

学习情境一

金属材料的性能



知识目标

1. 掌握金属材料力学性能的概念；
2. 了解金属材料力学性能的评价指标和评价方法；
3. 了解机械零件的制造过程；
4. 了解金属材料常用的加工方法及其工艺性。



技能目标

1. 掌握拉伸试验、计算强度和塑性的方法；
2. 掌握布氏硬度、洛氏硬度的测量方法。



学习导航

金属材料的性能主要包括使用性能和工艺性能两个方面。使用性能是指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，包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能等。

本学习情境重点介绍金属材料力学性能和工艺性能，以及测量力学性能的试验方法。

在机械设计选材与制造中主要考虑金属材料的力学性能。材料的力学性能，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，主要包括强度、塑性、硬度、韧性、疲劳极限等。

金属材料在加工及使用过程中所受的外力，称为载荷。根据载荷作用方式不同，可分为拉伸载荷、压缩载荷、弯曲载荷、剪切载荷、扭转载荷等，如图 1-1 所示。

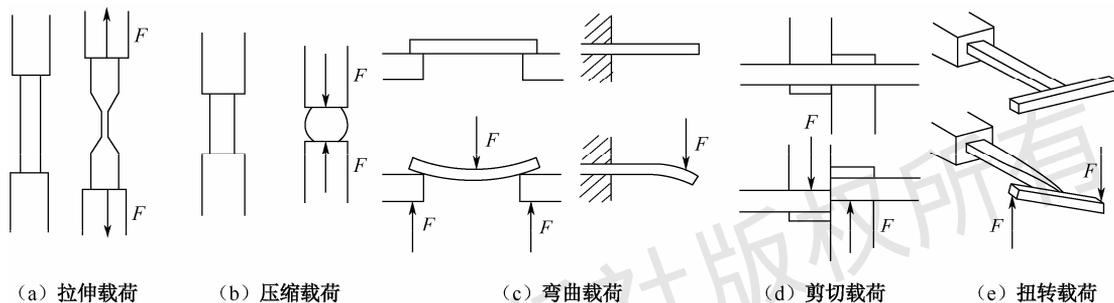


图 1-1 载荷的作用形式

1.1.1 强度和塑性

1. 强度

材料在载荷作用下，抵抗塑性变形或断裂的能力称为强度。强度越高的材料，所能承受的载荷越大。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。按照标准规定拉伸试验方法是把标准试样（GB/T228.1—2010）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量，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。

1) 拉伸试验与应力—应变曲线

材料的性质不同，拉伸曲线形状也不尽相同。图 1-2 为退火低碳钢的拉伸曲线，图中，纵坐标表示载荷 F ，单位为 N；横坐标表示绝对伸长量 ΔL ，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。

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。

es ——微量塑性变形阶段 当拉伸力继续增加时，试样在产生弹性变形时，开始产生微量的

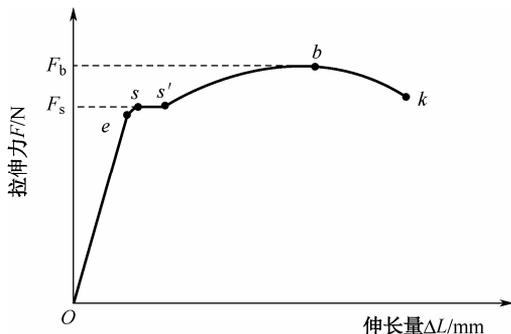


图 1-2 低碳钢的拉伸长曲线

塑性变形。

ss' ——屈服阶段 当载荷超过 F_s 时，曲线上出现水平阶段，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。

$s'b$ ——均匀塑性变形阶段 载荷超过 F_s 后，试样开始产生明显的塑性变形，伸长量随载荷增加而增大。 F_b 为试样拉伸试验时的最大载荷。

bk ——缩颈阶段 载荷达到最大值 F_b 后，试样局部开始急剧缩小，出现“缩颈”现象，由于截面积减小，试样变形所需载荷也随之降低，到 k 点时，试样发生断裂。

2) 强度指标

材料的强度是用应力来表示的，即材料受载荷作用后内部产生一个与载荷相平衡的内力，单位横截面积上的内力称为应力，用 σ 表示。常用的强度指标有屈服点和抗拉强度。

(1) 屈服点 材料产生屈服时的最小应力，以 σ_s 表示，单位为 MPa。

$$\sigma_s = F_s / S_0$$

式中 F_s ——屈服时的最小载荷 (N)；

S_0 ——试样原始横截面积 (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 σ_s 很困难，通常规定产生试样 0.2% 塑性变形时的应力作为条件屈服点，用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

屈服点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，低于材料的屈服点，则不会产生过量的变形。材料的屈服点越高，允许的工作应力也越高。因此，它是机械设计和选材的主要依据，也是评定金属材料优劣的重要指标。

(2) 抗拉强度 材料在拉断前所能承受的最大应力，以 σ_b 表示，单位为 MPa。

$$\sigma_b = F_b / S_0$$

式中 F_b ——试样断裂前所承受的最大载荷 (N)；

S_0 ——试样原始横截面积 (mm^2)。

抗拉强度表示材料抵抗均匀塑性变形的最大能力，也是机械设计和选材的主要依据。

2. 塑性

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 试样拉断后，标距的伸长量与原始标距的百分比，称为断后伸长率，用 δ 表示。

$$\delta = (L_1 - L_0) / L_0 \times 100\%$$

式中 L_0 ——试样原始标距长度 (mm)；

L_1 ——试样拉断后的标距长度 (mm)。

注意：被测试样长度不同，测得的断后伸长率也是不同的，长、短试样断后伸长率分别用符号 δ_{10} 和 δ_5 表示，通常， δ_{10} 也写为 δ 。

(2) 断面收缩率 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横截面积的百分比称为断面收缩率，用 ψ 表示。

$$\psi = (S_0 - S_1) / S_0 \times 100\%$$

式中 S_0 ——试样原始横截面积 (mm^2)；

S_1 ——试样拉断后缩颈处的最小横截面积 (mm^2)。

断面收缩率不受试样尺寸的影响，因此，能更可靠反映材料的塑性大小。

断后伸长率和断面收缩率数值越大，表明材料的塑性越好，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。

1.1.2 硬度

硬度是材料抵抗局部变形，特别是塑性变形、压痕或划痕的能力。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、划痕法和回跳法三大类。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和洛氏硬度试验。

1. 布氏硬度试验法

(1) 试验原理 图 1-3 为布氏硬度试验原理图。它是用一定直径的淬火钢球或硬质合金球做压头以相应试验力压入被测材料表面，按规定保持一定时间后卸载，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 HB 表示。

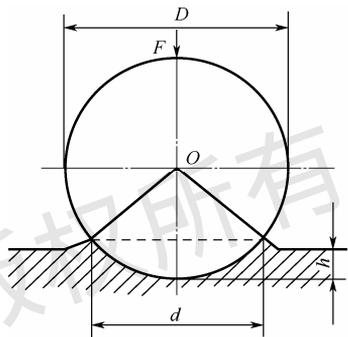


图 1-3 布氏硬度试验原理图

$$HB = F / S_{\text{压}} = 0.102 \times 2F / \pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

式中 F —— 试验力 (N)；

$S_{\text{压}}$ —— 压痕表面积 (mm^2)；

D —— 球体直径 (mm)；

d —— 压痕平均直径 (mm)。

从上式可看出，当外载荷 (F) 和压头球体直径 (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，硬度越高； 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) 表示方法 表示布氏硬度值时应同时标出压头类型，当试验压头为淬火钢球时，硬度符号为 HBS；当试验压头为硬质合金球时，硬度符号为 HBW。HBS 或 HBW 之前数字为硬度值，符号后面依次用相应数值注明压头直径 (mm)、试验力 (kgf)、试验力保持时间 (s) (小于 15s 不标注)。例如，170HBS10/1000/30 表示直径 10mm 的钢球压头，在 9807N (1000 kgf) 的试验力作用下，保持时间 30s 时测得的布氏硬度值为 170。

(3) 应用范围及优缺点 布氏硬度计主要用来测量灰铸铁、有色金属，以及经退火、正火和调质处理的钢材等材料。

布氏硬度优点是具有很高的测量精度，压痕面积较大，能较真实反映出材料的平均性

能，而不受个别组成相和微小不均匀度的影响。另外，布氏硬度与抗拉强度之间存在一定的近似关系，因而在工程中得到广泛应用。

布氏硬度缺点是操作时间长，对不同材料需要更换压头和试验力，压痕测量也较费时间。由于球体本身变形会使测量结果不准确。因此，HBS 适于测量布氏硬度值小于 450 的材料，HBW 适于测量硬度值小于 650 的材料。因压痕较大，布氏硬度不适宜检验薄件或成品。

2. 洛氏硬度试验法

(1) 洛氏硬度试验原理 洛氏硬度试验是用顶角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 1.588mm 的淬火钢球作为压头，试验时先施加初载荷，目的是使压头与试样表面接触良好，保证测量结果准确，然后施加主载荷，保持规定时间后卸除主载荷，依据压痕深度确定硬度值。图 1-4 为洛氏硬度试验原理图。

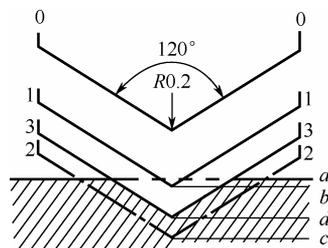


图 1-4 洛氏硬度试验原理图

0-0 为 120° 金刚石压头没有与试件表面接触时的位置；1-1 为加初载后压头压入深度 ab ；2-2 为压头加主载后的位置，此时，压头压入深度为 ac ；卸除主载后，由于弹性变形恢复，压头位置提高到 3-3 位置。最后，压头在主载荷下实际压入表面的深度为 bd ，洛氏硬度的值用 bd 大小来衡量。

实际应用时洛氏硬度可直接从硬度计表盘中读出。压头端点每移动 0.002mm，表盘上转过一小格，压头移动 bd 距离，指针应转 $bd/0.002$ 格，计算公式如下：

$$HR=C-bd/0.002$$

式中 C ——常数（金刚石作压头， $C=100$ ；钢球作压头， $C=130$ ）。

(2) 常用洛氏硬度标尺及应用范围 为了用一台硬度计测定从软到硬的不同金属材料的硬度，可采用不同的压头和总试验力组成几种不同的洛氏硬度标尺，每种标尺用一个字母在洛氏硬度符号 HR 后面加以注明。常用的洛氏硬度标尺是 A、B、C 三种，其中，C 标尺应用最广。HRA 主要用于测量硬质合金、表面淬火钢等；HRB 主要用于测量软钢、退火钢、铜合金等；HRC 主要用于测量一般淬火钢件。

(3) 特点 洛氏硬度试验法操作简单迅速，能直接从刻度盘上读出硬度值；测试的硬度值范围较大，既可测定软的金属材料，也可测定最硬的金属材料；试样表面压痕较小，可直接测量成品或薄件。但由于压痕小，对内部组织和硬度不均匀的材料，硬度波动较大，为提高测量精度，通常测定三个不同点取平均值。

1.1.3 冲击韧性

许多机械零件是在冲击载荷下工作的，例如，锻锤的锤杆、冲床的冲头、火车挂钩等。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性。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。

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，将材料制成标准冲击试样。

摆锤冲击试验原理，如图 1-5 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：

$$a_K = A_K / S_0 = G (H_1 - H_2) / S_0$$

式中 A_K ——冲击吸收功 (J)；
 G ——摆锤的重力 (N)；
 H_1 ——摆锤举起的高度 (m)；
 H_2 ——冲断试样后，摆锤的高度 (m)；
 a_K ——冲击韧性 (J/cm^2)；
 S_0 ——试样缺口处横截面积 (cm^2)。

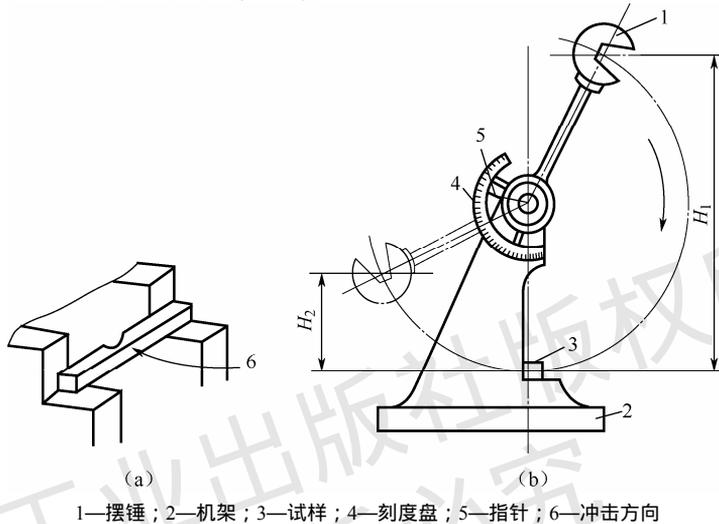


图 1-5 摆锤冲击试验示意图

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 值越大，表明材料的韧性越好、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，它是由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。

1.1.4 疲劳强度

1. 疲劳概念

机械零件，例如，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% 以上属于疲劳破坏，而且疲劳破坏前没有明显的变形而突然断裂。所以，疲劳破坏经常造成重大事故。

2. 疲劳强度

工程上规定，材料经无数次重复交变载荷作用而不发生断裂的最大应力，称为疲劳强度。图 1-6 是通过试验测定的材料交变应力 σ 和断裂前应力循环次数 N 之间的关系曲线（疲劳曲线）。曲线表明，材料受的交变应力越大，则断裂时应力循环次数（ N ）越少，反之，则 N 越大。当应力低于一定值时，试样经无限次循环也不破坏，此应力值称为材料的疲劳极限，用 σ_r 表示；对称循环（图 1-7） $r=-1$ ，故疲劳强度用 σ_{-1} 表示。实际上，金属材料不可能做无限次交变载荷试验。对于黑色金属，一般规定循环周次为 10^7 而不破坏的最大应力为疲劳强度，有色金属和某些高强度钢，规定循环周次为 10^8 。

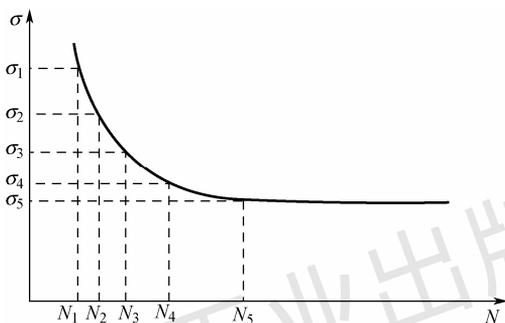


图 1-6 疲劳曲线示意图

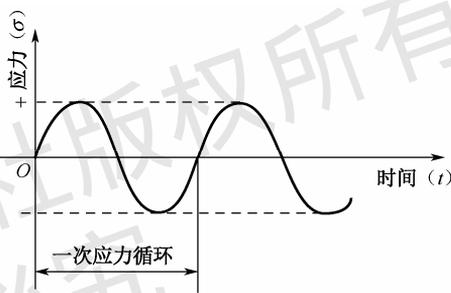


图 1-7 对称循环交变应力图

3. 提高疲劳强度的途径

材料产生疲劳同许多因素有关，目前普遍认为这是由于材料内部有缺陷，如夹杂物、气孔、疏松等；表面划痕、残余应力及其他能引起应力集中的缺陷导致微裂纹产生，这种微裂纹随应力循环次数的增加而逐渐扩展，致使零件突然断裂。

针对上述原因，为了提高零件的疲劳极限强度，应改善结构设计避免应力集中；提高加工工艺减少内部组织缺陷；还可以通过降低零件表面粗糙度和表面强化方法（如表面淬火、表面滚压、喷丸处理等）来提高。

单元二

材料的工艺性能

工艺性能是指材料所能采取的加工方法及其难易程度，它包括铸造性能、锻造性能、焊接性能和切削加工性能等。工艺性能直接影响到零件制造工艺和质量，是选材和制定零件工艺路线时必须考虑的因素之一。

1.2.1 铸造性能

金属及合金在铸造工艺中获得优良铸件的能力，称为铸造性能。衡量铸造性能的主要指标有流动性、收缩性和偏析倾向等。在金属材料中，以灰铸铁和青铜的铸造性能较好。

1.2.2 锻造性能

用锻压成形方法获得优良锻件的难易程度称为锻造性能。锻造性能的好坏主要与金属的塑性和变形抗力有关，也与材料的成分和加工条件有很大关系。塑性越好，变形抗力越小，金属的锻造性能越好。例如，黄铜和铝合金在室温状态下就有良好的锻造性能；碳钢在加热状态下锻造性能较好；铸铁、铸铝、青铜则几乎不能锻压。

1.2.3 焊接性能

焊接性能是指金属材料对焊接加工的适应性，也就是在一定的焊接工艺条件下，获得优质焊接接头的难易程度。对非合金钢和低合金钢，焊接性主要与金属材料的化学成分有关（其中，碳的质量分数影响最大）。如低碳钢具有良好的焊接性，高碳钢、不锈钢、铸铁的焊接性较差。

1.2.4 切削加工性能

金属材料的切削加工性能是指金属材料在切削加工时的难易程度。切削加工性能一般由工件切削后的表面粗糙度及刀具寿命等方面来衡量。影响切削加工性能的因素主要有工件的化学成分、组织状态、硬度、塑性、导热性和形变强化等。一般认为金属材料具有适当硬度（170~230 HBS）和足够的脆性时较易切削，从材料的种类而言，铸铁、铜合金、铝合金及一般非合金钢都具有较好的切削加工性能。所以铸铁比钢切削加工性能好，一般非合金钢比高合金钢切削加工性能好。改变钢的化学成分和进行适当的热处理，是改善钢切削加工性能的重要途径。

单元三

金属材料的硬度测试实验

通过金属材料的硬度测试实验，了解设备的工作原理，观察实验过程，学会操作实验步骤，加深对各种材料性能指标的理解，为选材、用材打好基础。

一、实验目的

1. 进一步加深对硬度概念的理解。
2. 了解布氏、洛氏硬度计的构造和作用原理。

3. 熟悉布氏硬度、洛氏硬度的测定方法和操作步骤。

二、实验设备及材料

- (1) 试样： $\phi 20\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的 45 钢、T10 钢正火及淬火状态。
- (2) 布氏硬度计。
- (3) 洛氏硬度计。
- (4) 读数显微镜。

三、实验步骤

1. 布氏硬度实验

(1) 根据试样材料和试样厚度，按试验规范选择球体直径 D 、实验力 F 的大小和实验力作用保持的时间。

(2) 将试样和工作台的台面擦拭干净，将试样稳固放在工作台上，然后按顺时针方向转动工作台升降手轮使工作台缓慢上升，并使压头与试样接触。

(3) 准备就绪后施加载荷将钢球压入试样。首先打开电源开关，电源指示灯（绿色）亮，然后启动换向开关，当加荷指示灯（红色）亮时即载荷全部加上，立即转动时间定位器至所需载荷保持时间的位置，从加荷指示灯亮到熄灭为止为全负荷保持时间。施加载荷时间为 2~8s。钢铁材料试验载荷的保持时间为 10~15s；非铁金属为 30s；布氏硬度值小于 35 时为 60s。

(4) 时间定位器停止转动后，逆时针转动手轮，降下工作台，取下试样。

(5) 用读数显微镜在两个垂直方向测出压痕直径 d_1 和 d_2 的数值，取平均值。然后根据压痕平均直径，由“布氏硬度换算表”查得布氏硬度值。

2. 洛氏硬度实验

(1) 根据试样材料及预计硬度范围，选择压头类型和初、主载荷。

(2) 根据试样形状和大小，选择适宜工作台，将试样平稳放在工作台上。

(3) 顺时针方向转动工作台升降手轮，将试样与压头缓慢接触，直至表盘的小指针指到 0 为止，即施加初载荷。

(4) 将表盘的大指针调整至零点（HRC、HRA 零点为 0，HRB 零点为 30）。

(5) 加主载荷，将加载手柄推向加载位置，应在 4~8s 内完成。待大指针停止转动后，保持一定的时间。再将卸载手柄扳回到起始位置，卸除主载荷。

(6) 读出硬度值。长指针在卸载主载荷后，停留位置所对应的数字即为硬度值。

(7) 逆时针方向旋转手轮，降下工作台，取下试样，或移动试样选择新的部位，继续进行实验。

(8) 为了获得较准确的硬度值，在每个试样上的试验点数应不小于三点（第一点不记），取三点的算术平均值作为硬度值。对于大批试样的检验，点数可以适当减少。

(9) 被测试样的厚度应大于压痕残余深度的十倍，试样表面应光洁平整，不得有氧化皮，裂缝及其他污物沾染。

(10) 要记住手轮的旋转方向，顺时针旋转时工作台上升，反之、下降。特别在试验快结束时，需下降工作台卸除初载荷，取下试样或调换试样位置时，手轮不得转错方向，否则，手轮转错，使工作台上升，容易顶坏压头。

四、实验报告

根据选用的实验规范和记录数据填写表 1-1 和表 1-2。

1. 布氏硬度

表 1-1 布氏硬度

材料 及热 处理状态	实验规范			实验结果					换算成洛氏硬度值	
	钢球 直径 d/mm	载荷 F/N	F/D^2	第一次		第二次		硬度均值 HBS	HRC	HRB
				压痕直径 d/mm	硬度值 HBS	压痕直径 d/mm	硬度值 HBS			

2. 洛氏硬度

表 1-2 洛氏硬度

材料 及热 处理状态	试验规范			测得硬度值				换算成布氏硬度值 HBS
	压头	总载荷 F/N	硬度标尺	第一次	第二次	第三次	平均硬度值	

习 题

一、名词解释

屈服、断面收缩率、刚度、硬度、韧性、疲劳断裂、工艺性能。

二、填空题

1. 材料的力学性能通常是指在载荷作用下材料抵抗_____或_____的能力。
2. 金属塑性的指标主要有_____和_____两种。
3. 洛氏硬度的标尺有_____、_____和_____三种。
4. 常用测定硬度的方法有_____、_____和维氏硬度测试法。
5. 在测量薄片工件的硬度时，常用的硬度测试方法的表示符号为_____。

6. 零件的疲劳失效过程可分为_____、_____和_____三个阶段。
7. 材料的工艺性能包括_____、_____、_____、_____和_____等。

三、判断题

1. 拉伸试验可以测定材料的强度、塑性等性能指标，因此，材料的力学性能都可以通过拉伸试验测定。 ()
2. 用布氏硬度测试法测量硬度时，压头为钢球，用符号 HBS 表示。 ()
3. 金属材料的力学性能可以理解为金属材料的失效抗力。 ()

四、简答题

1. 说明下列符号的意义和单位。
(1) σ_b ; (2) δ ; (3) ψ ; (4) A_k
2. 由拉伸试验可以得到哪些性能指标？在工程上这些指标是如何定义的？
3. 拉伸试样的原标距长度为 50mm，直径为 10mm。试验后，将已断裂的试样对接起来测量，标距长度为 73mm，缩颈区的最小直径为 5.1mm。试求该材料的延伸率和断面收缩率的值。
4. 材料的弹性模量 E 的工程含义是什么？它与零件的刚度有何关系？
5. 将 6500N 的力施加于直径为 10mm、屈服强度为 520MPa 的钢棒上，试计算并说明钢棒是否会产生塑性变形。
6. 黄铜轴套和硬质合金刀片采用什么硬度测试法比较合适？
7. 提高疲劳强度的途径有哪些？
8. 金属材料的工艺性能包含哪些方面？

五、讨论

1. 强度、塑性指标在工程中有哪些实际意义？
2. 研究材料的工艺性能和经济性有什么现实意义？