

JIXIE ZHIZAO JICHU



21世纪高职高专规划教材  
高等职业教育规划教材编委会专家审定

# 机械制造基础

主编 任海东 程 琴  
主审 唐昌松



北京邮电大学出版社  
www.buptpress.com



21世纪高职高专规划教材

高等职业教育规划教材编委会专家审定

# 机械制造基础

主编 任海东 程琴  
主审 唐昌松



北京邮电大学出版社

www.buptpress.com

## 内 容 简 介

本书是作者在从事多年高职教学实践的基础上根据最新国家标准编写而成的。本书共分为十一个学习情境：金属材料的力学性能、金属的晶体结构与结晶、铁碳合金和铁碳相图、钢的热处理、工业用钢、铸铁、铸造成形、锻压成形、焊接成形、机械零件材料与成形工艺的选择、金属的切削加工。

本书可作为高职高专院校机械制造及自动化、机电一体化及数控技术等专业通用教材，也可供相关专业学生、自学者和工作技术人员参考。

基 础 课 本

### 图书在版编目(CIP)数据

机械制造基础 / 任海东, 程琴主编. --北京: 北京邮电大学出版社, 2015. 6

ISBN 978-7-5635-4364-9

I. ①机… II. ①任…②程… III. ①机械制造—高等职业教育—教材 IV. ①TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 108028 号

---

书 名: 机械制造基础

责任著作者: 任海东 程 琴 主 编

责任 编辑: 刘 颖

出版 发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编: 100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 15.5

字 数: 401 千字

版 次: 2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-5635-4364-9

定价: 32.00 元

· 如有印装质量问题, 请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

# 前 言

机械制造基础是一门有关机械零件用材及其制造方法的综合性技术基础课。它系统地介绍了金属材料的性能、应用及改进材料性能的工艺方法,金属材料各种成形工艺方法及其在机械制造中的应用和相互联系,机械零件的切削加工等方面的基础知识。

我国古代在材料生产及其成形加工工艺技术方面,有着辉煌的成就。从原始社会后期我国就开始有陶器,早在仰韶文化和龙山文化时期,制陶技术已经很成熟。我国的青铜冶炼始于夏代,到了距今3 000多年前的殷商、西周时期,技术水平已相当先进,用青铜制造的工具、食具、兵器、车饰、马饰等,得到普遍应用。在河南安阳地区发掘出来的商代青铜大方鼎,高133 cm,长110 cm,宽78 cm,重达875 kg。在大鼎的里面铸有“后母戊”三个字,在大鼎的四周,有蟠龙等组成的精致花纹。铸造这样大型的青铜器物,需要有很大的铸造场所,要求各个工种协同操作、密切配合,这充分反映出我国古代青铜冶炼和铸造成形的高超技艺。

春秋战国时期,我国开始大量使用铁器,白口铸铁、麻口铸铁、可锻铸铁相继出现。1953年从河北兴隆地区发掘出来的战国铁器中,就有浇铸农具用的铁模子,说明当时已掌握了铁模铸造技术。随后出现了炼钢、锻造、钎焊和退火、淬火、正火、渗碳等热处理技术。一直到明朝,在这之前的2 000多年间,我国钢铁生产的产量及金属材料成形工艺技术一直在世界上遥遥领先。

上述事实生动地说明了中华民族在材料及其加工方面对世界文明和人类进步做出的卓越贡献。但是到了18世纪以后,封建统治者长期采取闭关自守的政策,严重地束缚了我国生产力的发展,使我国科学技术处于停滞落后状态。18世纪20年代初先后在欧美发生的产业革命极大地促进了钢铁工业、煤化学工业和石油化学工业的快速发展,各类新材料不断涌现。材料对科学技术的发展起着关键性作用,航空工业的发展充分说明了这一点。1903年世界上第一架飞机所用的主要结构材料是木材和帆布,飞行速度仅16 km/h;1911年硬铝合金研制成功,金属结构取代木布结构,使飞机性能和速度获得飞跃;喷气式飞机的超音速飞行,高温合金材料制造的涡轮发动机起到了重要作用,因为当飞机速度为2~3倍音速时,飞机表面温度会升到300℃,飞机材料只能采用不锈钢或钛合金;至于航天飞机,机体表面温度会高达1 000℃以上,只能采用高温合金材料及防氧化涂层;目前,玻璃纤维增强塑料、碳纤维高温陶瓷复合材料、陶瓷纤维增强塑料等复合材料在飞机、航天飞行器上已获得广泛应用。

近 200 多年来,在不断变化的市场需求驱动下,制造业的生产规模沿着“小批量、少品种大批量、多品种变批量”的方向发展;在科技高速发展的推动下,制造业的资源配置沿着“劳动密集、设备密集、信息密集、知识密集”的方向发展,与之相适应,制造技术的生产方式沿着“手工→机械化→单机自动化→刚性流水自动化→柔性自动化→智能自动化”的方向发展。

制造技术也发生了巨大的变化,18 世纪后半叶以蒸汽机的发明为特征的工业革命,标志着制造业已完成从手工业作坊式生产到以机械加工和分工原则为中心的工厂生产的艰难转变。19 世纪电气技术的发展,开辟了崭新的电气化新时代,制造业也得到飞速发展,制造技术实现了批量生产、工业化规范生产的新局面。20 世纪初内燃机的发明,引发了制造业的革命,流水生产线和泰勒工作制得到广泛的应用。两次世界大战特别是第二次世界大战期间,以降低成本为中心的刚性和大批量制造技术以及生产管理有了很大的发展。第二次世界大战后的 50 年,计算机技术、微电子技术、信息技术和自动化技术有了迅速发展,并在制造业中得到愈来愈广泛的应用,推动了制造技术向高质量和柔性化生产方向发展,先后出现了数控(NC)、柔性制造单元(FMC)、柔性制造系统(FMS)、计算机辅助设计/制造(CAD/CAM)、计算机集成制造(CIM)、准时化生产(JIT)、精益生产(LP)和敏捷制造(AM)等多项先进制造技术与制造模式,使制造业正经历着一场新的技术革命。

学习本课程的目的和任务是:让学生了解常用金属材料的性能、材料成形技术和零件切削加工的基础知识,为学习其他有关课程和今后从事机械设计与制造方面的工作奠定必要的工艺基础。

学生在学完本课程后,应达到以下基本要求:

- (1) 掌握常用机械金属材料的种类、性能及其热处理方法,初步具有正确使用金属材料的能力;
- (2) 掌握主要毛坯成形方法的基本原理和工艺特点,具有选择毛坯及工艺分析的初步能力;
- (3) 了解金属切削的基础知识、金属切削机床的基本知识;
- (4) 了解有关的新工艺、新技术及其发展趋势。

本书是根据教育部制订的高职高专“工程材料与成形工艺基础课程教学基本要求”,结合高职高专教学改革的实践经验,以适应培养高等技术应用型人才的要求编写的,是高职高专机械类专业的通用教材。

本书共分为十一个学习情境:金属材料的力学性能、金属的晶体结构与结晶、铁碳合金、钢的热处理、工业用钢、铸铁、铸造成形、锻压成形、焊接成形、机械零件材料与成形工艺的选择、金属切削加工的基础知识。每个学习情境均安排了思考题或练习题。

本书立足于 21 世纪对高等技术应用型人才在制造技术文化方面的要求,在

编写过程中力求体现以下特点:

(1) 重视综合性、应用性和实践性,以培养生产第一线需要的高等技术应用型人才为目标,着重培养学生的应用能力。

(2) 建立工程材料和材料成形工艺与现代机械制造过程的完整概念。

(3) 将材料与加工工艺有机地糅合,帮助学生建立材料和工艺之间的联系,以便正确地使用材料。

(4) 在本书内容的组织上坚持“理论够用、适度”的原则,对纯理论性内容进行了删减,增加了与机械工程应用密切相关的内容,更加注重知识的应用。

(5) 全面贯彻最新国家标准。

(6) 为培养学生的基本素质,适当引入技术经济分析和质量管理的概念,贯彻环境保护和可持续发展的观点。

本书由任海东、程琴主编。其中,任海东编写学习情境一至学习情境六,学习情境十至学习情境十一;程琴编写学习情境七至学习情境九。全书由任海东统稿。

本书在编写过程中参阅了国内外出版的有关教材和资料,在此对相关作者表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和不足,敬请广大读者批评指正。

作 者

# 目 录

学习情境一 金属材料的力学性能	1
单元一 强度和塑性	1
单元二 硬度	4
单元三 冲击韧性	7
单元四 疲劳强度	8
思考与练习	10
学习情境二 金属的晶格结构与结晶	11
单元一 金属的晶体结构	11
单元二 金属的结晶	15
单元三 合金的晶体结构与结晶	17
思考与练习	19
学习情境三 铁碳合金和铁碳相图	20
单元一 铁碳合金基本组织	20
单元二 铁碳合金相图	22
思考与练习	30
学习情境四 钢的热处理	31
单元一 钢的热处理原理	32
单元二 钢的普通热处理	37
单元三 钢的表面热处理和化学热处理	42
单元四 热处理工艺的应用	45
思考与练习	48
学习情境五 工业用钢	50
单元一 非合金钢	50
单元二 合金钢	56
思考与练习	76
学习情境六 铸铁	78
单元一 铸铁的石墨化	78
单元二 常用铸铁	80

单元三 合金铸铁 .....	85
思考与练习 .....	86
<b>学习情境七 铸造成形 .....</b>	<b>87</b>
单元一 合金的铸造性能 .....	87
单元二 砂型铸造 .....	90
单元三 铸造成形工艺设计 .....	96
单元四 铸件的结构工艺性 .....	103
单元五 特种铸造 .....	105
思考与练习 .....	110
<b>学习情境八 锻压成形 .....</b>	<b>111</b>
单元一 锻压成形工艺基础 .....	112
单元二 自由锻 .....	116
单元三 模锻 .....	124
单元四 板料冲压 .....	128
单元五 挤压、轧制、拉拔 .....	133
思考与练习 .....	137
<b>学习情境九 焊接成形 .....</b>	<b>138</b>
单元一 焊接工艺基础 .....	138
单元二 常用焊接方法 .....	141
单元三 常用金属材料的焊接 .....	155
单元四 焊接结构工艺 .....	159
单元五 焊接应力和变形 .....	162
单元六 常见焊接缺陷 .....	166
单元七 焊接检验 .....	171
思考与练习 .....	174
<b>学习情境十 机械零件材料与成形工艺的选择 .....</b>	<b>175</b>
单元一 机械零件材料及成形工艺的选择原则 .....	175
单元二 典型零件的选材实例分析 .....	181
思考与练习 .....	190
<b>学习情境十一 金属的切削加工 .....</b>	<b>191</b>
单元一 金属切削机床的类型和结构 .....	191
单元二 切削运动与切削要素 .....	197
单元三 金属切削刀具 .....	199
单元四 金属切削过程 .....	204
单元五 切削加工技术经济 .....	209



单元六 车削的工艺特点及其应用	216
单元七 钻削、镗削的工艺特点及其应用	218
单元八 刨削、拉削的工艺特点及其应用	223
单元九 铣削的工艺特点及其应用	226
单元十 磨削的工艺特点及其应用	228
单元十一 数控机床加工和特种加工简介	234
思考与练习	235
参考文献	236

• 掌握 HW、HRC 硬度表示方法及应用。

• 理解 淬硬层的力学特性的含义, 强度、塑性、硬度、冲击韧度与疲劳强度的概念。

### 能力目标

• 能用强度、塑性、硬度的概念分析金属材料力学性能。

• 能识读 HW、HRC 硬度金属材料硬度及标识。

### 学习导航

金属材料是工业生产中最重要原材料, 广泛应用于机械制造、交通运输、国防工业、石油化工和日常生活各个领域。生产实践中, 由于选材不当往往会造成机械达不到使用要求或过早失效, 因此, 了解熟悉金属材料性能成为合理选材、充分发挥金属材料内在性能潜力的重要依据。

金属材料的其他包括使用性能和工艺性能。使用性能是指材料在使用行程中表现出来的性能, 它包括力学性能、物理性能和化学性能等; 工艺性能是指材料对各种加工工艺适应的能力, 它包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能和热处理工艺性等。

机械制造业选材用料时, 大多以力学性能为主要依据, 因此必须首先了解金属材料力学性能。所谓金属的力学性能, 是指金属材料受到各种载荷(外力)作用时, 所表现出来的抵抗能力。力学性能主要包括: 强度、塑性、硬度、韧性、疲劳极限等。

## 单元一 强度和塑性

材料在加工及使用过程中所受的力称为载荷, 根据作用性质不同, 载荷可分为静载荷、冲击载荷和疲劳载荷。

• 静载荷: 大小和方向不随时间而变化的载荷, 例如车床刀杆对工件施加的力。

• 冲击载荷: 例如重锤或落物的载荷, 例如空车掉入坑里对坑底零件的冲击。

• 疲劳载荷: 例如交变载荷和动载荷, 例如机床主轴其是在交变载荷下工作的。根据作用力的性质, 载荷可分为: 静载荷、冲击载荷、交变载荷, 例如工件受到静载荷, 如图 1-1 所示。

# 学习情境一 金属材料的力学性能

## 知识目标

- 掌握: HBW、HRC 硬度表示方法及应用。
- 理解: 金属材料的力学特性的含义; 强度、塑性、硬度、冲击韧度与疲劳强度的概念。

## 能力目标

- 能用强度、塑性、硬度的概念分析金属材料的力学性能。
- 能用 HBW、HRC 表示金属材料的硬度指标。

## 学习导航

金属材料是工业生产中最重要材料,广泛应用于机械制造、交通运输、国防工业、石油化工和日常生活各个领域。生产实践中,由于选材不当往往会造成机械达不到使用要求或过早失效。因此,了解和熟悉金属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重要依据。

金属材料的性能包括使用性能和工艺性能。使用性能是指材料在使用过程中表现出来的性能,它包括力学性能、物理性能和化学性能等;工艺性能是指材料对各种加工工艺适应的能力,它包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能和热处理工艺性能等。

在机械制造领域选用材料时,大多以力学性能为主要依据。因此必须首先了解金属材料的力学性能。所谓金属的力学性能,是指金属材料受到各种载荷(外力)作用时,所表现出的抵抗能力。力学性能主要包括:强度、塑性、硬度、韧性、疲劳极限等。

## 单元一 强度和塑性

材料在加工及使用过程中所受的外力称为载荷。根据作用性质不同,载荷可分为静载荷、冲击载荷和疲劳载荷三种。

- (1) 静载荷。大小不变或变动很慢的载荷,例如床头箱对机床床身的压力。
- (2) 冲击载荷。突然增加或消失的载荷,例如空气锤锤头下落时锤杆所承受的载荷。
- (3) 疲劳(交变)载荷。周期性的动载荷,例如机床主轴就是在变载荷作用下工作的。根据作用方式不同,载荷可分为拉伸载荷、压缩载荷、弯曲载荷、剪切载荷和扭转载荷等,如图 1-1 所示。

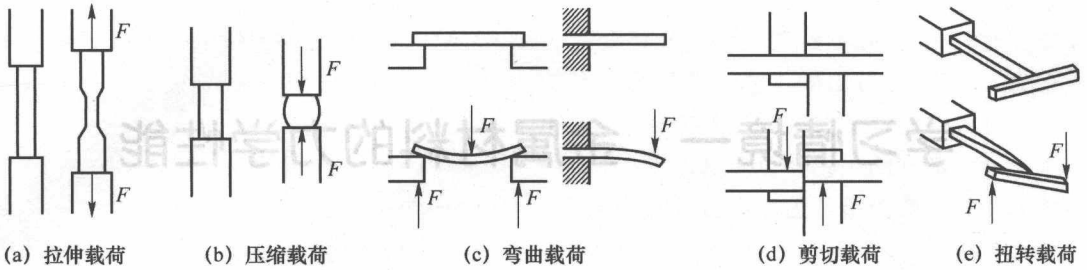


图 1-1 载荷的作用形式

## 一、强度

金属材料在载荷作用下,抵抗塑性变形或断裂的能力称为强度。强度愈高的材料,所承受的载荷愈大。

按照载荷作用方式不同,强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗扭强度和抗剪强度等。一般情况下,工程上多以抗拉强度作为判别金属强度高低的指标。

抗拉强度由拉伸试验来测定。静载荷拉伸试验是工业上最常用的力学试验方法之一。试验时,先将被测材料制成标准试样,如图 1-2 所示。试样的直径为  $d_0$ ,标距长度为  $l_0$ 。根据标距长度与直径之间的关系,试样分为长试样( $l_0=10$ )和短试样( $l_0=5d_0$ )两种。按照标准规定,把标准试样装夹在试验机上,然后对试样逐渐施加拉伸载荷的同时连续测量力和相应的伸长,直至把试样拉断为止,便得到拉伸曲线,依据拉伸曲线可求出相关的力学性能。

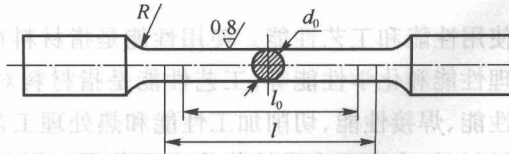


图 1-2 低碳钢的拉伸试样

### 1. 低碳钢的拉伸曲线

材料的性质不同,拉伸曲线形状也不尽相同。图 1-3 为退火低碳钢的拉伸曲线,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  $mm$ 。下面以退火低碳钢拉伸曲线为例说明拉伸过程中几个变形阶段。

(1) OE—弹性变形阶段。试样的伸长量与载荷成正比增加,此时若卸载,试样能完全恢复原来的形状和尺寸。这种随载荷消失而消失的变形叫弹性变形。

(2) ES—屈服阶段。当载荷超过  $F_{eL}$ 时,曲线上出现平台,即载荷不增加,试样继续伸长,材料丧失了抵抗变形的能力,这种现象称为屈服; $F_{eL}$ 为试样发生屈服时的最低载荷,称为下屈服载荷。若屈服时卸载,试样的伸长只能部分恢复,而保留一部分残留变形,这种不能随载荷去除而消失的变形称为塑性变形。

(3) SB—强化阶段。载荷大于  $F_{eL}$ 后,试样再继续伸长则必须增加拉伸力。随着继续变形增大,变形抗力也逐渐增大,这种现象称为形变强化(或称加工硬化)。 $F_m$ 为试样在拉伸试验中所能抵抗的最大载荷。

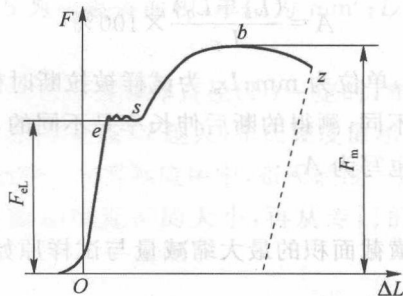


图 1-3 低碳钢的拉伸曲线

(4) 缩颈阶段。载荷达到最大值  $F_m$  后,继续拉伸,试样会在某一直径处发生局部收缩,称为“颈缩”,此处截面缩小,所需外力也随之逐渐降低,这时伸长主要集中于缩颈部位,直至断裂。

## 2. 强度指标

金属材料的强度是用应力来度量的,即材料受载荷作用后内部产生一个与载荷相平衡的内力,单位面积上的内力称为应力,用  $\sigma$  表示。常用的强度指标有屈服强度和抗拉强度。

### (1) 屈服强度

材料产生屈服时的应力极限值称为屈服强度,单位为 MPa。屈服强度分为上屈服强度,以  $R_{eH}$  表示,下屈服强度,以  $R_{eL}$  表示。由于下屈服强度的数值较为稳定,因此以它作为材料强度的指标,用符号  $R_{eL}$  表示金属材料的屈服强度。

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} \quad (1-1)$$

式中,  $F_{eL}$  为屈服时的最小载荷,单位为 N;  $S_0$  为试样原始截面积,单位为  $\text{mm}^2$ 。

对于无明显屈服现象的金属材料(如铸铁、高碳钢等)测定  $R_{eL}(\sigma_s)$  很困难,通常规定产生 0.2% 塑性变形时的应力作为条件屈服强度,用  $R_{p0.2}(\sigma_{0.2})$  表示,称为规定塑性延伸强度。

屈服强度表征金属发生明显塑性变形的抗力,机械零件在工作时如受力过大,会因过量变形而失效。当机械零件在工作时所受的应力,低于材料的屈服强度,则不会产生过量的塑性。材料的屈服强度越高,允许的工作应力也越高。因此它是机械设计的主要依据,也是评定金属材料优劣的重要指标。

### (2) 抗拉强度

材料在拉断前所承受的最大应力,以  $R_m(\sigma_b)$  表示,单位为 MPa。

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (1-2)$$

式中,  $F_m$  为试样断裂前所承受的最大载荷,单位为 N。抗拉强度表示材料抵抗均匀塑性变形的最大能力,也是设计机械零件和选材的主要依据。

## 二、塑性

金属材料在载荷作用下产生塑性变形而不断裂的能力称为塑性,塑性指标也是通过拉伸试验测定的。常用塑性指标是断后伸长率和断面收缩率。

### (1) 断后伸长率 $A(\delta)$

拉伸试样拉断后,标距的相对伸长与原始标距的百分比称为断后伸长率,即

$$A = \frac{(L_u - L_0)}{L_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中,  $L_0$  为试样原始标距长度, 单位为 mm;  $L_u$  为试样被拉断时标距长度, 单位为 mm。

必须注意, 被测试样长度不同, 测得的断后伸长率是不同的, 长、短试样断后伸长率分别用符号  $A_{10}$  和  $A_5$  表示, 通常  $A_{10}$  也写为  $A$ 。

## (2) 断面收缩率 $Z(\psi)$

拉伸试样拉断后, 缩颈处横截面积的最大缩减量与试样原始截面积的百分比称为断面收缩率, 即

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中,  $S_0$  为试样原始截面积, 单位为  $\text{mm}^2$ ;  $S_u$  为试样被拉断时缩颈处的最小横截面积, 单位为  $\text{mm}^2$ 。

断面收缩率不受试样尺寸的影响, 因此能更可靠地反映材料的塑性大小。断后伸长率和断面收缩率数值愈大, 表明材料的塑性愈好, 良好的塑性对机械零件的加工和使用都具有重要意义。例如, 塑性良好的材料易于进行压力加工(轧制、冲压、锻造等); 如果过载, 由于产生塑性变形而不致突然断裂, 可以避免事故发生。

除常温试验之外, 还有金属材料高温拉伸试验方法和低温拉伸试验方法供选用。

# 单元二 硬 度

材料抵抗局部变形和局部破坏的能力称为硬度。

硬度是各种零件和工具必须具备的性能指标。机械制造中所用的刀具、量具、磨具等, 都应具备足够的硬度, 才能保证使用性能和寿命。有些机械零件如齿轮等, 也要求有一定的硬度, 以保证足够的耐磨性和使用寿命。

硬度试验方法很多, 大体上可分为压入法、刻画法和弹性回跳法三大类, 金属材料质量检验主要用压入法进行硬度试验。压入法硬度值是表征材料表面局部体积内抵抗另一物体压入时变形的能力, 它可间接反映出材料强度、疲劳强度等性能特点, 试验操作简单, 可直接在零件或工具上进行而不破坏工件。目前应用最为广泛的是布氏硬度试验、洛氏硬度试验和维氏硬度试验。

## 一、布氏硬度

### 1. 试验原理

图 1-4 为布氏硬度试验原理图。它是用一定直径硬质合金钢做压头以相应试验力压入被测材料表面, 经规定保持时间后卸载, 以压痕单位面积上所受试验力的大小来确定被测材料的硬度值, 用符号 HBW 表示。

$$\text{HBW} = \frac{F}{S} = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-5)$$

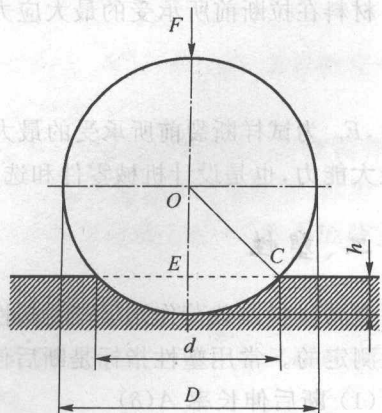


图 1-4 布氏硬度试验原理示意图

式中,  $F$  为试验力, 单位为  $N$ ;  $S$  为压痕表面积, 单位为  $mm^2$ ;  $D$  为球体直径, 单位为  $mm$ ;  $d$  为压痕平均值, 单位为  $mm$ 。

从上式可看出, 当外载荷 ( $F$ )、压头球体直径 ( $D$ ) 一定时, 布氏硬度值仅与压痕直径 ( $d$ ) 有关。  $d$  越小, 布氏硬度值越大, 硬度愈高;  $d$  越大, 布氏硬度值越小, 硬度越低。

通常布氏硬度值不标出单位。在实际应用中, 布氏硬度一般不用计算, 而是用专用的刻度放大镜量出压痕直径 ( $d$ ), 根据压痕直径的大小, 再从专门的硬度表中查出相应的布氏硬度值。

### 2. 布氏硬度实验规范

由于材料有软有硬, 工件有厚有薄, 有大有小, 如果只采用一种标准的载荷  $F$  和钢球直径  $D$ , 就会出现对硬材料合适, 对软材料则出现钢球陷入材料内部等现象; 对厚材料合适, 而对薄材料可能发生压透的现象。因此在生产中进行布氏硬度试验时, 要求使用大小不同的载荷  $F$  和钢球直径  $D$ 。

国家标准规定布氏硬度实验时,  $F/D_2$  的比值为 30、10 和 2.5 三种, 根据金属材料种类、试样硬度范围和厚度的不同, 按照表 1-1 的布氏硬度实验规范选择钢球直径  $D$ 、载荷  $F$  和载荷  $F$  的保持时间。

表 1-1 布氏硬度实验规范

材料种类	布氏硬度使用范围	球直径 $D/mm$	$0.102 \frac{F}{D^2}$	试验力 $F/N$	试验力保持时间/s	备注
钢、铸铁	$\geq 140$	10		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
		5	30	7 355		
		2.5		1 839		
	$< 140$	10		9 807	10~15	
		5	10	2 452		
		2.5		613		
非铁金属材料	$\geq 130$	10		29 420	30	两压痕中心距离不应小于压痕平均直径的 4 倍
		5	30	7 355		
		2.5		1 839		
	35~130	10		9 807	30	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的变形痕迹
		5	10	2 452		
		2.5		613		
	$< 35$	10		2 452	60	
		5	2.5	613		
		2.5		153		

### 3. 布氏硬度标注方法

淬火钢球作压头测得的硬度值用符号 HBS 表示, 2003 年新国标 GB/T 231.1—2002 规定取消了钢球压头, 全部采用硬质合金球头; 硬质合金球作压头测得的硬度值用符号 HBW 表示。因此 HBS 停止使用, 全部用 HBW 表示布氏硬度符号。

在 HBW 之前用数字标注硬度值, 符号后依次用数字注明压头直径、载荷力、保持时间  $s$ 。如 500HBW5/750, 表示用直径为 5 mm 的硬质合金球在载荷力 7 350N 作用下保持 10~15 s, 测得的布氏硬度值为 500。

#### 4. 布氏硬度应用对象

布氏硬度试验的压痕较大,实验结果比较准确,能很好地反映材料的硬度。布氏硬度主要用于铸铁,非铁金属以及经退火、正火或调质处理的材料,但不宜测量成品及薄壁件。

## 二、洛氏硬度

洛氏硬度是应用最为广泛的硬度试验方法,它是采用直接测量压痕深度来确定硬度值。

### 1. 洛氏硬度试验

洛氏硬度试验(如图 1-5 所示)是用顶角为  $120^\circ$  金刚石圆锥体或直径为  $1.588\text{ mm}$  ( $1/16$  英寸)的硬质合金球用压头,先施加初始力  $F_1$  ( $98\text{ N}$ ),再加上主试验力  $F_2$ ,总试验力为  $F = F_1 + F_2$ 。1-1 线为压头受初始力  $F_1$  后压入的位置;2-2 线为受总试验力  $F$  后压入的位置。经规定的保持时间,卸除主试验力  $F_2$ ,仍保持初始力  $F_1$ ,试样弹性变形的恢复使压头升至 3-3 的位置,压头受主试验力作用压入的深度  $h$  为 2-2 线和 1-1 线之间的距离。材料硬度越大, $h$  值越小。

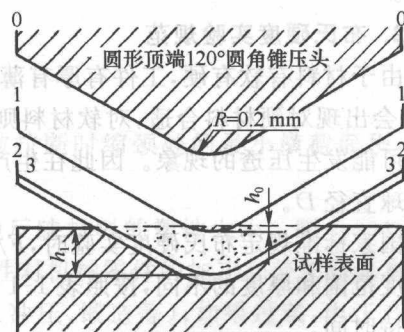


图 1-5 洛氏硬度试验原理示意图

为了符合人们数值越大硬度越高的表达习惯,规定用一个常数  $K$  (金刚石压头  $K = 0.2$ , 钢球压头  $K = 0.26$ ) 减去压痕深度  $h$  表示硬度值,具体计算公式为

$$HR = \frac{K - h}{0.002} \quad (1-6)$$

被测量材料的洛氏硬度,在卸除主试验力  $F_2$  后,可直接在硬度计表盘上读出。

### 2. 洛氏硬度实验规范

为了适应不同材料的硬度测试,将采用不同压头和载荷的组合。国家标准规定有 15 种,然而常用的有 HRA、HRB 和 HRC 三种。

表 1-2 洛氏硬度的实验条件及应用范围

硬度符号	压头类型	总试验力 $F/\text{kN}$	硬度值有效范围	应用举例
HRA	$120^\circ$ 金刚石圆锥体	0.588 4	70~85HRA	硬质合金,表面淬硬层,渗碳层
HRB	$\phi 1.588\text{ mm}$ 硬质合金球	0.980 7	25~100HRB	非铁金属,退火、正火钢等
HRC	$120^\circ$ 金刚石圆锥体	2.471 1	20~67HRC	淬火钢,调质钢等

注:总试验力 = 初始试验力 + 主试验力;初始试验力全为  $98\text{ N}$ 。

### 3. 洛氏硬度标注方法

在硬度符号之前用数字标注硬度值,如 52HRC、70HRA 等。

### 4. 洛氏硬度应用特点

测量范围大,操作简便,压痕小;可测量成品及较薄的工件。但因为压痕小,对组织不均匀的材料,硬度值波动较大,需要测量多点,取平均值。

### 三、维氏硬度

维氏硬度试验原理与布氏硬度实验原理相同。它是利用顶角为  $136^\circ$  的金刚石四棱锥体作为压头，在一定的载荷  $F$  作用下压入试样表面，经规定的保持时间后卸除载荷，在试样表面形成一底面为正方形的四方形锥形压痕，测量压痕二对角线的平均长度  $d$ ，根据  $d$  算出压痕的表面积  $S$ ，以  $F/S$  作为维氏硬度值，并以 HV 表示。

实际使用中，可以直接从硬度计上读出对角线长度  $d$ ，或者测出其对角线平均长度，再通过查表法求出相应的硬度值。维氏硬度的单位一般省略不写。

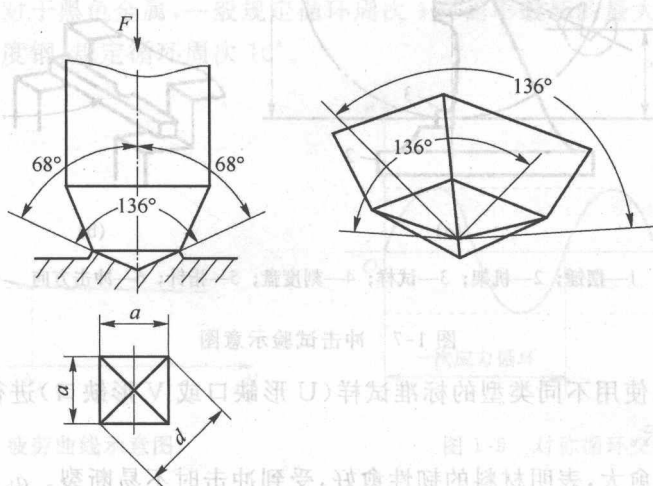


图 1-6 维氏硬度试验原理示意图

维氏硬度试验时的外加载荷最常用的是 49N、98N、196N、294N 及 490N。选用原则是根据材料的硬度或试样的厚度而定。材料越硬，厚度越小或硬化层越薄，载荷也越小。

维氏硬度试验是一种较为精确的硬度试验方法，多用来测定化学热处理工件的表面硬度及小件和薄片等的硬度，也广泛用于材料研究工作中。

## 单元三 冲击韧性

许多机械零件是在冲击载荷下工作的，如锻锤的锤杆、冲床的冲头、火车挂钩、活塞等。冲击载荷比静载荷的破坏能力大，对于承受冲击载荷的材料，不仅要求具有高的强度和一定塑性，还必须具备足够的冲击韧度。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，冲击韧性通常用一次摆锤冲击试验来测定。

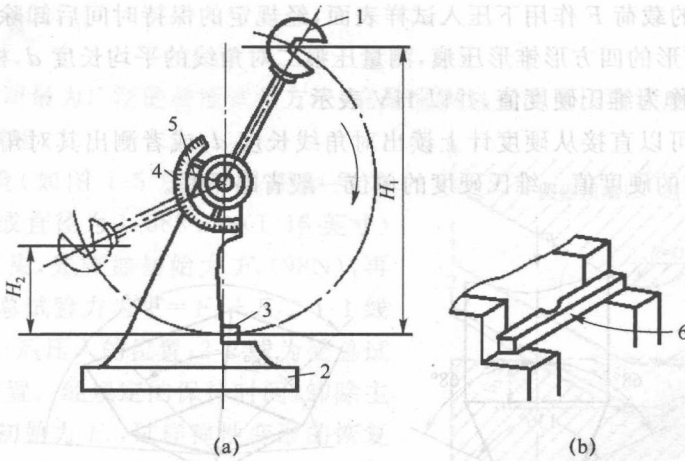
下面介绍摆锤式一次冲击试验。摆锤式一次冲击试验是目前最普遍的一种试验方法。为了使试验结果可以相互比较，按国家标准规定，将金属材料制成冲击试样。

摆锤冲击试验原理如图 1-7 所示。将标准试样安放在摆锤式试验机的支座上，试样缺口背向摆锤，将具有一定重力  $G$  的摆锤举至一定高度  $H_1$ ，使其获得一定势能  $GH_1$ ，然后由此高度落下将试样冲断，摆锤剩余势能为  $GH_2$ 。冲击吸收功 ( $A_k$ ) 除以试样缺口处的截面积  $S_0$ ，即可得到材料的冲击韧性  $a_k$ ，计算公式如下：



$$a_k = A_k / A_0$$

式中,  $A_k$  为折断试样所消耗的冲击功, 单位为 J;  $A_0$  为试样断口处的原始截面积, 单位为  $\text{mm}^2$ ;  $a_k$  为冲击韧性, 单位为  $\text{J}/\text{cm}^2$ 。



1—摆锤；2—机架；3—试样；4—刻度盘；5—指针；6—冲击方向

图 1-7 冲击试验示意图

需要说明一点, 使用不同类型的标准试样(U形缺口或V形缺口)进行试验时, 冲击韧性分别以  $a_{ku}$  或  $a_{kv}$  表示。

冲击韧性  $a_k$  值愈大, 表明材料的韧性愈好, 受到冲击时不易断裂。  $a_k$  值的大小受很多因素影响, 不仅与试样形状、表面粗糙度、内部组织有关, 还与试验时温度密切相关。因此冲击韧性值一般只作为选材时的参考, 而不能作为计算依据。

在工程实际中, 在冲击载荷作用下工作的机械零件, 很少因受大能量一次冲击而破坏, 大多数是经千百万次的小能量多次重复冲击, 最后导致断裂。例如, 冲模的冲头、凿岩机上的活塞等。所以用  $a_k$  值来衡量材料的冲击抗力, 不符合实际情况, 应采用小能量多次重复冲击试验来测定。

试验证明, 材料在多次冲击下的破坏过程是裂纹产生和扩展过程, 它是多次冲击损伤积累发展的结果。因此材料的多次冲击抗力是一项取决于材料强度和塑性的综合性指标, 冲击能量高时, 材料的多次冲击抗力主要取决于塑性; 冲击能量低时, 主要取决于强度。

## 单元四 疲劳强度

### 一、疲劳概念

许多机械零件, 如轴、齿轮、轴承、弹簧等, 在工作中承受的是交变载荷。在这种载荷作用下, 虽然零件所受应力远低于材料的屈服点, 但在长期使用中往往会突然发生断裂, 这种破坏过程称为疲劳断裂。

疲劳破坏是机械零件失效的主要原因之一。据统计, 在机械零件失效中大约有 80% 以上属