

# 材料力学实验 B

Experiments in Mechanics of Materials B

刘一华 贾贤安 巫绪涛 编

合肥工业大学土木与水利工程学院城市建设工程系

2024 年 10 月

# 目 录

实验一	工程材料的力学性能测定 .....	1
实验二	梁的纯弯曲(综合) .....	15
实验三	薄壁圆筒的弯扭组合变形(综合).....	19
附录 A	电测法基础 .....	24

# 实验一 工程材料的力学性能测定

材料的力学性能试验是工程中广泛应用的一种试验，它为机械制造、土木工程、冶金及其它各种工业部门提供可靠的材料的力学性能参数，便于合理地使用材料，保证机器(结构)及其零件(构件)的安全工作。拉伸力学性能是测定材料在拉伸载荷作用下的弹性常数、强度指标和塑性指标，是材料最常用和最重要的力学性能指标。

材料的力学性能试验必须按照国家标准进行：

1. 室温下金属材料拉伸试验最新的国家标准为：GB/T 228.1-2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》；
2. 室温下金属材料压缩试验最新的国家标准为：GB/T 7314-2017《金属材料 室温压缩试验方法》；
3. 室温下金属材料扭转试验最新的国家标准为：GB/T 10128-2007《金属材料 室温扭转试验方法》；
4. 室温下金属材料剪切试验最新的国家标准为：GB/T 43115-2023《金属材料 薄板和薄带 室温剪切试验方法》。

## 1. 1 拉伸试验

### 一、实验目的

1. 验证胡克定律，测定低碳钢的弹性常数：弹性模量  $E$ ；
2. 测定低碳钢拉伸时的强度性能指标：屈服应力  $\sigma_s$  和抗拉强度  $\sigma_b$ ；
3. 测定低碳钢拉伸时的塑性性能指标：断后伸长率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$ ；
4. 测定灰铸铁拉伸时的强度性能指标：抗拉强度  $\sigma_b$ ；
5. 绘制低碳钢和灰铸铁的拉伸图，比较并分析低碳钢与灰铸铁在拉伸时的力学性能和破坏形式差异。

### 二、实验设备和仪器

1. 电子万能试验机；
2. 电子引伸仪；
3. 游标卡尺。

### 三、实验试样

按照国家标准金属拉伸试样的形状随着产品的品种、规格以及试验目的的不同而分为圆形截面试样、矩形截面试样、异形截面试样和不经机加工的全截面形状试样四种。其中最常用的是圆形截面试样和矩形截面试样。

如图 1.1 所示，圆形截面试样和矩形截面试样均由平行、过渡和夹持三部分组成。平行部分的试验段长度  $l$  称为试样的标距，按试样的标距  $l$  与横截面积  $A$  之间的关系，分为比例试样和定标距试样。圆形截面比例试样通常取  $l=10d$  或  $l=5d$ ，矩形截面比例试样通常取  $l=11.3\sqrt{A}$  或  $l=5.65\sqrt{A}$ ，

其中,前者称为长比例试样(简称长试样),后者称为短比例试样(简称短试样)。定标距试样的 $l$ 与 $A$ 之间无上述比例关系。过渡部分以圆弧与平行部分光滑地连接,以保证试样断裂时的断口在平行部分。夹持部分稍大,其形状和尺寸根据试样大小、材料特性、试验目的以及万能试验机的夹具结构进行设计。对试样的形状、尺寸和加工的技术要求参见国家标准 GBT 228.1-2010。

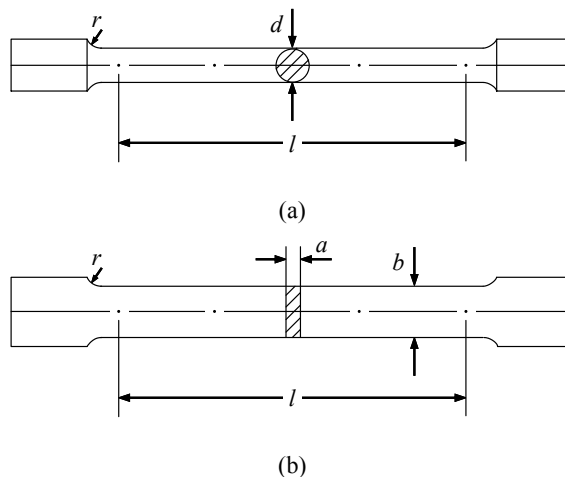


图 1.1 拉伸试样

(a) 圆形截面试样; (b) 矩形截面试样

#### 四、实验原理与方法

##### 1. 测定低碳钢的弹性常数

实验时,先打开计算机操控软件,再把试样安装在电子万能试验机的上下夹头间,在试样的中部装上电子引伸仪,用于测量试样中部 $l_0$ 长度(引伸仪两刀刃间的距离)内的微小变形。通过操控软件控制试验机以缓慢的速度对试样进行加载。

实验结束后,读取载荷变形图上升直线段(线弹性阶段)四点的载荷值和试样变形,分别用下式计算各段间的弹性模量并平均

$$E_i = \frac{\Delta F_i \cdot l_0}{A \cdot \Delta l_{0,i}} \quad (1.1)$$

$$E = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 E_i \quad (1.2)$$

式中: $\Delta F_i$ 为载荷增量; $A$ 为试样的原始横截面面积; $l_0$ 为引伸仪的标距(即引伸仪两刀刃间的距离,本实验 $l_0 = 50\text{mm}$ ); $\Delta l_{0,i}$ 为在载荷增量 $\Delta F_i$ 下由引伸仪测出的试样变形增量。若各段的弹性模量大致相等,则说明载荷与变形成正比关系,即验证了胡克定律。

##### 2. 测定低碳钢拉伸时的强度和塑性性能指标

操控试验机对试样连续加载,试样经过弹性阶段进入屈服阶段,观察屈服阶段时载荷变形图的变化规律。当达到设置的取下引伸计的变形量时,试验机自动停机,依指令取下引伸计,并再次通过操控软件以较快的速度对试样继续加载直至拉断。注意:取下引伸计后,软件界面所示的试样变形不再是真实变形,而是切换成根据试验机上横梁的移动量按比例转化得到的“变形”。

###### (1) 强度性能指标

实验结束后,从载荷变形图读取相关强度指标对应的载荷值,并计算屈服应力(屈服点)和抗拉强度两个强度性能指标。

屈服应力(屈服点)  $\sigma_s$

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A} \quad (1.3)$$

式中:  $F_s$  为屈服阶段上下波动的最低载荷;  $A$  为试样的原始横截面面积。

抗拉强度  $\sigma_b$

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A} \quad (1.4)$$

式中:  $F_b$  为试样所能承受的最大载荷;  $A$  为试样的原始横截面面积。

## (2) 塑性性能指标

测量试样拉断后的标距和最小断面直径, 计算断后伸长率和断面收缩率两个塑性性能指标。

断后伸长率  $\delta$

$$\delta = \frac{l_1 - l}{l} \times 100\% \quad (1.5)$$

式中:  $l$  为试样的原始标距;  $l_1$  为试样拉断后的标距长度。

试样的塑性变形集中产生在颈缩处, 并向两边逐渐减小。因此, 断口的位置不同, 标距  $l$  部分的塑性伸长也不同。若断口在试样的中部, 发生严重塑性变形的颈缩段全部在标距长度内, 标距长度就有较大的塑性伸长量; 若断口距标距端很近, 则发生严重塑性变形的颈缩段只有一部分在标距长度内, 另一部分在标距长度外, 在这种情况下, 标距长度的塑性伸长量就小。因此, 断口的位置对所测得的伸长率有影响。为了避免这种影响, 国家标准对  $l_1$  的测定作了如下规定。

试验前, 将试样的标距分成十等分。若断口到邻近标距端的距离大于  $l/3$ , 则可直接测量标距两端点之间的距离作为  $l_1$ 。若断口到邻近标距端的距离小于或等于  $l/3$ , 则应采用移位法(亦称为补偿法或断口移中法)测定: 在长段上从断口  $O$  点起, 取长度基本上等于短段格数的一段, 得到  $B$  点, 再由  $B$  点起, 取等于长段剩余格数(偶数)的一半得到  $C$  点(见图 1.2(a)); 或取剩余格数(奇数)减 1 与加 1 的一半分别得到  $C$  点与  $C_1$  点(见图 1.2(b))。移位后的  $l_1$  分别为:  $l_1 = \overline{AO} + \overline{OB} + 2\overline{BC}$  或  $l_1 = \overline{AO} + \overline{OB} + \overline{BC} + \overline{BC_1}$ 。

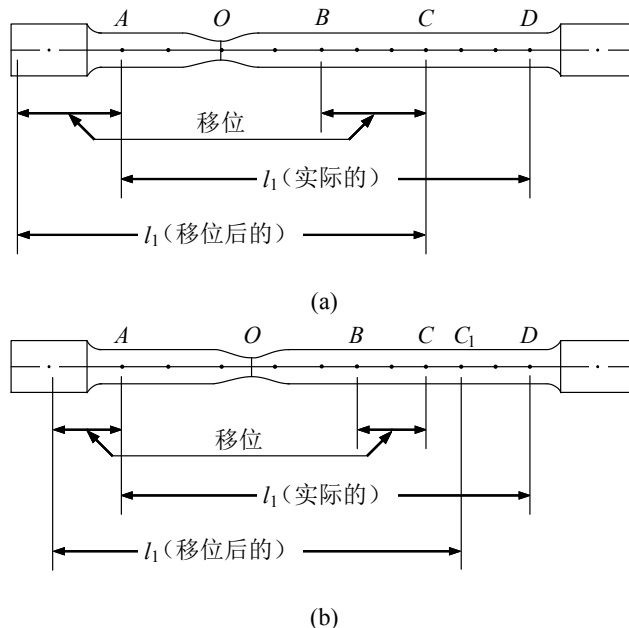


图 1.2 测  $l_1$  的移位法

测量时，两段在断口处应紧密对接，尽量使两段的轴线在一条直线上。若在断口处形成缝隙，则此缝隙应计入 $l_1$ 内。

如果断口在标距以外，或者虽在标距之内，但距标距端点的距离小于 $2d$ ，则试验无效。

断面收缩率 $\psi$

$$\psi = \frac{A - A_1}{A} \times 100\% \quad (1.6)$$

式中： $A$ 为试样的原始横截面面积； $A_1$ 为拉断后的试样在断口处的最小横截面面积。

### 3. 测定灰铸铁拉伸时强度性能指标

灰铸铁在拉伸过程中，当变形很小时就会断裂。实验结束后从载荷变形图读取最大载荷 $F_b$ 除以原始横截面面积 $A$ 所得的应力值即为抗拉强度 $\sigma_b$

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A} \quad (1.7)$$

## 五、实验步骤

### 1. 测定低碳钢的弹性常数

(1)测量试样的尺寸，包括直径和原始标距。测量直径时应该在试样标距范围内的中间以及两标距点的内侧附近，分别用游标卡尺在相互垂直方向上测取试样直径的平均值为试样在该处的直径，取三者中的最小值作为计算直径。

(2)用控制器快速移动试验机上横梁调整上夹头位置，直至能将低碳钢拉伸试样安装在万能试验机上、下夹头中，用控制器操控上、下夹头的液压夹紧装置夹紧试样。再将电子引伸仪用橡皮筋固定在试样的中部，注意观察并调整引伸计，使其基本沿试样轴线固定。

(3)在计算机操控软件界面设置相关参数，包括：试样信息，实验方式，加载速度，曲线窗口纵横坐标变量(载荷、变形)，取下引伸计对应的变形量，实验结束条件等，并将载荷、变形、位移和时间清零。

(4)用控制器对试样进行点触加载(上夹头上移)预加 $2\text{kN} \sim 4\text{kN}$ 初载荷，以降低初始效应，初始载荷值可以由操控软件界面实时观察。

(5)操控软件启动和发送加载指令，控制万能试验机以缓慢的速度进行加载，同时观察操控软件界面实时的载荷变形图，定性验证线弹性阶段载荷与变形之间的正比关系。

### 2. 测定低碳钢拉伸时的强度和塑性性能指标

(1)试验机对试样连续加载，试样经过弹性阶段进入屈服阶段，观察屈服阶段时载荷变形图的变化规律。当达到设置的取下引伸计的变形量时，试验机自动停机，根据操控软件弹出“取下引伸计”窗口取下引伸计，并再次启动和发送加载指令，控制试验机继续对试样加载。可以适当增大加载速度，调节加载速度时，要先缓慢拨大速度滚动条达到最大值，再点击下一加载速度菜单并再次缓慢拨大速度滚动条至下一加载速度，尽量控制加载速度缓慢平稳增加，降低其变化对试验影响。

(2)观察强化阶段、颈缩阶段载荷变形图的变化规律。当载荷开始下降时观察试样颈缩变形现象：试样变形集中在局部区域，出现颈缩现象，该阶段也称为局部变形阶段。随后试样很快被拉断，试验机按设置的条件自动停机。

(3)用控制器松开试验机的上、下夹头，取下拉断的试样。观察试样断口破坏现象，包括外侧与轴线近似 $45^\circ$ 的一圈光滑斜断面和中部沿横截面的粗糙断面。将断口吻合压紧，用游标卡尺量取断口处的最小直径和两标点之间的距离。

### 3. 测定灰铸铁拉伸时的强度性能指标

(1)测量试样的直径(方法同上)。

(2)设置操控软件参数(方法同上)，注意铸铁拉伸实验不采用引伸计测量变形，曲线窗口的横坐标设置为横梁位移，纵坐标仍然为载荷。

(3)把试样安装在万能试验机的上、下夹头之间，夹紧试样并预加初载荷。

(4)操控软件启动和发送加载指令，控制万能试验机以缓慢的速度进行加载，同时观察操控软件界面实时的载荷变形图。试样在较小的载荷时即拉断，断裂载荷即试样能够承担的最大载荷  $F_b$ 。观察试样断面破坏情况：沿横截面断裂，直径无明显变化。

## 六、实验数据的记录与计算

### 1. 测定低碳钢的弹性模量

表 1.1 测定低碳钢的弹性模量实验的数据记录与计算

试样直径 $d=$ mm;		引伸计标距 $l_0=$ mm;		
载荷值 $F_i/\text{kN}$	载荷增量 $F_i/\text{kN}$	试样变形 $l_{0i}/\text{mm}$	试样变形增量 $\Delta l_{0i}/\text{mm}$	分段弹性模量 $E_i/\text{GPa}$
平均弹性模量 $E$				

### 2. 测定低碳钢拉伸时的强度和塑性性能指标

表 1.2 测定低碳钢拉伸时的强度和塑性性能指标试验的数据记录与计算

试 样 尺 寸	实 验 数 据
实验前：	屈服载荷 $F_s =$ kN
标 距 $l =$ mm	最大载荷 $F_b =$ kN
直 径 $d =$ mm	屈服应力 $\sigma_s = F_s / A =$ MPa
实验后：	抗拉强度 $\sigma_b = F_b / A =$ MPa
标 距 $l_1 =$ mm	断后伸长率 $\delta = (l_1 - l) / l \times 100\% =$
最小直径 $d_1 =$ mm	断面收缩率 $\psi = (A - A_1) / A \times 100\% =$
拉断后的试样草图	试 样 的 拉 伸 图

### 3. 测定灰铸铁拉伸时的强度性能指标

表 1.3 测定灰铸铁拉伸时的强度性能指标试验的数据记录与计算

试 样 尺 寸	实 验 数 据
实验前： 直 径 $d =$ mm	最大载荷 $F_b =$ kN 抗拉强度 $\sigma_b = F_b / A =$ MPa
拉断后的试样草图	试 样 的 拉 伸 图

### 4. 拉伸试验结果的计算精确度

(1)强度性能指标(屈服应力 $\sigma_s$ 和抗拉强度 $\sigma_b$ )的计算精度要求为0.5MPa，即：凡 $<0.25$  MPa 的数值舍去， $\geq 0.25$ MPa 而 $<0.75$ MPa 的数值化为0.5MPa， $\geq 0.75$ MPa 的数值者则进为1MPa。

(2)塑性性能指标(伸长率 $\delta$ 和断面收缩率 $\psi$ )的计算精度要求为0.5%，即：凡 $<0.25\%$ 的数值舍去， $\geq 0.25\%$ 而 $<0.75\%$ 的数值化为0.5%， $\geq 0.75\%$ 的数值则进为1%。

## 七、注意事项

1. 实验时必须严格遵守实验设备和仪器的各项操作规程。操作者不得离开工作岗位，实验中如发生故障应立即停机。

2. 引伸仪系精密仪器，使用时须谨慎小心，不要用力掰开或压紧两臂。安装时不能卡得太松，以防实验中脱落摔坏；也不能卡得太紧，以防刀刃损伤造成测量误差。

3. 加载时速度要均匀缓慢，防止冲击。

## 八、思考题

1. 低碳钢和灰铸铁在常温静载拉伸时的力学性能和破坏形式有何异同？
2. 测定材料的力学性能有何实用价值？
3. 你认为产生试验结果误差的因素有哪些？应如何避免或减小其影响？

## 1. 2 压缩试验

### 一、实验目的

1. 测定低碳钢压缩时的强度性能指标：屈服应力 $\sigma_s$ ；
2. 测定灰铸铁压缩时的强度性能指标：抗压强度 $\sigma_{bc}$ ；
3. 绘制低碳钢和灰铸铁的压缩图，比较低碳钢与灰铸铁在压缩时的变形特点和破坏形式。



## 二、实验设备和仪器

1. 电子万能试验机;
2. 游标卡尺。

## 三、实验试样

按照国家标准, 金属压缩试样的形状随着产品的品种、规格以及试验目的的不同而分为圆柱体试样、正方形柱体试样和板状试样三种。其中最常用的是圆柱体试样和正方形柱体试样, 如图 1.3 所示。根据试验的目的, 对试样的标距 $l$ 作如下规定:

$l=(1\sim 2)d$  的试样仅适用于测定  $\sigma_{bc}$  ;

$l=(2.5\sim 3.5)d$  (或  $b$ ) 的试样适用于测定  $\sigma_{pc}$ 、 $\sigma_{sc}$  和  $\sigma_{bc}$  ;

$l=(5\sim 8)d$  (或  $b$ ) 的试样适用于测定  $\sigma_{pc0.01}$  和  $E_c$  。

其中  $d$  (或  $b$ ) = 10 ~ 20mm 。对试样的形状、尺寸和加工的技术要求参见国家标准。

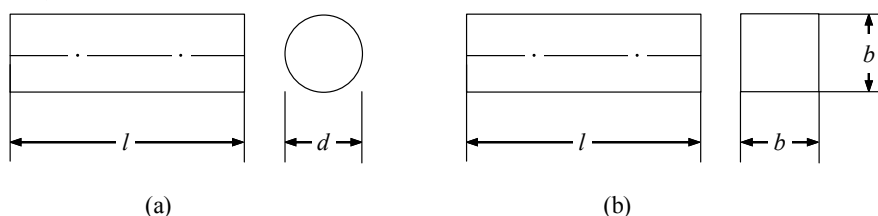


图 1.3 压缩试样

(a)圆柱体试样; (b)正方形柱体试样

## 四、实验原理与方法

### 1. 测定低碳钢压缩时的强度性能指标

低碳钢在压缩过程中, 当应力小于屈服应力时, 其变形情况与拉伸时基本相同。当达到屈服应力后, 试样产生塑性变形, 随着压力的继续增加, 试样的横截面面积不断变大直至被压扁。故只能测其屈服载荷  $F_s$ , 屈服应力为

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A} \quad (1.8)$$

式中:  $A$  为试样的原始横截面面积。

### 2. 测定灰铸铁压缩时的强度性能指标

灰铸铁在压缩过程中, 当试样的变形很小时即发生破坏, 故只能测其破坏时的最大载荷  $F_{bc}$ , 抗压强度为

$$\sigma_{bc} = \frac{F_{bc}}{A} \quad (1.9)$$

## 五、实验步骤

1. 检查试样两端面的光洁度和平行度, 并涂上润滑油。用游标卡尺在试样的中间截面相互垂直的方向上各测量一次直径, 取其平均值作为计算直径。
2. 检查试验机的下承垫是否能够自由微转动, 并将试样放进试验机上、下承垫之间, 检查对中情况。
3. 在计算机操控软件界面设置相关参数, 包括: 试样信息, 实验方式, 加载速度, 曲线窗口纵

横坐标变量(载荷、位移), 实验结束条件等, 并将载荷、位移和时间清零。

4. 用控制器快速移动横梁调整上承垫位置, 直至距离试样 5mm 左右, 之后通过计算机操控软件以 1mm/min 移动横梁向下移动, 当试样受力达到 6kN 时停止。

5. 操控软件启动和发送加载指令, 控制万能试验机以缓慢的速度 0.2mm/min 进行加载, 同时观察操控软件界面实时的载荷位移图, 例如低碳钢屈服时的曲线特征。

6. 试验结束后从载荷位移图读取低碳钢的屈服载荷  $F_s$  和灰铸铁的最大载荷  $F_b$ , 并注意观察试样的变形和破坏现象。

## 六、实验数据的记录与计算

表 1.4 测定低碳钢和灰铸铁压缩时的强度性能指标试验的数据记录与计算

材料	试样直径 $d / \text{mm}$	实 验 数 据	实验后的 试样草图	试样的压缩图
低碳钢		屈服载荷 $F_s =$ kN 屈服应力 $\sigma_s = \frac{F_s}{A} =$ MPa		
灰铸铁		最大载荷 $F_{bc} =$ kN 抗压强度 $\sigma_{bc} = \frac{F_{bc}}{A} =$ MPa		

## 七、思考题

1. 比较低碳钢和灰铸铁在拉伸与压缩时所测得的  $\sigma_s$  和  $\sigma_b$  的数值有何差别?
2. 仔细观察灰铸铁的破坏形式并分析破坏原因。

## 1.3 剪切试验

### 一、实验目的

1. 测定低碳钢剪切时的强度性能指标: 名义抗切强度  $\tau_b$ ;
2. 测定灰铸铁剪切时的强度性能指标: 名义抗切强度  $\tau_b$ ;
3. 比较低碳钢和灰铸铁的剪切破坏形式。

### 二、实验设备和仪器

1. 电子万能试验机;
2. 剪切器;
3. 游标卡尺。

### 三、实验试样

常用的剪切试样为圆形截面试样。

### 四、实验原理与方法

把试样安装在剪切器内，用试验机对剪切器的剪切刀刃施加压缩载荷，则试样上有两个横截面受剪，如图 1.4 所示。随着载荷  $F$  的增加，试样最后沿两个剪切面被剪断成三段。

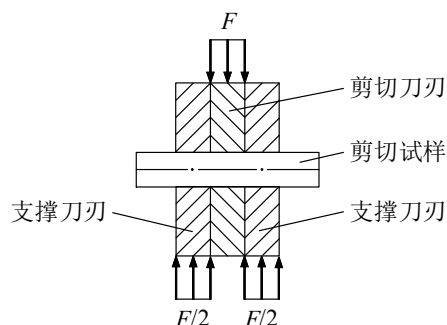


图 1.4 剪切器的原理

试验机测得试样剪坏时的最大载荷  $F_b$ ，名义抗切强度为

$$\tau_b = \frac{F_b}{2A} \quad (1.10)$$

式中： $A$  为试样的原始横截面面积。

从被剪坏的低碳钢试样可以看到，剪断面已不再是圆，说明试样尚受到挤压应力的作用。同时，还可以看出中间一段略有弯曲，表明试样承受的不是单纯的剪切变形式，这与工程中使用的螺栓、铆钉、销钉、键等联接件的受力情况相同，故所测得的  $\tau_b$  有实用价值。

## 五、实验步骤

1. 测量试样的直径(与拉伸试验的测量方法相同)。
2. 将试样装入剪切器中，拧紧两端固定螺帽。
3. 将剪切器放到试验机的上、下承垫间，用与压缩实验相同的方式操作试验机和操控软件。
4. 均匀缓慢加载直至试样被剪断，读取最大载荷  $F_b$ ，取下试样，观察破坏现象。

## 六、实验数据的记录与计算

表 1.5 测定低碳钢和灰铸铁剪切时的强度性能指标试验的数据记录与计算

材 料	试样直径 $d/\text{mm}$	最大载荷 $F_b/\text{kN}$	抗切强度 $\tau_b = F_b/(2A)/\text{MPa}$
低碳钢			
灰铸铁			

## 七、思考题

1. 比较低碳钢和灰铸铁被剪断后的试样，分析破坏原因。

## 1.4 扭转试验

### 一、实验目的

1. 验证剪切胡克定律，测定低碳钢的弹性常数：切变模量  $G$ ；
2. 测定低碳钢扭转时的强度性能指标：扭转真实屈服应力  $\tau_s$  和真实抗扭强度  $\tau_b$ ；

3. 测定灰铸铁扭转时的强度性能指标：抗扭强度  $\tau_b$ ；
4. 绘制低碳钢和灰铸铁的扭转图，比较低碳钢和灰铸铁的扭转破坏形式。

## 二、实验设备和仪器

1. 电子扭转试验机；
2. 扭角仪；
3. 游标卡尺。

## 三、实验试样

按照国家标准，金属扭转试样的形状随着产品的品种、规格以及试验目的的不同而分为圆形截面试样和管形截面试样两种。其中最常用的是圆形截面试样，如图 1.1a 所示。通常，圆形截面试样的直径  $d = 10\text{mm}$ ，标距  $l = 5d$  或  $l = 10d$ ，平行部分的长度为  $l + 20\text{mm}$ 。若采用其它直径的试样，其平行部分的长度应为标距加上两倍直径。试样头部的形状和尺寸应适合扭转试验机的夹头夹持。

由于扭转试验时，试样表面的切应力最大，试样表面的缺陷将敏感地影响试验结果，所以，对扭转试样的表面粗糙度的要求要比拉伸试样的高。对扭转试样的加工技术要求参见国家标准。

## 四、实验原理与方法

### 1. 测定低碳钢的弹性常数

为了验证剪切胡克定律，在弹性范围内，采用等量逐级加载法。试验装置如图 1.5 所示，将试样安装在扭角仪上，每次增加同样的扭矩  $\Delta T$ ，若扭转角  $\Delta\varphi$  也基本相等，即验证了剪切胡克定律，其中扭矩  $\Delta T$  是通过砝码重量  $\Delta F$  乘以加载力臂  $a$  得到，扭转角  $\Delta\varphi$  是通过百分表测量铅垂位移  $\Delta\delta$  除以测量力臂  $b$  获得。

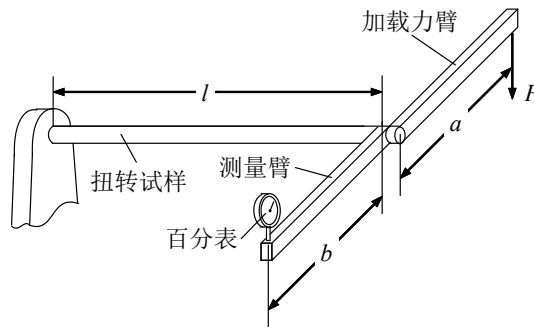


图 1.5 扭角仪

根据扭矩增量的平均值  $\overline{\Delta T}$ ，测得的扭转角增量的平均值  $\overline{\Delta\varphi}$ ，由此可得到切变模量

$$G = \frac{\Delta T l}{\Delta\varphi I_p} \quad (1.11)$$

式中： $l$  为试样的标距； $I_p = \pi d^4 / 32$  为试样在标距内横截面的极惯性矩； $d$  为试样的直径。

若载荷增量的平均值为  $\overline{\Delta F}$ ，则扭矩增量的平均值为  $\overline{\Delta T} = \overline{\Delta F} a$ ，若测量点的位移增量平均值为  $\overline{\Delta\delta}$ ，则小变形下扭转角增量的平均值为  $\overline{\Delta\varphi} = \overline{\Delta\delta} / b$ ，将这些关系式代入上式，即得

$$G = \frac{32 \overline{\Delta F} a b l}{\pi d^4 \overline{\Delta\delta}} \quad (1.12)$$

式中： $a$  为载荷力臂； $b$  为测量力臂。

## 2. 测定低碳钢扭转时的强度性能指标

试样在外力偶矩的作用下，其上任意一点处于纯剪切应力状态。随着外力偶矩的增加，一开始操控软件显示的  $M_e - \varphi$  呈现线性关系，此时试样处于线弹性阶段，即验证了剪切胡克定律。当  $M_e$  增加到一定值， $M_e - \varphi$  图出现弯曲及上下波动，波动处的最低外力偶矩的数值即为屈服力偶矩  $M_{es}$ ，低碳钢的真实扭转屈服应力为

$$\tau_s = \frac{3}{4} \frac{M_{es}}{W_p} \quad (1.13)$$

式中： $W_p = \pi d^3 / 16$  为试样在标距内的抗扭截面系数。

在测出屈服力偶矩  $M_{es}$  后，采用较大速度加载，直到试样被扭断为止。操控软件读出的最大外力偶矩数值即为  $M_{eb}$ ，低碳钢的真实抗扭强度为

$$\tau_b = \frac{3}{4} \frac{M_{eb}}{W_p} \quad (1.14)$$

对上述两公式的来源说明如下：

低碳钢试样在扭转变形过程中， $M_e - \varphi$  图如图 1.6 所示。当达到图中  $A$  点时， $M_e$  与  $\varphi$  成正比的关系开始破坏，这时，试样表面处的切应力达到了材料的扭转屈服应力  $\tau_s$ ，如能测得此时相应的外力偶矩  $M_{ep}$ ，如图 1.7a 所示，则扭转屈服应力为

$$\tau_s = \frac{M_{ep}}{W_p}$$

经过  $A$  点后，横截面上出现了一个环状的塑性区，如图 1.7b 所示。若材料的塑性很好，且当塑性区扩展到接近中心时，横截面周边上各点的切应力仍未超过扭转屈服应力，此时的切应力分布可简化成图 1.7c 所示的情况，对应的扭矩  $T_s$  为

$$T_s = \int_0^{d/2} \tau_s \rho 2\pi \rho d\rho = 2\pi \tau_s \int_0^{d/2} \rho^2 d\rho = \frac{\pi d^3}{12} \tau_s = \frac{4}{3} W_p \tau_s$$

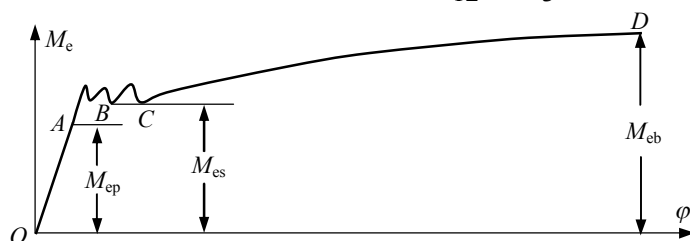


图 1.6 低碳钢的扭转图

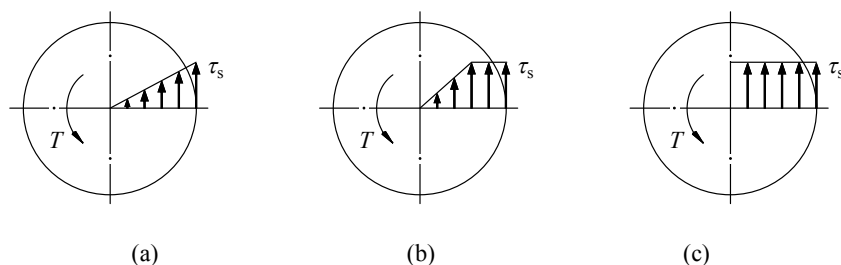


图 1.7 低碳钢圆柱形试样扭转时横截面上的切应力分布

(a)  $T = T_p$  ; (b)  $T_p < T < T_s$  ; (c)  $T = T_s$

由于  $T_s = M_{es}$ ，因此，由上式可以得到

$$\tau_s = \frac{3}{4} \frac{M_{es}}{W_p}$$

由于  $A$  点的位置不易精确判定, 而  $B$  点的位置则较为明显。因此, 一般均根据由  $B$  点测定的  $M_{es}$  来求真实扭转切应力  $\tau_s$ 。

从图 1.6 可以看出, 当外力偶矩超过  $M_{es}$  后, 扭转角  $\varphi$  增加很快, 而外力偶矩  $M_e$  增加很小,  $CD$  近似于一条直线。因此, 可认为横截面上的切应力分布仍然如图 1.7c 所示, 只是切应力值比  $\tau_s$  大。根据测定的试样在断裂时的外力偶矩  $M_{eb}$ , 可求得真实抗扭强度为

$$\tau_b = \frac{3}{4} \frac{M_{eb}}{W_p}$$

当然这种计算方法也有显著缺陷, 只有当实际的应力分布与图 1.7c 完全相符合时才是正确的。而除低碳钢之外的大多数塑性材料尤其是塑性较小材料屈服和扭断时的横截面上的切应力分布与图 1.7c 差异较大。因此, 国家标准为了便于试验, 统一采用名义应力法(按线弹性规律计算屈服点及抗扭强度), 即式(1.13)和式(1.14)等号右边的系数不是 0.75 而是 1。

### 3. 测定灰铸铁扭转时的强度性能指标

对于灰铸铁试样, 只需测出其承受的最大外力偶矩  $M_{eb}$  (方法同 2), 抗扭强度为

$$\tau_b = \frac{M_{eb}}{W_p} \quad (1.15)$$

由上述扭转破坏的试样可以看出: 低碳钢试样的断口与轴线垂直, 表明破坏是由切应力引起的; 而灰铸铁试样的断口则沿螺旋线方向与轴线约成  $45^\circ$  角, 表明破坏是由拉应力引起的。

## 五、实验步骤

### 1. 测定低碳钢的弹性常数

- (1)调整好转角仪上的百分表, 使指针对准“0”。
- (2)采用等量逐级加载法, 每加一块砝码, 记录一次百分表的读数(百分表每格对应位移 0.01mm), 全部加载完后再重复一遍。
- (3)卸载, 整理仪器。

### 2. 测定低碳钢扭转时的强度性能指标

- (1)测量试样的直径(方法与拉伸试验相同)。
- (2)将试样安装到电子扭转试验机上, 拧紧两端的夹持卡盘。
- (3)在计算机操控软件界面设置相关参数, 包括: 试样信息, 实验方式, 加载速度, 曲线窗口纵横坐标变量(扭矩、扭转角), 实验结束条件等, 并将扭矩、扭转角和时间清零。
- (4)操控软件控制试验机以  $5^\circ/\text{min}$  对试样进行缓慢加载, 直至低碳钢试样屈服。
- (5)当低碳钢试样屈服阶段结束后, 提高加载速度至  $360^\circ/\text{min}$ , 直至试样扭断。
- (6)试验结束后, 从操控软件显示的  $M_e - \varphi$  读取屈服力偶矩  $M_{es}$ 、最大力偶矩  $M_{eb}$ 。

### 3. 测定灰铸铁扭转时的强度性能指标

- (1)测量试样的直径(方法与拉伸试验相同)。
- (2)在计算机操控软件界面设置相关参数, 包括: 试样信息, 实验方式, 加载速度, 曲线窗口纵横坐标变量(扭矩、扭转角), 实验结束条件等, 并将扭矩、扭转角和时间清零。
- (3)操控软件控制试验机以  $10^\circ/\text{min}$  对试样进行缓慢加载, 直至灰铸铁试样扭断。

(4)试验结束后,从操控软件显示的  $M_e-\varphi$  读取最大力偶矩  $M_{eb}$ 。

## 六、实验数据记录与计算

### 1. 测定低碳钢的弹性常数

表 1.6 测定低碳钢的切变模量试验的数据记录与计算

试样尺寸:						标距 $l =$	mm	直径 $d =$	mm
扭角仪参数:						载荷力臂 $a =$	mm	测量臂长 $b =$	mm
载荷/N		位移/mm		第 一 次		第 二 次			
		读数 $F$	增量 $\Delta F$	百分表位移 $\delta$	增量 $\Delta\delta$	百分表位移 $\delta$	增量 $\Delta\delta$		
增量均值 $\overline{\Delta F} =$				增量均值 $\overline{\Delta\delta} =$			增量均值 $\overline{\Delta\delta} =$		
切变模量 $G = 32\overline{\Delta F}abl/(\pi d^4\overline{\Delta\delta}) =$				GPa					

### 2. 测定低碳钢和灰铸铁扭转时的强度性能指标

表 1.7 测定低碳钢和灰铸铁扭转时的强度性能指标试验的数据记录与计算

材料	低 碳 钢	灰 铸 铁
试样尺寸	直 径 $d =$ mm	直 径 $d =$ mm
实验后的试样草图		
实验数据	屈 服 扭 矩 $T_s =$ N·m 最 大 扭 矩 $T_b =$ N·m 扭转屈服应力 $\tau_s = 0.75T_s/W_p =$ MPa 抗 扭 强 度 $\tau_b = 0.75T_b/W_p =$ MPa	最大扭矩 $T_b =$ N·m 抗扭强度 $\tau_b = T_b/W_p =$ MPa
试样的扭转图		

## 六、思考题

1. 比较低碳钢与灰铸铁试样的扭转破坏断口,并分析它们的破坏原因。
2. 根据拉伸、压缩和扭转三种试验结果,比较低碳钢与灰铸铁的力学性能及破坏形式,并分析

原因。



## 实验二 梁的纯弯曲(综合)

### 一、实验目的及内容

1. 熟悉电阻应变测量技术的基本原理和方法;
2. 分别测量纯弯曲梁在矩形截面、工字形截面、T 形截面上的正应力;
3. 熟悉各种平面图形的几何性质的分析方法, 比较在各种截面上的正应力分布规律;
4. 比较实验结果与理论计算结果, 分析误差原因。

### 二、实验设备和仪器

1. 多功能材料力学实验装置, 包括数字载荷显示仪;
2. 静态电阻应变仪。

### 三、实验装置

如图 2.1 所示, 在主梁上对称放置子梁(分配梁), 载荷作用在子梁中点, 则子梁两支撑腿间的主梁任意截面为纯弯曲状态。主梁材料为 45 钢调质处理, 弹性模量  $E=210\text{ GPa}$ 。在子梁两支撑腿间的长度方向上分别制成矩形截面、工字形截面和 T 形截面三段, 每段梁的侧面沿与轴线平行的不同高度上均粘贴有五个单向应变片(1-1、2-2、3-3、4-4、5-5), 每种截面的尺寸及应变片位置如图所示。在与主梁相同材料制作的外置钢片上张贴有温度补偿片。通过转动实验装置框架的加载机构手柄进行加载和卸载, 载荷大小由数字载荷显示仪显示。

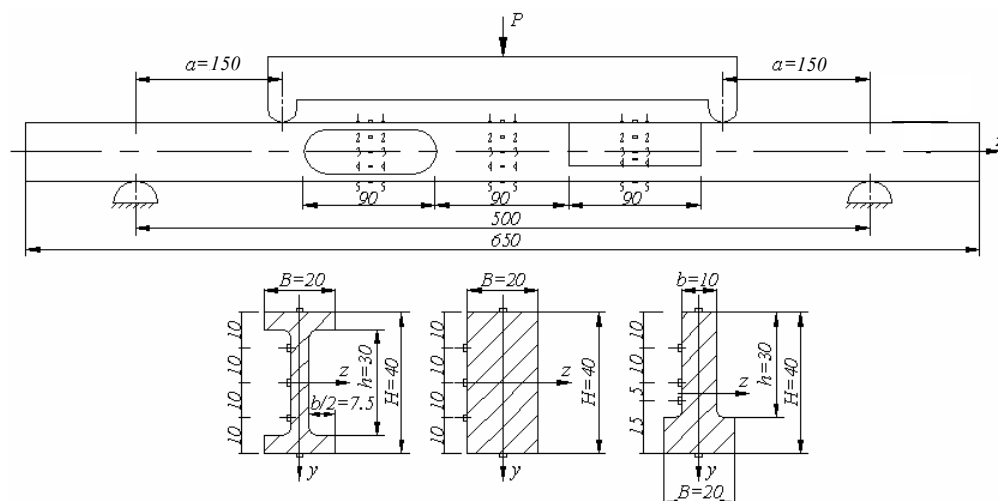


图 2.1 纯弯曲梁及其截面形式

### 四、实验原理与方法

在载荷  $P$  的作用下梁发生弯曲变形, 三种截面上所承受的弯矩均为

$$M = \frac{1}{2} Pa \quad (2.1)$$

横截面上的正应力理论计算公式为

$$\sigma_{\text{理}} = \frac{My}{I_z} \quad (2.2)$$

式中  $y$  为欲求应力点到中性轴的距离。对于矩形截面和工字形截面，梁的中性轴( $z$  轴)位置均在其几何中心线上，T 形截面梁的中性轴( $z$  轴)通过截面的形心(距底边 17mm 处)，各截面惯性矩  $I_z$  分别为

1)矩形截面的惯性矩

$$I_z = \frac{1}{12}BH^3 \quad (2.3)$$

2)工字形截面的惯性矩

$$I_z = \frac{1}{12}(BH^3 - bh^3) \quad (2.4)$$

3)T 形截面的惯性矩可用求惯性矩的平行移轴公式计算得到。

每次选择一种截面的 5 个应变片以 1/4 桥的形式分别接入应变仪的 5 个通道中，公用一个温度补偿片，组成如图 2.2 所示的 5 个电桥。当梁在载荷  $P$  的作用下梁发生弯曲变形时，工作片的电阻随着梁的变形而发生变化，通过电阻应变仪可以分别测量出各对应位置的应变值  $\varepsilon_{\text{实}}$ 。根据胡克定律可计算出相应的应力值。

$$\sigma_{\text{实}} = E\varepsilon_{\text{实}} \quad (2.5)$$

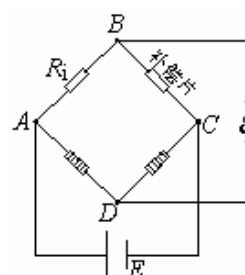


图 2.2 1/4 桥接法

## 五、实验步骤

1. 分别记录梁选择截面的尺寸、应变片位置参数及其它有关尺寸，预热应变仪和载荷显示仪。计算选择截面的惯性矩  $I_z$ 。
2. 检查各种仪器是否连接好，按顺序将各个应变片按图 2.2 所示的 1/4 桥接法接入应变仪的所选通道上。其中工作片接在应变仪上层(1~10 通道)的 5 个通道的  $A$ 、 $B$  端，温度补偿片接在上层最后一个补偿通道的  $A$ 、 $B$  端。拧紧各连接螺钉，并检查连通性。
3. 为了减少设备初始效应产生的误差，缓慢摇动多功能试验装置的加载机构手柄，预加 500N 载荷。逐一将应变仪的所选通道电桥调平衡，没听到平衡后停留 10s 检查是否有零漂，如果应变仪应变读数显示为“E”，则该通道未连通，如果应变仪读数波动(零漂)，则该通道接触不良。
4. 转动试验装置框架上的加载机构手柄，采用等量逐级加载(可取  $\Delta P = 500\text{N}$ )，每加一级载荷，分别读出各相应电阻应变片的应变值。加载应保持缓慢、均匀、平稳。
5. 将实验数据记录在实验报告的相应表格中。
6. 卸载，整理仪器，结束实验。

## 六、实验数据记录与计算

矩形截面											
$E =$		GPa,		$a =$		mm,		$B =$		$H =$	
应变( $\mu$ ) 载荷/N		1—1 点 $y =$ mm		2—2 点 $y =$ mm		3—3 点 $y =$ mm		4—4 点 $y =$ mm		5—5 点 $y =$ mm	
读数	增量	读数	增量	读数	增量	读数	增量	读数	增量	读数	增量
$\overline{\Delta P} =$		$\overline{\Delta \varepsilon} =$		$\overline{\Delta \varepsilon} =$		$\overline{\Delta \varepsilon} =$		$\overline{\Delta \varepsilon} =$		$\overline{\Delta \varepsilon} =$	
$\overline{\Delta \sigma_{\text{实}}}$ /MPa											
$\overline{\Delta \sigma_{\text{理}}}$ /MPa											
误差/%											

工字形截面											
$E =$		GPa,		$a =$		mm,		$B =$		$H =$	
应变( $\mu$ ) 载荷/N		1—1 点 $y =$ mm		2—2 点 $y =$ mm		3—3 点 $y =$ mm		4—4 点 $y =$ mm		5—5 点 $y =$ mm	
读数	增量	读数	增量	读数	增量	读数	增量	读数	增量	读数	增量
$\overline{\Delta P} =$		$\overline{\Delta \varepsilon} =$		$\overline{\Delta \varepsilon} =$		$\overline{\Delta \varepsilon} =$		$\overline{\Delta \varepsilon} =$		$\overline{\Delta \varepsilon} =$	
$\overline{\Delta \sigma_{\text{实}}}$ /MPa											
$\overline{\Delta \sigma_{\text{理}}}$ /MPa											
误差/%											

T 字形截面											
$E =$ GPa,		$a =$ mm,		$B =$ mm,		$H =$ mm,		$b =$ mm,		$h =$ mm	
应变( $\mu$ ) 载荷/N		1—1 点 $y =$ mm		2—2 点 $y =$ mm		3—3 点 $y =$ mm		4—4 点 $y =$ mm		5—5 点 $y =$ mm	
读数	增量	读数	增量	读数	增量	读数	增量	读数	增量	读数	增量
$\overline{\Delta P} =$		$\overline{\Delta \varepsilon} =$		$\overline{\Delta \varepsilon} =$		$\overline{\Delta \varepsilon} =$		$\overline{\Delta \varepsilon} =$		$\overline{\Delta \varepsilon} =$	
$\overline{\Delta \sigma_{\text{实}}}$ /MPa											
$\overline{\Delta \sigma_{\text{理}}}$ /MPa											
误差/%											

## 七、思考题

1. 比较实验结果与理论计算结果，分析误差原因。
2. 分析比较在纯弯矩作用下各种截面上的正应力分布规律，考虑如何采用半桥或全桥接法测量矩形截面和工字形截面的正应力分布。
3. 在工程实际中，如何合理设计受弯构件的截面形式。

## 实验三 薄壁圆筒的弯扭组合变形(综合)

### 一、实验目的

1. 了解实验应力分析的基本理论和方法；
2. 测量在弯扭组合变形下薄壁圆筒表面指定点的主应力大小和方向；
3. 测量在弯扭组合变形下薄壁圆筒表面指定点与弯矩、扭矩和剪力分别对应的应力。

### 二、实验设备和仪器

1. 薄壁圆筒弯扭组合变形实验装置；
2. 静态电阻应变仪；

### 三、实验原理及方法

实验装置如图 3.1 所示，圆筒的外径  $D = 40\text{mm}$ ，内径  $d = 34\text{mm}$ ，材料为铝合金。通过转动加载手轮进行加载，采用等量逐级加载，载荷大小由数字显示仪显示，根据载荷大小可计算出指定横截面 I-I 上的弯矩、剪力和扭矩。

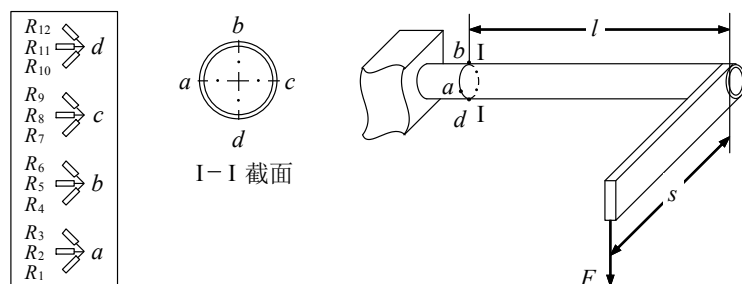


图 3.1 薄壁圆筒弯扭组合变形实验装置

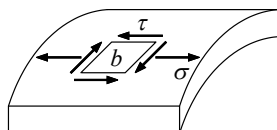


图 3.2 b 点的应力状态

#### 1. 测量主应力

选择横截面 I-I 上的  $b$ 、 $d$  两点进行测量， $b$  点的应力状态如图 3.2 所示，根据理论分析可知，正应力为

$$\sigma = \frac{M}{W_z} \quad (3.1)$$

式中：  $M = Fl$ ；  $W_z = \pi D^3(1-\alpha^4)/32$ ；  $\alpha = d/D$ ；  $D$  为薄壁圆筒的外径；  $d$  为薄壁圆筒内径。

扭转切应力为

$$\tau_T = \frac{T}{W_p} \quad (3.2)$$

式中：  $W_p = \pi D^3(1-\alpha^4)/16$ 。

选择电阻应变仪上层采用公用温度补偿片的 1/4 桥接法的 1~10 通道中任意 6 个通道，将  $b$ 、 $d$  两

点的两个应变花的 6 个应变片  $R_4 \sim R_6$ 、 $R_{10} \sim R_{12}$  分别接入应变仪所选 6 个通道的  $A$ 、 $B$  端；将一个公用的温度补偿片接入应变仪上层的最后一个补偿通道的  $A$ 、 $B$  端，拧紧所有连接螺钉并检查所有通道连通性，形成如图 3.3 所示的六个测量电桥电路。

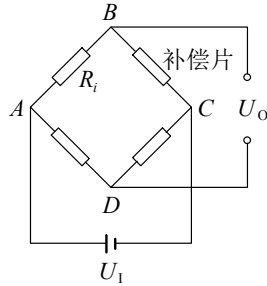


图 3.3 主应力测量接线图

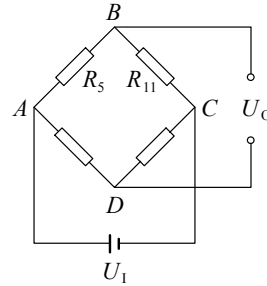


图 3.4 与弯矩对应的正应变测量

采用等量逐级加载(每级加载 100N)，在每一载荷作用下，分别测得  $b$ 、 $d$  两点的  $\varepsilon_{45^\circ}$ 、 $\varepsilon_{0^\circ}$ 、和  $\varepsilon_{-45^\circ}$ 。将测量结果记录在实验报告中，可用下列公式计算出  $b$ 、 $d$  两点的主应力大小和方向：

$$\sigma_1 = \frac{E}{2} \left[ \frac{1}{1-\nu} (\varepsilon_{45^\circ} + \varepsilon_{-45^\circ}) \pm \frac{\sqrt{2}}{1+\nu} \sqrt{(\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{-45^\circ})^2 + (\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{0^\circ})^2} \right] \quad (3.3)$$

$$\tan 2\alpha_0 = \frac{\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{-45^\circ}}{2\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{-45^\circ}} \quad (3.4)$$

## 2. 测量与弯矩 $M$ 对应的正应变

选择横截面 I-I 上的  $b$ 、 $d$  两点进行测量。将  $b$ 、 $d$  两点应变花的两个  $0^\circ$  方向应变片  $R_5$  和  $R_{11}$  按图 3.4 所示的半桥接法接入电阻应变仪下层采用半桥接法的 16~20 通道的任一通道( $A$ 、 $B$ )和( $B$ 、 $C$ )端。采用等量逐级加载(每级加载 100N)，在每一载荷作用下，可测得  $b$ 、 $d$  两点与弯矩  $M$  所对应的正应变

$$\varepsilon_M = \frac{\varepsilon_{du}}{2} \quad (3.5)$$

式中： $\varepsilon_{du}$  为电阻应变仪的读数。

## 3. 测量与扭矩 $T$ 对应的切应变

选择横截面 I-I 上的  $a$ 、 $c$  两点进行测量。选择电阻应变仪下层采用全桥接法的 11~15 通道的任一通道，用  $a$ 、 $c$  两点的  $45^\circ$  和  $-45^\circ$  方向的四个应变片  $R_1$ 、 $R_3$ 、 $R_7$  和  $R_9$  接入选择通道的( $B$ 、 $C$ )、( $A$ 、 $B$ )、( $D$ 、 $A$ )和( $C$ 、 $D$ )端，组成如图 3.5 所示的全桥电路。采用等量逐级加载(每级加载 100N)，在每一载荷作用下，可测得  $a$ 、 $c$  两点与扭矩  $T$  所对应的切应变

$$\gamma_T = \frac{\varepsilon_{du}}{2} \quad (3.6)$$

原理分析：由理论分析可知，由于  $a$ 、 $c$  两点位于中性轴上，所以无沿轴线方向的线应变， $a$ 、 $c$  两点均为纯剪切应力状态，与扭矩  $T$  和剪力  $F_Q$  分别对应的切应力  $\tau_T$  和  $\tau_{F_Q}$  为

$$\tau_T = \frac{T}{2\pi r_0^2 t} \quad (3.7)$$

$$\tau_{F_Q} = \frac{F_Q}{\pi r_0 t} \quad (3.8)$$

式中： $r_0 = (D+d)/4$  为薄壁圆筒的平均半径； $t = (D-d)/2$  为薄壁圆筒的厚度。

设在沿四个应变片  $R_1$ 、 $R_3$ 、 $R_7$  和  $R_9$  方向上与扭矩  $T$  所对应的线应变分别为  $\varepsilon_{T1}$ 、 $\varepsilon_{T3}$ 、 $\varepsilon_{T7}$  和  $\varepsilon_{T9}$ ，

于是有

$$\varepsilon_{T3} = -\varepsilon_{T1} = \varepsilon_{T9} = -\varepsilon_{T7}$$

设在沿四个应变片  $R_1$ 、 $R_3$ 、 $R_7$  和  $R_9$  方向上与剪力  $F_Q$  所对应的线应变分别为  $\varepsilon_{FQ1}$ 、 $\varepsilon_{FQ3}$ 、 $\varepsilon_{FQ7}$  和  $\varepsilon_{FQ9}$ ，则有

$$\varepsilon_{FQ3} = -\varepsilon_{FQ1} = \varepsilon_{FQ7} = -\varepsilon_{FQ9}$$

根据电桥的性质可知，电阻应变仪的读数为

$$\varepsilon_{du} = (\varepsilon_{T3} + \varepsilon_{FQ3}) - (\varepsilon_{T1} + \varepsilon_{FQ1}) + (\varepsilon_{T9} + \varepsilon_{FQ9}) - (\varepsilon_{T7} + \varepsilon_{FQ7}) = 4\varepsilon_{T3} \quad (3.9)$$

即每个应变片与扭矩  $T$  所对应的线应变为  $\varepsilon_T = \varepsilon_{du} / 4$ 。说明全桥接法，电阻应变仪的读数为每个应变片实际应变值的四倍。

上述测得的是线应变值，根据纯剪切应力状态下的应变分析可知，在  $a$ 、 $c$  两点处与扭矩  $T$  所对应的切应变为

$$\gamma_T = 2\varepsilon_{T3} = \frac{\varepsilon_{du}}{2}$$

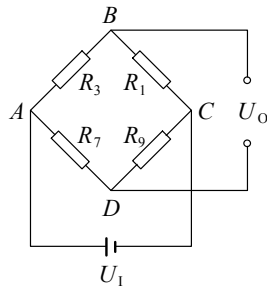


图 3.5 与扭矩对应的切应变测量

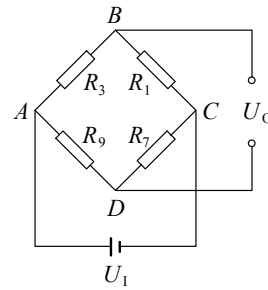


图 3.6 与剪力对应的切应变测量

#### 4. 测量与剪力 $F_Q$ 对应的切应变

选择横截面 I-I 上的  $a$ 、 $c$  两点进行测量。选择电阻应变仪下层采用全桥接法的 11~15 通道的任一通道，用  $a$ 、 $c$  两点的  $45^\circ$  和  $-45^\circ$  方向的四个应变片  $R_1$ 、 $R_3$ 、 $R_7$  和  $R_9$  接入选择通道的  $(B, C)$ 、 $(A, B)$ 、 $(C, D)$  和  $(D, A)$  端，组成如图 3.6 所示的全桥电路。在此情况下，电阻应变仪的读数为

$$\varepsilon_{du} = (\varepsilon_{T3} + \varepsilon_{FQ3}) - (\varepsilon_{T1} + \varepsilon_{FQ1}) + (\varepsilon_{T7} + \varepsilon_{FQ7}) - (\varepsilon_{T9} + \varepsilon_{FQ9}) = 4\varepsilon_{FQ3} \quad (3.10)$$

即每个应变片与剪力  $F_Q$  所对应的线应变为  $\varepsilon_{FQ} = \varepsilon_{du} / 4$ 。采用等量逐级加载(每级加载 100N)，在每一载荷作用下，可测得  $a$ 、 $c$  两点与剪力  $F_Q$  所对应的切应变

$$\gamma_{FQ} = \frac{\varepsilon_{du}}{2} \quad (3.11)$$

#### 5. 测量切变模量 $G$

按照 3 的方法，测量出切应变  $\gamma_T$  后，可计算出切变模量

$$G = \frac{\tau}{\gamma_T} \quad (3.12)$$

式中： $\tau = T / (2\pi r_0^2 t)$  为理论计算的切应力。

### 五、实验数据的记录与计算

#### 1. 测量主应力

表 3.1a 薄壁圆筒弯扭组合实验的数据记录与计算(测量应变)

应变/ $\mu\epsilon$		45° 方向		0° 方向		-45° 方向	
载荷/N							
读数 $F$	增量 $\Delta F$	读数 $\epsilon_{45^\circ}$	增量 $\Delta\epsilon_{45^\circ}$	读数 $\epsilon_{0^\circ}$	增量 $\Delta\epsilon_{0^\circ}$	读数 $\epsilon_{-45^\circ}$	增量 $\Delta\epsilon_{-45^\circ}$
$b$ 点		$R_4$		$R_5$		$R_6$	
$\overline{\Delta F} =$		$\overline{\Delta\epsilon_{45^\circ}} =$		$\overline{\Delta\epsilon_{0^\circ}} =$		$\overline{\Delta\epsilon_{-45^\circ}} =$	
$d$ 点		$R_{10}$		$R_{11}$		$R_{12}$	
$\overline{\Delta F} =$		$\overline{\Delta\epsilon_{45^\circ}} =$		$\overline{\Delta\epsilon_{0^\circ}} =$		$\overline{\Delta\epsilon_{-45^\circ}} =$	

表 3.1b 薄壁圆筒弯扭组合实验的数据计算结果(计算主应力及其方向)

材料常数: 弹性模量 $E=70\text{GPa}$ , 泊松比 $\nu=0.33$									
装置尺寸: 圆筒外径 $D=40\text{mm}$ , 圆筒内径 $d=34\text{mm}$ ,									
测点位置 $l=230\text{mm}$ , 加载臂长 $s=200\text{mm}$									
主应力	$\sigma_1/\text{MPa}$			$\sigma_3/\text{MPa}$			$\alpha_0/^\circ$		
测点	理论值	实验值	误差	理论值	实验值	误差	理论值	实验值	误差
$b$									
$d$									



## 2. 测量与弯矩、扭矩和剪力分别对应的应变和应力

表 3.2 薄壁圆筒弯扭组合实验的数据记录与计算(与内力对应的应变和应力)

应变/ $\mu\epsilon$		与弯矩 $M$ 对应		与扭矩 $T$ 对应		与剪力 $F_Q$ 对应	
载荷/N							
读数 $F$	增量 $\Delta F$	读数 $\epsilon_{du}$	增量 $\Delta\epsilon_{du}$	读数 $\epsilon_{du}$	增量 $\Delta\epsilon_{du}$	读数 $\epsilon_{du}$	增量 $\Delta\epsilon_{du}$
$\overline{\Delta F} =$		$\overline{\Delta\epsilon_{du}} =$		$\overline{\Delta\epsilon_{du}} =$		$\overline{\Delta\epsilon_{du}} =$	
		$\overline{\Delta\epsilon_M} =$		$\overline{\Delta\gamma_T} =$		$\overline{\Delta\gamma_{FQ}} =$	
应力实验值/MPa		$\sigma_{M实} =$		$\tau_{T实} =$		$\tau_{FQ实} =$	
应力理论值/MPa		$\sigma_{M理} =$		$\tau_{T理} =$		$\tau_{FQ理} =$	
误差 = $\frac{\text{理论值} - \text{实验值}}{\text{理论值}} / \%$							

## 六、注意事项

1. 加载时，最大载荷不得超过 500N。
2. 应变片接入电阻应变仪的位置应正确，接线应可靠。
3. 注意半桥和全桥接法的不同。
4. 选择通道接好电桥后，加载前应将电桥逐一调节平衡，使电阻应变仪应变读数为零。

## 附录 A 电测法基础

**电阻应变测量方法**是将应变转换成电信号进行测量的方法,简称**电测法**。电测法的基本原理是:将电阻应变片(简称**应变片**)粘贴在被测构件的表面,当构件发生变形时,应变片随着构件一起变形,应变片的电阻值将发生相应的变化,通过电阻应变测量仪器(简称**电阻应变仪**),可测量出应变片中电阻值的变化,并换算成应变值,或输出与应变成正比的模拟电信号(电压或电流),用记录仪记录下来,也可用计算机按预定的要求进行数据处理,得到所需要的应变或应力值。其工作过程如下所示:

应变——电阻变化——电压(或电流)变化——放大——记录——数据处理

电测法具有灵敏度高的特点,应变片重量轻、体积小且可在高(低)温、高压等特殊环境下使用,测量过程中的输出量为电信号,便于实现自动化和数字化,并能进行远距离测量及无线遥测。

### A. 1 电阻应变片

#### 一、电阻应变片的构造和类型

电阻应变片的构造很简单,把一根很细的具有高电阻率的金属丝在制片机上按图 A-1 所示的那样排绕后,用胶水粘结在两片薄纸之间,再焊上较粗的引出线,成为早期常用的丝绕式应变片。应变片一般由敏感栅(即金属丝)、粘结剂、基底、引出线和覆盖层五部分组成。若将应变片粘贴在被测构件的表面,当金属丝随构件一起变形时,其电阻值也随之变化。

常用的应变片有:丝绕式应变片(图 A-1)、短接线式应变片和箔式应变片(图 A-2)等。它们均属于单轴式应变片,即一个基底上只有一个敏感栅,用于测量沿栅轴方向的应变。如图 A-3 所示,在同一基底上按一定角度布置了几个敏感栅,可测量同一点沿几个敏感栅栅轴方向的应变,因而称为**多轴应变片**,俗称**应变花**。应变花主要用于测量平面应力状态下一点的主应变和主方向。

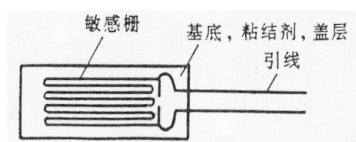


图 A-1 应变片的构造

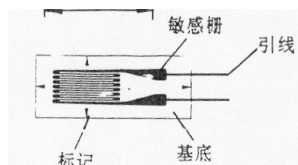
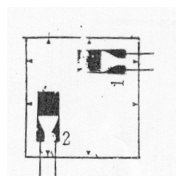
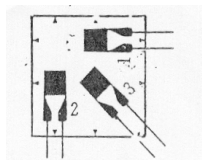


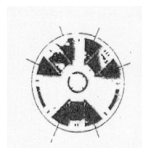
图 A-2 箔式应变片



(a)



(b)



(c)

图 A-3 应变花

(a) 90° 应变花; (b) 45° 应变花; (c) 120° 应变花

#### 二、电阻应变片的灵敏系数

在用应变片进行应变测量时,需要对应变片中的金属丝加上一定的电压。为了防止电流过大,产生发热和熔断等现象,要求金属丝有一定的长度,以获得较大的初始电阻值。但在测量构件的应

变时，又要求尽可能缩短应变片的长度，以测得“一点”的真实应变。因此，应变片中的金属丝一般做成如图 A-1 所示的栅状，称为**敏感栅**。粘贴在构件上的应变片，其金属丝的电阻值随着构件的变形而发生变化的现象，称为**电阻应变现象**。在一定的变形范围内，金属丝的电阻变化率与应变成线性关系。当将应变片安装在处于单向应力状态的试件表面，并使敏感栅的栅轴方向与应力方向一致时，应变片电阻值的变化率  $\Delta R/R$  与敏感栅栅轴方向的应变  $\varepsilon$  成正比，即

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (\text{A-1})$$

式中： $R$  为应变片的原始电阻值； $\Delta R$  为应变片电阻值的改变量； $K$  称为**应变片的灵敏系数**。

应变片的灵敏系数一般由制造厂家通过实验测定，这一步骤称为**应变片的标定**。在实际应用时，可根据需要选用不同灵敏系数的应变片。

### 三、电阻应变片的粘贴和防护

常温应变片通常采用粘结剂粘贴在构件的表面。粘贴应变片是测量准备工作中最重要的一个环节。在测量中，构件表面的变形通过粘结层传递给应变片。显然，只有粘结层均匀、牢固、不产生蠕滑，才能保证应变片如实地再现构件表面的变形。应变片的粘贴由手工操作，一般按如下步骤进行：

- (1)检查、分选应变片。
- (2)处理构件的测点表面。
- (3)粘贴应变片。
- (4)加热烘干、固化。
- (5)检查应变片的电阻值，测量绝缘电阻。
- (6)引出导线。

实际测量中，应变片可能处于多种环境中，有时需要对粘贴好的应变片采取相应的防护措施，以保证其安全可靠。一般在应变片粘贴完成后，根据需要可用石蜡、纯凡士林、环氧树脂等对应变片的表面进行涂覆保护。

## A. 2 电阻应变片的测量电路

在使用应变片测量应变时，必须用适当的办法测量其电阻值的微小变化。为此，一般是把应变片接入某种电路，让其电阻值的变化对电路进行某种控制，使电路输出一个能模拟该电阻值变化的信号，然后，只要对这个电信号进行相应的处理就行了。常规电测法使用的电阻应变仪的输入回路叫做**应变电桥**，它是以应变片作为其部分或全部桥臂的四臂电桥。它能把应变片电阻值的微小变化转化成输出电压的变化。在此，仅以直流电压电桥为例加以说明。

### 一、电桥的输出电压

电阻应变仪中的电桥线路如图 A-4 所示，它是以应变片或电阻元件作为电桥桥臂。可取  $R_1$  为应变片、 $R_1$  和  $R_2$  为应变片或  $R_1 \sim R_4$  均为应变片等几种形式。 $A$ 、 $C$  和  $B$ 、 $D$  分别为电桥的输入端和输出端。

根据电工学原理，可导出当输入端加有电压  $U_1$  时，电桥的输出电压为

$$U_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_1$$

当  $U_0 = 0$  时，电桥处于平衡状态。因此，电桥的平衡条件为  $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 。当处于平衡的电桥中

各桥臂的电阻值分别有  $\Delta R_1$ 、 $\Delta R_2$ 、 $\Delta R_3$  和  $\Delta R_4$  的变化时，可近似地求得电桥的输出电压为

$$U_O \approx \frac{U_1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

由此可见，应变电桥有一个重要的性质：**应变电桥的输出电压与相邻两桥臂的电阻变化率之差、相对两桥臂电阻变化率之和成正比**。对于平衡电桥，如果相邻两桥臂的电阻变化率大小相等、符号相同，或相对两桥臂的电阻变化率大小相等、符号相反，则电桥将不会改变其平衡状态，即保持  $U_O = 0$ 。

如果电桥的四个桥臂均接入相同的应变片，则有

$$U_O = \frac{KU_1}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

式中， $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_4$  分别为接入电桥四个桥臂的应变片的应变值。

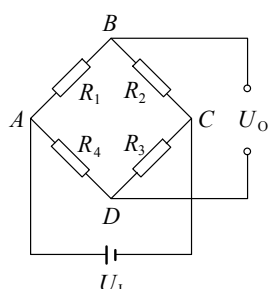


图 A-4 电桥原理

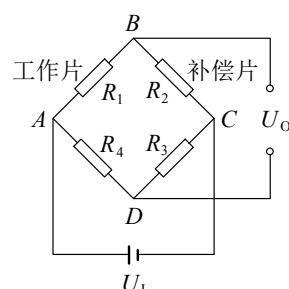


图 A-5 半桥单臂温度补偿接法

## 二、温度效应的补偿

贴有应变片的构件总是处在某一温度场中。若敏感栅材料的线膨胀系数与构件材料的线膨胀系数不相等，则当温度发生变化时，由于敏感栅与构件的伸长(或缩短)量不相等，在敏感栅上就会受到附加的拉伸(或压缩)，从而会引起敏感栅电阻值的变化，这种现象称为**温度效应**。敏感栅电阻值随温度的变化率可近似地看作与温度成正比。温度的变化对电桥的输出电压影响很大，严重时，每升温  $1^\circ\text{C}$ ，电阻应变片中可产生几十微应变。显然，这是非被测(虚假)的应变，必须设法排除。排除温度效应的措施，称为**温度补偿**。根据电桥的性质，温度补偿并不困难。只要用一个应变片作为**温度补偿片**，将它粘贴在一块与被测构件材料相同但不受力的试件上。将此试件和被测构件放在一起，使它们处于同一温度场中。粘贴在被测构件上的应变片称为**工作片**。在连接电桥时，使工作片与温度补偿片处于相邻的桥臂，如图 A-5 所示。因为工作片和温度补偿片的温度始终相同，所以它们因温度变化所引起的电阻值的变化也相同，又因为它们处于电桥相邻的两臂，所以并不产生电桥的输出电压，从而使得温度效应的影响被消除。

必须注意，工作片和温度补偿片的电阻值、灵敏系数以及电阻温度系数应相同，分别粘贴在构件上和不受力的试件上，以保证它们因温度变化所引起的应变片电阻值的变化相同。

## 三、应变片的布置和在电桥中的接法

应变片感受的是构件表面某点的拉应变或压应变。在有些情况下，该应变可能与多种内力(比如轴力和弯矩)有关。有时，只需测量出与某种内力所对应的应变，而要把与其它内力所对应的应变从总应变中排除掉。显然，应变片本身不会分辨各种应变成分，但是只要合理地选择粘贴应变片的位置和方向，并把应变片合理地接入电桥，就能利用电桥的性质，从比较复杂的组合应变中测量出指定的应变。

应变片在电桥中的接法常有以下三种形式：

(1) **半桥单臂接法** 如图 A-5 所示，将个工作片和一个温度补偿片分别接入两个相邻桥臂，另两个桥臂接固定电阻。如果工作片的应变为  $\varepsilon$ ，则电桥的输出电压为

$$U_O = \frac{KU_1}{4} \varepsilon \quad (\text{A-2})$$

(2) **半桥双臂接法** 如图 A-6 所示，将两个工作片接入电桥的两个相邻桥臂，另两个桥臂接固定电阻，两个工作片同时互为温度补偿片。如果工作片的应变分别为  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$ ，则电桥的输出电压为

$$U_O = \frac{KU_1}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (\text{A-3})$$

若  $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon$ ，则电桥的输出电压为

$$U_O = \frac{KU_1}{2} \varepsilon \quad (\text{A-4})$$

即为半桥单臂接法的两倍。

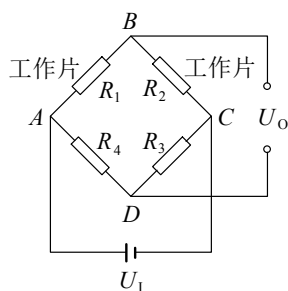


图 A-6 半桥双臂接法

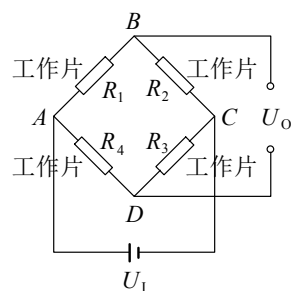


图 A-7 全桥接法

(3) **全桥接法** 如图 A-7 所示，电桥的四个桥臂全部接入工作片，如果工作片的应变分别为  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$  和  $\varepsilon_4$ ，则电桥的输出电压为

$$U_O = \frac{KU_1}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (\text{A-5})$$

若  $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 = \varepsilon$ ，则电桥的输出电压为

$$U_O = KU_1 \varepsilon \quad (\text{A-6})$$

即为半桥单臂接法的四倍。

必须注意，接入同一电桥各桥臂的应变片(工作片或温度补偿片)的电阻值、灵敏系数和电阻温度系数均应相同。应变片在构件上的布置可根据具体情况灵活采取各种不同的方法。应变片在构件上的布置和在电桥中的接法可参见有关资料。

## 参 考 文 献

- 1 单辉祖编著. 材料力学(I). 北京: 高等教育出版社, 1999
- 2 杨伯源主编. 材料力学(I). 北京: 机械工业出版社, 2001
- 3 贾有权主编. 材料力学实验. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1984
- 4 王杏根等主编. 工程力学实验. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002
- 5 张如一编. 应变电测与传感器. 北京: 清华大学出版社, 1999