



普通高等教育“十二五”规划教材

# 材料科学与工程 基础实验教程

CAILIAO KEXUE YU GONGCHENG  
JICHU SHIYAN JIAOCHENG

丰平 余海洲 戴雷 刘文俊 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

# 材料科学与工程基础实验教程

丰平 余海洲 戴雷 刘文俊 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书包含了机械工程材料、材料科学基础、热处理原理与工艺、金属材料学等四门课程的基础实验,共6章:第1章基础力学性能测试与设备,第2章光学金相显微技术,第3章金属和合金凝固及铁—碳合金平衡组织观察,第4章金属材料热处理,第5章工程材料显微组织观察与分析,第6章综合性、研究性实验。各章知识结构相对独立,与不同课程相对应。

本书可作为金属材料专业本科生实验教材,也可供从事金属材料研究和金相分析的科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

材料科学与工程基础实验教程 / 丰平等编著.

—北京:国防工业出版社,2014.12

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-118-09924-9

I. ①材… II. ①丰… III. ①材料科学—实验—  
高等学校—教材 IV. ①TB3-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第293205号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 7 $\frac{3}{4}$  字数 166千字

2014年12月第1版第1次印刷 印数1—3000册 定价25.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

本书是在三峡大学多年使用的实验指导书的基础上重新编写而成。原实验指导书实验项目包含了“机械工程材料”“材料科学基础”“热处理原理与工艺”“金属材料学”等四门课程的基础实验。本教材内容依然包含这四门课程的实验,但进行了一定的扩展,并增加了综合性实验,目的是针对不同课程和教学进度,学生只需使用一本实验指导书。

本实验教程主要内容分为6章:第1章基础力学性能测试与设备,第2章光学金相显微技术,第3章金属和合金凝固及铁—碳合金平衡组织观察,第4章金属材料热处理,第5章工程材料显微组织观察与分析,第6章综合性、研究性实验。为方便学生在实验过程中查找相关数据,附录中列出了常用金相化学浸蚀剂,金相砂纸型号与对应关系,压痕直径与布氏硬度对照表,抗拉强度与维氏、布氏、洛氏的硬度对照表,热处理工艺及相关性能。各章相对独立,与不同课程相对应,供实验教学选用。

重新编写的实验教程在以下两个方面作了改进:①翔实介绍了实验原理、设备工作原理和操作方法。学生通过阅读实验原理内容,对实验的目的、内容会有更清楚的认识,起到加强实验教学效果之功效。设备工作原理和操作方法是对理论课教材内容的必要补充,旨在让学生熟悉本行业的常用设备,扩展学生的知识范围,培养学生的动手能力。②增加了大量金相照片。金相分析是金属材料最重要的分析手段之一,让学生多接触金相照片,可培养和提高学生显微组织分析能力。

本书可作为“机械工程材料”“材料科学基础”“热处理原理与工艺”“金属材料学”等四门课程的实验指导用书,金属材料工程、材料成型与控制工程和机械工程等专业可根据实验教学要求,选做实验项目。本教材也可供相关领域的工程技术人员和管理人员学习参考。

由于编者水平有限,书中难免会存在不足之处,希望广大读者提出宝贵意见。

编者

2014年10月

# 目 录

第1章 基础力学性能测试与设备 .....	1
实验1 金属材料室温拉伸力学性能的测试 .....	1
实验2 金属材料硬度测定 .....	6
实验3 金属缺口试样冲击韧性的测定 .....	12
第2章 光学金相显微技术 .....	16
实验4 金相显微镜的构造及使用 .....	16
实验5 金相试样制备的一般方法 .....	21
第3章 金属和合金凝固及铁—碳合金平衡组织观察 .....	30
实验6 结晶过程观察及组织描述 .....	30
实验7 用热分析法测定二元相图 .....	33
实验8 铁碳合金显微组织的观察及分析 .....	35
实验9 金属材料冷形变与退火组织观察与性能分析 .....	42
第4章 金属材料热处理 .....	49
实验10 奥氏体晶粒的显示和晶粒度的测定 .....	49
实验11 晶粒尺寸的测定及评级方法 .....	54
实验12 热处理设备及热处理操作 .....	57
实验13 马氏体形态及淬火钢组织的观察与分析 .....	62
实验14 钢中贝氏体组织形态的观察与分析 .....	65
实验15 淬火钢在回火时组织状态的变化 .....	68
实验16 钢的淬透性测定 .....	71
实验17 奥氏体连续冷却转变曲线图的测定 .....	73
实验18 典型化学热处理显微组织观察与分析 .....	76
第5章 工程材料显微组织观察与分析 .....	79
实验19 灰口铸铁显微组织观察 .....	79
实验20 球墨铸铁显微组织观察 .....	81

实验 21	可锻铸铁显微组织观察 .....	83
实验 22	蠕墨铸铁显微组织观察 .....	85
实验 23	有色金属显微组织观察 .....	87
实验 24	铸造碳钢显微组织观察 .....	91
实验 25	轴承合金显微组织观察 .....	95
<b>第 6 章</b>	<b>综合性、研究性实验 .....</b>	<b>99</b>
实验 26	力学性能研究性综合实验 .....	99
实验 27	热处理工艺与显微组织和力学性能综合实验 .....	105
附录一	常用金相化学浸蚀剂 .....	107
附录二	金相砂纸型号与对应关系 .....	109
附录三	压痕直径与布氏硬度对照表 .....	111
附录四	抗拉强度与维氏、布氏、洛氏的硬度对照表 .....	113
附录五	热处理工艺及相关性能 .....	116
参考文献	.....	118

# 第 1 章 基础力学性能测试与设备

## 实验 1 金属材料室温拉伸力学性能的测试

### 一、实验目的

- (1) 了解拉伸实验原理,掌握万能材料实验机的操作方法。
- (2) 观察低碳钢、铸铁在拉伸过程中的各种现象,了解变形过程中变形随荷载变化规律,并绘制拉伸图。
- (3) 测定低碳钢在拉伸过程中的几个力学性能指标:屈服极限  $\sigma_s$ 、强度极限  $\sigma_b$ 、延伸率  $\delta$ 、断面收缩率  $\Psi$  以及铸铁的强度极限  $\sigma_b$ 。
- (4) 观察断口,比较低碳钢和铸铁两种材料的拉伸性能和破坏特点。

### 二、实验内容

- (1) 测定低碳钢和铸铁的拉伸曲线。
- (2) 利用拉伸曲线,计算力学性能指标:屈服强度  $\sigma_s$ 、强度极限  $\sigma_b$ 。
- (3) 用拉伸试样,计算延长率  $\delta$ 、断面收缩率  $\Psi$ 。
- (4) 比较和分析低碳钢和铸铁在拉伸过程的破坏特点。

### 三、实验原理

拉伸试样的形状通常有圆柱形和板状两类。图 1-1 所示为圆柱形拉伸试样。在圆柱形拉伸试样中, $d_0$  为试样直径, $l_0$  为试样的标距长度。根据标距长度和直径之间的关系,试样可分为长试样( $l_0 = 10d_0$ )和短试样( $l_0 = 5d_0$ )。

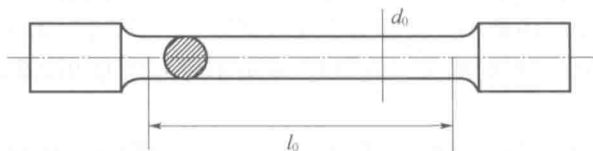


图 1-1 圆柱形拉伸试样

实验时,将试样两端夹装在试验机的上下夹头上,随后缓慢地增加载荷,随着载荷的增加,试样逐步变形而伸长,直到被拉断为止。在实验过程中,实验机自动记录了每一瞬间负荷  $F$  和变形量  $\Delta l$ ,并给出了它们之间的关系曲线,称为拉伸曲线。拉伸曲线反映了材料在拉伸过程中的弹性变形、塑性变形和直到拉断时的力学特性。图 1-2 为低碳钢的拉伸曲线。

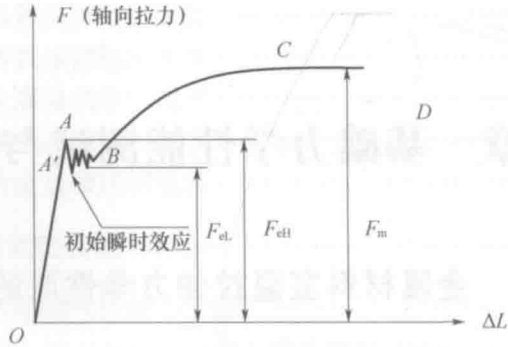


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

如图 1-2 所示,典型低碳钢的拉伸  $\sigma - \varepsilon$  曲线,可明显分为四个阶段:

(1) 弹性阶段  $OA'$ : 在此阶段试样的变形是弹性的,如果在这一阶段终止拉伸并卸载,试样仍恢复到原先的尺寸,实验曲线将沿着拉伸曲线回到初始点,表明试样没有任何残余变形。习惯上认为材料在弹性范围内服从虎克定律,其应力、应变为正比关系,即

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1-1)$$

式(1-1)中比例系数  $E$  代表直线的斜率,称为材料的弹性模量,其常用单位为 GPa。它是代表材料发生弹性变形的性能参数。 $E$  的大小反映材料抵抗弹性变形的能力,代表了材料的刚度。此外,材料在发生杆的轴向伸长的同时还发生横向收缩。反映横向变形的横向应变  $\varepsilon'$  与  $\varepsilon$  之比的绝对值  $\mu$  称为材料的泊松比,它是代表材料弹性变形的另一个性能参数。

(2) 屈服阶段  $AB$ : 在超过弹性阶段后出现明显的屈服过程,即曲线沿一水平段上下波动,即应力增加很少,变形快速增加。这表明材料在此载荷作用下,宏观上表现为暂时丧失抵抗继续变形的能力,微观上表现为材料内部结构发生急剧变化。从微观结构解释这一现象,是由于构成金属晶体材料结构晶格间的位错,在外力作用下发生有规律移动造成的。如果试样表面足够光滑、材料杂质含量少,可以清楚地看出试样表面有  $45^\circ$  方向的滑移线。

试样发生屈服而力首次下降前的最大应力称为上屈服强度,记为“ $R_{eH}$ ”;在屈服期间,不计初始瞬时效应时的最小应力称为下屈服强度,记为“ $R_{eL}$ ”,若试样发生屈服而力首次下降的最小应力是屈服期间的最小应力时,该最小应力称为初始瞬时效应,不作为下屈服强度。

通常把实验测定的下屈服强度  $R_{eL}$  作为材料的屈服极限  $\sigma_s$ ,  $\sigma_s$  是材料开始进入塑性的标志。不同的塑性材料其屈服阶段的曲线类型有所不同,其屈服强度按 GB/T 228.1—2010 规定确定。结构、零件的外加载荷一旦超过这个应力,就可以认为这一结构或零件会因为过量变形而失效。因此,强度设计中常以屈服极限  $\sigma_s$  作为确定许可应力的基础。由于材料在这一阶段已经发生过量变形,必然残留不可恢复的变形(塑性变形),因此,从屈服阶段开始,材料的变形就包含弹性和塑性两部分。

(3) 强化阶段  $BC$ : 屈服阶段结束后,  $\sigma - \varepsilon$  曲线又出现上升现象,说明材料恢复了对



继续变形的抵抗能力,材料若要继续变形必须施加足够的载荷。如果在这一阶段卸载,弹性变形将随之消失,而塑性变形将永远保留。强化阶段的卸载路径与弹性阶段平行。卸载后若重新加载,材料的弹性阶段线将加长、屈服强度明显提高,塑性将降低。这种现象称为应变强化或冷作硬化。冷作硬化是金属材料极为宝贵的性质之一。塑性变形与应变强化二者相结合,是工厂强化金属的重要手段。如喷丸、挤压、冷拔等工艺,就是利用材料的冷作硬化来提高材料的强度。强化阶段的塑性变形是沿轴向均匀分布的。随塑性变形的增长,试样表面的滑移线亦愈趋明显。 $\sigma - \varepsilon$  曲线的应力峰值  $R_m$  为材料的强度极限  $\sigma_b$ 。对低碳钢来说,  $\sigma_s$  是材料均匀塑性变形的最大抵抗能力,也是材料进入颈缩阶段的标志。

(4) 颈缩阶段  $CD$ : 应力到达强度极限后,开始在试样最薄弱处出现局部变形,从而导致试样局部截面急剧颈缩,承载面积迅速减少,试样承受的载荷很快下降,直至断裂。断裂时,试样的弹性变形消失,塑性变形则遗留在断裂的试样上。

塑性材料和脆性材料的拉伸曲线存在很大差异。低碳钢和铸铁是工程材料中最具典型意义的两种材料,前者为塑性材料,后者为脆性材料。观察它们在拉伸过程中的变形和破坏特征有助于正确、合理地认识和选用材料。

对于低碳钢,在确定屈服载荷  $P_s$  时,必须注意观察试件屈服时测力度盘上主动针的转动情况,以主动针停止转动时的恒定载荷或第一次回转的最小载荷值为屈服载荷  $P_s$ ,材料的屈服极限为

$$\sigma_s = \frac{P_s}{A_0} \quad (1-2)$$

试件拉伸达到最大载荷之前,在标距范围内的变形是均匀的。从最大载荷开始,试件产生颈缩,截面迅速变细,载荷也随之减小。因此,测力度盘上主动针开始回转,而从动针则停留在最大载荷的刻度上,给我们指示出最大载荷  $P_b$ ,则材料的强度极限为

$$\sigma_b = \frac{P_b}{A_0} \quad (1-3)$$

试件断裂后,将试件的断口对齐,测量出断裂后的标距  $l_1$  和断口处的直径  $d_1$ ,则材料的延伸率  $\delta$  和截面收缩率  $\Psi$  分别为

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

$$\Psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中:  $l_0$ 、 $A_0$  分别为实验前的标距和横截面面积;  $l_1$ 、 $A_1$  分别为实验后的标距和断口处的横截面面积。

测量时将试样断裂部分仔细地配接在一起,应使试样两段的轴线处于同一直线上,并且断裂部分适当接触。当断裂处与最接近的标距标记的距离不小于原始标距的  $1/3$  时,标距段长度  $L_0$  按要求配接后直接测量,否则应按下述移位方法测量  $L_0$ 。

实验前将原始标距  $L_0$  细分为  $N$  等分,把每一等分的细圆周线称为标距等分标记。

实验后,以符号  $X$  表示断裂后试样短的一段距离试样夹持部最近的标距等分标记,

以符号  $Y$  表示断裂试样长的一段的标距等分标记,要求  $Y$  与断裂处的距离最接近  $X$  与断裂处的距离, $X$  与  $Y$  之间的标距等分格数为  $n$ 。

若  $N-n$  为偶数,以符号  $Z$  表示断裂试样长的一段的标距等分标记,要求  $Z$  与  $Y$  的标距等分格数为  $\frac{N-n}{2}$ 。分别测量  $X$  与  $Y$  之间的距离记为  $XY$ 、 $Y$  与  $Z$  之间的距离记为  $YZ$ ,则试样断后的标距段长度  $L_0 = XY + 2YZ$ ,如图 1-3(a) 所示。

若  $N-n$  为奇数,以符号  $Z'$  和  $Z''$  表示断裂试样长的一段的标距等分标记,要求  $Z'$  与  $Y$  的标距等分格数为  $\frac{N-n-1}{2}$ , $Z'$  与  $Z''$  的标距等分格数为 1。分别测量  $X$  与  $Y$  之间的距离记为  $XY$ 、 $Y$  与  $Z'$  之间的距离记为  $YZ'$ 、 $Z'$  与  $Z''$  之间的距离记为  $Z'Z''$ ,则试样断后的标距段长度  $L_0 = XY + 2YZ' + Z'Z''$ ,如图 1-3(b) 所示。

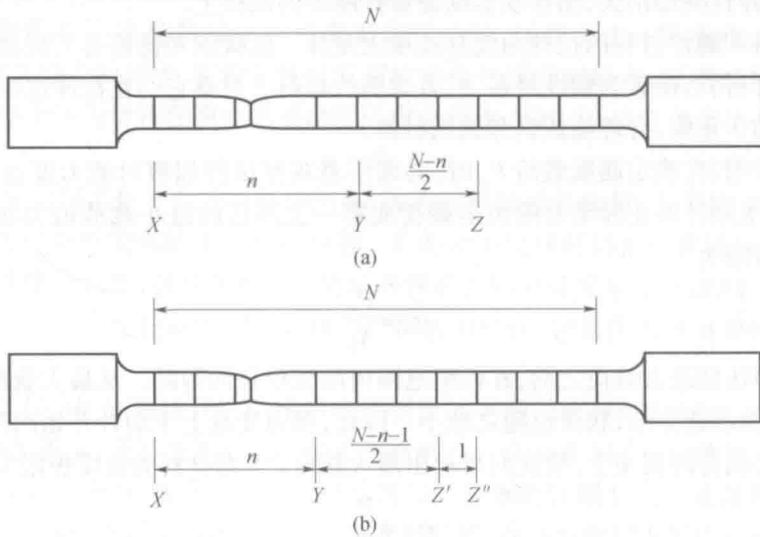


图 1-3 端口不在试样的 1/3 区域内标距计算方法

#### 四、实验设备及材料

- (1) 万能材料实验机;
- (2) 圆柱形拉伸试样;
- (3) 游标卡尺;
- (4) 划线台;
- (5) 小直尺。

#### 五、实验方法和步骤

##### 1. 低碳钢的拉伸步骤

##### 1) 试件准备

先用游标卡尺测量试件中间等直杆两端及中间这 3 个横截面处的直径,在每一横截

面内沿互相垂直方向各测量一次并取平均值。用所测得的3个平均值中最小的值作为试件的初始直径 $d_0$ ，并按 $d_0$ 计算试件的初始横截面面积 $A_0$ 。再根据试件的初始直径 $d_0$ 计算试件的标距 $l_0$ ，并用游标卡尺在试件中部等直杆段内量取试件标距 $l_0$ ，用刻线器将标距长度分为10等分。

## 2) 实验机准备

首先学习实验机操作规程。估计低碳钢 $\sigma_b$ ，计算打断试件所需的最大荷载。根据最大荷载选定实验机测力表盘和配重盘A、B、C，并调节缓冲手柄到相应的位置。按需要放大倍数调节好自动绘图器，装上绘图纸，以备画出 $P-\Delta L$ 曲线。装好试件，调整指针对准零点。

## 3) 试件安装

先将试件安装在实验机的夹头内，再移动下夹头到适当位置，并把试件下端夹紧。

## 4) 检查及试机

由教师检查以上准备情况，经教师许可后启动实验机，加少量荷载（勿使应力超过比例极限）检查实验机，绘图机构工作是否正常。然后卸载（可保留少量荷载），视情况指针调零。

## 5) 进行实验

开动实验机以慢速均匀加载，注意观察测力指针的转动、自动绘图情况及试件在拉伸过程中的各种现象。

当测力指针不动或倒退时，说明材料开始屈服，测力指针停止转动时的恒定值或第一次回转的最小值即屈服载荷 $P_s$ 。当测力指针和从动指针再次分离时，试件开始颈缩，直至最后被拉断。测力指针回到零点，而从动指针则指示出最大载荷 $P_b$ 。

关闭实验机，取下试件。将断裂的试件对齐并尽量靠紧，用游标卡尺测量断裂后标距段的长度 $l_1$ 及断口处直径 $d_1$ 。

## 6) 结束实验

(1) 从实验机上取下已绘制好的拉伸曲线图纸，并请教师检查实验记录。

(2) 清理实验现场，将实验机及有关工具复原。

(3) 实验结束关闭实验机，取下试件和图纸，打开实验机回油阀，使实验机回到原位。

## 7) 注意事项

(1) 参看液压式万能材料实验机的注意事项。

(2) 试件安装必须正确，防止试件偏斜夹入部分过短等现象。

(3) 实验时听见异常声音或发生任何故障，应立即停机，并马上报告实验指导教师。

## 2. 铸铁拉伸试验步骤

(1) 试件的准备：测量试件中间和两端之处直径 $d$ ，取最小值计算截面积。

(2) 实验机准备：估计铸铁 $\sigma_b$ 值，估算拉断试件最大荷载。实验机调整与低碳钢拉伸实验相同。

(3) 检查及试车：与低碳钢拉伸实验相同。

(4) 进行实验：开动实验机。用慢速加载直到试件断裂，记录最大荷载 $P_b$ 值。观察自动绘图器上的曲线。

(5) 实验结束：关闭实验机，取下试件，使实验机回原位。

(6) 测量试件:测量断裂后试件的直径和长度,可以发现  $\sigma \approx 0, \Psi \approx 0$ 。

(7) 计算铸铁拉伸强度极限: $\sigma_b$ 。

## 六、实验结果处理

(1) 清理并复原实验机、工具和现场。

(2) 描绘拉伸曲线,按要求填写实验报告,整理数据,写出结论。

(3) 铸铁拉伸实验步骤与低碳钢拉伸实验步骤相同,只记录最大载荷并绘出拉伸曲线。

## 七、思考题

1. 中华人民共和国国家标准,简称国标(GB)。国家标准分为强制性国标(GB)和推荐性国标(GB/T)。强制性国标是保障人体健康、人身、财产安全的标准和法律及行政法规规定强制执行的国家标准;推荐性国标是指生产、检验、使用等方面,通过经济手段或市场调节而自愿采用的国家标准。

请查找 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》文件并阅读,了解和认识国标 GB 的形式、结构、内容。

2. 什么叫比例试样?它应满足什么条件?国标为什么要对试样的形状、尺寸、公差和表面粗糙度等作出相应的规定?

3. 有材料和直径均相同的长试样和短试样各一个,用它们测得的断面伸长率、断面收缩率、下屈服强度和抗拉强度是否相同?为什么?

4. 测定材料屈服强度的意义是什么?哪些材料需要测定屈服强度?

## 实验2 金属材料硬度测定

### 一、实验目的

(1) 了解布氏、洛氏硬度实验机的主要结构。

(2) 掌握布氏、洛氏硬度测定的基本原理以及硬度的测试方法。

(3) 明确碳钢的含碳量与其硬度之间的关系。

### 二、实验内容

硬度是指材料对另一较硬物体压入表面的抗力,是重要的力学性能之一。硬度值是材料性能的一个重要指标,它赋予金属材料软硬程度的数量概念。硬度值越高,表明金属抵抗塑性变形能力越大,材料产生塑性变形就越困难。硬度测试方法简单,操作方便,因此被广泛应用。

硬度测试方法较多,使用最广泛的是压入法。压入法就是用一个很硬的压头以一定的压力压入试样的表面,使金属产生压痕,然后根据压痕的大小来确定硬度值。压痕越大,则材料

越软;反之,则材料越硬。根据压头类型和几何尺寸等条件的差异,常用的硬度测试方法有:

布氏硬度测试:主要用于黑色、有色金属原材料检验,也可用于退火、正火钢零件的硬度测定。

洛氏硬度测试:主要用于金属材料热处理后产品性能检验。

维氏硬度测试:用于薄板材或金属表层的硬度测定,以及较精确的硬度测定。

显微硬度测试:主要用于测定金属材料的局部显微组织或相的硬度,也可用于测定表面薄层和脆性材料的硬度。

### 三、实验原理

#### 1. 布氏硬度(HB)

##### 1) 布氏硬度基本原理

布氏硬度测定是以一定直径的钢球施加一定负荷  $P$ , 压入被测金属表面保持一定时间(图 2-1), 然后卸荷, 根据金属表面的压痕面积  $F$  求应力值, 以此作为硬度的计量指标, 用 HB 表示, 则  $HB = P/F = P/\pi Dh$ ; 其中  $P$  为负荷(kgf),  $D$  为钢球直径(mm),  $h$  为压痕深度(mm)。

由于测量压痕  $d$  要比测量压痕深度  $h$  容易, 将  $h$  用  $d$  代换, 这可由图 2-2 中的  $\triangle Oab$  关系求出:

$$\frac{1}{2}D - h = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (2-1)$$

$$h = \frac{1}{2}(D - \sqrt{D^2 + d^2}) \quad (2-2)$$

将式(2-2)代入式(2-1)得

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 + d^2})} \quad (2-3)$$

式(2-3)中, 只有  $d$  是变数, 所以只要测量出压痕直径, 就可根据已知的  $D$  和  $P$  值计算出 HB 值。在实际测量时, 可根据 HB、 $D$ 、 $P$ 、 $d$  的值列成表格, 若  $D$ 、 $P$  已选定, 则只需用读数测微尺(将实际压痕直径  $d$  放大 10 倍的测微尺)测量压痕直径  $d$ , 就可直接查表求得 HB 值。

由于金属材料有硬有软, 所测工件有厚有薄, 若采用同一种负荷(如 3000kgf)和钢球直径(如 10mm)时, 则对硬的金属适合, 而对软的金属就不合适, 会使整个钢球陷入金属中; 若对厚的工件适合, 而对薄的金属则可能压透, 所以规定测量不同材料的布氏硬度值时, 要有不同的负荷和钢球直径, 为了保持统一且便于比较, 必须使  $P$  和  $D$  之间保持某一比值关系, 以保证所得到的压痕形状的几何相似关系, 其必要条件就是使压入角保持不变。如图 2-2 所示, 则有

$$\frac{D}{2} \sin \frac{\phi}{2} = \frac{d}{2} \quad (2-4)$$

将式(2-4)代入式(2-3)得

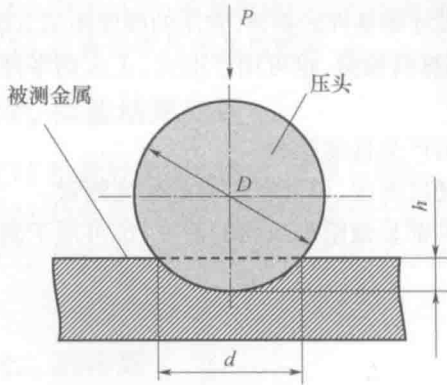


图 2-1 布氏硬度实验原理图

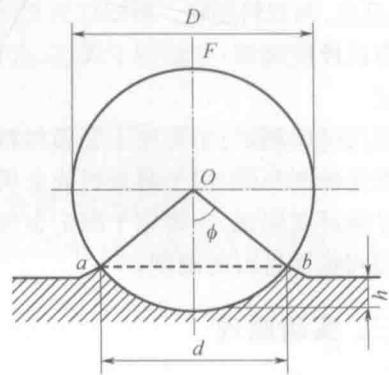


图 2-2 布氏硬度 h 和 d 的关系

$$HB = \frac{P}{D^2} \left[ \frac{2}{\pi \left( 1 - \sqrt{1 - S \sin^2 \frac{\phi}{2}} \right)} \right] \quad (2-5)$$

布氏硬度实验可根据材料的软硬和厚度选择不同直径的压头和不同的载荷。当采用淬火钢球作压头时,钢球的直径有  $D = 2.5\text{mm}$ ,  $D = 5\text{mm}$ ,  $D = 10\text{mm}$  三种,载荷有 156N, 612.9N, 1839N, 2452N, 7355N, 9807N, 29420N 等七种。

式(2-5)说明,当  $\phi$  值为常数时,为使 HB 值相同,  $P/D^2$  也应保持为一定值,因此对同一材料而言,不论采用何种大小的负荷和钢球直径,只要满足  $P/D^2 = \text{常数}$ ,所得的 HB 值都是一样的。对不同材料,所测得的 HB 值也可进行较。

国家标准规定  $P/D^2$  的比值为 294.2、98 和 24.5 三种。一般情况下,多选择  $D = 10\text{mm}$ ,  $F = 29420\text{N}$ ,保持载荷时间为 10s。其实验数据和应用范围可参考表 2-1。

表 2-1 布氏硬度测定的技术规范

材料种类	布氏硬度范围	试样厚度 /mm	负荷 P 与钢球直径 D 之间的关系	钢球直径 D/mm	负荷 P/kgf	负荷持续时间/s
钢铁(黑色金属)	140 ~ 450	>6	$P = 30D^2$	10	3000	10
		3 ~ 6		5	750	
		<3		2.5	187.5	
钢铁(黑色金属)	<140	>6	$P = 10D^2$	10	1000	10
		3 ~ 6		5	250	
		<3		2.5	62.5	
有色金属及合金	31.8 ~ 130	>6	$P = 10D^2$	10	1000	30
		3 ~ 6		5	250	
		<3		2.5	62.5	
有色金属及合金	8 ~ 35	>6	$P = 2.5D^2$	10	250	60
		3 ~ 6		5	62.5	
		<3		2.5	15.6	

布氏硬度的表示方法:若用淬火钢球压头  $D = 10\text{mm}$ , 载荷  $F = 29420\text{N}$  (3000kgf), 保持载荷时间为 10s, 测得的硬度为 280, 则布氏硬度表示为 280HBS10/3000, 即在 HB 之后标注  $D/P/T$ 。如果压头是淬火钢球记为 HBS, 压头用硬质合金球则记为 HBW。

## 2) 布氏硬度测试的技术要求

(1) 被测金属表面必须平整光洁。

(2) 压痕距离金属边缘应大于钢球直径, 两压痕之间距离应大于钢球直径。

(3)  $\text{HB} > 450$  的金属材料不得用布氏实验机测定。

(4) 用读数测微尺测量压痕直径  $d$  时, 应从相互垂直的两个方向上测量, 然后取其平均值。

(5) 查表时, 若使用的是 5mm、2.5mm 的钢球时, 则应分别以 2 倍和 4 倍压痕直径查阅。

## 3) 布氏硬度计的结构及操作

HB-3000 型布氏硬度计的结构如图 2-3 所示。它是利用杠杆系统将负荷加到金属表面上, 加载和卸载负荷都是自动的。

如图 2-3 所示, 布氏硬度的实验方法是将试样置于试样台上, 顺时针转动手轮, 使试样上升直到钢球压紧并听到“咔”一声为止。按下加载按钮, 此时电动机通过变速箱使曲轴转动, 连杆下降, 载荷通过吊环和杠杆系统施加于钢球上。保持载荷一定时间后, 电动机自动运转, 连杆上升, 卸载载荷, 使杠杆及载荷恢复到原始状态。此时, 电动机停止运转, 再反向回转手轮, 使试样台下降, 取下试样, 即可进行压痕直径的测量。

用读数显微镜测量出压头在试样表面上的压痕直径  $d$ , 如图 2-2 所示, 计算出压痕球冠的面积  $S$ , 然后再计算出单位面积所受的力, 此即试样的布氏硬度值, 用 HBS 或 HBW 表示。在实际操作时, 不必用计算压痕面积去求得硬度值, 只需测量出压痕直径  $d$  后, 查表即得 HB 硬度值(见附录三)。

## 2. 洛氏硬度(HR)

### 1) 洛氏硬度测量的基本原理

洛氏硬度测定常用两种压头:一种是顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥体, 另一种是直径为  $1/16$  英寸 (1.588mm) 的淬火钢球。根据金属材料软硬程度不同, 选用不同的压头和负荷配合, 形成 HRA、HRB、和 HRC 三种标尺。三种

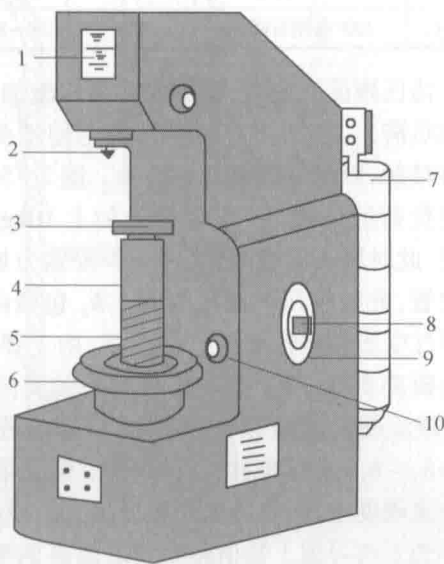


图 2-3 HB-3000 布氏硬度计

1—指示灯;2—压头;3—工作台;4—立柱;5—丝杠;  
6—手轮;7—载荷砝码;8—压紧螺钉;9—时间定位器;  
10—加载按钮。

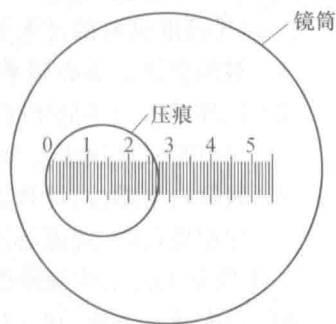


图 2-4 读数显微镜测量

压头、负荷及应用范围可参考表 2-2。

表 2-2 洛氏硬度测定的技术规范

符号	压头类型	负荷/kgf	硬度值有效范围	使用范围
HRA	120°金刚石圆锥	60	>70	测量硬质合金、表面淬火层、渗碳层
HRB	1/16 钢球	100	25 ~ 100 (HB60 ~ 230)	测量有色金属、退火及正火钢
HRC	120°金刚石圆锥	150	20 ~ 67 (HRC230 ~ 700)	测量调质钢、淬火钢

洛氏硬度测定时,需要先后两次施加负荷(初负荷和主负荷)。施加初负荷的目的是使压头与试样表面良好接触,以保证测量结果准确。图 2-5 中 0-0 为未加主负荷的位置,1-1 位置为加上 10kgf 初负荷后的位置,此时压入深度为  $h_1$ 。2-2 位置为加上主负荷后的位置,此时使压入深度为  $h_2$ 。 $h_2$  包括由加荷所引起的弹性变形和塑性变形。卸荷后,由于弹性变形恢复,压头提高到 3-3 位置,此时压头的实际压入深度为  $h_3$ 。洛氏硬度就是以主负荷所引起的残余压入深度

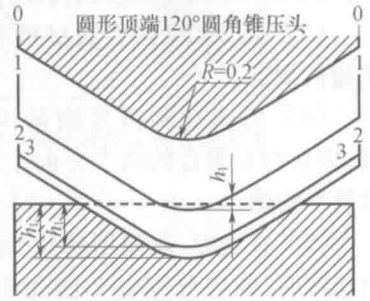


图 2-5 洛氏硬度测定原理图

( $h = h_3 - h_1$ ) 来反映材料的软、硬。但如果直接用压入深度的大小表示硬度,将会出现硬的金属硬度小,而软的金属硬度值大的现象,这与布氏硬度所表示的硬度大小的概念相矛盾。为了与习惯上数值越大硬度越高的概念相一致,故需用一常数( $K$ )减去( $h_3 - h_1$ )的差值表示洛氏硬度值。为简便起见又规定每 0.002mm 的压入深度作为一个硬度单位(即表盘上一小格)。如此,就得到洛氏硬度值的计算公式:

$$HR = \frac{K - (h_3 - h_1)}{0.002} \quad (2-6)$$

式中: $K$  为常数,当采用金刚石圆锥时, $K = 0.2$  (用于 HRA、HRC),采用钢球时, $K = 0.26$  (用于 HRB)。为此,上式可写为

$$HRC(HRA) = 100 - \frac{h_3 - h_1}{0.002} \quad (2-7)$$

$$HRB = 130 - \frac{h_3 - h_1}{0.002} \quad (2-8)$$

## 2) 洛氏硬度试验的技术要求

- (1) 被测金属表面必须平整光洁。
- (2) 试样厚度应不低于压入深度的 10 倍。
- (3) 压痕距试样边缘及两相邻压痕之间距离均不应小于 3mm。
- (4) 测量三个部位,计算后两次实验得出硬度值的平均值,并作好记录。
- (5) 加初负荷时,应谨防试样与金刚石压头突然碰撞,以免损坏金刚石压头。

## 3) 洛氏硬度计结构及操作

洛氏硬度计是由加、卸负载装置和测量机构两部分组成的(图 2-6)。前者是利用杠杆和砝码加载,后者是用百分表测量压痕深度,即洛氏硬度值可直接由百分表盘上读出。



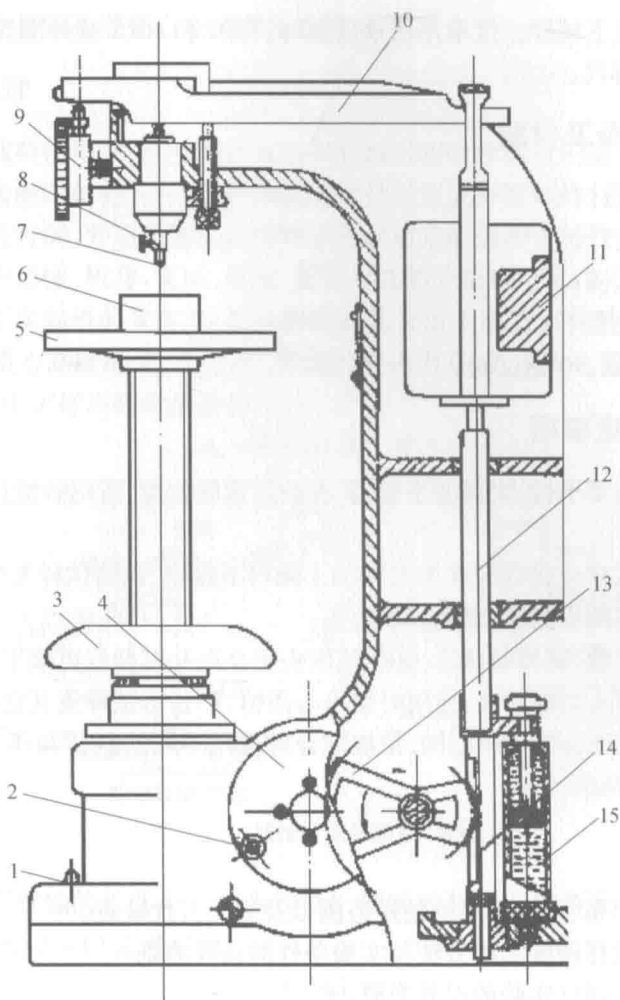


图 2-6 洛氏硬度计结构

1—按钮;2—手柄;3—手轮;4—转盘;5—工作台;6—试样;7—压头;8—压轴;  
9—指示器表盘;10—杠杆;11—砝码;12—顶杆;13—扇齿;14—齿条;15—缓冲器。

实验时,先将试样置于试样台上,对准压头,顺时针转动手轮。当试样上升与压头接触后,缓慢转动手轮使百分表刻度盘上的短时针顺时针转动直至对准红点。其后,转动表盘,使表盘上的长针对准0点位置(图 2-6)。此时,压头利用弹簧压缩的方式将10kgf 预负荷加到了试样上。然后将负荷手柄缓慢向后推(4~5s),将主负荷加到试样上。主负荷加上后,长针由转动到停止,待保持1s后,再将负荷手柄向前拉,回到原始位置。待长针停止转动后,长针所指示的读数即为该材料的硬度值。最后,逆时针回转头

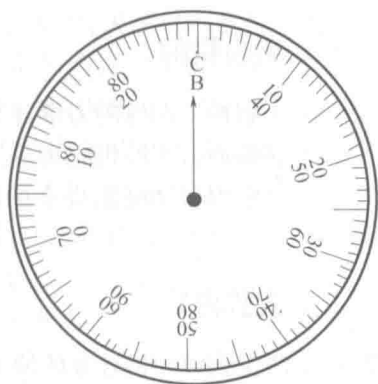


图 2-7 洛氏硬度计表盘