

§ 2—1 拉伸与压缩实验

拉伸实验是测定材料在静载荷作用下机械性能的最基本和最重要的实验之一。这不仅因为拉伸实验简便易行，易于分析，且测试技术较为成熟。更重要的是，工程设计中所选用材料的强度、塑性和弹性模量等机械性能指标，大多是以拉伸实验为主要依据。本实验将选用两种典型的材料——低碳钢和铸铁，作为常温和静载下塑性和脆性材料的代表，分别作拉伸和压缩实验。

一、 实验目的

- 1、 通过对低碳钢和铸铁这两种不同性能的材料在拉伸、压缩破坏过程的观察和对试验数据、断口特征的分析，了解它们的力学性能特点。
- 2、 了解电子万能试验机的构造、原理和操作。
- 3、 测定低碳钢拉伸时的弹性模量 E 、下屈服强度 σ_{sL} 、抗拉强度 σ_b 、断后伸长率 δ_5 和断面收缩率 ψ ^①；测定低碳钢压缩时的屈服强度 σ_{sc} ，以及测定铸铁拉伸时的抗拉强度 σ_b 和压缩时的抗压强度 σ_{bc} ^①。

二、 试样

1、 试样制备

由于试样的形状和尺寸对实验结果有一定的影响，为了使实验结果具有可比性，试样应按统一规定加工成标准试样。按现行国家标准 GB/T228-2002《金属材料室温拉伸试验方法》规定，拉伸试样可分比例试样和定标距试样两种。比例试样是指按相似原理，原始标距 L_0 与试样截面积平方根 $\sqrt{S_0}$ 有一定的比例关系，即 $L_0 = k\sqrt{S_0}$ ， k 取 5.65 或 11.3，前者称短比例试样，后者称长比例试样，并修约到 5mm、10mm 的整倍数长。对圆试样，二者的 L_0 则分别为 $L_0 = 5d_0$ 和 $L_0 = 10d_0$ 。一般推荐用短比例试样。定标距试样是指取规定 L_0 长度，与 S_0 无比例关系。

^①由于材料力学教材仍然采用 GB228-87 标准中的术语，所以本实验指导书仍采用此标准中的性能术语，

但 GB/T228-2002 标准中的性能术语为下屈服强度 R_{eL} 、抗拉强度 R_m 、断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 。

^①由于材料力学教材仍然采用 GB228-87 标准中的术语，所以本实验指导书仍采用此标准中的性能术语，

但 GB/T228-2002 标准中的性能术语为下屈服强度 R_{eL} 、抗拉强度 R_m 、断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 。

图 1-1 为一种拉伸圆试样图形，试样头部与平行部分要过渡缓和，以减少应力集中，其圆弧半径 r 依试样尺寸、材质和加工工艺而定，而 $d_0 = 10\text{mm}$ 的圆试样， $r > 4\text{mm}$ 。试样两端头部形状依试验机夹头形式而定，要保证拉力通过试样轴线，不产生附加弯矩，其长度 H ，至少为夹具长度的 $3/4$ 。中部平行长度 $L_c > L_0 + d$ 。为测定断后伸长率 δ ，要在试样上标出原始标距 L_0 ，可采用划线或打点法，标出一系列等分格标记。

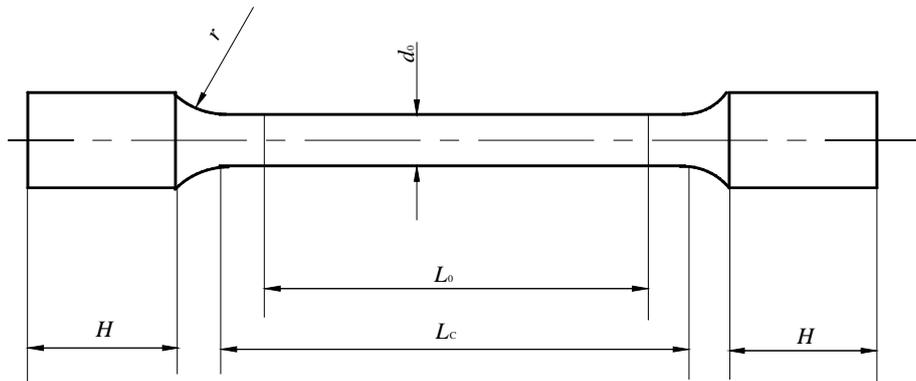


图 1-1 拉伸圆试样

压缩试样常用圆柱形和正方柱形。本实验取圆柱形。为了既防止试样失稳，又使试样中段为均匀单向压缩（距端面小于 $0.5d_0$ 内，受端面摩擦力影响，应力分布不是均匀单向的），其长度一般为 $L = (1 \sim 3.5)d_0$ 。为防止偏心受力引起的弯曲影响，对两端面的不平行度及它们与圆柱轴线的不垂直度也有一定要求。图 1-2 为圆柱形压缩试样图。

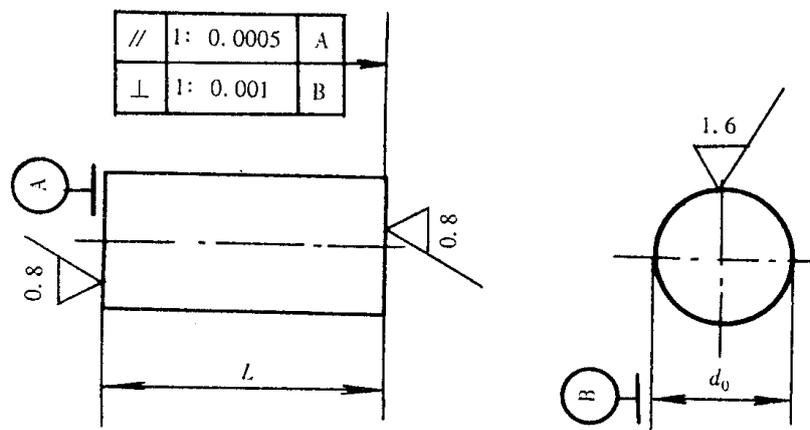


图 1-2 圆柱形压缩试样

2、试样直径测量

对于拉伸试样，取试样工作段的两端和中间共三个截面，每个截面在相互垂直的方向各量取一次直径，取其算术平均值为该截面的平均直径，再取这三个平均直径的最小值作为被测拉伸试样的原始直径。对于压缩试样，在试样的中间截面处相互垂直的方向各量取一

次直径，取其算术平均值作为被测压缩试样的原始直径。

三、 电子万能试验机简介

1、 构造原理

测定材料力学性能的主要设备是材料试验机。一般把同时可以作拉伸、压缩、剪切和弯曲等多种实验的试验机称为万能材料试验机。供静力实验用的万能材料试验机有液压式、机械式和电子机械式等类型。下面介绍的电子万能试验机为电子机械式的试验机，它是电子技术与机械传动相结合的一种新型试验机，以 CSS-44000 型试验机为例，它由主机、控制器、计算机系统及配件所组成。如图 1-3。

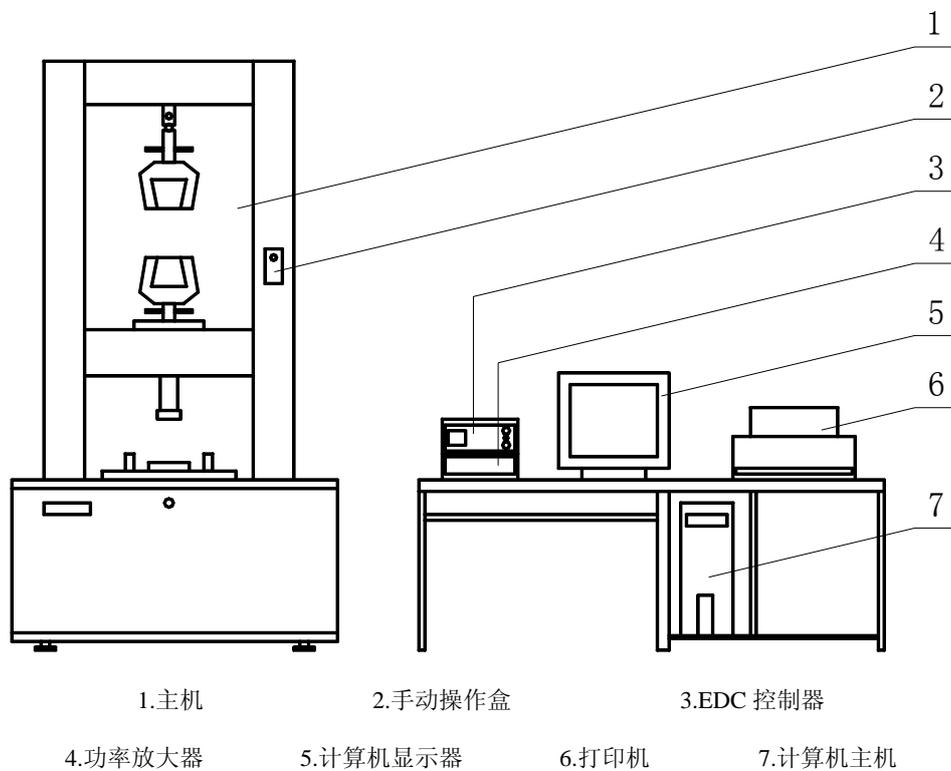


图 1-3 电子万能试验机布局图

(1) 主机部分

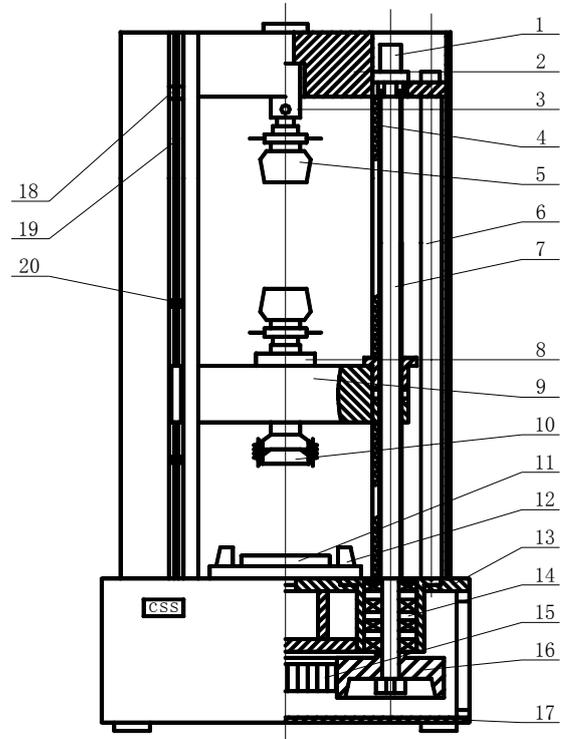
电子万能试验机主机由负荷机架、传动系统、夹持系统和位置保护装置等四部分组成。如图 1-4。

1) 负荷机架

负荷机架由四立柱支承上横梁与工作台板构成门式框架，两丝杠穿过动横梁两端并安装在上横梁与工作台板之间。工作台板由两个支脚支承在底板上，且机械传动减速器也固定在工作台板上。工作时，伺服电机驱动机械传动减速器，进而带动丝杠转动，驱使动横梁上下移动。试验过程中，力在门式负荷框架内得到平衡。

2) 传动系统

传动系统由数字式脉宽调制直流伺服系统、减速装置和传动带轮等组成。执行元件采用永磁直流伺服电机，其特点是响应快，而且该电机具有高转矩和良好的低速性能。由与电机同步的高性能光电编码器作为位置反馈元件，从而使动横梁获得准确而稳定的试验速度。



- | | | |
|-----------|---------|----------|
| 1.位移编码传感器 | 2.上横梁 | 3.万向联轴节 |
| 4.防尘罩 | 5.拉伸夹具 | 6.立柱 |
| 7.滚珠丝杆副 | 8.负荷传感器 | 9.活动横梁 |
| 10.上压头 | 11.下压板 | 12.弯曲试台 |
| 13.工作台 | 14.轴承组 | 15.圆弧齿形带 |
| 16.大带轮 | 17.底板 | 18.导向节 |
| 19.限位杆 | 20.限位环 | |

图 1-4 电子式万能试验机主机结构图

3) 夹持系统

对于 100kN 和 200kN 规格的电子万能试验机，在拉伸夹具的上夹头均安装有万向联轴节，它的作用是消除由于上、下拉伸夹具的不同轴度误差带来的影响，使试样在拉伸过程中只受到沿轴线方向的单向力，并使该力准确地传递给负荷传感器。但是 500kN 规格的电子万能试验机的夹具不用万向联轴节，而是通过连杆直接与夹具刚性连接。对于双空间结构的电子万能试验机（如 100kN 和 200kN 规格的试验机），下夹头安装在动横梁上。对于单空间结构的电子万能试验机（如 500kN 的试验机），下夹头直接安装在工作台板上。

4) 位置保护装置

动横梁位移行程限位保护装置由导杆、上、下限位环以及限位开关组成，安装在负荷机架的左侧前方。调整上、下限位环可以预先设定动横梁上、下运动的极限位置，从而保证当动横梁运动到极限位置时，碰到限位环，进而带动导杆操纵限位开关触头切断驱动电源，动横梁立即停止运行。

(2) 数字控制器

数字控制系统由德国 DOLI 公司的 EDC120 数字控制器和直流功率放大器组成。其中功率放大器的作用在于功率放大、驱动和控制电机。通常情况下，数字控制器与计算机相联，利用计算机软件控制和完成各种实验。

2、测量系统

电子式万能试验机测量系统包括载荷测量、试样变形测量和活动横梁的位移测量等三部分。

(1) 载荷测量

载荷测量是通过负荷传感器来完成的，本实验所用的负荷传感器为应变片式拉、压力传感器，由于这种传感器以电阻应变片为敏感元件，并将被测物理量转换为电信号，因此便于实现测量数字化和自动化。应变片式拉、压力传感器有圆筒式、轮辐式等类型，本试验机上采用轮辐式传感器。见图 1-5 所示，应变片通常接成全桥以提高其灵敏度和实现温度补偿。

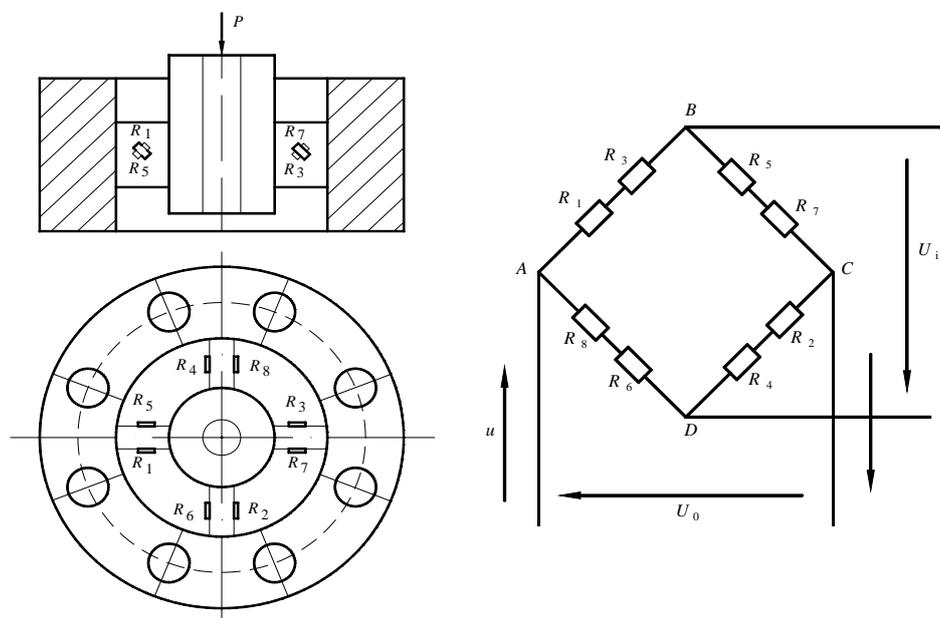


图 1-5 轮辐式拉压传感器

轮辐式拉、压力传感器的弹性元件为四根应变梁，从图中可知轮轴处受到载荷 P 作用后，四根应变梁受到剪切力，在梁的 45° 方向和 -45° 方向分别受到拉应变和压应变，故

与传感器受拉方向成 45° 方向贴四枚应变片 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 ，与传感器受拉方向成 -45° 方向贴四枚应变片 R_5 、 R_6 、 R_7 、 R_8 ，然后把对称且同一方向的应变片两两串联组成测量电桥。当载荷变化时被测应变片的电信号量同时也发生变化，应变片电测原理详见 § 2-2 应变电测原理简介。

(2) 变形测量

试样的伸长变形量是通过变形传感器来测得的。本实验所用的变形传感器为应变式轴向引伸仪。其外形、结构原理及应变测量桥路见图 1-6 所示。引伸仪主要由刚性变形传递杆、

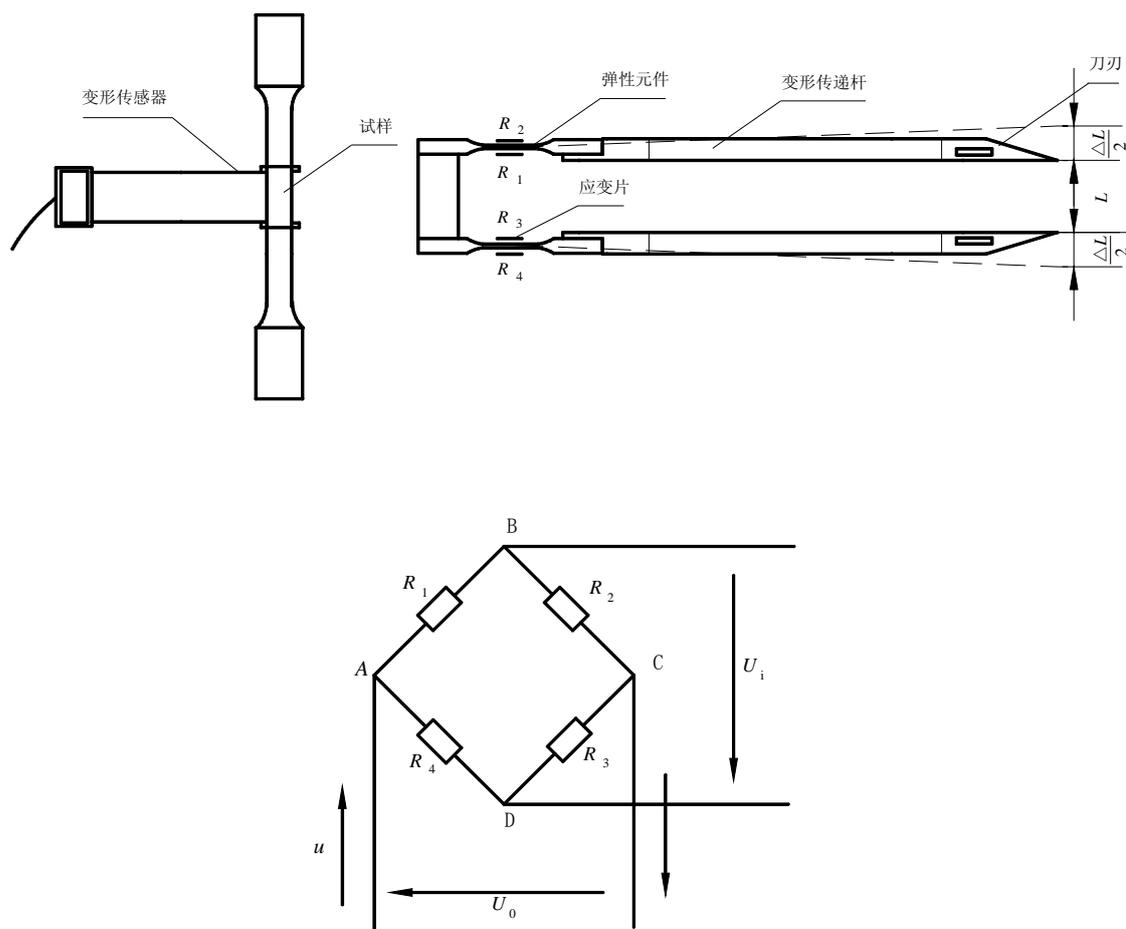


图 1-6 变形传感器外形、结构原理及应变测量桥路图

弹性元件及贴在其上的应变片和刀刃等部件所组成。 L 为引伸仪的初始标距，其长度靠定位销插入销孔来确定。实验前，将引伸仪装夹于试样上，当两刀刃以一定压力与试样接触，刀刃就与接触点保持同步移动，试样变形就准确地传递给引伸仪，该压力通过绑在试样上的橡皮筋得到，于是，在传递杆带动下，引伸仪的弹性元件产生弯曲应变 ε 。从几何关系可以得到，在一定范围内 ΔL 与 ε 可视为正比关系，故测得 ε 后，就可知道试样的伸长 ΔL ，然后通过控制器并经放大后输入计算机。

(3) 位移测量

活动横梁相对于某一初始位置的位移量是借助丝杠的转动来实现的，滚珠丝杠转动时，装在滚珠丝杠上的光电编码传感器输出的脉冲信号经过转换而测得。

3、操作步骤

(1) 启动计算机后，打开功率放大器电源开关，控制器（上）出现PC-CONTROL后，双击桌面CSS图标，然后分别点击**联机**钮和**启动**钮。

(2) 在菜单栏选择**条件**，点击**条件读盘**，选**低碳钢拉伸实验**、**压缩实验**或**铸铁拉伸实验**、**压缩实验**，输入试验条件。除数据文件名、试样尺寸、实验者、实验日期、年级专业外，其他选项也可使用默认值。

(3) 安装试样，通过手动盒调节机器横梁升降，使之适合拉伸或压缩实验要求。调整时**密切观察横梁与上夹头及下支座间的空余距离，严防接触过载，损坏机器！**在夹紧拉伸试样前，鼠标右键点击力显示框内清零。

(4) 根据实验要求安装引伸计，安装好后拔出定位销。

(5) 由于夹具原因在夹紧试样时，试样可能已经受力，请用鼠标点击**上升**和**暂停**钮卸除载荷。

(6) 开始试验，请点击**试验**钮。如安装了引伸计，当变形超过设定值时机器会发出提示音，提醒你摘引伸计，此时点击**摘引伸计**钮，请马上摘除引伸计，试验继续进行。当试样破坏后按**结束试验**钮并保存结果，对于低碳钢压缩实验，当加载到 100 kN左右时请结束试验。

四、 实验原理

1、 低碳钢拉伸

低碳钢是工程上广泛使用的材料。低碳钢一般是指含碳量在 0.3% 以下的碳素结构钢。本次实验采用牌号为 Q235 的碳素结构钢，其含碳量在 0.14~0.22% 范围内，把试样装在电子万能试验机上进行拉伸实验，拉力由负荷传感器测得，位移由光电编码传感器测得，变形由安装在试样上的电子引伸计测得。由于负荷传感器、位移传感器和电子引伸计都通过数字控制器与计算机相连接，因此，低碳钢拉伸时的力和位移曲线、力和变形的关系曲线都直接反映在了显示器上，并保存于计算机。通过一定的计算软件，对应低碳钢拉伸时的应力—应变的关系曲线也可获得。

典型的低碳钢拉伸时力和变形的关系曲线（ $F-\Delta L$ 曲线），可分为四个阶段（图 1-7）。

(1) 弹性阶段

拉伸初始阶段（OA）段为弹性阶段，在此阶段若卸载，试样的伸长变形即可消失，即弹性变形是可以恢复的变形。在此阶段，力 F 与变形 ΔL 成正比关系为一直线。由于弹性模量是材料在线性弹性范围内的轴向应力与轴向应变之比，即 $E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F}{S_0} / \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right) = \frac{F \cdot L_0}{\Delta L \cdot S_0}$ ，而 $\frac{F}{\Delta L}$ 为直线OA的斜率。因此直线OA的斜率乘以 L_0 / S_0 即为低碳钢材料的弹性模量 E 。弹性模量 E 又称杨氏模量。

(2) 屈服阶段

继续增加载荷，当试验进行到A点以后，试样继续变形，但力却不再增加，而是出现一段比较平坦的波浪线。若试样表面加工光洁，那么此时可看到 45° 倾斜的滑移线。这种现象称为屈服，即进入屈服阶段（AB段）。其特征值屈服强度表征材料抵抗永久变形的能力，是材料重要的力学性能指标。屈服强度分为上屈服强度和下屈服强度，分别用 σ_{su} 和 σ_{sL} 表示，工程上通常采用下屈服强度 σ_{sL} 作为设计依据。

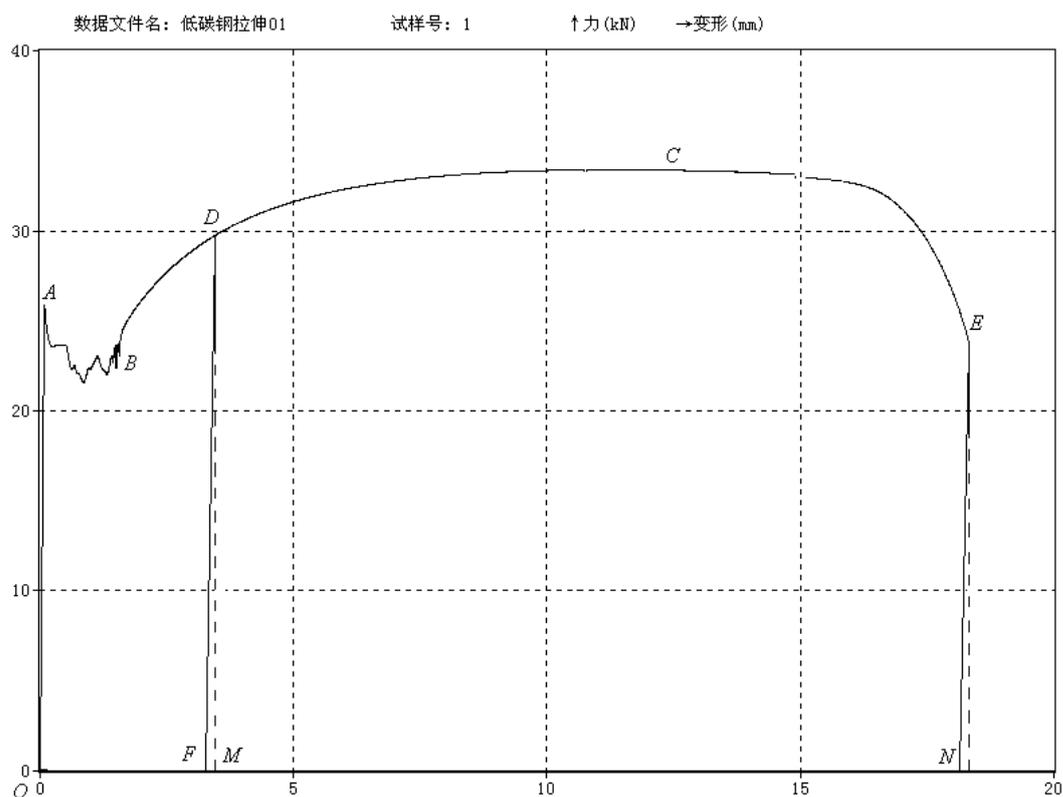


图 1-7 低碳钢拉伸时的 $F-\Delta L$ 曲线

(3) 强化阶段

过了屈服阶段（B点），力又开始增加，曲线亦趋上升，说明材料组织结构发生变化，得到强化，需要增加载荷，才能使材料继续变形。随着载荷增加，曲线斜率逐渐减小，直到C点，达到峰值，该点为抗拉极限载荷，即试样能承受的最大载荷。此阶段（BC段）称强

化阶段，若在强化阶段某点 D 卸去载荷，可看到此时曲线沿与弹性阶段 (OA) 近似平行的直线 (DF) 降到 F 点，若再加载，它又沿原直线 (DF) 升到 D 点，说明亦为线弹性关系，只是比原弹性阶段提高了。 D 点的变形可分为两部分，即可恢复的弹性变形 (FM 段) 和残余 (永久) 的塑性变形 (OF 段)。这种在常温下冷拉过屈服阶段后呈现的性质，称为冷作硬化。在工程上常利用冷作硬化来提高钢筋和钢缆绳等构件在线弹性范围内所能承受的最大载荷，但此工艺同时亦降低了材料的塑性性能，如图 1-7 所示，冷拉后的断后伸长 FN 比原来的断后伸长 ON 减少了。这种冷作硬化性质，只有经过退火处理，才能消失。

(4) 颈缩阶段

材料强化到达最高点 C 以后，试样出现不均匀的轴线伸长，在某薄弱处，截面明显收缩，直到断裂，称颈缩现象。因截面不断削弱，承载力减小，曲线呈下降趋势，直到断裂点 E ，该阶段 (CE 段) 为颈缩阶段。颈缩现象是材料内部晶格剪切滑移的表现。

2、铸铁拉伸

铸铁拉伸图 (见图 1-8) 比低碳钢拉伸图简单，在变形很小时就达到最大的载荷而突然发生断裂破坏，没有屈服和颈缩现象，其抗拉强度也远远小于低碳钢的抗拉强度。

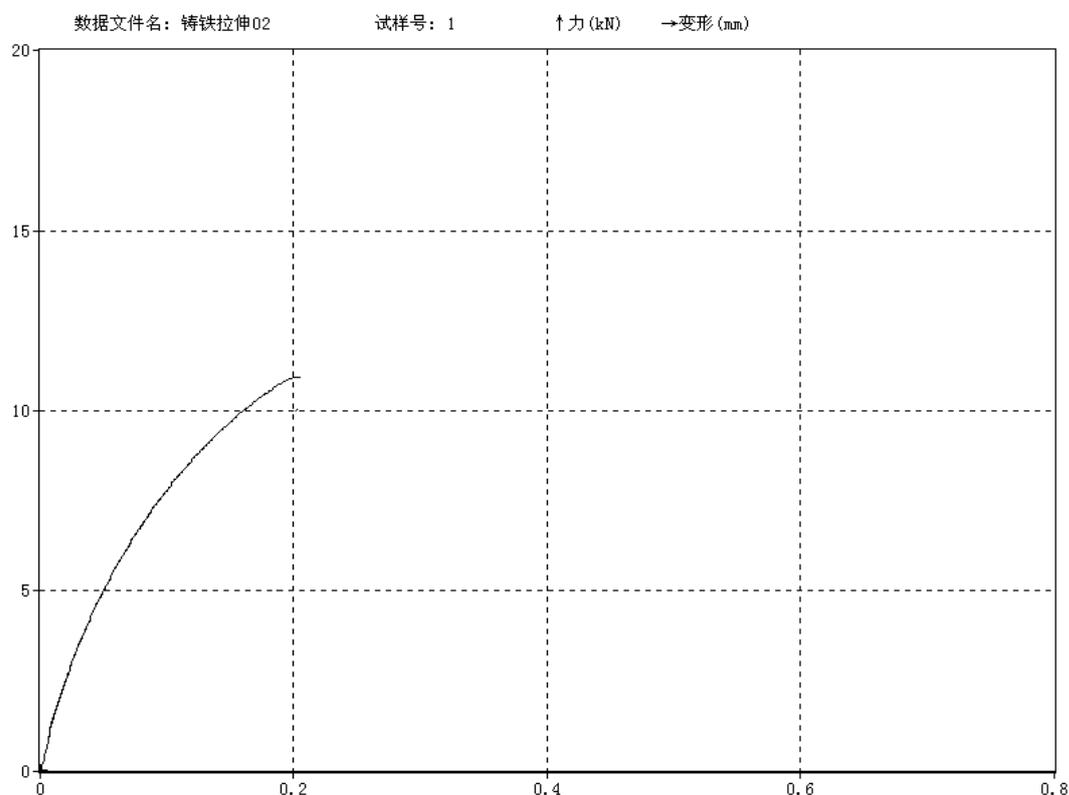


图 1-8 铸铁拉伸时的 $F-\Delta L$ 曲线

3、低碳钢压缩

低碳钢压缩图见图 1-9。它也有屈服阶段，当载荷超过屈服值以后，由于低碳钢是塑性材料，继续加载也不会出现明显破坏，只会越压越扁，同时试样的横截面面积也越来越大，这就使得低碳钢试样的抗压强度无法测定。由于试样两端面受到摩擦力的影响，不可能象其中间部分那样自由地发生横向变形，因此试样变形后逐渐被压成鼓形，如果再继续加载，试样则由鼓形再变成象棋形状甚至饼形。

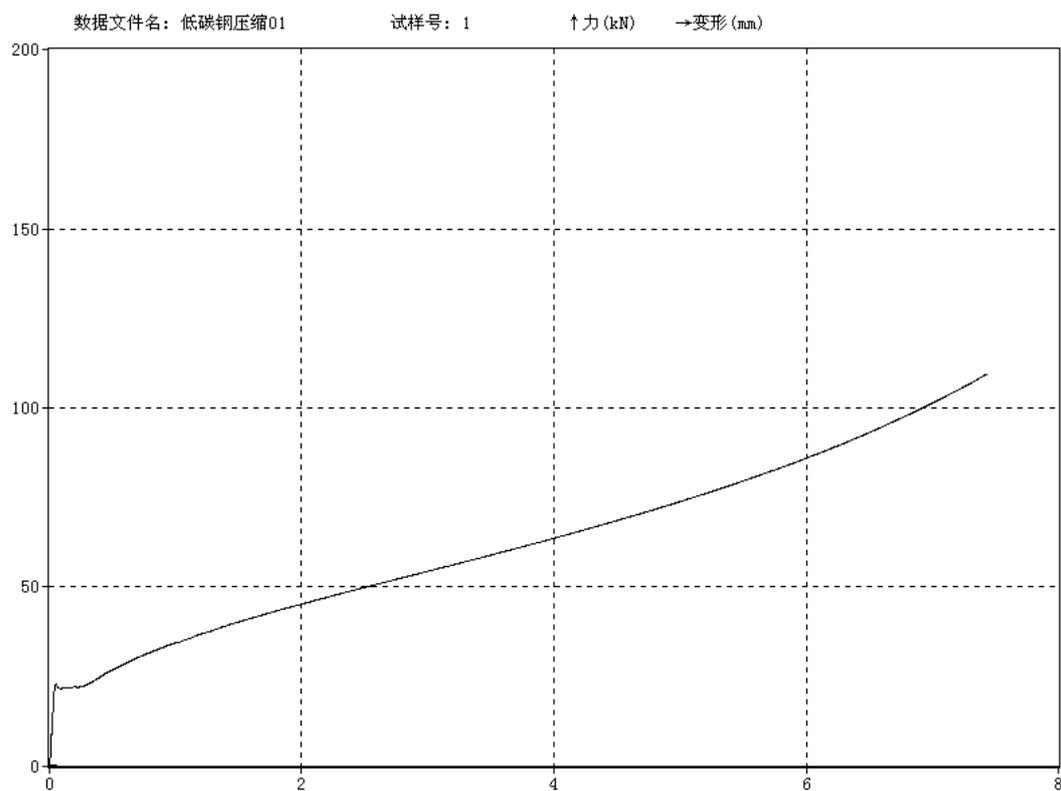


图 1-9 低碳钢压缩时的 $F-\Delta L$ 曲线

4、铸铁压缩

铸铁压缩图（见图 1-10）与铸铁拉伸图相似，不过其抗压强度要比其抗拉强度大得多。

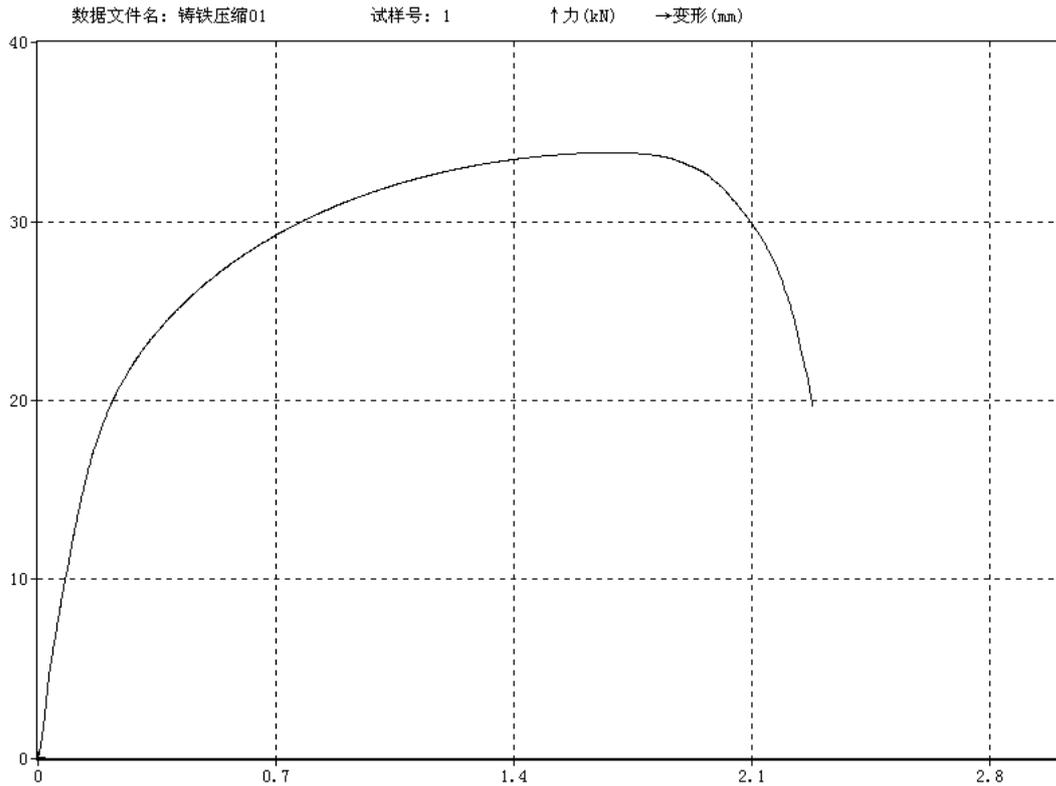


图 1-10 铸铁压缩时的 $F-\Delta L$ 曲线

试样破坏时断裂面大约和试样轴线成 45° ，说明破坏主要是由切应力引起的。

五、 拉伸、压缩力学性能的试验定义和测定

1、屈服强度 σ_s 、上屈服强度 σ_{su} 、下屈服强度 σ_{sL} 、压缩时屈服强度 σ_{sc}

在屈服阶段，若载荷是恒定的，则此时的应力称屈服强度 σ_s ；若载荷下降或波动，则首次下降前的最大应力为上屈服强度 σ_{su} ，波动的最小应力为下屈服强度 σ_{sL} 。本试验系测定材料的下屈服强度 σ_{sL} 。

压缩时，则不分上、下屈服强度，把上述方法测定的 σ_s 或 σ_{sL} 当作屈服强度 σ_{sc} 。

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0}, \quad \sigma_{su} = \frac{F_{su}}{S_0}, \quad \sigma_{sL} = \frac{F_{sL}}{S_0}, \quad \sigma_{sc} = \frac{F_{sc}}{S_0}$$

2、抗拉强度 σ_b

拉伸过程中最大载荷与原始横截面积之比称为抗拉强度 σ_b 。

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0}$$

3、抗压强度

试样受压至破坏前承受的最大载荷与原始横截面积之比称为抗压强度 σ_{bc} 。不发生破裂

的材料，如低碳钢则没有抗压强度极限。

4、断后伸长率 δ

试样拉断后，标距内的伸长与原始标距 L_0 的百分比称为断后伸长率 δ ：

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

其中， L_1 是试样断后标距，测量时将断后的试样按原样紧密对接在同一轴线上量取。短、长比例试样的断后伸长率分别以符号 δ_5 、 δ_{10} 表示。定标距试样的断后伸长率应附以该标距数值的角注，例如： $L_0 = 100\text{ mm}$ 或 200 mm ，则分别以符号 $\delta_{100\text{mm}}$ 或 $\delta_{200\text{mm}}$ 表示。

许多塑性材料在断裂前发生颈缩（如低碳钢），会发生不均匀伸长（断口处伸长最大），于是，断口发生在标内的不同位置，量取的 L_1 也会不同。为具有可比性，当断口到最邻近标距端点的距离大于 $\frac{1}{3}L_0$ 时，直接测量断后标距；当断口到最邻近标距端点的距离小于或等于 $\frac{1}{3}L_0$ 时，需采用断口移中的办法。具体方法如下：

在长段上从拉断处 O 取基本等于短段的格数，得 B 点，此时若剩余格数为偶数（见图 1-11(a)），取剩余格数一半得 C 点，若此时剩余格数为奇数（见图 1-11(b)），取剩余格数减 1 后的一半得 C 点，加 1 后的一半得 C_1 点，从而得到移位后的断后标距 L_1 分别为：

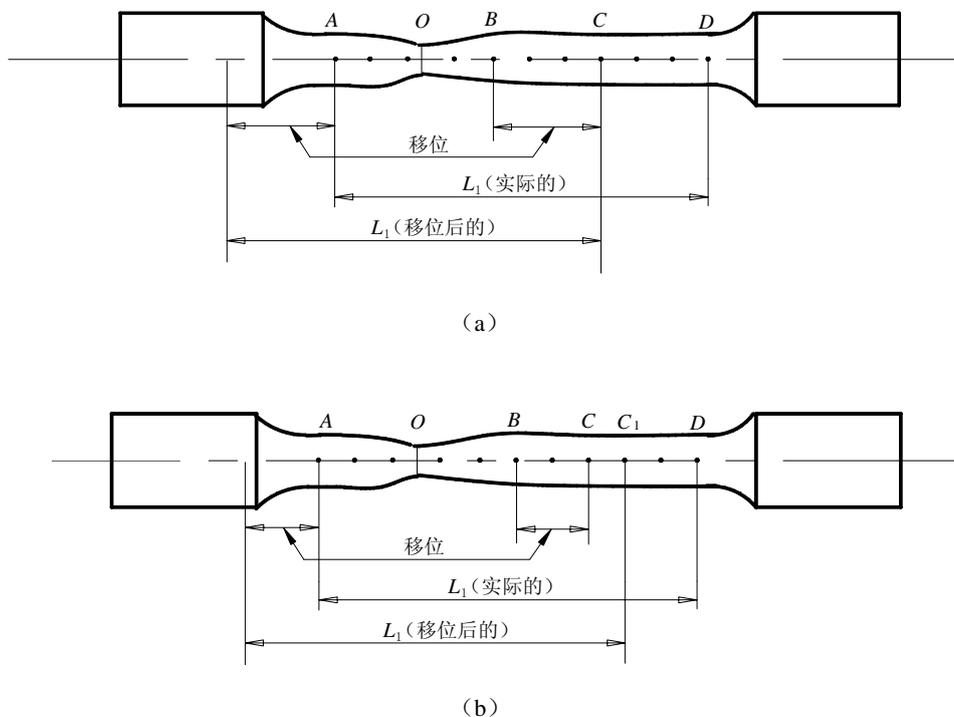


图 1-11 断口移中示意图

$$L_1 = AB + 2BC \quad (\text{当剩余格数为偶数时})$$

$$L_1 = AB + BC + BC_1 \quad (\text{当剩余格数为奇数时})$$

5、断面收缩率 ψ

原始横截面积 S_0 与断后最小横截面积 S_1 之差除以原始截面积的百分率称为断面收缩率

ψ :

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$$

颈缩处最小横截面积 S_1 的测定，是在断口按原样沿同一轴线对接后，在颈缩最小处两个相互垂直的方向上测量其直径，取两者的算术平均值计算。

六、思考题

1. 材料相同，直径相同的长比例试件 $L_0 = 10d_0$ 和短比例试样 $L_0 = 5d_0$ ，其拉断后伸长率 δ 是否相同？
2. 试件的截面形状和尺寸对测定弹性模量值是否有影响？
3. 在同一温度，以不同的加载速度进行拉伸实验，所得结果是否相同？是否可以通过拉伸实验来测试出材料的泊松比 μ 值？

§ 2—2 扭转实验

扭转实验是对杆件施加绕轴线转动的力偶矩，以测定其扭转变形和力学性能的试验，是材料力学的一项重要试验。

一、实验目的

2、通过对低碳钢和铸铁这两种典型材料在扭转破坏过程的观察和对试验数据、断口特征的分析，了解它们的扭转力学性能特点。

3、了解电子式扭转试验机的构造、原理和操作方法。

4、利用电子式扭转试验机测定低碳钢扭转时的剪切屈服极限 τ_s 、剪切强度极限 τ_b 和单位扭角 θ ；以及测定铸铁扭转时的剪切强度极限 τ_b 和单位扭角 θ 。

二、试样

1、试样制备

本实验采用圆形试样，直径为 10mm，夹持头部根据试验机夹头结构而定，如图 3-1 所示。

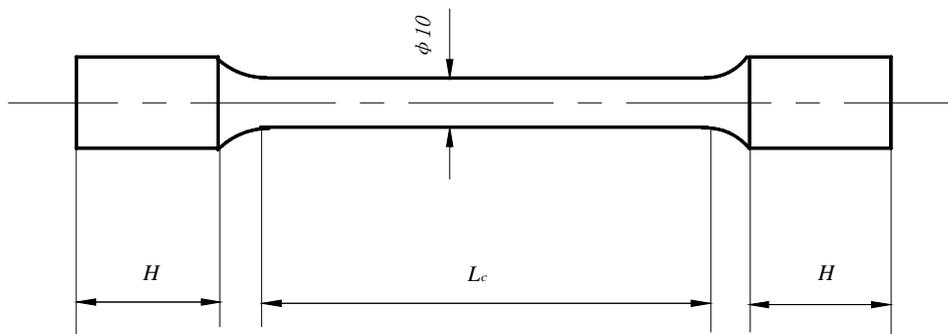


图 3-1 扭转试样

2、试样直径测量

取试样标距的两端和中间共三个截面，每个截面在相互垂直的方向各量取一次直径，取其算术平均值为平均直径，取三个截面中最小的平均直径作为被测试样的原始直径。

三、实验原理

1、电子式扭转试验机

电子式扭转试验机由主机和计算机系统所组成。见图 3-2。

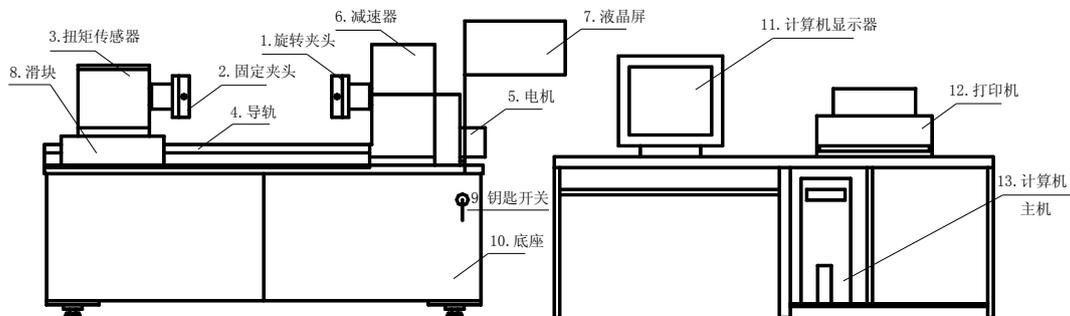


图 3-2 电子式扭转试验机

电子式扭转试验机主机由加载机架、测力单元、显示器、试验机附件等组成。如图 3-2。试样安装在旋转夹头 1 和固定夹头 2 之间，安装在导轨 4 上的加载机构，由伺服电机 5 的带动，通过减速器 6 使夹头 1 旋转，对试样施加扭矩。试验机的正反加载和停车，可按液晶屏 7 上面的标志按钮进行操作。测力单元，通过与固定夹头相连的扭矩传感器 3 输出电信号，在液晶屏 7 和计算机上同步显示出来，并保存于计算机。

2、JS-1 型测定剪切弹性模量 G 实验装置

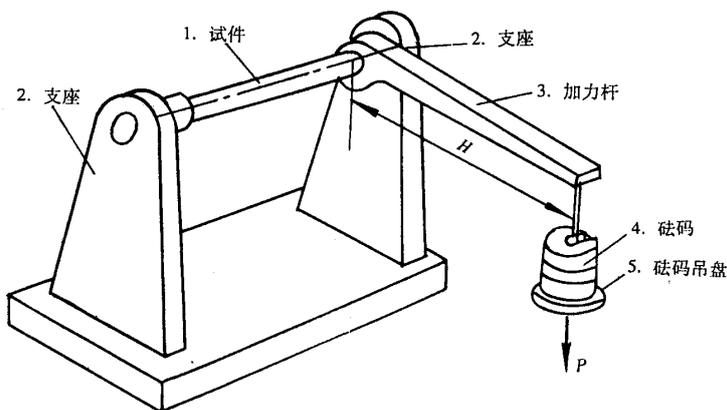


图 3-3 JS-1 型测 G 加力架

该装置是用来验证剪切胡克定律和测定剪切弹性模量 G 的。它由两部分组成，第一部分是加力部分，结构如图 3-3 所示。试样 1 安装在两支座 2 之间，一端固定，一端可转动，可转动端与一臂长为 H 的水平加力杆 3 固定，加力杆另一端有砝码吊盘 5，可置砝码 4 加载荷 P ，因此，试样扭矩 $T = PH$ 。第二部分是装在试样上的千分表测扭角仪，其结构如图 3-4 所示。它由两个夹具 6、8 和一个千分表 7 组成，两个夹具可安装在试样相距为标距 l_0 的两

个截面处，并在至试样轴线距离为 h 处各伸出与试样平行的传递杆 10、11，两传递杆位置重叠，一杆安装固定千分表 7，一杆具有垂直千分表测杆的平面挡板 9。测杆顶端与平面挡板保持接触，当夹具随试样相对转动 $\Delta\phi$ 角时，两传递杆间发生 $f\Delta s = h\Delta\phi$ 的相对位移，并被千分表测出。我们即可从千分表读数增量 Δs 和放大敏感度 $f = 0.001 \text{ mm/格}$ ，推算出试样标距 l_0 之间的扭角增量：

$$\Delta\phi = \frac{f\Delta s}{h} \quad (a)$$

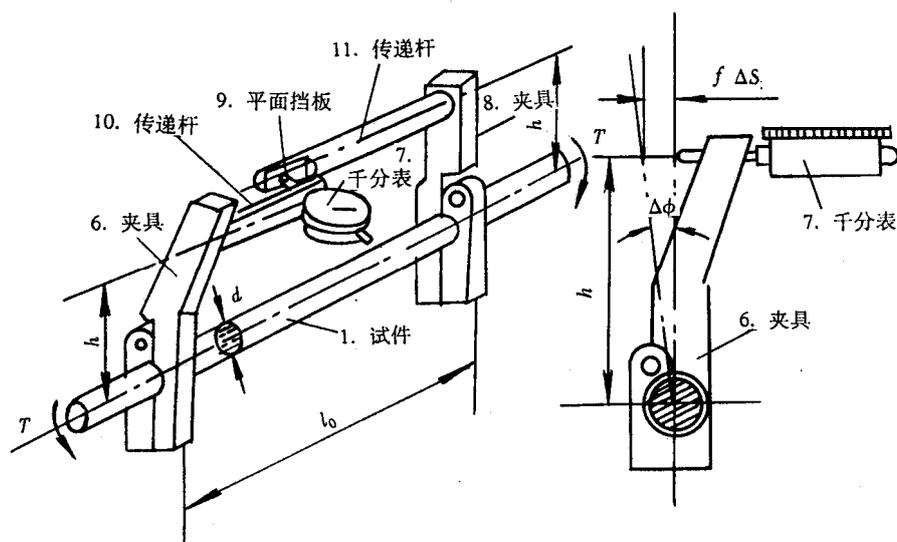


图 3-4 千分表扭角仪结构和原理

由图 3-5 可看出切应变

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta\phi R}{l_0}$$

将式 (a) 代入，即

$$\Delta\gamma = \frac{f\Delta s R}{hl_0} = \frac{f\Delta s d}{2hl_0} \quad (3-1)$$

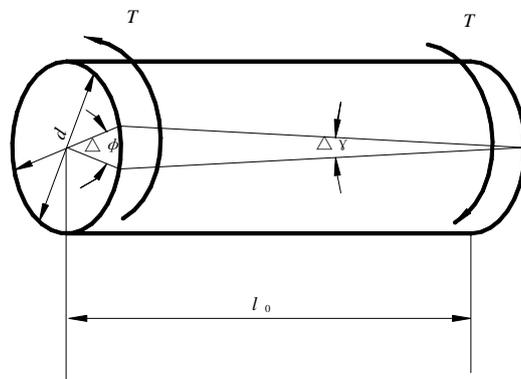


图 3-5 扭角 ϕ 与切应变 γ 的关系

3、应变片和切应变 γ 的确定

在前面 § 2-2 已经介绍了电阻应变片的电测原理，我们知道，电阻应变片可测定线应变，而切应变是不能直接测得的，但线应变可以通过理论推导转换成切应变。

当试样受扭转时，表面处单元体为纯剪切状态，其主拉应力（应变）和主压应力（应变）方向分别与试件轴线成 $+45^\circ$ 和 -45° ，且绝对值相等。单元体如图 3-6 所示。

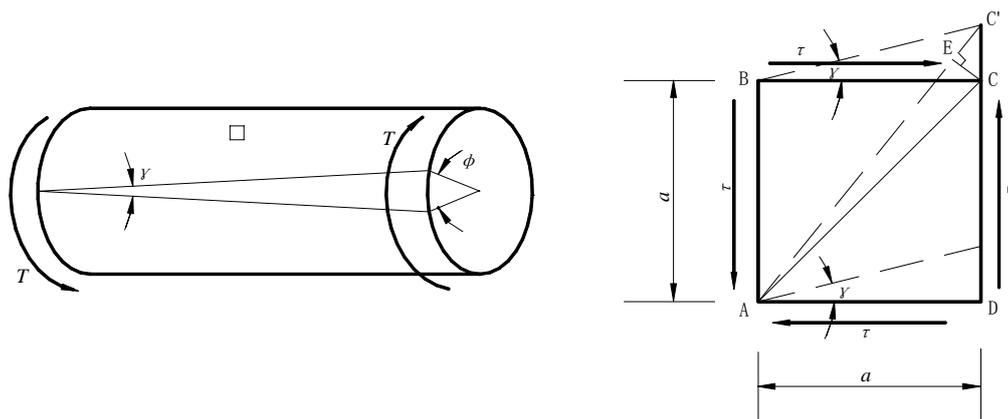


图 3-6 线应变 ε_1 与切应变 γ 的转换

由应变定义，对角线 AC 的线应变为

$$\varepsilon_1 = \frac{AC' - AC}{AC} = \frac{C'E}{AC}$$

由于 $C'E = CC' \sin 45^\circ = CC' \frac{\sqrt{2}}{2}$

而 $CC' = a\gamma$

于是 $C'E = a\gamma \frac{\sqrt{2}}{2}$

又由于 $AC = a\sqrt{2}$

所以 $\varepsilon_1 = \frac{\gamma}{2}$

即 $\gamma = 2\varepsilon_1$ (3-2)

由此可见，只要测得与试样轴线成 45° 方向的线应变 ε_1 ，就能确定试样受扭后的切应变 γ 。为此，专门设计了测定切应变的电阻应变片，其结构如图 3-7 所示。实际上，该电阻应变片是由电阻丝与中心线成 $\pm 45^\circ$ 的两片应变片合成。粘贴时，应变片的中心线与试样轴线平行，两片应变片的电阻丝方向各与主拉（压）应力（应变）方向一致，以能直接测得主应变 ε_1 、 ε_3 。

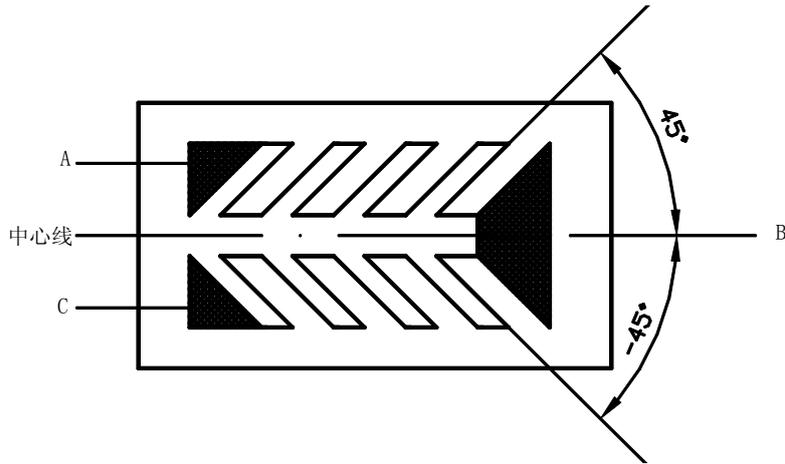


图 3-7 剪切应变片

四、 扭转力学性能试验定义^①

剪切弹性模量 G (切变模量 G) ——剪应力 (切应力) 与剪应变 (切应变) 成线性比例关系范围内的切应力与切应变之比:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3-3)$$

剪切屈服极限 τ_s (屈服点 (扭转) τ_s) ——扭转试验中, 扭角增大而扭矩不增加 (保持恒定) 时, 按弹性扭转公式计算的切应力:

$$\tau_s = \frac{T_s}{W_t} \quad (3-4)$$

其中 W_t 为抗扭截面系数, $W_t = \frac{\pi d^3}{16}$ 。

剪切下屈服极限 τ_{sL} (下屈服点 (扭转) τ_{sL}) ——以屈服阶段的最小扭矩, 按弹性扭转公式计算的切应力:

$$\tau_{sL} = \frac{T_{sL}}{W_t} \quad (3-5)$$

值得指出的是, 扭矩下屈服极限 τ_{sL} 与拉伸下屈服极限 σ_{sL} 试验定义有所不同。拉伸时, 要考虑到“初始瞬时效应”现象, 即取剔除了第一次波动后的最小力值。

剪切强度极限 τ_b (扭转强度 τ_b) ——试样扭断前承受的最大扭矩, 按弹性扭转公式计算的切应力:

$$\tau_b = \frac{T_b}{W_t} \quad (3-6)$$

^① 本节提出的性能术语定义, 均按国家标准 GB10128-88, GB10623-89 的论点叙述, 与课本上有所差异, 但名称仍按课本给出, 其后括号内, 则注出国家标准规定的术语。

真实剪切强度极限 τ_{tb} (扭转强度 τ_{tb}) —— 试样扭断前承受的最大扭矩, 按刘德维克-卡尔曼公式计算的切应力。

如上所述, 名义扭转应力如 τ_{sL} 、 τ_b 等, 是按弹性扭转公式计算, 它是假设试件横截面上的切应力为线性分布, 外表面最大, 形心为零, 这在线弹性阶段是对的, 如图 3-8 (b) 所示, 当超过此阶段, 处于塑性扭转时, 塑性变形向中心区扩展, 此时, 截面应力分布不再呈线性, 如图 3-8 (c)、(d)、(e) 所示。如果仍用线弹性扭转理论计算扭转应力, 严格地讲是不合理的, 所以, 有时要计算真实扭转应力。

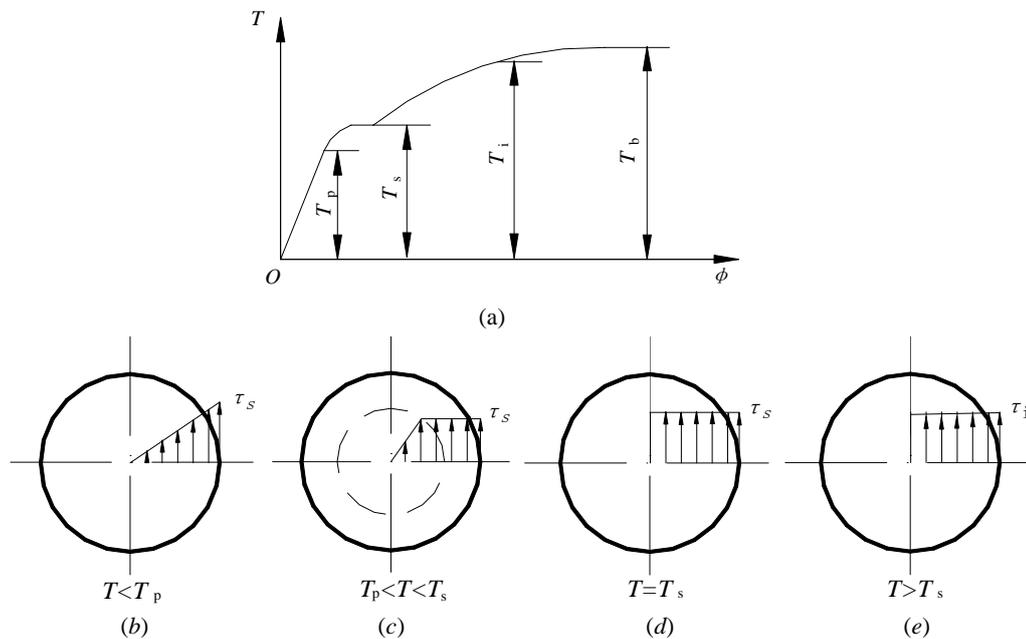


图 3-8 扭转试件在不同扭矩下截面应力分布

实际测定 τ_{tb} 时, 可采用图解法, 见图 3-9。自动记录系统记录了某材料的 $T-\phi$ 曲线, 在断裂点 K 处作该点曲线的切线, 并交扭矩 T 轴于 T_B , 取 K 点扭矩 T_K 和 T_B , 由下列公式计算 τ_{tb} :

$$\tau_{tb} = \frac{1}{4W_t} (4T_K - T_B) \quad (3-7)$$

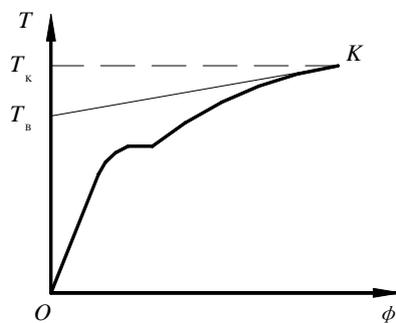


图 3-9 真实剪切强度极限 τ_{tb} 图解法测定

一般情况下, 低碳钢断裂点 K 处曲线为水平线, $T_B \approx T_K = T_b$, 由上式可推得

$\tau_{tb} = \frac{3}{4} \times \frac{T_b}{W_t}$ 。实际上，从图 3-8 (e) 横截面的切应力分布图上看，整个截面上各点的应力

近似相同，在断裂点为 τ_{tb} ，用静力平衡关系同样可推出下式：

$$T_b = \int_A \tau_{tb} \rho dA = \tau_{tb} \int_A \rho dA = \frac{4}{3} \tau_{tb} W_t$$

故有

$$\tau_{tb} = \frac{3}{4} \times \frac{T_b}{W_t}$$

低碳钢的屈服阶段，也有类似情况。真实剪切屈服极限为

$$\tau_{ts} = \frac{3}{4} \times \frac{T_s}{W_t}$$

对于铸铁等脆性材料，试样受扭直至破坏，其 $T-\phi$ 线并非一直线，但可近似地看作为一直线，因此，剪切强度极限 τ_b 仍用

$$\tau_b = \frac{T_b}{W_t}$$

五、实验步骤

1、扭转破坏实验

- (1) 打开扭转试验机右侧钥匙电源开关，按操作盘上**5**键，清零。
- (2) 打开电脑，双击桌面**扭转机**图标，输入用户名、密码。
- (3) 安装试样并加套管用力扳紧试样，在扳紧和放松试样时请注意手的安全。
- (4) 录入试验参数，按**录入**图标，点**试样组编号**，按**增加扭**，输入试验参数后，按**保存**。
- (5) 点击刚输入的组编号，按**增加扭**，输入试样参数。建议在试样序号栏输入：1 低碳钢、2 铸铁，机器按序号顺序试验。输完后按**保存**并退出。
- (6) 开始试验，点击**试验**图标，按**联机**钮，选中要测量的参数，输入完后按**试验开始**钮。
- (7) 打印结果，返回主界面后，按**分析打印**图标，选择试样组号，按**检索**钮，选中要分析的试样编号，预览并打印结果。

2、测剪切弹性模量 G

本实验在 JS-1 剪切弹性模量实验装置上进行。加载采用分级增量法，每级增加 10N，共加至 40N。每加一级载荷，测读一次读数，重复进行三次。

(1) 测法测剪切弹性模量 G

试样的相对两边，各粘贴好一片剪切应变片，方向按前述要求，每片各有承受主拉应力和主压应力的两个敏感栅，可与应变仪接成半桥自补偿桥路或全桥自补偿桥路。

根据试件受扭方向，判断四个敏感栅是受拉还是受压。当用半桥方式时，装好应变仪半桥连接片，把受拉片接入 AB ，受压片接入 BC ；当用全桥方式时，拆除连接片，把两个受拉片接入 AB 、 CD ，受压片接入 BC 、 DA 。桥路接好后，调灵敏系数，预调平衡，即可加载测读。

因为主拉应变和主压应变绝对值相等，符号相反，所以，从实验二所述电测原理的式 (2-9) 可推知：

$$\text{半桥方式时, } \varepsilon_{ds} = 2\varepsilon_1$$

$$\text{全桥方式时, } \varepsilon_{ds} = 4\varepsilon_1$$

代入式 (3-2)，则得到欲求切应变分别如下：

$$\text{半桥方式时, } \gamma = \varepsilon_{ds} \text{ 或 } \Delta\gamma = \Delta\varepsilon_{ds} \quad (3-8a)$$

$$\text{全桥方式时, } \gamma = \frac{\varepsilon_{ds}}{2} \text{ 或 } \Delta\gamma = \frac{\Delta\varepsilon_{ds}}{2} \quad (3-8b)$$

(2) 扭角仪测剪切弹性模量 G

按前述要求装好扭角仪。先读取千分表初读数 s (或归零)，然后加载，读取相应各级读数。

前面已推导过式 (3-1)，切应变增量为

$$\Delta\gamma = \frac{f\Delta s d}{2hl_0} \quad (3-9)$$

(3) 剪切弹性模量计算

求出各级读数增量的平均值，利用式 (3-1)、式 (3-8) 得到各级增量下的平均切应变增量 $\overline{\Delta\gamma}$ ，再根据试样尺寸和载荷增量，算得各级增量的切应力增量 $\Delta\tau$ ，最后，代入剪切虎克定律，求得剪切弹性模量 G 。

六、思考题

1. 扭转试件各点受力和变形并不均匀，为什么可由它验证剪应力与剪应变的线性关系？
2. 如木材或竹材制成纤维平行于轴线的园截面试件，受扭转时试件将如何破坏？
3. 比较低碳钢扭转和拉伸的实验，二者试件材料破坏过程有何差异？一根悬挂矩形梁受纯扭转荷载作用，如何测试最大的剪应力？

§ 2—3 梁弯曲正应力实验

一、实验目的

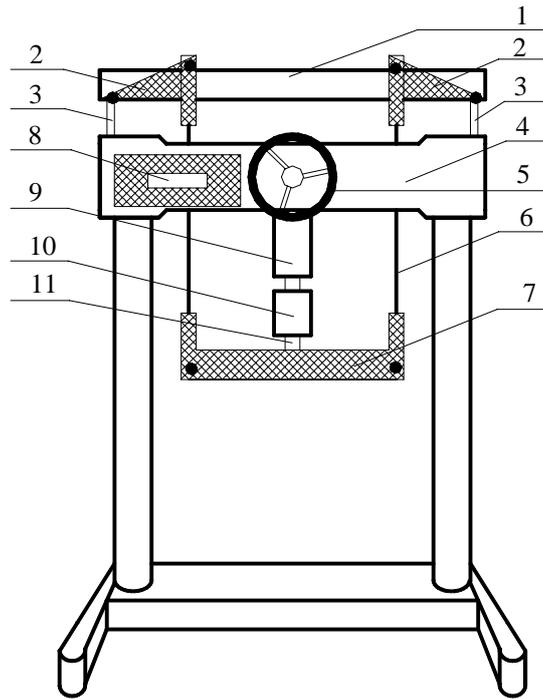
- 1、测定钢梁纯弯曲段横截面上的正应力大小及分布规律，并与理论值比较，以验证弯曲正应力公式。
- 2、了解应变电测原理，学会静态电阻应变仪的使用。（详见 § 2-2 应变电测原理简介）

二、实验设备

- 1、纯弯曲梁实验装置一套（见图 4-1）。
- 2、YJR-5A 型静态电阻应变仪一台。（见 § 2-2 章节图 2-3 和图 2-4）

三、实验原理和装置

弯曲梁实验装置如图 4-1 所示。它有弯曲梁、定位板、支座、试验机架、加载系统、两端万向接头的加载拉杆、加载压头（包括 $\Phi 16$ 的钢珠）、加载横梁、载荷传感器和测力仪等组成。该装置的弯曲梁是一根已粘贴好应变片的钢梁，其弹性模量 $E = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。实验时，转动手轮加载至 P 时，钢梁的 B 、 C 处分别受到垂直向下的力，大小均为 $\frac{P}{2}$ ，由剪力图得到 BC 段剪力为零，故 BC 段梁为纯弯曲段，弯矩为 $M = \frac{Pa}{2}$ ，梁的受力图、剪力图及弯矩图如图 4-2 所示。



1. 钢梁 2. 定位板 3. 支座 4. 试验机架
 5. 加载手轮 6. 拉杆 7. 加载横梁 8. 测力仪
 9. 加载系统 10. 载荷传感器 11. 加载压头

图 4-1 纯弯曲梁试验装置

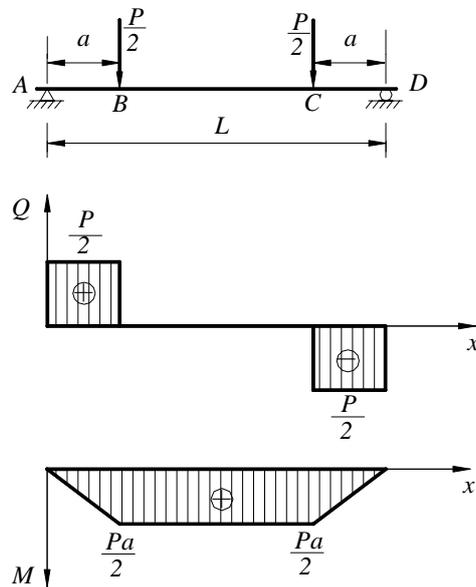


图 4-2 简支梁受力图、剪力图及弯矩图

由理论推导得出梁纯弯曲时横截面上的正应力公式为：

$$\sigma_{\text{理}} = \frac{M}{I_z} y \quad (4-1)$$

式中 M 为横截面上的弯矩， I_z 为梁横截面对中性轴 z 的惯性矩， y 为需求应力的测点离中性轴的距离。为了验证此理论公式的正确性，在梁纯弯曲段的侧面，沿不同的高度粘贴了电阻应

变片，测量方向均平行于梁轴，布片方案及各片的编号见图 4-3 所示。当梁加载变形时，利用电阻应变仪测出各应变片的应变值，然后根据单向应力状态的虎克定律求出各点实测的应力值。

$$\sigma_{\text{实}} = E\varepsilon_{\text{实}} \quad (4-2)$$

式中 E —— 钢梁的弹性模量；
 $\varepsilon_{\text{实}}$ —— 电阻应变仪测量的应变值。

将测得的应力值与理论应力值进行比较，从而验证弯曲正应力公式的正确性。

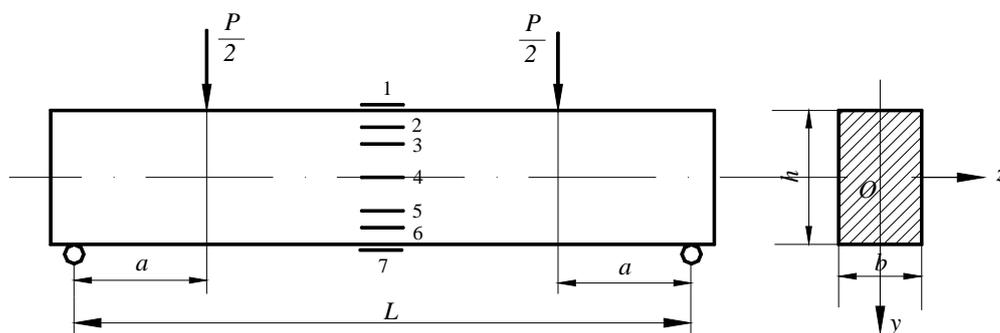


图 4-3 应变片分布图

有关电阻应变片的结构和工作原理可详见实验二。

由于式 (4-1)、式 (4-2) 适用于比例极限以内，故梁的加载必须在此范围内进行。为了随时观察变形与载荷的线性关系，实验时第一次采用增量法加载，即每增加等量载荷 ΔP ，测读各点的应变一次，观察各次的应变增量是否也基本相同。然后，再重复加载从零至最终载荷两次，以便了解重复性如何。由于应变片是按中性层上下对称布置的，因此，在每次加载、测读应变值后，还可以分析其对称性，最后，取三次最终载荷所测得的应变平均值计算各点的应力值 $\sigma_{\text{实}}$ 。

本实验用电测法测量应变，采用半桥温度补偿接法，如图 4-4 所示。因是多点测量，且七个测量点的温度条件相同，为方便测量，七片测量片共用一片温度补偿片，即公共补偿的办法。

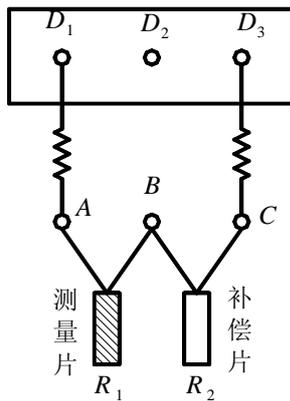


图 4-4 半桥测量法

四、实验步骤

1、记录钢梁的截面尺寸

宽度 $b = 20 \text{ mm}$ ，高度 $h = 40 \text{ mm}$ ，跨度 $L = 620 \text{ mm}$ ，加载点到支座距离 $a = 150 \text{ mm}$ 。

钢梁的材料为低碳钢，其弹性模量 $E = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。

2、应变仪准备

(1) 接通 YJR-5A 型静态电阻应变仪电源，按下“开”按钮，仪器面板上显示屏点亮。

(2) 调整应变仪灵敏系数 (K 值)，使用 K 值不同的应变片有不同的标定值，可查阅仪器说明书附表内 K 值所对应的标定值，在测量前进行校准。

(3) 查看应变仪反面 10 点接线板，钢梁上贴有七片应变片 (测量片) 的两根引出导线依次接在 1~7 点的“AB”接线柱上，一片补偿片的两根引出导线接在 1~7 点中任意一点“BC”接线柱上作公共补偿。

(4) 要使各测量点的电桥处于平衡状态，须调整各测点的电位器。将选择开关转到“1”位置，用螺丝刀调平衡电位器“1”，使指示表数字显示全为零，按此方法依次调整 2~7 点的平衡电位器。

3、加载测量

本实验采用转动手轮加载的方法，载荷大小由与载荷传感器相连接的测力仪显示。每增加载荷增量 ΔP ，通过两根加载拉杆，使得钢梁距两端支座各为 a 处分别增加作用力 $\frac{\Delta P}{2}$ 。

缓慢转动手轮均匀加载，每增加一级载荷，记录一次钢梁横截面上各测点的应变读数一次，观察各次的应变增量是否基本相同。然后，再重复加载从零至最终载荷两次，最后取三次最终载荷所测得的各点的应变平均值计算各点的实测应力。

五、注意事项

- 1、 不要随意拉动导线或触碰钢梁上的电阻应变片。
- 2、 不要随意调整应变仪上的调幅电位器。
- 3、 为防止试件过载，手轮加载时不要超过 5kN。
- 4、 实验结束后，先卸除梁上荷载，再关闭测力仪和应变仪电源。

六、预习要求

- 1、 认真阅读 § 2-2 应变电测原理简介。了解杆件产生的应变 ε 如何通过应变仪测量的转换过程。
- 2、 了解本次实验的目的和实验的具体内容。

七、思考题

- 1、 在图 4-3 中第 2、3、4、5、6 应变片粘贴位置稍上一点或稍下一点对测量结果有无影响？为什么？
- 2、 虎克定律 $\sigma = E\varepsilon$ 是在拉伸的情况下建立的？这里计算弯曲应力时为什么仍然可用？

§ 2—4 弯曲与扭转组合变形实验

一、实验目的

- 1、学习用电测法测定平面应力状态下一点处主应力的大小及方向的原理和方法。
- 2、测定薄壁圆管在弯曲、扭转及弯扭组合变形情况下表面任一点处的主应力的大小和方向。
- 3、测定薄壁管某截面内由弯矩、剪力、扭矩分别引起的应变及剪切弹性模量 G 。

二、实验装置与仪器

- 1、由薄壁管 1(已粘贴好应变片)，加力杆 2，钢索 3，传感器 4，加载手轮 5，座体数字测力仪 7 等组成的弯扭组合变形实验装置一套(图 5—1)。

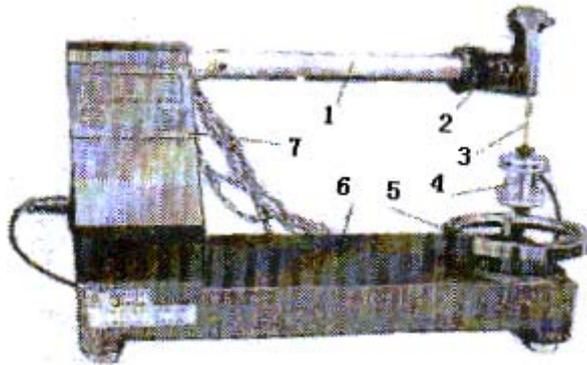


图 5-1 弯扭组合变形实验装置

- 2、YJR—5A 型静态电阻应变仪一台。

试验时，逆时针转动加载手轮，逐渐收紧的钢索对加力杆施加向下的力，传感器和薄壁管均受载荷作用。传感器受载荷作用后，就有信号输给数字测力仪，此时，数字测力仪显示的数字即为作用在加力杆端的载荷值，加力杆端作用力传递至薄壁管上，薄壁管产生弯扭组合变形。薄壁管受组合变形后，粘贴其上的应变片就有应变输出，用应变仪可以检测到。

薄壁管为铝合金材料，其弹性模量为 $E=70\text{GN/m}^2$ ，泊松比 $\mu=0.33$ 。薄壁管截面尺寸见图 5—2(a)，5—2 (b)为薄壁管受力简图和有关尺寸。本设备选取 I—I 截面为测试截面(试验者也可以选取其它截面)，并取四个被测点，位置见图 5-2(a)所示的 A、B、C、D，在每个

被测点上粘贴一枚应变花(-45° , 0° , 45°), 如图 5-3 所示, 共计 12 片应变片, 供不同实验选用。该实验装置逆时针为加载, 顺时针为卸载, 最大载荷为 500N, 超载会损坏薄壁管和传感器

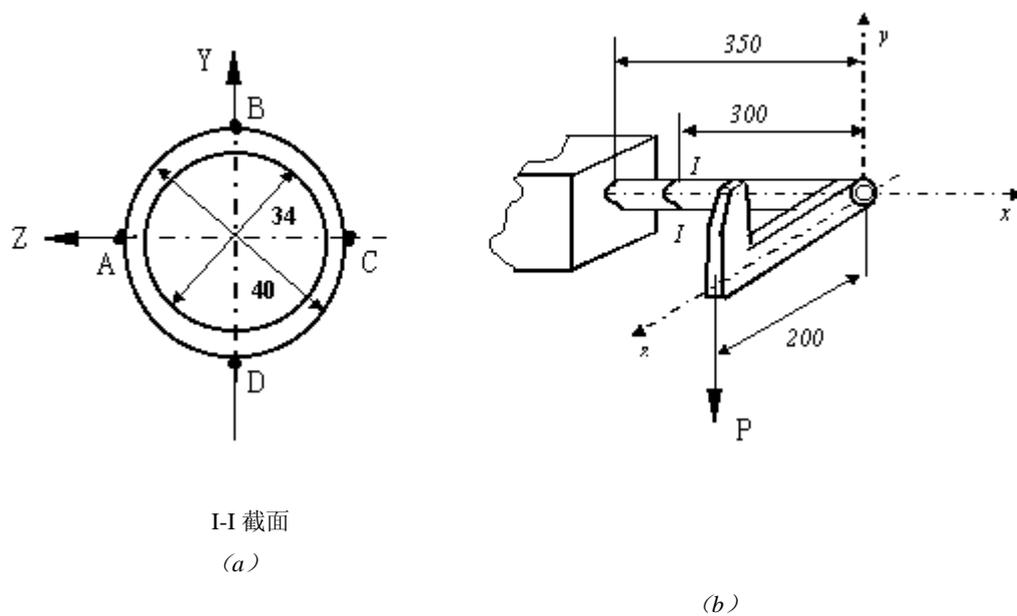
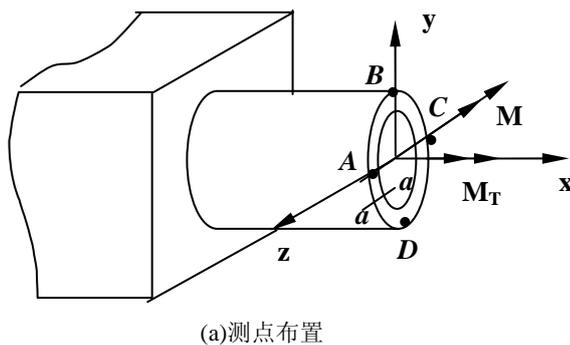
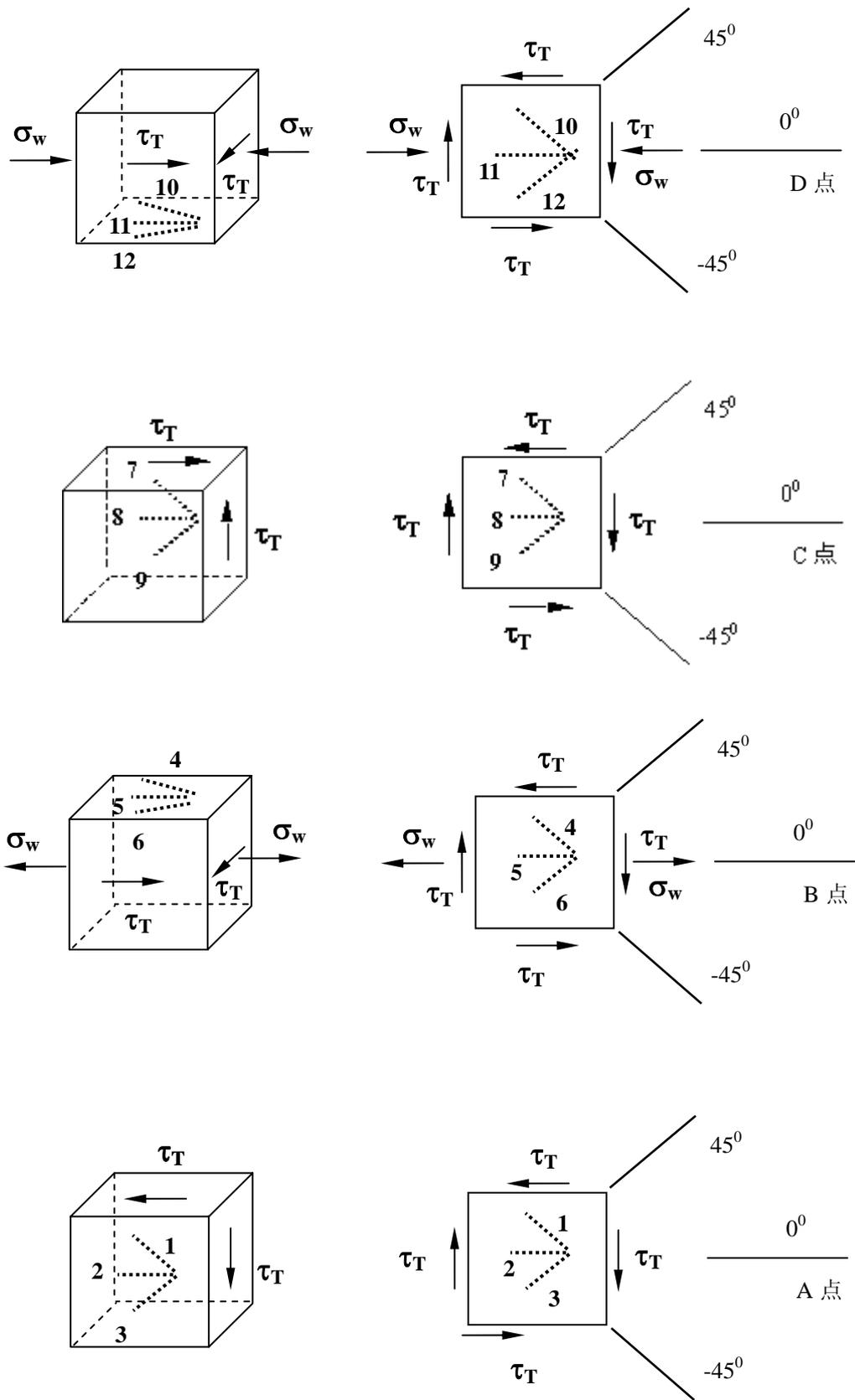


图 5-2 受力简图及尺寸





(b) 单元体图

(c) a-a 截面处薄臂管表面展开图

图 5-3 测点位置，应力单元体及应变片粘贴位置

1. 理论分析

当竖向荷载 P 作用在加力杆 C 点时, 试件 AB 发生弯曲与扭转组合变形, B 、 D 点所在截面的内力(如图 5—3(a))有弯矩 M 、剪力 Q 和扭矩 M_T 。因此该横截面上同时存在弯曲引起的正应力 σ_w , 扭转引起的剪应力 τ_T (弯曲引起的剪应力比扭转引起的剪应力小得多, 故在此不予考虑)。根据弯矩引起的正应力和扭转引起的剪应力在该截面上的分布规律, 从 B 、 D 两点截取单元体, 其各面上作用的应力如图 5—3(b)所示, 其中

$$\sigma_w = \frac{M}{W}, \quad \tau_T = \frac{M_T}{W_T}$$

显然, B 、 D 两点均处于平面应力状态。根据应力状态理论, 该两点的主应力大小和方向由以下两式决定:

$$\begin{aligned} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{aligned} = \frac{\sigma_w}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_w}{2}\right)^2 + \tau_T^2} \quad (5-1)$$

$$\tan 2\alpha_0 = \frac{-2\tau_T}{\sigma_w} \quad (5-2)$$

2. 测试原理

为了用实验的方法测定薄壁圆管弯曲和扭转时表面上一点处的主应力大小和方向, 首先要在该点处测量应变, 确定该点处的主应变 ε_1 , ε_3 的数值和方向, 然后利用广义胡克定律算得主应力 σ_1 , σ_3 。根据应变分析原理, 要确定一点处的主应变, 需要知道该点处沿 x, y 两个相互垂直方向的三个应变分量 ε_x , ε_y , γ_{xy} 。由于在实验中测量剪应变很困难, 而用电阻应变片测量线应变比较方便, 所以, 通常采用测量一点处沿着与轴成三个已知方向的线应变 ε_a , ε_b , ε_c 的方法, 见图 5-4, 按下列方程组联立求得 ε_x , ε_y , γ_{xy} :

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_a &= \varepsilon_x \cos^2 \alpha_a + \varepsilon_y \sin^2 \alpha_a - \gamma_{xy} \sin \alpha_a \cos \alpha_a \\ \varepsilon_b &= \varepsilon_x \cos^2 \alpha_b + \varepsilon_y \sin^2 \alpha_b - \gamma_{xy} \sin \alpha_b \cos \alpha_b \\ \varepsilon_c &= \varepsilon_x \cos^2 \alpha_c + \varepsilon_y \sin^2 \alpha_c - \gamma_{xy} \sin \alpha_c \cos \alpha_c \end{aligned} \right\} \quad (5-3)$$

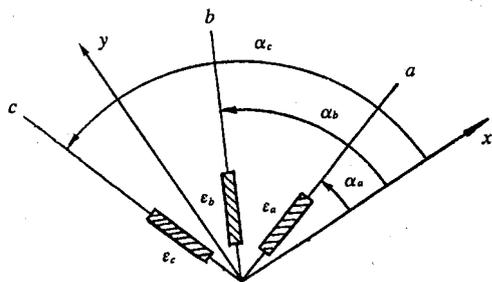


图 5-4 应变花粘贴位置

为了简化计算，往往采用互成特殊角度的三片应变片组成的应变花，本实验用了 45° 应变花，将其粘贴在测点 A、B、C、D 处（见图 5-3），通过电阻应变仪就可测得这些点处沿与 x 轴成 -45° ， 0° ， 45° 三个方向的线应变 ε_{-45° ， ε_{0° ， ε_{45° ，代入方程式 (3)，得应变分量分别为

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{0^\circ}, \varepsilon_y = \varepsilon_{-45^\circ} + \varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{0^\circ}, \gamma_{xy} = \varepsilon_{-45^\circ} - \varepsilon_{45^\circ} \quad (5-4)$$

主应变的数值为

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \\ \varepsilon_3 &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \\ &= \frac{\varepsilon_{-45^\circ} + \varepsilon_{45^\circ}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_{0^\circ} - (\varepsilon_{45^\circ} + \varepsilon_{-45^\circ})}{2}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{-45^\circ} - \varepsilon_{45^\circ}}{2}\right)^2} \end{aligned} \quad (5-5)$$

主应变的方向

$$\tan 2\alpha_0 = \frac{-\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} = \frac{\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{-45^\circ}}{2\varepsilon_{0^\circ} - (\varepsilon_{-45^\circ} + \varepsilon_{45^\circ})} \quad (5-6)$$

注意： α_0 为 x 到主应变方向的夹角，以逆时针转向为正。

利用广义胡克定律可得主应力的大小为

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_3) \\ \sigma_3 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_3 + \mu\varepsilon_1) \end{aligned} \quad (5-7)$$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{E}{1-\mu^2} \left[\frac{1+\mu}{2} (\varepsilon_{-45} + \varepsilon_{45}) \pm \frac{1-\mu}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_{-45} - \varepsilon_0)^2 + (\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2} \right]$$

主应力方向与主应变方向一致

四、实验步骤

1. 接线

将测点B、D两组应变花的六个应变片的六对引出线按 B_{-45° ， B_{0° ， B_{45° ， D_{-45° ， D_{0° ， D_{45° 的顺序分别接在YJR-5A型静态电阻应变仪的1，2，3，4，5，6测点的A，B接线柱上；将公共补偿片接到公共的B，C接线柱上。

2. 预调平衡

打开静态电阻应变仪开关，检查灵敏系数的设置，然后用螺丝刀在预调平衡箱上逐点调节电阻平衡螺丝，使各测点的电桥处于平衡状态。

3. 加载测量

(1) 逆时针转动加载手轮对试件加载（数字测力仪显示的数字即为作用在加力杆端的荷载值，单位：N）分级加载，初始载荷为0N，以后每级加载150N，记录相应各测点的应变值，直至最大荷载为450N为止。

(2) 卸载至零，逐点检查和调整电桥平衡，或记下零荷载时应变仪的初读数。再由0直接加载至450N，记录相应各测点的应变值。重复两次。

(3) 取以上三次 $P=450N$ 时实测应变的平均值计算B,D两点处主应力的大小和方向。

五、注意事项

本实验装置能承受的最大荷载为500N，严禁超载，否则会损坏薄壁管和传感器。

六、思考题

- 1、主应力测量中，应变花是否可沿任意方向粘贴？
- 2、试用测点A,B,C,D的四组应变花的12个应变片，来制定测试各测点的主应变与主应力值的测试方案。

§ 2—5 压杆稳定实验

一、 实验目的

- 1、观察和了解细长中心受压杆件将要丧失稳定时的现象。
- 2、用电测法测定两端铰支压杆的临界力 P_{cr} ，并与理论计算的结果进行比较。

二、 实验仪器, 装置及构造原理

- 1、静态电阻应变仪一台。
- 2、小型压杆稳定实验架一台(图 7—1)。

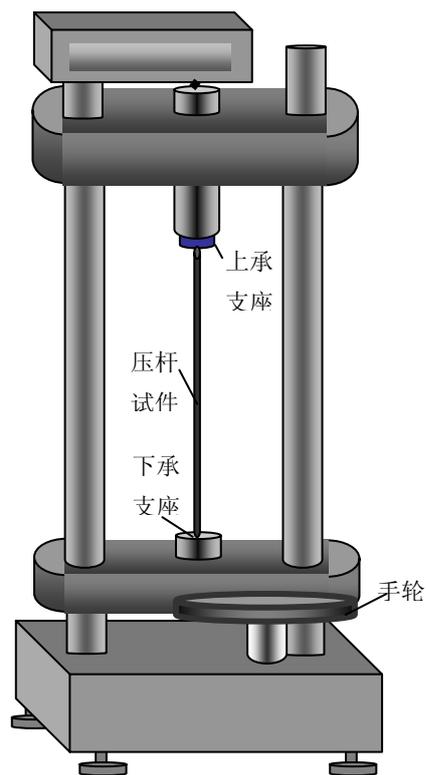


图 7-1 压杆稳定试验架

- 3、压杆稳定基本实验组合方式(见图 7—2)。

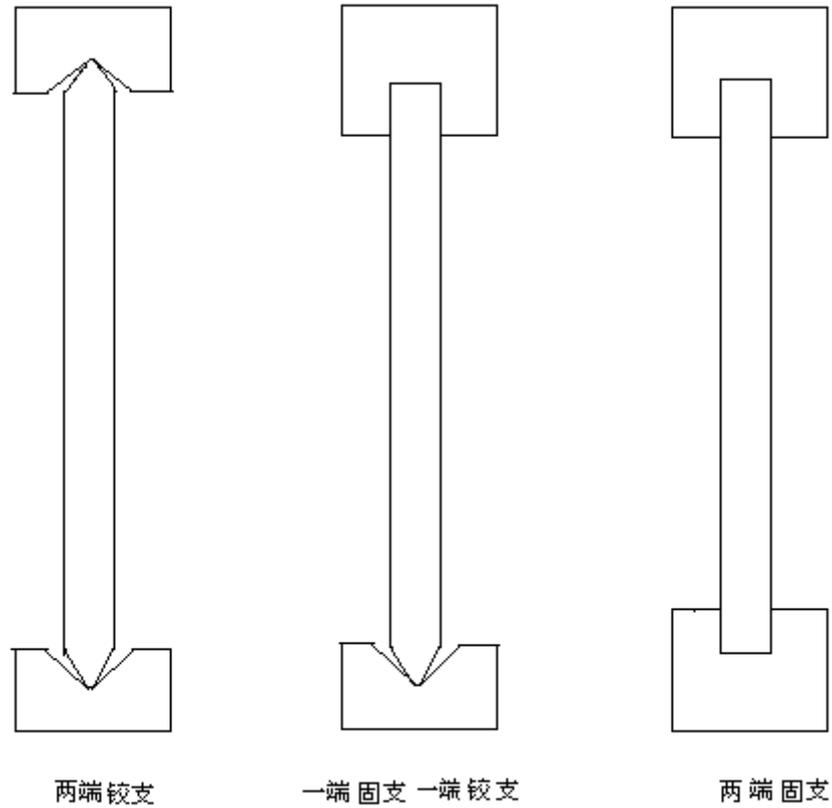


图 7-2

本实验采用矩形截面薄杆试件，材料为 65 号钢，试件尺寸为：厚度 $t=3.00\text{mm}$ ，宽度 $b=20.00\text{mm}$ ，长度 $L=345\text{mm}$ ，弹性模量 $E=2.10\times 10^5\text{Mpa}$ 。试件两端做成带有一定圆弧的尖端，将试件放在试验架支座的V型槽口中，顺时针转动加载手轮，通过一组机械传动减速装置的带动，加力横梁向上移动，试件受压，压杆受到的力由上横梁上的传感器拾取，被数字测力仪测得并显示出来。当试件发生弯曲变形时，试件的两端能自由地绕V型槽口转动，因此可把试件视为两端铰支压杆。在压杆长度的中间部分两个侧面沿轴线方向各贴一片电阻应变片 R_1 、 R_2 ，采用半桥温度自补偿的方法进行测量，即将应变片 R_1 、 R_2 各自的二个引出线分别接于电阻应变仪的 AB 和 BC 接线柱上， AD 和 DC 则用仪器内部的固定电阻，(见图 7—3)。

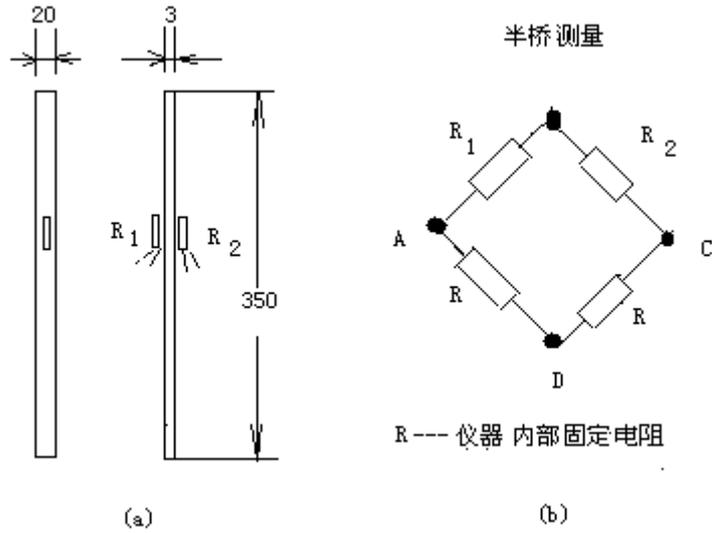


图 7-3

三、 实验原理

两端铰支、中心受压的细长杆，其欧拉临界力为

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{\min}}{L^2}$$

式中， L 为压杆的长度， I_{\min} 为截面的最小惯性矩。

当压杆所受的荷载 P 小于试件的临界力 P_{cr} 时，中心受压的细长杆在理论上应保持直线形状，杆件处于稳定平衡状态。当 $P \geq P_{cr}$ 时，杆件因丧失稳定而弯曲，若以荷载 P 为纵坐标，压杆中点挠度 f 为横坐标，按小挠度理论绘出的 $P-f$ 图形即为折线 OCD ，如图 7-4(b)所示。

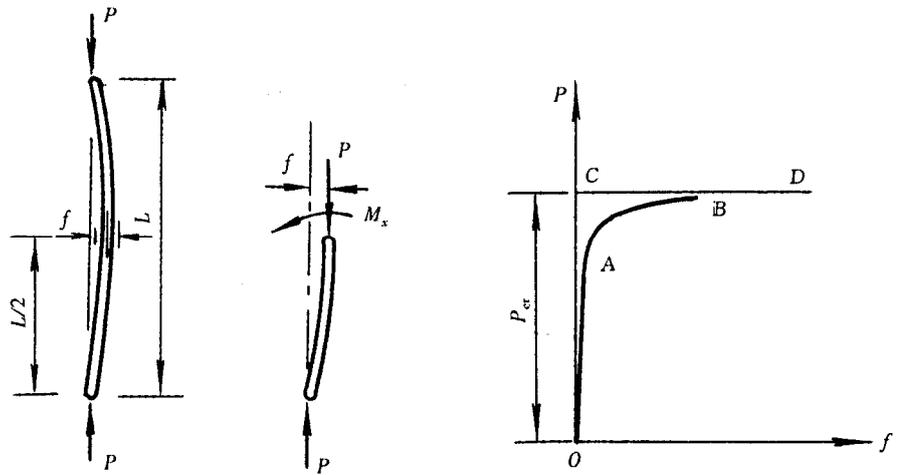


图 7-4

由于试件可能有初曲率，压力可能偏心，以及材料的不均匀等因素，实际的压杆不可能完全符合中心受压的理想情况。在实验过程中，即使压力很小时，杆件也会发生微小弯曲，中点挠度随荷载的增加而逐渐增大。若令杆件轴线为 X 坐标轴，杆件下端点为坐标轴原点，

则在 $x = \frac{L}{2}$ 处截面上的内力(图 7—4(a))为

$$M_{x=\frac{L}{2}} = Pf, \quad N = -P$$

横截面上的应力为

$$\sigma = -\frac{P}{A} \pm \frac{M_y}{I_{\min}}$$

当用半桥温度自补偿的方法将电阻应变片接到静态电阻应变仪后，可消除由轴向力产生的应变读数，这样，应变仪上的读数就是测点处由弯矩 M 产生的真实应变的两倍，把应变仪读数写为 ε_{ds} ，把真实应变写为 ε ，则 $\varepsilon_{ds} = 2\varepsilon$ 。杆上测点的弯曲正应力为

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{\varepsilon_{ds}}{2}$$

因为弯矩产生的测点处的弯曲正应力可表达为

$$\sigma = \frac{M \frac{t}{2}}{I_{\min}} = \frac{Pf \frac{t}{2}}{I_{\min}}$$

所以

$$\frac{Pf \frac{t}{2}}{I_{\min}} = E \frac{\varepsilon_{ds}}{2}$$

即

$$f = \left(\frac{EI_{\min}}{tP} \right) \varepsilon_{ds}$$

由上式可见，在一定的荷载 P 作用下，应变仪读数 ε_{ds} 的大小反映了压杆挠度 f 的大小， ε_{ds} 越大，表示 f 越大。所以用电测法测定 P_{cr} 时，图 7—4(b) 的横坐标 f 可用 ε_{ds} 来代替。当 P 远小于 P_{cr} 时，随荷载的增加 ε_{ds} 也增加，但增长极为缓慢(OA段)；而当 P 趋近于临界力 P_{cr} 时，虽然荷载增加量不断减小，但 ε_{ds} 却会迅速增大(AB段)，曲线 AB 是以直线 CD 为渐近线的。试件的初曲率与偏心等因素的影响越小，则曲线 OAB 越靠近折线 OCD。所以，可根据渐近线 CD 的位置确定临界荷载 P_{cr} 。

四、实验方法

1 接线

将压杆上已粘贴好的应变片按图 7—3(b)的组桥方式接至应变仪上。

2 预调平衡

打开静态电阻应变仪开关，在荷载为 0 时先用螺丝刀调节第 1 测点的电阻平衡螺丝，使应变仪读数为 0。

3 加载测量

顺时针方向旋转手轮，对压杆施加荷载，施加荷载的大小由测力仪显示。

压杆受载初始，杆件是直的，应变片只感受到压缩应变，在图 7—3(b)的组桥方式下，压缩应变被消除了，因此，应变仪上显示的应变几乎不增加，但随着荷载的增加，压杆逐渐变弯，应变片这时不但感受到压缩应变，同时也感受到弯曲应变，这时应变仪上显示的应变 ε_{ds} 开始增加，本实验要求采用由等量加载到非等量加载的方法，实验开始时可选用 $\Delta P=300\text{N}$ 的荷载增量等量加载，以后随着 $\Delta \varepsilon_{ds}$ 的不断变大，我们把 ΔP 逐渐减小，分别记录相应的应变读数，到 ΔP 很小而 $\Delta \varepsilon_{ds}$ 突然变得很大时，应立即停止加载。

五、注意事项

为了保证压杆及杆上所贴电阻应变片都不受损，使试件可以反复使用，试件的弯曲变形不能过大，故本实验要求将总的应变量控制在 $1500\mu\varepsilon$ 以内。

六、思考题

- 1、如已知试件尺寸：厚度 $t=3.00\text{mm}$ ，宽度 $b=20.00\text{mm}$ ，长度 $L=345\text{mm}$ ， $E=2.10 \times 10^5\text{Mpa}$ ，试求两端铰支压杆的临界力 P_{cr} 。
- 2、如果在实验初期按照每增加 $\Delta P=300\text{N}$ 测读杆件中点应变值，请问在接近临界力时这种加载方法是否仍然可行？为什么？试根据上题算得的临界力 P_{cr} 值，并参考图 7—4(b)所示的曲线特征设计一个确定临界力的加载方案。