

材料力学实验指导书

(农业工程类专用)

主编：赵立军

东北农业大学

主 编 赵立军

副主编 张文娇 袁 威

主 审 赵淑红

绪 论

材料力学实验是材料力学的重要支柱之一。材料力学从理论上研究工程结构构件的应力分析和计算，并对构件的强度、刚度和稳定性进行设计或核校其可靠性。材料力学实验则从实验角度为材料力学理论和应用提供实验支持。材料力学实验是工科学生必须掌握的重要实践课程，也是面向 21 世纪基础力学实验课程改革的一项重要研究内容。本课程是通过实验来加强学生对材料力学基本理论、基本概念和研究方法的理解，重点是拓宽学生的知识面，进行实验能力和操作技能的系统培养，培养用实验的方法去发现问题、分析问题和解决问题的能力。

一、目前常见的材料力学实验大致可以分为以下几种类型

1. 机械法：采用万能试验机对材料进行拉、压、弯、扭及组合变形等力学性能测试。
2. 电测方法：有电阻、电感等多种方法，而以电阻应变仪测量技术的应用较为普遍，实际效果也较好。电阻应变测量技术不仅可以用于模型实验，而且可用于实际工程结构在各种条件下的应变及其它参数（扭矩、压力等）测量。利用无线电遥控技术和红外技术还可远距离遥测。

上述各种方法应用时，针对解决的问题，选择合适的方法。当理论分析、计算遇到困难时，借助材料力学实验技术和方法，可直接进行结构构件的应力分析；在工程结构投入运行期间，材料力学实验的分析要求，更是结构安全性评价的可靠手段之一。因此材料力学实验能力和理论分析、计算能力的培养，具有同等重要的地位。

二、教学实验注意事项

为了确保实验顺利进行，达到预定目的，应做到下列几点：

（一）作好实验前的准备工作

1. 预习实验指导书，明确本次实验目的、方法、步骤和基本原理。
2. 对实验中所用到仪器、设备要有一定了解。
3. 必须清楚地知道本次实验需记录数据项目及数据处理方法。
4. 对自行设计的实验，提前准备好方案。

（二）遵守实验室规章制度

1. 实验时应严肃认真，爱护设备及仪器，并应严格遵守操作规程。
2. 非本实验所用仪器及设备切勿任意动用，以免损坏，造成经济损失。
3. 实验完毕后，应将设备和仪器擦拭干净，并恢复到原来正常状态。

（三）认真做好实验

1. 认真听好教师对本次实验重点讲解及操作注意事项。
2. 实验时，应有严格的科学作风，认真细致的按照实验指导书中要求实验方法与步骤逐步进行。
3. 在实验过程中，应密切观察实验现象，随时进行分析，若发现异常现象，应及时总结。

（四）认真写好实验报告。实验报告具体内容见附录。

第一部分 实验机器

前言：在材料力学试验中，一般都要给试件施加载荷，这种加载用的设备称为材料试验机。如果同一台机器，能兼作拉伸、压缩、弯曲和剪切等多种试验，则称为万能试验机。电子万能试验机是材料力学性能测试的专用设备，主要用于材料的拉伸、压缩、弯曲、剪切等力学性能试验。电子万能试验机是机械技术、传感器技术、电子（计算机）测量、控制及数据处理技术相结合的新型试验机。

与以往的机械式和液压式试验机相比，近年来生产的电子万能试验机最突出的特点是利用计算机控制试验过程，并完成测量数据的自动采集和处理。实现了恒试验力、应力速率及恒变形、应变速率的闭环控制。具有试验过程控制模式智能设置系统，用户可以根据自己的需要设置试验过程及试验过程中各阶段的控制模式；计算机控制系统可以按照用户设置的模式自动控制试验过程。实现了试验力、位移、变形和试验曲线的屏幕显示，同时具备试验条件、试验结果的存储和文件处理功能。试验过程控制、横梁移动速度大小的改变、参数输入等操作可全部用鼠标器完成，使用方便。处理结果和试验曲线既可以打印，也可以以 ASCII 文件的形式进行磁盘和网络操作，以便于试验结果的后续处理。具有全试验过程数据曲线的再现功能。曲线的再现可使用户完全采用人机对话的方式，自主处理试验数据。例如：可以在任意点输入试验力、变形、应力、应变中的任意一项数值而得到其它几项的结果。具有试验力和变形的数字调零及标定的功能，提高了机器的可靠性。

万能试验机，一般都是由下列两个基本部分组成。

（一）加载部分

它是对试件施加载荷的装置。一般所谓加载，都是利用一定的动力和传动装置强迫试件发生变形，使试件受到力的作用。

（二）测力部分

它是传递和指示试件所受载荷大小的装置。

试验机一般还有自动绘图装置，它可以在实验过程中，自动画出试件所受载荷与变形之间的关系曲线。

这种试验机一般外型分为两部分：主机和控制柜。基本构造包括机械加载架、试件夹持装置、测量系统、动力系统、传动系统、控制系统、计算机系统等基本工作单元。按照最大载荷划分为 2KN、5KN、10KN、20KN、50KN、100KN 等不同的载荷量程。

下面分别介绍三种万能试验机的外观结构、工作原理及操作步骤和使用注意事项。

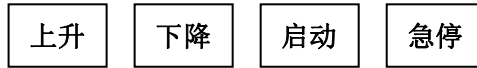
一、WDW—100 型电子式万能试验机

（一）外观结构

它的外形图见图 1-1 所示。试验的拉伸与压缩用同一个加载空间。当进行拉伸与压缩时需要更换夹具。

该试验机由三部分组成：

- (1) 加力部分：主机与辅具构成试验机的加力框架。
- (2) 测力部分：主机工作台下的交流伺服电机、交流伺服系统、减速系统构成动力驱动系统。
- (3) 处理部分：插卡式控制器、计算机和打印机构成试验机的控制与数据处理系统。为了方便试验开始前试样的装夹和试验过程中的安全保护，在主机右侧，装有按钮



点动控制横梁的上升、下降，伺服系统的启动、停止。

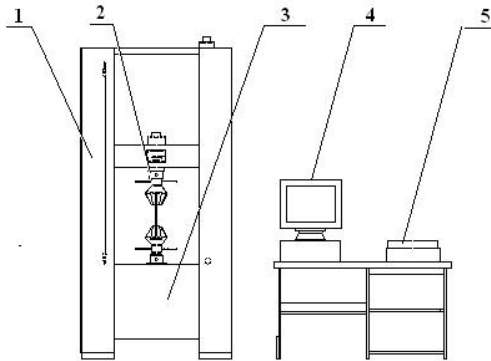


图 1-1 WDW—100 型电子式万能试验机

1.主机 2.夹具 3.控制系统 4.显示器 5.打印机

(二) 工作原理

(1) 主机部分(见图 1-2 所示)

主机部共有七部分组成：导向立柱 3、上横梁 1、中横梁 2、工作台 4 组成落地式框架，调速系统 7 安装在工作台下部。交流伺服电机 6 通过同步齿形带减速系统带动滚珠丝杠副 5 旋转，滚珠丝杠副 5 驱动中横梁 2，带动拉伸辅具（或压缩、弯曲等辅具）上下移动，实现试样的加荷与卸载。该结构保证机架有足够的刚度，同时实现高效、平稳传动。丝杠与丝母之间有消除间隙结构，提高了整机的传动精度。

(2) 试验空间

拉伸试验在上横梁和中横梁之间完成，压缩、弯曲试验在中横梁和工作台之间完成。

(3) 负荷传感器

负荷传感器安装在中横梁的下部。其作用是将外加的力通过放大器转换成电信号输出。

(4) 限位开关

限位开关安装在主机左侧前方，当中横梁移动超过设定位置时，限位开关动作，试验机停止工作。

(5) 急停开关

急停开关按钮安装在主机右侧前下方，同时装有点动控制横梁的上升、下降按钮。在紧急情况下，按下急停开关使伺服系统断电，横梁立即停止移动。

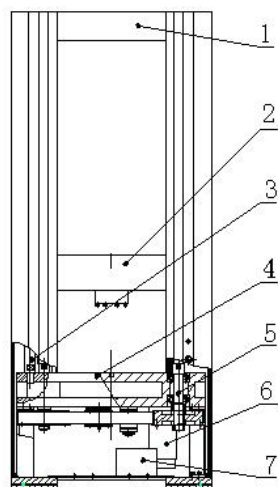


图 1-2 WDW—100 型电子式万能试验机原理示意图

1.上横梁 2.中横梁 3.导向立柱 4.工作台 5.滚珠丝杠 6.伺服电机 7.调速部分

二、WDW—100D 型电子式万能试验机

（一）外观结构

它的外形图见图 1-3 所示。试验的拉伸与压缩用两个加载空间，不需要更换夹具。使用比较方便。

该试验机由三部分组成：

（1）加力部分：主机与辅具构成试验机的加力框架。

（2）测力部分：主机工作台下的交流伺服电机、交流伺服系统、减速系统构成动力驱动系统。

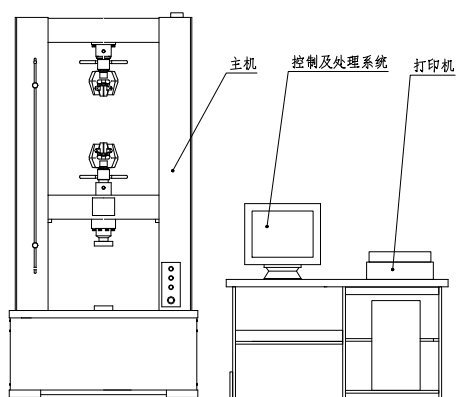


图 1-3 WDW—100D 型电子式万能试验机

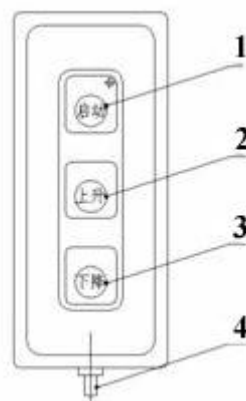
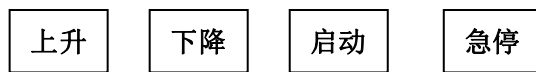


图 1-4 遥控盒面板示意图

(3)处理部分: 插卡式控制器、计算机和打印机构成试验机的控制与数据处理系统。同样, 为了方便试验开始前试样的装夹和试验过程中的安全保护, 在主机右侧, 装有按钮, 点动控制横梁的上升、下降, 伺服系统的启动、停止。



钮, 点动控制横梁的上升、下降, 伺服系统的启动、停止。

(二) 工作原理

(1) 加载控制系统 (由图 1-5 原理示意图说明)

在加载控制系统中, 由上横梁、四根立柱和工作平台组成门式框架。活动横梁由滚珠丝杠驱动。试样安装于活动横梁与工作平台之间。操纵速度控制单元使其发出指令, 伺服电机便驱动齿轮箱带动滚珠丝杠转动, 丝杠推动横梁向上或向下位移, 从而实现对试样的加载。通过测速电机的测速反馈和旋转变压器的相位反馈形成闭环控制, 以保证加载速度的稳定。

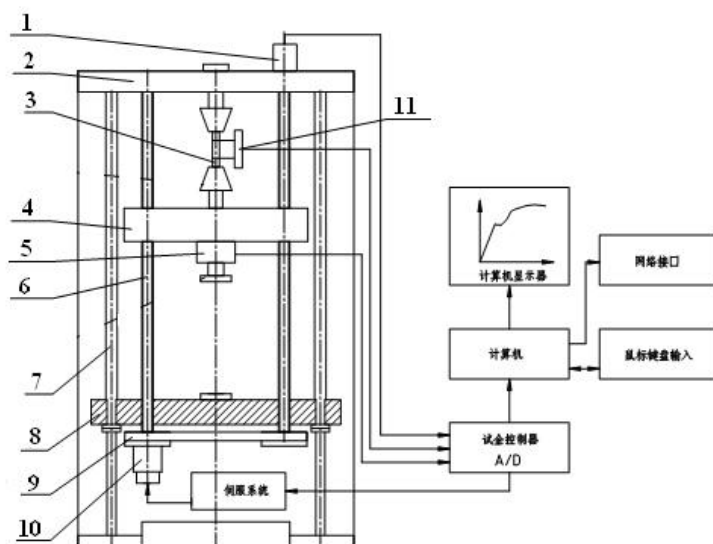


图 1-5 WDW—100D 型电子式万能试验机原理示意图

- 1.光电编码器 2.上横梁 3.试样 4.中横梁 5. 负荷传感器 6.滚珠丝杠
7.立柱 8.工作平台 9.同步齿型带减速系统 10.伺服电机 11.电子引伸计

(2) 测量系统

试验机测量系统包括载荷测量、试样变形测量和活动横梁的位移测量等三部分。载荷测量把应变式拉压力传感器发出的信号变成微弱的电信号, 经放大器放大, 再经 A/D 转换变成数字显示。变形测量则是把应变式引伸计的信号经放大器, 并经 A/D 转换变成数字显示。如把放大器和的信号接到计算机上, 即可画出负载—变形曲线。活动横梁的位移是借助丝杠的转动来实现的。滚珠丝杠转动时, 装在滚珠丝杠上的光栅编码器输出的脉冲信号经过转换, 也可用数字显示。

三、 WDW—100E 型电子式万能试验机

(一) 外观结构

它的外形图见图 1-6 所示。试验的拉伸与压缩用两个加载空间，不需要更换夹具。使用比较方便。

该试验机由三部分组成：

(1) 加力部分：主机与辅具构成试验机的加力框架。

(2) 测力部分：主机工作台下的交流伺服电机、交流伺服系统、减速系统构成动力驱动系统。

(3) 处理部分：插卡式控制器、PC 机和打印机构成试验机的控制与数据处理及打印系统。

同样，为了方便试验开始前试样的装夹和试验过程中的安全保护，在主机装有遥控

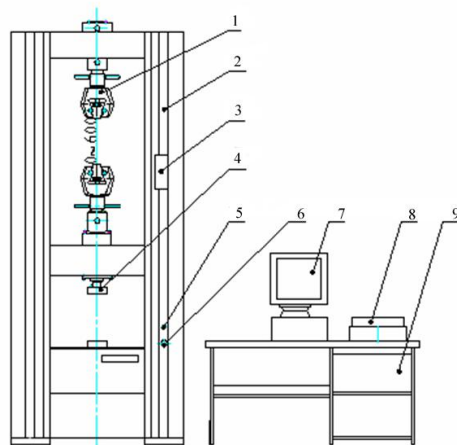


图 1-6 外观图

1.拉伸辅具 2.主机 3.遥控盒 4.压缩辅具

5.电源指示灯 6.急停开关 7.显示器 8.打印机 9.计算机桌

盒吸挂在主机右方前侧中部，用以控制伺服系统通电和控制中横梁的移动。如图 1-4 所示其中：1 是伺服系统“启动”按键。用以给系统通电，2 是“上升”按键。用以控制中横梁的上升，3 是“下降”按键。用以控制中横梁的下降，4 是遥控盒控制线。

(二) 工作原理

1. 该试验机实现了恒试验力、应力速率及恒变形、应变速率的闭环控制。具有试验过程控制模式智能设置系统，用户可以根据自己的需要设置试验过程及试验过程中各阶段的控制模式；PC 机控制系统可以按照用户设置的模式自动控制试验过程。

2. 试验机实现了试验力、位移、变形和试验曲线的屏幕显示，同时具备试验条件、试验结果的存储和文件处理功能。试验过程控制、横梁移动速度大小的改变、参数输入等操作可全部用鼠标器完成，使用方便。

3. 试验机可完成符合 GB/T228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》、

GB/T7314-2005《金属材料室温压缩试验方法》要求的各项试验，且可以满足 GB、ISO、ASTM、DIN 等标准的要求。处理结果和试验曲线既可以打印，也可以以 ASCII 文件的形式进行磁盘和网络操作，以便于试验结果的后续处理。

4. 试验机具有全试验过程数据曲线的再现功能。曲线的再现可使用户完全采用人机对话的方式，自主处理试验数据。例如：可以在任意点输入试验力、变形、应力、应变中的任意一项数值而得到其它几项的结果。

5. 试验机具有试验力和变形的数字调零及标定的功能，提高了机器的可靠性。

6. 试验机具有软件权限分级管理功能，便于分权限管理。

7. 可根据需要定制满足特殊材料试验方法要求的数据处理软件，无污染、噪音低，效率高。

主机部共有七部分组成（如图 1-7 所示）：导向立柱 3、上横梁 1、中横梁 2、工作台 4 组成落地式框架，调速系统 7 安装在工作台下部。交流伺服电机 6 通过同步齿形带减速系统带动滚珠丝杠副 5 旋转，滚珠丝杠副 5 驱动中横梁 2，带动拉伸辅具（或压缩、弯曲等辅具）上下移动，实现试样的加荷与卸载。该结构保证机架有足够的刚度，同时实现高效、平稳传动。丝杠与丝母之间有消除间隙结构，提高了整机的传动精度。

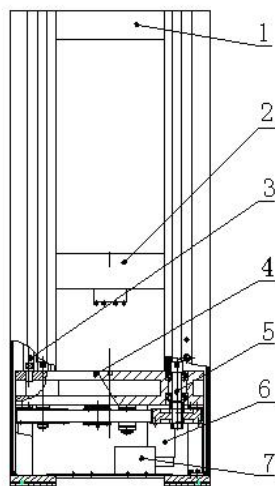


图 1-7 WDW—100 型电子式万能试验机原理示意图

1.上横梁 2.中横梁 3.导向立柱

4.工作台 5.滚珠丝杠 6.伺服电机 7.调速部分

（三）操作步骤及注意事项

1. 操作步骤

WDW—100、WDW—100D、WDW—100E 型电子式万能试验机都是由计算机控制，使用软件几乎相同，因此，操作步骤把试验机控制部分与计算机结合在一起说明。

（1）打开计算机进入 Windows 操作系统。

（2）双击桌面 TestSoft 软件图标进入试验操作系统，此时会出现一个小对话框，点击“确认”进入系统，会出现一个操作界面。

（3）点击操作界面上方的“方案”图标

1) 出现“试验方案向导第一步”的对话框，在试验方案名一栏输入“试验方案名”，在试验数据处理方法一栏输入“金属材料室温拉伸（或压缩）方法”字样，然后点击“下一步”进入试验方案向导第二步。

2) 在“试验方案向导第二步”的对话框中，在试验形状一栏输入“试件形状”，在试验类型一栏输入“试样长或短”，在试验信息数据库表中表单名一栏输入“拉伸或压缩”，在变形传感器一栏输入“位移或变形”，之后点击“下一步”试验方案向导第三步。

3) 在“试验方案向导第三步”的对话框中，在选择过程控制方式一栏输入“手动控制”，点击“下一步”进入试验方案向导第四步。

4) 在“试验方案向导第四步”的对话框中，在选择同步显示曲线类型一栏输入你想选择的曲线类型。点击“下一步”进入试验方案向导第五步。

5) 在“试验方案向导第五步”的对话框中，点击“取消”图标，试验方案编写完毕。

(4) 点击试验操作界面上方“试样信息”图标。此时会出现一个试样信息设定的对话框，根据对话框要求编写试样信息，完成之后点击“确认”图标。

(5) 安装试件。安装时先将试件安装在固定夹头上，选择合适的速度，移动中横梁距离，之后把试件下夹头夹紧。若需安装引伸仪，此时安装上。（注：空载速度最好选择 50~200mm/min）

(6) 根据实验需要，选择合适的试验速度，点击“试验开始”图标，试验开始。同时计算机自动绘出曲线。

(7) 单击“曲线参数”键，设置与试验相对应的纵、横坐标。

(8) “试验力”中“最大力”清零，选择所需力量程档，“位移”清零。

(9) 选择适当的“试验速度”键。试验时建议选 5~10mm/min。

(10) 如果需要观察绘出的曲线，单击“试验开始”键；如果不需要观察曲线，单击“上升”或“下降”键，试验开始。

(11) 试验结束后，单击“保存”键，并键入该试验的名称。

(12) 单击“结果分析”键，同时打印“结果分析”和“观察曲线”。

(13) 试验结束后，先取下引伸仪，然后卸载。取下试件，关闭“动力驱动系统”，并清理机器，关闭计算机。

2. 注意事项

(1) 启动试验机前，一定要检查安装在左前外罩上的限位开关位置，使之处于满足试验行程要求，确保上、下夹具至少相距 10cm。

(2) 拉伸附具的手柄旋转方向已在夹具体上标明。在更换钳口时，注意把钳口上的圆销放入夹具体后面的导向槽里，且前面的挡片要放正，避免卡死钳口。更换完毕后，用手应能移动钳口。

(3) 放置试样时，一定要把试样放入钳口长度的 2/3 以上，以便有效夹持和保护钳口。

(4) 主机上红色蘑菇头按钮是试验机的紧急停车按钮。如遇紧急情况请立即按下。下次开机前应旋按急停按钮，使其在闭合位置。

(5) 如果横梁运动到所设定机械限位，试验机将自动停车，并给以提示。若重新开始试验，则应先通过鼠标点击反向运行按钮或移动限位开关到其他所需工作位置方可开始试验。

- (6) 如果试验过程中出现超载, 请先切断电源后重新通电, 并注意断电与通电顺序。断电时, 要先切断动力电源, 然后退出计算机应用软件, 最后切断计算机电源。
- (7) 开始试验前, 一定要接好试验机的接地保护线。
- (8) 机器运转时, 操作者不得擅自离开。
- (9) 使用时, 听见异声或发生任何故障应立即停车。
- (10) 试件安装时先把试件安装在固定夹头上。

四、TNS—J02 数显式扭转试验机

该产品广泛用于金属和非金属材料的扭转力学性能试验。适用于教学科研、质量监督、计量质检商检行业、冶金、航天航空核工兵器、汽车、建工建材等试验领域。



图 1-8 TNS—J02 数显式扭转试验机

(一) 介绍

本试验机主要是对材料进行手动加载的扭转试验。高精度扭矩传感器检测扭矩、光电编码器检测转角、数字显示检测结果。该扭转试验机具有结构简单、操作方便、价格低廉等特点。主要适用于有关科研部门、各类大专院校和工矿企业的力学实验室用来测定材料的主要扭转参数 (如图 1-8 所示)。

(二) 该试验机主要具有以下功能

1. 自动检测: 摇动手轮至试棒扭断, 试验机自动检测材料的屈服扭矩 F_v 、最大扭矩 F_{max} 、屈服角度 S_v 和最大角度 S_{max} , 自动检测试验结束后可选择查询或打印当次试验结果;
2. 手动检测: 可实时显示试验角度及扭矩。也可选择峰值检测, 试验机可自动记录试样断裂前的最大扭矩;
3. 试验结束后可选择查询或打印当次试验结果;
4. 可显示当前的年、月、日、时、分、秒。

(三) 工作条件

试验机在下列条件下正常工作：

1. 在室温 10~35 °C 范围内,相对湿度 \leq 80%;
2. 在稳固的基础上放置;
3. 在周围无振动,无腐蚀性介质和无强电磁场干扰的清洁的环境中;
4. 电源电压的波动范围不应超过额定电压的 $\pm 10\%$;
5. 试验机应可靠接地。

五、组合试验装置

（一）构造

组合试验台为多功能材料力学实验装置，具有 7 种功能，它们是：弯曲变形；动荷挠度；静不定梁；压杆稳定；扭转求 G，组合变形应力；弯曲应力等 7 项实验。总装置如图 1-9 所示，主要由机架和附件构成，每种实验有相应的附件配置，在每个实验里分别详细介绍，这里不再重复，数据可由计算机读出，也可以用百分表读出。

（二）软件使用

1. 打开计算机进入 Windows98 操作系统。

2. 双击桌面“组合试验”软件图标进入实验操作系统，此时会出现一个“组合实验演示程序”的操作界面，点击界面上方的通道测试图标，会出现一个通道测试对话框，点击测试图标，进行测试，之后退出此操作回到“组合实验演示程序”的操作界面（一般情况下不用通道测试，实验前已经调好）。

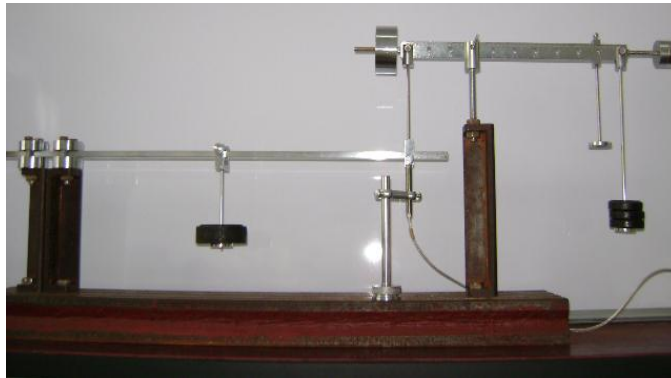


图 1-9 组合试验台

3. 点击界面上方“实验类型”图标，此时会出现一个下拉条框，在此下拉条框上有多种实验的名称，选择此次实验的名称点击进入，此时会出现一个传感器编号的对话框，选择此次实验使用的第一通道传感器的编号，输入此传感器编号所对应的序号，然后点击确定图标；此时又会出现一个传感器编号的对话框，选择此次实验使用的第二通道传感器的编号，输入此传感器编号所对应的序号，然后点击确定图标（如果使用两个传感器，会出现第二个传感器编号的对话框，否则不出现）。

4. 这时会出现此次实验的指导操作的对话框，先仔细阅读对话框上对实验的简单介绍，之后按照上面的实验设计要求在试验台上依次将试件安装在相应的卡具中，并记录

有关数据，之后点击此对话框得下一页图标。

5. 此时又会出现一个对话框，此对话框需要输入实际安装试件的尺寸，并按照对话框的要求调整传感器的间隙，调整完毕后点击结束调整图标，之后点击下一页图标。

6. 此时会出现一个加荷实验操作对话框，按照实验设计要求输入加荷的数值后，在试验装置的相应位置上加上与输入数值相等的砝码，才能点击数采图标，根据加载方案加载 N 次后，试验结束，记录实验数据，关闭此对话框，退出试验系统，关闭计算机及电源。

7. 最后一定按照安装的先后顺序，从最后安装的一个试件进行拆卸试验装置，放回原处，并填写实验仪器使用记录。

六、BDCL 型材料力学多功能试验台

（一）产品介绍

1. 用途 本产品是用于材料力学电测法实验的装置，它是将多种材料力学实验集中在一个台上进行，使用时稍加准备，即可进行教学大纲规定内容的多项实验。

2. 特点 实验台采用蜗杆机构以螺旋千斤进行加载，经传感器由数字测力仪测出力的读数；各试件受力变形，通过应变片由电阻应变仪显示。整机结构紧凑、外型美观、加载稳定、操作省力，实验效果好，易于学生自己动手，有利于提高教学质量。本仪器的潜力较大，还可根据需要，增设其它实验，实验数据也可由计算机处理。

3. 结构 本产品的架体设计采用封闭型钢及铸件配制而成，表面经喷塑处理，结构坚固耐用。蜗杆及螺旋机构为内藏式，从而使得结构紧凑。每项实验均配有精密化学镀试件和附件（如图 1-10 所示）。

（二）产品功能

1. 纯弯曲梁横截面上正应力的分布规律实验；
2. 电阻应变片灵敏度系数的标定；
3. 材料弹性模量 E，泊松比 μ 的测定；
4. 偏心拉伸实验；
5. 弯扭组合受力分析；
6. 等强度梁实试验；
7. 压杆稳定实验；
8. 悬臂梁实验。

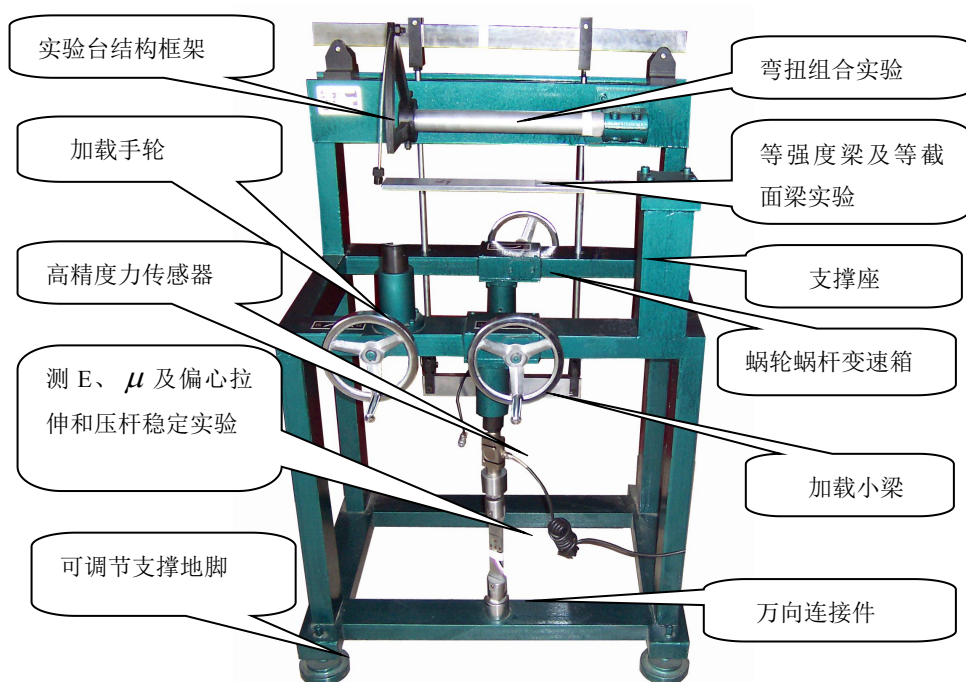


图 1-10 BDCL 型材料力学多功能试验台结构图

第二部分 实验仪器

一、千分表

千分表的用途很广，在材料力学实验中，常用它来测量位移。千分表的构造如图 2-1 所示，使用时将外壳上的孔环（或顶杆套）安装在千分表架上，将顶杆触头顶在物体上，借助弹簧的作用，便能接触紧密。当物体沿顶杆方向移动时，推动顶杆使杆上平齿带动小齿轮，小齿轮与它同轴的大齿轮一起转动最后使指针齿轮和指针旋转，经过一系列的传动和放大，便在表盘上示出位移的大小。

一般千分表触头移动 1mm 时，大指针旋转一圈，每圈有 100 个分格，每格便代表 1/100mm，故也称作百分表。一般量程为 5—10mm。还有更精密的，每格代表 1/1000mm。测量时，顶杆与物体接触好以后，可以用手旋转表盖使大指针对准“零”点。有的千分表则是旋转顶杆上端的螺帽，使指针对准“零”点。

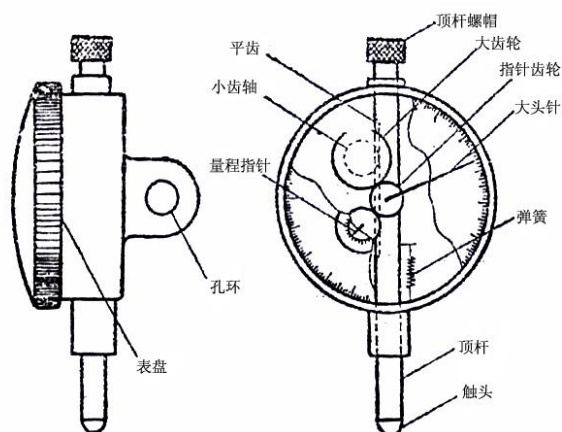


图 2-1 千分表构造图

使用千分表时的注意事项如下：

- （1）使用时应拿住外壳。不得随意推动顶杆，避免磨损精密机件，影响仪表精度。注意保护触头，触头上不得有伤痕。
- （2）安装时，要使顶杆与被测物体移动的方向一致。并注意被测位移的正反方向和大小，以便调节顶杆，而使千分表有适宜的测量范围。
- （3）千分表架要放置稳当，表架上各个螺旋要拧紧。

二、引伸仪

在材料力学实验中，试件的变形一般很小，必须用精度高、放大倍数大的仪器来测

量。用来测量微小线变形的仪器称为引伸仪。

引伸仪一般都由三个基本部分组成：

- (1) 感受变形部分—它是直接与试件表面接触，以感受试件变形的机构；
- (2) 传递和放大部分—它是把所感受到的变形加以放大的机构；
- (3) 指示部分—它是指示或记录放大后变形大小的机构。

引伸仪所感受到的总是试件上某一长度内所发生的平均线变形，这一长度称为引伸仪的标距。引伸仪有两种类型，分别是杠杆式（蝶式）引伸仪和电子式引伸计，下面分别介绍蝶式引伸仪和电子式引伸计的构造原理和使用方法。

（一）蝶式引伸仪

1. 结构及原理

(1) 感受变形部分：主要由一对上刀口和一对下刀口组成，并直接与试棒接触。上刀口可在标杆中上下移动。在选择位置上固定。下刀口可绕自身中点转动。上、下刀口的横向移动是通过套在导杆内的弹簧在导向套内移动来实现。上、下刀口的纵向距离就是试样的标距长度，横向距离就是试样的直径变化范围。上、下刀口均经淬硬处理，具有较高的硬度和耐磨性。

(2) 传递部分：把变形传递到量表是通过装在左、右主体内的两活动刀口来实现的，活动下刀口的一端是 60° 尖角。另一端镶有一顶尖，均经淬硬处理。活动下刀口分别被支承在旋入左、右主体的螺轴锥尖上，形成一等臂杠杆。两支承点的配合情况影响量表的灵敏度，而 1:1 的臂长比关系将直接影响量表的数值。引伸仪工作时，传递部分的任务是将试样标距范围内的变形量传递到配用的量表上，通过指针的转动直观反映出来。

(3) 指示部分：该型式的引伸仪配用的两只表（分度值为 0.01mm 的百分表或分度值为 0.001mm 的千分表）可按不同精度要求选用。量表测杆的端部镶硬质合金片，经研磨光洁度达 $\nabla 10$ 以上。百分表按 JJG34—71 检定规程，千分表按 JB1079—75 检定标准，检定合格。

如图 2-2 所示可以看出，当蝶式引伸仪上、下刀口紧卡在试件上时，在试件受力所产生的轴向位移使活动下刀口绕中点转动，由于杠杆比为 1:1，使量表反映出轴向位移数值来。从构造原理可知，蝶式引伸仪对应变测量的灵敏度是可变的、灵敏度随标距的增大而提高，但此时仪器的量程变小，因为量表的量程是一定的。

2. 使用方法

- (1) 根据使用 and 实际需要，决定标距值和选用量表。
- (2) 调整上刀口的位置，使上、下刀口间的距离等于标距值。

(3) 松开紧固螺钉（在右主体侧面上）调整量表位置。使下刀口底面与底板上定位螺钉接触，顶尖与量表测量平面接触。测拉伸变形时，量表起始位置应在指针正向行程 0.1~0.2mm 以上，然后固定好量表，转动量表罩圈在需要位置上。

注意：紧固量表时，要保证量表测杆能上下运动自如，不被卡住，如重复使用，则不需每次实验都要调整量表位置。

(4) 握住蝶式引伸仪压缩弹簧（在右主体后面，没有画出），使两刀口分开，夹持在试件上，如果夹紧力不够，可调整压缩弹簧上连接杆簧帽。

(5) 如增加上刀口夹紧力时，需在标杆上使用夹紧架，其位置应尽量靠近上刀口处。

夹紧力也可以通过夹紧架上连接杆簧帽调整。

(6) 试件在标距范围内的伸长量取两表数值的平均值进行计算。

(7) 转动表盘、使指针针对准零点。

3. 注意事项

(1) 蝶式引伸仪夹持试件时，不要使上、下刀口在试件上滑移，以免损坏刀口。

(2) 蝶式引伸仪使用完后，握住压缩弹簧使两刀口分开，把木块放在下刀口稍上位置，避免下刀口碰撞，刀口损坏。

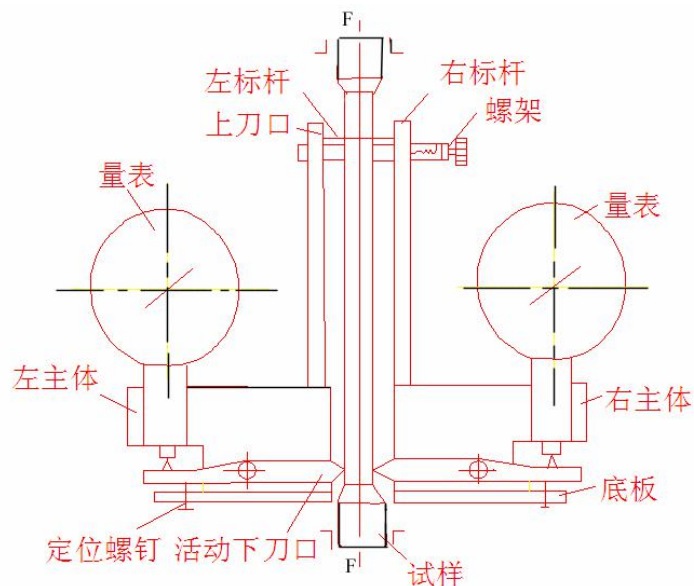


图 2-2 蝶式引伸仪

(二) 电子式引伸计

1. 结构及原理

电子式引伸计主要由带刀刃的变形传递杆、弹性元件、电阻应变计、标距调整机构及固定夹具组成，标距分为 50、25 等不同的规格。如图 2-3 所示是一种常见的夹式电子引伸计的结构原理（标距调整机构和固定夹具未画出）。引伸计的弹性元件上粘贴有 4 枚电阻应变片，这 4 枚电阻应变片组成全桥测量电路。测量时，引伸计的刀刃与试件接触，当刀刃间距随着试件的伸长而变化时，变形传递杆带动弹性元件发生弯曲变形，粘贴在弹性元件上的电阻应变计感受到应变，使测量电桥产生输出信号。输出信号的大小与试件的伸长量成正比。

2. 使用方法

- (1) 根据使用和实际需要，决定标距值。
- (2) 测量时，并且刀刃与试件垂直接触。
- (3) 测量时，引伸计的刀刃用固定夹具与试件夹紧，避免试件变形时刀刃在试件上滑移。

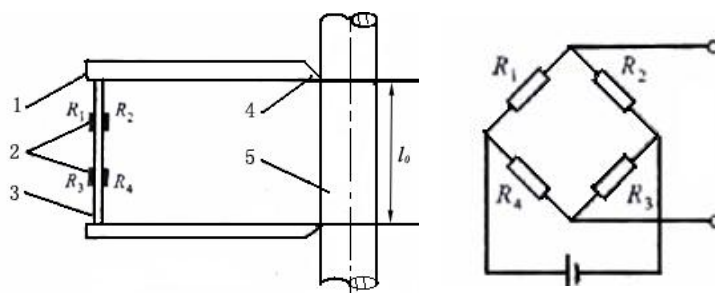


图 2-3 电子式引伸计

三、DH—3818 静态应变测试仪

电阻应变仪是电测法常用仪器。其工作原理是利用贴在构件上的电阻应变片随同构件一起变形而引起电阻值改变，再用应变指示器测量此改变量，得到所贴部位的应变。因此，电阻应变仪由电阻应变片和应变指示器两个部分构成。应变仪有多种类型，下面介绍 DH—3818 静态应变测试仪。

DH-3818 静态应变测量仪可自动、准确、可靠、快速测量大型结构、模型及材料应力试验中多点的静态应变（应力）值。广泛应用于机械制造、土木工程、桥梁建设、航空航天、国防工业、交通运输等领域。若配接适当的应变式传感器，也可对多点静态的力、压力、扭矩、位移、温度等物理量进行测量。其特点如下：

- （1）为学生实验室专门设计；
- （2）手控状态时,大屏数码管显示测量通道和输入应变变量,且可通过功能键设置显示通道、修正系数及平衡操作；
- （3）程控状态时,和笔记本电脑 RS-232 口进行数据通讯,最大程度上满足了对便携式仪器的要求,可方便地应用于野外测试；
- （4）自动平衡;内置 120Ω 标准电阻, $1/4$ 桥（公用补偿）、半桥、全桥连接方便。

（一）工作原理

1. 测量原理：以 $1/4$ 桥、 120Ω 桥臂电阻为例对测量原理加以说明。如图 2-4 所示：

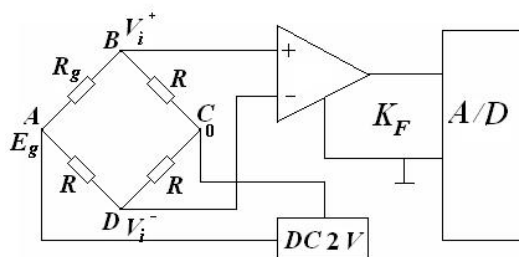


图 2-4 测量原理示意图

图中： R_g —测量片电阻；

R —固定电阻；

K_F —低漂移差动放大器增益。

因 $V_i = 0.25 E_g K \varepsilon$ ，

即 $V_0 = K_F V_i = 0.25 K_F E_g K \varepsilon$ ：

所以

$$\varepsilon = \frac{4V_0}{E_g K K_F} \quad (1)$$

式中: V_i —直流电桥的输出电压;

E_g —桥压(V);

K —应变计灵敏度系数;

ε —输入应变变量($\mu \varepsilon$);

V_o —低漂移仪表放大器的输出电压(μV);

K_F —放大器的增益;

当 $E_g=2.000V$ $K=2.00$ 时 $\varepsilon=V_o/K_F(\mu \varepsilon)$

对于半桥电路

$$\varepsilon = \frac{2V_o}{E_g K K_F} \quad (2)$$

对于全桥电路

$$\varepsilon = \frac{V_o}{E_g K K_F} \quad (3)$$

这样, 测量结果由软件加以修正即可。

2. 软件功能(程控状态): 本系统的控制软件可以工作于中文视窗 NT/2000/XP 操作系统下, 软件实现了文件管理、参数设置、平衡操作、采样控制、数据查询、打印控制等功能。

(1) 文件管理: 包括打开文件、数据备份、文件删除、数据格式转换等功能。

1) 打开文件: 选择存有试验数据的文件, 打开即可浏览所有采样数据。

2) 数据备份: 选择“文件”菜单下的“另存到”选项, 可将数据发送到软盘保存。

3) 删除文件: 当数据文件不再需要时, 为避免占用硬盘存储空间, 可将之永久删除。

4) 文本转换: 可将本数据文件格式转化为与 Word 兼容的文本格式, 为用户调用数据另作处理提供接口。

(2) 参数设置: 包括装入配置、平衡结果下传、设置工作测点、设置测点特性、电桥及试件参数设置、应变花设置。

1) 装入配置: 系统自动保留关机前采集箱设定参数, 但当所测参数和以前某一次试验参数相同时, 可调入该次实验数据文件中的设置参数, 以避免重复输入设置。

2) 平衡结果下传: 系统在进行平衡操作后自动保存平衡结果数据, 当发生突然断电或试验当天不能结束时, 可在下次开机后, 先查找机箱, 再进行平衡结果下传操作, 可自动恢复工作机箱状态, 保证试验继续进行。

3) 工作测点设置: 分别设置各采集箱的起始测点和结束测点, 并定义每个

采集箱应变测量和温度测量, 若采集箱配接热电偶, 选择温度测量, 输入热电偶的分度号和冷端温度, 则系统就可对多点温度进行准确测量。测量结果精度可自定义采样结果的小数点位数。

4) 测点特性设置: 当配接其它桥式传感器时, 可根据传感器的灵敏度对每个测点分别输入修正系数, 并设置被测物理量的单位, 描述设置可输入用户在实际测量中对每一测点的自定义, 供在测量中显示及打印输出。所有设置在紧缩模式下对整个机箱所有测

点有效，在展开模式下只对选择的测点有效。

5) 电桥及试件参数设置：输入应变计电阻、导线电阻、灵敏度系数、桥路方式，实现对测量结果的自动修正。输入被测试件材料的弹性模量和泊松比，供测量结果的修正及应力和应变花计算。(注：导线电阻的修正,请参阅长导线的修正公式计算误差,如认为此误差可忽略,则无需修正导线电阻;灵敏度系数的修正根据用户所使用的应变计灵敏度系数而定义。

6) 应变花设置：系统预设了两片直角应变花、三片 45° 直角应变花、60° 等边三角形应变花、伞形应变花、扇形应变花五种常用贴片方法以供选用。

(3) 采样控制：包括查找机箱、平衡操作、试采样、单次采样、定时采样、X-Y 函数记录仪。

1) 查找机箱：系统将自动查找已经进入系统的工作机箱，以自动设置系统的数据库范围。

2) 平衡操作：完成所有工作机箱或单台机箱的自动平衡，显示平衡结果数据，并在软件设计时，采用多种方式防止用户的误操作，以免丢失有用数据。

3) 试采样操作：每次采样只显示结果但不存盘，供试验开始前预调平衡时使用。

4) 单次采样：输入自定义的试验状态，控制系统采样，自动存盘，并显示当前采样数据。

5) 定时采样：设置采样时间间隔和采样次数，系统将根据要求自动采样。当设置的采样时间间隔小于本仪器采样速率指标时，系统将连续采样。

6) X-Y 函数记录仪：将任意两点的测量数据定义为 X 轴和 Y 轴，边采样边绘制其合成曲线，其它测点则按单点采样的方式直接存硬盘。

(3) 显示设置：包括显示方式设置、数据翻页、删除当前记录、显示采样信息等功能。

1) 显示方式：可设置成显示应变、应力、应变花、X-Y 函数记录仪，在数据查询时可根据采样状态或采样时间信息直接定位到某一次采样数据。双击显示测点列表中某测点，该测点在数据显示和打印时将自动隐藏，但不能改变硬盘内的原始数据。

2) 数据翻页：可选择显示前一次数据或后一次数据。

3) 删除当前记录：当某次采样数据无效时，可将其从文件中删除。

4) 采样信息：可显示机箱的平衡时间、试验第一次采样时间、最后一次采样时间、采样次数等信息。

(4) 其它功能：

当前有数据显示时，单击鼠标右键,屏上将出现测点编号和测点描述选择以及历史数据显示选择；

测点编号显示：显示的数据按机器定义的测点编号显示；

测点描述显示：显示的数据按所述用户自定义的测点描述显示；

历史数据显示：可分别显示某一测点平衡操作后，历次采样的数据或曲线。

(二) 数据采集箱的使用方法

1. 数据采集箱的面板功能：（面板图如图 2-5 所示，以实物为准，如有更改，恕不通知）

- A. 通道号显示数码管。
- B. 应变量及设置修正系数的显示数码管。
- C. 手动控制指示。
- D. 自动控制指示。
- E. 应变量指示, 当此灯亮表示 B 显示的是 A 所指示的通道号对应的应变量。
- F. 修正系数指示, 当此灯亮表示 B 显示的是 A 所指示的通道的修正系数。此时修正系数值的改变可通过数字键来设置。
- G. 数字键, 按此键, 则显示所按数值, 此键在修改通道号和修正系数时有效。
- H. 确认键, 按此键, 则确认通道号或修正系数, 确认通道号时, 当通道号数值大于 20 或等于 0 时, 则数码管闪烁, 通道号不能被确定, 此时可按退格键更改数值; 确认修正系数时, 按此键则将修正系数显示切换为应变量显示。
- I. 设置键, 按此键将应变量显示切换为修正系数显示, 此时按数字键更改修正系数。
- J. 平衡键, 按此键则平衡 A 所显示的通道, 此键在通道号和修正系数已确定时有效。
- K. 退格键, 按此键则闪烁的数码管显示值退后一位, 此键在修改通道号和修正系数时有效。
- M. 风扇。
- N. O.RS232 通讯接口, 其中 N 接口可通过一根通讯电缆与计算机的 RS232 通讯接口相连, O 接口可与下一台机的通讯或扩展接口相连, 如此结联, 一台计算机最多可控制十六台仪器。
- P. 接地端子。
- S. 保险丝座。
- R. 仪器电源开关。
- Q. 交流 220V 电源输入插座。

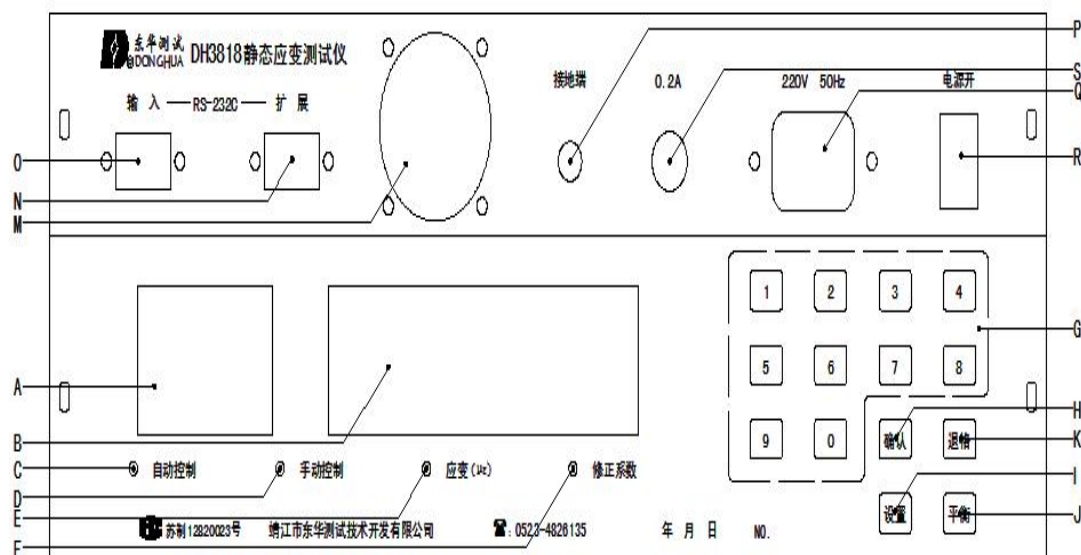


图 2-5 前面板示意图

2. 桥路的连接:

与应变计的连接如表 2-1、表 2-2 所示。表 2-1 为旧接线图, 表 2-2 为新接线图。

表 2-1 应变计的连接

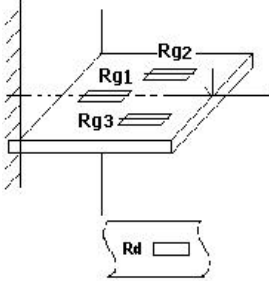
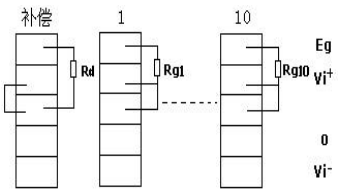
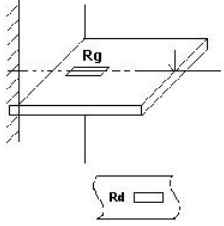
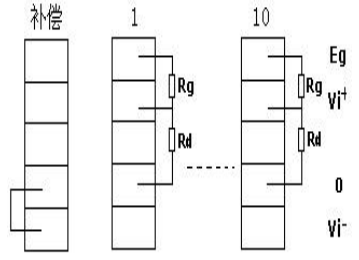
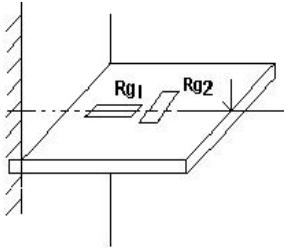
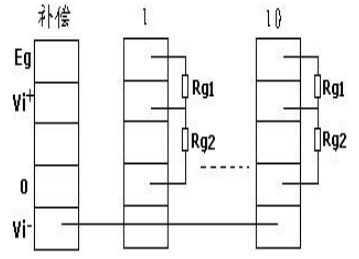
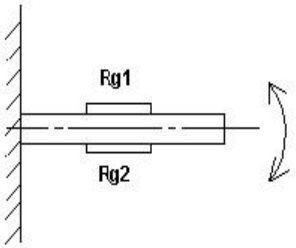
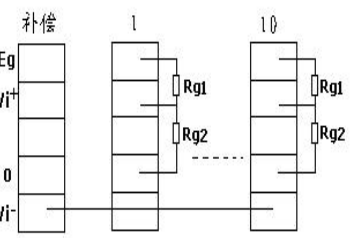
序号	用途	现场实例	与采集箱的连接	输入参数
方式一	1/4 桥(多通道共用补偿片) 适用于测量简单拉伸压缩或弯曲应变			灵敏度系数 导线电阻 应变计电阻
方式二	半桥(1片工作片, 1片补偿片) 适用于测量简单拉伸压缩或弯曲应变, 环境较恶劣			灵敏度系数 导线电阻 应变计电阻
方式三	半桥(2片工作片) 适用于测量简单拉伸压缩或弯曲应变, 环境温度变化较大			灵敏度系数 导线电阻 应变计电阻 泊松比
方式四	半桥(2片工作片) 适用于只测弯曲应变, 消除了拉伸和压缩应变			灵敏度系数 导线电阻 应变计电阻

表 2 -2 应变计的连接

序号	用途	现场实例	与采集箱的连接	输入参数
方式五	全桥(4 片工作片) 适用于只测拉伸压缩的应变			灵敏度系数 导线电阻 应变计电阻 泊松比
方式六	全桥(4 片工作片)适用于只测弯曲应变			灵敏度系数 导线电阻 应变计电阻

当使用新接线方式时，每个通道只能接一种桥路，不能同时接几种桥路（如 1/4 桥和全桥不能混接），而旧接线方式中，每个通道可同时接 1/4 桥和全桥或同时接半桥和全桥。新接线图接法比旧接线图简单，无须焊接短路线，修正及计算新旧接线方式相同。如应变计为自补偿（即三根线），接法如表三，桥路方式选“方式二”。可修正结果如下：

1) 灵敏度系数的修正

$$\varepsilon = \frac{2.00}{K_i} \varepsilon_i \quad (4)$$

式中： ε_i —测量应变变量；

ε —实际应变变量；

K_i —应变计灵敏度系数。

2) 长导线的修正

a. 将工作片用两根长导线接至 DH3818（1/4 桥公用补偿片）

$$\varepsilon = (1 + 2 \frac{R_l}{R}) \varepsilon_i \quad (5)$$

式中： ε_i —测量应变变量；

ε —实际应变变量；

R —应变计的阻值；

R_l —单根长导线的阻值。

b. 将工作片和补偿片的一端连接成公共线后再用三根引线至 DH3818（半桥连接，1/4 桥计算结果）

$$\varepsilon = (1 + \frac{R_l}{R}) \varepsilon_i \quad (6)$$

式中： ε_i —测量应变变量；

ε —实际应变变量；

R —应变计的阻值；

R_l —单根长导线的阻值。

c. 将工作片接成半桥电路，然后用三根长导线引至 DH3818

$$\varepsilon = (1 + \frac{R_l}{R}) \varepsilon_i \quad (7)$$

式中： ε_i —测量应变变量；

ε —实际应变变量；

R —应变计的阻值；

R_l —单根长导线的阻值。

d. 将应变计接成半桥或全桥电路，然后用四根长导线引至 DH3818

$$\varepsilon = (1 + 2 \frac{R_l}{R}) \varepsilon_i \quad (8)$$

式中： ε_i —测量应变变量；

ε —实际应变变量；

R —应变计的阻值；

R_l —单根长导线的阻值。

e. 将应变计接成全桥电路，然后用四根长导线引至 DH3818

$$\varepsilon = (1 + 2 \frac{R_l}{R}) \varepsilon_i \quad (9)$$

式中： ε_i —测量应变变量

ε —实际应变变量

R —应变计的阻值

R_l —单根长导线的阻值

3) 应变计阻值的修正

a. 全桥和半桥状态：桥路为卧式桥，测量结果和等臂桥相同；

b. 1/4 桥（公用补偿片）状态：桥路为立式桥，则：

$$\varepsilon = \frac{R/120 + 120/R + 2}{4} \varepsilon_i \quad (10)$$

式中： ε_i —测量应变变量；

ε —实际应变变量；

R —应变计的阻值。

应该说明，只有当 R 与 120Ω 相差较大时，才需修正，如当 $R=130\Omega$ 时，引起的误差为 0.16%。

4) 修正系数的设置：

$$\varepsilon = K \varepsilon_i \quad (11)$$

式中： ε_i —测置应变变量；

ε —实际应变变量；

K —所设置的修正系数。

3. 操作流程

(1) “自动控制”软件操作：

1) 软件安装：

将随机所附光盘放入光驱；双击“我的电脑”图标，指到光驱图标并双击打开光盘目录；打开要安装的文件目录 DH3818，双击“setup”图标；按屏幕提示安装至结束。打开 DH3818 测量系统控制软件时，系统自动由“手动控制”状态切换到“自动控制”，关闭控制软件，则自动切换到“手动控制”状态。

2) 软件操作(从开始菜单程序中点击 DH3818 测量系统)：

A. 查找机箱：选择合适的串行口 COM1 或 COM2；

B. 平衡操作：若不覆盖原文件，则必须要点击“更改---”，输入自定义文件名，单击“平衡”按钮；若需要显示平衡结果，请点击“显示平衡结果”可选框；若存在不平衡点，在“未平衡测点数”下拉式列表框中显示不平衡点，找出不平衡原因；

C. 参数设置：参数重新设置后，必须先平衡操作再采样，否则易出错或造成死机；

D. 采样操作

E. 显示结果

F. 数据处理

(2) “手动控制”操作：打开系统电源或关闭系统自动控制软件，则系统处于“手动控制”状态下，面板功能详见图 2-5。

4. 注意事项

(1) 所有 RS-232C 通讯电缆的连接必须在计算机和数据采集箱断电状态下进行。

(2) 在平衡操作过程中，当出现误操作，将有效数据文件覆盖，可用以下方法将其恢复：在数据文件的存放目录下，找到与其对应的 BAK 文件，将其更名为*.TST 即可。

(3) 有关软件中导线电阻的修正说明：

- 1) 方式一，导线电阻为两根导线之和。
- 2) 方式二、三、四，将应变计分别用两根导线接至数据采集箱，导线电阻为两根导线电阻之和。若将两组应变计的一端连接成公共线后再引线至数据采集箱，导线电阻为单根导线电阻。
- 3) 方式五、六，导线电阻为两根导线之和。
- (4) 所有连线必须牢固可靠，建议与端子连接用焊锡焊牢。
- (5) 接通电源，系统就可正常工作，若精确测量，请预热三十分钟。
- (6) 系统必须良好接地，接地点为电源插座的接地端。系统接地不好，将产生一定的漂移，稳定度也将受到影响。
- (7) 半桥连接时，交换+ E_g 和- E_g 的连接，可以改变输出信号的极性。全桥连接时，交换 V_i+ 和 V_i- 的连接，可以改变输出信号的极性。
- (8) 每通道各测点所有 R_g 、 R_d 及 R 的对外连接线均应尽量短，长度也应相等。

表 2-3 仪器常见故障原因和排除方法

序号	故障现象	故障原因	排除方法
1	未检测到数采箱	数采箱电源未打开	接通电源
2	系统不能正常工作	RS232-C 电缆未接,系统连接存在短路或断路及插头座之间或接触不良	重新全面认真检查系统,再连接一次。
3	自动平衡未成功,存在正或负超值不平衡现象	使用工作电阻应变计与补偿器电阻应变计,阻值误差超值;连接电阻应变计的长导线长度不等,引起测量和补偿之间的阻值超值。	用惠斯登电桥或数字万用表,分别检查电阻应变计及长导线电阻,如发现超值,则需要更换应变计或长导线。
4	测量结果不稳定,存在时好时坏现象	交流电源电压超过额定范围 应变计电阻接触不良 测试现场存在强的电磁场干扰源。	①用交流电压表检查供电电压,如不在额定范围,还需加接交流稳压源,②采用边采边查,分别用手轻压工作或补偿电阻应变计,轻轻拉动连接导线与采集箱的焊接点。如有影响,则重新牢接一次,③分别查找影响干扰源,如有强电磁场干扰源,则分别关闭后再采集,如干扰排除,则测试时间应避开强电磁场干扰, ④屏蔽线与仪器的 G 良好连接。
5	测量结果漂移偏大,存大测量值时大时小现象。	工作或补偿应变计绝缘程度偏低 $<500m\Omega$; 连接长导线受潮; 测试环境温差太大。	① 用低压高阻绝缘电表分别检查电阻应变计,连接长导线、绝缘电阻程度,如不达标,则需更换新的新的电阻应变计和导线。②用温、湿度计测定环境温度,如超差,则可采取局部恒温措施。

(9) 在中文视窗 NT/2000/XP 操作系统下,平衡开始前,必须先查找机箱,计算机自动进行设备检测,出现相应的提示框。

(10) 湿度较大的环境下使用本仪器,零漂将明显增加。

(11) 应避免将仪器置于强电场中使用。

(12) 输入、输出电缆线应尽量避免靠近电力线、变压器及其它干扰源。

(13) 切勿在过高温和湿度条件下使用和存放仪器,切勿将仪器直接在阳光下曝晒。

(14) 采集箱必须放置在合适的位置上使用,切勿将其倾斜或倒置使用。

(15) 仪器在进入定时采样前,应将 Win9X 中的屏幕保护程序去掉,即设置为“无”。同时应避免计算机进入睡眠状态和节电模式。

(三) 仪器维护及故障排除:

1. 仪器的维护:

(1) 本仪器是 II 组仪器,属于通用仪器,若在超过环境规定条件的现场使用,应注意避免酸、碱、盐、雾、雨淋及过强的幅射场、电场、磁场。

(2) 交流电源电压必须在 $220V \pm 10\%$, $50Hz \pm 2\%$ 内。

(3) 存放时,应将仪器盖好,防止灰尘污染,以减小接线柱及插座的接触电阻,若一旦污染,应根据污染性质选择适当的溶剂(如无水乙醇、乙醚、四醚化碳等),以白绸布蘸少许将污物擦净。

2. 仪器常见故障原因和排除方法(见表 2-3 所示)。

3. 一般来讲,仪器在设计和制造中已充分考虑能够提供用户多年的无故障运行,若出现影响其正常功能的故障时,请首先考虑其外部原因,如上所述。然而一旦出现元件的早期失效,就应切断电源,以防止故障进一步扩大而损坏仪器,若故障一时无法排除,请立即与公司取得联系,以免影响您的工作。

四、CML-1L-16 型数字静态应变仪

CML 型应变&力综合测试仪是在 CM-1J 型静态电阻应变仪和 CL-2 型测力仪的基础上,通过精心设计将两台仪器有机的结合到一起,在一台仪器完成两种仪器的工作,因此占实验室空间更小,使用更方便;同时,可选配 RS-232C 串行接口与配套测试软件,可方便的实现显示、存储、参数修正及生成测试报告的工作,组成一套静态应变测量虚拟仪器测试系统(如图 2-6 所示)。

该综合参数测试仪通过配接型材料力学实验台,适合各做电测法材力实验使用。该综合测试仪采用双 LED 显示,测力(称重)与普通应变测试同时并行工作且互不影响。测力部分通过对测量参数的正确设置,能适配绝大多数应变力(称重)传感器;应变测量部分采用现代应变测试中常用的预读数法自动桥路平衡的办法,增强学生对现代测试尤其是虚拟仪器测试的基本概念和使用方法的了解,测量迅速且准确。本仪器应变测量部分及测力部分的性能指标已达到国内现阶段同类仪器的最高水平,因此 CML 应变&力综合测试仪以其良好的性价比深受用户好评,并成为诸多力学实验室模拟应变仪升级换代的首先产品。

（一）性能特点

1. 全数字化智能设计，数字键与功能键配合使用，非常便于各种参数设置，操作简单。
2. 测量功能丰富，通过串口与计算机连接后配合相应软件组成虚拟仪器测试系统。
3. 组桥方式全面，可组 1/4 桥、半桥、全桥，适合多种力学实验。
4. 配接力传感器测量拉压力，传感器配接范围广。
5. 测点切换采用进口优质器件程控完成，减少因开关氧化引起的接触电阻变化对测试结果的影响。
6. 采用仪器上面板接线方式，接线简单方便；接线端子采用进口端子，接触可靠，不易磨损。

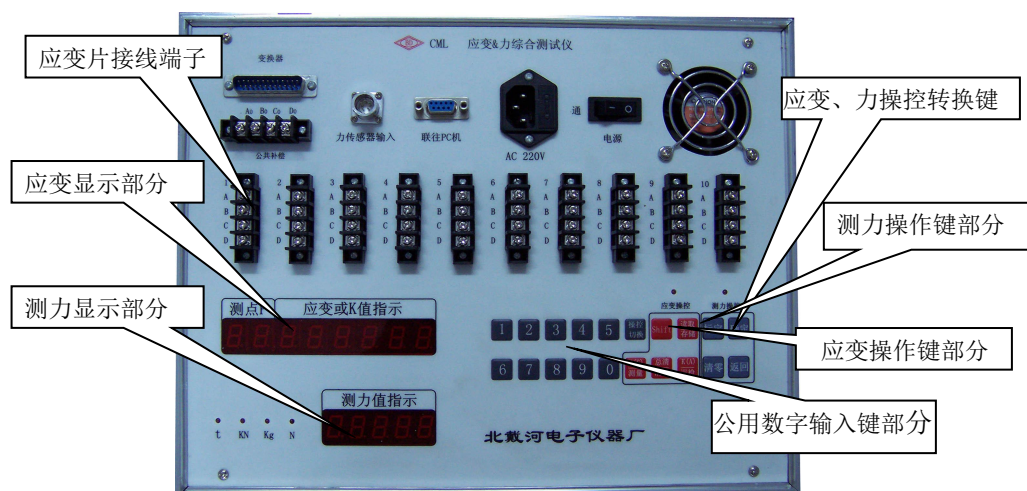


图 2-6 面板说明

本仪器通过“操控转换”键来进行应变、力的测量操作。

按下“操控转换”键，“应变操控”指示灯亮，可通过应变操作部分的 5 个功能键（即功能换挡键“SHIFT”、“读取/存储”键、“K (S)/测量”键、“总清/清零”键、“K (A)/巡检”键）配合 0-9 十个数字输入键进行应变测量的操作。

按下“操控转换”键，“测力操控”指示灯亮，可通过测力操作部分的 4 个功能键（即“标定”键、“确定”键、“清零”键、“返回”键）配合 0-9 十个数字输入键进行测力测量的操作。

（二）使用与维护

1. 应变测试部分的使用

本仪器的应变测试部分主要基于单片机技术的应用，全数字智能化设计，测量功能丰富，全部采用电子开关技术，避免了因机械开关和继电器氧化、老化后接触不良而造成的测量误差。可实现实验应力分析及静力强度研究中测量结构及材料任意点变形的应力分析，配用相应的传感器，可测力、压力、扭矩、位移等物理量，其主要特点是：测量点数多，操作简单，携带方便，数据可单点自动平衡和多点自动平衡，可方便的进行单臂、半桥或全桥测量，各测点 K 值或灵敏度可单独设定、连续可调并可永久保持。改善了人机对话接口功能，其键盘为矩阵式键盘，具有数字键及功能键。数字键可方便的

用于数据采集通道的快速切换及 K 值大小的设置，配合功能键实现读取存储值，主机自带存储体，掉电不丢失数据，可存储 10 点 99 级测量数据，数据可回放、传往计算机存储分析。

具体使用说明如下：

(1) 准备工作：

本仪器共 10 点，单臂时公用一个补偿。在确定采用哪种测量方法（单臂测量、半桥测量、全桥测量）后进行连线，具体要求是：

1) 单臂测量的联接：面板顶部左侧的“变换器（单臂）”插头插好；补偿接线端子的 AO 与 DO 之间连接补偿应变片，10 个点的 A、B 间接测量应变片。

2) 半桥测量的联接：面板顶部左侧的“变换器（半桥）”插头插好，10 个点的 A、B 间与 B、C 间接测量应变片。

3) 全桥测量的联接：面板顶部左侧的“变换器”插头拔下。10 个点的 A 点接桥路的电压正极，C 点接桥路电压的负极、B 点和 D 点接桥路输出的正极和负极。

(2) 按键功能及使用

数字键(0~9)的功能：数字键主要用于数据采集通道的切换及 K 值大小的设置。数字键配合功能键实现读取存储值。

功能键的功能：功能键共 5 键，即功能换挡键“SHIFT”、“读取/存储”键、“K (S) /测量”键、“总清/清零”键、“K (A) /巡检”键。

接通电源开机后，表头显示 9~0 进行自检，仪表完成自检进入工作状态，显示测点号及其初始应变值，进入测量界面。

表头显示分为测量界面、K 值修正界面及读取存储测量值界面。

有关键盘的详细操作介绍如下：

1) 切换测点：

用户可通过数字键输入 1 位数来实现测点切换。如由键盘输入 2，则表头显示切换为第 2 测点应变（注意：若输入 0 时仪器表头显示第 10 测点的应变）。

2) K 值修正：

当表头显示测量界面时，用户按“SHIFT”+“K (S) /测量”键组合键将表头显示切换为 K 值修正界面，查看 K 值或对 K 值进行修正，即：

首先在键盘按下功能换挡键（SHIFT），释键后再按下“K (S) /测量”键，表头显示当前测点应变片 K 值。在完成上述步骤后，可由数字键的输入对当前 K 值进行修改。

例：当前 K 值为 2.000，若操作者输入四位数如 1999，则表头 K 值指示修正为 1.999，完成对 K 值的设置并自动保存。

K 值设置完成后只需按下“K (S) /测量键”键，表头即可切换回测量界面显示应变值。（应变值与 K 值显示最显著的差别是应变值无小数点，K 值显示是 2.000 左右的数值）。

若设置完 K 值返回测量界面，只是对当前测点 K 值进行了修正，在设置完 K 值后，按“K (A) /巡检”键，则仪器所有测点的 K 值将被修改为与当前测点相同 K 值。按“K (S) /测量”键返回测量界面。

3) 总清/清零：

按“总清/清零”键，对表头当前的测点进行清零；若该键与“SHIFT”相组合实现

总清功能，即先按下“SHIFT”键，再按“总清/清零”键对各测点自动进行清零，然后返回原测点（即总清前测点位置）。

4) 巡检:

按一次“K(A)/巡检”键，对各测点自动循环测量一次，如果连接计算机可同时将显示的数据传往计算机。

5) 读取/存储功能:

按下一次“读取/存储”功能键实现存储功能，仪表自动完成一次巡检功能并将所采集应变值存储到内存单元，请用户记录级号（注：每测一次为一级）以备读取时对照（应变测试部分可存储 99 级数据）。

而其读取功能需要结合“SHIFT”键实现。例：欲读取内存单元第二级数据，步骤如下：

I：按下“SHIFT”键；

II：释放“SHIFT”键后按下“读取/存储”键；

III：由数字键输入欲读取的级号 02，即完成操作。

表头依次显示内存单元所存储相应测点应变。

在读取界面，功能键“读取/存储”、“K(A)/巡检”、“总清/清零”、“K(S)/测量”被锁住，如误操作按下上述四键后表头显示测点+六位横线提示，用户只需在输入 2 位数字键即可恢复正常显示。此时，输入 2 位数字键来查看所存储的该级某一测点应变。

在读取界面，表头显示记录值，若结束读取操作，按“K(S)/测量”键返回测量界面。

(3) 测量

连接接好后打开电源，8 位数码管发亮由 9 到 0 递减显示完成仪器自检进入工作状态，数字面板表左部 1-2 点显示测点位置，第 3 点显示正负号，第 4-8 点显示应变值或 K 值（仪器设置的应变片灵敏度系数）。预热 40 分钟~1 小时，检查每个测量点初始不平衡值，如是较小不平衡数值时，表示此点连接正确。出现大的不平衡数值或数字“E”时，应查明应变片或导线是否断、短路或其他异常情况，根据具体情况排除故障。经此检查正确后按“总清”组合键（SHIFT+清零）进行巡检清零。清零后给测件加载，加载完成后按“巡检”键，仪器以约每秒 2 点的速率进行测量，也可通过按数字键切换测点，从表头上读取数据。

2. 测力部分的使用方法

(1) 传感器与测力仪的连接

本仪器面板上部左侧装有一个 5 芯航空插头座，这是用于应变式拉压力传感器与本测试仪连接的。随机配件中附有一个 5 芯航空插头，应将之用电烙铁焊到传感器的输出线上。现市场上常见的应变式拉压力传感器（称重传感器）从受力结构上有多种，如柱式、S 型、悬臂梁、轮幅式及孔幅式等，一般力学实验室采用柱式或 S 型传感器；从接线上一般分为 4 线、6 线接法。

(2) 传感器与测力仪配合使用的标定设置

传感器与本仪器第一次配接时必须进行标定设置。一般应变力传感器的生产厂家在出厂合格证中，应提供以下两个指标，以供本测力仪的标定工作。

一是传感器满量程：如 1t、200KN、500kg、500N 等。一般用户购买传感器时应已按照自己实验的要求选择好，所以此处不用说明，只应注意在使用传感器的过程中不应使传感器过载，以免损坏传感器。同时在标定时注意满量程的单位，以便标定时输入。

二是传感器灵敏度（部分厂家将该指标定义为额定输出）：如 1.988mV/V。该指标指的是传感器在受到满量程载荷时的输出值。

在得到该传感器的上述指标后就可进行标定设置工作了。第一步设置传感器单位，按一下面板上的“标定”键，这时数字表左数第一位显示 L，右侧四位显示整数值，在此种状态下前面板上数字键 1-4 与单位指示灯 t、KN、Kg、N 顺序对应，根据传感器的单位按一下对应的数字键，面板上对应的单位指示灯点亮，按“确定”键，数字表左数第一位显示的 L 值消失，传感器单位设置完成。进入第二步设置传感器满量程，这时输入传感器的满量程值，如 300N，直接按数字键 3、0、0 即可，按“确定”键存入仪器芯片中，按“返回”键进入测量状态。第三步设置传感器的灵敏度，继续按“标定”键，这时数字表上显示带小数点的四位数，这时输入传感器灵敏度，如 1.988mV/V，直接按数字键 1、9、8、8 即可，按“确定”键存入仪器芯片中后，按“返回”键进入测量状态，全部标定设置工作完成。

（3）测量

后面板输入端插入力传感器，接通 220V 电源并将电源开关拨向“通”，5 位数字面板表数码管发亮由 99999 到 00000 递减显示完成仪器自检后进入工作状态，仪器预热半小时后，对表头显示传感器初始零点进行清除，方法是按“清零”键，表头显示值为 0，测量即可开始。对传感器施加拉压力，这时仪器表头显示值即为测量到的力值，拉力指示为正，压力指示为负。

3. 使用注意事项

（1）请用户在使用本仪器前要仔细阅读使用说明书，避免连线和操作错误，给测量带来困难。

（2）仪器应尽可能在 0℃～40℃ 的温度环境中使用，避免阳光强烈照射。

（3）避免在高温下使用，并尽量远离磁场源（电机，大变压器），使仪器少受干扰。

（4）要求测量片与温度补偿片的阻值尽量选用一致，所用的连接导线线径和长度相同，这样便于平衡。

（5）测量片与补偿片不受阳光曝晒、高温辐射的影响，补偿片应贴在与试件相同的材料上，与测量片保持同样的温度，应变片对地绝缘电阻应在 500MΩ 以上。

(四) 故障与检修 (见表 2-4 所示)

表 2-4

故 障	可 能 原 因	检 修 方 法
数字表头显示“E”，桥路不能平衡	输入连接线开路	正确连线
	桥路连接形式不正确	按说明书选对桥路形式
	应变片断、短路或阻值误差大于 2 欧姆，应变片对地短路	用万用表检查应变片电阻及对地电阻
零点漂移及数字跳动大	导线与接线端子接触不良	重新连接
	应变片绝缘电阻降低	用万用表检查应变片对地电阻
	导线与地绝缘电阻降低	用万用表检查导线对地电阻
	应变片粘贴工艺不好	重新粘贴
	空气流动大，温度变化快	采取措施尽量避免风吹日晒
测量值误差偏大	应变片灵敏度系数设置不对	重新设置 K 值

第三部分 应变电测技术基础

一、概述

电测法是一种非电量电测技术。它以电阻应变片为敏感元件，通过电阻应变仪测出构件表面测点的应变，然后借助胡克定律求出测点的应力。测量时，用专用粘结剂将电阻应变片（简称应变片或应变计）粘贴到被测构件表面，应变片因感受测点的应变而使自身的电阻改变，电阻应变仪（简称应变仪）将应变片的电阻变化转换成电信号并放大，然后显示出应变值，再由应力、应变关系换算成应力值，达到对构件进行实验应力分析的目的。

电测法在工程中广泛使用，是实验应力分析中的重要方法之一。电测法具有许多优点。

（1）灵敏度高：能测量小到 $1\mu\varepsilon$ 的微小应变（ $1\mu\varepsilon=1\times10^{-6}$ ）。

（2）适应性强：可测应变范围为 $1\sim2.2\times10^{-5}\mu\varepsilon$ ，可测应变频率为 $0\sim200\text{kHz}$ ，能在接近绝对零度的极低温直到高于 900°C 的高温环境下工作，能在水中和核辐射环境下测量，能在转速为 $10\,000\text{ r/min}$ 的运动构件上取得信号，还可以进行远距离遥测。

（3）传感元件小：电测法以电阻应变片为传感元件。它的尺寸可以很小，最小标距可达 0.2mm ，可粘贴到构件的很小部位上以测取局部应变。利用由电阻应变片组成的应变花，可以测量构件一点处的应变状态。应变片的质量很小，其惯性影响甚微，故能适应高速转动等动态测量。

（4）精度高：在实验室常温条件下静态测量，误差可控制在 1% 以内；现场条件下的静态测量，误差为 $1\%\sim3\%$ ；动态测量误差在 $3\%\sim5\%$ 范围内。

（5）自动化程度高：可配以先进的测试仪器和数据处理系统，不仅使测试效率大为提高，也使测量误差不断降低；目前已有 100 点/秒的静态应变仪和对动态应变信号进行自动分析处理的系统。

（6）可测多种力学量：现已有裂纹扩展片（测量裂纹的扩展）、测温片、残余应力片等。采用应变片作敏感元件制成的应变式传感器，可测力、压强、扭矩、位移、转角、速度和加速度等多种力学量。

同时电测法也有局限性，它只能测量构件表面有限点的应变，当测点较多时，准备工作量非常大。所测应变是应变片敏感栅投影面积下构件应变的平均值，对于应力集中和应变梯度很大的部位，会引起较大的误差。

应变电测法所具有的独特优点，使该方法成为动态应变测量的最有效的方法，也是高温、液下和旋转、运动构件应变测量所常用的方法。现在，应变电测法在工业、农业、国防、科学研究、工程监测、航空、航天、医学、体育及日常生活中都得到了广泛的应用。

二、电阻应变计

（一）电阻应变计简介

我们把能将工程构件上的应变，即尺寸变化转换为电阻变化的变换器（又称电阻应变片），简称为应变计。一般由敏感栅、引线、粘结剂、基底和盖层组成。

电阻应变计出现于第二次世界大战，它的应用范围十分广泛，适用的结构包括航空、航天器，原子能反应堆、桥梁、道路、大坝以及各种机械设备、建筑物等；适用的材料包括钢铁、铝、木材、塑料、玻璃、土石、复合材料等各种金属及非金属材料。它不仅是实验应力分析、测试计量技术、自动检测与控制技术以及应变式传感器的关键元件，还广泛应用于各种机械和工程结构强度及寿命的诊断与评估和多种物理量的检测和计量，这些特点是任何一种传感元件或传感器所不能比拟的。另外，它在对结构和设备的安全监测方面也有广泛的应用前景，对实现生产过程和科学实验过程的测量与控制，具有重要的意义。

（二）电阻应变计术语及应变计材料简介

1. 电阻应变计的主要结构及各部分名称如图 3-1 所示

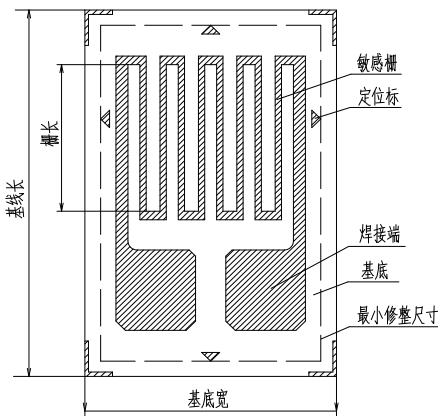


图 3-1 应变计结构和尺寸术语

2. 电阻应变计材料

（1）敏感栅材料

电阻应变计的敏感栅是用合金材料制成的。敏感栅在应变计中实现应变电阻转换，是决定应变计工作特性的主要部分。

主要使用的有康铜箔材、卡玛箔材，此外还有退火康铜箔材（见表 3-1）

（2）基底材料

1)纸

制造电阻应变计的纸，一般为厚度小于 0.06mm 的棉纸、拷贝纸、卷烟纸或脱脂的电容器用纸等。

2)胶膜

目前，普遍用于制造应变计的胶膜是用不同成分的有机树脂制成的。它们的厚度约为 0.02~0.04mm。本公司常用的胶膜材料有改性酚醛树脂、聚酰亚胺树脂、环氧树脂、环氧酚醛树脂等。它们既可用于基底材料，又可用于粘结剂材料。如果在有机树脂中加入玻璃纤维或其它纤维材料，则可增加胶膜的弹性模量和机械强度、减小蠕变、提高疲劳寿命、增大测量应变范围、提高材料耐温范围。

3)浸胶玻璃纤维

玻璃纤维是一种耐湿、耐热和电绝缘性好、机械强度高且质地柔软的材料。浸胶玻璃纤维是采用厚度不大于 0.025mm 的无碱玻璃纤维，将粘结剂均匀涂刷在它上面固化而成的，其厚度约为 0.04~0.05mm。这种基底材料适用于制造低温、中温、高温应变计。

表 3-1 不同材料的特点及用途

名称	主要成份	特点及用途
康铜	铜，镍	综合性能优良，成本低廉，能做成温度自补偿型，使用最广，但不能在较高温度下工作。
退火康铜	铜，镍	柔性，延伸率高，变形量可达 20%，不具备温度自补偿能力，疲劳寿命较差，用于大应变测量。
卡玛	镍，铬 铝，铁	稳定性好，电阻率、灵敏系数和疲劳寿命较高，能做成镍、铬、温度自补偿型或弹性膜量自补偿型。热输出曲线比康铜铝、铁平直，温度自补偿效果好，能在-269-+290℃：范围内进行静态测量，短期高温可至 400℃。

(三) 电阻应变计的选择方法

在实际应用中，应遵循试验或应用条件（即应用精度、温度、湿度、环境恶劣状况、各类干扰等环境条件。共模共地问题、试件材料 大小尺寸、粘贴面积、曲率半径、安装条件等）为先，试件或弹性体材料状况（材料线膨胀系数、弹性模量、结构、大概受力状况或应力分布状况等）次之的原则，利用上述内容来选用与之匹配的应变计。

1. 选择电阻应变计的步骤

- (1) 首先根据应用精度、环境条件选择应变计系列。
- (2) 根据试件材料大小尺寸、粘贴面积、曲率半径、安装条件、应变梯度选择敏感栅栅长。
- (3) 根据应变梯度、应力种类、散热条件、安装空间、应变计电阻等选择敏感栅结构。
- (4) 根据使用条件、功耗大小、最大允许电压等选择标称电阻。
- (5) 根据试件材料类型、工作温度范围、应用精度选择温度自补偿系数或弹性模量自补偿系数。
- (6) 根据弹性体的固有蠕变特性、实际测试的精度、工艺方法、防护胶种类、密封形式等选择蠕变补偿代号。

(7) 根据实际需要选择应变计的引线连接方式。

2. 常用电阻应变计参数选择时考虑的内容

进行应变测量必须根据实际情况选择应变计。表 3-2 中列出了选择应变计参数应考虑的内容，仅适用于常规情况，不包括核辐射、强磁场、高离心力等特殊场合。

表 3-2 选择应变计参数应考虑的内容

选择步骤	选择参数	考虑内容
1	栅长	1.应变梯度 2.最大应变面积 3.所需精度 4.静态应变稳定性 5.最大应变值 6.交替安装循环次数 7.散热 8.安装方便
2	敏感栅的结构形状	1.应变梯度 2.应力维数 3.散热条件 4.安装空间 5.有否合适的应变计电阻 6.蠕变
3	应变计系列	1.应变测量类型(静态、动态、野外等) 2.工作温度 3.测试周期 4.应变循环次数 5.所需精度 6.安装方便
4	应变计电阻	1.散热 2.导线电阻的影响 3.信噪比
5	温度自补偿系数或弹性模量自补偿代号	1.试件材料 2.工作温度范围 3.所需精度
6	蠕变补偿代号	1.弹性体固有蠕变 2.防护胶 3.密封形式 4.工艺方法 5.所需精度

(四) 电阻应变计的粘结技术及防护

在电阻应变计的各种安装方法中，粘贴法应用最多。应变计粘贴质量的好坏，是决定应变测试成功与否的关键因素之一。因此，粘贴时必须严格按照粘贴的工艺流程进行操作。

1. 电阻应变计粘贴和防护的工艺流程：

(1)应变计选择—(2)胶粘剂选择—(3)构件打磨—(4)幻表面清洗—(5)画线定位—(6)应变计清洗—(7)涂敷底胶—(8)应变计粘贴—(9)加温固化—(10)贴片质量检查—(11)引线连接—(12)质量检查—(13)常温及温度性能补偿—(14)质量检查—(15)性能测试—(16)防护处理。

2. 电阻应变计粘贴的工艺方法

使用不同粘结剂粘贴应变计的工艺是有差异的，这里我们只对其中一些共同性的内容加以介绍。

(1)应变计的准备

应变计的准备是指应变计的选择、应变计检查和应变计表面处理。应变计的选择我们在前面已经做了专门介绍，这里仅介绍其它两方面的内容。

1)应变计检查包括外观检查和阻值检查

外观检查主要查看基底和盖层有否破损，敏感栅有否锈斑，引线有无折断的危险，敏感栅排列是否整齐，有无短路、缺口、断栅、划伤和变形，基底是否有气泡、皱折、

坑点存在。测量电阻应该精确到 $0.1\ \Omega$ 。

2)应变计表面处理

应变计在使用前，要用脱脂棉浸无水乙醇擦洗，注意两面都要清洗，对没有盖层的应变计，要顺着敏感栅的方向轻轻擦洗，洗净后用红外线灯或其它烘干装置烘干备用。

(2)粘贴表面的处理

为了使应变计粘贴牢固，需要对粘贴表面进行机械、化学处理，处理范围约为应变计面积的 3-5 倍。

首先除去油污、锈斑、氧化膜、镀层、涂料等，根据试件材料选用粒度为 220-400 目的砂纸进行打磨，并打出与贴片方向呈 45° 角的交叉条纹，然后用浸有丁酮或丙酮的脱脂棉清洗打磨部位，并用无水乙醇清洗至棉球上不见任何污渍为止。注意，擦洗时要沿单一方向进行，不要来回交替擦拭。清洗干净的表面要避免再次污染（如用嘴吹气）及手触摸，待溶剂挥发表面完全干燥后立刻贴片。

为保证应变计粘贴位置的准确，可用无油圆珠笔芯或划针在贴片部位轻轻划出定位线。划线时，线不能划到应变计贴片部位下面，避免对应变计产生损伤。经过划线的试件表面需用丙酮、无水乙醇、丁酮、三氯乙烷、异丙醇等溶剂对贴片试件表面单项清洗，并及时擦干或烘烤干，避免表面有油污残留或溶剂残留，对贴片质量产生致命性影响；贴片时，尽量保证应变计的位置准确，刷胶均匀，胶量控制适量等；然后盖上聚四氟乙烯薄膜，用手指均匀挤压应变计，排除多余胶液和气泡，同时，轻轻拨动应变计，调整应变计位置，使其定位准确，真实反映测量点的应变。

(3)底胶处理

许多粘结剂要求涂底胶，并经适当的热固化处理。底胶面积约为 应变计面积的 1.5 倍。底胶一般采用与贴片胶相同的粘结剂，厚度应控制在 $0.01-0.03\text{mm}$ 并按相应的固化参数进行充分固化。

在满足粘合和绝缘强度的前提下，粘结层（包括底胶）越薄越好，因为这样可以保持较强的传递应变能力，减少胶层的不匀性，降低蠕变和灵敏系数分散。有些粘结剂不需要涂刷底胶，如 H-610、H-611 等，这些粘结剂结力强，绝缘强度高，蠕变小，特别适合制造传感器和进行精密应力分析。

(4)应变计粘贴

应变计粘贴是整个贴片过程中最关键的步骤，对测试精度有绝对影响。粘贴前，对所需的工具、量具（如镊子、刀片、玻璃板）用丙酮清洗干净，戴上洁净的细纱手套，用化妆笔在试件表面贴片部位和应变计基底上分；刷粘结剂，稍稍晾干，待胶液略有发粘时，将应变计的中心线对准试件的定位线准确的贴上，盖上一层聚四氟乙烯膜，沿应变计轴线方向用手指滚压 $1-2\text{mm}$ ，排净气泡并挤出多余胶液，按所用粘结剂的要求自然干燥适当时间后揭掉聚四氟乙烯薄膜注意，带有引线的应变计要从无引线的-端开始揭起，用力方向尽量与粘贴表面平行将应变计带起。

粘贴完毕后，要对应变计进行认真检查，发现基底有损坏，敏感栅有变形、断路、短路，贴片位置不正确，有气泡，局部没贴上，绝缘强度不够等问题，应及时排除，或铲除重贴。

(5)固化

目前国内外常用的粘结剂大多数都需要加热固化。温度、时间和压力是固化的三要

素，这三者都应严格按粘结剂的相应固化工艺规范加以保证。

应变计的加压一般是在其上依次铺垫聚四氟乙烯薄膜、硅橡胶板，再用夹具或压块加压，对复杂型面，可用专门夹具加压，砂袋、捆扎加压也常常被采用。

为有效地消除内应力，一般在卸压后将温度升到高出加压固化温度 30℃ 左右，保温 1-2mm 进行稳定化处理，具体的贴片固化参数可参考相应的贴片胶介绍，如 H-610，贴片工艺为：初固化，加压 0.1-0.3MPa 升温至 135℃，保温 2 小时，然后降温到室温卸压，再升温至 165℃，保温 2 小时，后降到室温即可。

（6）粘贴质量检查

加温固化后，对应变计的粘贴质量要作认真检查，检查项目有：

- 1) 应变计粘贴前后阻值的变化；
- 2) 绝缘电阻；
- 3) 片内是否有残余的气泡；
- 4) 贴片位置准确与否；
- 5) 有否断路、短路或敏感栅变形。

（五）焊接

如果在应变计表面焊接，焊接前，应用水砂纸或含砂橡皮轻轻擦除焊端表面残留胶液和氧化物，并清洗干净，方便焊接，避免破坏焊端；焊接温度不能太高（常温应变计不能超过 250℃，焊接时间不能太长，应迅速焊接，避免高温对应变计焊端产生损伤，降低绝缘强度等。焊接引线应采用柔软、材质不能太硬的线材，以免长时间受力时，线材损坏或脱落；尽量在应变计焊端和接线端子之间的连接线上留出应力释放环，避免试件或弹性体长期受力或温度发生较大范围变化时，在连接线上形成内应力集中，造成引线拉断，使桥路或电路断路。焊接后，助焊剂应清洗干净，不能有残留，以免对应变计的绝缘强度和阻值产生影响。完毕后，应对其绝缘强度再次进行测量。

（六）防护处理

对已安装好的应变计采取可靠实用的防护措施，是保证应变计正常工作，提高测试精度的有效途径。应变计防护的根本途径，是利用一定的材料或介质将应变计连同其附件与恶劣环境隔开，所以首先在应变计安装和使用过程中、谨慎、细心地操作，保持不用手直接接触就是一种有效的防护措施；其次就是利用涂敷保护层来进行防护，应变计的防护一般可选用人 AZ-710 胶，对裸露部分进行防护，要求涂刷均匀，然后再覆盖 G-004、G-704 等硅橡胶即可。

（七）电阻应变计使用中容易出现的问题和对策

1. 贴片后阻值异常

一般情况下，应变计贴片后其阻值会有微小变化或不变，但往往有用户反映应变计阻值发生很大变化，造成这一问题的因素有以下几点：

(1) 加压固化时加压力过大，造成贴片后阻值异常，可适当降低加压力，推荐用户加压力范围为 0.15Mpa—0.3GMPa。

(2) 加压时加压力不均匀，造成应变计敏感栅变形而阻值异常，这一问题主要是加压夹具不规范，使应变计受力不均匀所致。

(3)工装设计的曲率半径与构件不吻合，造成应变计变形或鼓包而阻值异常。

(4)使用一段时间后，阻值发生异常。这一问题主要有应变计本身有气泡、个别虚空或焊接时有不可靠因素存在等。

2. 贴片后的表面缺陷

从前述的内容中可以看出贴片的主要缺陷有虚空、鼓包、胶层不均匀、胶层过厚、胶棱、压坑、变形等，其中鼓包、压坑只要不在敏感栅受力部位，均可以使用。针对这些缺陷，一定要在贴片后进行外观检查，剔出有缺陷的，保证贴片质量。同时应对阻值、绝缘电阻进行检查，以免后道工序的浪费。

三、电阻应变计工作原理

电阻应变计是一种用途广泛的高精度力学量传感元件，其基本任务就是把构件表面的变形量转变为电信号，输入相关的仪器仪表进行分析。在自然界中，除超导体外的所有物体都有电阻，不同的物体电阻也不同。物体电阻的大小与物体的材料性能和几何形状有关，电阻应变计正是利用了导体电阻的这一特点。

有物理学可知，金属丝的电阻值与其材料的性质有关外，还与金属丝的长度、横截面面积有关。若金属丝变形而使其长度和横截面面积发生变化，其电阻值亦将相应地发生变化。将金属丝粘贴在构件上，当构件受力变形时，金属丝也随构件一起变形而发生电阻变化。因此，可用测量金属丝的电阻改变量的方法测定构件所产生的应变值。

电阻应变计的最主要组成部分是敏感栅。敏感栅可以看成为一根电阻丝，其材料性能和几何形状的改变会引起栅丝的阻值变化。

假设一种金属电阻丝，其材料的电阻率为 ρ ，原始长度为 L 。不失一般性，假设其横截面是直径为 D 的圆形，面积为 A ，初始时该电阻丝的电阻值为 R

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

在外力作用下，电阻丝会产生变形。假设电阻丝沿轴向伸长，其横向尺寸相应缩小，导致横截面面积发生变化。电阻丝的横截面原面积为 $A = \frac{\pi D^2}{4}$ ，其相对变化为

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D} = -2\mu \frac{dL}{L} \quad (2)$$

其中， μ 为金属丝材料的泊松比； dL/L 为金属导线长度的相对变化，可用应变表示，即

$$\varepsilon = \frac{dL}{L} \quad (3)$$

在电阻丝伸长的过程中，所产生的电阻值的相对变化为

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)\varepsilon \quad (4)$$

此式中，前一项是由金属丝变形后电阻率发生变化所引起的；后一项是由金属丝变形后几何尺寸发生变化所引起的。在常温下，许多金属材料在一定的应变范围内，电阻丝的相对电阻变化与丝的轴向长度的相对变化成正比，即

$$\frac{dR}{R} = K_s \varepsilon \quad (5)$$

式中， K_s 为单根金属丝的灵敏系数，其物理意义是单位应变的电阻变化率，标志着该类丝材电阻应变效应显著与否。它等于

$$K_s = \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu) \quad (6)$$

由式(5)可知，金属丝在产生应变效应时，应变 ε 与电阻变化率 $\frac{dR}{R}$ 成线性关系，这就是利用金属应变片来测量构件应变的理论基础。 ε 为量纲一的量，但习惯上仍给以单位，这个单位称为微应变，在应变测量中常用符号 $\mu\varepsilon$ 表示($1\mu\varepsilon = 1 \times 10^{-6}$)。从式(5)中可看出，为了能精确地测读出 ε ，希望 dR 尽可能地大，这就要求 R 尽可能大，亦即要求金属丝尽可能地长。此外，在进行应变测量时，需对金属丝加一定的电压，为防止电流过大，产生发热乃至熔断，也要求金属丝较细长，已获得较大的电阻值 R 。但从测量构件应变的角度来看，却又希望金属丝的长度尽可能地小，以便较准确地反映一点的应力情况。解决这一矛盾的措施，就是将金属丝做成丝式和箔式形状，称为电阻应变片。如图3-2所示。

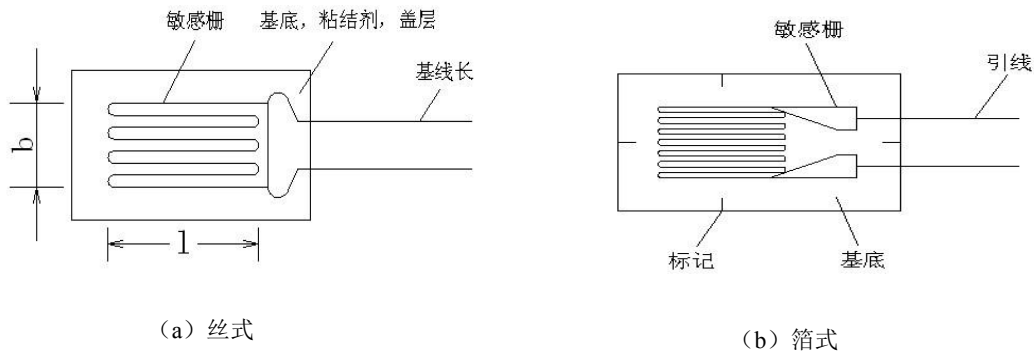


图 3-2 金属丝电阻应变片

固定在构件上的应变片，其敏感栅的电阻变化不仅与敏感栅轴线方向的应变有关，而且也与敏感栅弯头圆弧方向的应变有关，因此应变片的灵敏系数与金属丝在拉伸（或缩短）状态下所得灵敏系数不同，它与被测构件应变状态有关。因此，应变片的灵敏系数 K 定义为：当将应变片安装在处于单向应力状态的试样表面，使其轴线（敏感栅纵向

中心线)与应力方向一致时,应变片电阻值的相对变化与其轴向应变之比值,即

$$K = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon_x} \text{ 或 } \Delta R/R = K\varepsilon_x$$

式中: R —应变片变形前的电阻值;

ε_x —试件表面沿应变片轴线(又称灵敏轴线)的应变;

ΔR —应变片电阻值的改变量。

应变片的灵敏系数一般由制造厂抽样实验测定。电阻应变片有多种形式,常用的有丝式(图 3-2a)和箔式(图 3-2b)。它是由 $\phi = 0.02 \sim 0.05 \text{ mm}$ 的康铜丝或镍铬丝绕成栅状(或用很薄的金属箔腐蚀成栅状)夹在两层绝缘薄片(基底)制成,用镀锡铜线与应变片丝栅连接作为应变片引线,用来连接测量导线。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。

一般丝式应变片多用于纸基,价格低、粘贴容易,但耐久性、耐湿性较差,横向效应大,在要求不高时使用;箔式应变片多用于胶基,可用于 150°C 以下的中温和常温测试,它绝缘性能好,参数分散性小,精度高,在应变测量中应用最广泛。

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力和主方向。

应变片主要参数:

基长:应变敏感栅的轴向长度。

原始电阻值: 60Ω 、 120Ω 、 350Ω 、 600Ω 、 1000Ω ,其中以 120Ω 为常用。

绝缘电阻:指敏感栅和基底的电阻值,一般在 $500\text{M}\Omega$ 以上。

四、应变测量电路原理及电测技术

应变仪测量电路的作用,就是把电阻片的电阻变化率 $\Delta R/R$ 转换成电压输出,然后提供给放大电路放大后进行测量。

1. 电桥原理(见图 3-3 所示)

测量电路有多种,最常用的是桥式测量电路。 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 四个电阻依次接在 A、B、C、D(或 1、2、3、4)之间,构成电桥的四桥臂。电桥的对角 AC 接电源,电源电压为 E;对角 BD 为电桥的输出端,其输出电压用 U_{DB} 表示。可以证明 U_{DB} 与桥臂电阻有如下关系:

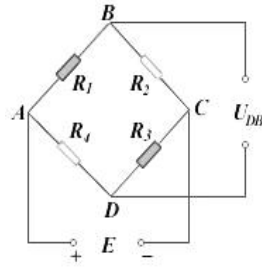


图 3-3 电桥原理

$$U_{DB} = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (7)$$

若 4 个桥臂电阻由贴在构件上的 4 枚电阻片组成，而且初始电阻 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ，当输出电压 $U_{DB} = 0$ 时，电桥处于平衡状态。构件变形时，各电阻的变化量分别为 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 、 ΔR_4 。输出电压的相应变化为：

$$U_{DB} + \Delta U_{DB} = E \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + R_2 + \Delta R_1 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + R_4 + \Delta R_3 + \Delta R_4} \right) \quad (8)$$

在小应变 $\frac{\Delta R}{R} \gg 1$ 的条件下，可以证明桥路输出电压为：

$$\Delta U_{DB} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (9)$$

如果 ΔR 仅由机械变形引起、与温度影响无关，而且 4 枚电阻片的灵敏系数 K_s 相等时，根据 $\frac{\Delta R}{R} = K_s \frac{\Delta l}{l}$ ，可以写成：

$$\Delta U_{DB} = \frac{E}{4} K_s (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (10)$$

如果供桥电压 E 不变，那么构件变形引起的电压输出 ΔU_{DB} 与 4 个桥臂的应变值 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 、 ε_4 成线性关系。式中各 ε 是代数值，其符号由变形方向决定。一般拉应变为“正”、压应变为“负”。根据这一特性：

相邻两桥臂的 ε （ ε_1 、 ε_3 或 ε_2 、 ε_4 ）符号一致时，两应变相抵消；如符号相反，则两应变的绝对值相加。

相对两桥臂的 ε （ ε_1 、 ε_2 或 ε_3 、 ε_4 ）符号一致时，两应变的绝对值相加；如符号相反，则两应变相抵消。

实验如果能很好地利用电桥的这一特性，合理布片、灵活组桥，将直接影响电桥输出电压的大小，从而有效地提高测量灵敏度、并减少测量误差。这种作用称做桥路的加减特性。电阻应变仪是测量应变的专用仪器，桥路输出电压 ΔU_{DB} 的大小，是按应变直接标定来显示的。因此与 ΔU_{DB} 对应的应变值 ε 可由应变仪直接读出来。

2. 组桥方式(见表 3-3)

一般贴在构件上参与机械变形的电阻片称做工作片，在不考虑温度影响的前提下，

应变片接入各桥臂的组桥方式不同、与工作片相应的输出电压也不同。几种典型的组桥方式如下：

①单臂测量。只有一枚工作片 R_1 接在 AB 桥臂上。其它 3 个桥臂的电阻片都不参与变形应变 ε 为零。这时电桥的输出电压为：

$$\Delta U_{DB} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right) = \frac{E}{4} K_s (\varepsilon_1)$$

单臂测量的结果 ΔU_{DB} 代表被测点的真实工作应变。

②半桥测量。两枚工作片 R_1 、 R_2 分别接在相邻两个桥臂 AB、BC 上。其它两个桥臂是应变仪的内接电阻。这时电桥的输出电压为：

$$\Delta U_{DB} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) = \frac{E}{4} K_s (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$$

③对臂测量。两枚工作片 R_1 、 R_3 分别接在对臂 AB、CD 上。温度补偿片 R_2 、 R_4 分别接在其它两对臂 BC、AD 上。这时：

$$\Delta U_{DB} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) = \frac{E}{4} K_s (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)$$

④全桥测量。4 枚工作片 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 依次接在电桥的 4 个桥臂上。这时：

$$\Delta U_{DB} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{E}{4} K_s (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

⑤单臂串联测量。两枚串联的工作片 $2R$ 接 AB 臂。而两枚串联的温度补偿片 $2R$ 接 BC 臂。其他两个桥臂接仪器的内接电阻这时：

$$\Delta U_{DB} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right)$$

工作片串联后 $R_1 = 2R$ ，同样 $\Delta R_1 = 2 \Delta R$ ，因此 ΔU_{DB} 的测量结果不变，与两枚阻片电阻变化率的平均值成正比。

3. 温度的影响与补偿

在测量时，被测构件和所粘贴的应变计的工作环境是具有一定温度的。当温度发生变化时，应变计将产生热输出 ε_t ，其大小由 $\varepsilon_t = \frac{1}{K} \left(\frac{\Delta R_t}{R} \right)$ 确定。显然，热输出 ε_t 中是不包含结构因受载而产生的应变，即使结构处在不承载且无约束状态， ε_t 仍然存在。因此，当结构承受温度引起的应变 ε_t 的大小可以与构件的实际应变相当，例如，当采用镍

铬丝的电阻应变计粘贴在钢构件上进行应变测量时，如果温度升高 1°C ， ε_t 即可达 70 微应变。因此，在应变计电测中，必须消除应变 ε_t ，以排除温度的影响，这是一个十分重要的问题。

测量应变计既传递被测构件的机械应变，又传递环境温度变化引起的应变。根据式 (5-10)，如果将两个应变计接入电桥的相邻桥臂，或将四个应变计分别接入电桥的四个桥臂，只要每一个应变计的 ε_t 相等，即要求应变计相同，被测构件材料相同，所处温度场相同，则电桥输出中就消除了 ε_t 的影响。这就是桥路补偿法，或称为温度补偿片法。

桥路补偿法可分为两种，下面作简单介绍。

(1) 补偿块补偿法

此方法是准备一个其材料与被测构件相同，但不受外力的补偿块，并将它置于构件被测点附近，使补偿片与工作片处于同一温度场中，如图 3-4 所示。在构件被测点处粘贴电阻应变计 R_1 ，称工作应变计（简称工作片），接入电桥的 AB 桥臂，另外在补偿块

上粘贴一个与工作应变计规格相同的电阻应变计 R_2 称温度补偿应变计（简称补偿片），

接入电桥的 BC 桥臂，在电桥的 AD 和 CD 桥臂上接入固定电阻 R ，组成等臂电桥，如图 3-4b 所示。这样，根据电桥的基本特性式 (10)，在测量结果中便消除了温度的影响。

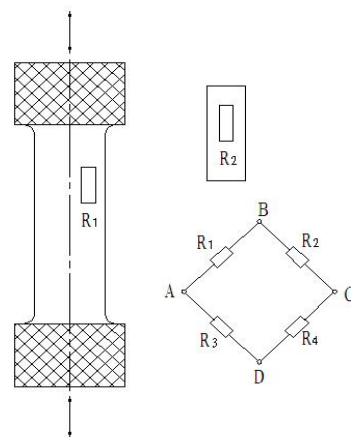


图 3-4 试件及电路简图

(2) 工作片补偿法

在同一被测试件上粘贴几个工作应变计，将它们适当地接入电桥中（比如相邻桥臂）。当试件受力且测点环境温度变化时，每个应变计的应变中都包含外力和温度变化引起的应变，根据电桥基本特性式 (10)，在应变计的读数应变中能消除温度变化所引起的应变，从而得到所需测量的应变这种方法叫工作片补偿法。在该方法中，工作应变计既参加工作，又起到了温度补偿的作用。

如果在同一试件上能找到温度相同的几个贴片位置，而且它们的应变关系又已知，就可采用工作片补偿法进行温度补偿。

在高温条件下，若用桥路补偿法已无法消除温度影响，则一般采用温度自补偿电阻应变计。这种应变计是用电阻温度系数为正值和负值的两种电阻丝串联或控制电阻温度系数而制成的应变计，当环境温度变化时，电阻增量相互抵消，使得减少以至不产生温度应变。

温度补偿是运用桥路的加减特性，合理布片、有效利用温度补偿片正确组桥，以消除温度给应变测量带来的影响。下面讨论桥路原理在温度补偿中的几种典型应用。

1) 单臂测量。工作片 R_1 接 AB 臂，温度补偿片 R_2 接 BC 臂，剩下的两个桥臂是不参与变形的内接电阻。由于温度的影响，这时电桥的输出电压为：

$$\Delta U_{DB} = \frac{E}{4} \left[\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right) + (\Delta R_1 / R_1)_T - (\Delta R_2 / R_2)_T \right]$$

相邻两桥臂的电阻片因温度变化引起的电阻变化率： $(\Delta R_1 / R_1)_T = (\Delta R_2 / R_2)_T$ 。根据桥路特性二者在桥路中相互抵消。从而使 ΔU_{DB} 消除了温度的影响。即：

$$\Delta U_{DB} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right), \text{ 因此单臂测量的结果只反映被测点的工作应变。}$$

2) 半桥测量。两枚工作片 R_1 、 R_2 分别接在相邻的两个桥臂 AB、BC 臂上，其它两个桥臂是应变仪的内接电阻。这时电桥的输出电压为：

$$\Delta U_{DB} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + (\Delta R_1 / R_1)_T - \frac{\Delta R_2}{R_2} + (\Delta R_2 / R_2)_T \right)$$

R_1 、 R_2 的温度电阻变化率相等，即： $(\Delta R_1 / R_1)_T = (\Delta R_2 / R_2)_T$ 。根据桥路特性，二者在桥路中相互抵消。从而不必接温度补偿片就消除了温度的影响。这时桥路输出电压为：

$$\Delta U_{DB} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right)$$

3) 对臂测量。两枚工作片 R_1 、 R_3 分别接在对

臂 AB、CD 上；两个温度补偿片 R_2 、 R_4 。分别接其他两对臂 BC、AD 上由于 4 个电阻片都处于同一温度条件下，而且各电阻片由温度引起的电阻变化率相等，温度影响即在桥路中相互抵消。这时电桥的输出电压仍为：

$$\Delta U_{DB} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right)$$

4) 全桥测量。4 枚工作片 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 依次接在电桥的 4 个桥臂上。由于各工作片由温度引起的电阻变化率相等，温度影响在桥路中相互抵消。这时：

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

表 3-3 典型的组桥方式如下：

组桥方式	组 桥 图	输出电压 ΔU_{DB}	桥臂系数 B	温度补偿
单臂测量		$\frac{E}{4} K_s (\varepsilon_1)$	1	BC 臂需接一枚补偿片 R
半桥测量		$\frac{E}{4} K_s (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$	$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$ 时 B=2;	不要接补偿片，温度影响自动消除
对臂测量		$\frac{E}{4} K_s (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$	$\varepsilon_1 = \varepsilon_3$ 时 B=2;	非工作对臂接补偿片
全桥测量		$\frac{E}{4} K_s (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$	$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4$ 时 B=4;	不接补偿片，温度影响可自动消除
串联测量		$\frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right)$	B=1	阻值与工作片相会地补偿片串联后接 BC 臂

第四部分 实验项目

实验一 万能试验机器和仪器操作实践

一、目的

1. 了解实验机器和仪器的构造及原理。
2. 进行试验机和仪器的操作练习，学习操作规程和注意事项，为今后其它实验打好基础。

二、设备和仪器

1. 万能试验机
2. DH-3818 静态应变测试仪
3. 蝶式引伸仪
4. 扭转电阻应变仪
5. 多功能实验台
6. 千分表
7. 游标卡尺

三、步骤

按照指导书第一、第二部分进行预习和实物进行操作练习。

WDW—100、WDW—100D、WDW—100E 电子式万能试验机

四大基本组成	主机及传动机械	试件夹持机构	控制台	计算机
	开机步骤			
	力标定、测力量程与拉压选择方法			
	由微计算机选择机器横头升降速度		调整横头空间位置速度选择	
			加载速度选择	
	夹持试件装置的使用方法		放置与夹持试件	
			换夹头	
	计算机操作步骤		由桌面进入万能试验机操作系统	
			点击“试验操作”	
			输入试样参数	
			输入实验曲线参数	
			选择位移或变形方式	
写出操作注意事项				

TNS—J02 数显式扭转试验机

基本构造	试件夹持夹头为固定、转动	机械部分	传感器、数显部分
使用方法	操作步骤		
	扭矩的读数方法		
操作注意事项	***两个夹头一定不可相接触碰撞！同方向匀速加载！		
	***实验完成后，不要用手接触段口处！不可敲击传感器！		

蝶式引伸仪（双表式微小变形测量仪）

基本构造	试件夹持刀口			变形放大机构（杠杆机构）	量表（千分表）
	固定刀口	活动刀口	夹紧器		
使用方法	操作步骤				
	量表的读数方法				
操作注意事项	***刀口一定不可相接触碰撞！				
	***实验完成后，一定先卸载荷，再取下引伸仪！				

BDCL 多功能试验台、CML-1L-16 型数显力-应变综合应变仪

基本组成	应变片与测量电桥	应变仪（放大与读数）			
	架体、手摇轮、贴片试件	传感器	蜗杆及螺旋机构		
测量电桥的工作原理、应变片的灵敏系数及其调整					
应变仪面板各旋钮的名称及作用					
应变仪的使用方法、操作步骤			仪器准备	接线	
				调整灵敏度系数	
				调整实验力平衡	
				调整应变平衡	
			测 量	加载	
				选择测点	
				读数	

DH-3818 静态应变测试仪

DH-3818 静态应变测试仪工作原理		
DH-3818 静态应变测试仪软件功能		
数据采集箱的面板功能		
桥路的连接		
DH-3818 静态应变测试仪软件操作	查找机箱	
	平衡操作	
	参数设置	
	采样操作	
	显示结果	
	数据处理	
注意事项		

数显式游标卡尺：要求熟练掌握使用方法，快速、准确的测量与读数。

实验二 低碳钢的拉伸实验

一、目的

1. 测定低碳钢的某些机械性能（屈服极限 σ_s 、强度极限 σ_b 、延伸率 δ 、断面收缩率 ψ 等）。
2. 观察低碳钢在拉伸过程中的弹性、屈服、强化和颈缩的现象。
3. 绘制拉力与伸长量即 $F - \Delta L$ 的关系曲线。

二、设备

1. 万能实验机
2. 游标卡尺
3. 辅助工具（锤子、直尺等）

三、原理

本次实验是要把试件一直拉断为止，然后根据计算机所绘出的拉伸图和拉断前后的试件尺寸来确定它们的机械性能。试件尺寸和形状对实验结果具有一定的影响，为了避免这种影响和便于各种材料机械性质的数值能互相比较，所以对试件尺寸和形状比例要有一定的规定，一般采用以下三种标准（表 4-1）。

表 4-1

	圆形横截面	矩形横截面	备注
5 倍试件	$L_0=5d_0$	$L_0=5.65\sqrt{A_0}$	适用于软钢
10 倍试件	$L_0=10d_0$	$L_0=11.3\sqrt{A_0}$	适用于软钢
2.5 倍试件	$L_0=2.5d_0$		适用于铸铁

L_0 : 工作段长度 A_0 : 原横截面面积 d_0 : 原直径

对低碳钢来说其拉伸图如图 4-1 所示。在拉伸过程中有些现象略加说明如下：

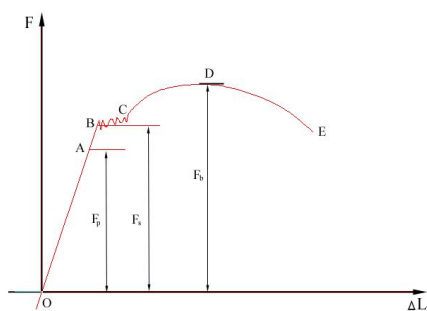


图 4-1 低碳钢的拉伸图

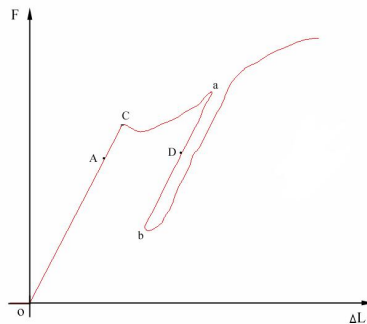


图 4-2 冷作硬化

1. 屈服现象：从图 4-1 看出 F 和 ΔL 开始成直线比例关系。然后出现一个接近水平的平台 BC，这表示当拉力达到 F_s 时，力变化不大，而变形很大。此种情况称屈服现象。
2. 颈缩现象：当力达到最大值 D 点时，试件的某一断面将开始较其它地方明显变细，此种现象称为颈缩现象。

3. 冷作硬化：当试件超过屈服阶段后，将外力慢慢卸掉如图 4-2 所示，这时看到曲线将沿着与直线 OA 平行的线段 ab 退回。如再重新加力时，则又基本上沿原退回线 ab 向上，直线段超过原来直线段 OA。此种现象称为冷作硬化。

四、实验步骤

1. 测直径：用游标卡尺测量标距两端及中间这三个横截面处的直径，在每一横截面内沿互相垂直的两个直径方向各测量一次取其平均值。用所测得的三个平均值中最小的值 d_{\min} 计算试件的横截面面积 A_0 。计算 A_0 时取三位有效数字。

2. 打印记：（在靠近底端处先打一个印记，然后用直尺量出 100mm，再打一个印记）。

3. 估算载荷（预估整个实验过程中试件所承受的最大实验力，以便选择合适的量程）。

4. 夹持试件：把试件安装在万能实验机的固定夹头内，再选择合适的速度，移动活动横梁，使安装在活动横梁上的活动夹头达到适当位置，然后把试件另一端端夹紧。（速度 < 200 mm/min，夹在试件夹持部分的 2/3 处）。

5. 利用万能实验机的操作软件制定实验方案、试样信息。

6. 选量程 50KN，然后将实验力值，峰值清零。选择 $F - \Delta L$ 曲线类型。

7. 选择速度 5~10mm/min，点击“实验开始”使实验机缓慢匀速加载。注意观察曲线情况和相应的实验现象。当实验力获负荷的读数值缓慢变化或曲线出现上下缓慢波动时，说明材料已开始屈服，此时记录屈服载荷 F_s 。件断裂后机器自动停止，由峰值读出最大载荷 F_b ，并记录下来。

8. 从万能实验机上取下试件，将拉断的试件的端口对在一起，测量两个印记之间的距离为 l_1 ，用游标卡尺测断口处的直径两次取其平均值为 d_1 。整理设备，填写实验记录本。

五、数据记录

表 4-2 试件直径测量记录

材料	标距 l_0 (mm)	直径 d_0 (mm)									最小横截面 面积 A_0 (mm ²)
		横截面 I			横截面 II			横截面 III			
		(1)	(2)	平均	(1)	(2)	平均	(1)	(2)	平均	
低碳 钢											

表 4-3 F_s 、 F_b 记录录

材料	屈服载荷 F_s	最大载荷 F_b
低碳钢		

表 4-4 低碳钢试件断后尺寸记录

断后标距长度 l_1 (mm)	断口（颈缩）处直径 d_1 (mm)		断口处最小横截面面积 A_1 (mm ²)
	1	2	

六、试验结果的处理

1. 根据屈服载荷 F_s 及最大载荷 F_b ，计算屈服极限 σ_s 及强度极限 σ_b

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0} \qquad \sigma_b = \frac{F_b}{A_0}$$

2. 根据试件前、后的标距段长度及横截面面积计算延伸率 δ 及断面收缩率 ψ

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \qquad \psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

若断口不在标距长度中部三分之一区内，需采用断口移中的办法（即借计算法将断口移至中间），以计算试件拉断后的标距长度 l_1 。采用断口移中法时，试验前要将试件标距等分为十个格，试验后将拉断的试件断口对紧，见图 4-3 所示。以断口 O 为起点，在长段上取基本等于短段的格数得 B 点。当长段所余格数为偶数时（图 4-3a），然后量取长段所余格数的一半得出 C 点，将 BC 段长度移到试件左端，则移位后的 l_1 为

$$l_1 = AB + 2BC$$

在长段上取基本等于短段格数得 B 点后，

若长段所余格数为奇数时（图 4-3b），可在长段上量取所余格数减 l 之半得 C 点，再量取所余格数加 l 之半得 C_1 点，则移位后的 l_1 为

$$l_1 = AB + BC + BC_1$$

为什么要将断口移中呢？这是因为断口靠近试件两端时，在断裂试件的较短一段上，必将受到试件头部较粗部分的影响，而降低颈缩部分的局部伸长量，从而使延伸率 δ 的数值偏小，用断口移中的办法可在一定程度上弥补上述偏差。

当断口非常靠近试件两端，而其与头部的距离等于或小于直径 d_0 的两倍时，试验结果无效，必须重做。

七、问题讨论

1. 低碳钢和在拉伸过程中有哪些现象？
2. 算出低碳钢拉断时的实际应力，为何不用它作为强度极限？
3. 这些实验中还发现哪些问题？如何理解？

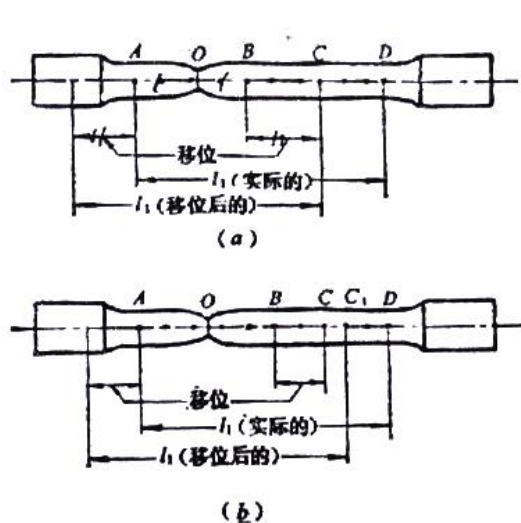


图 4-3 断口移中示意图

实验三 铸铁的压缩实验

一、目的

1. 确定铸铁圆形试件在压缩过程中的强度极限 σ_b 。
2. 观察铸铁压缩时的变形和断口破坏的形状，分析其原因。

二、设备

1. 万能试验机
2. 游标卡尺

三、原理及装置

铸铁等金属材料的压缩试件一般制成圆柱形（图 4-4a）。当试件承受压缩时，其上下两端面与试验机支承垫之间产生很大的摩擦力（图 4-4b），这些摩擦力阻碍试件上部和下部的横向变形。若在试件两端面涂以润滑剂，就可以减小摩擦力，试件的抗压能力将会有所降低。当试件的高度相对增加时，摩擦力对试件中部的影响将有所减小，因此抗压能力与试件高度 h_0 和直径 d_0 的比值 h_0/d_0 有关。例如这一比值愈大，铸铁的强度极限就愈小。由此可见，压缩试验是有条件的。在相同的试验条件下，才能对不同材料的压缩性能进行比较。金属材料压缩破坏试验所用的试件，一般规定为 $1 \leq \frac{h_0}{d_0} \leq 3$ 。

实验时，利用计算机自动绘图，绘出铸铁压缩图（图 4-5）。铸铁试件作压缩试验时，在达到最大载荷 F_b 前要出现较大的塑性变形后才发生破裂，此时压缩曲线图迅速下降，由测力读数峰值可读出最大载荷 F_b 值。铸铁试件最后被压成鼓形，表面出现与试件轴线大约成 45° 左右的倾斜裂纹，破坏主要是由剪应力引起的。

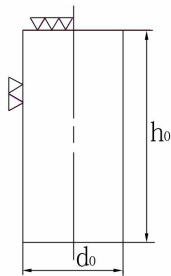


图 4-4a 压缩试件

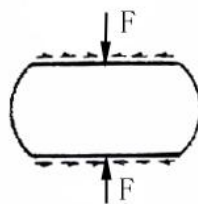


图 4-4b 压缩时试件端面的摩擦力

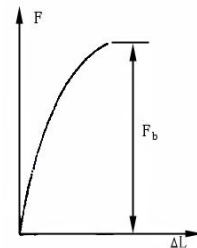


图 4-5 铸铁压缩图

四、试验步骤

1. 测直径 d ：用游标卡尺测量试件中部截面的直径两次，取平均直径从而来计算截面面积。
2. 放置试件：将试件准确地放在实验机下压盘的中心处。
3. 选择合适的速度移动万能实验机的中横梁，使其上压盘与试件的上表面刚好接触，而实验力值为零。
4. 估算载荷，选择量程 100KN。

5. 将万能实验机操作软件中实验力值、峰值清零。
6. 利用万能实验机的操作软件制定实验方案、试样信息。
7. 选择 $F - \Delta L$ 的关系曲线类型。
8. 选择速度 5mm/min，点击实验开始，使万能实验机匀速加载。
9. 观察实验曲线，当实验力值下降到峰值一半时，手动点击停止。
10. 先选择 5mm/min，点击上升键，使实验力值为零，点击停止，然后在选择 50-100 mm/min 使万能实验机中横梁继续上升一段距离，点击停止，取出试件，记录峰值 F_b 。
11. 整理实验设备，填写实验记录本。

五、数据记录

表 4-5

材料	直径 d_0 (mm)			载荷值 (KN)	
	中部横截面			屈服载荷 F_s	最大载荷 F_b
	(1)	(2)	平均		
铸铁					

六、试验结果的处理

根据试验记录，计算出铸铁的强度极限

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0}$$

式中： A_0 为试验前试件的横截面面积。

七、问题讨论

1. 为什么铸铁试件在压缩时沿着与轴线大致成 45° 的斜截面破坏？
2. 这些实验中还发现哪些问题？

实验四 机械法测定材料拉伸时的弹性模量

一、目的

1. 在弹性比例极限内，使用机械法测定低碳钢圆形试件在拉伸时的弹性模量 E 。
2. 学会拟定实验加载方案，多级等量加载。
3. 掌握数据处理方法（差值平均法）。

二、设备

1. 万能实验机
2. 游标卡尺
3. 蝶式引伸仪

三、原理及装置

测定钢材的弹性模量时，应采用拉伸实验。钢材在弹性比例极限内服从胡克定律，

其关系式为

$$\Delta L = \frac{F \cdot L_0}{EA_0}$$

所以

$$E = \frac{F \cdot L_0}{\Delta L \cdot A_0}$$

在圆形试件上安装测量轴向伸长的蝶式引伸仪（如图 4-6），加载荷 F 即可以从引伸仪测得在引伸仪标距范围内的轴向伸长量 ΔL ，即可计算出钢材的弹性模量 E 。

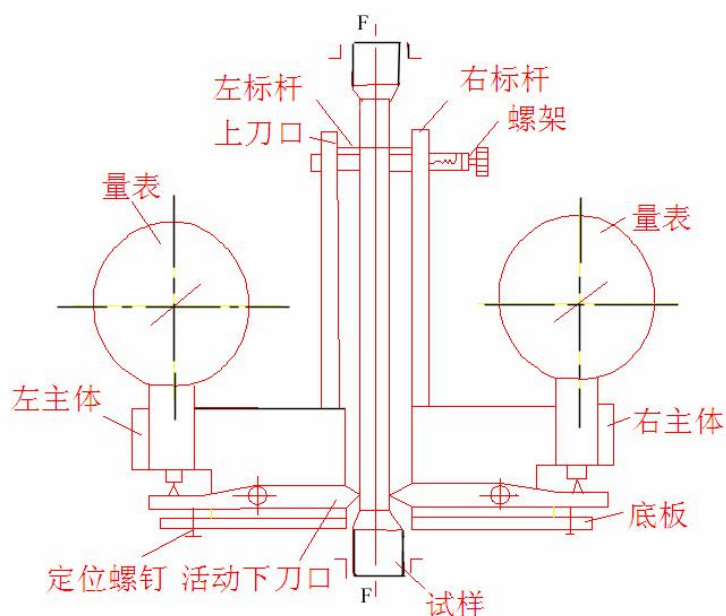


图 4-6 蝶式引伸仪

为了消除测量中可能产生的误差，一般采取增量法。所谓增量法，就是把欲加的最

终载荷分成若干等份，逐级加载来测量试件的变形。设试件横截面面积 A_0 ，引伸仪标距为 L_0 ，各级载荷增加量相同并等于 ΔF ，各级伸长增加量为 $(\Delta L)_i$ 则

$$E_i = \frac{\Delta F L_0}{(\Delta L)_i A_0}$$

式中足标 i 为加载级数 ($i=1, 2, \dots, n$)。

由于实验开始时引伸仪机构间存在间隙，其刀刃往往在试件表面上有微小的滑动，从而影响读数的准确性；同时为了夹牢试件和消除试验机构之间的空隙。必须加一定量的初载荷。

在试验前要拟订加载方案。拟定加载方案时根据上述要求，一般考虑以下几点：

(1) 由于在比例极限内进行实验，故最大应力值不能超过比例极限，碳钢一般取屈服极限 σ_s 的 70—80%，本试验低碳钢 $\sigma_s = 320\text{Mpa}$ 。

(2) 初载荷可按所用量程的 10%或稍大于此标准来选定。

(3) 至少应有 4—5 级加载，每级加载应使引伸仪的读数有明显的变化。

例如：使用中碳钢试件，设 $E=210\text{Gpa}$ ， $\sigma_s=350\text{Mpa}$ ， $A_0=150\text{mm}^2$ 。取最大应力为

屈服极限 σ_s 的 80%，则最终载荷为

$$F=0.8 \sigma_s A_0=0.8 \times 350 \times 150=42000\text{N}=42\text{KN}$$

根据这个最终载荷值，试验机应采用 50KN 测力度盘。

取初载荷为所用度盘量程的 10%。则初载荷为 $F_0=0.1 \times 50=5\text{KN}$ 。取 5 级加载，则每级载荷增加量为

$$\Delta F = \frac{F - F_0}{5} = \frac{42 - 5}{5} = 7.4\text{KN}$$

为了加载方便，最好把 ΔF 取为整数，故取为 7KN。

以上介绍的是用蝶式引伸仪测定值 E 的静载法。对于碳钢等有明显弹性直线段的 $F - \Delta L$ 曲线，取弹性直线段的斜率即为所测材料的弹性模量 E 。

四、试验步骤

1. 测直径 d ：用游标卡尺测量试件工作段的两端及中间这三个横截面处的直径，在每一横截面内沿互相垂直的两个直径方向各测量一次取其平均值。用所测得的三个平均值再平均的值来计算试件的横截面面积 A_0 。计算时 A_0 取三位有效数字。

2. 夹持试件：把试件先安装在万能实验机的固定夹头内，再选择合适的速度，移动活动横梁，使安装在活动横梁上的活动夹头达到适当位置，然后把试件另一端端夹紧。（速度 $<200\text{mm/min}$ ，夹在试件夹持部分的 2/3 处）。

3. 安装引伸仪和夹紧器：小心准确的将蝶式引伸仪安装在试件上，应使引伸仪两刀刃位于试件的对称平面内。然后将夹紧器安装在引伸仪上端立柱的卡槽内。

4. 拟定实验方案，选量程 50KN。
5. 在万能实验机操作软件中将实验力值、峰值清零，然后将蝶式引伸仪的指针调零。
6. 选择速度 0.5 mm/min 点击上升键，当实验力接近第二次要加载的力值时速度变为 0.1 mm/min，当达到要加载的力值时（即读数时）速度变为 0.005 mm/min（注：实验过程中方向键不能改变，不能点击停止键）。
7. 将每次的读数记录在相应的表格中。
8. 整个加载完毕后，先点击停止，然后选择 5 mm/min 点击上升键直到实验力卸载至 0 时，再点击停止。
9. 先取下蝶式引伸仪，然后再取下试件。
10. 整理实验设备，填写实验记录本。

五、数据记录

表 4-6

载荷 F (KN)	左表读数 L (mm)	读数差 $\Delta L_i = L_i - L_{i-1}$	右表读数 L (mm)	读数差 $\Delta L_i = L_i - L_{i-1}$
$F_0 =$				
$F_1 = F_0 + \Delta F =$				
$F_2 = F_1 + \Delta F =$				
$F_3 = F_2 + \Delta F =$				
$F_{终} =$				
平均				

表 4-7

材料	标距 I (mm)	直径 d_0 (mm)									横截面面积 A_0 (mm ²) (平均)
		横截面 I			横截面 II			横截面 III			
		(1)	(2)	平均	(1)	(2)	平均	(1)	(2)	平均	
低碳钢											

六、试验结果的处理

分别求出蝶式引伸仪左、右表平均读数差，再按下式求出圆形试件弹性模量 E。

$$E = \frac{\Delta F \cdot L_0}{\frac{\Delta l_{\text{左}} + \Delta l_{\text{右}}}{2} \cdot A_0}$$

七、问题讨论

1. 试件的尺寸和形状对测定弹性模量有无影响？
2. 试验时为什么要加初载荷？

实验五 电阻应变法测量材料拉伸时的弹性常数

一、目的

1. 电测法测低碳钢扁形试件在拉伸时的 E 、 μ ，并由关系式求出剪切弹性模量 G 。
2. 进一步学习拟定加载方案，验证胡克定律。

二、设备和仪器

1. 万能试验机
2. DH-3138 静态测试仪
3. 贴有应变片的拉伸试件和补偿块
4. 游标卡尺

三、试件

试件采用低碳钢材料制成的扁试件，应变片布片如图 4-7 所示。

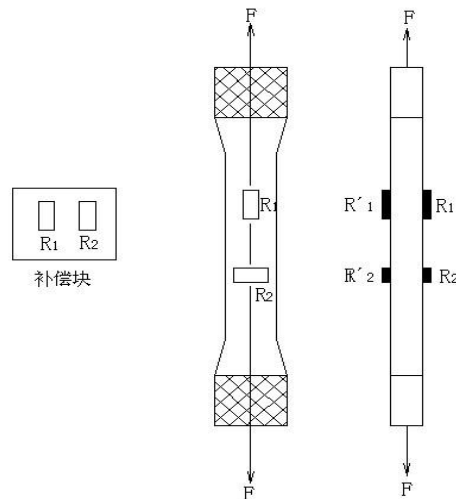


图 4-7 试件及应变片布片简图

四、实验原理

1. 设试件横截面面积为 A_0 ，标距为 L_0 ，采用等级增量加载法，各级载荷增加量相同并等于 ΔF ，各级伸长增加量的平均值为 $\Delta(\Delta L)$ ，则由胡克定律，该材料的弹性模量 E 为

$$E = \frac{\Delta F \cdot L_0}{\Delta(\Delta) \cdot A_0}$$

由于本实验采用电测法测量，其反映变形测试的数据为应变增量。

即
$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta(\Delta L)}{L_0}$$

则
$$E = \frac{\Delta F}{\frac{\Delta(\Delta L)}{L_0} \cdot A_0} = \frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon \cdot A_0}$$

2. 材料在受拉伸或压缩变形时，不仅沿纵向发生变形，在横向也同时发生变形。在弹性变形范围内，横向线应变和纵向线应变成正比关系，这一比值称为材料的泊松比，用 μ 表示。

即
$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|$$

实验时，测出材料纵向线应变 ε 和横向线应变 ε' ，则可由上式计算出泊松比。

3. 根据 $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ ，可计算出材料的剪切弹性模量。

五、实验步骤

1. 测量尺寸：用游标卡尺测量扁形试件的宽度、厚度（a、b）。
2. 夹持试件：更换夹块后，把试件先安装在万能实验机的固定夹头内，再选择合适的速度，移动活动横梁，使安装在活动横梁上的活动夹头达到适当位置，然后把试件另一端端夹紧。（速度<200mm/min，夹在试件夹持部分的 2/3 处）
3. 接线：根据实验要求，将应变片的链接导线接在应变仪相应的通道上，连接方式为 1/4 桥路连接。
4. 拟定实验方案，选量程 50KN。
5. 在万能实验机的操作软件中将实验力值、峰值清零，然后将应变仪上连接导线的通道上的应变值调零。
6. 选择速度 0.5 mm/min 点击上升键，开始加载，当实验力接近第二次要加载的力值时速度变为 0.1 mm/min，当达到要加载的力值时（即读数时）速度变为 0.005 mm/min（注：实验过程中方向键不能改变，不能点击停止键）。
7. 将每次的读数记录在相应的表格中。
8. 整个加载完毕后，先点击停止，然后选择 5 mm/min 点击上升键直到实验力卸载至 0 时，再点击停止。
9. 将扁形试件小心的从万能实验机上取下来。
10. 整理实验设备，填写实验记录本。

六、数据记录

表 4-8

截面尺寸（mm）		截面面积 A_0 （mm ² ）
b=	h=	

表 4-9

载荷 F (KN)	应变仪读数 ($\mu \varepsilon \times 10^{-6}$)			
	ε_1 (横向)		ε_2 (纵向)	
$F_0 =$				
$F_1 = F_0 + \Delta F =$				
$F_2 = F_1 + \Delta F =$				
$F_3 = F_2 + \Delta F =$				
$F_4 = F_3 + \Delta F =$				
$F_{终} =$				
平均				

七、实验结果处理

1. 按式 $E = \frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon \cdot A_0}$ 计算求出 E, 并由 $\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|$ 求 μ ; 由 $G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$ 求出 G。

2. 将观察结果记录填入表中

八、问题讨论

1. 为什么测量弹性模量和泊松比?
2. 材料在拉伸和压缩时, 测得弹性模量是否相同?

实验六 低碳钢扭转测剪切屈服极限、剪切强度极限

一、目的

1. 测定低碳钢圆形试件在扭断后的 τ_s 、 τ_b （剪切屈服极限，剪切强度极限）。
2. 测定铸铁圆形试件在扭断后的剪切强度极限 τ_b 。
3. 观察低碳钢和铸铁试件在扭断后端口的形状，分析其原因。

二、设备

1. TNS-J02 数显式扭转试验机
2. 游标卡尺

三、原理

圆轴承受扭转时，材料处于纯剪应力状态。因此常用扭转试验来研究不同材料在纯剪作用下的机械性质。

当扭矩达到一定数值时，试件横截面边缘的剪应力开始达到剪切屈服极限 τ_s ，这时的扭矩叫 T_p ，在扭矩超过 T_p 后，横截面上剪应力的分布不再是线性的（图 4-9 的右方两图）。在圆轴的外部处，材料发生屈服形成环形塑性区，同时 $T_n-\phi$ 图变成曲线（见图 4-8）。

此后，随着试件继续扭转变形，塑性区不断向圆心扩展， $T_n-\phi$ 曲线稍微上升，直至 B 点趋于平坦，扭矩数显显示器上数字几乎不动或波动，波动的最小值即是试件全部屈服所对应的扭矩 T_s ，这时塑性区占据了几乎全部截面（图 4-9 右图）。 τ_s 近似等于

$$\tau_s = \frac{3}{4} \cdot \frac{T_s}{W_p}$$

式中 $W_p = \frac{\pi}{16} d^3$ 是试件的抗扭截面模量。

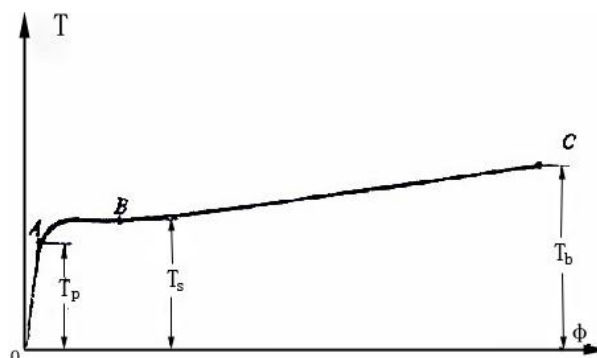


图 4-8 低碳钢的 $T-\phi$ 曲线

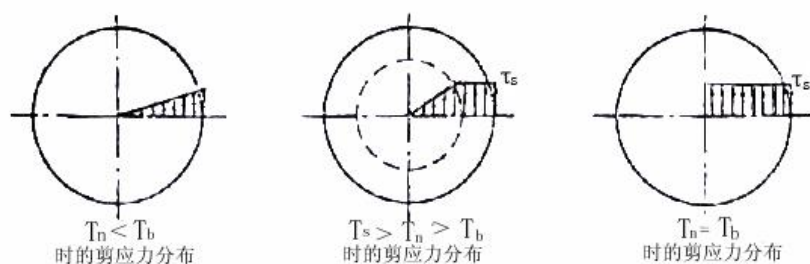


图 4-9 低碳钢圆轴在不同扭矩下剪应力分布图

试件再继续变形，材料进一步强化，到达 $T_n-\phi$ 曲线的 C 点，试件发生断裂。由扭矩数显显示器的读数读出最大扭矩 T_b 。与上式相似，可得

$$\tau_b = \frac{3}{4} \cdot \frac{T_b}{W_p}$$

铸铁的 $T_n-\phi$ 曲线如图 4-10 所示。从开始受扭，直到破坏，近似为一直线。故近似地按弹性应力公式计算

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

试件受扭，材料处于纯剪应力状态（图 4-11）。在与杆轴成 $\pm 45^\circ$ 角的螺旋面上，分别受到主应力 $\sigma_1 = \tau$ 、 $\sigma_3 = -\tau$ 的作用。低碳钢的抗拉能力大于抗剪能力，故从横截面剪断，而铸铁的抗拉能力较抗剪能力弱，故沿着与 σ_1 方向成正交的方向拉断。

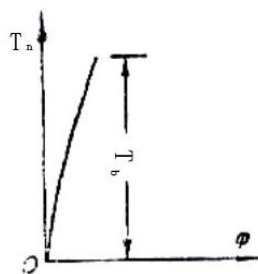


图 4-10 铸铁的 $T_n-\phi$ 曲线

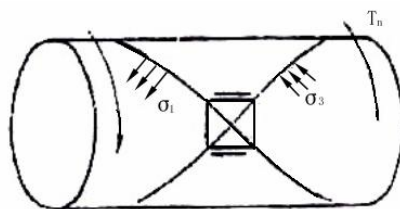


图 4-11 纯剪应力状态

四、实验步骤

1. 测直径：用游标卡尺测量标距两端及中间这三个横截面处的直径，在每一横截面内沿互相垂直的两个直径方向各测量一次取其平均值。用所测得的三个平均值中最小的值 d_{\min} 计算试件的横截面积 A_0 。计算 A_0 时取三位有效数字。

2. 夹持试件：先将试件的一端夹在扭转实验机的固定端夹头上，在移动扭转实验机的另一端，将试件夹持。

3. 将扭转实验机上的扭矩显示值清零、角度显示值清零。

4. 开始实验：手动开始加载（要求：同方向、匀速加载）。
5. 试件扭断之后，记录数据 T_s 、 T_b 。
6. 取下试件，然后观察断口的形状。
7. 再用铸铁的试件重新加载一次（重复以上 2-6 步骤）。
8. 整理实验设备，填写实验记录本。

五、数据记录

表 4-10

材料	直径 d_0 (mm)									横 截 面 面 积 A (mm ²) (最小值)
	横截面 I			横截面 II			横截面 III			
	(1)	(2)	平均	(1)	(2)	平均	(1)	(2)	平均	
低碳钢										
铸 铁										

表 4-11

材料	T_s	T_b
低碳钢		
铸 铁		

六、实验结果处理

1. 分别求出低碳钢的 τ_s 和 τ_b ；铸铁的 τ_b 。
2. 最后绘出两种材料的断口图形，并解释其断裂原因。

七、问题讨论

试诉低碳钢试件和铸铁试件在扭断之后端口的形状，分析其原因？

实验七 圆轴扭转实验

一、目的

1. 测定低碳钢圆形试件在扭转过程中的剪切弹性模量 G 。
2. 验证剪切胡克定律。

二、设备

1. 组合实验器
2. 游标卡尺和直尺
3. 涡流位移传感器

三、原理及装置

试件受力及涡流位移传感器安装简图如图 4-12 所示。试件 1 的一端固定，另一端用轴承 6 支承，用砝码 8 通过加力杆 7，使试件承受扭矩。

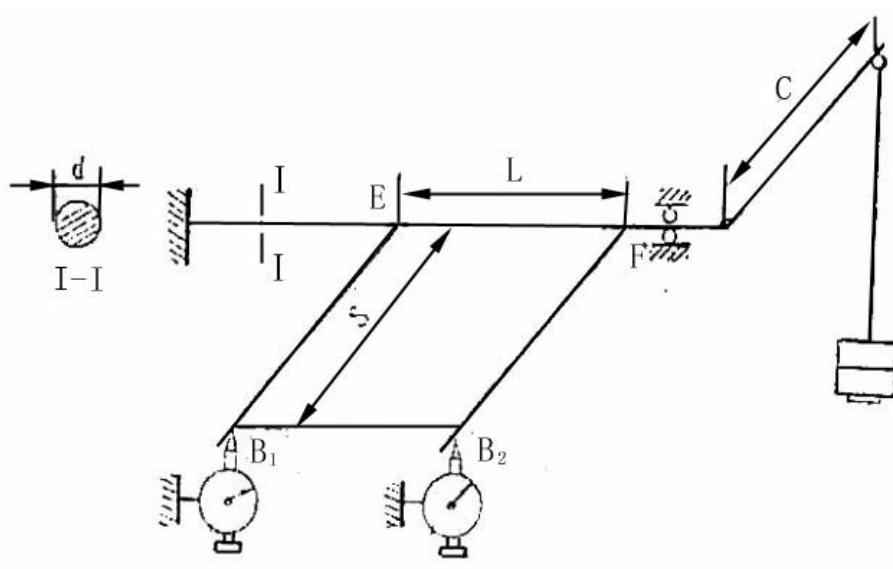


图 4-12 试件受力涡流位移传感器及安装简图

按选定的标距 l ，将涡流位移传感器分别放在 B_1 、 B_2 两端点上。若这两截面发生相对转动，涡流位移传感器就示出距试件中心轴线为 S 、分别在 E 和 F 截面上两点的相对位移 $\Delta(B_2 - B_1)$ ，相对位移在计算机上读出。故 E 、 F 横截面的相对扭转角为

$$\phi = \frac{\Delta(B_2 - B_1)}{S}$$

在材料的剪切比例极限内，扭转角公式为

$$\phi = \frac{T_n l_0}{GI_p}$$

式中： T_n —扭矩；

I_p —圆截面的极惯性矩。

同样采用增量法，逐级加载。如每增加同样大小的扭矩 ΔT_n ，扭转角的增量 $\Delta\phi$ 基本相等，这就验证了剪切胡克定律。根据测得的各级扭转角增量 $\Delta\phi_i$ ，可用下式算出相应的剪切弹性模量：

$$G_i = \frac{\Delta T_n \cdot L}{\Delta\phi_i \cdot I_p}$$

下标 i 为加载级数 ($i=1, 2, \dots, n$)。

四、试验步骤

1. 按实验要求将试件装在相应的卡具中，并组装此实验装置。
2. 在正确的位置安装涡流位移传感器。
3. 测量有关数据 l 、 d 、 s 、 c 。
4. 利用组合实验操作软件来激活涡流位移传感器。
5. 传感器间隙调整，按照要求调整到 $\leq 0.3\text{mm}$ 之内。
6. 开始加载，此实验采用 5N 的砝码进行加载，加载 5 次，加载方案：5N、10N、15N、20N、25N。
7. 记录相关数据。
8. 整理实验设备，填写实验记录本。

五、数据记录

表 4-12

荷重 $F(\text{N})$	涡流位移传感器读数 $B(0.01\text{mm})$		
	ΔB_1	ΔB_2	$\Delta (B_2 - B_1)$
$F_0 =$			
$F_1 = F_0 + \Delta F =$			
$F_2 = F_1 + \Delta F =$			
$F_3 = F_2 + \Delta F =$			
$F_{\text{终}} =$			

表 4-13

s (mm)	l (mm)	c (mm)	d (mm)

六、试验结果的处理

按式 $G = \frac{\Delta T \cdot L}{\Delta \phi \cdot I_p}$ 得到材料剪切。弹性模量

$$\text{式中: } \Delta \phi = \frac{\Delta(B_2 - B_1)}{S} \quad \Delta T = F_N \bullet C \quad I_p = \frac{\pi d^4}{32}$$

七、问题讨论

1. 从各个试件的破坏形式，分析一下材料是由何种应力破坏的。
2. 根据拉伸、压缩和扭转三种试验结果，综合分析低碳钢与铸铁的机械性质。

实验八 低碳钢直梁纯弯曲正应力实验

一、实验目的

1. 电测法测定低碳钢直梁在纯弯曲时横截面的正应力 $\sigma_{\text{实}}$ 。
2. 利用弯曲的理论公式计算 $\sigma_{\text{理}}$ 并与实验值比较，分析误差原因。
3. 验证梁的弯曲理论。

二、实验仪器

1. 万能实验机
2. DH-3818 电阻应变仪
3. 直尺
4. 粘贴应变片的低碳钢矩形截面梁

三、试件

本实验采用低碳钢（或中碳钢）制成的矩形截面梁如图 4-13 所示。

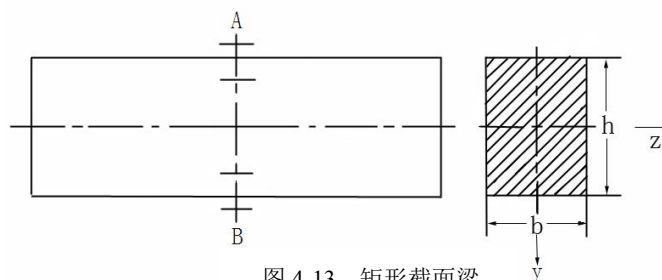


图 4-13 矩形截面梁

四、实验原理

梁受纯弯曲时，根据平面假设和纵向纤维间无挤压的假设，由理论分析得知，其横截面上的正应力为线性分布。公式为

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I_z}$$

其中 M —作用在横截面上的弯矩；

I_z —梁整个横截面对中性轴的惯性矩；

y —欲求点到中性轴的距离。

为了实现纯弯曲，采用图 4-14 的装置。如图所示梁在 CD 段发生纯弯曲。

在梁纯弯曲段任一横截面 A—B 上的不同高度处，沿纵向粘贴应变片，所贴位置是梁的顶面、底面、中性层及离中性层 $\pm \frac{3}{10}h$ 处。

加一定载荷后，由电阻应变仪测出各点的纵向线应变 $\epsilon_{\text{实}}$ ，由于纵向纤维间无挤压，

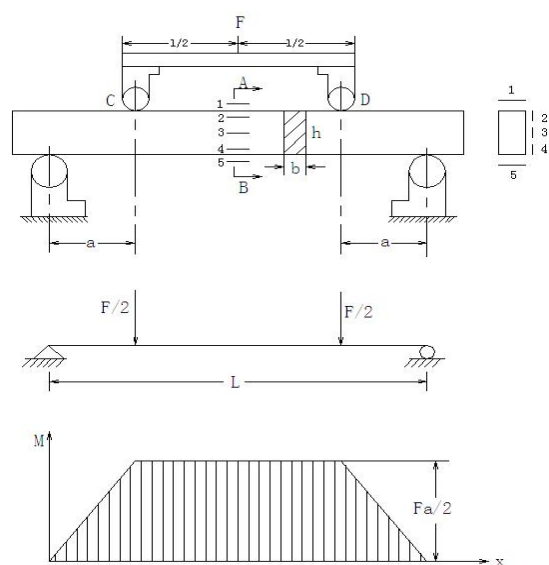


图 4-14 纯弯曲加载布置图及弯矩图

根据单向胡克定律求出实验应力 $\sigma_{\text{实}}$ 。

$$\sigma_{\text{实}} = E \cdot \varepsilon_{\text{实}}$$

计算各点正应力，然后将此值与相应的理论值比较，分析误差原因。

本实验仍采用增量法，每增加等量的载荷 ΔF ，测定各点相应的应变增量 $\Delta \varepsilon_i$ 一次，足标 i 为应变片的编号，横截面 A—B 上由顶部至底部，各个应变片的编号按次序分别为 1、2、…5，然后算出各次加载后测得的应变增量的平均值 $\Delta \varepsilon_{\text{实}}$ ，即可按下式算出各点应力增量的实验结果。

$$\Delta \sigma_{\text{实}} = E \cdot \Delta \varepsilon_{\text{实}}$$

五、实验步骤

1. 将试件水平放置到万能实验机的弯曲支座上，要求试件与弯曲支座水平方向要垂直。
2. 将辅助梁放置到试件上侧，要求辅助梁的形心与试件形心在一条铅垂线上。
3. 启动万能实验机，使其中横梁以 5mm/min 速度下降，当中横梁恰好接触辅助梁时，停止下降。即辅助梁与试件接触而试验力值为零。
4. 根据实验要求，按应变片的编号，将应变片引出的导线连接在应变仪相应的通道上，连接方式为 1/4 桥路。
5. 根据实验加载方案，选择合适的量程。之后将实验力值、峰值清零，应变仪上对应的通道清零。
6. 开始实验，选择 0.2-0.5mm/min 的速度点击方向键向下，进行加载，当载荷接近

所要加载到的载荷时，用 0.05-0.1mm/min 的速度过度，当达到所加载的载荷时，用 0.005mm/min 的速度读数。

7. 读数时，一次要读取 5 个通道上的线应变值。

8. 继续增加载荷，重复步骤 6、7，直至加载完成。

9. 加载完成后，先点击停止键，再以 5mm/s 的速度上升，直至加载载荷为 0KN，在点击停止。

10. 将试件从实验机上卸下，整理实验设备，填写试验记录本。

六、数据记录

表 4-14 纯弯曲

载荷 F (KN)	应变读数 ($\mu \varepsilon \times 10^{-6}$)				
	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5
$F_0 =$					
$F_1 = F_0 + \Delta F =$					
$F_2 = F_1 + \Delta F =$					
$F_3 = F_2 + \Delta F =$					
$F_{终} =$					

表 4-15 纯弯曲梁尺寸

b (mm)	h (mm)	a (mm)	E (MPa)

七、试验结果的处理

1. 梁在纯弯曲时，按 $\Delta \sigma_{实} = E \cdot \Delta \varepsilon_{实}$ 计算各点的应力增量的实验值。

2. 梁在纯弯曲时，按 $\Delta \sigma_{理} = \frac{\Delta M \cdot y}{I_z}$ 计算各点应力增量的理论值，将这些实验值和

理论值进行比较，如有误差，分析原因。

八、问题讨论

1. 哪些因素促使实验与理论产生偏差。

2. 为何在这个实验中，能用 $\sigma = E\varepsilon$ 这个公式来计算正应力。

实验九 低碳钢直梁横力弯曲正应力实验

一、目的

1. 电测法测定低碳钢直梁在横力弯曲时横截面的正应力 $\sigma_{\text{实}}$
2. 利用弯曲的理论公式计算 $\sigma_{\text{理}}$ 并与实验值比较，分析误差原因。
3. 验证梁的弯曲理论。

二、设备

1. 万能实验机
2. DH-3818 电阻应变仪
3. 直尺
4. 粘贴应变片的低碳钢矩形截面梁

三、试件

本实验采用低碳钢（或中碳钢）制成的矩形截面梁如图 4-15 所示。

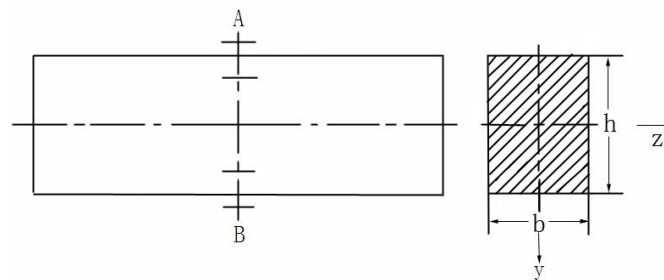


图 4-15 矩形截面梁

四、原理

梁在横力弯曲时，横截面上不但有正应力还有剪应力，由于剪应力的存在，横截面不再保持为平面。但对于细长梁，用纯弯曲正应力公式计算出的结果不会引起很大误差，能够满足工程问题所需要的精度，因此，梁在横力弯曲时横截面上正应力公式与纯弯曲时正应力公式相同。即：

$$\Delta\sigma_{\text{实}} = E \cdot \Delta\varepsilon_{\text{实}}$$

为了实现横力弯曲，把实验八的图 4-14 中的 CD 辅助梁去掉，直接把力 F 加在梁上即可。

采用试件和方法与纯弯曲相同。

五、试验步骤

1. 将试件水平放置到万能实验机的弯曲支座上，要求试件与弯曲支座水平方向要垂直。
2. 要求弯曲支头的中心与试件形心在一条铅垂线上。

3. 启动万能实验机,使其中横梁以 5mm/min 速度下降,当弯曲支头恰好接触试件时,停止下降。即弯曲支头与试件接触而试验力值为零。

4. 根据实验要求,按应变片的编号,将应变片引出的导线连接在应变仪相应的通道上,连接方式为 1/4 桥路。

5. 根据实验加载方案,选择合适的量程。之后将实验力值、峰值清零,应变仪上对应的 5 个通道全部清零。

6. 开始实验,选择 0.2-0.5mm/min 的速度点击方向键向下,进行加载,当载荷接近所要加载到的载荷时,用 0.05-0.1mm/min 的速度过度,当达到所加载的载荷时,用 0.005mm/min 的速度读数。

7. 读数时,一次要读取 5 个通道上的线应变值。

8. 继续增加载荷,重复步骤 6、7,直至加载完成。

9. 加载完成后,先点击停止键,再以 5mm/s 的速度上升,直至加载载荷为 0kN,在点击停止。

10. 将试件从实验机上卸下,整理实验设备,填写试验记录本。

六、数据记录

表 4-16 横力弯曲

载荷 F (kN)	应变读数 ($\mu \varepsilon \times 10^{-6}$)				
	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5
$F_0=$					
$F_1=F_0+\Delta F=$					
$F_2=F_1+\Delta F=$					
$F_3=F_2+\Delta F=$					
$F_{终}$					

表 4-17 横力弯曲梁尺寸

b (mm)	h (mm)	l (mm)	E (MPa)

七、试验结果的处理

梁在横力弯曲时,按 $\Delta \sigma_{实} = E \cdot \Delta \varepsilon_{实}$ 计算各点的应力增量的实验值,并与梁在纯弯曲时计算出的各点应力实验值进行比较。

八、问题讨论

为什么在横力弯曲时计算横截面各点正应力公式可用纯弯曲时正应力公式?

实验十 直梁弯曲实验测量材料的弹性常数

一、目的

1. 用电测法测量低碳钢矩形直梁在纯弯曲时的 E ， μ ， G 。
2. 验证胡克定律。

二、设备

1. 万能实验机
2. DH-3818 电阻应变仪
3. 直尺
4. 粘贴应变片的低碳钢矩形截面梁

三、试件

本实验采用直梁矩形截面低碳钢材料。应变片布片如图 16 所示。

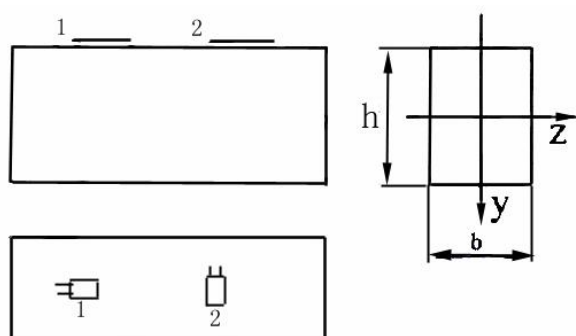


图 4-16 矩形截面梁

四、原理

矩形截面直梁在纯弯曲情况下，横截面上最大正应力公式

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W_{\max}}$$

为了实现纯弯曲，采用图 4-17 装置。

在纯弯曲段内，沿纵向粘贴两片应变片（1），沿横向粘贴应变片（2），所贴位置是梁的上、下面。

在弹性范围内，由胡克定律得

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\text{纵}}} = \frac{M}{W \cdot \varepsilon_{\text{纵}}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot F \cdot a}{W \cdot \varepsilon_{\text{纵}}}$$

其中： M —横截面弯矩

W —梁的抗弯截面模量

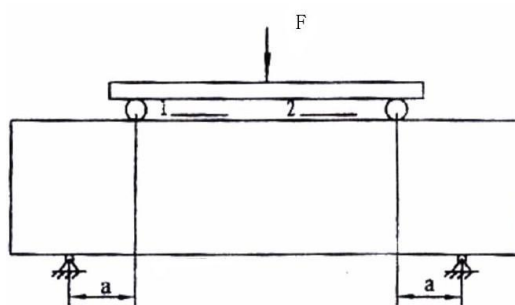


图 4-17 纯弯曲加载布置图

$\varepsilon_{\text{纵}}$ —纵向线应变

因此，本实验采用增量法，每增加等量的载荷 ΔF ，测定各点相应的应变增量 $\Delta\varepsilon$ ，然后算出各次加载后测得的应变增量的平均值，即可求出材料的弹性模量

$$E = \frac{\frac{1}{2} \cdot \Delta F \cdot a}{W \cdot \Delta\varepsilon_{\text{纵}}}$$

根据泊松比 μ 有如下公式

$$\mu = \left| \frac{\Delta\varepsilon_{\text{横}}}{\Delta\varepsilon_{\text{纵}}} \right|$$

可求出材料的泊松比

再由 $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ 可求出材料的剪切弹性模量。

五、实验步骤

1. 将试件水平放置到万能实验机的弯曲支座上，要求试件与弯曲支座水平方向要垂直。
2. 将辅助梁放置到试件上侧，要求辅助梁的形心与试件形心在一条铅垂线上。
3. 启动万能实验机，使其中横梁以 5mm/min 速度下降，当中横梁恰好接触辅助梁时，停止下降。即辅助梁与试件接触而试验力值为零。
4. 根据实验要求，按应变片的编号，将应变片引出的导线连接在应变仪相应的通道上，连接方式为 1/4 桥路。
5. 根据实验加载方案，选择合适的量程。之后将实验力值、峰值清零，应变仪上对应的 2 个通道全部清零。
6. 开始实验，选择 0.2-0.5mm/min 的速度点击方向键向下，进行加载，当载荷接近所要加载到的载荷时，用 0.05-0.1mm/min 的速度过度，当达到所加载的载荷时，用 0.005mm/min 的速度读数。
7. 读数时，一次要读取 2 个通道上的线应变值。
8. 继续增加载荷，重复步骤 6、7，直至加载完成。
9. 加载完成后，先点击停止键，再以 5mm/s 的速度上升，直至加载载荷为 0KN，在点击停止。
10. 将试件从实验机上卸下，整理实验设备，填写试验记录本。

六、数据记录

表 4-18 梁尺寸

b (mm)	h (mm)	a (mm)

表 4-19 应变读数

载荷 F (KN)	应变仪读数 ($\mu \varepsilon \times 10^{-6}$)			
	ε_1 (横向)		ε_2 (纵向)	
$F_0=$				
$F_1=F_0+\Delta F=$				
$F_2=F_1+\Delta F=$				
$F_3=F_2+\Delta F=$				
$F_4=F_3+\Delta F=$				
$F_{终}=$				
平均				

七、实验结果的处理

1. 按 $E = \frac{\Delta M}{W_z \cdot \varepsilon_{纵}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \Delta F \cdot a}{W_z \cdot \varepsilon_{纵}}$ 公式，计算材料的弹性模量。

2. 按 $\mu = \left| \frac{\varepsilon_{横}}{\varepsilon_{纵}} \right|$ 公式，计算材料的泊松比。

3. 按 $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ 公式，计算材料的剪切弹性模量。

八、问题讨论

为了提高梁的强度措施，梁应如何放置？

实验十一 组合梁的弯曲试验

一、目的

1. 用电测法测定在纯弯曲状态下两根铝合金直梁自由叠加在一起时的应力分布。
2. 验证梁的弯曲理论。

二、设备

1. 万能实验机
2. 直尺
3. DH-3818 电阻应变仪
4. 贴有应变片的铝合金直梁

三、试件

本试验选用材料为铝，横截面相同的两个矩形截面梁自由叠在一起，如图 4-18 所示。

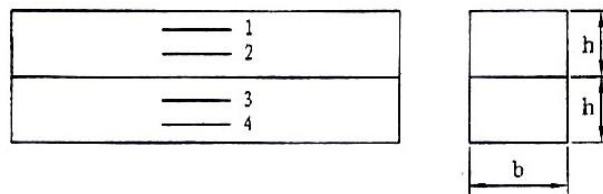


图 4-18 矩形截面自由叠梁

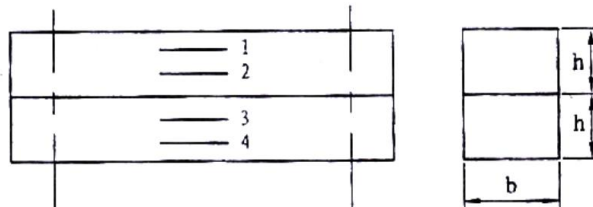


图 4-19 矩形截面两端紧固叠梁

四、原理

1. 材料相同的二梁自由叠在一起

由理论可知，整梁在纯弯曲变形时，横截面仍是平面，纵向纤维之间无挤压；在两种假设情况下，得到正应力公式。叠梁受弯曲变形后，两梁之间可自由滑动，造成上下梁截面错位，对整个截面而言不再保持平面，因此不能直接使用公式计算正应力。但对每根梁本身横截面还保持平面，因此可以对每根梁使用弯曲应力公式。各点应力按横截面高度线性分布。

本实验加载布置如图 4-20 所示。

在纯弯曲段内，沿纵向粘贴应变片。所贴位置是距上、下端面为 5mm。

本试验仍采用增量法，方法与前相同。

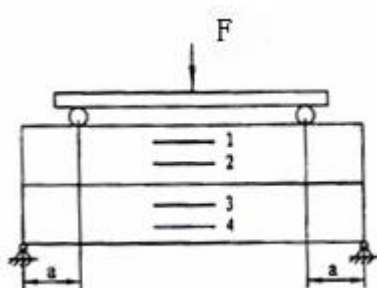


图 4-20 自由叠梁加载布置图

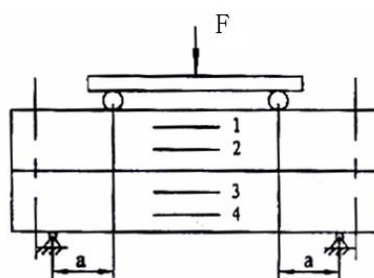


图 4-21 两端紧固叠梁加载布置图

2. 材料相同的二梁两端紧固连接在一起

两端紧固连接在一起的二梁应力分布非常复杂，自然不能使用弯曲应力公式计算应力，又因为单根梁对称截面应力并不对称分布，因此也不能象自由叠梁那样分解后再使用公式计算。我们知道，两端紧固连接时，由于连接不能使二梁成为整体，因而梁弯曲变形时，连接处有轴向力作用，因此，两端紧固连接的二梁在弯曲变形时有弯曲应力和轴力产生正应力。这两个应力不能具体解出，只能通过实验定性分析应力分布。实验加载布置如图 4-21 所示。在纯弯曲段内，沿纵向粘贴应变片。所贴位置是距上、下端面为 5mm。本试验仍采用增量法，方法与前相同。

五、实验步骤

1. 将两个试件自由叠加后放置在万能实验机的弯曲支座上，要求试件与弯曲支座水平方向要垂直。
2. 将辅助梁放置到叠加试件上侧，要求辅助梁的形心与叠加试件形心在一条铅垂线上。
3. 启动万能实验机，使其中横梁以 5mm/min 速度下降，当中横梁恰好接触辅助梁时，停止下降。即辅助梁与试件接触而试验力值为零。
4. 根据实验要求，按应变片的编号，将应变片引出的导线连接在应变仪相应的通道上，连接方式为 1/4 桥路。
5. 根据实验加载方案，选择合适的量程。之后将实验力值、峰值清零，应变仪上对应的 4 个通道全部清零。
6. 开始实验，选择 0.2-0.5mm/min 的速度点击方向键向下，进行加载，当载荷接近所要加载到的载荷时，用 0.05-0.1mm/min 的速度过度，当达到所加载的载荷时，用 0.005mm/min 的速度读数。
7. 读数时，一次要读取 4 个通道上的线应变值。
8. 继续增加载荷，重复步骤 6、7，直至加载完成。
9. 加载完成后，先点击停止键，再以 5mm/s 的速度上升，直至加载载荷为 0KN，在点击停止。
10. 将试件从实验机上卸下，整理实验设备，填写试验记录本。

六、数据记录

表 4-20 应变读数

载荷 F (kN)	应变读数 ($\mu\varepsilon \times 10^{-6}$)			
	自由叠			
	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
$F_0 =$				
$F_1 = F_0 + \Delta F =$				
$F_2 = F_1 + \Delta F =$				
$F_3 = F_2 + \Delta F =$				
$F_{终} =$				

表 4-21 梁尺寸

b (mm)	h (mm)	a (mm)	E (MPa)

七、实验结果的处理

按公式 $\Delta\sigma_{实} = E \cdot \Delta\varepsilon_{实}$ ，计算各点的应力增量的实验值。

八、问题讨论

1. 整梁、自由叠梁和两端紧固梁哪种承载能力最强？哪种最差？
2. 具有楔块的梁，应力分布与楔块连接的紧密是否有关系？

实验十二 梁弯曲变形时挠度和倾角的测定

一、目的

1. 测量直梁弯曲时的挠度 f 和倾角 θ ，并根据理论公式计算理论的挠度 $f_{\text{理}}$ 和理论的倾角 $\theta_{\text{理}}$ 。

2. 理论值与实验值分析比较误差原因。
3. 了解和掌握挠度与倾角的测试方法。

二、设备

1. 组合实验器
2. 直尺
3. 涡流位移传感器

三、试件

此采用矩形截面钢梁作为试件，它在组合装置上的受力和传感器安装如图 4-22 所示。

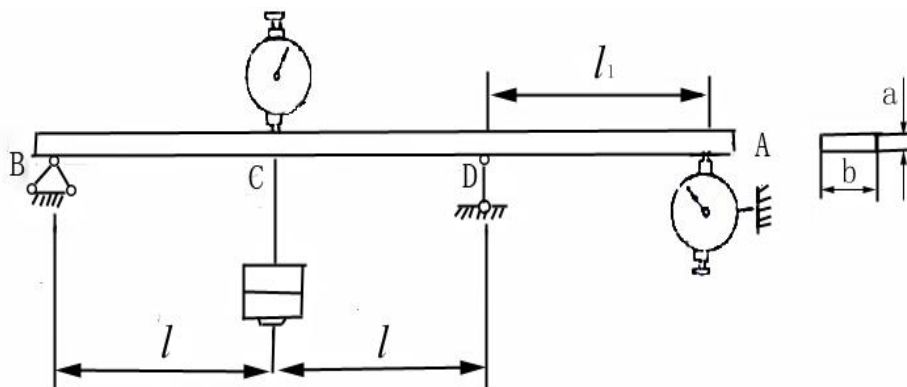


图 4-22 挠度和倾角实验简图

四、试验步骤

1. 按实验要求将试件装在相应的卡具中。
2. 在正确的位置安装涡流位移传感器
3. 测量相关数据： l_1 、 l 、 b 、 h ，并记录。
4. 激活涡流传感器，并调整传感器与试件之间的距离，使其 $\leq 0.3\text{mm}$ 。
5. 确定加载方案：加载 5 次，每次加 5N 砝码，加载方案分别为 5,10,15,20,25 (N)
6. 开始实验，过程中记录相关数据， f_A 和 f_C 。
7. 实验结束，整理实验仪器，填写实验记录本。

五、数据记录

表 4-22

荷重 F (单位: N)	A 点挠度 (单位: 0.01mm)	C 点挠度 (单位: 0.01mm)
$F_0=$		
$F_1=F_0+\Delta F=$		
$F_2=F_1+\Delta F=$		
$F_3=F_2+\Delta F=$		
$F_{终}=$		

表 4-23

E(MPa)	b(mm)	h(mm)	l (mm)	l_1 (mm)

六、实验结果处理

1. 根据表 4-22 中的数据, 计算出差值, 然后取平均, 计算出 A、C 两点的挠度, 再根据

$$\text{挠度 } f_{C_{\text{实}}} = \Delta f_c \quad \text{转角 } \theta_{D_{\text{实}}} = \frac{\Delta f_A}{l_1}$$

求出 C 点最终挠度和 D 点最终倾角的实验值。

按以下理论公式求得在 ΔP_N 作用下试件断面 C 和断面 D 上的挠度 f_c 和转角 θ_D

$$f_{c_{\text{理}}} = \frac{\Delta F_N (2l)^3}{48EI} \quad \theta_{D_{\text{理}}} = \frac{\Delta F_N (2l)^2}{16EI}$$

式中: I 一试件断面对中性轴的惯性矩。

2. 将测得的实验结果和求出的理论值记入表 4-24 中, 以便比较。

表 4-24

	挠度 f_c (mm)	倾角 θ_D (rad)
实验值		
理论值		
偏差%		

七、问题讨论

1. 在力—挠度关系曲线中, 如何得到一条直线?
2. 挠度和倾角的试验值与理论值相比, 分析误差原因。

实验十三 等强度梁正应力分析实验

一、目的

1. 利用电测法测量悬臂梁上下表面的应力。
2. 验证梁的弯曲理论。

二、仪器

1. BDCL 型材料力学多功能实验台
2. CML-1L-16 型数字力-应变综合测试仪
3. 贴有应变片的试件

三、实验原理

按等强度理论有

$$\sigma_{\max} = \frac{|M(x)|}{W(x)} = [\sigma]$$

由此得

$$W(x) = \frac{M(x)}{[\sigma]}$$

对于矩形截面，若保持厚度 h 不变，则有

$$\frac{Fx}{\frac{b(x)h^2}{6}} = [\sigma]$$

由此

$$b(x) = \frac{6F(x)}{h^2[\sigma]}$$

考虑到端部剪力影响

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \frac{F_{S\max}}{A} = \frac{3}{2} \frac{F}{hb_{\min}} = [\tau]$$

即要求

$$b_{\min} = \frac{3F}{2h[\tau]}$$

按此设计的等强度梁如图 4-23 所示, l_B 部分满足 $b(x) = \frac{Fx}{h^2[\sigma]}$, $l - l_B$ 部分为

保证足够的剪切强度, 修改成如图 4-23 所示的形状, 其宽度等于 b_2 。

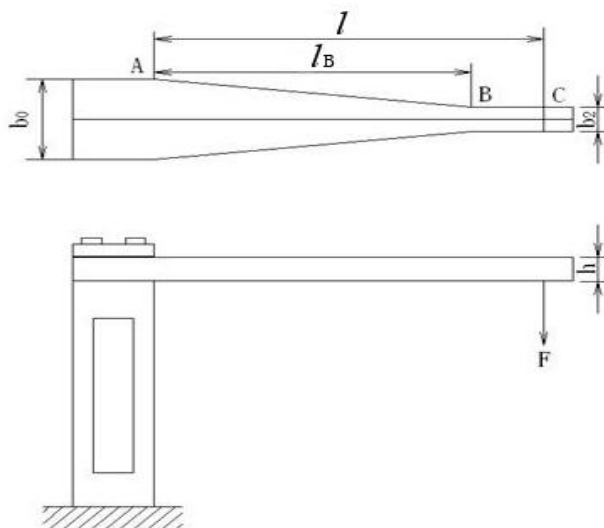


图 4-23 等强度试件及加载方式简图

将试件固定在实验台架上, 梁在纯弯曲时, 同一截面上表面产生压应变, 下表面产生拉应变, 上下表面产生的拉压应变绝对值相等。计算公式

$$\varepsilon = \frac{6FL}{Ebh^2}$$

式中: F — 梁上所加的载荷;

L — 载荷作用点到测试点的距离;

E — 弹性模量;

b — 梁的宽度;

h — 梁的厚度。

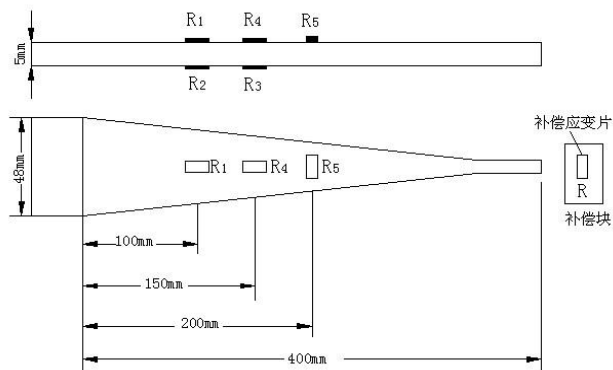


图 4-24 等强度梁布片图

在梁的上下表面分别粘贴上应变片 R_1/R_2 ；如图 24 所示，当对梁施加载荷 F 时，梁产生弯曲变形，在梁内引起应力。

四、实验步骤

1. 按照实验要求将试件装在相应卡具中。
2. 将应变片连接到应变仪的 4 个通道上，接线方式为 1/4 桥。
3. 拟定实验加载方案。
4. 根据加载方案，选择合适量程，将力-应变测试仪上力值、4 个通道的应变值清零。
5. 按照加载方向手动匀速转动加载手轮。
6. 按照加载方案读取数据并记录。
7. 加载结束，按照卸载方向手动匀速转动手轮。使力-应变综合测试仪上的力值为零。
8. 整理实验设备，填写实验记录本。

五、数据记录

表 4-25

载荷 F (kN)	应变读数 ($\mu\varepsilon \times 10^{-6}$)			
	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
$F_0=$				
$F_1=F_0+\Delta F=$				
$F_2=F_1+\Delta F=$				
$F_3=F_2+\Delta F=$				
$F_{\text{终}}=$				

表 4-26

b (mm)	h (mm)	l (mm)	E (MPa)

六、试验结果处理

1. 理论计算

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{6\Delta FL}{bh^2}$$

2. 实验值计算

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_{\text{均}}$$

3. 理论值与实验值比较

$$e = \frac{\sigma_{\text{理}} - \sigma_{\text{实}}}{\sigma_{\text{理}}} \times 100\%$$

七、问题讨论

实验产生误差的原因？

实验十四 槽钢形心、弯心观察分析实验

一、目的

1. 利用电测法测量槽钢在横力弯曲时通过形心时的切应力 $\tau_{\text{形}}$ 。
2. 利用电测法测量槽钢在横力弯曲时通过弯心时的切应力 $\tau_{\text{弯}}$ 。
3. 比较 $\tau_{\text{形}}$ 与 $\tau_{\text{弯}}$ 的大小，并分析原因。

二、设备

1. 万能实验机
2. DH-3818 电阻应变仪
3. 贴有应变片的槽钢试件

三、试件

本试验选用槽形截面梁，如图 4-25 所示。

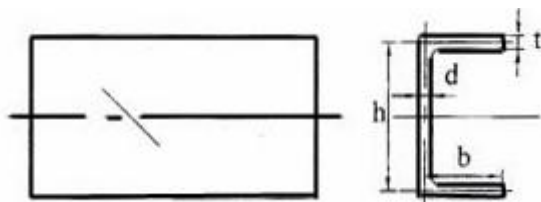


图 4-25 槽形截面梁

四、原理

1. 梁在横力弯曲时，载荷通过形心

槽形截面梁在横力弯曲、载荷通过形心时，横截面上不但有弯曲变形，还有扭转变形。梁在弯曲变形时，中性轴处横截面上正应力为零，剪应力最大；扭转变形产生剪应力，因此，槽形截面梁中性轴处横截面上剪应力是弯曲变形和扭转变形产生的。

本实验加载布置如图 4-26 所示。在中性轴处沿 45° 方向粘贴应变片。本实验仍采用增量法。方法与前相同。

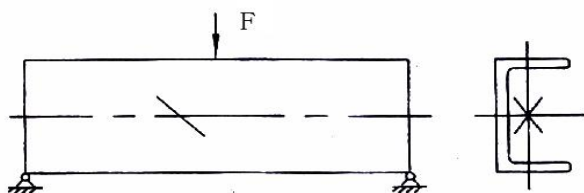


图 4-26 槽形截面梁载荷通过形心时横力弯曲加载布置图

2. 梁在横力弯曲时，载荷通过弯曲中心

对于槽形截面梁，载荷通过弯曲中心时，横截面只有弯曲变形。因此，横力弯曲时，横截面中性轴处只有剪应力，没有正应力。

本实验加载布置如图 4-27 所示。

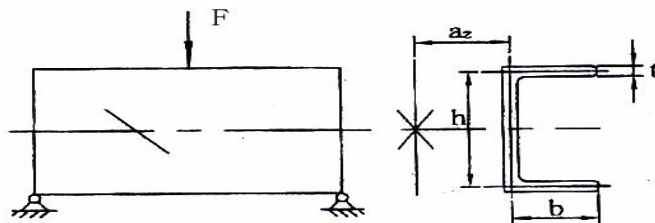


图 4-27 槽形截面梁载荷通过弯心时横力弯曲加载布置图

$$a_z = \frac{b^2 h^2 t}{4I_z}$$

其中： b —翼缘宽度

t —翼缘厚度

h —两翼缘中心线间距离

I_z —整个截面对中性轴惯性矩

1、2 二种方法，由于中性轴处横截面上应力状态为纯剪切应力状态， 45° 方向主应力与剪应力相等，因此，沿 45° 方向粘贴应变片，测得线应变 ε_{45° 。

根据广义胡克定律得

$$\varepsilon_{45^\circ} = \frac{1}{E} [\sigma_{45^\circ} - \mu \sigma_{45^\circ \pm 90^\circ}]$$

所以

$$\begin{aligned} \varepsilon_{45^\circ} &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu \sigma_3] = \frac{1}{E} [\tau - \mu(-\tau)] \\ &= \frac{1}{E} [\tau + \mu\tau] = \frac{1}{E} \cdot (1 + \mu) \cdot \tau \end{aligned}$$

$$\tau = \frac{E \cdot \varepsilon_{45^\circ}}{1 + \mu}$$

五、实验步骤

1. 将试件水平放置到万能实验机的弯曲支座上，要求试件与弯曲支座水平方向要垂直。
2. 要求弯曲支头的中心与试件形心在一条铅垂线上。
3. 启动万能实验机，使其中横梁以 5mm/min 速度下降，当弯曲支头恰好试件时，停止下降。即弯曲支头与试件接触而试验力值为零。
4. 根据实验要求，将应变片引出的导线连接在应变仪相应的通道上，连接方式为 1/4 桥路。
5. 拟定实验方案选量程 10KN，之后将实验力值、峰值清零，应变仪上对应的 1 个通道清零。
6. 开始实验，选择 0.2mm/min 的速度点击方向键向下，进行加载，当载荷接近所要加载到的载荷时，用 0.05mm/min 的速度过度，当达到所加载的载荷时，用 0.005mm/min 的速度读数。

7. 记录数据：读数时，一次要读取 1 个通道上的线应变值。
8. 继续增加载荷，重复步骤 6、7，直至加载完成。
9. 加载完成后，先点击停止键，再以 5mm/s 的速度上升，直至加载载荷为 0KN，再点击停止。
10. 将弯曲支头的中心与试件弯心在一条铅垂线上。然后重复 3-9 步在弯心处再做一次。
11. 将试件从实验机上卸下，整理实验设备，填写试验记录本。

六、数据记录

表 4-27

E(MPa)	μ	d(mm)	$I_z(\text{mm}^4)$	$S_z^*(\text{mm}^3)$	I_z : S_z^* (mm)

表 4-28

荷重 F (单位: N)	应变 ($\mu \varepsilon \times 10^{-6}$)	
	ε_1 (形心)	ε_2 (弯心)
$F_0 =$		
$F_1 = F_0 + \Delta F =$		
$F_2 = F_1 + \Delta F =$		
$F_3 = F_2 + \Delta F =$		
$F_{终} =$		

七、实验结果处理

1. 二种方法分别测得 ε_1 、 ε_2 根据以下公式计算出剪应力，并进行比较。

$$\tau = \frac{E \cdot \varepsilon_{45^\circ}}{1 + \mu}$$

八、问题讨论

1. 梁在横力弯曲时，载荷通过形心时应力较大，为什么？
2. 实验过程中，有哪些新见解？

实验十五 直梁横力弯曲时最大切应力的测量

一、目的

1. 电测法测量直梁横力弯曲时，横截面上的最大剪应力。

二、设备

1. 万能实验机 2. 直尺 3. DH-3818 电阻应变仪 4. 贴有应变片的矩形直梁

三、试件

采用低碳钢制成的矩形截面梁如图 4-28 所示。

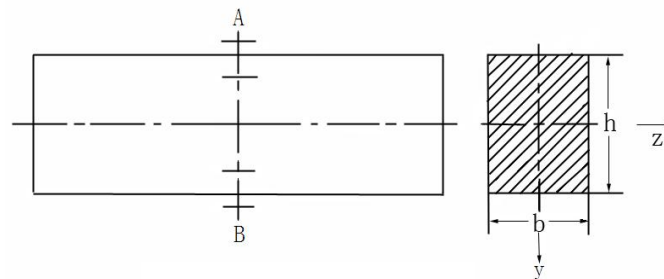


图 4-28 矩形截面梁

四、原理

矩形截面梁在横力弯曲时，横截面中性轴处正应力为零，剪应力最大，在中性轴处取微小正六面体，单元体及主单元体见图 4-29 所示。

由理论可知， 45° 方向主应力与剪应力相等，因此，在中性轴 45° 方向粘贴应变片，由电阻应变仪测得 45° 方向线应变 ε_{45° ，根据广义虎克定律得：

$$\varepsilon_{45^\circ} = \frac{1}{E} [\sigma_{45^\circ} - \mu \sigma_{45^\circ \pm 90^\circ}] = \frac{1}{E} [-\tau - \mu \tau]$$
$$\therefore \tau_{\max} = -\frac{E \cdot \varepsilon_{45^\circ}}{1 + \mu}$$

五、实验步骤

1. 将试件水平放置到万能实验机的弯曲支座上，要求试件与弯曲支座水平方向要垂直。
2. 要求弯曲支头的中心与试件形心在一条铅垂线上。
3. 启动万能实验机，使其中横梁以 5mm/min 速度下降，当弯曲支头恰好接触试件时，停止下降。即弯曲支头与试件接触而试验力值为零。
4. 根据实验要求，按应变片的编号，将应变片引出的导线连接在应变仪相应的通道上，连接方式为 1/4 桥路。

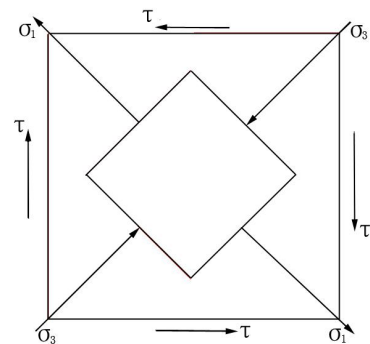


图 4-29 中性轴处单元体及主单元体

5. 根据实验加载方案，选择合量程 20KN。之后将实验力值、峰值清零，应变仪上对应的 1 个通道清零。

6. 开始实验，选择 0.2-0.5mm/min 的速度点击方向键向下，进行加载，当载荷接近所要加载到的载荷时，用 0.05-0.1mm/min 的速度过度，当达到所加载的载荷时，用 0.005mm/min 的速度读数。

7. 记录数据：读数时，一次要读取 1 个通道上的线应变值。

8. 继续增加载荷，重复步骤 6、7，直至加载完成。

9. 加载完成后，先点击停止键，再以 5mm/s 的速度上升，直至加载载荷为 0KN，再点击停止。

10. 将试件从实验机上卸下，整理实验设备，填写试验记录本。

六、数据记录

表 4-29

载荷 F (KN)	应变 ($\mu\varepsilon \times 10^{-6}$)	
	ε	$\Delta \varepsilon$
$F_0=$		
$F_1=F_0+\Delta F=$		
$F_2=F_1+\Delta F=$		
$F_3=F_2+\Delta F=$		
$F_{终}=$		
平均		

七、实验结果的处理

1. 在每个载荷作用下，读出 ε ，然后取平均值 $\Delta \varepsilon$ ，根据

$$\text{求出最大剪应力 } \tau_{\max} = -\frac{\Delta \varepsilon_{45^\circ} \cdot E}{1 + \mu}$$

实验十六 低碳钢试件在偏心拉伸时横截面应力分析

一、目的

1. 电测法测量低碳钢扁形试件在偏心拉伸时的实际应力。
2. 利用理论公式计算其理论值与实际值比较，分析误差原因。

二、设备与仪器

1. CML-1L-16 型数字力-应变综合测试仪
2. BDCL 材料力学多功能实验台
3. 游标卡尺
4. 直尺

三、试件

本实验以扁试件为例，如图 4-30 所示

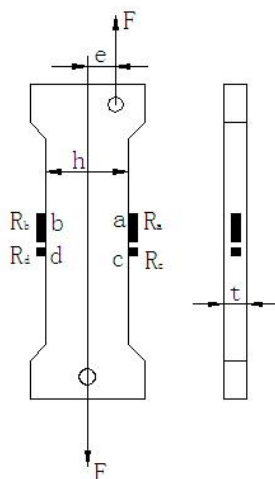


图 4-30 试件及应变片分布简图

四、原理

在弹性范围内，材料在外力通过试件轴线拉伸时，横截面上产生的正应力沿截面宽度均匀分布。当外力偏心拉伸时，由于有弯曲和拉伸两种变形，弯曲变形产生的正应力在横截面上沿宽度线性分布，因此，得到的正应力是拉伸与弯曲两种变形产生正应力叠加。

为了得到正应力在横截面上沿宽度分布情况，在试件上贴有如图 4-30 所示应变片，加一定载荷后，由电阻应变仪测出各点的线应变 ε ，由于横截面上无剪应力（弯曲变形产生剪应力忽略），是单向应力状态，因此，根据单向虎克定律求出正应力 σ

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

本次实验仍采用增量法，每增加等量的载荷 ΔF ，测定各点相应的应变 ε_i ，最后求出每个点应变增量的平均值 $\Delta \varepsilon$ ，则可按下式算出各点应力值

$$\sigma = E \cdot \Delta \varepsilon_{\text{平均}}$$

采用图 4-30 所示的偏心拉伸试件，材质为低碳钢材料。

五、实验步骤

1. 试件准备：在试件的标距范围内，测量横截面处的尺寸 b 、 h ，试件的横截面面积

$$A_0 = b \cdot h$$

其中： b —试件宽度

h —试件厚度

2. 安装试件：把试件安装在多功能实验台的偏心装置的固定夹头内，摇动加载手柄，使安装活动夹头上的另一端达到适当位置，为了便于量取载荷 F 与试件轴线偏离距离，使试件一端面与夹具最外端对齐，然后量取偏离距离 a 。

3. 拟定加载方案

按照理论公式来估算最终载荷

$$\sigma_{\max} = \frac{F}{A_0} + \frac{Fa}{W_z}$$

其中：

$$A_0 = b \cdot h \quad W_z = \frac{hb^2}{6}$$

σ_{\max} 的值应取屈服极限的 70—80%，计算出 F 为最终载荷。初载荷仍取所用力量程的 10%或稍大于此值。

4. 接线和电阻应变仪的准备，根据线路要求，按应变片的编号将应变片的引出导线按照顺序接在应变仪的 3 个通道上连成桥路。连接方式为 1/4 桥路。

5. 根据加载方案，选用合适的测力量程。将力-应变综合测试仪上的力值、3 个通道的应变值清零。

6. 检查，请教师检查以上步骤完成情况。

7. 进行实验，选择合适的加载速度缓慢加载。按照加载方向手动匀速转动加载手轮。

8. 按照加载方案读取数据并记录。

9. 加载结束，按照卸载方向手动匀速转动加载手轮。使力-应变测试仪上的力值为零。

10. 整理实验设备，填写实验记录本

六、数据记录

表 4-30

载荷 F (N)	应变读数 ($\mu \varepsilon \times 10^{-6}$)		
	ε_1	ε_2	ε_3
$F_0 =$			
$F_1 = F_0 + \Delta F =$			
$F_2 = F_1 + \Delta F =$			
$F_3 = F_2 + \Delta F =$			
$F_{终} =$			

七、实验结果的处理

1. 按 $\sigma = E \cdot \Delta \varepsilon$ 计算各点的应力实验值。
2. 按照理论公式来计算各点的应力理论值，然后与实验值比较，分析误差原因。

$$\sigma_{\max} = \frac{F}{A_0} + \frac{Fa}{W_z}$$

其中：

$$A_0 = b \cdot h \quad W_z = \frac{hb^2}{6}$$

3. 将这些实验值画在方格纸上，横坐标表示各点位置，纵坐标表示正应力，由此得到应力沿截面宽度分布情况。

八、问题讨论

1. 在弹性范围内，外力通过试件轴线拉伸和偏心拉伸时，应力沿截面宽度分布有何不同？
2. 在偏心拉伸时，求各点应力，为什么能用 $\sigma = E \cdot \Delta \varepsilon$ 公式来计算？

实验十七 弯扭组合变形时主应力的分析

一、目的

1. 学习用实验的方法测定圆轴扭转时在平面应力状态下主应力的方向。
2. 计算理论的应力值与实验值比较，分析误差原因。
3. 学习电测应力分析的方法。

二、设备

1. BDCL 材料力学多功能实验台
2. CML-1L-16 型数字力-应变综合测试仪
3. 直尺

三、原理

由平面应力状态的解析公式可知

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \cos 2\alpha - \tau_x \cdot \sin 2\alpha \quad (1)$$

$$\tau_{\alpha} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \sin 2\alpha + \tau_x \cdot \cos 2\alpha \quad (2)$$

由于电阻应变片只能感应正应力，因此，仅考虑上面的（1）式。且以主应力状态为原始状态如图 4-31 所示，则有

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha \quad (3)$$

（3）式中有 4 个量 σ_{α} 、 σ_1 、 σ_2 和 α 。如果把 σ_{α} 作为测得的已知量，（3）式中将会有三个未知量，即主应力 σ_1 、 σ_2 和代表主方向的角 α （它是已知测定方向和主应力方向的夹角），从理论上讲，如果在某点处沿三个已知方向测出 σ_{α_1} 、 σ_{α_2} 和 σ_{α_3} 三个量，那么利用（3）式，就可以得到三个方程，组成一个三元一次方程组，即可解出 σ_1 、 σ_2 和 α 。

在实际测试中，在该点处沿三个确定方向粘贴应变片，一般采用三个电阻应变片组成的应变花。常用的应变花有 60° 和 45° 两种，见图 4-31 所示，然而应变片测得的是应变值，这就需要利用广义虎克定律，分别把 ε_{α_1} 、 ε_{α_2} 和 ε_{α_3} 转换成应力值。即

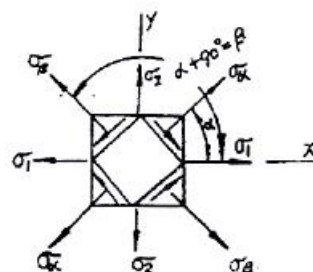


图 4-31 主应力为原始状态

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\alpha} &= \frac{1}{E} [\sigma_{\alpha} - \mu \sigma_{\alpha+90^\circ}] \\ \varepsilon_{\alpha+90^\circ} &= \frac{1}{E} [\sigma_{\alpha+90^\circ} - \mu \sigma_{\alpha}] \end{aligned} \quad (4)$$

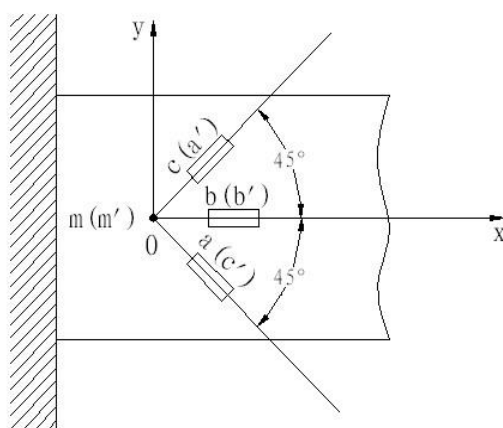


图4-32 应变花示意图

(4) 式中

$$\begin{aligned}\sigma_{\alpha+90^\circ} &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2(\alpha + 90^\circ) \\ &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha\end{aligned}\quad (5)$$

因此，根据应变花粘贴方向，测得相应方向应变值，然后设主应力方向及主应力与各应变片方向夹角，见图 4-32 所示，再由 (3)、(4)、(5) 式经过一定的代数推算，得到以下计算公式。式中以脚标 a、b、c 代替 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 。

45° 应变花

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_1}{\sigma_2} &= \frac{E}{2(1-\mu)}(\varepsilon_a + \varepsilon_c) \pm \frac{E}{2(1+\mu)}\sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + [2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)]^2} \\ \alpha_1 &= \frac{1}{2} \arctan \frac{-2\varepsilon_b + \varepsilon_a + \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c}\end{aligned}\quad (6)$$

因此，只要测出 ε_a 、 ε_b 、 ε_c ，由 (6) 式就可以得到主应力的大小和方向。

注意：在推导公式 (6) 过程中，设主应力方向不一定是 σ_1 ，根据实验最后结果，

计算是 σ_1 、 σ_2 或 σ_3 。

四、实验步骤

1. 试件准备：按照实验要求将试件安装在相应位置。
2. 测量试件相关尺寸， D 、 d 、 E 、 μ 、 l_1 、 l 、 c ，为计算其主应力的理论值做准备。

3. 拟定加载方案。根据设计要求初载荷大于等于 50N，终载荷小于等于 450N。
4. 将试件和补偿块上的应变片导线按 1/4 桥接法，将应变片的引出导线按顺序接在应变仪的 3 个通道上连成桥路。
5. 根据加载方案，选用合适的测力量程。将力-应变综合测试仪上的力值、3 个通道的应变值清零。
6. 检查，请教师检查以上步骤完成情况。
7. 进行实验，选择合适的加载速度缓慢加载。按照加载方向手动匀速转动加载手轮。
8. 按照加载方案读取数据并记录。
9. 加载结束，按照卸载方向手动匀速转动加载手轮。使力-应变综合测试仪上的力值为零。
10. 整理实验设备，填写实验记录本。

五、数据记录

表 4-31

编号	$a (-45^\circ)$		$b (0^\circ)$		$c (45^\circ)$	
载荷 F (N)	应变仪读数 ($\mu\epsilon \times 10^6$)	读数差	应变仪数 ($\mu\epsilon \times 10^6$)	读数差	应变仪读数 ($\mu\epsilon \times 10^6$)	读数差
$F_0 =$						
$F_1 = F_0 + \Delta F =$						
$F_2 = F_1 + \Delta F =$						
$F_3 = F_2 + \Delta F =$						
$F_{终} =$						
读数差平均值	$\Delta \epsilon_a$		$\Delta \epsilon_b$		$\Delta \epsilon_c$	

六、实验结果的处理

1. 将观察记录填入表 4-31 中；
 2. 按 (6) 式计算主应力的实验值 σ_1 ， σ_2 或 σ_3 和 α ；
 3. 按下式计算相应主应力的理论值。
- 从理论上

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad \text{弯曲正应力,} \quad \tau = \frac{T_n}{W_p} \quad \text{扭转剪应力}$$

其中
$$W = \frac{\pi d^3}{32} \quad , \quad W_p = \frac{\pi d^3}{16}$$

其主应力：

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1}{2}(\sigma \pm \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2})$$

$$\alpha = -\frac{1}{2} \arctan \frac{2\tau}{\sigma}$$

4. 两者进行比较，分析误差原因。
5. 画出测得点初始单元体及主单元体。

七、问题讨论

1. 平面应力状态下，主应力方向未知时，贴一个单片或两个应变片来测主应力大小和方向行不行？
2. 对这次实验有哪些收获、体会及意见？

实验十八 静不定梁的分析

一、目的

1. 用实验方法测定静不定梁支座的约束反力。
2. 计算理论的约束反力值与实验值进行比较，分析误差原因。
3. 学习测试方法。

二、设备

1. 组合实验器
2. 涡流位移传感器
3. 直尺
4. 游标卡尺

三、试件

试件受力和传感器安装简图如图 4-33 所示。

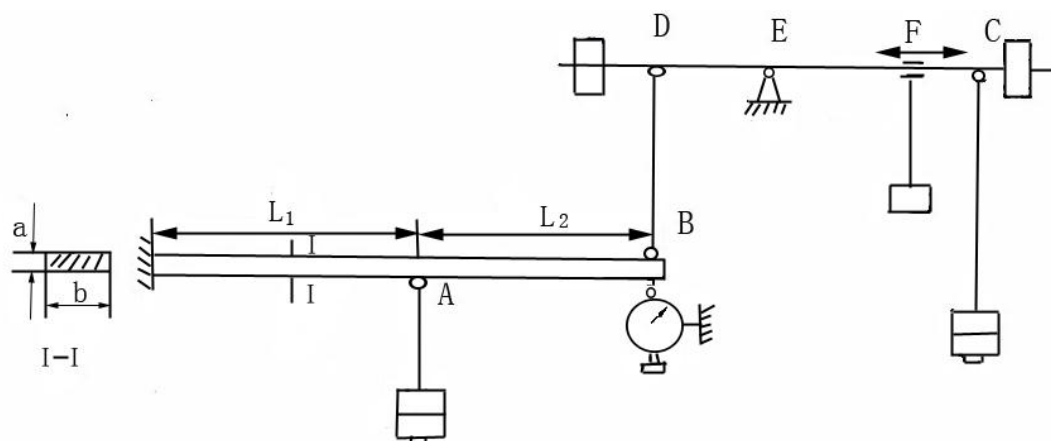


图 4-33 静不定梁装置简图

四、实验步骤

1. 将试件，涡流位移传感器，加力杠杆按预先设计好的位置安装在相应的夹具中。
2. 测量并记下有关数据： l_1 、 l_2 、ED、EC 以及试件断面尺寸 a、b 和弹性模量 E 。
3. 在未加所有砝码前，调整加力杠杆两端平衡砣的位置，使试件右端 B 点上的支座反力为 0。即加力杠杆保持平衡。
4. 激活涡流位移传感器，调整传感器与试件之间的间隙为 1.5mm 左右。
5. 在试件中部 A 处加 5N 砝码 2-3 个使其端部产生挠度，为了使涡流位移传感器上的读数返回到原先读数，先在加力杠杆的右端 C 处加 1N 的砝码 n 个，然后再加力杠杆 E 处加 1N 砝码 n 个，将其左右移动来微调，直到涡流位移传感器读数回到原来读数。使挠度消失。

6. 最后,显然,在此情况下试件的受力情况即为如图所示的静不定梁。在 B 点处的多余约束支反力即为 BD 杆中的拉力。

7. 记录 Q_c 、 Q_a 、 Q_f 、 EF 的数值。

8. 结束实验,整理实验用具,填写实验记录本。

五、数据记录

表 4-32

载 荷 $Q_c(N)$	载 荷 $Q_f(N)$	载 荷 $Q_a(N)$	$FE(mm)$	$DE(mm)$	$l_1(mm)$	$l_2(mm)$	$a(mm)$	$b(mm)$	$EC(mm)$	$E(MPa)$

六、实验结果处理

1. 根据平衡原理, B 点上的约束支反力为:

$$F_R = \frac{F_c \cdot CE + F_f \cdot FE}{DE}$$

式中: F_c , F_f 为对应于砝码 7, 6 的重力。

2. 根据静不定理论, 计算出 B 点处的约束支反力 F_R 。记录数据见表 4-32 所示。

3. 两者相比较,分析误差原因。

实验十九 压杆稳定实验

一、目的

1. 观察细长杆件在轴向压力作用下的失稳现象。
2. 用实验方法测定两端铰支时压杆的临界载荷 F_{cr} ，并与其理论计算值进行比较,分析误差原因。
3. 学会绘制 $F - f$ 的关系曲线图。

二、设备

1. 组合实验器
2. 涡流位移传感器
3. 直尺
4. 游标卡尺

三、原理

对于轴向受压的理想细长直杆，按小变形理论其临界载荷可由欧拉公式求得

$$F_{cr} = \frac{\pi EI}{(\mu l)^2}$$

式中： E —材料的弹性模量；

I —压杆横截面的惯性矩；

l —压杆的长度；

μ —长度系数,对于两端铰支的情况， $\mu = 1$ 。

图 34 (a) 中 AB 水平线与 F 轴相交的 F 值，即为依据欧拉公式计算所得的临界力 F_{cr} 的值。在 A 点之前，当 $F < F_{cr}$ 时压杆式中保持直线形式，处于稳定平衡状态。在 A 点， $F = F_{cr}$ 时，标志着压杆丧失稳定平衡的开始，压杆可在微弯的状态下维持平衡。

在 A 点之后，当 $F > F_{cr}$ 时压杆将丧失稳定而发生弯曲变形。因此， F_{cr} 是压杆由稳定平衡过渡到不稳定平衡的临界力。

实际实验中的压杆，由于不可避免地存在初曲率，材料不均匀和载荷偏心等因素影响，由于这些影响，在 F 远小于 F_{cr} 时，压杆也会发生微小的弯曲变形，只是当 F 接近 F_{cr} 时弯曲变形会突然增大，而丧失稳定。

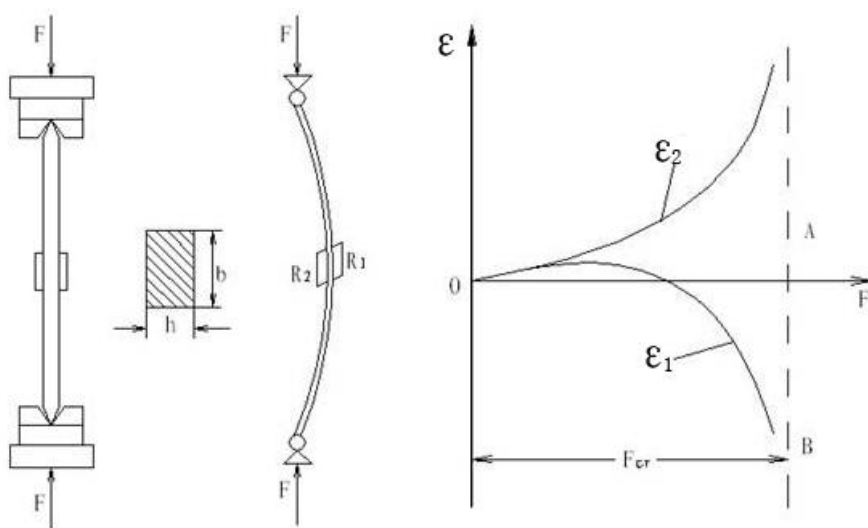


图 4-34 试件、应变片布片及变形曲线简图

实验测定 F_{cr} 时，可采用本材料力学多功能试验装置中压杆稳定试验部件，该装置上、下支座为 V 型槽口，将带有圆弧尖端的压杆装入支座中，在外力的作用下，通过能上下活动的上支座对压杆施加载荷，压杆变形时，两端能自由地绕 V 型槽口转动，即相当于两端铰支的情况。利用电测法在压杆中央两侧各贴一枚应变片 R_1 和 R_2 ，如图 4-34

(a) 所示。假设压杆受力后如图标向右弯曲情况下，以 ε_1 和 ε_2 分别表示应变片 R_1 和 R_2 左右两点的应变值，此时， ε_1 是由轴向压应变与弯曲产生的拉应变之代数和， ε_2 则是由轴向压应变与弯曲产生的压应变之代数和。

当 $F \ll F_{cr}$ 时，压杆几乎不发生任何弯曲变形， ε_1 和 ε_2 均为轴向压缩引起的压应变，两者相等，当载荷 F 增大时，弯曲应变 ε_1 则逐渐增大， ε_1 和 ε_2 的差值也愈来愈大；当载荷 F 接近临界力 F_{cr} 时，二者相差更大，而 ε_1 变成为拉应变。故无论 ε_1 还是 ε_2 ，当载荷 F 接近临界力 F_{cr} 时，均急剧增加。如用横坐标代表载荷 F ，纵坐标代表压应变 ε ，则压杆的 $F - \varepsilon$ 关系曲线如图 4-34 (a) 所示。从图中可以看出，当 F 接近 F_{cr} 时， $F - \varepsilon_1$ 和 $F - \varepsilon_2$ 曲线都接近同一水平渐近线， A 点对应的横坐标大小即为实验临界压力值。

四、试验步骤

1. 将试件按照实验要求安装在相应的卡具中。
2. 记录并测量有关数据： l , a , b , AB , AD 和材料的弹性模量 E 。
3. 将涡流位移传感器的探头放在细长杆件的中心 E 处,并尽量保持与试件表面垂直
4. 在未加砝码前, 调整加力杠杆两端的平衡砣。使试件的轴向力 F_A 为零。即加力杠杆保持平衡。
5. 激活涡流位移传感器, 并调整涡流位移传感器与试件之间的距离, 使其 $\leq 0.3\text{mm}$ 。
6. 加载: 先逐次在加力杠杆的 B 处加砝码, 每加一个砝码 (1N), 记下涡流位移传感器读数 f_E 。直到试件失稳为止。
7. 实验结束, 先取下砝码, 在取下试件。
8. 整理实验设备, 填写实验记录本。

五、数据记录

表 4-33

N_0	砝码重 (N)	涡流位移传感器读数 (0.01mm)
	Q_B	f_E
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

六、实验结果的处理

1. 根据试验结果, 在方格纸上绘出 F_A — f_E 曲线, 并根据平衡原理此确定 F_{cr} 。
2. 根据欧拉公式, 计算理论临界载荷。两者进行比较。
3. 观察记录结果见表 4-33 所示。

七、问题讨论

1. 压缩实验与压杆稳定实验性质有何不同?
2. 为什么说欧拉公式是在小变形条件下导出的?

附录

实验报告主要内容

1. 实验名称、编组号，完成日期。
2. 所用机器、仪器及量程。
3. 试件受力简图、有关尺寸、应变片粘贴部位等。
4. 实验原理、实验步骤
5. 实验有关曲线图。（如拉伸图，压杆失稳 $F - f$ 图等）。
6. 实验记录数据表。
7. 实验结果。
8. 理论计算结果。
9. 问题讨论。