

# 第 1 章 工程材料基础实验

## 1.1 金属材料的硬度实验

### 1.1.1 实验目的与要求

- (1) 了解硬度测定的基本原理。
- (2) 了解布氏硬度计、洛氏硬度计的主要结构及操作方法。

### 1.1.2 实验设备与器材

- (1) HBE-3000A 型布氏硬度计。
- (2) HR-150A 型洛氏硬度计。
- (3) JC-10 型读数显微镜或“20×”读数显微镜。
- (4) 45、T10 或 T12 钢退火状态试样和 45、T10 或 T12 钢淬火状态试样。

### 1.1.3 实验原理

衡量金属材料机械性能的指标有强度、塑性、硬度和冲击韧性等。硬度是指金属表面在接触应力的作用下抵抗塑性变形的一种能力。硬度与强度、伸长率等不同,它不是一个单纯的物理量或力学量,而是代表着弹性、塑性、塑性形变强化率、强度、韧性等一系列物理量组合的一种综合性能指标。硬度测量能够给出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的能力越大,材料产生塑性变形就越困难。硬度实验方法一般简单易行。硬度测定后仅在金属表面局部体积内产生很小的压痕,并不损坏零件,因而适合于成品检验。硬度值对材料的强度、耐磨性、疲劳强度等性能也有定性的参考价值,在机械零件设计图纸上对机械性能的技术要求往往只标注硬度值,其原因就在于此。故在生产、科研实验中,硬度实验是不可或缺的标准实验方法。硬度的实验方法很多,一般分为三类:压力法、划痕法、回跳法。目前生产中使用最多的是静载荷压入法硬度实验,即布氏硬度实验、洛氏硬度实验、维氏硬度实验和显微硬度实验。下面着重介绍布氏、洛氏硬度实验的原理及方法。

#### 1. 布氏硬度(HB)实验的基本原理

如图 1-1(a)所示,用规定载荷为  $P$  (kgf,  $1 \text{ kgf}=9.8 \text{ N}$ ) 的力把直径为  $D$  (mm) 的钢球压入试样表面并保持一定的时间,待塑性变形稳定后,卸去载荷,用读数显微镜测出钢球在试样表面所压出的圆形凹痕的直径  $d$  (mm),由  $d$  计算出凹痕的面积  $F_{\text{凹}}$ ,载荷  $P$  与凹痕面积  $F_{\text{凹}}$  的比值,即平均单位凹痕面上所受的力  $P/F_{\text{凹}}$  即为布氏硬度值,用符号 HB 表示。

设凹痕深度为  $h$  (mm),由立体几何公式可知,直径为  $D$ ,高度为  $h$  的凹痕面面积为

$$F_{\text{凹}} = \pi Dh \quad (1-1)$$

则布氏硬度的计算公式为

$$HB = P/F_{\text{凹}} = P/(\pi Dh) \quad (1-2)$$

实际测量中,凹痕深度  $h$  很难测准,而凹痕直径  $d$  较易测准,故可以利用几何关系将凹痕深度  $h$  用钢球直径和凹痕直径  $d$  来表示,这可以根据图 1-1(b)中  $\triangle oab$  的关系求出:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}D - h &= \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \\ h &= \frac{1}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2}) \end{aligned} \quad (1-3)$$

将式(1-3)代入式(1-2)即得

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-4)$$

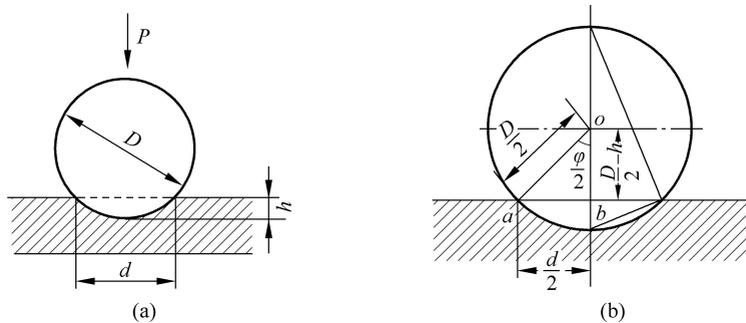


图 1-1 布氏硬度实验原理  
(a) 原理图; (b)  $h$  和  $d$  的关系

金属有硬有软,工件有厚有薄、有大有小,若只采用一种载荷(如 3000 kgf)和钢球直径(如 10 mm),则对硬的金属适合,而对极软的金属不适合,会发生整个钢球陷入金属中的现象;若对于厚的工件适合,则对于薄件会出现压透的可能,所以在测定不同材料的布氏硬度值时就要求有不同的载荷  $P$  和钢球直径  $D$ 。为了得到统一的、可以相互进行比较的数值,必须使  $P$  和  $D$  之间维持某一比值关系,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  $\varphi$  保持不变。

根据相似原理,由图 1-1(b)可知,  $d$  和  $\varphi$  的关系是

$$\frac{D}{2} \sin \frac{\varphi}{2} = \frac{d}{2} \quad \text{或} \quad d = D \sin \frac{\varphi}{2} \quad (1-5)$$

将式(1-5)代入式(1-4)可得

$$HB = \frac{P}{D^2} \left[ \frac{2}{\pi \left( 1 - \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\varphi}{2}} \right)} \right] \quad (1-6)$$

式(1-6)说明,当  $\varphi$  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,无论采用何种大小的载荷和钢球直径,只要能满足  $\frac{P}{D^2} = \text{常数}$ ,所得的  $HB$  值就

是一样的。对于不同材料来说,所得的 HB 值也是可以进行比较的。《金属材料 布氏硬度试验 第1部分:试验方法》(GB/T 231.1—2018)规定,根据金属材料的种类和布氏硬度范围,选定  $\frac{P}{D^2}$  值(见表 1-1),从而确定试验条件的  $D$  值、 $F$  值和保持时间。

表 1-1 不同材料的试验力-压头球直径平方的比率

材 料	布氏硬度 HBW	试验力-球直径平方的比率 $0.102 \times F/D^2 / (\text{N}/\text{mm}^2)$
钢、镍基合金、钛合金	—	30
铸铁(铸铁试验压头的名义直径应为 2.5 mm、5 mm 或 10 mm)	<140	10
	$\geq 140$	30
铜和铜合金	<35	5
	35~200	10
	>200	30
轻金属及其合金	<35	2.5
	35~80	5
		10
		15
	>80	10
	15	
铅、锡	—	1

## 2. 洛氏硬度(HR)实验的基本原理

洛氏硬度试验同布氏硬度一样也属于压入硬度法,但它不是测定压痕面积,而是根据压痕深度来确定硬度值指标,其实验原理如图 1-2 所示。

洛氏硬度实验的压头分为两种:一种是顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥,另一种是直径为 1.5875 mm 或 3.175 mm 的淬火钢球。根据金属材料的软硬程度不同,可选用不同的压头和载荷配合使用,最常用的是 HRA、HRB 和 HRC。这三种洛氏硬度的压头、载荷及使用范围见表 1-2。

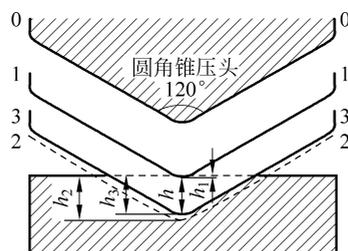


图 1-2 洛氏硬度实验原理

表 1-2 洛氏硬度的实验规范

标度	压头	载荷/kgf	硬度值的有效范围	使用范围
HRA	$120^\circ$ 金刚石圆锥	60	70~85	适于测量硬质合金,表面淬火层、渗碳层

续表

标度	压头	载荷/kgf	硬度值的有效范围	使用范围
HRB	1/16"钢球	100	25~100 (60~230 HB)	适于测量有色金属、退火及正火钢
HRC	120°金刚石圆锥	150	20~67 (230~700 HB)	适于测量调质钢、淬火钢

洛氏硬度测定时,需要先后两次施加载荷(预载荷和主载荷),施加预载荷的目的是使压头与试样表面接触良好,以保证测量结果准确。图 1-2 中的 0—0 位置为未加载荷时的压头位置,1—1 位置为加上 10 kgf 预载荷后的位置,此时压入深度为  $h_1$ ,2—2 位置为加上主载荷的位置,此时压入深度为  $h_2$ , $h_2$  包括由加载所引起的弹性变形和塑性变形,卸除主载荷后,由于弹性变形恢复而稍提高到 3—3 位置,此时压头的实际压入深度为  $h_3$ 。洛氏硬度就是以主载荷所引起的残余压入深度( $h = h_3 - h_1$ )表示。但这样直接以压入深度的大小表示硬度将会出现硬的金属硬度值小,而软的金属硬度值大的现象,这与布氏硬度所标志的硬度值大小的概念相矛盾。为了与习惯上数值越大硬度越高的概念相一致,采用( $k$ )减回( $h_3 - h_1$ )的差值表示硬度值。为了简便起见。又规定每 0.002 mm 压入深度作为一个硬度单位(即刻度盘上的一格)。

洛氏硬度的计算公式为

$$HR = \frac{k - (h_3 - h_1)}{0.002} \quad (1-7)$$

式中, $h_1$  为预载荷压入试样的深度,mm; $h_3$  为卸除主载荷后压入试样的深度,mm; $k$  为常数,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)。

因此,式(1-7)可以改为

$$HRC(\text{或 HRA}) = 100 - \frac{h_3 - h_1}{0.002} \quad (1-8)$$

$$HRB = 130 - \frac{h_3 - h_1}{0.002} \quad (1-9)$$

此值为一无名数,HRA、HRB、HRC 互不联系,彼此不能换算。

### 1.1.4 实验步骤

#### 1. 布氏硬度的测定

1) 布氏硬度测定的技术要求

- (1) 试样表面必须平整光洁,以使压痕边缘清晰,保证精确测量压痕直径  $d$ 。
- (2) 压痕距离试样边缘大于  $D$ (钢球直径),两处压痕之间的距离不小于  $D$ 。
- (3) 用读数显微镜测量压痕直径  $d$  时,应从相互垂直的两个方向上进行,并取其算术平均值。

(4) 为了表明实验条件,可在 HB 值后标注 D/P/T,如 HB10/3000/10 即表示此硬度值是在  $D=10$  mm、 $P=3000$  kgf、 $T=10$  s 的条件下得到的。

2) HBE-3000A 型布氏硬度计的结构和操作

(1) HBE-3000A 型布氏硬度计面板功能介绍

HBE-3000A 型布氏硬度计的面板上有 6 个输入键和力值、保荷时间、加卸荷状态及力值范围按键,输出显示采用 LED 八段数码管及发光二极管。面板的布局如图 1-3 所示。

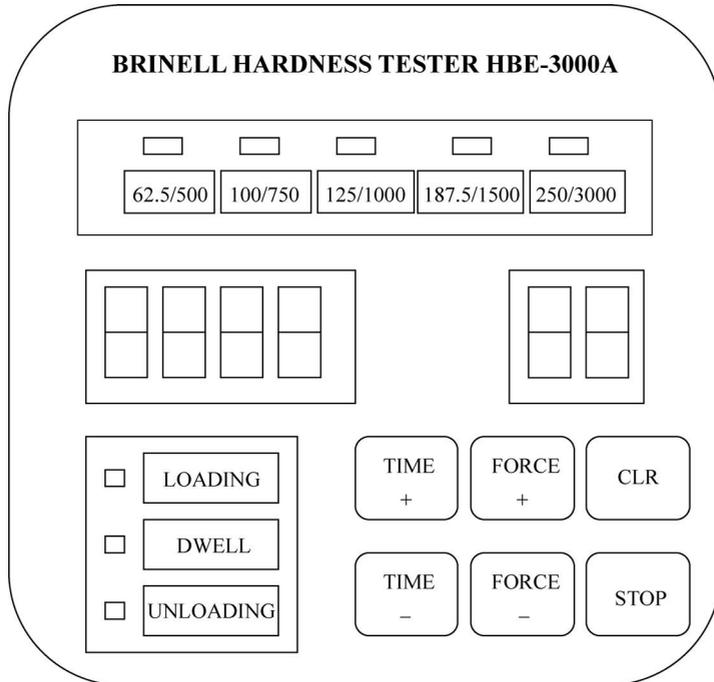


图 1-3 HBE-3000A 型布氏硬度计的面板

布氏硬度实验力级数显示:按照实验要求共有分别为 62.5、100、125、187.5、250、500、750、1000、1500、3000 kgf 共十级实验力,按所选择的载荷对应的发光二极管被点亮。

力值显示:实验时,显示出实际力值(瞬时力值,kgf),如红灯亮即显示红色数字的力值,绿灯亮即显示白色数字的力值。

保荷时间,当加载结束时,保荷时间开始呈倒计时显示,保荷时间的范围为 5~60 s,共 12 挡,一般设在 15 s。

实验状态显示,实验时分为 3 个阶段,即加荷阶段“LOADING”灯点亮,保荷阶段“DWELL”灯点亮,卸荷阶段“UNLOADING”灯点亮。

面板上共设 6 个输入功能键。其中,两个为时间增减键,两个为力值增减键,每按一下即发出“嘟”声,如果选择到最大或最小时,再按一下会发出“嘟——”较长声,表示该值已达到最大值或最小值;还有一个停止键和一个清零键。



为保荷时间增加键,每按一下,增加 5 s,最大增加至 60 s。



为保荷时间减少键,每按一下,减少 5 s,最小减少至 5 s。



为力值增加键,每按一下,力值增加一级,最大力值增加至 3000 kgf。

FORCE
—

为力值减少键,每按一下,力值减少一级,最小力值减少至 62.5 kgf。

CLR
-----

为清零键,当负荷全部卸除后(工件与压头脱开),力值显示还有余值,用该键置零。

STOP
------

为停止键,做硬度实验时需要停止则按此键,按此键后,仪器停止加荷并回到起始位置。

## (2) 操作程序

打开电源开关,面板显示 A~0 倒记数,到力值数码管显示“0”时,杠杆自动调整进入工作起始位置,如力值数码管有残值,则要清除(按清零键)。开机时力值设定在 2450 N (250 kgf)位置,时间设定在 15 s。如要选择其他实验力和保荷时间,请参阅操作面板功能介绍。

实验前针对仪器的准备工作就绪后,将试件平稳地放在工作台上,转动手轮,在工件接触压头的同时实验力也开始显示,当实验力接近自动加荷值时必须缓慢上升,到达自动加荷值时,仪器会发出“嘟”的响声,同时停止转动手轮,加荷指示灯“LOADING”点亮,负荷自动加载,运行到达所选定的力值时,保荷开始,保荷指示灯“DWELL”点亮,加荷指示灯熄灭,并进入倒计时。待保荷时间结束,保荷指示灯熄灭,自动进行卸荷,同时卸荷指示灯“UNLOADING”点亮,卸荷结束后指示灯熄灭,反向转动旋轮使工件与压头分离,杠杆回到起始位置,一次实验结束。

逆时针转动手轮降下工作台,取下试样,用读数显微镜测出压痕直径  $d$  值。实验后压痕直径应满足  $0.25D < d < 0.6D$ ,否则实验结果无效,应考虑换用其他载荷重做实验。

根据压痕直径、负荷大小和钢球直径按式(1-4)计算布氏硬度值。

**注意:**每次更换钢球或进行大批实验前,必须用标准硬度块检验仪器。在硬度块表面的不同部位进行 3 次硬度实验,然后取其算术平均值。该值不能超过标准硬度块硬度值的  $\pm 3\%$ 。

HBE-3000A 型布氏硬度计的实验力共有 10 级,其中 62.5~250 kgf 为第一挡,自动加荷值为 30 kgf; 500~3000 kgf 为第二挡,自动加荷值为 90 kgf。

## 2. 洛氏硬度的测定

### 1) 测定洛氏硬度的技术要求

- (1) 根据被测金属材料的硬度高低,按表 1-2 的规范选定压头和载荷。
- (2) 加荷时一定要平稳,防止用力过猛及摆动砝码。
- (3) 试样表面应平整光洁,不得有氧化皮或油污及明显的加工痕迹。
- (4) 两相邻压痕及压痕离试样边缘的距离均不应小于 3 mm。
- (5) 加载时力的作用线必须垂直于试样表面。
- (6) 试样或表面层的最小厚度应不小于压入深度的 10 倍。实验之后,试样支撑面上不得有显著的变形痕迹,试样的最小厚度可查表 1-3。试样最小厚度的确定取决于其预期硬度值。表 1-3 所列的大约厚度数值可供使用不同标尺、实验不同硬度金属时参考。

表 1-3 试样的最小厚度

标尺名称	洛氏硬度值/mm	试样最小厚度/mm	标尺名称	洛氏硬度值/mm	试样最小厚度/mm
A	70	0.7	B	80	1.0
A	80	0.5	B	90	0.8
A	90	0.4	B	100	0.7
B	25	2.0	C	20	1.5
B	30	1.9	C	30	1.3
B	40	1.7	C	40	1.2
B	50	1.5	C	50	1.0
B	60	1.3	C	60	0.8
B	70	1.2	C	67	0.7

## 2) 洛氏硬度计的结构和操作

HR-150A 型洛氏硬度计的结构如图 1-4 所示,主要包括以下几部分:

(1) 机体及工作台。HR-150A 型洛氏硬度计有坚固的铸铁机体,在机体前面安装有不同形状的工作台,通过手轮的转动,借助螺杆的上下移动可使试台上升或下降。

(2) 加载机构。加载机构由加载杠杆(横杠)及挂重架(纵杆)等组成,通过杠杆系统可将载荷传至压头而压入试样。

(3) 千分表指示盘。千分表指示盘用于指示各种不同的硬度值。

HR-150A 型洛氏硬度计的操作规程如下:

(1) 根据试样的预期硬度按表 1-2 确定压头和载荷,并装入硬度计,顺时针转动变荷手轮,确定总实验力。

(2) 当使用金刚石压头时,用中指顶住金刚石头部,轻轻地朝压头杆孔中推进,贴紧支承面,把压头止紧螺钉略微拧紧,然后将被测试件置于试台上。

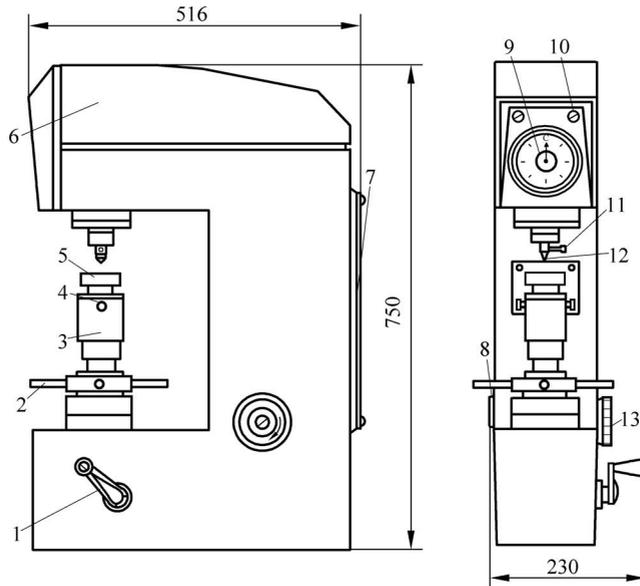
(3) 顺时针转动手轮,升降螺杆上升,应使试件缓慢无冲击地与压头接触,直至硬度计百分表的小指针从黑点移到红点,与此同时长指针转过三圈垂直指向“C”处,此时已施加了 98.07 N 初实验力,长指针偏移不得超过 5 个分度值,若超过此范围不得倒转,应更换测点位置重做。

(4) 转动硬度计指示盘,使长指针对准“C”位。

(5) 将加卸实验力手柄缓慢向后推,保证主实验力在 4~6 s 施加完毕。总实验力保持时间为 10 s,然后将加卸实验力手柄在 2~3 s 平稳地向前拉,卸除主实验力,保留初实验力。此时,硬度计百分表指针所指数据即为被测试件的硬度值。

(6) 反向旋转升降螺杆的手轮,使试台下降,更换测试点,重复上述操作。

**注意:** 每个试样或制品的实验次数不得少于 3 次,并应记录每次的读数或采用读数范围作为金属的洛氏硬度值,亦可根据技术条件要求取 3 次实验结果的算术平均值。每次更换压头、载样台或支座之后的最初两次实验结果不能采用。



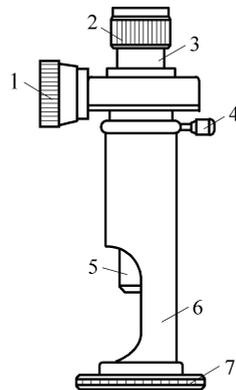
1—加卸实验力手柄；2—手轮；3—保护罩；4—螺钉；5—试台；6—上盖；7—后盖；8—缓冲器调节盖板；9—指示盘；10—上盖螺钉；11—压头止紧螺钉；12—压头；13—变荷手轮。

图 1-4 HR-150A 型洛氏硬度计结构

### 3) 读数显微镜的使用

#### (1) “20×”读数显微镜

① 结构。“20×”读数显微镜的结构示意图如图 1-5 所示。



1—读数鼓轮；2—目镜调节套；3—测微目镜组；4—镜筒锁紧螺丝；5—物镜筒；6—长镜筒；7—镜筒底座。

图 1-5 “20×”读数显微镜的结构

② 使用方法。将读数显微镜置于硬度块或试件上，在长镜筒的缺口处用自然光或灯光照明。在视场中应同时看清分划板上的字和刻线，如感觉压痕不清晰，可转动目镜调节套调至清晰。硬度块或试件上的压痕应同时清晰，这在出厂时已调整好。

进行测量时，转动读数鼓轮，在读数鼓轮的圆周上刻有 0~90 的数字和 100 格线条，每一小格为 0.005 mm，转动鼓轮一圈为 0.5 mm。

目镜内有两块分划板,在固定分划板上刻有0~8的数字,每个数字间隔为1 mm。分划板刻线如图1-6所示。在移动分划板上刻有用于测量的黑色刻线。

在鼓轮开始转动后,刻有黑线的分划板开始移动,此时可对压痕进行测量。测量时先将一刻线的内侧与压痕直径的一边相切,记录测得的数据,然后再转动鼓轮,移动刻线到压痕直径的另一边,同样,将刻线的内侧与压痕直径的一边相切,再记录测得的数据。

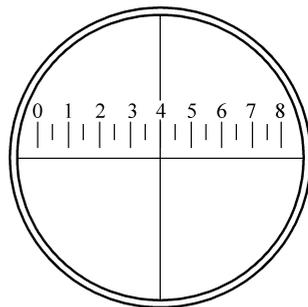


图1-6 分划板刻线示意图

测试举例:将一打好布氏硬度压痕的硬度块或试件平稳地放在工作台上,然后把读数显微镜放在硬度块或试件上,在视场中可见一被放大的布氏压痕。如图1-7所示,测量时,先转动读数鼓轮使视场中分划板的黑色刻线内侧与压痕的直径一边相切,得一读数2.970 mm,然后再转动读数鼓轮(2.970 mm是这样读取的,2是分划板上直接读取的,0.970是鼓轮转动一圈又94格即194.2格乘0.005 mm得到的),使黑色刻线的内侧与压痕直径的另一边相切,又得一读数4.000 mm,则压痕直径为两次读数之差,将读数显微镜旋转90°,在压痕垂直方向按上述方法测量,得到压痕的另一直径为1.031 mm,两次压痕直径的平均值即为直径的数值。但在计算时应注意,因为分划板上0~8的数值的间隔是1 mm,中间刻的短线为0.5 mm,鼓轮的每一小格为0.005 mm,一圈为100格,即0.5 mm。读数时毫米数直接读取,鼓轮上的格数乘以0.005 mm。于是有

$$4.000 - (2 + 0.005 \times 194.2) \text{ mm} = 1.029 \text{ mm}$$

$$(1.029 + 1.031) \div 2 \text{ mm} = 1.030 \text{ mm}$$

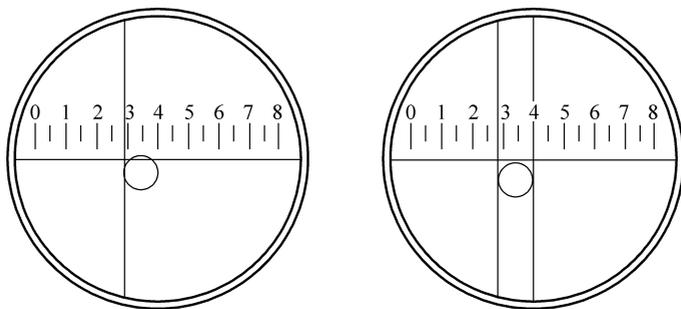


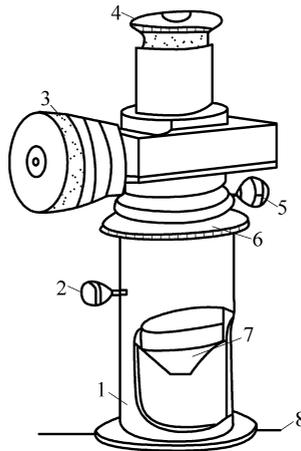
图1-7 测量压痕示例

## (2) JC-10型读数显微镜

① 结构。JC-10型读数显微镜的结构如图1-8所示。

② 工作原理。由丝杆测微器推动带有十字交叉双刻线的分划板在目镜固定分划尺上做平行于X方向的移动,丝杆沿轴向移动1 mm距离,鼓轮的分值为0.01 mm。测量时在目视场内移动带有十字交叉和双刻线的分划板瞄准被测物经物镜放大后在目视场固定分划尺上的成像,通过目视场内的固定分划尺读取被测两点的整数值加上鼓轮上的小数即为被测两点的读数值,两次读数值之差除以物镜放大倍数即为实际被测物的大小。

③ 使用方法。将读数显微镜放在被测物表面上,镜座缺口朝向光线射来的方向,按住



1—镜座；2—调焦锁紧螺钉；3—测微鼓轮；4—目镜；5—固定螺丝；6—镜座调焦环；  
7—物镜；8—物平面。

图 1-8 JC-10 型读数显微镜结构

镜座调节目镜，将目镜视场中的分划线调节清晰，转动镜座调焦环使被测物经物镜放大清晰地成像在目镜分划尺上，松开镜座固定螺丝，对好被测物再次锁紧。转动测微鼓轮，用带有十字交叉和双划线的分划板瞄准被测物像需要测量区域的边界，读取固定尺上的整数加上测微鼓轮上的尾数值即为被测物像边界的起始点读数  $a$  (见图 1-9 中  $a = 5.36 \text{ mm}$ )，然后再转动测微鼓轮，使带有十字交叉和双划线分划板瞄准需要测量区域的另一端边界，读取固定尺上的整数值加上测微鼓轮上的尾数值即为被测物像边界的终点读数  $b$  (见图 1-9 中  $b = 4.50 \text{ mm}$ )，两读数值之差  $a - b$  除以物镜放大倍数 2 即为实际被测物的测量值，如图 1-9 中的测量值为  $(a - b) \div 2 = 0.43 \text{ mm}$ 。

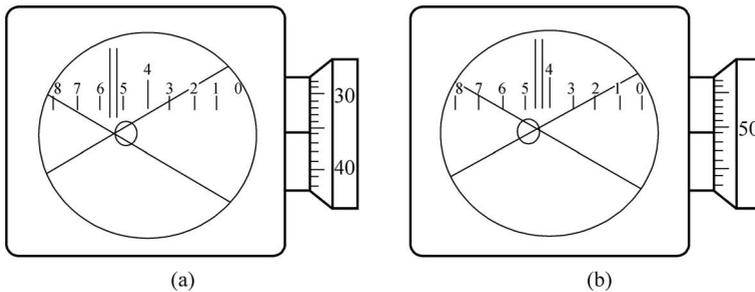


图 1-9 JC-10 型读数显微镜测量实例

(a)  $a$  的读数；(b)  $b$  的读数

### 1.1.5 实验内容与注意事项

#### 1. 实验内容

- (1) 测定退火状态的中碳钢(45)和高碳钢(T10 或 T12)的布氏硬度。
- (2) 测定中碳钢(45)和高碳钢(T10 或 T12)淬火状态的洛氏硬度(HRC)。