

A6 金属材料机械性能测量:拉伸和压缩

实验内容一 拉伸实验

【实验目的】

1. 了解电子万能试验机的基本结构、工作原理及使用方法;
2. 观察拉伸时所表现的各种现象;
3. 观察低碳钢和铸铁的断口特征, 辨别两种材料的力学特征;
4. 通过低碳钢和铸铁的应力-应变曲线, 评价二者的力学性能, 掌握金属材料屈服强度, 抗拉强度, 断裂伸长率和断面收缩率的测定方法。

【实验原理】

机械零件或者工程结构在使用过程中都会受到各种形式的外力作用。材料的力学性能是指材料能够抵抗各种外加载荷的能力, 是衡量材料性能非常重要的一个方面, 对材料的力学性能指标的测量在使用材料前必不可少。其中, 材料在静态载荷下的拉伸、压缩实验是材料力学性能测量实验中最基本和重要的实验方法。采用静拉伸试验可得到材料的应力-应变曲线并依此确定许多重要的力学性能指标, 如屈服强度, 抗拉强度, 弹性模量, 泊松比, 延伸率, 断面收缩率等, 这些指标都是工程设计选定材料的主要依据。本实验即是在室温下分别对低碳钢和铸铁进行拉伸, 由此获得评价两类材料基本力学性能的重要指标。

拉伸实验是测量材料力学性能指标的非常重要的基础实验。实验测量性能指标全面, 能够清楚地反映出材料受力后所发生的弹性阶段、屈服阶段、强化阶段与断裂阶段的基本特征。静拉伸实验是一个操作较为简单的破坏性实验, 实验通过夹持不同材料的试样两端并沿轴向进行拉伸, 直至试样断裂。

实验依据国家标准 GB/T 228.1-2010 《金属材料 拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法》对确定形状的不同试样进行室温轴向拉伸。同时, 万能试验机记录拉伸过程中试样的力-位移曲线并绘制为材料的应力-应变曲线。

1. 低碳钢拉伸的应力-应变曲线及特征参数

(1) 低碳钢的应力-应变曲线

低碳钢是塑性材料的典型代表性材料，对于低碳钢试样，在受拉伸过程中，如图 1 所示应力-应变曲线，可以观察到试样经历四个典型的变形阶段：弹性变形阶段，屈服阶段，均匀塑性变形阶段（强化阶段），局部塑性变形阶段（颈缩阶段），伴随着应力-应变曲线上存在不同的特征点。

①弹性变形阶段：弹性变形阶段是指试样在此阶段发生的是弹性变形，即在此阶段内卸载试样载荷，变形可恢复到变形前的状态。此阶段内应力-应变曲线应为一条直线，应力 R 与应变（延伸率 e ）成正比关系，符合胡克定律。

②屈服阶段：当试样承受的载荷从弹性极限处继续增加，试样除发生弹性变形外，将开始产生塑性变形，此阶段的应力-应变曲线呈水平锯齿形状。当待测试样呈现明显的屈服现象时，可区分上屈服强度 R_{eH} 和下屈服强度 R_{eL} 。根据 GB/T 228.1—2010 的规定， R_{eH} 为试样发生屈服应力首次下降前的最大应力， R_{eL} 为在屈服期间，不计初始瞬时效应时的最小应力。在整个屈服平台或水平锯齿波动阶段，试样承受载荷不变或者变化很小，试样的应变却不断伸长。因此，这个阶段叫做屈服阶段。此阶段去除外力后，试样部分变形不可恢复，发生明显的塑性变形。

③强化阶段：试样经历屈服阶段发生了塑性变形，其内部结构调整而抵抗变形的能力增强，需要增加载荷才能使试样继续变形，发生明显的加工硬化，即此阶段变形和硬化交替进行。强化阶段内的塑性变形是均匀的，因而此阶段为均匀塑性变形阶段。强化阶段内最高点所对应的应力 R_m 称为材料的抗拉强度， R_m 是试样在拉伸过程中的最大载荷。

值得一提的是，对低碳钢进行冷加工具有冷加工硬化的特性。如果此室温下，或者材料结晶温度以下，对试样进行塑性变形使应力-应变曲线到达强化阶段的某一点 C 处，之后进行卸载再加载操作，则卸载时的曲线则为一与弹性阶段基本平行的直线，说明卸载后之前拉伸产生的弹性变形消失，塑性变形不可恢复继续存在。之后再继续进行加载，应力-应变曲线会再次上升到 C 点，而后的曲线与未经卸载的应力-应变曲线重合。这种不经任何热处理，在常温或结晶温度以下对材料进行冷拉伸，使其具备塑性变形达到强化阶段后进行卸载再加载的做法，可提高材料的弹性极限和屈服极限，但降低塑性，因而称作冷作硬化。冷作硬化因降低材料的塑性而使材料变脆易于产生裂纹，因此，工程中可通过退火进行消除。

试样被拉伸达到最大载荷以前，在其标距内变形是均匀的，到达最大载荷时产生局部变形不均而伸长，局部细颈出现，开始发生颈缩现象。

④颈缩阶段，经过了最大应力 R_m 后，试样开始局部不均匀变形，试样的局部明显不均匀快速缩小而呈现缩颈现象，同时，试样所受应力也迅速显小，应力-应变曲线急剧下降直至断裂。

试样拉断后，弹性变形（延伸）消失，塑性变形（延伸）保留。

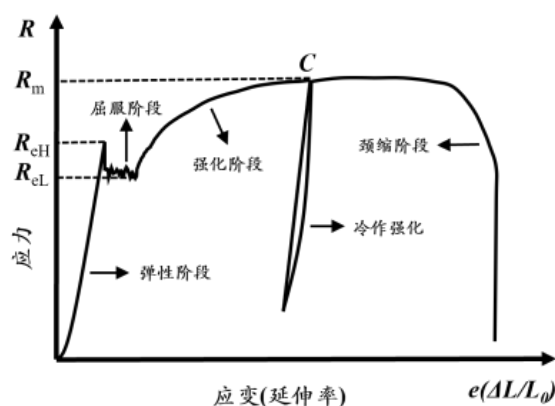


图1 低碳钢的拉伸曲线 (R - e 曲线)

(2) 铸铁的应力-应变曲线

铸铁是典型的脆性材料，铸铁的拉伸变形无屈服现象和缩颈现象，进行非常小的塑性变形后在较小的应力作用下就可被拉断，且突然断裂。拉断后铸铁的延伸率通常很小，约为 0.5%。下图 2 为铸铁典型的应力-应变曲线，由图可见，铸铁的应力-应变曲线没有明显的直线部分。铸铁拉断前承受的最大应力值为其被拉伸的强度极限，定义为铸铁的抗拉强度。

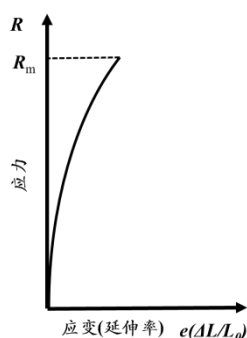


图2 铸铁的拉伸曲线

2. 相关概念基本定义及计算公式：

弹性模量：在应力-应变曲线上，应力低于弹性极限的范围内，应力与应变的比值，表达式为： $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ ， σ 为应力， ϵ 为应变。

上屈服强度 R_{eH} : 试样发生屈服时应力下降时达到的最大值。

下屈服强度 R_{eL} : 试样屈服期间屈服平台上不计初始屈服瞬时效应的最低应力点。

抗拉强度 R_m : 试样缩颈前所达到的最大应力值。

原始标距 L_0 : 试样初始状态, 夹头内用于测试的等截面积的试样部分的长度。

断后标距 L_u : 实验被拉断后, 将试样断口处紧密对接, 初始标线内的总长度。

断后延伸率 δ : 试样拉断后, 试样原始标线之间的伸长量和原始标距之比,

$$\delta = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%。$$

断面收缩率 ψ : 试样拉断后, 断口处横截面积的最大缩小量与原始标距内截面积

之比, $\psi = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%。$

3. 影响因素

实验依据国家标准 GB/T 228.1-2010 《金属材料 拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法》规定的标准状态测定低碳钢和铸铁的力学性能。其中的标准状态指: 待测标准试样的制备、实验具体状态的调节, 实验环境和实验条件。这样是否符合标准状态会影响实验结果。另外, 对仪器的熟练程度和实验过程中对仪器操作的熟练程度, 都会对实验测量结果产生不同影响。

【实验仪器和材料】

电子万能试验机, 控制微机, 游标卡尺, YYU-25/50 电子引伸计, 低碳钢标准试样, 铸铁标准试样

【实验装置】

1. 室温拉伸实验通常使用电子万能试验机对试样进行冷拉伸。下电子万能试验机实验装置如下图 3 所示:

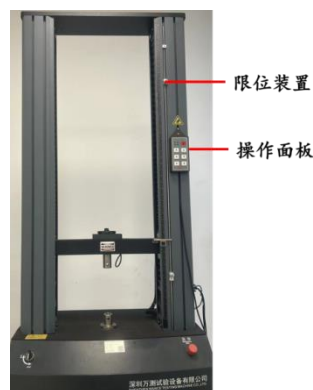


图 3 ETM104B 微机控制电子万能试验机装置图

另外，电子万能试验机除可对本实验试样进行拉伸操作之外，还可以对试样和材料进行压缩实验，弯曲实验等。

2. 拉伸模具结构如图 4:

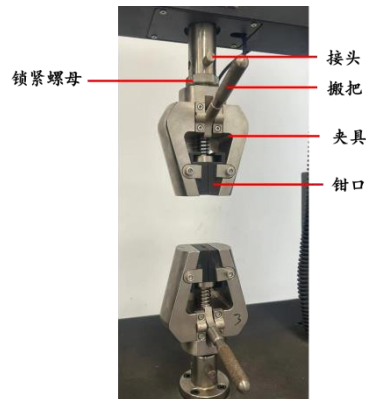


图 4 拉伸模具结构图

3. 电子引伸计(型号: YYU-25/50);

本实验测量应力-应变曲线时，若没有使用专用的变形测量设备，由电子万能试验机绘制出来的应力-应变曲线，其中代表试样伸长量的应变量实际上为试验横梁的实际位移。显然，该位移不紧包括了实验标距内的实际伸长量，还包含了试样标距外以及试样夹头的变形，电子万能试验机拉伸过程中承受载荷的相关部件本身的变形，以及试样夹头部分在拉伸模具的钳口内可能的因滑动引起的位移。因此，实验中采用电子引伸计来消除以上因素对测量结果的影响。电子引伸计是用来测量两点间线变形量的仪器。引伸计由传感器、放大器和记录器三部分构成。其中，传感器通过力臂及刀口与待测试样测量部分接触，从而测得试样实际变形量，并将测得的变形经放大器放大后由记录器采集数据。常用的引伸计有

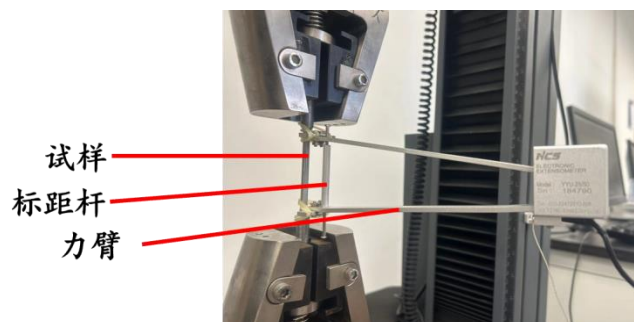


图 5 电子引伸计结构图

有 100mm 标距 25mm 变形量、**50mm 标距 25mm 变形量**、50mm 标距 10mm 变形量、25 mm 标距 5mm 变形量等多种规格。实验过程中，为防止损坏引伸计，选择使用的引伸计的最大变形量要大于待测试样标距内的伸长量。为防止试样的

伸长量大于引伸计的最大变形量，在执行拉伸任务设置时，在程序中应注意设置由引伸计控制到位移控制的切换点的数值，当变形量达到设置的切换点值时，及时取下引伸计。

4. 实验待测试样：低碳钢标准试样和铸铁标准试样。待测试样为圆形截面的标准棒形试样。如下图，对于标准试样，原始标距 $L_0=10d_0$ ， d_0 为标距内平均截面直径。

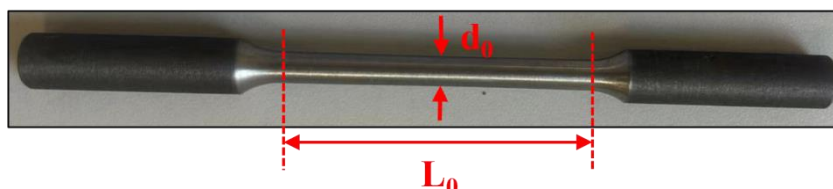


图 6 拉伸试样示意图

【实验内容和步骤】

1. 首先，在装夹试样前，标记待测试样的原始标距 L_0 。选取待测试样夹头内部变形部分偏中间位置，在此处不同位置处选择3~5个截面，用游标卡尺在每个截面相互垂直的两个方向上分别测量一次该截面的直径，对所测量的所有截面直径求平均值即可视为待测试样拉伸之前的直径，记为 d_0 ，之后在待测试样夹头中间变形部分，以其变形部分的中点为中心，左右各选取 $5d_0$ 共 $10d_0$ 的长度，在端点处做标记，标记内即为待测试样的原始标距 L_0 。

2. 检查并确认电子万能试验机和计算机已连接。之后打开万能电子试验机，旋转红色急停旋钮使其弹起，这样操作的目的是，如果实验中有突发情况，可以立刻按下此急停按钮强行终止实验。之后在计算机上找到“TestPilot_E10C”图标并打开此操作软件。

3. 安装拉伸模具。

4. 装夹试样。先用上边的拉伸模具夹持住试样上端，旋紧加固螺环，然后按键调节横梁位置，待拉伸模具上下端间距约为试样长度时，打开下模具夹口，夹持住试样下端，旋转加固螺环。过程中注意同时观察

5. 装夹引伸计（低碳钢拉伸）。首先，通过万能试验机上的引伸计接口将电子引伸计连接在试验机上。然后，将电子引伸计夹在试样上。先标距杆垫片在标距杆和力臂交叉位置并放置在二者之间垫好，引伸计卡在标距位置靠中部，确保引伸计两端口与试样轴向垂直，轻轻并松紧适当地套上橡皮筋。

6.编辑实验方案进行并进行测量。

在导航栏中选择“试验部分”，点击“编辑试验方案”进行试验方法设置，选择“实验方案名”，如“金属材料室温拉伸试验（棒材）”，

① 低碳钢

试验过程中软件记录 $F-\Delta L$ 曲线， ΔL 为横梁位移。我们运用引伸计来测量试样标距长度 L_e （50 mm）范围内的变形，并得出**应力 R —延伸率 e** 曲线图。为保护引伸计，在引伸计跟踪试样伸长量为8 mm时取下引伸计。

a.“基本参数”：试验方向“拉向”；变形传感器“引伸计”，切换点“8 mm”；试样形状“棒材”；入口力“20 N”；预加载速度“2mm/min”；去除点数“5 Points”；试验结束条件：定力（勾选）“10000 N”。

b.“控制方式”：为了观察冷作硬化现象，将加载过程分为三步，选择程序控制。设置3个阶段：①先以2 mm/min的速度拉伸试样，直至试样经过屈服阶段，“位移控制，终止值：8 mm”；②之后以2 mm/min的速度卸载，直至试样所受载荷降到约2kN，“力控制，终止值：2000 N”；③最后以2 mm/min的速度拉伸试样直至断裂，“力控制，终止值：10000 N”。这里设置断裂终止条件与“基本设置”中的“试验结束条件”同时有效，任意一个条件先被触发，试验即终止。

设置完成后点击“保存”，返回软件主页面，点击“查看实验参数”检查并确认，准备开始实验。

② 铸铁

铸铁的拉伸过程相对较快，为安全起见这里不使用引伸计，试验过程中软件记录 $F-\Delta L$ 曲线， ΔL 为横梁位移。

a.“基本参数”：试验方向“拉向”；变形传感器“位移”；试样形状“棒材”；入口力“30 N”；预加载速度“2mm/min”；去除点数“5 Points”；试验结束条件：定力（勾选）“10000 N”。

b.“控制方式”：以2 mm/min的速度拉伸试样直至断裂，“力控，终止值：10000 N”。这里设置断裂终止条件与“基本设置”中的“试验结束条件”同时有效，任意一个条件先被触发，试验即终止。

设置完成后点击“保存”，返回软件主页面，点击“查看实验参数”检查并确认，准备开始实验。

7.进行测试

试样装夹和实验方案设置完毕，准备开始实验，此时将力通道、位移通道、变形通道均清零。之后点击“运行”，试验开始。拉伸过程中随时注意观察试样的形状变化和拉伸曲线的变化情况。做低碳钢拉伸试验时，当拉伸曲线出现屈服平台时，观察试样表面可能出现的45°滑移线；过了屈服阶段后，观察冷作硬化现象；当载荷到达最大值时，曲线开始回落下降，注意试样形状变化，此时可看到颈缩现象。**注意，低碳钢试验时根据电脑提示及时取下引伸计！**

实验结束后在界面的右边蓝色衬底部分输入测量的试样尺寸，允许修改并应用。

8.测量断后试样尺寸

点击“预览”生成测试结果报告并保存。取下试样，将低碳钢试样的两半接在一起，使其尽量紧贴，用游标卡尺测取断后标距 L_u ；颈缩段最小截面处互相垂直的两个方向各测量一次直径，取其平均值作为试样断口处的最小直径 d_u 。

如果试样断裂是在标距之外，此次测量试验作废。

9. 保存数据，作图并分析待测试样各力学性能参数指标。

10. 按照步骤7中②铸铁的实验方案的编辑方案。测量铸铁的拉伸曲线。

11. 根据测量的低碳钢和铸铁的拉伸曲线，分析和判断两类金属材料的力学性能和各性能指标参数。

【注意事项】

1.装夹试样后，检查夹具并确认试样夹好可正常拉伸。

2.装夹引伸计时：手拿引伸计时，注意对引伸计力臂不要用力捏太紧，避免两臂本身产生弹性变形而使标距不准确。

3.注意保护引伸计，如不摔、撞引伸计，引伸计刀口不因大力而变形，标距杆两端的螺钉不可拿掉而使得引伸计两臂张开过大从而导致应变片和弹簧片永远变形，损坏引伸计

4.电子引伸计的刀口不可划伤试样，试样划伤对力学性能影响较大，会导致数据测量不准确。

【思考题】

1. 比较低碳钢和铸铁的拉伸曲线，讨论其差异。
2. 低碳钢在拉伸过程中可分为几个阶段，各阶段有何特征？
3. 何谓“冷作硬化”现象？此现象在工程中如何运用？

实验内容二 压缩实验

【实验目的】

1. 测定低碳钢在压缩时的名义屈服强度 $R_{p0.2}$ ；
2. 测定铸铁在压缩时的强度极限 R_m ；
3. 观察上述材料在压缩时的变形及破坏形式，并分析其破坏原因；
4. 比较塑性材料与脆性材料的力学性能及特点。

【实验装置】

1. 实验所采用的设备及工具与拉伸实验相同。
2. 压缩模具

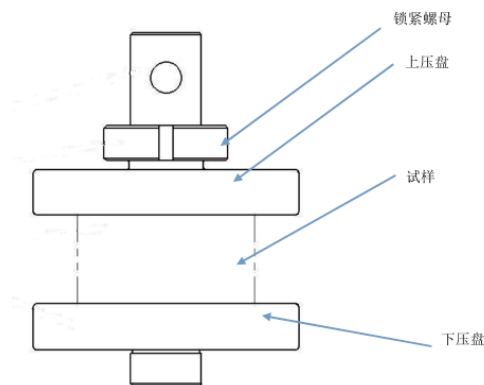


图2-1 压缩模具

操作说明：

- ① 将装有锁紧螺母的上压盘装到试验机上接头上，插上插销，旋转锁紧螺母将上压盘与上接头锁紧。
- ② 将底座放到试验机下接头上
- ③ 将下压盘放到底座上。
- ④ 移动试验机中横梁，使上、下压盘轻轻接触上，用手调整上、下压盘平行，再向上移动中横梁。

- ⑤将试样放到下压盘上。
- ⑥将力值清零。
- ⑦向下移动试验机中横梁，使上压盘压在试样上，按试验标准要求施加一定的预负荷。
- ⑧预负荷达到要求后，开始试验。

3. 实验试样：按国标《金属材料室温压缩方法》（GB/T 7314-2005）要求，金属压缩试样一般采用圆柱形，当试件承受压缩时，其上下两端面与试验机支承垫之间产生很大的摩擦力，这些摩擦力阻碍试件上部和下部的横向变形。若在试件两端面涂以润滑剂，就可以减小摩擦力，试件的抗压能力将会有所降低。当试件的高度相对增加时，摩擦力对试件中部的影响将有所减小，因此，一般规定试件高度 h_0 、直径 d_0 满足 $1 \leq h_0/d_0 \leq 3$ ，如图2-1所示。



图2-1 金属材料压缩试样图

【实验原理】

1. 低碳钢

低碳钢为塑性材料，其压缩曲线（ $F-\Delta L$ 曲线）如图2-2（a）所示，开始加载时，力-变形曲线呈直线上升，此时材料服从胡克定律。当载荷达到一定值以后，随载荷增加变形加快，不再为线性关系，但试样无明显屈服现象。随载荷进一步增大，曲线逐渐向上弯曲。这是因为随着塑性变形的迅速增长，试样横截面积逐渐增大，增加了承载能力，同时纵向变形速度下降，从而导致力-变形关系曲线上翘。

由于低碳钢为塑性材料，所以载荷虽然不断增加，但试件并不发生破坏，只是被压扁，由圆柱形变成鼓形（如图2-2（b）所示），因此无法求出强度极限。此时根据《金属材料室温压缩试验方法》（GB/T 7314-2005），只能确定规定非比例压缩强度 R_{pc} （试样标距段的非比例压缩变形达到规定的原始标距百分比时的压缩应力）。如国标中定义的 $R_{pc0.2}$ 表示规定非比例压缩应变为0.2%时的压缩应力。可以用 $R_{pc0.2}$ 来表示低碳钢压缩时的名义屈服强度。

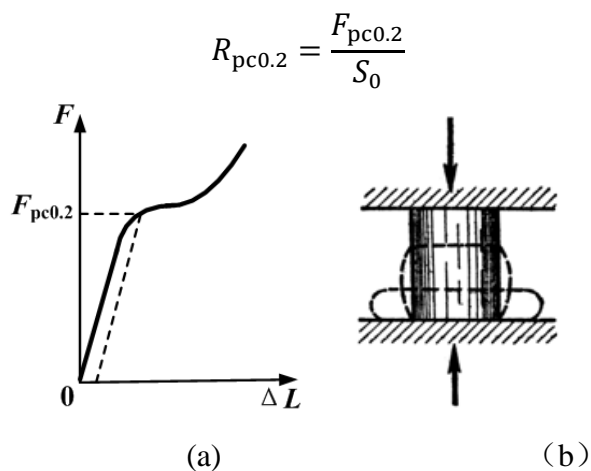


图 2-2 低碳钢压缩图

2. 铸铁

铸铁为脆性材料，其压缩曲线在开始时接近直线。随载荷增加曲率逐渐增大，最后至破坏，破坏后试件的断面法线方向与轴线夹角 α 大约为 45° - 55° 。

如图2-3所示，铸铁没有屈服极限，只有在最大载荷 F_m 下测出的强度极限 R_m 。铸铁的抗压强度极限比它的抗拉强度极限高3~4倍。其它脆性材料，如混凝土、石料等的抗压强度也远高于相应材料的抗拉强度。

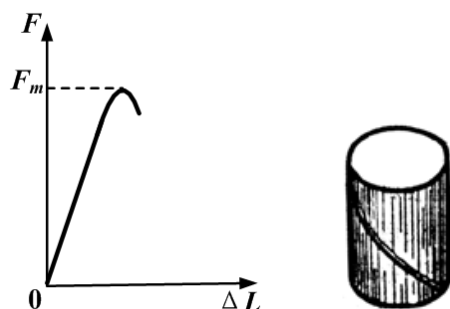


图2-3 铸铁压缩图

脆性材料抗拉强度低，塑性性能差，但抗压能力强，而且价格低廉，宜作为抗压构件的材料。铸铁坚硬耐磨，易于浇铸成形状复杂的零部件，广泛地用于铸造机床床身、机座、缸体及轴承等受压零部件。

【实验步骤及注意事项】

1. 测量试件尺寸

用游标卡尺在互相垂直方向，两次测量金属材料试件的直径，取其平均值为 d_0 (用于计算试件原始截面面积 S_0)，同时测量试件高度 h (测一次即可)。

1. 打开设备

检查试验机、电脑、引伸计等各部分连接完整；打开试验机开关，再向右旋转红色的急停按钮至弹起。打开软件“TestPilot_E10C”。注意，在实验过程中若有突发状况，立即按下红色的急停按钮终止实验！

2. 试验方案设置

在导航栏中选择“试验部分”，点击“编辑试验方案”进行试验方法设置，选择“实验方案名”，如“金属材料室温压缩试验”。

① 低碳钢

a.“基本参数”：试验方向“压向”；变形传感器“位移”；试样形状“棒材”；自动返车（勾选），返车速度“20mm/min”；入口力“10 N”；预加载速度“2 mm/min”；去除点数“5 Points”；试验结束条件：定力（勾选）“10000 N”，定位移（勾选）“5 mm”。

b.“控制方式”：以1 mm/min的速度压缩试样，直至载荷为10 kN，“力控，终止值：10000 N”。这里设置的终止条件与“基本设置”中的“试验结束条件”同时有效，任意一个条件先被触发，试验即终止。

设置完成后点击“保存”，返回软件主页面。点击“查看实验参数”检查并确认，开始实验。开始实验时力通道清零。实验结束后在界面的右边蓝色衬底部分输入测量的试样尺寸，允许修改并应用。

② 铸铁

a.“基本参数”：试验方向“压向”；变形传感器“位移”；试样形状“棒材”；自动返车（勾选），返车速度“20mm/min”；入口力“10 N”；预加载速度“2mm/min”；去除点数“5 Points”；试验结束条件：定力（勾选）“8000 N”。

b.“控制方式”：以1 mm/min的速度压缩试样直至破坏，“力控，终止值：8000 N”。这里设置的终止条件与“基本设置”中的“试验结束条件”同时有效，任意一个条件先被触发，试验即终止。

设置完成后点击“保存”，返回软件主页面。点击“查看实验参数”检查并确认，开始实验。开始实验时力通道清零。实验结束后在界面的右边蓝色衬底部分输入测量的试样尺寸，允许修改并应用。

3. 装夹试样

上升横梁，将试样放在压缩测试空间的下压盘上，试样中心尽量对准下压盘轴心，调节横梁下移，使试样上表面与上压盘间距离约为1-2mm。

注意，以上操作完成后必须经由实验指导老师检查确认后再进行下一步测试！

4. 开始测试

点击“运行”，测试开始。观察实验曲线，做好记录。

5. 实验结束

将横梁上升，取出被测试样；点击“预览”生成测试结果报告并保存；关闭仪器，整理好实验台面方可离开实验室。

【思考题】

1. 试分析低碳钢和铸铁试件在压缩过程中及破坏后有哪些区别。
2. 与拉伸实验相比较，分析低碳钢和铸铁在压缩时的破坏原因。
3. 为什么低碳钢压缩时测不出强度极限？
4. 简述低碳钢和铸铁的力学性能的主要区别。

附录：

仪器主要技术参数

- 1.激光光源：He-Ne 激光器（功率约 1 mW，波长 632.8 nm）
- 2.温控仪适宜升温范围：室温-60℃，测温最小分辨率 0.1℃；
- 3.试件品种：硬铝（20℃起测），黄铜（H62）（25℃~300℃），
钢（20℃起测）；
- 4.试件尺寸：L= 150 mm ， ϕ = 18 mm；
- 5.线膨胀装置系统误差：<3 %。