

第一部分 拉伸实验

工程中用于制作结构件和零件的材料，一般称为结构材料。对于结构材料，人们最关心的是它的力学性能。所谓力学性能是材料承受外载荷而不发生失效的能力。任何材料受力后都要产生变形，变形到一定程度即发生断裂。这种在外载作用下材料所表现的变形与断裂的行为叫力学行为，它是由材料内部的物质结构决定的，是材料固有的属性。同时，环境因素如温度、介质和加载速率对于材料的力学行为有很大的影响。因此材料的力学行为是外加载荷与环境因素共同作用的结果。

不同材料的力学行为差别巨大。为了选材和评定材料，需要用实验的方法观察和研究其力学行为，测定其力学性能。通过拉伸试验测定的材料弹性、强度、塑性和应力-应变关系等重要力学性能代表材料基本力学性能，是工程中合理选用材料及进行强度设计的主要依据。又由于拉伸实验简单易行、实验结果易于分析，因此是研究和测定材料力学性能最基本、应用最广的试验方法。

力学性能测试实验必须要在一定的条件和要求下完成，其测试结果要按统一的规定方法和定义来确定以准确表征材料的力学性能。所以，要依据国家标准规定的实验要求、条件及力学性能指标的定义方法来进行材料力学性能测试。本实验依据金属材料拉伸国家标准 GB/T228.1—2010【金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法】和高分子材料拉伸国家标准 GB/T1040.1—2018/ISO527-1:2012【塑料 拉伸性能测试】。其它材料如复合材料等拉伸试验和其它加载方式的实验（如压缩试验、弯曲试验、扭转实验、冲击试验等）都有相应的国家标准。

一、试验条件

拉伸试验的基本条件是常温、静荷、轴向加载，即拉伸实验是在室温下以均匀缓慢的速度对被测试样施加轴向载荷的试验。

1. 拉伸试样

金属材料的拉伸试样应按国家标准 GB228—2002 的规定制备。通常试样有圆截面和矩形截面两种。图 1.1 为圆截面试样的示意图。一般的拉伸试样由三部分组成，即工作部分、过渡部分和夹持部分。工作部分必须保持光滑均匀以确保单向应力状态。 L_c 称为试样的平行长度， L_0 称作试样的原始标距。圆试样的 L_c 应大于 $L_0 + d/2$ ；板试样的 L_c 应大于 $L_0 + b/2$ 。拉伸试样分为比例试样和定标距试样。比例试样的标距与试样原始截面积的关系规定为

$$L_0 = 5.65\sqrt{S_0}$$

或

$$L_0 = 11.3\sqrt{S_0}$$

式中系数取为 5.65 时称为短比例试样，取为 11.3 时称为长比例试样。如果是圆试样，那么当试样标距与试样直径的比为 5，即 $L_0 = 5d$ 时为短比例试样， $L_0 = 10d$ 时为长比例试样。

国家标准规定使用短比例试样。如实验采用的是长比例试样或非比例试样，应在实验测试报告中明确标注。

试样的过渡部分必须有足够大的过渡圆弧半径 r 。试样的夹持部分的形状和尺寸与所

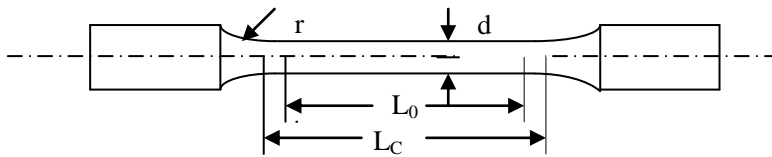


图 1.1 圆形拉伸试样简图

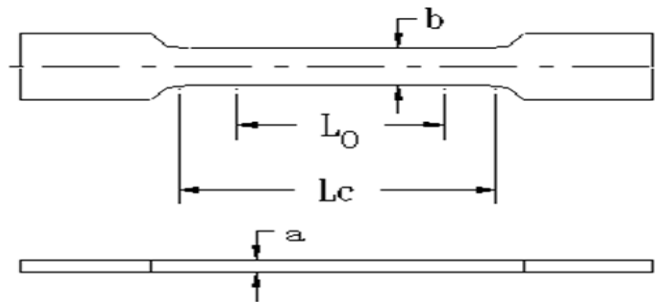


图 1.2 矩形拉伸试样简图

用试验机的夹具结构有关，如试样为图 1.1 和 1.2 的形式，则试样夹持部分的长度不应小于夹具长度的三分之二。

2. 材料试验机

用于测定材料基本力学性能的试验设备是电子万能试验机。试验机的主机是由丝杠、上横梁、活动横梁及工作台组成的门式框架结构。丝杠转动推动活动横梁上下移动。伺服控制系统控制伺服电机的转动速度使活动横梁在给定速度下匀速转动，实现不同速度下活动横梁上下移动。活动横梁的移动速度范围一般是 $0.05\text{mm}\sim 500\text{mm/min}$ 。在活动横梁与上横梁（或工作台）之间连接拉伸夹具并装上拉伸试件，移动活动横梁即可对试件施加拉伸载荷，如安装压缩和弯曲附具即可完成压缩和弯曲实验。

对试件施加的载荷、横梁位移及试件变形是试验机基本信号。载荷和变形信号的测量是利用电测传感技术，即通过应变计式传感器将机械信号转变为电信号。安装在活动横梁上的载荷传感器通过万向联轴节及拉伸夹具与试样联在一起。载荷传感器的容量即试验机的最大量程。比如拉伸实验用的 Instron9582 电子万能试验机的最大实验载荷是 100KN 。测量试样变形的传感器称作引伸计。引伸计的两个力臂的端部装有锋利的刀口。两刀口间距就是引伸计的标距长度，常用的引伸计标距是 50mm ，最大量程为 5mm 。实验前将引伸计固定到拉伸试件上，对试件加拉伸载荷的同时测量标距内试件的伸长。横梁位移即活动横梁移动的距离，它表示了横梁的状态，也反映了的被测试件大致的轴向变形。位移的测量是采用光电转换技术，通过安装在丝杠顶部的脉冲编码器将丝杠转动信号转变为脉冲信号。载荷、变形和位移三路信号均经过信号调理电路变为标准信号显示或输送给计算机进一步处理。

现在实验室用于材料力学实验教学的材料试验机全部是计算机控制的电子万能试验

机。计算机控制的电子万能试验机，使用专用的控制软件，只需点击鼠标即可完成试验机的各种控制 and 功能操作，具有数据文件存储、实验数据分析处理、实验曲线放大、遍历及结果打印输出等功能。

二、试验原理和方法

进行单向拉伸试验时，外力必须通过试样轴线以确保材料处于单向拉应力状态。试验机的夹具、万向联轴节和按标准加工的试样，以及对试样准确地夹持保证了试样测量部分各点受力相等且为单向受拉状态。试样所受到的载荷通过载荷传感器检测出来，试样产生的变形可以通过在试样上安装的引伸计准确地检测出来。如果测试的要求不高，也可利用横梁位移代表试样的伸长。在试验过程中试验机的控制软件将实时显示和记录载荷与试样变形的关系曲线即 $F-\Delta L$ 曲线。拉伸曲线的纵坐标为载荷 F ，单位是 N 或 KN ，横坐标是试

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

件的伸长 ΔL ，单位是 mm 。 $F-\Delta L$ 曲线形象地体现了材料变形特点以及各阶段受力和变形的关系，但是 $F-\Delta L$ 曲线的定量关系不仅取决于材质而且受试样几何尺寸的影响。因此 $F-\Delta L$ 曲线常常转化为名义应力、名义应变曲线即 $\sigma-\varepsilon$ 曲线（如图 1.2 所示），即式中 S_0 和 L_0 分别代表试样初始条件下的面积和标距。试样受到的载荷除以试样原始面积就得到了名义应力用 σ 表示，也叫工程应力；同样，试样在标距之间的伸长除以试样的原始标距得到名义应变用 ε 表示，也叫工程应变。 $\sigma-\varepsilon$ 曲线与 $F-\Delta L$ 曲线形状相似，但消除了几何尺寸的影响，因此能代表材料的属性。如果试验能提供一条精确的拉伸曲线，那么就可以测定材料的基本力学性能指标。

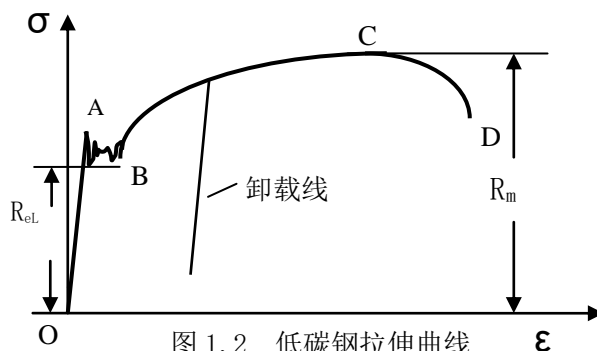
下面以低碳钢为例，说明金属材料拉伸性能指标的定义。低碳钢具有良好的塑性变形，从其 $\sigma-\varepsilon$ 曲线（图 1.2）可以看出，低碳钢断裂前明显地分为四个阶段：

弹性阶段（OA）：试样的变形是弹性的。在这个范围内卸载，试样仍恢复到原来的尺寸，没有任何残余变形。多数材料在弹性范围内服从虎克定律，其应力、应变成正比关系，即

$$\sigma = E\varepsilon$$

比例系数 E 代表直线的斜率，称作材料的弹性模量。弹性模量反映了材料抵抗弹性变形的能力，是材料刚度的量度。很多工程材料和机械部件用的材料都需要知道它的弹性模量，以便用于设计计算。

屈服阶段（AB）：加载到 A 点后，在试样继续变形的情况下，载荷却不再增加，或呈下降，甚至反复多次下降，使曲线变成锯齿状。若试样表面光滑，可看到 45° 的滑移线。这种现象称为屈服，通常把下屈服点作为材料的下屈服强度 R_{eL} 。 R_{eL} 是材料开始进入塑性的标志。从屈服阶段开始，材料的变形包含弹性和塑性两部分。



强化阶段（BC）：过了屈服阶段（B）点，力又开始增加，曲线又开始上升，表明材料具有应变强化的能力。即材料要继续变形，载荷就必须不断增加。如果在这个阶段卸载，弹性变形将随之消失，而塑性变形将永远保留下来。卸载后若重新加载，加载线则与弹性阶段平行，但重新加载后，材料的弹性阶段加长、屈服强度明显提高，而塑性却相应下降。这种现象称作冷作硬化。随着载荷的继续加大，拉伸曲线的上升将渐趋平缓，C 点是曲线的最高点，此点定义为材料的强度极限又称抗拉强度 R_m 。对低碳钢来说 R_m 是材料均匀塑性变形的最大抗力，是材料进入颈缩阶段的标志。

颈缩阶段（CD）：应力达到强度极限后，塑性变形开始在局部进行。局部截面急剧收缩，承载面积迅速减小，承载力下降，直到断裂。断裂时，试样的弹性变形消失，塑性变形则遗留在破断的试样上。

材料发生塑性变形的能力叫塑性，塑性的大小用塑性指标表示。它包括断后伸长率和断面收缩率。断后伸长率用 A 表示，断面收缩率用 Z 表示，即：

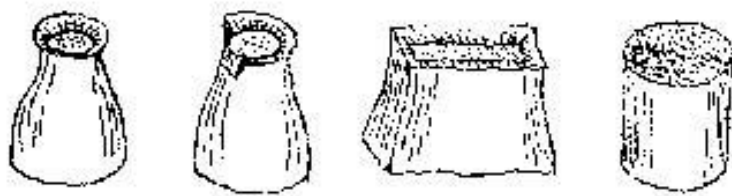
式中 l_0 、 S_0 分别代表试样的原始标距长度和原始横截面积， L_u 、 A_u 为试样拉断后的标距长

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} 100\%$$

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} 100\%$$

度和断口面积。如果断口位置在标距线之外，则试验无效。如断口在标距内，但靠近标距线则需用断口补偿法计算断后伸长率（方法略）。对于国家标准规定的两种比例试样，断后伸长率采用不同的下标表示。短试样，用 A 表示，长试样用 $A_{11.3}$ 表示。工程上通常认为，材料的断后伸长率 $A > 5\%$ 属于韧断，而 $A < 5\%$ 属于脆断。韧断的特征是断裂前有较大的宏观塑性变形，断口形貌是暗灰色纤维状组织。低碳钢的断口如图 1.3（a）所示，断口为杯状，周边为 45° 剪切唇，断口组织为暗灰色纤维状，因此是典型的韧状断口。

如果材料比较脆，比如铸铁其拉伸过程最为简单，可近似的认为是经弹性阶段直接过渡到断裂，其强度指标只有 R_m 。铸铁断口如图 1.3（c）所示，断口沿着横截面方向，与正应力方向垂直，断面平齐为闪光的结晶状组织，是一种典型的脆状断口。



(a) 杯状断口 (b) 板试件杯状断口 (c) 结晶状断口

图 1.3 金属典型材料拉伸破坏断口

多数金属材料，它们的拉伸曲线介于低碳钢和铸铁之间，常常只有两个阶段或三个阶段。对于那些没有明显物理屈服现象的塑性材料，从弹性到塑性是光滑过渡的，硬铝和青铜就属于这类材料。由于没有明显的屈服阶段，这类材料的屈服强度只能用规定塑性变形量的方法来测定。工程设计中常以已产生 0.2% 塑性应变时的应力定义为材料的屈服强度，一般称作条件屈服强度或称作非比例延伸强度，用 $R_{p0.2}$ 来表示。

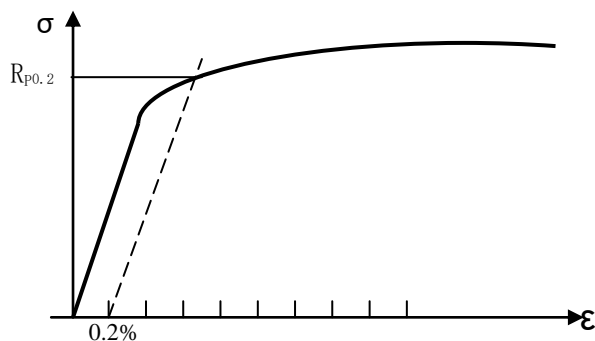


图 1.4 $R_{p0.2}$ 定义

$R_{p0.2}$ 是在微量塑性变形条件下测定出来的。不论采用哪种方式测量试件的变形，都必须保证测量仪表具有高的灵敏度和精确度。利用图解法测定 $R_{p0.2}$ 是当前普遍使用的方法（见图 1.4）。测定 $R_{p0.2}$ 时，若拉伸曲线已精确记录下来，即可利用卸载规律在 ϵ 坐标上的 0.2% 处，作平行于弹性阶段的斜直线。斜直线与拉伸曲线的交点，即为 $R_{p0.2}$ 。

除了金属材料之外，在工程上还有大量的非金属材料作为结构材料在使用，比如高分子材料和纤维增强复合材料。高分子材料又叫聚合物，其特殊的内部结构造成这种材料独有的特点和繁多的种类。高弹性和粘弹性是高分子材料区别于金属材料的力学性能特点。高分子材料中用于制造机器零件或构件的叫工程塑料。纤维增强的复合材料是由两种或两种以上组分材料组合的，其力学性能集中了组分材料的优点，且性能大大优于组分材料。作为结构复合材料主要是以高聚物（如环氧树脂）为基体，增强材料采用连续纤维如玻璃纤维、碳纤维所组成的连续增强复合材料。俗称为玻璃钢的就是玻璃纤维与环氧树脂复合而成的复合材料，其强度和刚度都比较高，又有绝缘和重量轻等特点，因此在很多地方代替金属。

三、实验目的

1. 观察分析低碳钢和铸铁两种材料的拉伸过程及实验现象，比较其力学性能。
2. 测定材料的强度指标及塑性指标。
3. 认识韧性材料和脆性材料的力学性能特点及断口特征。

四、实验设备及试件

1. 电子万能试验机（Instron9582）
2. 应变计式引伸计（标距 50mm，最大量程 5mm，选用）
3. 0.02mm 游标卡尺
4. 试件（低碳钢 ϕ 10 圆试件，铸铁 ϕ 10 圆试件，铝合金 ϕ 10 圆试件）

五、试验步骤（以低碳钢为例）

1. 测量试样原始尺寸

确定标距，并在试样上做标距线 L_0 。测量直径：在标距中央及两个标距线内附近各取一个截面进行测量，每个截面沿互垂方向各测量一次取其平均值。 d_0 采用三个截面中最小平均值。试样的原始尺寸要准确记录。

2. 打开计算机电源，进入试验应用软件界面。
3. 将负荷显示调零，移动横梁调节上下拉伸夹具的距离，安装试样并保持上下对中。
4. 输入数据文件名，选定加载方式为拉伸。
5. 设定加载速度，金属材料 1~5mm/min。
6. 开始加载。加载过程中观察试验机控制软件实验界面上的载荷-位移曲线，观察拉伸试件在各阶段的试验现象，直至拉断。
7. 从载荷-位移曲线上确定屈服载荷和最大载荷，实验结束后将实验数据拷贝回去按实验要求进行数据处理。
8. 取下试样。将已破坏的试样对拢，测量有关数据并观察断口形貌。
9. 整理现场，切断电源。

六、试验结果整理（以低碳钢为例）

1. 强度指标计算：

按强度指标定义，从拉伸图上确定屈服载荷 F_{eL} 和最大载荷 F_m ，并代入公式计算屈服强度 R_{eL} 和抗拉强度 R_m 。

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}$$
$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

2. 塑性指标计算：

紧密对拢拉断的拉伸试件，测量标距线的长度 L_u 和最小直径 d_u 并计算出 S_u 代入下列公式计算断后伸长率 A 和截面收缩率 Z 。

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} 100\%$$

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} 100\%$$

3. 整理拉伸图将载荷—位移曲线转为工程应力—工程应变曲线，并将力学性能测试结果标注在曲线上。

4. 画断口形貌草图。

5. 比较韧性材料和脆性材料的拉伸力学性能，完成实验报告。

七、预习要求

预习实验讲义，了解力学性能指标定义和测试方法，明确实验目的和要求。

预习思考题如下：

1. 为什么在实验前需要测量试样原始尺寸？应测哪些数据，如何测？
2. 有哪些强度指标，它们是如何定义的？
3. 有哪些塑性指标？拉断后需要测量试件哪些尺寸，如何测？
4. 何为韧性材料，何为脆性材料？

八、试验报告要求

试验名称_____

试验日期_____ 实验分组号_____ 小组成员_____

报告人_____ 学号_____ 班次_____

(一) 实验目的

(二) 实验设备和试件

(三) 实验方法与步骤简述

(四) 原始数据及试验结果

注：实验数据应包括低碳钢（或铝合金）和铸铁两种材料

1. 试件尺寸

材料名称	试 验 前										试 验 后			
	L ₀ mm	d (mm)									S ₀ mm ²	L _u mm	d _u mm	S _u mm ²
		1			2			3						
		①	②	平均	①	②	平均	①	②	平均				

2. 试验数据

材 料	下屈服载荷 F_{eL} (或 $F_{p0.2}$) (KN)	最大载荷 F_m (KN)

3. 计算结果

材料	强 度 指 标		塑 性 指 标	
	屈服强度 $R_{eL}(R_{p0.2})$ (Mpa)	抗拉强度 R_m (Mpa)	断后伸长率 A (%)	截面收缩率 Z (%)

注：实验结果采用三位有效数字。

(五) 画典型的金属韧性材料和脆性材料拉伸试件断口草图。

(六) 比较低碳钢（铝合金）和铸铁的拉伸过程，简要说明金属韧性材料和脆性材料力学性能特点和断口特征。

(七) 试验结果分析和讨论（实验结论，并回答 2~3 个思考题）

(八) 根据试验结果绘制两种材料 $\sigma - \epsilon$ 曲线（在曲线上标注力学性能测量结果）。

九、课后思考题

1. 拉伸实验为什么一般规定要采用比例试件？同种材料用不同比例测定的断后伸长率哪个大，为什么？

2. 应变强化是哪类材料的特点，发生在拉伸过程的哪个阶段，有何作用和意义？

3. 断后伸长率 A 反映材料什么性能，在 $\sigma - \epsilon$ 曲线上如何表示？能否利用载荷-位移曲线准确测定材料的断后伸长率 A ？

4. 拉伸曲线下的面积反映材料什么性能？哪种材料的这种性能最好，为什么？

5. 是不是所有材料都可以进行拉伸破坏实验测定强度和塑性指标？举例说明原因？

6. 为什么选用这四种材料（低碳钢/铸铁/铝合金/高分子材料）？

7. 为什么要将实验测定的力-位移曲线转换成工程应力-工程应变曲线图？如何转换？

8. 复合材料的力学性能有哪些优点？从力学角度来看是否可以代替传统的钢铁材料？

9. 温度对金属材料的力学性能的影响规律，金属材料是否有塑脆转变温度？以钢铁材料为例说明塑脆转变温度的影响因素？

10. 观察脆性材料拉伸过程和断口形貌，分析破坏原因，为什么脆性材料不易做受拉构件？

第二部分 电测原理和电测实验

第一节 电测法的基本原理

一、电阻应变测量的基本原理

采用电阻应变片作为敏感元件的电测方法是应力分析中常使用的一种方法。电阻应变测量方法简称电测法，是用电阻应变片测定构件的应变，再根据应力和应变的关系把应变转换成实际应力的一种实验方法。电测法的基本原理是：将电阻应变片牢固地粘贴在被测构件的表面，构件变形时应变片随着一起变形。利用电阻片的应变效应使应变变化转化为电阻变化，而专门测量应变的仪器—电阻应变仪可以把应变片的电阻变化转化为电压变化，经放大后的电压信号再换算成应变值直接显示或输送到计算机进行处理。

电测法的主要优点是：（1）应变片尺寸小、粘贴方便，一般不会干扰构件的应力状态；（2）灵敏度高，测量范围广。例如普通应变片测量范围 $\pm 1 \sim 10^4 \mu \varepsilon$ ，大应变片可测量高达2%应变；（3）能进行静、动态测量，频响范围为 $0 \sim \pm 50 \text{KHZ}$ ；（4）应变片的栅长最小只有0.2mm，可以满足大应力梯度的测量要求。电测法的不足之处是：一枚应变片只能测量一个“点”，测出的应变只能代表栅长范围内的平均应变，而且应变片不能重复使用。

二、电阻应变片

应变片一般由敏感栅、基底、覆盖层和引线等组成（图2.1）。图中(a)、(b)为纸基丝绕式电阻片，(c)为箔式电阻片。丝绕式应变片的敏感栅一般由很细的铜镍合金或镍铬合金丝制成，其丝盘成栅状固结在基底上。箔式应变片是将所用合金轧制成 $0.003\text{mm} \sim 0.01\text{mm}$ 的箔材，经化学腐蚀处理制成栅状。敏感栅是应变片的主体，主要用来感受变形，并把应变 $\Delta L/L$ 转化成电阻变化率 $\Delta R/R$ ，其电阻值一般有 120Ω 、 350Ω 等几种。

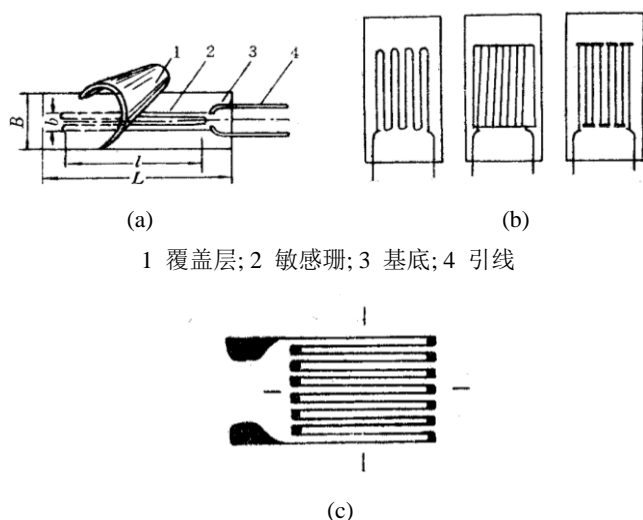


图 2.1 电阻片构造图

电阻片按一定方向贴在构件的测量位置。实验表明，应变片长度变化率（应变）与电阻变化率满足下列关系，即

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l} = K\varepsilon \quad (2-1)$$

式中 K 称为电阻片的灵敏系数。 K 主要取决于敏感栅的材质、几何形状和尺寸。由于应变片只能粘贴一次，不能重复使用，所以 K 值是由厂家抽样标定后确定的，一般 $1.8 < K < 3.0$ 。 K 值是应变片的特性参数，它反映应变片对电阻变化率的灵敏程度。进行测量时仪器的灵敏系数应和应变片的 K 值相符，否则要进行修正。

粘贴电阻片是应变电测法的一个重要环节，它直接影响测量的精度。粘贴时，首先必须保证被测构件表面的清洁平整，无油污、无锈，其次要保证粘贴位置准确，第三要选用专用的粘接剂。粘贴的步骤如下：

- (1) 打磨。测量部位的表面经打磨后应平整光滑，无锈点。打磨可使用砂轮、砂纸等。
- (2) 画线。测量点精确地用钢针画好十字交叉线以便定位。
- (3) 清洗。用浸有丙酮的脱脂棉清洗欲测部位表面，清除油污，保持清洁干净。
- (4) 粘贴。在电阻片底面均匀地涂上一层粘接剂，胶层厚度要适中，然后对准十字交叉线粘贴在欲测部位。粘接剂有 502 快干胶及其他常温及高温固化胶。再用同样的方法粘贴引线端子。
- (5) 焊线。将电阻片的两根引出线焊在引线端子上，再焊出两根导线。

三、电桥电路与接桥方式

测量电路的作用是将电阻片感受的电阻变化 $\Delta R/R$ 变换成电压变化输出，再经放大电路放大。测量电路有多种，最常用的是桥式测量电路，它有四个桥臂 AB、BC、CD 和 DA， R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 顺序地接在四个桥臂上（图 2.2）。电桥的对角点 AC 接电源 E 。另一对角 BD 为电桥的输出端，其输出电压为 U_{DB} 。可以证明输出电压

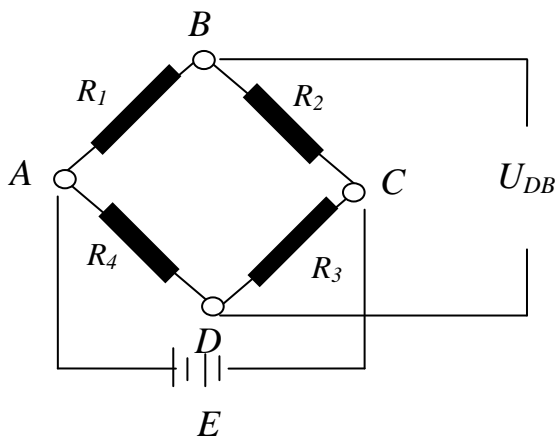


图 2.2 桥式测量电路

$$U_{DB} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) E \quad (2-2)$$

若电桥的四个桥臂与四枚粘贴在构件上的电阻片连接。当构件变形时，其电阻值的变化分别为： $R_1 + \Delta R_1$ ； $R_2 + \Delta R_2$ ； $R_3 + \Delta R_3$ ； $R_4 + \Delta R_4$ ，此时，电桥的输出电压即为：

$$U_{DB} + \Delta U_{DB} = \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + R_2 + \Delta R_1 + \Delta R_2} \right) - \left(\frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + R_4 + \Delta R_3 + \Delta R_4} \right) \quad (2-3)$$

由式（2-2）和（2-3）可以解出电桥电压的变化量 ΔU_{DB} 。略去 ΔR 高次项，对上式做简化整理后得

$$\Delta U_{DB} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2-4)$$

当满足小应变、等桥臂（ $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ）、而且4枚电阻片有相同的灵敏系数时，（2-4）式又可进一步简化成

$$\Delta U_{DB} = \frac{EK}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2-5)$$

（2-5）式中， ε_1 、 ε_2 、 ε_3 、 ε_4 分别代表电阻片 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 感受的应变值。上式表明，电压变化量 ΔU_{DB} 与四个桥臂电阻片对应的应变值 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 、 ε_4 成线性关系。应当注意，式中的 ε 是代数值，其符号由变形方向决定。通常拉应变为正，压应变为负。可以看出，相邻两臂的 ε （例如 ε_1 、 ε_2 、或 ε_3 、 ε_4 ）符号一致时，根据（2-5）两式应变相抵消。如符号相反，则两应变绝对值相加。而相对两臂的 ε （例如 ε_1 和 ε_3 ）符号一致时，其绝对值相加，否则二者相互抵消。显然，不同符号的应变按照不同的顺序组桥，会产生不同的测量效果。因此，灵活地运用（2-5）式，正确地布片和组桥，可提高测量的灵敏度并减少误差。这种作用称为电桥的加减特性。

在利用电阻应变片测量构件变形时，还要考虑温度问题。因为电阻片的电阻会随着被测构件的变形而改变，同时温度改变也会引起电阻片电阻的变化。因此在温度环境下进行测量，应变片的电阻变化将由两部分组成，即：

$$\Delta R = \Delta R_\varepsilon + \Delta R_t \quad (2-9)$$

ΔR ——构件变形引起的电阻变化， ΔR_t ——由温度引起的电阻变化。

由此可见，如不消除 ΔR_t 的影响，就会影响构件变形的测量结果。温度补偿片的作用就是消除温度给应力测量带来的影响。所谓温度补偿，是将电阻片贴在与构件材质相同但不参与变形的一块材料上，并与构件处于相同的温度条件下，将补偿片正确地连接在桥路中即可消除温度变化所产生的影响。

下面介绍几种常用的组桥方式：

（1）单臂测量：工作片 R_t 贴到被测构件上，接电桥的AB。电桥的BC接温度补偿片，CD、DA接仪器内的标准电阻。若温度引起的应变用 ε_T 表示，则工作片产生的应变包括构

件变形产生的应变和温度产生的应变，即 $\varepsilon_1 + \varepsilon_T$ ，而温度补偿片仅有温度产生的应变 ε_T 。
输出电压为

$$\Delta U_{DB} = \frac{EK}{4}(\varepsilon_1 + \varepsilon_T - \varepsilon_T) = \frac{EK}{4}\varepsilon_1 \quad (2-10)$$

即电桥的输出电压只与工作片 R_1 感受的构件变形 ε_1 有关，而与温度的变化无关。

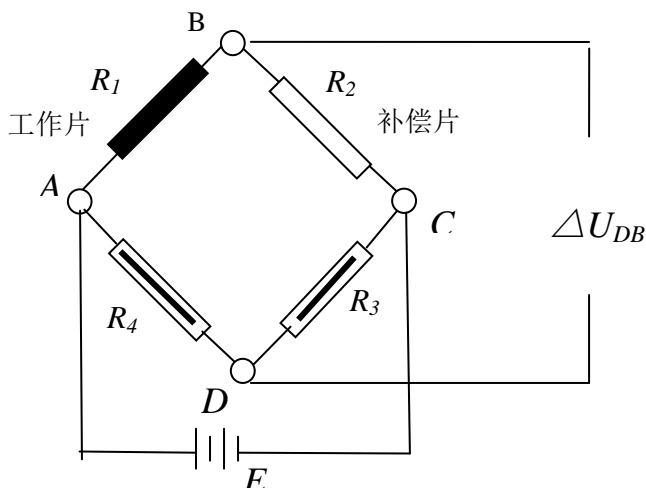


图 2.3 单臂测量

(2) 半桥测量：AB、BC 臂分别接工作片 R_1 和 R_2 ，CD、DA 臂仍接仪器的内部电阻 R_3 和 R_4 。两枚工作片处在相同的温度条件下。电桥的输出电压为

$$\Delta U_{DB} = \frac{EK}{4}[\varepsilon_1 + \varepsilon_T - (\varepsilon_2 + \varepsilon_T)] = \frac{EK}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (2-11)$$

由上式可知，由于电桥的加减特性自动消除了温度的影响，无需另接温度补偿片，输出的电压只与两个工作片测量的应变相减的结果 ($\varepsilon_1 - \varepsilon_2$) 有关。

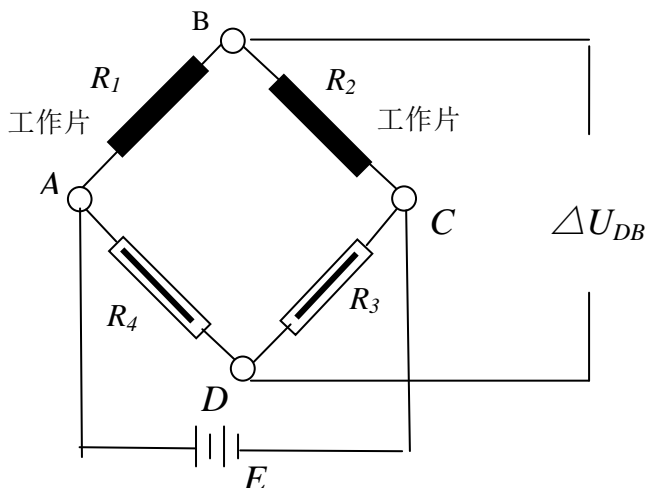


图 2.4 半桥测量

(3) 对臂测量：一般 AB、CD 分别接工作片 R_1 和 R_3 ，另两个对臂接温度补偿片 R_2 和 R_4 。这时四个桥臂的电阻都处于相同的温度下，相互抵消了温度的影响。输出的电压只与两个工作片应变相加的结果 $(\epsilon_1 + \epsilon_3)$ 有关。

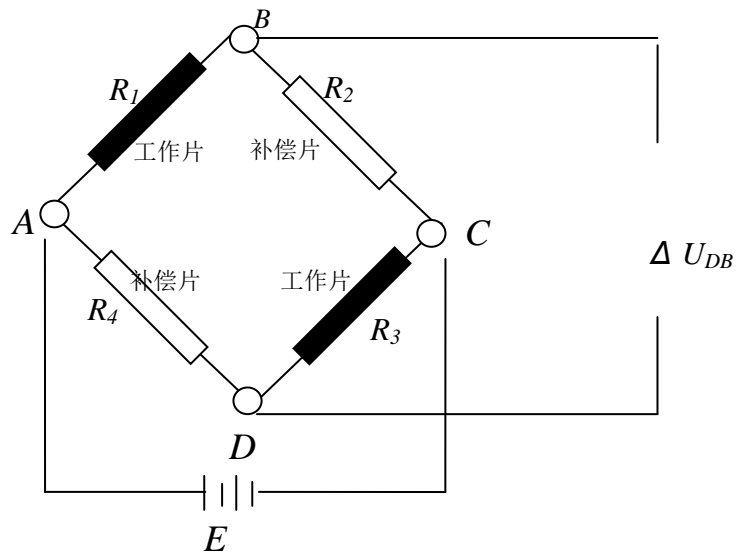


图 2.5 对臂测量

(4) 全桥测量：四个桥臂都接工作片，由于它们处于相同的温度条件下，相互抵消了温度的影响，输出的电压只与四个工作片测量的应变代数和 $(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4)$ 有关。

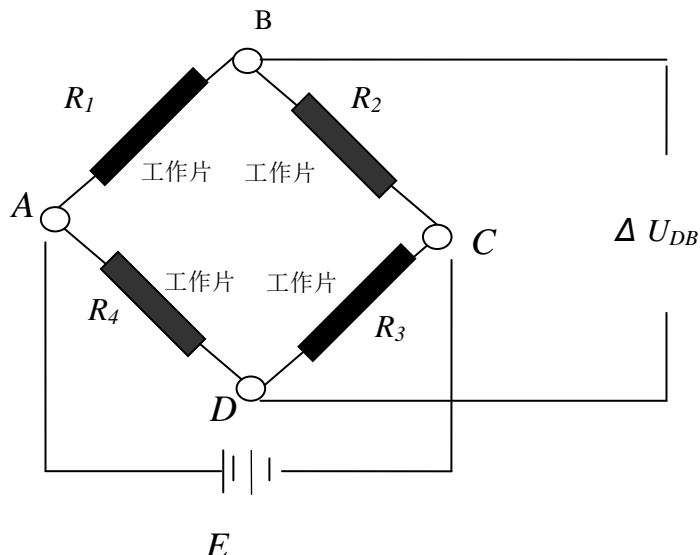


图 2.6 全桥测量

四、桥臂系数

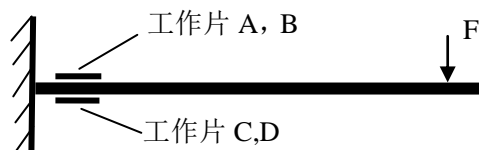


图 2.7 悬臂梁布片示意图

实际测量时，电阻应变片的布片和组桥方式的选用是很灵活的。图 2.7 所示的是一个受到集中力 F 作用的悬臂梁。在梁上靠近固定端某截面的上、下表面沿轴向各粘贴两枚电阻应变片（同一表面的两个应变片并排布置）。选用这四枚应变片中的部分或全部应变片按不同的组桥方式接到电桥上将得到不同的输出值。也就是说测量同一个被测量，如选用的电阻片或组桥方式不同，其电桥输出可能有很大的差异。一般用桥臂系数 B 来定义不同组桥方式的应变输出灵敏度。试验时桥臂系数 B 常按下式确定

$$B_i = \left| \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\text{单}}} \right| \quad (2-12)$$

式中， ε_i — 不同组桥方式（单臂、半桥、对臂、全桥）的应变测量值；

$\varepsilon_{\text{单}}$ — 与组桥相关的各工作片单臂测量值的平均值。

如仅选悬臂梁（如图 2.7 所示）上一枚应变片接成单臂，则其测量值即为待测值，其桥臂系数 $B=1$ ；如选上下表面各一枚应变片并接成半桥，则得到的测量值是待测值的 2 倍，即桥臂系数 $B=2$ ；如将这两枚应变片接成对臂，则输出为零，桥臂系数 $B=0$ 。所以，正确布片和正确组桥是提高应变测量精度和灵敏度的关键。

另外，当构件处在复杂的应力状态时，沿某个方向粘贴的应变片所测量的应变可能是由几种外力综合作用的结果。如果能对被测结构做出正确的分析、正确的布片并选择适当的组桥方式，就可以在测量结果中排除不需要的成分、保留需要的成分，而准确得到不同内力相对应的应变，既而测量出所要求的内力分量。

思考题：利用已布置好的应变片测量悬臂梁（见图 2.7）被测截面的最大应变，有几种组桥方式？每种方式的桥臂系数为何值？哪种方式为最佳方式？哪种方式不能采用，为什么？

五、电阻应变仪

电阻应变仪是测量应变的专用设备，它由电桥、放大器和电源等部分组成。电阻应变仪分静态和动态两大类。静态应变仪专供测量不随时间变化或变化很慢的应变，应变的数值由应变仪直接显示出来。动态应变仪则主要用于测量随时间变化的应变。由于必须把应变的变化过程记录下来才能进行分析，所以动态应变仪一般与记录设备或计算机配套使用。

教学实验使用的电阻应变仪是联能公司生产的 UCAM-65C 应变系统。该仪器内置了单片机，除一般应变仪的基本功能外，还具有数据采集、处理和与计算机通讯等功能，通

过串口通讯方式直接在计算机上应用专用软件采集各通道应变信号。

六、思考题

1. 如果中性层的实测应变值不为零是由什么原因产生的？它与相邻两片的数据有何简述电测法中的温度效应，说明常见钢材和铝材当环境温度升高 1 摄氏度时，产生的应变有多大？
2. 简述应变片灵敏系数的物理意义，通常电阻应变仪灵敏系数默认值为 2.00，如果应变测试过程中未设置应变片真实灵敏系数为 2.08，会对测试结果产生什么影响？如何修正？

第二节 桥路与弯曲应力实验

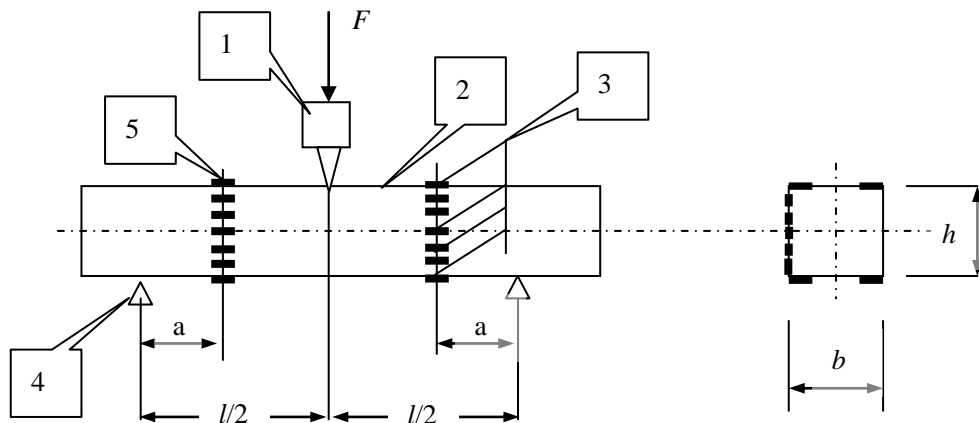
一、实验目的

1. 测定矩形梁在横弯条件下指定截面的应力分布规律，并与理论值进行比较。
2. 初步掌握电阻应变仪的使用方法。
3. 利用已有布片方案进行各种组桥，并比较不同组桥方式的测量结果，学习提高测量灵敏度的方法，并计算出各种组桥方式下的桥臂系数 B。

二、实验装置及仪器设备

1. 实验装置简述

本实验是将矩形截面梁安置在 AGX-V 20KN 型电子万能试验机上，梁的受力方式为三点弯曲。通过试验机的控制面板操作试验机，实现对梁加载，施加的载荷由控制面板读出。在指定截面上沿梁的高度分布有 9 枚电阻应变片，施加到额定载荷时，由 UCAM-65C 应变测试系统自动检测电阻应变片所感受的应变值。装置简图如图 2-8 所示。



1.试验机压头；2.矩形截面梁；3.应变测试系统；4.支座；5.电阻应变片。

图 2.8 简支梁实验装置简图

2. 实验设备

- 1) AGX-V 20KN 电子万能试验机
- 2) 矩形截面梁一根
- 3) UCAM-65C 应变测试系统

三、实验基本原理

在平面弯曲条件下，矩形截面梁任一截面上的应力沿高度的变化可按下式计算。

$$\sigma = \frac{MZ}{I_y} \quad (2-13)$$

式中： M —— 该截面上的弯矩；

I_y —— 截面惯性距；

Z —— 所求点至中性轴的距离。

其最大应力产生在梁的上、下表面，最大值为

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} \quad (2-14)$$

式中 W 为梁的抗弯截面系数。(2-14) 式是在平面假设的条件下推导出来的，是否正确可通过实验来验证。

本实验指定截面的电阻应变片布置如图 (2.8) 所示。在初载荷 F_0 和末载荷 F_N 时，通过应变仪分别读出应变测量值即初读数 ε_0 和末读数 ε_n 。此时各枚电阻片的测量应变值为

$\Delta \varepsilon = \varepsilon_n - \varepsilon_0$ ，通过胡克定律 $\sigma = E\varepsilon$ ，即可计算出各点的应力值。

在被测梁的上下表面沿轴向各布置了两枚电阻片，以使用各种组桥方式测定应变最大值，并比较各种组桥方式下的灵敏度大小。

四、实验步骤

1. 检查矩形截面梁的加力点位置与支座位置是否正确（以梁上刻线为准），梁的截面尺寸由同学自己测量。

2. 按选定的组桥方式接线。

3. 加载到初载荷 F_0 测量应变 ε_0 ，然后将载荷加至 F_N 值测量 ε_n ，求出两次读数差值。重复加卸载 2~3 次，每次 $\Delta \varepsilon$ 相对误差不超过 5%，否则应检查接线是否牢靠，仪器工作是否正常，排除故障后重做。

4. 实验数据经教师检查合格后，卸掉载荷、关闭电源、拆线并将实验装置整理好、将所用工具放回原处后方可离开实验室。

五、实验内容及要求

1. 测量矩形截面梁指定截面的应力分布规律。按试验步骤 3 对梁上 9 片电阻片逐点进行单臂测量，将各片的应变读数记入预先准备好的表格中，并及时计算出各点的应变差值 $\Delta \varepsilon = \varepsilon_n - \varepsilon_0$ ，以便检查读数是否稳定正确。

2. 利用梁的上下表面的四枚电阻片，按下述组桥方式进行测量，测出该截面的最大应变值 ε_{\max} ，以便求出该截面的弯矩 M 并求出不同组桥方式的桥臂系数 B 。

(1) 半桥测量：将上述四枚电阻片中选取两枚组成半桥测量，使测量灵敏度（桥臂系数）达到该组桥方式的最大值。

(2) 对臂测量：将上述四枚电阻片中选取两枚组成对臂测量，使测量灵敏度（桥臂系数）达到该组桥方式的最大值。

(3) 全桥测量：用四枚电阻片组成全桥测量，使测量灵敏度（桥臂系数）达到该组桥方式的最大值。

以上各种组桥方式均按步骤 3 进行重复试验，直至得到稳定的结果。

注：根据实验时间，选做部分或全部组桥方式。

六、实验报告要求

1. 实验目的。
2. 画出实验装置简图，标注仪器设备的名称、型号、精度及编号。
3. 试验原理简述。
4. 根据实际操作列出试验内容及实验步骤。
5. 试验数据的整理及结果计算，应列出计算公式，结果以表格形式给出。应包括以下内容：

(1) 实验原始数据。

(2) 根据 ΔP 及梁的几何尺寸，计算理论应力值 $\sigma_{理}$ 。

(3) 按胡克定律公式，计算各点实测应力 $\sigma_{实}=E\varepsilon_{实}$ 。如果 $K_{仪}=K_{片}$ ，应变值不须修正，否则 $\varepsilon_{实}$ 按下式计算

$$\varepsilon_{实} = \frac{K_{仪}}{K_{片}} \varepsilon_{仪} \quad (2-15)$$

(4) 在坐标纸上画出 $\sigma_{理} \sim Z$ 关系曲线和沿 Z 各测量点的 $\sigma_{实}$ 。将实验数据用最小二乘法拟合成直线，以此画出 $\sigma_{实} \sim Z$ 关系曲线。要求给出相关系数。注意梁的上下表面两点数据应各取平均值，分别作为一个点。

(5) 计算各种组桥方式的桥臂系数 B 。

$$B_i = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{仪}} \quad (2-16)$$

式中 B_i 为不同组桥方式下的桥臂系数， ε_i 为不同组桥方式下应变仪测量的应变值， $\overline{\varepsilon_{仪}}$ 为参与组桥电阻片单臂测量值绝对值的平均值。

(6) 按下式计算梁的上下表面最大应力的实验值与理论值的相对误差

$$\delta = \frac{\sigma_{理} - \sigma_{实}}{\sigma_{理}} \times 100\% \quad (2-17)$$

并分析产生误差的原因。

七、思考题

1. 如果中性层的实测应变值不为零，是由什么原因产生的？它与相邻两片的数据有何关系，如何修正？

2. 分析造成梁上表面或下表面两片电阻片的实测值不相同的原因，如何修正。用梁上表面1, 2两枚电阻片组成半桥测量会得到什么结果，为什么？用1, 8两枚电阻片组成对臂测量时测量结果如何，为什么？

3. 如果试验机压头不垂直与梁的表面，会对实验结果产生什么影响，如何利用组桥方法消除这种影响。

4. 用几何尺寸相同而材料不同的试件进行实验时，在相同的载荷增量下，同一点处测量出来的应变值是否一相等？同一点处得到的弯曲正应力是否一相等？

5. 尺寸和加载方式完全相同的钢梁和木梁, 如果与中性层等距离处的应变相等, 两梁相应位置的应力是否相等? 载荷是否相等?

6. 如果在中性层处布置了 45° 方向的应变片, 可否测出应变读数? 该应变可能与什么应力有关? 在横力弯曲和纯弯曲条件下有何不同?

7. 论述横力弯曲条件下的电测法测量弯曲应力的理论基础假设 (包括理论应力和实验应力的假设条件)?

8. 何为单向应力状态? 何为二向应力状态? 梁受横力弯曲时, 梁顶、梁底及其他各点处于何种应力状态?

八、实验原始数据

1. 初载荷 $F_0=500\text{N}$; 末载荷 $F_N=5500\text{N}$ 。

2. 梁的截面尺寸: $h=?$ $b=?$ $a=?$ 实际测量值。

3. 支座跨度 $L \leq 560\text{mm}$, 同学自行思考并选定合适的跨距, 实际测量并记录。

4. 电阻片灵敏系数 $K_{\text{片}}=2.08$ 。

5. 试样的弹性模量 $E=2.06 \times 10^5 \text{Mpa}$ 。

6. 加载速度 1mm/min , 接近额定载荷时 0.05mm/min 。

第三节 圆管在弯扭组合作用下的应力与内力测试实验

一. 实验目的

1. 掌握用电测法测定一点应力状态的方法。
2. 根据理论分析的结果，正确选择测量部位，设计最佳布片方案。
3. 选择适当的组桥方式，分离和测量内力。
4. 根据实验数据判断测试结果的正确性。

二. 实验设备与实验装置

1. 弯扭组合受力圆管实验装置

如图 2.9 所示，圆管的其中一段为空心圆管，拐臂为加载力臂，加载点到空心圆管中心距离为定值。通过电子万能试验机对实验装置施加载荷。

2. 电子万能试验机；
3. 静态电阻应变仪；
4. 游标卡尺，钢板尺。

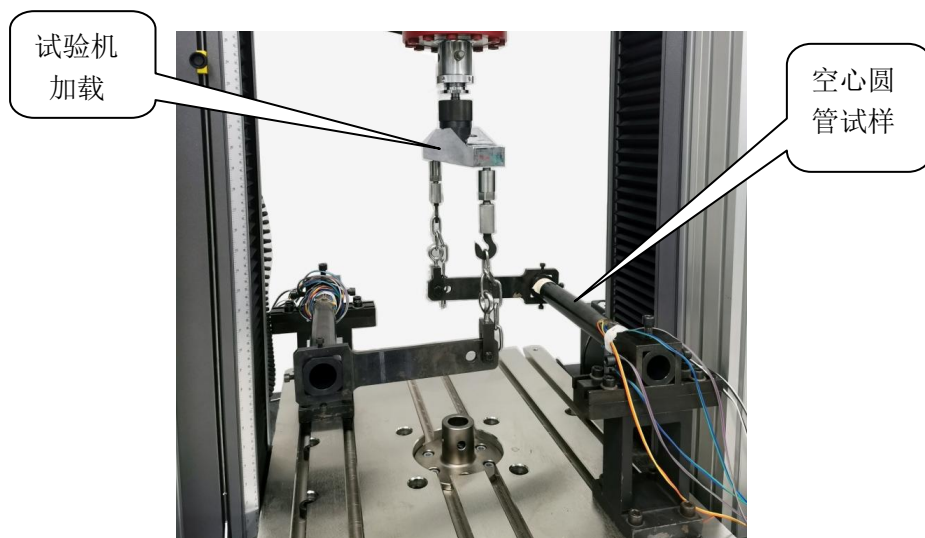


图 2.9 弯扭实验装置图

三. 实验内容和要求

本实验是复杂构件应力状态分析和电测实验方法的一次综合训练。通过实验使学生在掌握了基本电测技能的基础上，进一步全面、深入地掌握一点应力状态的实验分析方法和正确组桥测量和分离内力的方法。为了使该实验达到预期效果，要求学生实验前完成预习报告和预习思考题，提出自己的实验方案（包括布片方案、组桥方案及加载方案）。实验过程全部由每组学生自己自主安排、独立完成。

实验基本要求：

1. 用单臂组桥方式测量各应变片的应变值。
2. 选择电阻片、选择适当的组桥方式测出只与弯矩有关的应变，选择电阻片、选择适当的组桥方式测出只与扭矩有关的应变。要求至少各选一种。
3. 每项测试内容应至少重复加载三次，且三次测量结果的差值小于 5%。

根据各专业课程情况，可组织学生在实验前讨论实验方案，在实验后讨论实验现象和实验结果。

四. 试验结果整理

1. 实验方案说明（被测结构受力分析，危险截面应力状态说明，贴片位置说明，测定各内力分量方法说明）。
2. 将各类原始数据整理成表格。
3. 根据所测应变值计算主应力 σ_1 、 σ_2 及主方向 θ 并与理论值进行比较，计算相对误差。
4. 根据各种组桥方式测出的应变，计算出弯矩与扭矩。并与理论值比较，计算误差。
5. 对测量结果进行分析讨论，分析误差来源，比较各种组桥方式的利弊。
6. 完成试验报告。

五. 预习报告要求

1. 复习材料力学中有关弯曲、扭转及应力状态等章节。
2. 确定测量截面及各测点的位置，给出测量截面上下表面及左右对称点的应力状态。
3. 根据本实验目的设计布片方案及组桥方案。
4. 设计试验用表格。
5. 回答预习思考题。

六、预习思考题

1. 实验装置中，圆管受那些内力作用，它们沿轴线是如何分布的；
2. 实验装置中，如何判断危险截面和危险点，画出本实验危险点的应力状态；
3. 实验装置中，圆管左右测点处如何布置应变片测试扭矩？
4. 实验中如果要求用半桥、对臂、全桥分别测出指定截面的弯矩、扭矩，如何选择电阻片；
5. 实际工程中的拉、压构件，很难做到让构件只受简单的拉力或压力，为什么？如何采用科学的布片方案测试拉力或压力？
6. 常见的圆柱形压力容器罐，最少粘贴几枚应变片可测得主应力？为什么？
7. 工程实际应用中，主应力方向未知的复杂应力状态，最少粘贴几枚应变片可测得危险点的应力状态？如何布置应变片？常用的应变花都有哪些？
8. 为了提高实验精度，在布片时应注意什么问题。