)
第五节	粉末冶金材料 .....	(170)
	思考与应用 .....	(173)
<b>第九章</b>	<b>非金属材料与复合材料 .....</b>	<b>(176)</b>
第一节	高分子材料 .....	(176)
第二节	陶瓷材料 .....	(185)
第三节	碳-石墨材料 .....	(194)
第四节	复合材料 .....	(197)
	思考与应用 .....	(206)
<b>第十章</b>	<b>典型零件的选材及热处理工艺分析 .....</b>	<b>(208)</b>
第一节	机械零件的失效 .....	(208)
第二节	选材的一般原则、方法和步骤 .....	(210)
第三节	热处理工艺位置安排和热处理方案的选择 .....	(212)
第四节	热处理技术条件的标注 .....	(214)
第五节	典型零件、工具的选材及热处理 .....	(215)
	思考与应用 .....	(221)
<b>附录一</b>	<b>实训项目手册 .....</b>	<b>(223)</b>
实训项目一	拉伸试验 .....	(223)
实训项目二	硬度试验 .....	(230)
实训项目三	冲击试验 .....	(237)
实训项目四	金相试样的制备和铁碳合金平衡组织观察 .....	(240)
实训项目五	钢的热处理综合实训 .....	(247)
实训项目六	碳钢的热处理显微组织观察 .....	(253)
实训项目七	铸铁及有色金属的显微组织观察 .....	(259)

实训项目八 钢铁材料的火花鉴别 .....	(265)
<b>附录二 金属材料及热处理常用数据表格 .....</b>	<b>(271)</b>
附表一 压痕直径与布氏硬度对照表 .....	(271)
附表二 HB 与 $\sigma_b$ 的关系 .....	(273)
附表三 布氏、维氏、洛氏硬度值的换算表 .....	(273)
附表四 常用结构钢退火及正火工艺规范 .....	(274)
附表五 常用工具钢退火及正火工艺规范 .....	(274)
附表六 常用钢种的回火温度与硬度对照表 .....	(275)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(276)</b>

# 绪 论

在现代工业社会里，信息、能源、材料和生物工程称为现代技术的四大支柱，而能源、信息和生物工程的发展，在某种意义上又依赖于材料的进步。材料科学的发展在现代工业社会中占有举足轻重的地位。

材料是人类用来制作各种产品的物质，是人类生活和生产的物质基础。历史学家以石器时代、陶瓷时代、青铜时代来划分古代史各阶段，而今人类正跨入人工合成材料的新时代。工程材料是指具有一定性能，在特定条件下能够承担某些功能，被用来制造各类机械、车辆、船舶、建筑、化工、能源、仪器仪表、航空航天等工程领域产品的材料。工程材料种类繁多，应用的场合也各不相同。

按材料的化学组成分类，可将工程材料分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料、复合材料四类。

(1) 金属材料 金属材料可分为黑色金属材料和有色金属材料两类。黑色金属材料是指铁及铁基合金，主要包括碳钢、合金钢、铸铁等；有色金属材料是指铁及铁基合金以外的金属及其合金。有色金属材料的种类很多，根据它们的特性不同，又可分为轻金属、重金属、贵金属、稀有金属等多种类型。金属材料具有正的电阻温度系数，一般具有良好的导电性、导热性、塑性、金属光泽等，是目前应用最广泛的工程材料。

(2) 高分子材料 以高分子化合物为主要组分的材料称为高分子材料，可分为有机高分子材料 and 无机高分子材料两类。有机高分子材料主要有塑料、橡胶、合成纤维等；无机高分子材料包括松香、淀粉、纤维素等。高分子材料具有较高的强度、弹性、耐磨性、抗腐蚀性、绝缘性等优良性能，在机械、仪表、电机、电气等行业得到了广泛应用。

(3) 陶瓷材料 陶瓷材料是金属和非金属元素间的化合物，主要包括水泥、玻璃、耐火材料、绝缘材料、陶瓷等。它们的主要原料是硅酸盐矿物，又称为硅酸盐材料，由于陶瓷材料不具有金属特性，因此也称为无机非金属材料。陶瓷材料熔点高、硬度高、化学稳定性高，具有耐高温、耐腐蚀、耐磨损、绝缘性好等优点，在现代工业中的应用越来越广泛。

(4) 复合材料 复合材料由基体材料和增强材料两个部分复合而成。基体材料主要有金属、塑料、陶瓷等，增强材料则包括各种纤维、无机化合物颗粒等。根据基体材料不同，可将复合材料分为金属基复合材料、陶瓷基复合材料、聚合物基复合材料；根据组织强化方式的不同，可将复合材料分为颗粒增强复合材料、纤维增强复合材料、层状复合材料等。复合材料具有非同寻常的强度、刚度、高温性能和耐腐蚀性等，这是它的组成材料所不具备的。

在上述四种基本类型材料中，金属材料具有良好的导电性、塑性与韧性；陶瓷材料则有高的硬度但脆性很大，且大多是绝缘材料；而高分子材料的弹性模量、强度、塑性都很低，多数也是不导电的。这些材料的不同性能都是由其内部结构决定的。从使用的角度看，对于一个机械产品，人们总是力求其使用性能优异、质量可靠、制造方便、价格低廉，而产品的使用性能又与材料的成分、组织及加工工艺之间的关系非常密切。

从材料学的角度看，材料的性能取决于其内部结构，而材料的内部结构又取决于成分和

加工工艺。所以，正确地选择材料，确定合理的加工工艺，得到理想的组织，获得优良的使用性能，是决定机械制造中产品性能的重要环节。

《工程材料及应用》课程主要由金属的力学性能、金属学基本知识、钢的热处理、常用金属材料、非金属材料以及机械工程材料的选用等部分组成。

学完本课程应达到下列基本要求：

- (1) 熟悉常用工程材料的成分、组织结构和性能的关系及变化规律。
- (2) 掌握常用工程材料的种类、牌号、性能及用途，能够对典型的机械零件、刀具和模具等合理正确地选用工程材料。
- (3) 了解金属材料强化的各种方法(固溶强化、细晶强化、变形强化、第二相强化和热处理强化等)及其基本原理。
- (4) 具有正确选择零件热处理工艺方法及确定热处理工序位置的能力。
- (5) 具有对常用工程材料制件进行工艺性分析的能力。
- (6) 了解与本课程相关的新材料、新技术、新工艺及其发展概况。

工程材料是一门理论和实践紧密结合的课程，因此要求学生在学习过程中不仅要掌握材料的一些最基本的理论知识，还要具备一定的实践技能。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，尚需在后续的专业基础课、专业课、课程设计、毕业设计中反复实践，巩固提高。在教学实践中必须注意密切联系实际，要求学生通过对学习内容的实际运用加深对课程内容的认识，从而使所学知识能够彼此贯通，提高学生实践与创新能力。

# 第一章 金属的力学性能

**本章导读：**通过本章学习，学生应掌握金属材料的主要力学性能(强度、塑性、硬度、冲击韧性、疲劳强度)判据的含义；为以后各章中学习金属组织结构与性能关系打下良好的基础；熟悉力学性能试验的基本原理、试验方法。

金属材料在现代工农业、国防、交通运输等各部门是应用最广泛的材料，这不仅是因为其来源丰富，而且因为其具有良好的使用性能和工艺性能，因此被广泛用来制造机械零件和工程结构。所谓使用性能是指金属材料在使用过程中表现出来的性能，包括力学性能、物理性能(如电导性、导热性等)、化学性能(如耐蚀性、抗氧化性)等。所谓工艺性能是指金属材料在各种加工过程中所表现出来的性能，包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理性能和切削加工性能等。

为了正确、合理地使用金属材料，必须了解其性能。在机械行业中选用材料时，一般以力学性能作为主要依据。力学性能是指金属在外力作用下所表现出来的特性。常用的力学性能判据有：强度、塑性、硬度、冲击韧性和疲劳强度等。金属力学性能判据是指表征和判定金属力学性能所用的指标和依据。判据的高低表示了金属抵抗各种损伤能力的大小，也是设计金属材料制件时选材和进行强度计算的主要依据。

## 第一节 强度与塑性

### 一、强度

强度是指金属材料在外力作用下抵抗塑性变形和断裂的能力。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、抗弯强度和抗剪强度等。各种强度间有一定的联系，而抗拉强度是最基本的强度判据。

金属材料受外力作用时，其内部产生了大小相等、方向相反且沿横截面均匀分布的抵抗力，称为内力；单位横截面积上的内力称为应力，用 $\sigma$ 表示。强度和塑性是通过拉伸试验测得的。

#### 1. 拉伸试验

试验前，将被测金属材料制成一定形状和尺寸的标准拉伸试样，如图1-1所示。

图中 $d_0$ 为试样原始直径(mm)， $l_0$ 为试样原始标距长度(mm)。试样分为长试样和短试样。对圆形拉伸试样，长试样 $l_0 = 10 d_0$ ；短试样 $l_0 = 5 d_0$ 。

试验时，将标准试样装夹在拉伸试验机上，缓慢地进行拉伸，使试样承受轴向拉力，直至拉断为止。试验

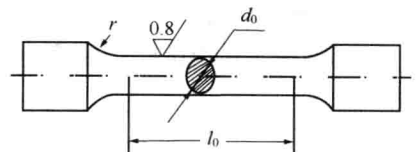


图1-1 圆柱标准拉伸试样

机自动记录装置可将整个拉伸过程中的拉伸力和伸长量描绘在以拉伸力  $F$  为纵坐标，伸长量  $\Delta l$  为横坐标的图上，即得到力 - 伸长量曲线，如图 1-2 所示。

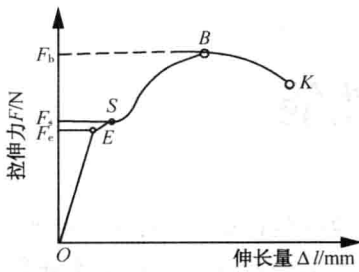


图 1-2 退火低碳钢的力 - 伸长量曲线

当拉伸力由零逐渐增加到  $F_e$  时(即曲线上  $OE$  段)，试样的伸长量与拉伸力成正比例增加，试样随拉伸力的增大而均匀伸长，此时若去除拉伸力，试样能完全恢复到原来的形状和尺寸，即试样处于弹性变形阶段。当拉伸力超过  $F_e$  后，试样除产生弹性变形外，还开始出现微量的塑性变形。塑性变形是指金属在外力作用下，发生不能恢复原状的变形，也称永久变形。当拉伸力增大到  $F_s$  时，曲线上出现水平(或锯齿形)线段，即表示拉伸力不增加，试样却继续伸长，此现象称为“屈服”。

拉伸力超过  $F_s$  后，试样产生大量的塑性变形，直到拉伸力为  $F_b$  时，试样横截面发生局部收缩，即产生“缩颈”。此后，试样的变形局限在缩颈部分，故能承受的拉伸力迅速减小，直至拉断试样(曲线  $K$  点)。

## 2. 强度的主要判据

目前，金属材料室温拉伸试验方法采用 GB/T 228—2010 新标准，但由于原有的金属材料力学性能指标是采用旧标准进行测定和标注的，所以原有旧标准 GB/T 228—1987 仍然被使用，本教材仅为叙述方便而采用旧标准，在工程实践中则必须使用新标准。关于金属材料强度与塑性的新、旧标准名词和符号对照见表 1-1。

表 1-1 金属材料强度与塑性的新、旧标准名词和符号对照

GB/T 228—2010 新标准		GB/T 228—1987 旧标准	
名 词	符 号	名 词	符 号
断面收缩率	$Z$	断面收缩率	$\psi$
断后伸长率	$A$ 和 $A_{11.3}$	断后伸长率	$\delta_5$ 和 $\delta_{10}$
屈服强度	—	屈服点	$\sigma_s$
上屈服强度	$R_{eH}$	上屈服点	$\sigma_{su}$
下屈服强度	$R_{eL}$	下屈服点	$\sigma_{sl}$
规定残余伸长强度	$R_r$ , 如 $R_{r0.2}$	规定残余伸长应力	$\sigma_r$ , 如 $\sigma_{r0.2}$
抗拉强度	$R_m$	抗拉强度	$\sigma_d$
弹性极限	$R_e$	弹性极限	$\sigma_e$

金属材料的强度是用应力来度量的。常用的强度判据有：弹性极限、屈服点和抗拉强度。

### 1) 弹性极限

弹性极限是指试样产生完全弹性变形时所能承受的最大应力，用符号  $\sigma_e$  表示，单位为 MPa。

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0}$$

式中  $F_e$  —— 试样产生完全弹性变形时的最大拉伸力，N；

$A_0$  ——试样原始横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

弹性极限  $\sigma_e$  是弹性元件(如弹簧)设计和选材的主要依据。

## 2) 屈服点(屈服强度、屈服极限)

屈服点是材料产生屈服现象时所承受的应力值, 用符号  $\sigma_s$  表示, 单位为  $\text{MPa}$ 。

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

式中  $F_s$  ——试样产生屈服时的拉伸力,  $\text{N}$ 。

有些金属材料, 如高碳钢、铸铁等, 在拉伸试验中没有明显的屈服现象。因此, GB 10623—2008 规定, 以试样去掉拉伸力后, 其标距部分的残余伸长量达到规定原始标距长度 0.2% 时受到的应力, 为该材料的条件屈服点, 用符号  $\sigma_{0.2}$  表示。

$\sigma_s$  和  $\sigma_{0.2}$  是表示材料抵抗微量塑性变形的能力。零件工作时通常不允许产生塑性变形, 因此,  $\sigma_s$  是设计和选材时的主要参数。

## 3) 抗拉强度(强度极限)

抗拉强度是指试样拉断前所能承受的最大拉应力, 用符号  $\sigma_b$  表示, 单位为  $\text{MPa}$ 。

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

式中  $F_b$  ——试样被拉断前的最大拉伸力,  $\text{N}$ 。

$\sigma_b$  表征材料对最大均匀塑性变形的抗力。 $\sigma_s$  与  $\sigma_b$  的比值称为屈强比, 屈强比越小, 零件工作时的可靠性越高, 因为若超载也不会立即断裂。但屈强比太小, 材料强度的有效利用率降低。 $\sigma_b$  也是设计和选材时的主要参数。

# 二、塑性

塑性是指金属材料在载荷作用下产生塑性变形而不破坏的能力。金属材料的塑性也是通过拉伸试验测得的。常用的塑性指标有伸长率和断面收缩率。

## 1. 伸长率

伸长率是指试样被拉断后, 标距长度的伸长量与原始标距长度比值的百分比, 用符号  $\delta$  表示。

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中  $l_0$  ——试样原始标距长度,  $\text{mm}$ ;

$l_k$  ——试样被拉断后的标距长度,  $\text{mm}$ 。

长试样和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  $\delta$ 。伸长率的大小与试样的尺寸有关, 对于同一材料, 短试样测得的伸长率大于长试样的伸长率, 即  $\delta_5 > \delta_{10}$ 。因此, 在比较不同材料的伸长率时, 应采用相同尺寸规格的标准试样。

## 2. 断面收缩率

断面收缩率是指试样被拉断后, 缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积比值的百分比, 用符号  $\psi$  表示。

$$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \times 100\%$$

式中  $A_k$  ——试样被拉断处的横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

断面收缩率不受试样尺寸的影响, 因此能较准确地反映出材料的塑性。

材料的伸长率和断面收缩率愈大，则表示材料的塑性愈好。塑性好的材料，如铜、低碳钢，适合进行轧制、锻造、冲压等压力加工工艺；塑性差的材料，如铸铁，不能进行压力加工，只能用铸造方法成形。而且用塑性较好的材料制成的机械零件，在使用中万一超载，能产生塑性变形而避免突然断裂，增加了安全可靠。因此，大多数机械零件除要求具有较高的强度外，还必须有一定的塑性。

## 第二节 硬 度

硬度是衡量材料软硬程度的指标，它表示金属材料局部体积内抵抗塑性变形或断裂的能力，是重要的力学性能指标。材料的硬度与强度之间有一定的关系，根据硬度可以大致估计材料的强度。因此，在机械设计中，零件的技术条件往往标注硬度。热处理生产中也常以硬度作为检验产品是否合格的主要依据。材料的硬度是通过硬度试验测得的。

硬度试验方法较多，生产中常用的是布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度试验法。

### 一、布氏硬度

布氏硬度的测定是在布氏硬度试验机上进行的，其试验原理如图 1-3 所示。用直径为  $D$  的淬火钢球或硬质合金球作压头，以相应的试验力  $F$  将压头压入试件表面，经过规定的保持时间后，去除试验力，在试件表面得到一直径为  $d$  的压痕。以压痕单位面积上承受的压力表示布氏硬度值，用符号 HB 表示。以淬火钢球为压头时，符号为 HBS；以硬质合金球为压头时，符号为 HBW。

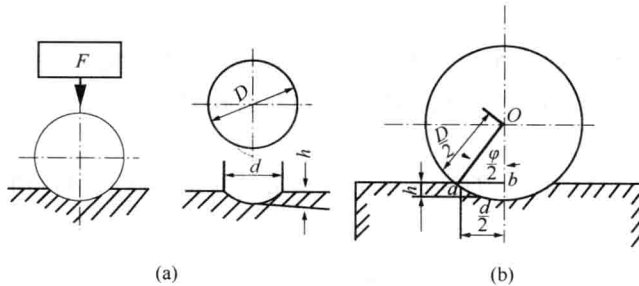


图 1-3 布氏硬度试验原理示意图

$$HBS(HBW) = \frac{F}{A_{\text{压}}} = \frac{F}{\pi D h} = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \text{kgf/mm}^2 \quad (\text{试验力 } F \text{ 的单位为 kgf})$$

$$HBS(HBW) = 0.102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \text{kgf/mm}^2 \quad (\text{试验力 } F \text{ 的单位为 N})$$

式中  $A_{\text{压}}$ ——压痕表面积， $\text{mm}^2$ ；

$D, D, h$ ——压痕平均直径、压头直径、压痕深度， $\text{mm}$ 。

上式中只有  $d$  是变数，只要测出  $d$  值，即可通过计算或查表得到相应的布氏硬度值。

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、试验力和试验力保持时间。通常，压头直径有五种（10mm、5mm、2.5mm、2mm 和 1 mm）； $F/D^2$  的比值有七种（30、15、10、5、2.5、1.25、1），可根据金属材料种类和布氏硬度范围选择  $F/D^2$  值，见表 1-2。

表 1-2 布氏硬度试验规范

金属种类	布氏硬度范围 /HBS(HBW)	试样厚度/mm	$0.102F/D^2$	钢球的直径/mm	试验力 $F$ /kN(kgf)	试验力保持时间/s
黑色金属	140 ~ 450	6 ~ 3	30	10.0	29.42(3000)	12
		4 ~ 2		5.0	7.355(750)	
		< 2		2.5	1.839(187.5)	
非铁金属	> 130	> 6	30	10.0	9.807(1000)	30
		6 ~ 3		5.0	2.452(250)	
		< 2		2.5	1.839(187.5)	
非铁金属	36 ~ 130	9 ~ 3	10	10.0	9.807(1000)	30
		6 ~ 3		5.0	2.452(250)	
	8 ~ 35	> 6	2.5	10.0	2.452(250)	60

试验力保持时间：钢铁材料为 10 ~ 15s，有色金属为 30s，布氏硬度值小于 35 时为 60s。

实验时布氏硬度不需计算，只需根据测出的压痕直径  $d$  查表即可得到硬度值。 $d$  值越大，硬度值越小； $d$  值越小，硬度值越大。布氏硬度一般不标注单位，其表示方法为：在符号 HBS 或 HBW 前写出硬度值，符号后面依次用相应数字注明压头直径、试验力和保持时间（10 ~ 15s 不标注）。例如，120HBS10/1000/30 表示用直径 10mm 的淬火钢球作压头，在 1000 kgf(9.807kN) 试验力作用下，保持 30s 所测得的布氏硬度值为 120。

布氏硬度试验法压痕面积较大，能反映出较大范围内材料的平均硬度，测量结果较准确、稳定，但操作不够简便，又因压痕大，故不宜测试薄件和成品件。HBS 适于测量硬度值小于 450 的材料；HBW 适于测量硬度值小于 650 的材料。

## 二、洛氏硬度

洛氏硬度试验原理如图 1-4 所示。它是用顶角为  $120^\circ$  金刚石圆锥体或直径为 1.588mm 淬火钢球作压头，在初试验力和总试验力（初试验力 + 主试验力）先后作用下，将压头压入试件表面，保持规定时间后，去除主试验力，用测量的残余压痕深度增量（增量是指去除主试验力并保持初试验力的条件下，在测量的深度方向上产生的塑性变形量）来计算硬度的一种硬度试验法。

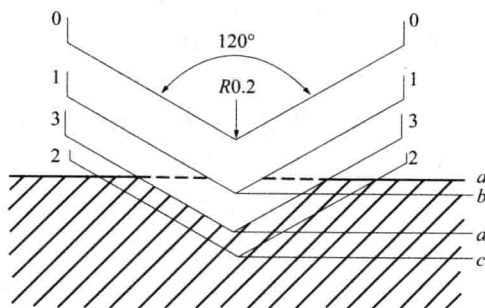


图 1-4 洛氏硬度试验原理示意图

图中 0-0 为压头与试件表面未接触的位置；1-1 为加初试验力 10kgf(98.07N)后，压头经试件表面压入到  $b$  处的位置， $b$  处是测量压入深度的起点；2-2 为初试验力和主试验力共同作用下，压头压入到  $c$  处的位置；3-3 为在卸除主试验力，但保持初试验力的条件下，因试件弹性变形的恢复使压头回升到  $d$  处的位置。因此，压头在主试验力作用下，实际压入试件产生塑性变形的压痕深度为  $bd$  ( $bd$  为残余压痕深度增量)。用  $bd$  大小来判断材料的硬度， $bd$  越大，硬度越低；反之，硬度越高。为适应习惯上数值越大，硬度越高的概念，故用一常数  $K$  减去  $bd/0.002$  作为硬度值(每 0.002mm 的压痕深度为一个洛氏硬度单位)，直接由硬度计表盘上读出。洛氏硬度用符号 HR 表示。

$$HR = K - \frac{bd}{0.002}$$

金刚石作压头， $K$  为 100；淬火钢球作压头， $K$  为 130。

为使同一硬度计能测试不同硬度范围的材料，可采用不同的压头和试验力。按压头和试验力不同，洛氏硬度的标尺有多种，但常用的是 HRA、HRB、HRC 三种，其中 HRC 应用最广。洛氏硬度表示方法为：在符号前面写出硬度值，如 62HRC、85HRA 等。洛氏硬度的试验条件和应用范围见表 1-3。

洛氏硬度试验操作简便迅速，可直接从硬度计表盘上读出硬度值；压痕小，可直接测量成品或较薄工件的硬度。但由于压痕较小，测得的数据不够准确，通常应在试样不同部位测定三点取其算术平均值作为硬度值。

表 1-3 洛氏硬度试验条件和应用范围

标尺符号	所用压头	总载荷/N	测量范围 HR	应用举例
HRA	120°金钢石圆锥	588.4	60~88	碳化物、硬质合金、淬火工具钢、浅层表面硬化钢等
HRB	φ1.588mm 淬火钢球	980.7	25~100	软钢、铜合金、铝合金、可锻铸铁
HRC	120°金钢石圆锥	1471.1	20~70	淬火钢、调质钢、深层表面硬化钢

注：HRA、HRC 所用刻度为 100，HRB 为 130。

### 三、维氏硬度

维氏硬度试验原理基本上与布氏硬度相同，也是根据压痕单位表面积上的载荷大小来计算硬度值。所不同的是采用相对面夹角为 136°的正四棱锥体金刚石作压头，见图 1-5。

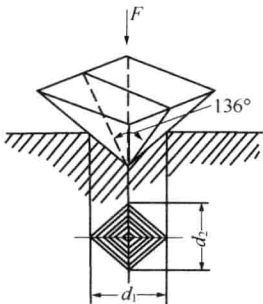


图 1-5 维氏硬度试验原理示意图

试验时，用选定的载荷  $F$  将压头压入试样表面，保持规定时间后卸除载荷，在试样表面压出一个四方锥形压痕，测量压痕两对角线长度，求其算术平均值，用以计算出压痕表面积，以压痕单位面积上所承受的载荷大小表示维氏硬度值，用符号 HV 表示。

维氏硬度试验法所用试验力小，压痕深度浅，轮廓清晰，数字准确可靠，广泛用于测量金属镀层、薄片材料和化学热处理后的表面硬度。又因其试验力可在很大范围内选择(49.03 ~ 980.7N)，所以可测量从很软到很硬的材料。但维氏硬度试验不如洛氏硬度试验简便、迅速，不适于成批生产的常规试验。

### 第三节 韧性与疲劳强度

#### 一、韧性

强度、塑性、硬度都是在缓慢加载即静载荷下的力学性能指标。实际上，许多机械零件常在冲击载荷作用下工作，例如锻锤的锤杆、冲床的冲头等。对这类零件，不仅要满足在静力作用下的强度、塑性、硬度等性能判据，还应具有足够的韧性。

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。材料的冲击韧性值通常采用摆锤式一次冲击试验进行测定。

按 GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》规定，将被测材料制成标准冲击试样，如图 1-6 所示。

试验时，将试样缺口背向摆锤冲击方向放在试验机支座上[见图 1-7(a)]，摆锤举至  $h_1$  高度，具有位能  $mgh_1$ ，然后使摆锤自由落下，冲断试样后，摆锤升至高度  $h_2$ [见图 1-7(b)]，此时摆锤的位能为  $mgh_2$ 。摆锤冲断试样所消耗的能量，即试样在冲击力一次作用下折断时所吸收的功，称为冲击吸收功，用符号  $A_K$  表示(U 型缺口试样用  $A_{KU}$ 、V 型缺口试样用  $A_{KV}$ )，单位为 J。

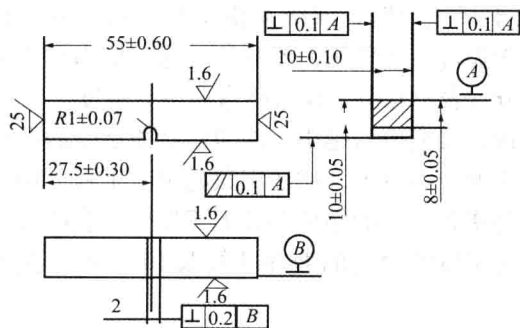


图 1-6 夏比 U 型缺口试样

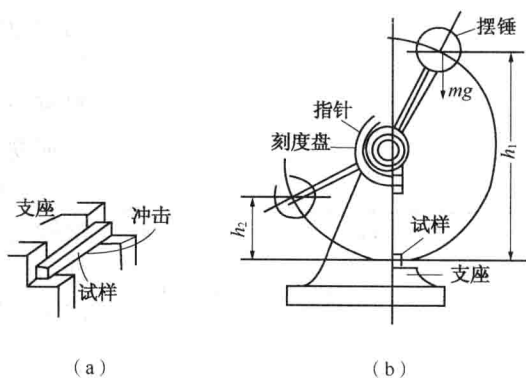


图 1-7 摆锤式冲击试验原理示意图

$$A_K = mgh_1 - mgh_2 = mg(h_1 - h_2)$$

$A_K$  值不需计算，可由冲击试验机刻度盘上直接读出。冲击试样缺口底部单位横截面积上的冲击吸收功，称为冲击韧性，用符号  $\alpha_K$  表示，单位为  $J/cm^2$ 。

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

式中  $A$ ——试样缺口底部横截面积， $cm^2$ 。

冲击吸收功越大，材料韧性越好。

上述实验是在室温 ( $10 \sim 35^\circ C$ ) 下进行的。如果在较低的温度下，材料可能脆断，这种现象称为冷脆现象。为了研究因温度变化材料由塑性状态向脆性变化的规律，可在不同温度测定韧性值。图 1-8 即为某种材料的冲击韧性与

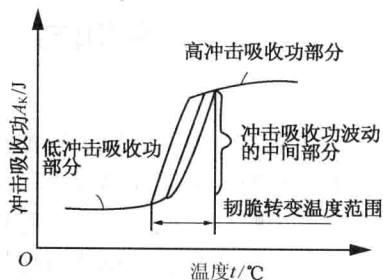


图 1-8 温度对冲击吸收功的影响

温度的关系曲线。显而易见，冲击吸收功  $A_k$  值随温度降低而减小，在不同温度的冲击试验中，冲击吸收功急剧变化或断口韧性急剧转变的温度区域，称为韧脆转变温度。韧脆转变温度越低，材料的低温抗冲击性能越好。这对于寒冷地区和低温下工作的机械结构尤为重要。

冲击吸收功大小还与试样形状、尺寸、表面粗糙度、内部组织和缺陷等有关。因此，冲击吸收功一般作为选材的参考，而不能直接用于强度计算。

应当指出，冲击试验时，冲击吸收功中只有一部分消耗在断开试样缺口的截面上，冲击吸收功的其余部分则消耗在冲断试样前缺口附近体积内的塑性变形上。因此，冲击韧度不能真正代表材料的韧性，而用冲击吸收功  $A_k$  作为材料韧性的判据更为适宜。国家标准现已规定采用  $A_k$  作为韧性判据。

## 二、疲劳强度

许多机械零件(如齿轮、弹簧、连杆、主轴等)都是在循环应力(即应力的大小、方向随时间作周期性变化)作用下工作。按循环应力大小和方向不同，零件承受的应力分为交变应力和重复应力两种。零件在循环应力作用下，在一处或几处产生局部永久性累积损伤，经一定循环次数后产生裂纹或突然发生完全断裂的过程，称为疲劳(疲劳断裂)。疲劳断裂前无明显塑性变形，因此危险性很大，常造成严重事故。据统计，大部分零件的损坏均是由疲劳造成的。

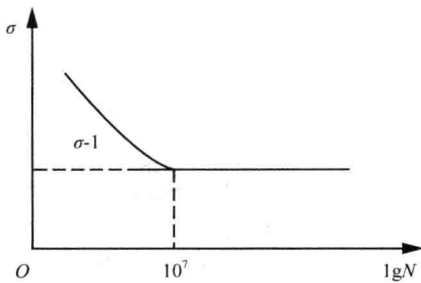


图 1-9 钢铁材料的疲劳曲线

实验证明，金属材料能承受的交变应力  $\sigma$  与断裂前应力循环基数  $N$  之间的关系如图 1-9 所示。由图可知，当  $\sigma$  低于某一值时，曲线与横坐标平行，表示材料可经无数次循环应力作用而不断裂，这一应力称为疲劳强度，用  $\sigma_{-1}$  表示光滑试样对称弯曲疲劳强度。

一般来说，交变应力越小，断裂前所能承受的循环次数越多；交变应力越大，循环次数越少。工程上用的疲劳强度，是指在一定的循环基数下不发生断裂的最大应力，通常规定钢铁材料的循环基数取  $10^7$ ，有色金属

取  $10^8$ 。

疲劳的原因是很复杂的，材料存在气孔、微裂纹、夹杂物等缺陷，材料表面划痕、局部应力集中等因素，均可加快疲劳断裂。为提高零件的疲劳强度，除了在设计时应考虑结构形状，避免应力集中外，还可通过提高零件表面质量(如减小表面粗糙度值)和进行表面淬火、喷丸处理、表面滚压等使表面产生残余压应力等提高材料的疲劳强度。

## 第四节 金属的蠕变极限与持久强度

在锅炉、燃气轮机、炼油化工设备及航空、汽车发动机中，有许多零件是长期在高温条件下工作的。金属在高温下工作时，虽然所受应力小于  $\sigma_s$  但也会逐渐产生塑性变形，这种变形称为蠕变。蠕变会导致零件形状尺寸变化，甚至破裂造成事故。

为保证在高温长期载荷作用下的机件不致产生过量变形和断裂而破坏，要求金属材料具有一定的蠕变极限和持久强度。蠕变极限是材料经受高温长期载荷作用下塑性变形抗力的指标。