

材 料 力 学 实 验

Experiments in Mechanics of Materials

广西大学机械工程基础实验教学中心

2005 年 11 月

学 生 实 验 守 则

1. 学生应按照课程教学计划，准时上实验课，不得迟到早退。
2. 实验前应认真阅读实验指导书，明确实验目的、步骤、原理，预习有关的理论知识，并接受实验教师的提问和检查。
3. 进入实验室必须遵守实验室的规章制度。不得高声喧哗和打闹，不准抽烟、随地吐痰和乱丢纸屑杂物。有净化要求的实验室，进室必须换拖鞋。
4. 做实验时必须严格遵守仪器设备的操作规程，爱护仪器设备，节约使用材料，服从实验教师和技术人员的指导。未经许可不得动用与本实验无关的仪器设备及其物品。
5. 实验中要细心观察，认真记录各种实验数据。不准敷衍，不准抄袭别组数据，不得擅自离开操作岗位。
6. 实验时必须注意安全，防止人身和设备事故的发生。若出现事故，应立即切断电源，及时向指导教师报告，并保护现场，不得自行处理。
7. 实验完毕，应清理实验现场。经指导教师检查仪器设备、工具、材料和实验记录后方可离开。
8. 实验后要认真完成实验报告，包括分析结果、处理数据、绘制曲线及图表。在规定的时间内交指导教师批改。
9. 在实验过程中，由于不慎造成仪器设备、器皿工具损坏者，应写出损坏情况报告，并接受检查，由领导根据情况进行处理。
10. 凡违反操作规程、擅自动用与本实验无关的仪器设备、私自拆卸仪器而造成事故和损失的，肇事者必须写出书面检查，视情节轻重和认识程度，按章予以赔偿。

目 录

实验一	拉伸试验	1
实验二	压缩试验	5
实验三	静态应力的电测实验	8
实验四	扭转实验	18
实验五	冲击试验	21
实验六	压杆稳定试验	23
附录一	力学实验常用设备	26
附录二	电测基础	34
附录三	实验数据的直线拟合	41
附录四	实验数据有效数后第一位数的修约规定	44
附录五	常见材料性能参数	49

实验一 拉伸实验

一、目的

- 1、测定低碳钢的屈服极限 σ_s 、强度极限 σ_b 、延伸率 δ 和断面收缩率 ψ ；
- 2、测定铸铁的强度极限 σ_b ；
- 3、观察拉伸过程中的各种现象（屈服、强化、颈缩、断裂特征等），并绘制拉伸图（ $P-\Delta L$ 曲线）；
- 4、比较塑性材料和脆性材料力学性质特点。

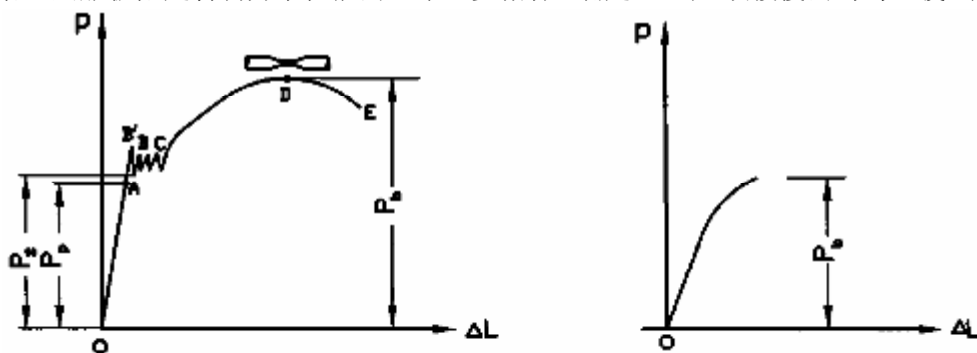
二、原理

将划好刻度线的标准试件，安装于万能试验机的上下夹头内。开启试验机，由于油压作用，便带动活动平台上升。因下夹头和蜗杆相连，一般固定不动。上夹头在活动平台里，当活动平台上升时，试件便受到拉力作用，产生拉伸变形。变形的大小可由滚筒或引伸仪测得，力的大小通过指针直接从测力度盘读出， $P-\Delta L$ 曲线可以从自动绘图器上得到。

低碳钢是典型的塑性材料，试样依次经过弹性、屈服、强化和颈缩四个阶段，其中前三个阶段是均匀变形的。

用试验机的自动绘图器绘出低碳钢和铸铁的拉伸图（如图 1-1）。对于低碳钢试件，在比例极限内，力与变形成线性关系，拉伸图上是一段斜直线（试件开始受力时，头部在夹头内有一点点滑动，故拉伸图最初一段是曲线）。

低碳钢的屈服阶段在试验机上表现为测力指针来回摆动，而拉伸图上则绘出一段锯齿形线，出现上下两个屈服荷载。对应于 B' 点的为上屈服荷载。上屈服荷载受试件变形速度和表面加工的影响，而下屈服荷载则比较稳定，所以工程上均以下屈服荷载作为计算材料的屈服极限。屈服极限是材料力学性能的一个重要指标，确定 P_s 时，须缓慢而均匀地使试件变形，



仔细观察。

(a)低碳钢拉伸图

图 1-1

(b)铸铁拉伸图

试件拉伸达到最大荷载 P_b 以前，在标距范围内的变形是均匀分布的。从最大载荷开始便产生局部伸长的颈缩现象；这时截面急剧减小，继续拉伸所需的载荷也减小了。试验时应把

测力指针的副针（从动针）与主动针重合，一旦达到最大荷载时，主动针后退，而副针则停留在载荷最大的刻度上，副针指示的读数为最大载荷 P_b 。

铸铁试件在变形极小时，就达到最大载荷 P_b ，而突然发生断裂。没有屈服和颈缩现象，是典型的脆性材料（拉伸曲线见图 1-1）。

三、仪器设备

1. 液压式万能试验机、3.游标卡尺。

四、试件

试件一般制成圆形或矩形截面，圆形截面形状如图 3-2 所示，试件中段用于测量拉伸变形，此段的长度 L_0 称为“标距”。两端较粗部分是头部，为装入试验机夹头内部分，试件头部形状视试验机夹头要求而定，可制成圆柱形（图 1-2a）、阶梯形（图 1-2b）、螺纹形（图 1-2c）。

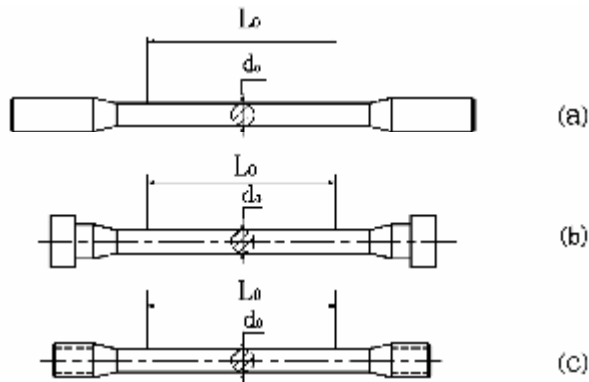


图 1-2

试验表明，试件的尺寸和形状对试验结果会有影响。为了避免这种影响，便于各种材料力学性能的数值互相比对，所以对试件的尺寸和形状国家都有统一规定，即所谓“标准试件”，其形状尺寸的详细规定参阅国家标准《金属拉伸试验试样》GB/T6397-1986。标准试件的直径为 d_0 ，则标距 $L_0=10d_0$ 或 $L_0=5d_0$ ， d_0 一般取 10mm 或 20mm。矩形截面试件标距 L 与横截面积 A 的比例为 $L_0=11.3\sqrt{A}$ 或 $L_0=5.65\sqrt{A}$ 。

五、低碳钢的拉伸实验步骤

1、测量试件尺寸

用游标卡尺在试件标距长度 L_0 范围内，测量两端及中间等三处截面的直径 d_0 ，在每一处截面垂直交叉各测量一次，三处共需测量六次。取三处中最小一处之平均直径 d_0 作为计算截面面积 A_0 之用。

按 $L_0=10d_0$ ，在试件的标距长度内，用锤子和冲钉划出两点作为试件的标距点。

2、选择度盘：根据试件截面尺寸估算最大荷载($P_{\max}=A_0 \times \sigma_b$)，并选择合适的测力度盘。配置好相应的砣（摆锤），调节好相应回油缓冲器的刻度。

3、**指针调零**：打开电源，按下(绿色)油泵启动按钮，关闭回油阀（手感关好即可，不用拧得太紧），打开进油阀（开始时工作油缸里可能没有液压油，需要开大一些油量，以便液压油快速进入工作油缸，使活动平台加速上升）。当活动平台上升 5~10mm 左右，便关闭进油阀（如果活动平台已在升起的合适位置时，则不必先打开进油阀，仅将进油阀关好即可；如果活动平台升得过高，试件无法装夹，则需打开回油阀，将活动平台降到合适的位置并关好即可）。移动平衡锤使摆杆保持铅垂（铅垂的标准是摆杆右侧面和标示牌的刻画线对齐重合）。然后轻轻地旋转螺杆使主动针对准度盘上的零点，并轻轻按下拨钩拨动从动针与主动针靠拢，注意要使从动针靠在主动针的右边。同时调整好自动绘图器，装好纸和笔并打下绘图笔。

4、安装试件：

先将试件安装在试验机上夹头内，再开动下夹头升降电机（或转动下夹头升降手轮）使其达到适当的位置，然后把试件下端夹紧，夹头应夹住试件全部头部。

5、检查：

先请指导教师检查以上步骤完成情况，并经准许后方可进行下步实验。

6、进行试验：

用慢速加载，缓慢均匀地使试件产生变形。当指针转动较快时，关小一些进油量，指针转动较慢时，则增大一些进油量。

在试件受拉的过程中注意观察测力指针的转动和自动绘图器上的 $P-\Delta L$ 曲线的轨迹。当测力指针倒退时（有时表现为指针来回摆动，说明材料已进入屈服阶段，注意观察屈服现象，此时不要增加油量也不要减少油量，让材料慢慢屈服，注意观察，记录屈服时的最小载荷 P_s （下屈服点），也就是指针来回摆动时的最小值。

当主动针开始带动从动针往前走，说明材料已过屈服阶段，并进入强化阶段。这时可以适当再增大一些进油量，即用快一点的速度加载，直至试件断裂。在试件断裂前，注意指针移动，当主动针往回走，此时材料已进入颈缩阶段，注意观察试件颈缩现象，这时可以适当减少一些进油量。当听到断裂声时，立即关闭进油阀，并记录从动针指示的最大载荷 P_b 。

7、结束工作

取下试件，并关闭电源。将试件重新对接好。用游标卡尺测量断后标距长 L_1 （即断后的两个标记刻画线之间的距离）。和断口处的直径 d_1 。（在断口处两个互相垂直方向各测量一次），最后观察断口形状和自动绘图器上的拉伸曲线图是否与理论相符。

注意事项：

- （1）试件夹紧后，不得再开动下夹头的升降电机。否则会烧坏电机。
- （2）开始加载要缓慢，防止油门开得过大，引起载荷冲击突然增加，造成事故。
- （3）进行试验时，必须专人负责，坚守岗位，如发生机器声音异常，立即停机。
- （4）试验结束后，切记关闭进油阀，取下试件，打开回油阀，并关闭电源。

六、铸铁的拉伸实验

实验步骤与低碳钢基本相同，但拉伸图没有明显的四个阶段，只有破坏荷载 P_b ，而且数值较小，变形也不大。因此加载时速度一定要慢，进油阀不要开得过大，断裂前没有任何预兆，突然断裂，是典型的脆性材料。最后观察断口形状和自动绘图器上的拉伸曲线图是否与理论相符，其断口形状与低碳钢有何不同，请教师检查试验记录。

七、数据处理

根据材料的屈服载荷 P_s 和最大载荷 P_b ，计算屈服极限 σ_s 和强度极限 σ_b ：

$$\sigma_s = \frac{P_s}{A_0} \quad \sigma_b = \frac{P_b}{A_0}$$

根据试件试验前后标距长度及断面面积计算：

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad \psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

拉伸试验结果的计算精确度

1. 强度性能指标（屈服应力 s_s 和抗拉强度 s_b ）的计算精度要求为 0.5MPa，即：凡 < 0.25MPa 的数值舍去， $\geq 0.25\text{MPa}$ 而 < 0.75MPa 的数值化为 0.5MPa， $\geq 0.75\text{MPa}$ 的数值者则进为 1MPa。
2. 塑性性能指标（伸长率 d 和断面收缩率 y ）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%。

八、思考题

- 1、从试件的破坏断口及其拉伸图上，反应了两种材料的哪些异同？为什么将低碳钢的极限应力 σ_{jx} 定为 σ_s ，而将铸铁的定为 σ_b ？
- 2、为何在拉伸试验中必须采用标准试件或比例试件？材料和直径相同而长短不同的试件延伸率是否相同？

实验二 压缩实验

一、目的

- 1、测定压缩时低碳钢的屈服极限 σ_s 和铸铁的强度极限 σ_b 。
- 2、观察低碳钢和铸铁压缩时的变形和破坏情况。

二、仪器设备

- 1、液压式万能试验机
- 2、游标卡尺

三、试件

低碳钢和铸铁等金属材料的压缩试件一般制成圆柱形（图 2-1）。其直径 d_0 与高 h_0 之间比例应控制在 $1 \leq \frac{h_0}{d_0} \leq 3$ 。即高度不能太大以避免试件在试验中发生挠曲现象。但 h_0 也不能太

小，由于上下垫板发生摩擦，也影响试验结果。由于摩擦阻止了靠近垫板部分的金属的横向变形，因而试件变形后如图 2-2 所示形成鼓形，越靠近垫板变形越小。这种摩擦力的影响，试件越小影响越大。所以需要在试件两端面涂上润滑剂（润滑油或石蜡），以减小摩擦。同时在安放试件时要注意放在压板的中心，并使用导向装置（图 2-3），使试件仅承受轴向压力。

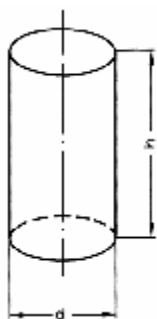


图 2-1

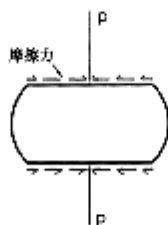


图 2-2

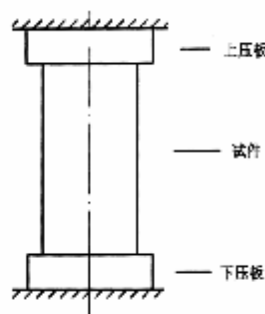


图 2-3

四、操作步骤：

1、低碳钢

- (1) 测量尺寸：测量试件的高度和直径，直径取试件的上、中、下三处，每处垂直交叉各测量一次，取最小值来计算截面面积 A_0 。
- (2) 选测度盘：根据试件的截面大小估算量程，并选好测力度盘，挂好相应的砣。
- (3) 指针调零：按下启动按钮，随即关闭回油阀，拧开进油阀，将活动平台提升一小段，

便关闭进油阀。然后检查摆杆是否垂直，如果不垂直，调节平衡铰，使摆杆保持垂直。最后将指针调零，并装好绘图纸和绘图笔。

(4) 安放试件：将试件安放在下夹板的中心位置或压缩实验装置的中心（注意一定要放在中心，否则偏心受压）。

(5) 加载：缓开动机器均匀缓慢加载。并注意观察测力指针，如果指针转动较快，则关小一些进油量；如果转动较慢，则开大一些进油量。并注意观察自动绘图器上的 $P-\Delta L$ 曲线。曲线的开始部分为一段斜直线，说明低碳钢在弹性阶段，此时力与变形成比例。当测力指针转动速度减慢或停顿，自动绘图器上的曲线出现拐点时，此时的荷载即为屈服荷载 P_s 。记下此荷载。然后再加大一些进油量，继续加载，观察到试件被压成鼓状即可，停机。如果继续加载，随着载荷的增大，试件将越压越扁，最后将压成饼形而不破裂（如图 2-4 所示）。

2、铸铁

铸铁压缩实验的方法和步骤与低碳钢压缩相同，但要注意铸铁是脆性材料，没有屈服点。从 $P-\Delta L$ 曲线上可以看出，其压缩图在开始时接近于直线，以后曲率逐渐增大，当载荷达到最大载荷 P_b 时，测力指针停顿并开始往回走，预示试件很快破裂，这时关小一些进油量，当听到响声后，立即停机（按下红色按钮），打开回油阀，关闭进油阀，由从动针可读出 P_b 值。试件最后被破坏（如图 2-5 所示），破裂面与试件轴线约成 45° 角。

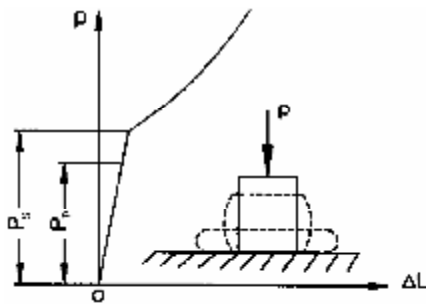


图 2-4 低碳钢压缩

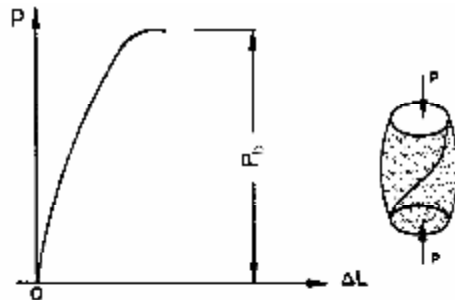


图 2-5 铸铁压缩

注意事项：

(1) 当试件或压缩实验装置的顶面与上压板快接触时，进油量一定要小（进油阀控制在半圈即可），否则进油量较大，引起载荷瞬间突然增大，超过试验的最大量程，造成试验机损坏。

(2) 铸铁压缩时，不要靠近试件探望，以防试件破坏时，碎片飞出伤人。

五、数据整理

计算低碳钢的屈服极限和铸铁强度极限

$$\sigma_s = \frac{P_s}{A_0} \quad \sigma_b = \frac{P_b}{A_0}$$

式中 A_0 是试验前试件截面面积。

绘图表示两种材料的变形和断口形状、从宏观角度分析破坏原因；比较并说明两种材料的力学性质特点。

六、思考题

- 1、试件偏心时对试验结果有何影响？
- 2、为什么不能求得塑性材料的强度极限？
- 3、铸铁拉、压破坏时断口为何不同？

实验三：静态应力的电测实验

项目 1： 拉伸时材料弹性模量 E 和泊松比 μ 的测定

一、目的

在比例极限内，验证虎克定律，并测定材料的弹性模量 E 和泊松比 μ 。

二、仪器设备

- 1、多功能组合实验台
- 2、静态应变测试仪

三、试件

矩形长方体扁试件、材料为不锈钢、试件横截面尺寸： $h=32\text{mm}$, $b=2.7\text{mm}$

四、预习要求

- 1、预习本节实验内容和材料力学的相关内容。
- 2、阅读附录电测法的基本原理和电阻应变仪。

五、试验原理与方法

本实验在多功能组合实验台上进行，实验装置如图 3-1 所示，应变片布置和加载示意图如图 3-2 所示。

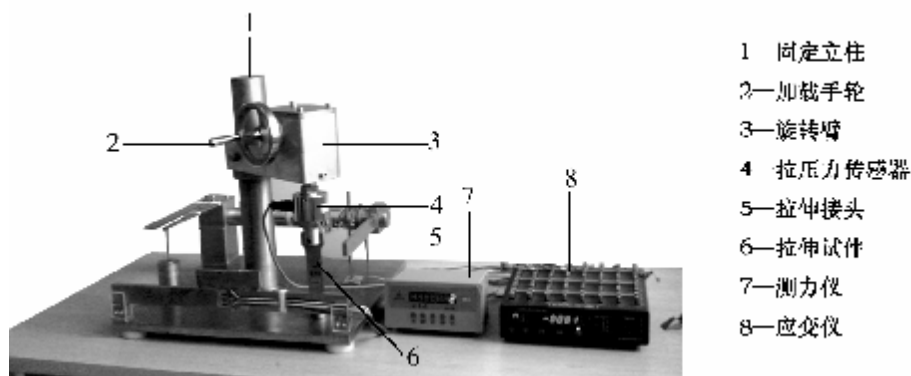
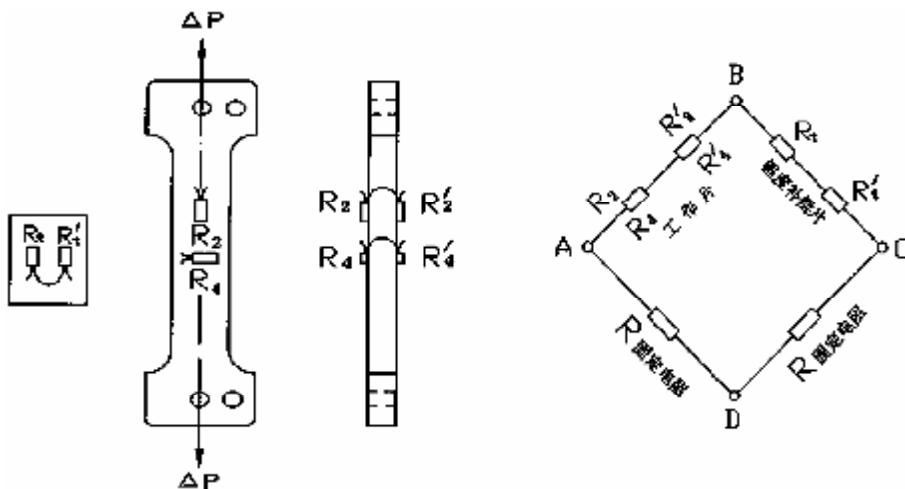


图 3-1 拉伸试验装置



E 和 μ 测定示意图 图 3-2 逆时针 (1) 应变片布点

在试件的正、反两面的对称位置上粘贴纵向和横向应变片，并把纵向应变片和纵向应变片进行串接，横向应变片与横向应变片进行串接，在另一个不锈钢的小铁块上粘贴 2 片应变片并进行串接作为温度补偿片。实验时，纵向应变片，横向应变片和温度补偿片在静态应变仪上组成半桥测量。

(2) 试验原理

试样下端用插销固定在基座平台上，上端通过插销和力的传感器相连接，旋转加载手轮施加拉力。试件受力时，便在纵横向产生伸长和缩短，用电阻应变仪测取纵向应变 $\varepsilon_{\text{纵}}$ 和横向应变 $\varepsilon_{\text{横}}$ 。试件横截面面积为 A ，便可以计算出材料的弹性模量 E 和泊松比 μ 。

$$E = \frac{s}{e} = \frac{\Delta P}{\Delta e_{\text{纵}}} ; \quad \mu = \left| \frac{\Delta e_{\text{横}}}{\Delta e_{\text{纵}}} \right|$$

因为试验采用增量法，分级加载，每次增加相同的拉力 ΔP ，相应地由应变仪测出的纵向应变增量 $\Delta \varepsilon_{\text{纵}}$ （即读数差）也应大致相等，如果这样，便验证了虎克定律。

六、实验步骤

- 1、打开测力仪电源，如果此时数字显示不为“0”，按“ZERO”将其调整为“0”。
- 2、打开应变仪电源，预热 30 分钟，并对应变仪进行灵敏系数 K 值设定和应变片桥路电阻值选择。
- 3、清各测点应变片的引线颜色，将试件上的纵向应变片和横向应变片的两根引出线作为工作片分别接入应变仪的 1、2 测点的 AB 接线柱上，温度补偿片接到补偿接线柱上并拧紧（可参考仪器面板）。
- 4、调零：仪器开机后自动调零，也可按数字键和“确定”键选择 1、2 点，按“平衡”按钮对各测点进行调零。重复检查，直至全部测点的初应变在未加载之前均显示为“±0000”或“±0001”也行。

5、逆时针旋转加载手轮，对试件旋加拉力，分四级加载，每级加载 500N

500N→1000N→1500N→2000N

6、按测点选择键，并分别记录每级荷载作用下的纵向应变和横向应变值（注意正负号：数字前有“-”号者为压应变，无“-”号者为拉应变）。

7、测试完毕，将荷载卸去，关闭电源。拆线整理所用仪器、设备，清理现场，将所用仪器设备复原。数据经指导教师检查签字。

注意事项：

1、切勿超载，所加荷载最大不得超过 4000N，否则将损坏荷载传感器。

2、测试过程中，不要震动仪器、设备和导线，否则将影响测试结果，造成较大的误差。

七、预习思考题

1、为何要在试件正反两面的对称位置上粘贴应变片，并进行相应地串接测量，能否只贴一面进行应变测量？

2、为何要用等量加载法进行试验？用等量加载法求出的弹性模量与一次加载到终值所求出的弹性模量是否相同？

3、实验中是怎样验证虎克定律的？怎样测定和计算 E 和 μ ？

项目 2： 矩形截面梁弯曲正应力电测实验

一、概述

梁是工程中常用的构件和零件。在结构设计和强度计算中经常要涉及到梁的弯曲正应力的计算。而梁的弯曲正应力的理论公式是根据纯弯曲梁横截面变形保持平面的假设推导出来的，它的正确性以及能否推广到剪切弯曲梁，可以由本次实验提供的简便方法验证。

二、实验目的

- 1.用电测法测量矩形截面梁在纯弯曲时横截面上正应力的大小及分布规律，并与理论计算值相比较，以验证弯曲正应力理论公式。
- 2.掌握电测法原理和电阻应变仪的使用方法。

三、实验设备、器材及试样

- 1. 静态应变测试仪 DH3818。
- 2. 多功能组合实验台。

四、实验原理

实验装置见图 3-3。它由固定立柱 1、加载手轮 2、旋转臂 3、荷载传感器 9、压头 8、分力梁 6、弯曲梁 5、简支支座 4、底板 7、数字测力仪 10、应变仪 11 等部分组成。弯曲梁为矩形截面钢梁，其弹性模量 $E=2.05\times 10^5\text{MPa}$ ，几何尺寸见图 3-4，CD 段为纯弯曲段，梁上各点为单向应力状态，在正应力不超过比例极限时，只要测出各点的轴向应变 $\varepsilon_{\text{实}}$ ，即可按 $\sigma_{\text{实}}=E\varepsilon_{\text{实}}$ 计算正应力。为此在梁的 CD 段某一截面的前后两侧面上，在不同高度沿平行于中性层各贴有五枚电阻应变片。其中编号 3 和 3' 片位于中性层上，编号 2 和 2' 片与编号 4 和 4' 片分别位于梁的上半部分的中间和梁的下半部分的中间,编号 1 和 1' 片位于梁的顶面的中线上,编号 5 和 5' 片位于梁的底面的中线上（见图 3-4），并把各前后片进行串接。

温度补偿片贴在一块与试件相同的材料上,实验时放在被测试件的附近。上面粘贴有各种应变片和应变花，实验时根据工作片的情况自行组合。为了便于检验测量结果的线性度，实验时采用等量逐级缓慢加载方法，即每次增加等量的荷载 ΔP ，测出每级荷载下各点的应变增量 $\Delta\varepsilon$ ，然后取应变增量的平均值 $\overline{\Delta\varepsilon_{\text{实}}}$ ，依次求出各点应力增量 $\Delta\sigma_{\text{实}}=E_{\text{实}}\overline{\Delta\varepsilon_{\text{实}}}$ 。

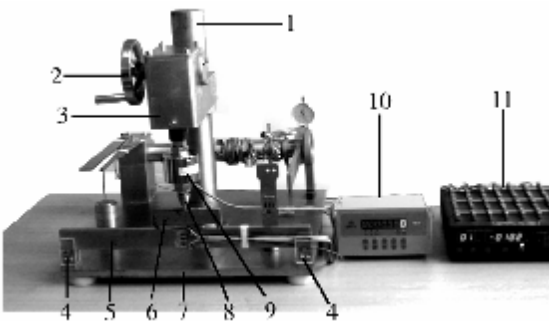
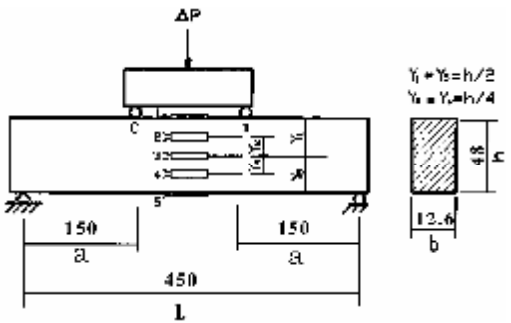


图 3-3 弯曲正应力实验装置



实验可采用半桥接法、公共外补偿。即工作片与不受力的温度补偿片分别接到应变仪的 A、B 和 B、C 接线柱上（如图 3-5），其中 R_1 为工作片， R_2 为温度补偿片。对于多个不同的工作片，用同一个温度补偿片进行温度补偿，这种方法叫做“多点公共外补偿”。

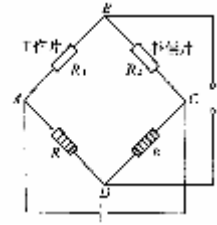


图 3-5 半桥接线图

也可采用半桥自补偿测试。即把应变值绝对值相等而符号相反的两个工作片接到 A、B 和 B、C 接线柱上进行测试、但要注意，此时 $\varepsilon_{\text{实}} = \varepsilon_{\text{仪}}/2$ ， $\varepsilon_{\text{仪}}$ 为应变仪所测的读数。

实验采用等增量法。即每增加等量的载荷 ΔP ，测定一次各测点相应的应变增量，并观察各测点应变值的线性程度。载荷分为 3 级，最大载荷 2000N。当加载至最后一级，测取各测点应变值后，即卸载。应变测量值的平均值来计算各测点实验应力值。然后再与应力的理论值进行比较，以期检验理论公式 $\sigma_{\text{理}} = My/I_z$ 的正确性（ M 为 AA 截面上弯矩， y 为测点离中性轴的距离， I_z 为 AA 截面对中性轴的惯性矩）。

五、实验步骤

- 1、打开测力仪电源。
- 2、打开应变仪电源，预热 10 分钟，并对应变仪进行灵敏系数 K 值设定和应变片桥路电阻值选择（参见电阻应变仪的使用）。
- 3、接线：看清各测点应变片的引线颜色，将工作片的两根引出线按序号分别接到 1—5 个测点的 AB 接线柱上，温度补偿片接到补偿接线柱上并拧紧（可参考仪器面板）。
- 4、调零：仪器开机后自动调零，也可按数字键和“确定”键选择 1~5 点，按“平衡”按钮对各测点进行调零。重复检查，直至全部测点的初应变在未加荷载之前均显示为“±0000”或“±0001”也行。
- 5、加载：分四级进行（500N→1000N→1500N→2000N），顺时针转动加载手轮，对梁施加荷载，注意观察测力仪读数，每级荷载 $\Delta P=500\text{N}$ ，并分别记录每级荷载作用下各点的应变值（注意数字前的符号，有“—”者为压应变，无“—”号者为拉应变）。
- 6、测试完毕，将荷载卸去，关闭电源。拆线整理所用仪器、设备，清理现场，将所用仪器设备复原。数据经指导教师检查签字。

注意事项：

- 1、切勿超载，所加荷载最大不能超过 3000N，否则损坏拉压力传感器。
- 2、测试过程中，不要震动仪器、设备和导线，否则将影响测试结果，造成较大的误差。
- 3、注意爱护好贴在试件上的电阻应变片和导线，不要用手指或其它工具破坏电阻应变片的防潮层，造成应变片损坏。

六、实验结果的整理

(1) 求出各测量点在等量载荷作用下，应变增量的平均值 $\overline{\Delta e_{\text{测}}}$ 。

(2) 考虑到应变仪与应变片灵敏系数不同，按下式对应变增量的平均值 $\overline{\Delta e_{\text{测}}}$ 进行修正得到实际的应变增量平均值 $\overline{\Delta e_{\text{实}}}$

$$\overline{\Delta e_{\text{实}}} = \frac{K_{\text{仪}}}{K_{\text{片}}} \overline{\Delta e_{\text{测}}} \quad (2.1)$$

式中 $K_{\text{仪}}$ 、 $K_{\text{片}}$ 分别为电阻应变仪和电阻应变片的灵敏系数。

(3) 以各测点位置为纵坐标，以修正后的应变增量平均值 $\overline{\Delta e_{\text{实}}}$ 为横坐标，画出应变随试件高度变化曲线。

(4) 根据各测点应变增量平均值 $\overline{\Delta e_{\text{实}}}$ ，计算测量的应力值 $\overline{\Delta s_{\text{实}}} = E \overline{\Delta e_{\text{实}}}$ 。

(5) 根据实验装置的受力图和截面尺寸，先计算横截面对 z 轴的惯性距 I_z ，再应用弯曲应力的理论公式，计算在等增量荷载作用下，各测点的理论应力增量值 $\overline{\Delta s_{\text{理}}} = \frac{\Delta M \cdot y}{I_z}$ 。

(6) 比较各测点应力的理论值和实验值，并按下式计算相对误差

$$e = \frac{\overline{\Delta s_{\text{理}}} - \overline{\Delta s_{\text{实}}}}{\overline{\Delta s_{\text{理}}}} \times 100\% \quad (2.2)$$

(7) 在量的中性层内，因 $s_{\text{理}}=0, \Delta s_{\text{理}}=0$ ，故只需计算绝对误差。

(8) 比较梁中性层的应力。由于电阻应变片是测量一个区域内的平均应变，粘贴时又不可能正好贴在中性层上，所以只要实测的应变值是一个很小的数值，就可以认为测试是可靠的。

七、思考题

1. 电阻应变片是粘贴在梁的表面上，为什么把测得的表面上的应变说成是梁横截面上的应变？其依据是什么？

2. 读者自行设计验证梁横截面上应力分布的布片方案，并与本实验布片进行分析和比较。

项目 3： 弯扭组合变形的电测试验

一、实验目的

工程实际中的构件一般处于复杂应力状态下，往往是几种基本变形的组合，要确定这些构件上某点的主应力大小和方向，也就比较复杂，甚至有些复杂的工程结构尚无准确的理论公式可供计算，在这种情况下，常常要借助实验的方法解决，如电测法、光测法等。

本实验的目的是在复合抗力下的应力，应变测定。包括通过薄壁圆管在弯扭组合作用下其表面任一点主应力大小和方向的测定；薄壁管某截面内弯矩、剪力、扭矩所分别引起的应变的测定。

1.学习电阻应变仪的使用，学习了解半桥和全桥的组桥技术。

2.通过组桥技术，学习掌握在弯扭组合条件下分离弯曲正应变、扭转剪应变、弯曲剪应变的测量技术。

二、仪器设备

- 1、静态电阻应变仪
- 2、多功能组合实验台

三、实验装置

实验装置如图 3-6 所示，它由圆管固定支座 1、空心圆管 2、固定立柱 3、加载手轮 4、荷载传感器 5、压头 6、扭转力臂 7、测力仪 8、应变仪 9 等组成。实验时顺时针转动加载手轮，传感器和压头使随螺杆套向下移动。当压头和扭转力臂接触时，传感器受力。传感器把感受信号输入测力仪，测力仪显示出作用在扭转力臂端点 D 处的荷载值 ΔP 。端点作用力 ΔP 平移到圆管 E 点上，便可分解成 2 个力：一个集中力 ΔP 和一个扭矩 $M_n = \Delta P \times a$ 。这时，空心圆管不仅受到扭矩的作用，同时还受到弯矩的作用，产生弯扭组合变形。空心圆管材料为不锈钢，外径 $D=47.20\text{ mm}$ ，内径 $d=40.7\text{ mm}$ ，其受力简图和有关尺寸见图 3-7 所示。

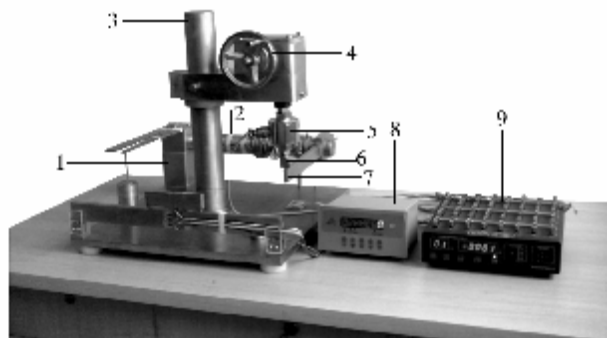


图 3-6 弯扭组合变形实验装置

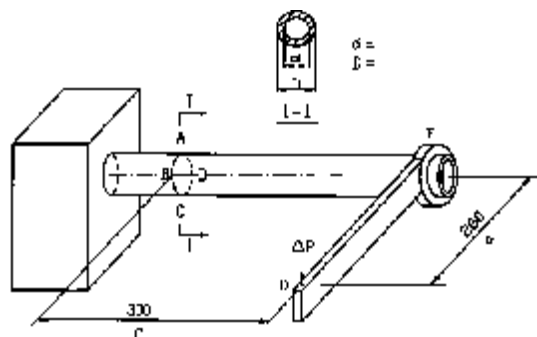


图 3-7 受力简图及几何尺寸

I-I 截面为被测试截面，取图示 A、C 二个测点，在每个测点上各贴一枚应变花。

四、实验原理和方法

由截面法可知，I-I 截面上的内力有弯矩、剪力和扭矩，A、C 点均处于平面应力状态。用电测法测试时，按其主应力方向已知的和未知的，分别采用不同的布片形式。

1、主应力方向已知

主应力的方向就是主应变方向，只要沿两个主应力方向各贴一个电阻片，便可测出该点的两个主应变 ε_1 和 ε_3 ，进而由广义虎克定律计算出主应力 σ_1 和 σ_3 ：

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_3) \quad , \quad \sigma_3 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_3 + \mu \varepsilon_1)$$

2、主应力方向未知

由于主应力方向未知，故主应变方向也未知。由材料力学中应变分析可知，某一点的三个应变分量 ε_x 、 ε_y 和 γ_{xy} ，可由任意三个方向的正应变 ε_0 、 ε_α 和 ε_ϕ 确定。若取 $\theta = -45^\circ$ 、 $\alpha = 0^\circ$ 、 $\phi = 45^\circ$ 进而可求出主应力大小和方向。

在主应力方向未知的应力测量时常采用应变花。应变花是一个基底上沿不同方向粘贴几个电阻片的传感元件。常用的应变花有 45° 、 60° 、 90° 等。在测点处的主应力方向不明时，可采用 60° 应变花，确定测点处主应力的方向和大小。如果测点处主应力方向大致明确，则多采用 45° 应变花。如果主应力方向均为已知，可采用 90° 应变花。采用应变花的优点是可以简化贴片工序，减少工作量，减小误差，便于分析计算等。

本实验采用的是 45° 应变花，在 A、C 两点各贴一枚应变花。用 45° 应变花可测出 E_{-45} 、 E_0 和 E_{45} ，由此可求出：

$$\varepsilon_1 = \frac{e_{-45} + e_{45}}{2} + \sqrt{\frac{1}{2} [(e_{-45} - e_0)^2 + (e_0 - e_{45})^2]}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{e_{-45} + e_{45}}{2} - \sqrt{\frac{1}{2} [(e_{-45} - e_0)^2 + (e_0 - e_{45})^2]}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \text{tg}^{-1} \frac{e_{45} - e_{-45}}{2e_0 - e_{45} - e_{-45}}$$

式中 α 为 ε_1 与 0° 应变片之间的夹角（即 σ_1 与 X 轴之间的夹角）。

3. 测定弯矩

薄壁圆管虽为弯扭组合变形，但 A、C 两点沿 x 方向的 0° 应变片只有因弯曲引起的拉伸或压缩应变，且两者数值相等符号相反。因此采用不同的组桥方式测量，即可得到 A、C 两点由弯矩引起的轴向应变 ε_M 。由虎克定律得

$$\sigma = E \varepsilon_M$$

由截面上最大弯曲应力公式 $\sigma = \frac{My}{I_z}$ 便可得到截面 A-C 的弯矩实验值为

$$M_w = \frac{s I_z}{y} = \frac{E e_M I_z}{y}$$

4. 测定扭矩

当空心圆管受纯扭转时，A、C 两点，沿 45° 方向和 -45° 方向的应变片都是沿着主应力方向。且主应力 σ_1 和 σ_3 数值相等、符号相反。同样利用 A、C 两点的应变片，还可以用来测量扭转力矩。因为在弯扭组合作用下，A、C 两点沿轴线成 $\pm 45^\circ$ 方向上的应变片，不仅受到弯矩的作用，同时还受到扭矩的作用。由于弯矩引起的应变数值相等符号相同。而扭矩引起的应变，数值相等符号相反。因此，采用不同的组桥方式测量，便可达到“测扭”“消弯”，从而得到 A、C 两点由扭矩引起的主应变 ε_n 。由平面应力状态的广义虎克定律得

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-m^2} (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_3) = \frac{E}{1-m^2} [\varepsilon_n + \mu (-\varepsilon_n)] = \frac{E e_n}{1-m}$$

因纯扭转时主应力 σ_1 与剪切应力 τ 相等，又因 $\tau = \frac{M_n r}{I_r}$ ，故有

$$\frac{E e_n}{1+m} = \frac{M_n r}{I_r}$$

这样便得到截面 A—C 的扭矩实验值为

$$M_n = \frac{E e_n I_r}{(1+m)r}$$

五、理论值计算

由图 3-8 可看出，A 点与 C 点单元都承受由 M_w 产生的弯曲正应力 σ_w 和由扭矩 M_n 产生的剪应力 τ 的作用。B 点单元体处于纯剪切状态，其剪应力由扭矩 M_n 和剪力 Q 两部分产生。这些应力可根据下列公式计算：

A、C 点：

$$M_w = \Delta P \times c \quad ; \quad I_z = \frac{p}{64} (D^4 - d^4)$$

$$y = \rho = \frac{D}{2} \quad ; \quad \sigma_x = \frac{M_w y}{I_z} \quad M_w y I_z$$

$$M_n = \Delta P \times a \quad ; \quad I_\rho = \frac{p}{32} (D^4 - d^4)$$

$$\tau_x = \frac{M_n r}{I_r} \quad ; \quad \tau = \frac{Q S_{z\max}}{b I_z} 2 \frac{Q}{A}$$

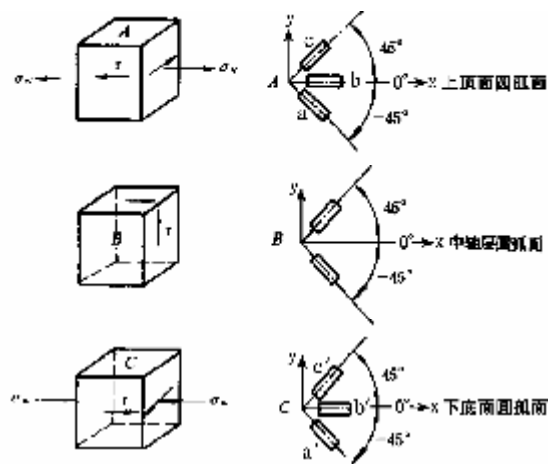


图 2-8 单元体及应变片的布置

$$\sigma_1 = \frac{s_c}{2} + \sqrt{\left(\frac{s_c}{2}\right)^2 + t_c^2}$$

$$\sigma_3 = \frac{s_c}{2} - \sqrt{\left(\frac{s_c}{2}\right)^2 + t_c^2}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \frac{-2t_c}{s_c}$$

B 点：主应力大小 $\sigma_{1、3} = \pm \tau_x$ ，方向沿 x 轴成 $\pm 45^\circ$ 。

六、实验步骤

(1) 测量记录相关尺寸

(2) 将空心圆管上的应变片按不同测试要求接入静态电阻应变仪组成不同的测量电桥，并调整好所用的仪器设备。完成以下两项参数的测定：

①主应力大小、方向测定：将 A 点 3 个方向的应变片按半桥接线，并按公共温度补偿法组成测量线路，进行半桥测量。

②测定弯矩 M_W 、扭矩 M_n ，根据实验要求，自行设计组桥方案。

(3) 调零：在未加荷载之前，将所接的各个测点调整到零位。

(4) 加载：分四级进行，每级加载 200N，一直加到 800N。

(200N→400N→600N→800N)，并分别记录每级荷载作用下各点的应变值（注意数字前的符号，有“-”号者为压应变，无“-”号者为拉应变）。

(5) 完成一项测试后，重新组桥测试，重复步骤 (3) 和 (4)。

(6) 完成全部实验内容后，卸除载荷，关闭电源，拆线整理所用仪器设备，清理现场，将所用仪器设备复原。数据经教师检查签字。

注意事项：

1、切勿超载，所加荷载最大不得超过 1000N，否则将损坏试件。

2、测试过程中，不要震动仪器、设备和导线，否则将影响测试结果，造成较大的误差。

3、注意爱护好贴在试件上的应变花，不要破坏其防潮层，造成应变花损坏。

七、试验结果的整理

1. 利用给出的三个公式，分别计算各加载步的弯曲正应变、扭转剪应变、弯曲剪应变的测量值。

2. 分析、推导三个公式。

3. 根据应变的测量值，用材料力学公式计算实验时所加的载荷，并与实际载荷进行比较，简要分析误差产生的原因，并进行必要的讨论。

实验四 扭转试验

一. 试验目的

扭转试验是了解材料抗剪能力的一项基本试验。本试验通过两种典型材料了解塑性（低碳钢）和脆性材料（铸铁）受扭转时的机械性能，绘制扭矩—扭角图。并比较它们的破坏现象及原因。

扭转试验过程中，试件的断面形状和尺寸几乎一直不变，无缩颈现象，变形较均匀，可比较准确地测定试件变形及瞬时破坏应力。

关于扭转试验的要求及试件尺寸，可参阅国家标准《金属室温扭转试验方法》GB10128-88的规定。

1. 测定低碳钢的扭转屈服极限和强度极限。
2. 测定铸铁的扭转强度极限。
3. 观察低碳钢和铸铁的断口情况，并分析其原因

二. 实验原理

1. 低碳钢圆截面试件扭转时，其尺寸和形式视试验机而定。在弹性范围内，扭矩 T 与转角 j 为直线关系(图 4-1a)。

当扭矩超过比例极限扭矩 T_p 时，曲线变弯并逐渐趋于水平。在屈服阶段时，扭角增加而扭矩不增加，此时的扭矩即为屈服扭矩 T_s 。屈服后，圆截面上的剪应力，由边缘向中心将逐步升值到扭转屈服极限 t_s (图 4-1b)，即截面材料处于全屈服状态，由此，可以求得材料的剪切屈服极限为：

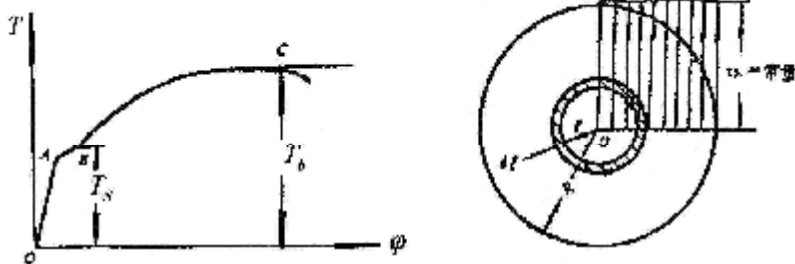


图 4-1a 低碳钢扭转时的 $T-j$ 曲线

4-1b 低碳钢扭转时横截面在全屈服下的应力分布

$$t_s = \frac{3T_s}{4W_p}, \quad \text{其中} \quad W_p = \frac{pd^3}{16}$$

此后，扭转变形继续增加，试件扭矩又继续上升至 C 点，试件被剪断，记下破坏扭矩 T_b ，扭转强度极限 t_b 为：

$$t_b = \frac{3T_b}{4W_p}$$

铸铁受扭时， $T-j$ 曲线如图 4-2 所示。从开始受扭，直到破坏，近似为一条直线，故其强度极限 t_b 可按线弹性应力公式计算如下：

$$t_b = \frac{T_b}{W_p}$$

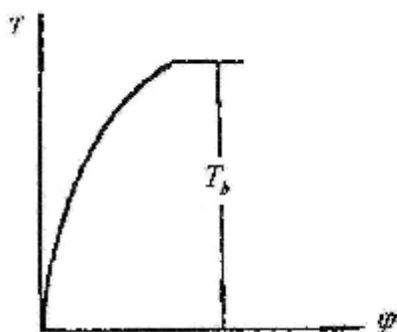


图 4-2 铸铁扭转时的 $T-j$ 曲线

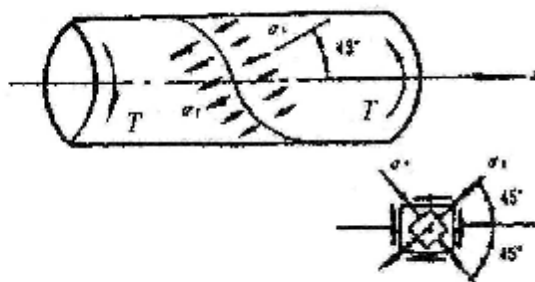


图 4-3 铸铁扭转时沿 45° 斜截面的应力

材料在纯剪切时，横截面上受到切应力作用，而与杆轴成 45° 螺旋面上，分别受到拉应力 $\sigma_1 = t$ 和压应力 $\sigma_3 = -t$ 的作用(图 4-3)。

低碳钢的抗拉能力大于抗剪能力，故试件沿横面剪断(图 4-4a)，而铸铁抗拉能力小于抗剪能力，故沿 45° 方向拉断(图 4-4b)。

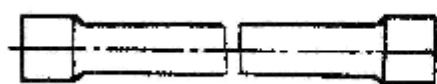


图 4-4a 低碳钢扭转破坏



图 4-4b 铸铁扭转破坏

三. 仪器与设备

1. 扭转试验机
2. 游标卡尺

四. 试验方法与步骤

1. 测量原始直径 d_0 : 在试样的标距部分测量 3 个截面, 每个截面互垂方向测量两次, 用其中最小截面的平均直径计算 W_p 。
2. 试样对中、夹紧, 力盘及转角计数器调零。
3. 调整曲线自动记录装置, 确定曲线的起始点, 落笔。
4. 开机加载。试样整体屈服前用慢速, 速度应在 $6^0 \sim 30^0/\text{min}$ 的范围内, 强化后可提高加载速度。
5. 观察 $M-\phi$ 曲线的生成过程。及时记录屈服扭矩 M_s 和断裂时的最大扭矩 M_b 、及断裂时的相对扭转角 ϕ
6. 绘制试件破坏形状图。

五. 注意事项

1. 加扭矩要均匀缓慢。
2. 变换扭矩测量范围, 要在加载前停机进行。若要调整机器转速, 也要停机进行, 以免损坏传动齿轮。

六. 预习要求

1. 了解扭转试验的目的。
2. 复习扭转变形的理论及试验原理。
3. 自行设计实验记录格式。

七. 试验报告要求

试验报告应包括: 试验名称。试验目的。仪器设备名称、规格、量程。 试验记录及结果, 如低碳钢及铸铁扭转时的机械性能, 图 (用坐标纸绘制), 两种试件破坏时的断口状态图等。分析讨论低碳钢和铸铁破坏情况及原因, 并与拉伸、压缩试验情况进行比较。

实验五 冲击实验

一、实验目的

测定和比较不同金属材料的冲击韧性，并观察破坏情况。

二、实验设备

1. JB—30A 冲击试验机
2. 游标卡尺

三、实验原理

材料抗冲击的能力用冲击韧性表示。冲击韧性一般通过一次摆锤冲击弯曲试验来测定。试验用的材料必须按要求加工成标准试样，常用的标准冲击试样有两种：一种为 U 型缺口试样，一种为 V 型缺口试样（图 1）。

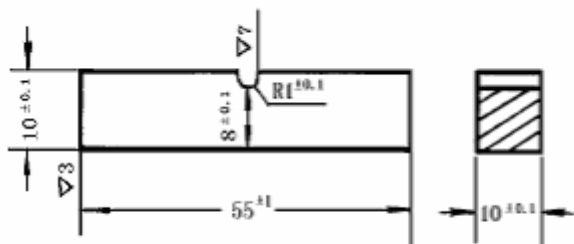


图 1 冲击试样

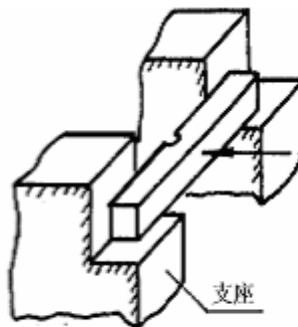
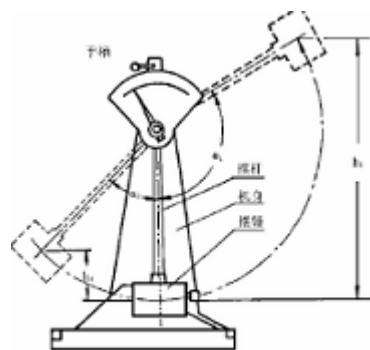


图 2

试样开缺口是为了在缺口附近造成应力集中和三向应力状态，使材料产生脆化倾向让塑性变形仅局限在缺口附近不大的体积范围内保证试样一次就被冲断，而且断裂就发生在缺口处。铸铁、工具钢一类的脆性材料很容易冲断，试样可不开缺口。试验时，试样以简支梁的形式（图 2）安放在试验机的支座上，试样的缺口背对摆锤的刀口。把重量为 G 的摆锤举至 H 的高度，摆锤获得的位能为 GH ，然后落锤将试样一次冲断（图 3），此时摆锤的剩余能量为 Gh ，冲断试样消耗的能量 $G(H-h)$ 就是试样的冲击吸收功，用 A_k 来表示，即：

$$A_k = G(H-h)$$



（图 3）

单位为焦耳 J ($N \cdot m$) 或千克力·米 ($kgf \cdot m$)， $1kgf \cdot m \approx 9.8 J$ 。试样的冲击韧性定义为：

$$\alpha_k = A_k / A_0, \quad \text{单位为 } J/cm^2 \text{ 或 } kgf \cdot m/cm^2。$$

A_0 代表试样缺口截面的面积。冲击韧度 α_K 影响因素：试件的绝对尺寸、缺口形状，实验温度等。

四. 试验方法与步骤

1. 测量试样尺寸，选择试验机度盘。
2. 将摆锤举到规定高度后，落锤空打一次，校准试验机度盘的零点。
3. 将摆锤略微抬起、锁定，在有人监护的情况下安放试样，令缺口背对摆锤刀口使缺口尖端位于受拉面并对中。
4. 释放摆锤、冲断试样，然后刹车记录试样的冲击吸收功 A_k 值。
5. 回收试样观察断口。

五. 结果整理

1. 计算两种材料、不同缺口试样的冲击韧性值 α_K 。
2. 分析、比较两种材料抗冲击的能力。
3. 画出两种材料、不同缺口试样的断口草图。并比较低碳钢 U 型、V 型缺口试样断口组织形貌的差异，说明其原因。
4. 根据实验目的和试验结果完成实验报告。

材料	原始尺寸		最小横截面积		α_K $N-m/mm^2$	破坏断口图
	b (cm)	h (cm)	面积 $A (cm^2)$	冲击功 $E (N-m)$		
钢						
铁						

六. 试验报告要求

试验报告应包括：试验名称、试验目的、仪器设备名称、规格、量程，试验记录及结果。

七. 问题讨论

1. 冲击韧性的物理意义？
2. 冲击试样为什么要开缺口？什么情况下可以不开缺口？
3. 冲击韧性值 α_K 的大小与什么因素有关？为什么不能用于定量换算，只能用于材料间的相对比较？
4. 分析、比较铸铁和低碳钢冲击断口组织形貌的差异，并说明低碳钢 U 型缺口和 V 型缺口试样断口形貌的异同。

八. 注意事项

1. 本实验要特别注意安全。先安试件，后再升起摆锤，严禁先升摆锤，后安试件。因为这样很危险。
2. 冲击时，同学们一律不得站在面对摆锤运动的方向上，以免试件飞出伤人。

实验六 压杆稳定实验

一. 实验目的:

1.测定在各种支承条件下压杆的临界载荷, 观察支承方式对临界载荷的影响, 并与理论值比较。

2.观察各种支承条件下压杆失稳现象及失稳时的挠曲线的形状, 观察压力与轴向变形的变化规律。

二. 实验原理:

当细长杆受轴向压力较小时, 杆的轴向变形较小, 它与载荷是线弹性关系。即使给杆以微小的侧向干扰使其稍微弯曲, 解除干扰后, 压杆最终将恢复其原形即直线形状, 如图 6-1 a 所示, 原有的平衡状态是稳定的。

当轴向压力逐渐增大, 超过某一值时, 压杆受到微小的干扰后弯曲, 解除干扰后, 压杆不能恢复直线形状, 将继续弯曲, 产生显著的弯曲变形, 即丧失了原有的平衡状态, 所以原有的平衡状态是不稳定的。使压杆直线形态的平衡状态开始由稳定转变为不稳定的轴向压力值, 称为压杆的临界载荷, 用 P_{cr} 表示, 如图 6-1b 所示。

临界载荷的一般表达式(或称临界载荷的欧拉公式):

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(mL)^2}$$

式中, E ---材料的弹性模量;

I ---试件截面的最小惯性矩;

L ---压杆长度;

μ ---和压杆端点支座情况有关的系数, 两端铰支杆 $\mu = 1$ 。

按规定的实验步骤测出各支承条件下的临界载荷试验值并记录, 观察支承方式对临界载荷的影响, 观察各支承条件下的失稳现象和挠曲线形状, 观察压力与轴向变形的变化规律, 打印各试验曲线。由实验可发现, 当载荷略超出临界载荷时, 挠度急剧增加, 轴向变形也随之增大, 这说明了压杆失稳的危险性。

试验台采用的是螺旋加力方式, 通过拧紧顶部的旋钮使丝杆顶推压头向下运动, 对试件施压, 压力的大小通过传感器经数字测力仪显示, 压力的大小通过测力传感器经数字测力仪

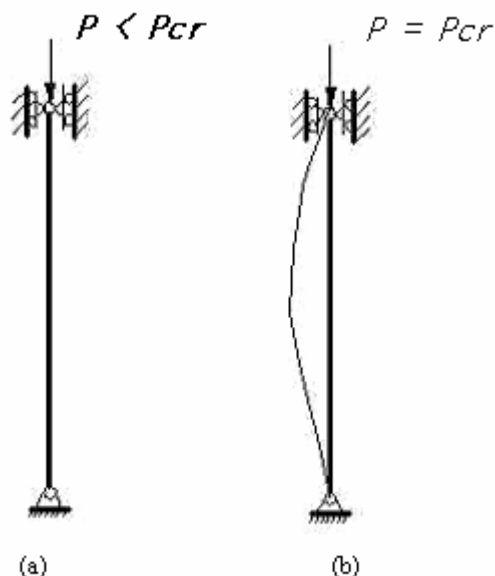


图 6-1 压杆的稳定(a)与失稳(b)现象

显示，位移由位移传感器显示。若将试验台与数字测力仪及电脑联接，就可在电脑上观察试验的曲线和测得各临界载荷的数据。

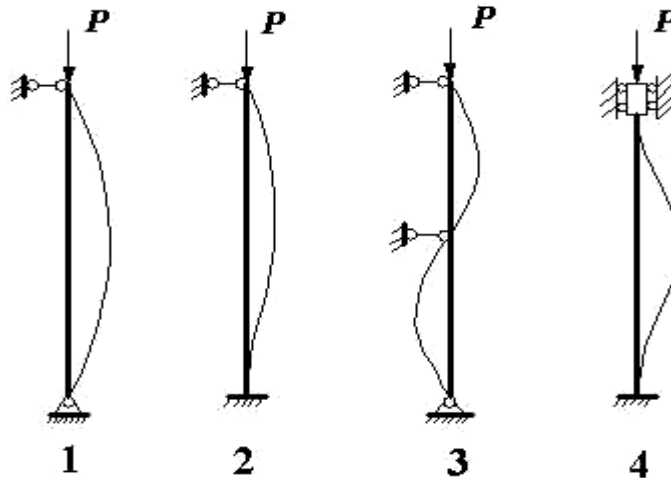


图 6-2 压杆实验的四种支承模式

三. 试验仪器、装置与工具

1. 压杆试验台。
2. 压杆试件。
3. 静态电阻应变仪。
4. 游标卡尺及钢皮尺。

四. 试验方法与步骤

1. 量取试件尺寸：厚度 t ；宽度 b ；长度 L 。量取截面尺寸时至少要沿长度方向量三个截面，取其平均值。
2. 计算试件的临界载荷 P_{cr} ，拟定分级加载方案。
3. 安装试件。
4. 将电阻应变片接入电阻应变仪，按电阻应变仪操作规程，调整仪器及“零”位。
5. 分级加载，每加一级载荷，记录一次应变值，当应变突然变得很大时，停止加载。重复试验 2~3 次。
6. 测毕，取下试件，整理现场。
7. 根据试验数据绘制 $P-\epsilon$ 曲线，作曲线的渐近线确定临界载荷 P_{cr} 值。

五. 注意事项

1. 由于采用杠杆加载，砝码盘上所加的荷载令其为 P^* ，则试件上所受的荷载 P 等于 P^* 乘以杠杆比 H ，加上支座自重 ($0.7N$)。可先绘制 $P^*-\epsilon$ 曲线，得到 P^*_{cr} 值，然后再换算到 P_{cr} 值。
2. 为了保证试件和试件上所贴的电阻应变片都不损坏，可以反复使用，故本试验要求试件的弯曲变形不可过大，应变读数控制在 $1500\mu\epsilon$ 左右。
3. 加载时，砝码轻取轻放，严禁用手随意掀压加力杆和试件，不允许拿走和旋转限位杆。

六. 预习要求

1. 复习有关理论，明确临界载荷的意义，了解其测试方法.
2. 试验中应记录哪些数据？如何选取载荷增量？在接近 P_{cr} 值时要注意什么？
3. 拟定实验数据的记录表格。

七. 问题讨论

1. 欧拉公式的应用范围.
2. 本试验装置与理想情况有何不同？
3. 试验误差分析.
4. 失稳后，变形与载荷是否还是线性关系？

附录一 力学实验常用设备简介

1 液压式万能材料试验机

本机是油压式万能试验机，利用油压加力，可作拉伸、压缩、剪切、弯曲等实验。

1. 构造原理：图1 为万能试验机的构造原理图，分为加力、测力、自动绘图三个部分。

(1) 加力部分。加力部分由油箱、油缸、工作台、机座等组成。机座（14）、光滑立柱（7）及上横梁（6）固定不动，开动马达后，油泵将油经过送油阀（17）和油管③送至工作油缸内，推动活塞（5）带动工作台（11）上升。若试件放在工作台（11）上，则受压缩。试件受力的大小与油压的大小成正比关系。

(2) 测力部分。测力为重摆平衡式。试件受力后，油缸内油压逐渐增加，高压油经油管④⑤进入到测力油缸（28）内，使测力活塞（27）向下移动，通过连杆（26），使摆锤摆起，推动齿杆（21）带动齿轮（15），即可使指针转动，从而由示力盘上得到相应的载荷。更换摆锤重量，即可得到不同的测力范围。

(3) 自动绘图部分：参阅拉力机介绍。

2. 操作方法：

① 选择力盘。根据试件尺寸和实验要求，选择合适的测力范围，加上相应的摆锤。

② 选择合适的夹具及其附件。

③ 调整零点：开启马达，将油打入工作油缸，使工作台稍微升起，以平衡掉工作台自重，然后旋转齿杆（21），使示力盘指针指零。

④ 安装试件。作压缩实验，试件放在工作台的中心；如果作拉伸实验，则将试件夹入上、下夹头（12）、（10）中。

⑤ 调整好自动绘图装置。

⑥ 加载实验。加载前检查各油阀是否关闭，然后开动马达，微开送油阀，缓慢加载。

⑦ 卸载。实验完毕后，打开回油阀退油，关闭电门。

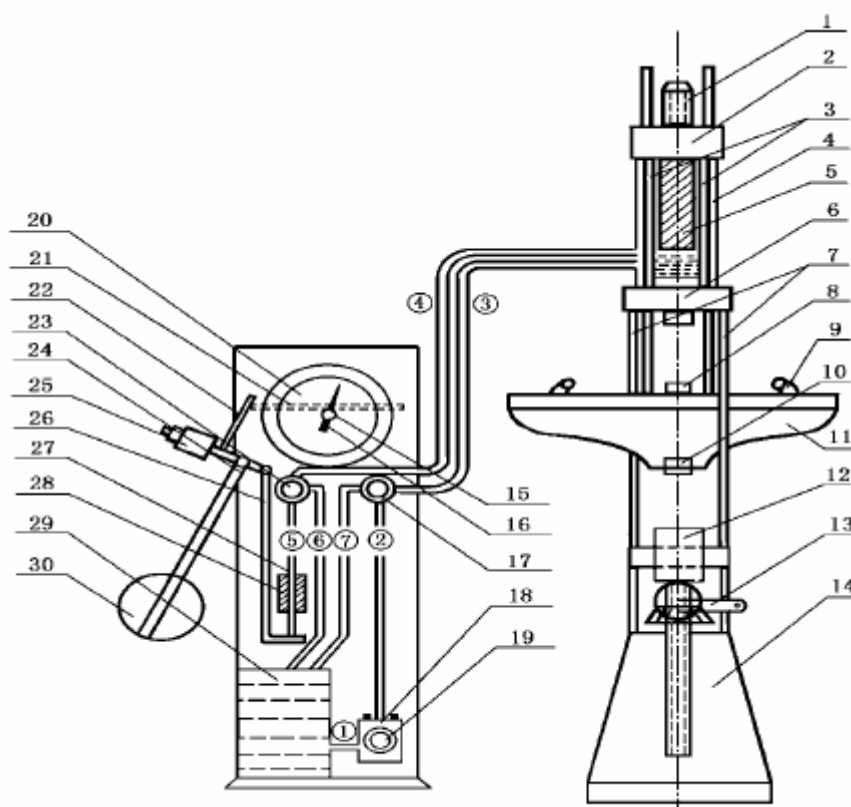


图1 万能试验机结构原理图

1.马达 2.上支架 3.螺杆 4.工作油缸 5.活塞 6.上横梁 7.光滑立柱 8.压板 9.支座 10.夹头 11.工作台 12.夹头 13.手柄 14.机座 15.齿轮 16.指针 17.送油阀 18.油泵 19.马达 20.度盘 21.齿杆 22.推杆 23.回油阀 24.摆杆 25.平衡锤 26.连杆 27.测力活塞 28.测力油缸 29.油箱 30.摆锤

3. 注意事项

- ① 开马达前，应将送油阀，回油阀都关闭。
- ② 为保证均匀缓慢加载，特别是试件将要受力时，送油阀不应开得过大，以防过载。
- ③ 试件受力后及加载，卸载过程中，不准开动上支架马达，以免损坏机器。
- ④ 送油阀不要关得过紧，以免损坏阀针。

2 杠杆引伸仪（108 型）

杠杆引伸仪是用来测量静荷下微小线变形的仪器。其常用标距为20mm，利用专用附件标距可达50~100mm，通常杠杆引伸仪的放大倍数为1000 倍左右。

1. 构造原理：如图2所示。（1）为活动刀口，（2）为固定刀口。用夹具将杠杆引仪两

刀口紧压在试件上，当试件受力变形时，活动刀口（1）绕着支点转动一角度，带动与其连接在一起的杠杆（3）也转过同样的角度，从而推动连杆（4）使指针（5）绕支点（8）转动，经杠杆系统的两次放大，从刻度盘（7）上便可给出读数 ΔN (A_2-A_1)

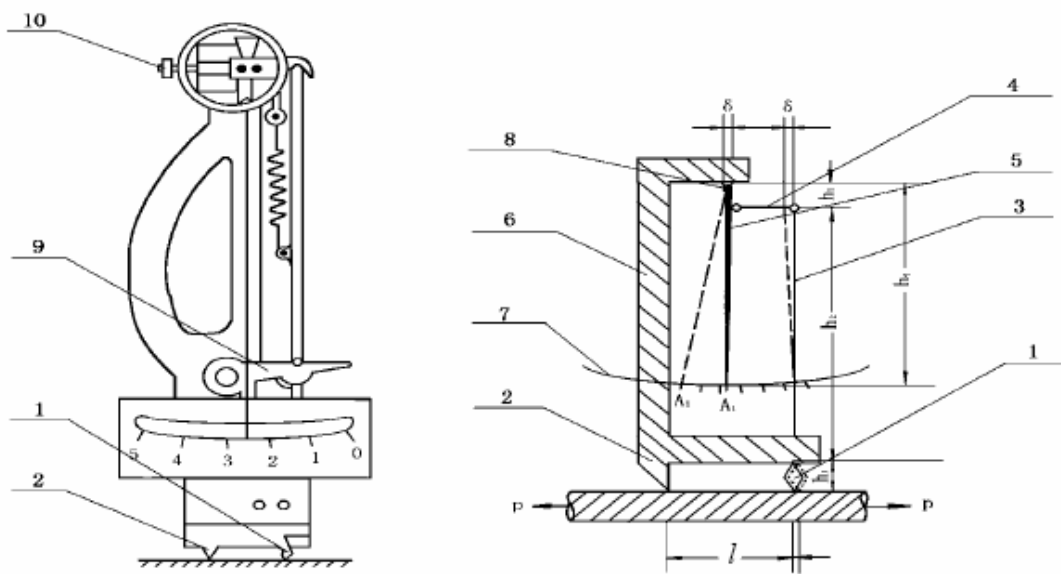


图2 杠杆引伸仪结构原理图

（1）和（2）之间的距离 l 即为标距，试件受力后，变形量为 l 时，通过杠杆（3）的第一次放大，将 l 放大为 δ ，然后通过指针（5）再次放大，将 δ 放大为 N ，由相似三角形关系可得：

$$k = \frac{\Delta N}{\Delta l} = \frac{h_2 \cdot h_4}{h_1 \cdot h_3}$$

K——放大倍数，一般它约为1000~1200。故杠杆引伸仪能测到1‰mm 的变形量，估计值可达0.1‰mm 的变形。

2. 操作方法

- ① 根据不同形状的试件选择夹具。
- ② 安装前检查或调整使指针在2.5 处。（25mm 处，中央）
- ③ 安装时先接触固定刀口，然后再使活动刀口与试件接处，旋紧夹具紧固螺丝，松紧要适宜。
- ④ 安装妥善后，推下杠杆闸（9），使杠杆（3）活动，调节螺丝（10）使指针指在适当

的位置，此时即可开始实验。卸载后，先将指针调到2.5 处，后关上杠杆闸，再取下仪器。

3. 注意事项

- ① 安装夹具时，要注意使刀口中点及夹具的顶尖三点在一个平面里。
- ② 仪表安装、拆卸时均应用杠杆闸（9）将杠杆固定。
- ③ 安装和拿持仪表时要小心，别碰杠杆及指针以免损坏仪器。
- ④ 开、关杠杆闸时，指针都需调在2.5 处。

3 蝶式引伸仪

蝶式引伸仪又称双表引伸仪，也是测量微小线变形的一种机械式引伸仪。如图3 所示。

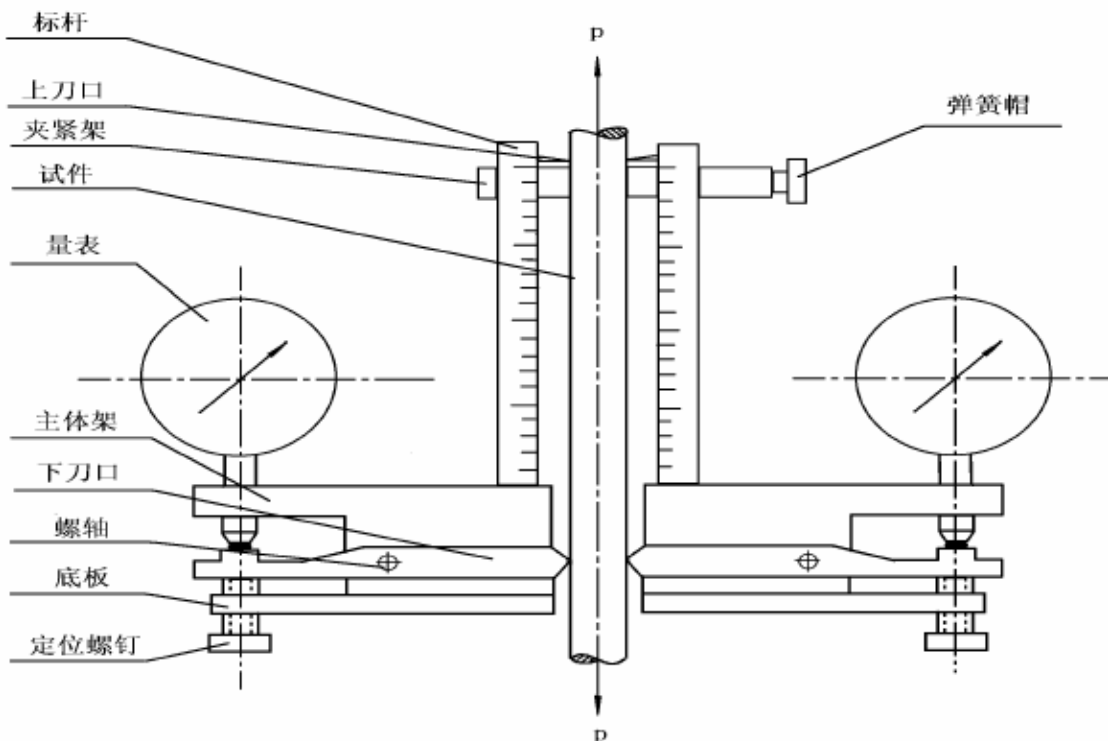


图3 蝶式引伸仪原理图

引伸仪主要由三部分组成：感受变形部分，传递变形部分，指示部分。

感受变形部分：主要由一对上刀口和一对下刀口组成。实验时，刀口直接与试件接触。上刀口可在杠杆中上、下移动，以便调整标距，上下刀口间的纵向距离即为标距长。下刀口可绕自身中点（螺轴）转动，其杠杆比为1: 1。

传递变形部分：把变形传递给量表是通过装在左、右主体内的两个活动下刀口来实现的，它们被分别支承在旋入左、右主体的螺轴锥尖上，形成一等臂杠杆。引伸仪工作时，传递变

形部分便将试件标距范围内的变形量传递到量表上，通过量表指针的转动，直观地反映出来。

指示部分：引伸仪可配用两种量表，（分度值为01.0 mm 百分表或分度为001.0 mm 的千分表）按不同精度要求选用。

使用方法：

1. 调整上刀口位置，使上、下刀口间距离为所需的标距值。
2. 调整量表位置。使量表小针起始位置在1.0 mm 左右。
3. 握住引伸仪，压缩弹簧，使两边刀口分开，夹持在试件上。张紧力可以依靠连接簧帽来调节。
4. 将夹紧架安装在标杆上，其位置应尽量靠近上刀口处。夹紧力也可通过簧帽调整之。
5. 转动量表罩圈至所需位置上，即可开始读数。

注意事项：

1. 蝶式引伸仪配有精密量表，使用时须轻拿轻放，严禁使劲猛压，严禁乱拧乱动。
2. 仪器安装在试件上后，应联好保护绳带，以防万一碰落损坏。
3. 安装时，切勿使刀口在试件上来回摩擦，以免过早磨损。
4. 仪器用毕，须将簧帽退回原始位置。

4 百分表

1. 构成原理：

如图4所示，顶杆借助弹簧，经常压在被测物体上。当物体发生沿杆方向位移时，推动顶杆及上面的齿条（1），带动齿轮（2）、（3）（两轮同轴）转动，齿轮（3）又带动小齿轮（4），使指针转动，经一系列放大，便在表盘上指出移位大小，百分表的最小刻度值为0.01mm。

2. 使用方法：

把表与测量使用的附件安装好后，即可把顶杆头部压在所需测量点，调好零点（或记下初读数），加载后，记下表上读数，两次读数的差，即为相应的位移值。

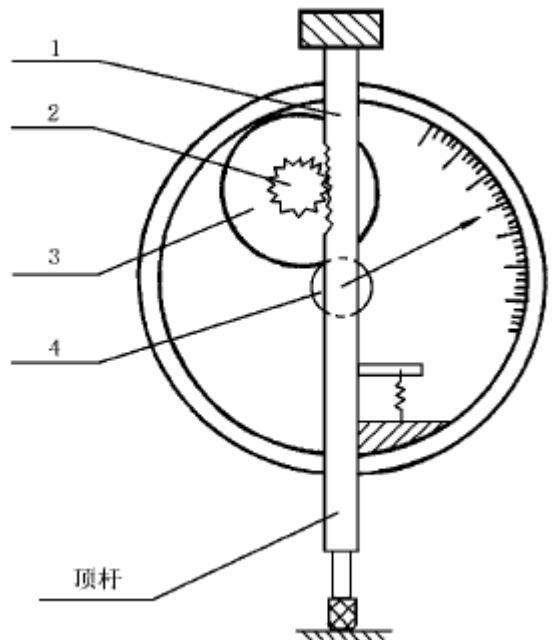


图4 百分表构造原理

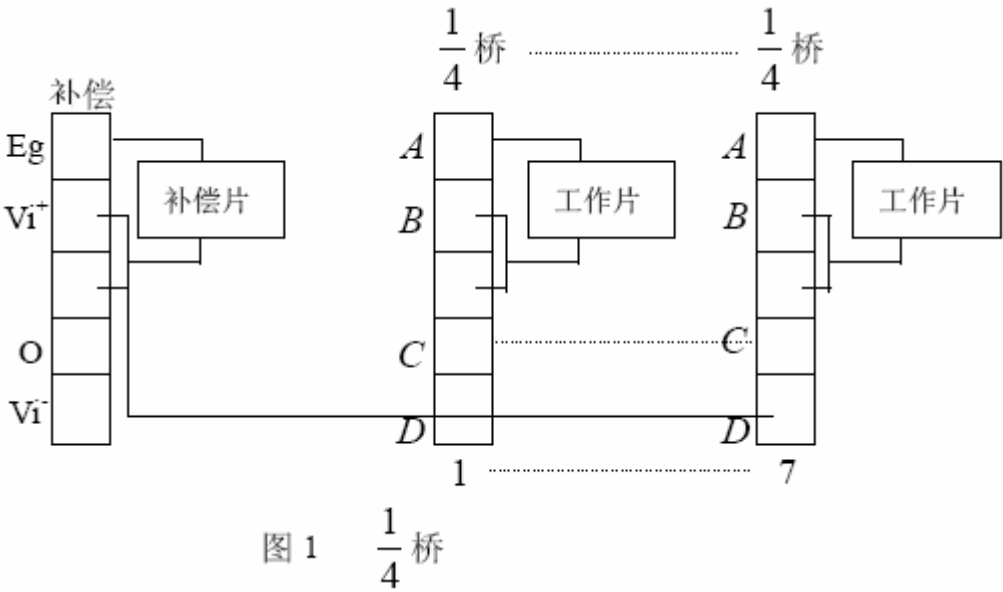
5 电阻应变仪

电测法是实验应力分析中的重要实验方法之一。电测法是以电阻应变片为传感元件，将试件的应变（非电量）转换成应变片的电阻改变，再由电阻应变仪测量电阻改变量而得到试件的应变。

静态电阻应变仪是专供测量不随时间变化或变化极缓慢的电阻应变仪器，其功能是将应变电桥的输出电压放大，在显示部分以刻度或数字形式显示应变的数值，或者利用计算机软件控制测试。

DH-3818 静态应变仪使用说明

- 一. 打开电源（在面板右侧）
- 二. 按照实验需求接桥路
 - 1. $\frac{1}{4}$ 桥：（多通道工作片共用一个补偿片，见图1，）



- 2. 半桥
 - ①. 方式一，一片工作片对应一片补偿片（见图2）

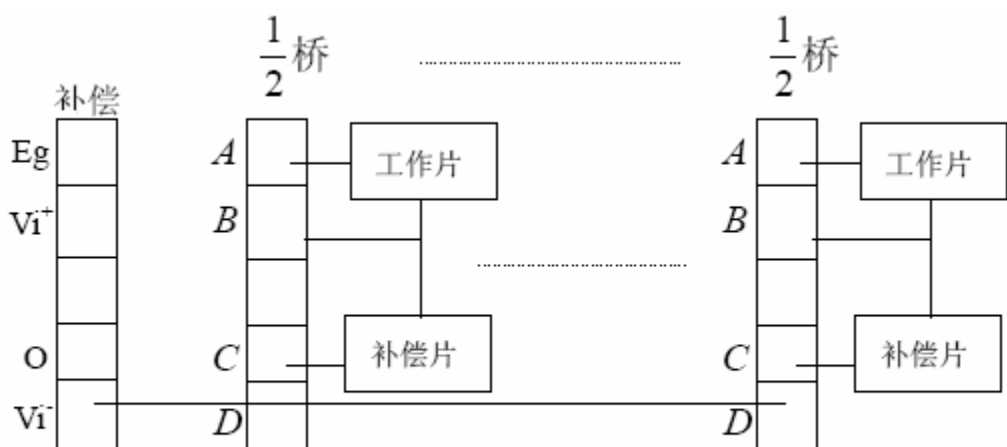


图 2 半桥 方式一

②. 方式二，两片均为工作片（见图3）

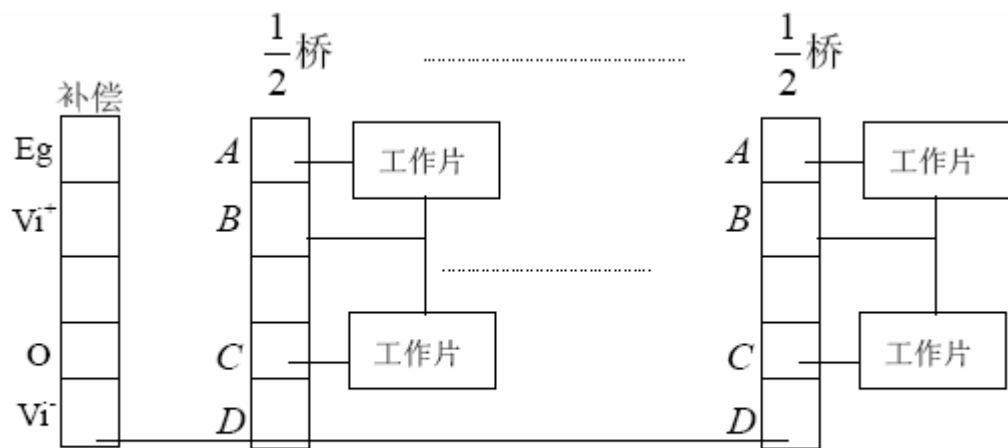


图 3 半桥 方式二

3. 全桥 4 片均为工作片（见图4）

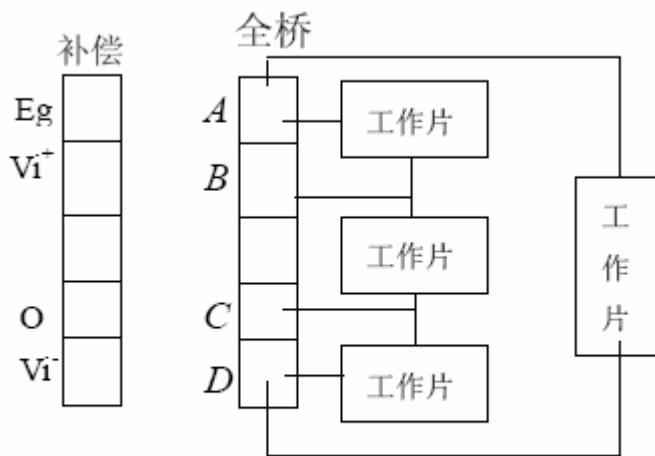


图 4 全桥

三. 灵敏系数修正

1. 按“设置”键，使“修正系数”灯亮。
2. 通过数字键输入灵敏系数修正值。

$$\text{灵敏系数修正值 } \varepsilon_{\text{片}} = \frac{K_{\text{仪}}}{K_{\text{片}}} \varepsilon_{\text{仪}}$$

$K_{\text{片}}$ =应变片灵敏系数；

$K_{\text{仪}}$ =2，应变仪标准灵敏系数；

$\varepsilon_{\text{仪}}$ =1，应变仪标准应变。

3. 灵敏系数修正值设置完毕后，再按“确定”键，使“修正系数”灯灭，“应变”灯亮。

四. 各测点平衡

1. 通过数字键和“确定”按键选择测点通道。
2. 在实验前各测点分别通过“平衡”键进行各测点预调平衡。

注意：在实验中切勿再按“平衡”键。

五. 加载荷，分别测量各点应变。

六. 实验完毕，仪器恢复原状，关闭电源。

附录二 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。

第一节 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。

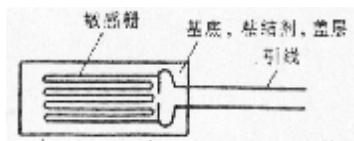


图 A-1 应变片的构造

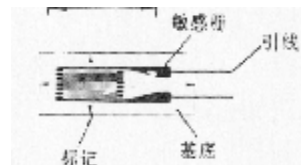
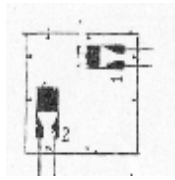
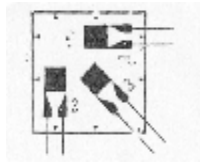


图 A-2 箔式应变片



(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 e 成正比，即

$$\frac{\Delta R}{R} = K e$$

式中： R 为应变片的原始电阻值； ΔR 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。

第二节 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

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

当 $U_o = 0$ 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 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 和 ΔR_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

$$U_o = \frac{KU_1}{4} (e_1 - e_2 + e_3 - e_4)$$

式中， $e_1 \sim e_4$ 分别为接入电桥四个桥臂的应变片的应变值。

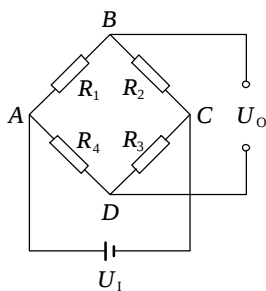


图 A-4 电桥原理

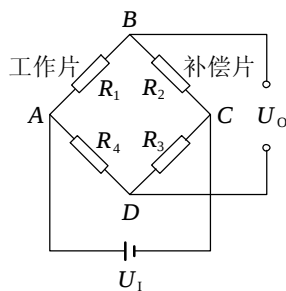


图 A-5 半桥单臂温度补偿接法

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**。严重时，温度每升高 1°C ，应变仪可显示几十微应变，因此必须设法消除。消除温度影响的措施，称为**温度补偿**。

消除温度影响最常用的方法是补偿片法。具体做法是用一片与工作片规格相同的应变片，贴在一块与被测试件材料相同但不受力的试件上，放置在被测试件附近，使他们处于同一温度场中，将工作片与温度补偿片分别接入电桥 A、B 和 B、C 之间（图 A-5），当试件受力后，工作片产生的应变为

$$\varepsilon_1 = \varepsilon + \varepsilon_t$$

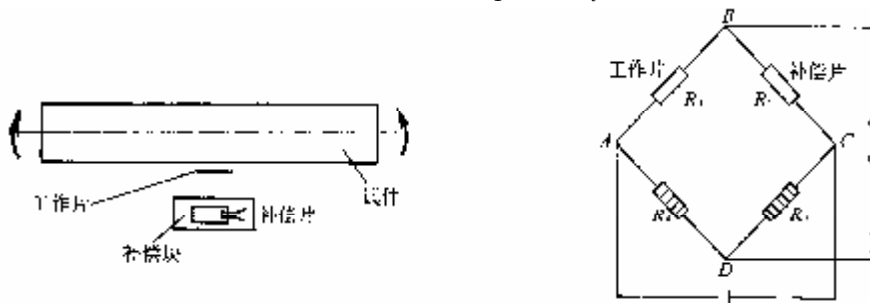


图 A-5

温度补偿片产生的应变为

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_t$$

固定电阻 R_3 和 R_4 产生的应变为零，即 $\varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0$

采用半桥接线法，应变仪的读数应变为

$$\varepsilon_r = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + 0 - 0 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = (\varepsilon + \varepsilon_t) - \varepsilon_t = \varepsilon$$

上式表明，采用补偿片后，即可消除温度变化造成的影响。（应当注意的是：工作片和温度补偿片都是相同的应变片，它们的规格、阻值、灵敏系数都应基本相同，也就是同一包或同一批次的应变片，它们感应温度的效应基本相同，这样才能达到消除温度产生应变的影响。）

当然补偿片也可贴在受力构件上或利用工作片作为温度补偿片，但要保证工作片和补偿片所测的应变值，绝对值相等，符号相反，或关系已知，这样既可以消除温度的影响，又可以增加电桥的输出电压，提高测量的灵敏度。

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，将一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 e ，则电桥的输出电压为

$$U_o = \frac{KU_1}{4}e$$

(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 e_1 和 e_2 ，则电桥的输出电压为

$$U_o = \frac{KU_1}{4}(e_1 - e_2)$$

若 $e_1 = -e_2 = e$ ，则电桥的输出电压为

$$U_o = \frac{KU_1}{2}e$$

即为半桥单臂接法的两倍。

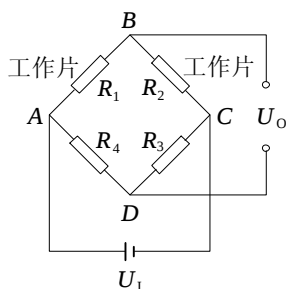


图 A-6 半桥双臂接法

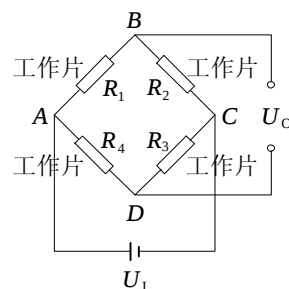


图 A-7 全桥接法

(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 e_1 、 e_2 、 e_3 和 e_4 ，则电桥的输出电压为

$$U_o = \frac{KU_1}{4}(e_1 - e_2 + e_3 - e_4)$$

若 $e_1 = -e_2 = e_3 = -e_4 = e$ ，则电桥的输出电压为

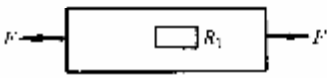
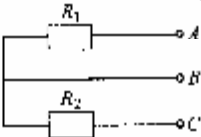
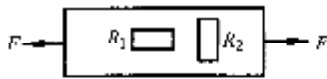
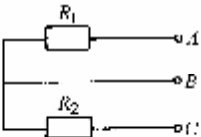
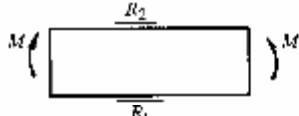
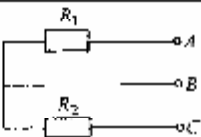
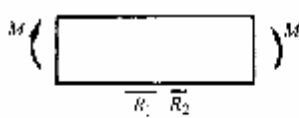
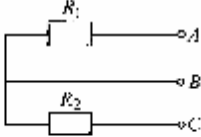
$$U_o = KU_1 e$$

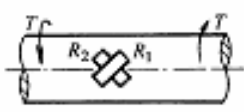
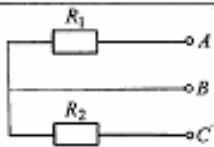
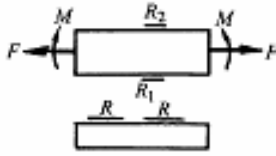
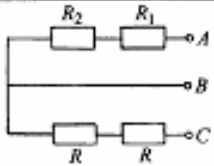
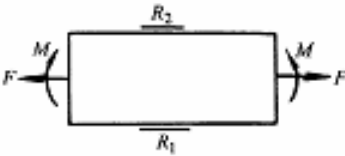
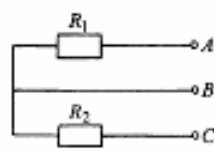
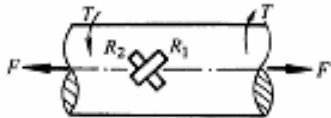
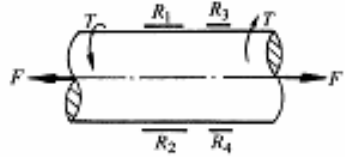
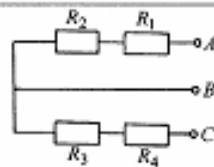
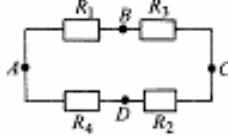
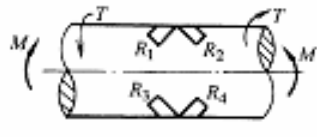
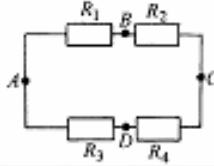
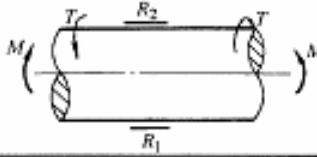
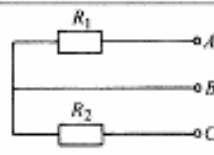
即为半桥单臂接法的四倍。

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。

应变仪读数 ε_r 具有对臂相加、邻臂相减的特性。根据此特性，采用不同的桥路布置方法，有时可达到提高测量灵敏度的目的，有时可达到在复合抗力中只测量某一种内力素，消除另一种或几种内力素的作用。同学们可视具体情况灵活运用。表 2-1 给出直杆在几种主要变形条件下测量应变使用的布片及接线方法。

表 2-1 常见变形情况下应变电测方法

变形类型	应变片的粘贴位置	电桥联接方法	测量应变 ε 与仪器读数应变 ε_r 间的关系	备 注
拉(压)			$\varepsilon = \varepsilon_r$	R_1 为工作片 R_2 为补偿片
			$\varepsilon = \frac{\varepsilon_r}{1 + \mu}$	R_1 为纵向工作片, R_2 为横向工作片, μ 为材料泊松比
弯曲			$\varepsilon = \frac{\varepsilon_r}{2}$	R_1 与 R_2 均 为工作片
			$\varepsilon = \frac{\varepsilon_r}{1 + \mu}$	R_1 为纵向工 作片, R_2 为 横向工作片

变形形式	需测应变	应变片的粘贴位置	电桥联接方法	测量应变 ϵ 与仪器读数应变 ϵ_r 间的关系	备 注
扭转	扭转主应变			$\epsilon = \frac{\epsilon_r}{2}$	R_1 和 R_2 均为工作片
拉(压)弯组合	拉(压)			$\epsilon = \epsilon_r$	R_1 和 R_2 均为工作片, R 为补偿片
	弯曲			$\epsilon = \frac{\epsilon_r}{2}$	R_1 和 R_2 均为工作片
拉(压)扭组合	扭转主应变			$\epsilon = \frac{\epsilon_r}{2}$	R_1 和 R_2 均为工作片
	拉(压)		 	$\epsilon = \frac{\epsilon_r}{1+\mu}$ $\epsilon = \frac{\epsilon_r}{2(1+\mu)}$	R_1, R_2, R_3, R_4 均为工作片
扭弯组合	扭转主应变			$\epsilon = \frac{\epsilon_r}{4}$	R_1, R_2, R_3, R_4 均为工作片
	弯曲			$\epsilon = \frac{\epsilon_r}{2}$	R_1 和 R_2 均为工作片

附录三 实验数据的直线拟合

在科学试验中常会遇到两个相关物理量有接近于直线的关系，如弹性阶段应力应变关系。有些变量表面上没有直线关系，但是经过简单变量变换之后就表现出直线关系，如两个接近幂函数关系的变量关系 $y=Cx^n$ ，则取对数以后即呈直线关系 $\log y=\log C+n\log x$ 。整理这些实验数据时，最简单的办法是根据各实验点的数据直观作图确定近似的直线关系（如图 1），但这种方法在数据点相对分散时，同一组数据就会得到不同的结果。为了更准确更合理的解决这一数据处理问题，可应用数理统计中直线拟合的方法。该方法可根据实验数据得到最佳的直线关系。现简要介绍如下：

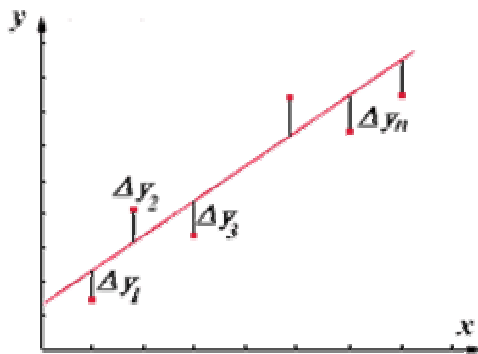


图1 根据数据点描绘直线

设测试物理量为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，与其对应测试的物理量为 $y_1, y_2, \dots, y_n$ ，若设 $y=a+bx$ 为诸试验点的最佳直线关系，显而易见，用 x_i 计算出来的 y_i 与 x_i 对应测试的 y_i 不同，存在一个差值（图 1）

$$\Delta y_i = y_i - (a + bx_i) \quad (i=1, 2, 3, \dots, n)$$

根据最小二乘法原理，当观测值的误差 Δy_i 的平方和为最小时确认为最佳直线方程，根据这个条件可以确定系数 a 和 b ，从而确定最佳直线方程 $y=a+bx$ 。

观测值 y_i 的误差 Δy_i 的平方和最小，数学上表示为

$$Q = \sum (\Delta y_i)^2 = \min_{(i=1, 2, 3, \dots, n)}$$

即
$$Q = \sum [y_i - (a + bx_i)]^2 = \min$$

利用
$$\frac{\partial Q}{\partial a} = -2(y_1 - a - bx_1) - 2(y_2 - a - bx_2) - \dots - 2(y_n - a - bx_n) = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial b} = -2x_1(y_1 - a - bx_1) - 2x_2(y_2 - a - bx_2) - \dots - 2x_n(y_n - a - bx_n) = 0$$

整理后得 $\sum y_i - na - b \sum x_i^2 = 0$

$$\sum x_i y_i - a \sum x_i - b \sum x_i^2 = 0$$

引入 $L_{xx} = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}$, $L_{yy} = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}$

$$L_{xy} = \sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n} , \quad \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} , \quad \bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}$$

则可解出 $b = \frac{L_{xy}}{L_{xx}}$, $a = \bar{y} - b\bar{x}$

最终获得直线方程 $y=a+bx$

对于任何一组实验数据，总可以用最小二乘法拟合出一条直线方程来，但是有的数据远离直线，而有的数据可能会很接近直线，仅用拟合出来的直线方程不能反映这种差别，而相关系数 r 可以判别一组数据线性相关的密切程度，相关系数定义为

$$r = \frac{L_{xy}}{\sqrt{L_{xx} \cdot L_{yy}}}$$

r 的绝对值愈接近于 1，表示数据 x_i 和 y_i 的线性关系愈好，理想直线关系的数据 $r=1$ 。相关系数接近于零，表示 x_i 和 y_i 的直线关系很差，或 x_i 和 y_i 没有直线关系。因此拟合出直线方程以后，通常都要计算相关系数 r ，以表示直线相关关系的优劣。

实验数据 x_i 和 y_i 存在相关关系，根据 x_i 并不能完全确定 y_i ，但可以知道 y_i 会落在拟合出来的直线方程 $y=a+bx$ 的附近，并且知道愈接近直线的数据点的概率越大，点越密集。而越远离直线的数据点的概率越小，但总还存在可能性，可见数据在回归直线方程附近的分布与概率有关。剩余标准离差 s 可以表示在一定概率之下数据点偏离的程度。

$$s = \sqrt{\frac{L_{yy} - bL_{xy}}{n-2}}$$

对于任一 x_i 值, y_i 值落在 $[y-s, y+s]$ 区间的概率为 68.3%, 落在 $[y-2s, y+2s]$ 区间的概率为 95.4%, 落在区间 $[y-3s, y+3s]$ 的概率为 99.7%, 这就说明 s 值代表了一定概率之下的数据分散带的宽度, s 值越小, 数据直线相关性越好, 理想直线关系的数据 $s=0$ 。 r 和 s 都是反映数据直线相关关系的参数, 一般计算其中之一即可。

应该指出, 直线拟合需要有足够的试验点, 直线关系越好 (即 r 接近于 1), 试验点数可以减少, 但最好不要少于五, 相关关系越差, 试验点数必须相应增加, 否则直线拟合无效。

附录四 实验数据有效数后第一位数的修约规定

一.有效数字的位数

有效数字是指在表达一个数量时，其中的每一个数字都是准确的、可靠的，而只允许保留最后一位估计数字，这个数量的每一个数字为有效数字。

1. 纯粹理论计算的结果：如 π ， e ， $\sqrt{2}$ 和 $\frac{1}{3}$ 等，它们可以根据需要计算到任意位数的有效数字，如 π 可以取 3.14，3.141，3.1415，3.14159 等。因此，这一类数量其有效数字的位数是无限制的。

2. 测量得到的结果：这一类数量其末一位数字往往是估计得来的，因此具有一定的误差和不确定性。例如用千分尺测量试样的直径为 10.47mm，其中百分位是 7，因千分尺的精度 0.01mm，所以百分位上的 7 已不大准确，而前三位数是肯定准确、可靠的，最后一位数字已带有估计的性质。所以对于测量结果只允许保留最后一位不准确数字，这是一个四位有效数字的数量。

在鉴别有效数字时，数字 0 可以是有效数字也可以不是有效数字。例如，我们用 0.02 精度的卡尺测试样直径，得到 10.08mm 和 10.10mm 这里的 0 都是有效数字。在测量一个杆件长度时得到 0.00320m，这时前面三个零均非有效数字，因为这些 0 只与所取的单位有关，而与测量的精确度无关。如果采用毫米做单位，则前面的三个 0 完全消失，变为 3.20mm，故有效数字是 3 位。另外，象 12000m 和 13000g，我们很难肯定其中的 0 是否是有效数字。这时最好用指数的表示法，用 10 的方次，前面的数字代表有效数字。如 12000m 写为 $1.2 \times 10^4\text{m}$ ，则表示有效数字是二位；如果把它写为 $1.20 \times 10^4\text{m}$ ，则表示有效数字是三位。现以下列长度测量为例说明有效数字位数：

(a)123cm; (b)0.00123cm; (c)12.03cm; (d)12.30cm; (e)12300cm。

其中测量 (a) 的有效数字为 3 位；测量 (b) 的有效数字为 3 位，小数点后的两个 0 仅供指示小数点的位置用。测量 (c) 的有效数字是 4 位，测量 (d) 也是 4 位有效数字。而测量 (e) 的形式最为含混，看不出来长度接近于米还是接近于厘米，因此，遇到这种情况，可将其表示为 $1.230 \times 10^4\text{cm}$ 则可以看出有效数字是 4 位。

3. 自变量 x 和因变量 y 数字位数的取法：因变量 y 的数字位数取决于自变量 x ：凡数值

是根据理论计算得来的，则可以认为因变量 y 的有效数字位数为无限制的，可以根据需要来选取；若因变量 y 的数值取决于测定量 x 时，因自变量 x 在测定时有误差，则其有效数字取决于实验的精确度。例如，测量拉伸试样的工作直径，其名义值为10mm，若用千分尺测量，因其精确度为0.01mm，因此，试样直径的有效数字可以是10.01、10.02、10.03，也可能是9.99、9.98、9.97等。根据直径计算的试样横截面积为三位有效数字，再根据实验测得的载荷量计算屈服极限和强度极限，这些应力值的有效数字位数顶多取三位。

二. 数值修约规则概述

测量结果及其不确定度同所有数据一样都只取有限位，多余的位应予修约。修约采用国家标准GB8107—87规定的数值修约规则。修约规则与修约间隔有关。

修约间隔系确定修约保留位数的一种方式。修约间隔的数值一经确定，修约值即应为该数值的整数倍。例如，指定修约间隔为0.1，修约值即应在0.1的整数倍中选取；指定间隔为100，修约值应在100的整数倍中选取，相当于将数值修约到“百”数位。数值修约时首先要确定修约数位：

- (a) 指定修约间隔为 10^{-n} （ n 为正整数），或指明将数值修约到 n 位小数；
- (b) 指定修约间隔为1，或指明将数值修约到个位数；
- (c) 指定修约间隔为 10^n ，或指明将数值修约到 10^n 位数（ n 为正整数）。

三. 进舍规则

1. 拟舍弃数字的最左一位小于5时，则舍去，即保留各位数字不变；
2. 拟舍弃数字的最左一位大于5或是5，但其后跟有并非全部为0的数字时，则进1，即保留的末尾数字加一；
3. 拟舍弃数字的最左一位为5，而右面无数字或皆为0时，若保留的末位数字为奇数（1，3，5，7，9）则进1，为偶数（2，4，6，8，0）则舍去。以上记忆口诀为“5下舍去5上进，5整单进双舍去”。例：

修约到1位小数：	12.1498	→	12.1			
修约到个位数：	10.502	→	11			
修约到百位数：	1268	→	13×10^2			
修约间隔0.1：	1.050	→	1.0,	0.350	→	0.4
修约间隔 10^3 ：	2500	→	2×10^3 ,	3500	→	4×10^3

上述进舍规则第3条的意义是什么呢？

由于数字修约而引起的误差称舍入误差，采用第3条的目的，不但可以使末位成为偶数以便于以后的计算，主要还在于使舍入误差成为偶然误差而不造成系统误差，以50至60

间数为例，为便于区别舍弃的数字，将其写在指数位置上，保留的末位数按正常写，56 写成 5₆。以下例子均以此写法表示。

$$\begin{array}{lll} 5^1 \rightarrow 50 & 5^5 & 5^6 \rightarrow 60 \\ 5^2 \rightarrow 50 & & 5^7 \rightarrow 60 \\ 5^3 \rightarrow 50 & & 5^8 \rightarrow 60 \\ 5^4 \rightarrow 50 & & 5^9 \rightarrow 60 \end{array}$$

不管5⁵，则舍入前后总和不变，皆为4×(50+60)，若5⁵入为60，则使测量结果增大，故舍入误差为期望不为零的随机误差。

注意到5 前可为奇也可为偶（1,2,3,4,5,6,7,8,9,0 皆可出现），且为奇为偶概率

$$P(5 \text{ 前为奇}) = P(5 \text{ 前为偶}) = \frac{1}{2}$$

于是所有可能舍入情况为下表：

数	误差	数	误差	数	误差	数	误差
0 ¹	-1	1 ¹	-1	8 ¹	-1	9 ¹	-1
0 ²	-2	1 ²	-2	8 ²	-2	9 ²	-2
0 ³	-3	1 ³	-3	8 ³	-3	9 ³	-3
0 ⁴	-4	1 ⁴	-4	8 ⁴	-4	9 ⁴	-4
0 ⁵	-5	1 ⁵	+5	8 ⁵	-5	9 ⁵	+5
0 ⁶	+4	1 ⁶	+4	8 ⁶	+4	9 ⁶	+4
0 ⁷	+3	1 ⁷	+3	8 ⁷	+3	9 ⁷	+3
0 ⁸	+2	1 ⁸	+2	8 ⁸	+2	9 ⁸	+2
0 ⁹	+1	1 ⁹	+1	8 ⁹	+1	9 ⁹	+1

表中5 行的误差总和又为0，表中误差之和为0，从而误差期望为0，所以本进舍规则可使舍入误差为偶然误差。

注意：本进舍规则不许连续修约。

例如：修约15.4546，修约间隔为1。正确的做法为：15.4546→15；不正确的做法为：15.4546→15.455→15.46→15.5→16。

在具体实施中有时先将获得数值按指定位数多一位或几位报出然后再判定。为避免产生连续修约的错误，应按下述步骤进行：

(a) 报出数字最后的非0 数字为5 时应在数值后加(+)、(-)或不加，已分别表明已进行过舍、进或未舍未进。如16.50(+)表示实际值大于16.50，经修约舍弃而成为16.50。

(b) 如判定报出值需修约,当拟舍数字的最左一位数字为5 而后面无数字或皆为0 时,数值后面有 (+) 者进1, 数值后有 (-) 者舍去, 其它仍按进舍规则进行。如:

实测值	报出值	修约值
15.4546	15.5(-)	15
16.5203	16.5(+)	17
17.5000	17.5	18

四. 0.5 及0.2 单位修约

有时需用0.5 单位修约或0.2 单位修约。0.5 单位修约亦称半个单位修约,指修约间隔为指定位数的0.5 单位,即修约至指定位数的0.5 单位。

0.2 单位修约指修约间隔为指定位数的0.2 单位,即修约至指定位数的0.2 单位。

上述的进舍规则实际为1 单位修约,即单位修约。

0.5 单位修约法:将拟修约数字乘2,按指定数位依进舍规则修约,所得数值再除以2。

例如:将下列数修约至个位数的0.5 单位。

拟修约值 (A)	拟修约值乘 2 (2A)	2A 修约值 (修约间隔为 1)	A 修约值 (修约间隔为 0.5)
60.25	120.50	120	60.0
60.38	120.76	121	60.5
60.75	121.50	122	61.0

0.2 单位修约法:将拟修正数乘5,按指定数位依进舍规则修约,所得数字再乘以5。

例如:将下列数字修约至个位数的0.2 单位

拟修约值 (A)	拟修约值乘 5 (5A)	5A 修约值 (修约间隔为 1)	A 修约值 (修约间隔为 0.2)
8.42	42.10	42	8.4

五. 最终测量结果修约

最终测量结果应不再含有可修正的系统误差。

力学试验所测定的各项性能指标及测试结果的数值一般是通过测量和运算得到的。由于计算的特点,其结果往往出现多位或无穷多位数字。但这些数字并不是都具有实际意义。在表达和书写这些数值时必须对它们进行修约处理。

对数值进行修约之前应明确保留几位数有效数字,也就是说应修约到哪一位数。性能数值的有效位数主要决定于测试的精确度。例如,某一性能数值的测试精确度为 $\pm 1\%$,则计算结果保留4 位或4 位以上有效数字显然没有实际意义,夸大了测量的精确度。在力学性能测试中测量系统的固有误差和方法误差决定了性能数值的有效位数。

测得金属材料拉伸力学性能数值按下表进行修约，修约的方法按照GB1.1—81 附录C “数字修约规则” 执行。

测试项目	范围	修约到
$\sigma_p, \sigma_t, \sigma_r$	$\leq 200 \text{ N/mm}^2$	1 N/mm ²
$\sigma_s, \sigma_{su}, \sigma_{sl}$	$> 200 \sim 1000 \text{ N/mm}^2$	5 N/mm ²
σ_b	$> 1000 \text{ N/mm}^2$	10 N/mm ²
$\delta_s, \delta_g, \delta_{gt}$		0.1%
δ	$\leq 10\%$	0.5%
	$> 10\%$	1%
ψ	$\leq 25\%$	0.5%
	$> 25\%$	1%

附录五 常见材料性能参数

材料的性质与制造工艺、化学成份、内部缺陷、使用温度、受载历史、服役时间、试件尺寸等因素有关。本附录给出的材料性能参数只是典型范围值。用于实际工程分析或工程设计时，请咨询材料制造商或供应商。

除非特别说明，本附录给出的弹性模量、屈服强度均指拉伸时的值。

表 1 材料的弹性模量、泊松比、密度和热膨胀系数

材料名称	弹性模量 E GPa	泊松比 ν	密度 ρ kg/m ³	热膨胀系数 α 10 ⁻⁶ /℃
铝合金	70—79	0.33	2600-2800	23
黄铜	96-110	0.34	8400-8600	19.1-21.2
青铜	96-120	0.34	8200-8800	18-21
铸铁	83-170	0.2-0.3	7000-7400	9.9-12
混凝土(压)	17-31	0.1-0.2		
普通			2300	7-14
增强			2400	
轻质			1100-1800	
铜及其合金	110-120	0.33-0.36	8900	16.6-17.6
玻璃	48-83	0.17-0.27	2400-2800	5-11
镁合金	41-45	0.35	1760-1830	26.1-28.8
镍合金(蒙乃尔铜)	170	0.32	8800	14
镍	210	0.31	8800	13
塑料				
尼龙	2.1-3.4	0.4	880-1100	70-140
聚乙烯	0.7-1.4	0.4	960-1400	140-290
岩石(压)				
花岗岩、大理石、石英石	40-100	0.2-0.3	2600-2900	5-9
石灰石、沙石	20-70	0.2-0.3	2000-2900	
橡胶	0.0007-0.004	0.45-0.5	960-1300	130-200
沙、土壤、砂砾			1200-2200	
钢		0.27-0.30		10-18
高强钢	190-210		7850	14
不锈钢				17
结构钢				12
钛合金	100-120	0.33	4500	8.1-11
钨	340-380	0.2	1900	4.3
木材(弯曲)				
杉木	11-13		480-560	
橡木	11-12		640-720	
松木	11-14		560-640	

表 2 材料的力学性能

材料名称/牌号	屈服强度 σ_s MPa	抗拉强度 σ_b MPa	伸长率 δ_s %	备注
铝 合 金	35-500	100-550	1-45	
LY12	274	412	19	硬铝
黄 铜	70-550	200-620	4-60	
青 铜	82-690	200-830	5-60	
铸 铁 (拉伸)	120-290	69-480	0-1	
HT150		150		
HT250		250		
铸 铁 (压缩)		340-1400		
混凝土 (压缩)		10-70		
铜及其合金	55-760	230-830	4-50	
玻 璃		30-1000	0	
平板玻璃		70		
玻璃纤维		7000-20000		
镁合金	80-280	140-340	2-20	
镍合金(蒙乃尔铜)	170-1100	450-1200	2-50	
镍	100-620	310-760	2-50	
塑 料				
尼龙		40-80	20-100	
聚乙烯		7-28	15-300	
岩 石 (压缩)				
花岗岩、大理石、石英石		50-280		
石灰石、沙石		20-200		
橡胶	1-7	7-20	100-800	
普通碳素钢				
Q215	215	335~450	26~31	旧牌号 A2
Q235	235	375~500	21~26	旧牌号 A3
Q255	255	410~550	19~24	旧牌号 A4
Q275	275	490~630	15~20	旧牌号 A5
优质碳素钢				
25	275	450	23	25 号钢
35	315	530	20	35 号钢
45	355	600	16	45 号钢
55	380	645	13	55 号钢
低合金钢				
15MnV	390	530	18	15 锰钒
16Mn	345	510	21	16 锰
合金钢				
20Cr	540	835	10	20 铬
40Cr	785	980	9	40 铬