



信陽師範大學
Xinyang Normal University

材 料 力 学
实 验 指 导

建筑与土木工程学院

2023 年 6 月

前 言

本讲义为满足我院材料力学实验教学的需要于 2022 年编写的，在第一版和第二版基础上做了适当修改。其主要目的是使讲义与材料力学实验室的新设备相符以及使同学们能够对力学实验原理和方法有较深的理解和认识。

本讲义共分五章，第一章绪论介绍材料力学实验的意义、任务、特点和要求；第二章结合我院材料力学实验室具体情况对材料力学常用设备进行较为详细的介绍；第三章介绍电阻应变片测量技术；第四章依据材料力学实验大纲对相关实验的实验目的、实验原理、实验步骤、实验报告的要求等做了逐一介绍；第五章介绍实验数据的处理方法。此外，根据材料力学实验大纲的要求编写了《材料力学实验报告》，作为配套用书。

本讲义虽然基本上达到了教学要求，但由于时间紧迫、水平有限，编写的过程比较仓促，还有一些不妥之处，恳请批评指正。

目 录

前 言.....	II
材料力学实验守则.....	1
1 绪论.....	2
2 试验设备及测试仪器.....	4
2.1 材料试验机简介.....	4
2.2 液压式万能材料试验机.....	4
2.3 微机控制电子式万能材料试验机.....	7
2.4 XL3418T 型材料力学创新组合试验台.....	9
2.5 扭转试验机.....	10
2.6 静态电阻应变仪.....	11
3 电阻应变片测量技术.....	15
3.1 电阻应变片的工作原理及分类.....	15
3.2 电阻应变片的工作特性.....	17
3.3 电阻应变片的粘贴工艺.....	21
3.4 应变电桥原理.....	22
3.5 电桥接法.....	24
3.6 静态应变测量.....	27
4 材料力学实验.....	32
4.1 拉伸试验.....	32
4.2 压缩试验.....	37
4.3 电测法测定材料的弹性常数 E 和 μ	40
4.4 扭转实验.....	42
4.5 矩形截面梁弯曲正应力电测实验.....	45
4.6 薄壁圆管在弯曲和扭转组合变形下的主应力测定.....	48
4.7 弹性压杆稳定实验.....	50
5 实验数据处理.....	52
参考文献.....	54

材料力学实验守则

1、实验前必须预习实验指导书中相关的内容，了解本次实验的目的、要求及注意事项。

2、按照排定的时间进行实验，不得迟到。

3、进入实验室后，不得高声喧哗和擅自乱动仪器设备，应遵守实验室规则，保持室内安静、整洁。不准乱丢纸屑，不准随地吐痰。

4、未听实验指导教师讲解设备使用之前，不得操作仪器设备。若未按操作规程操作仪器，导致仪器损坏者，将按学校有关规定进行处理。

5、实验时应注意安全，爱护仪器、设备按照指定的方法、步骤进行实验，如有故障，应立即停止操作，关闭电源，及时报告老师处理，排除故障后，方能继续实验。

6、实验过程中，同组同学要相互配合，认真测取和记录实验数据。

7、实验结束后，将仪器、工具清理摆正。不得将实验室的工具、仪器、材料等物品携带出实验室。

8、实验完毕，实验数据经教师认可后方可离开实验室。

9、认真独立做好实验报告，数据要独立整理、计算，图表要清晰、整齐，并认真回答问题，实验报告要按时上交。

1 绪论

1.1 材料力学实验的意义和任务

实践是理论的基础，科学实验是进行科学研究的重要手段。材料力学的内容和理论清楚表明，它是在实验观察的基础上，经过科学抽象，抓住主要事实，由表及里，去伪存真，将真实材料理想化、实际构件典型化、公式推导假设化的一门学科。它的理论结果是否正确，能否在工程实际中应用，只有通过进一步的实验验证才能断定。在结构设计和新材料开发中，也需要了解材料的力学性能参数，这些数据要通过材料的力学试验进行测定。在工程实际中，构件的几何形状、受力条件和支承条件往往是十分复杂的，这些构件的强度、刚度计算仅靠理论分析的方法难以得到正确结果，除了使用有限元等数值方法外，使用实验应力分析的方法是解决此类难题的可靠途径。

材料力学实验是材料力学课程的一个重要教学环节，重在通过这一环节不但可使学生巩固和深化对材料力学理论的学习和掌握，而且使学生学会材料各种力学性能的测试方法，熟悉常用的应力分析方法和各种仪器设备的正确使用操作方法，锻炼动手能力，培养独立分析解决问题的能力 and 科学严谨的工作态度。

由此可见，材料力学实验的主要任务是：

- 1、通过试验测定和验证典型工程材料的各种力学性能，并使学生掌握符合国际规定的一般试验方法；
- 2、通过实验验证材料力学中的重要理论，并使学生从中了解和熟悉常用的应力分析方法；
- 3、通过试(实)验，使学生熟悉和掌握常用试验仪器设备的正确使用及其操作方法；
- 4、通过实验课教学和课外作业的完成，培养学生独立分析解决问题的能力 and 科学严谨、实事求是的工作态度。

1.2 材料力学实验的特点和要求

实验课不同于课堂的理论教学。首先，学生面对陌生的仪器设备，必须在有限的时间内亲手操作，给试样加载，同时观测其变形，获取实验数据，甚至拿出实验结果，这一切离开实验条件就无法进行；再则，实验教学存在设备安全甚至人身交全问题，特别是材料力学实验，有时对试件所加的载荷比较大，存在一定的危险性，这就要求学生必须严格遵守实验规则和仪器设备的操作规程；最后，在进行实验时力和变形要同时测试，一般需要几个人相互配合才能很好地完成实验全过程。这就要求学生有明确的岗位职责，在实验的每个环节都必须严谨认真，并发挥分工协作的团队糟神。否则就不可能得到正确的实验结果，有效地完成实验任务。

根据上述实验课的特点，同学们应达到以下几个方面要求：

- 1、实验课前每位同学都必须明朗本次实验的目的、原理和步骤，了解所使用试验机、仪器等的基本构造原理和操作规程，了解所测试试样的材料、形状和公差要求，进行充分的预习和实验准备，并应写出预习报告。
- 2、在实验之前，要检查试验机测力度盘指针是否对准零点，试件安装是否正确，电测仪表接线是否正确等，并拟定好相应的加载方案。根据试样所能承受的最大载荷，选择适当的量程，注意其最大载荷不得超过试验机所选量程的 80%，

以保证试验机有足够的灵敏度和示值精度。静载实验的加载速率应缓慢、均匀，严格按照相关国家标准或国际标准的规定进行。

3、实验过程中应精心操作，细心观察，测量和记录各种实验现象及数据。若出现异常现象应及时报告指导教师并作好原始记录。在实验中还应提倡主动思索，发挥独立思考能力，使理论与实际联系起来。对实验中发现的可疑现象和数据可以重复测试、重复观察并分析其产生的原因再决定取舍，但无论取或舍都必须保持原始记录。

4、实验结束要及时编写实验报告。实验报告的内容应包含：实验名称，实验日期，实验目的，原理简述，使用的仪器设备的名称，实验数据的记录，数据处理，误差分析及结论等。实验数据要用数学归纳法进行整理，并注意有效数字修正。对材料常数的确定，常用增量平均值法处理。

5、对试样变形的量测，一般由于弹性变形很小，需用变形仪器进行放大测量，因此应了解其构造原理、使用方法和放大倍数。在选用时，要注意使实验中最小变形值远大于变形仪上的最小刻度值，而最大变形值则不得超过变形仪满量程的 80%。

以上诸条件是实验成功所必备的基本条件和主要要求，在实验全过程中都必须严格遵守。

1.3 材料力学实验的发展趋势

1、实验技术向广度和深度发展。广度：如日益广泛地应用电阻应变测量技术，使得从真空到高压，从深冷到高温，从静态到高频条件下的应变，都可获得有效的测量数据。又如把经典方法和新兴科学技术结合起来(全息干涉法，全息光弹性法，散斑干涉法，声发射技术等)，不断增加测试手段，扩大了测量和应用范围，或提高了测试精度。深度：开展宏观和微观相结合的实验研究，深入探索失效机理和各种影响材料强度因素的规律性。

2、实验装备的自动化。在实验数据的采集、处理、分析和控制方面实现计算机化。如大型动载实验，已能做到实时的数据处理，大大缩短实验周期，及时提供准确的实验分析数据和图表。即使是多年来难以实现自动化的光弹性仪，也已出现多种光弹性自动测试装置的方案。

3、随着计算机及有限元分析和其他数值分析方法的应用，材料力学实验正朝着实验与计算相结合、物理模型与数学模型相结合的方向发展。

2 试验设备及测试仪器

2.1 材料试验机简介

在材料力学实验中，一般都要对试样施加荷载，这种加载用的设备称为材料试验机，试验机按加载速度来分可分为静荷试验机和动荷试验机；按工作条件又可分为常温、高温和低温试验机；按试样的变形形式又可分为拉力、压力、扭转、冲击、疲劳等试验机。如果同一台试验机能兼做拉伸、压缩和弯曲等多种试验，则称之为万能材料试验机。按试验机的加载、测载方式来分，试验机还分为机械式、液压式和电子式等。随着电子技术的迅速发展，各种电子式的试验机得到扩大应用，它融精密控制与精密测量为一体，使试验机性能大大提高，同时也杜绝了人工判读出错现象。

传统试验机一般都由两大部分(从原理上分)组成，即加载部分和测量部分：多数的测量部分中包括自动绘图装置，它在加载过程中可自动绘出试样所受的载荷与受形之间的关系曲线。而现代电子试验机的测试自动化程度比较高，一般由机械加载部分和测量控制部分组成。控制部分用来控制机械部分的动作。若将计算机及实验软件应用于电子试验机就可实现程控试验、测量与数据处理，组成微机控制试验机。试验软件通过控制器进行试验信息交换，控制试验机按设定的控制方案自动进行试验，并采集控制参量与欲测物理量的当前值，判别和记忆特征力学物理量，在试验结束时自动处理和显示试验数据。

为了保证试验结果的可靠性，材料试验机要满足一定的技术条件，其标准由国家统一规定，称为国家计量检定规程。试验机载荷示值误差要在 0.5%~3.0%以内。试验机安装时或使用一定期限后都要进行检定，检定不合格者应进行检修。

2.2 液压式万能材料试验机

2.2.1 构造原理

液压式万能材料试验机是最常见的一种试验机，其类型很多，一般只是外形不同，基本原理相同。此机利用油压加载，动摆侧力计测力，能作材料之拉伸、压缩、弯曲等实验，也可作非金属材料的强度实验。对于 WE-100A 型液压式万能试验机，其组成结构可分为四大部分，主要由加载部分、测力部分、自动绘图器和操作面板组成。其外形如图 2.1 所示，结构原理如图 2.2 所示。

1、加载部分

在机器底座上，装有两根固定立柱，它支撑着固定横头和工作油缸。开动油泵电机带动油泵工作，将油液从油箱经油管(18)和送油阀送入工作油缸，从而推动工作活塞、上横头、活动立柱和活动台上升。若将试样两端装夹在上下夹头中，因下夹头固定不动，当活动台上升时试样就承受拉力。若把试样放置在活动台上、下垫板之间。当活动台上升到试样与上垫板接触时，试样就承受压力。输油管路中的送油阀用来控制进入工作油缸中的油流量，以调节对试样加载的速度。加载时回油阀置于关闭位置。当回油阀打开时，则可将工作油缸中的油液泄回油箱，活动台由于自重作用而下降。如果拉伸试样的长度不同，可用下夹头电机传动底座中的蜗轮使螺柱上下移动，调节下夹头位置。注意，当试样已被夹紧或已受力时，不能再开动下夹头电机，否则造成用下夹头对试样加载，以致损伤机件。活动台及下夹头的行程，由安装在固定立柱上的几个限位开关控制。

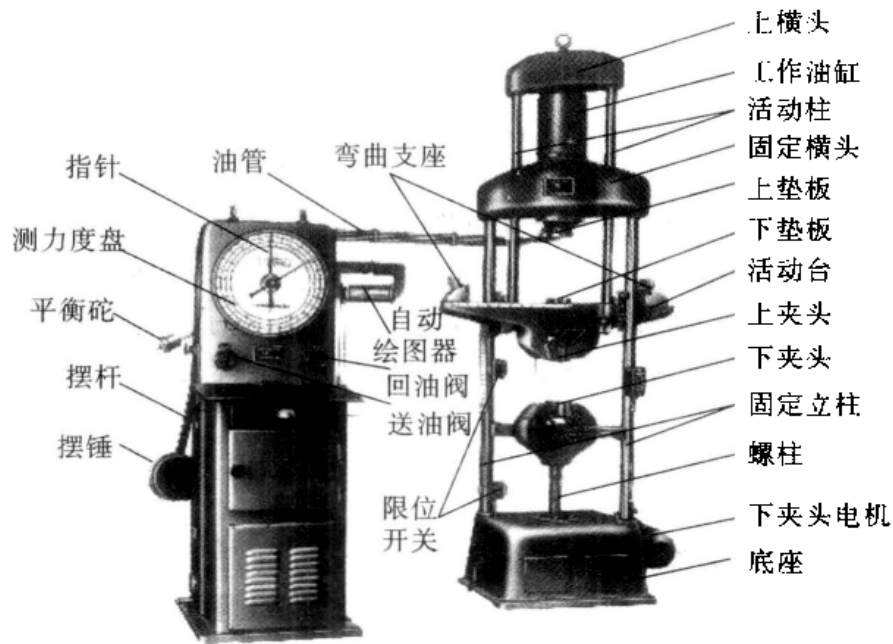


图 2.1 液压式万能试验机外观图

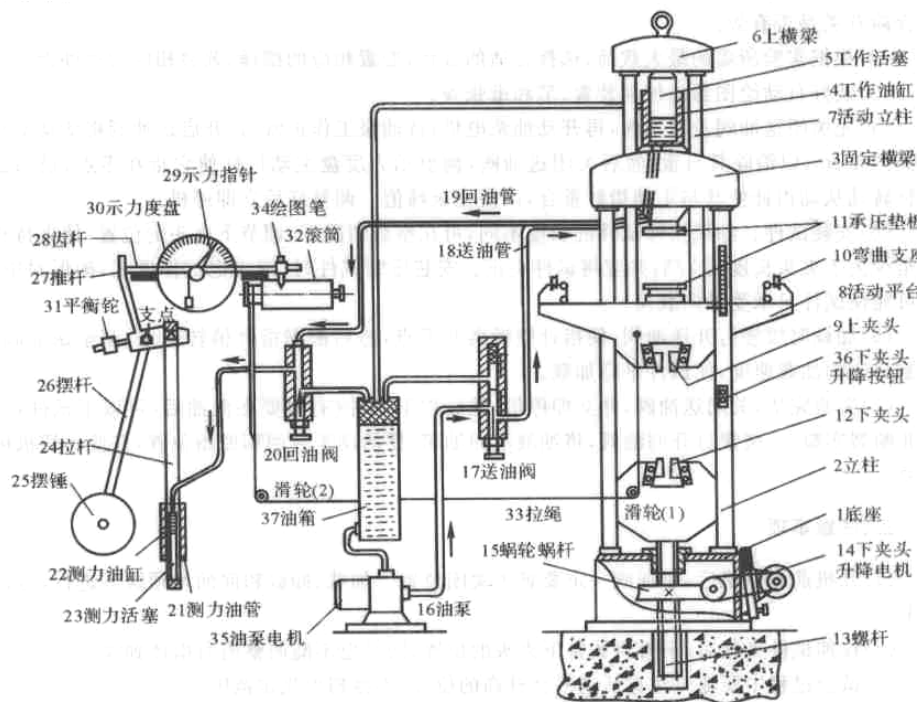


图 2.2 液压式万能试验机原理示意图

2、测力部分

加载时，工作油缸中油压推动活塞的力与试样所受的力成正比。如果用油管(19)将工作油缸和测力油缸联通，此油压便推动测力活塞向下移动，使拉杆拉动摆锤绕支点转动而扬起，同时与摆杆固定在一起的推杆便推动齿杆，使齿轮和指针转动，指针的转角与油压成正比，亦即与试样上所加载荷成正比，因此经过适当刻度，在测力度盘上便可读出试样所受力的大小。

如果增加或减小摆锤的质量，指针在度盘上同一位置所需油压不同，即指针

在同一位置所需的载荷大小与摆锤质量有关。一般试验机都配有三种锤重，相应地有三种测力度盘，分别表示不同的测力范围。例如 WE-100A 型液压式万能试验机的三种度盘分别为 0~20KN、0~50KN 和 0~100KN。试验时，为了保证测力的精度，要根据事先估计的载荷大小来选择适宜的测力度盘，并在摆杆上悬置相应质量的锤重。通常摆锤由小到大编为 A、B、C 三种号码，分别对应于上述三种度盘。为了达到上述目的，有些试验机是采用调节摆杆长度的方法，而不是变更摆锤质量。

加载前，应调整测力指针对好度盘上的零点。方法是开动油泵电机送油，将活动台升起 1cm 左右，然后转动摆杆上的平衡铤，使摆杆处于铅垂位置，再转动齿杆使指针对准零点，这样做是为了消除横头、活动立柱和活动台等部件的自重，使测得的力为纯粹施加到试样上的力。

3、绘图装置

在试验机测力度盘的右侧装有自动绘图器，由记录笔、导轨架、描绘筒和线绳等组成。它的工作原理是，活动平台上升时，由绕过滑轮(1)和(2)的拉绳 33 带动滚筒 32 绕轴线转动，在滚筒圆柱面上构成沿周线表示位移的坐标，同时，齿杆 28 的移动构成沿滚筒轴线表示载荷的坐标。这样，实验时绘图笔 34 在滚筒上就可自动绘出载荷-位移曲线。

2.2.2 操作步骤及注意事项

1、操作步骤

(1) 检查油路上各阀门是否处于关闭位置，关闭各油阀；换上与试样所匹配的夹头；检查限位开关是否有效。

(2) 估计所需载荷，并据此选择测力度盘，换上相应的摆锤。带有摆锤回落缓冲器的试验机，还应将缓冲器调到相应的位置。缓冲器的作用是保证在试样断裂或卸载时摆锤能缓慢回落，避免撞击机身。

(3) 调整好自动绘图器，选择合适的绘图比例，将记录笔装在笔架上，记录纸卷于纸筒上。

(4) 开动油泵电机，检查运转是否正常，然后打开送油阀门，向工作油缸缓缓送油，待活动台上升 1 厘米左右时，关闭送油阀，并按上述方法调整测力指针和随动指针对准零点。加载时测力指针带动随动指针一起转动，当卸载或试样断裂时，测力指针随油压下降而回转，而随动指针不能被带回，它示出试验过程中的最大载荷值。

(5) 安装试样。压缩试样必须放置在下垫板上，并调整下垫板球面支承使下垫板与上垫板基本平行。安装拉伸试样则需调整下夹头位置，使上下夹头间的距离与试样长度相适应，然后再夹紧试样。试样夹紧后，不要再调整下夹头高度。

(6) 放下绘图器记录笔，开机送油。按有关标准规定的加载速度进行试验。

(7) 试验完毕，关闭送油阀，关闭电机开关。然后取下试样（压缩试样需先泄油才能取下，非破坏件试验也需先泄油再取下试样）。如果不再进行别的试验，应缓慢打开回油阀，将油泄回油箱，使活动台回到原位，抬起笔架取下记录纸，并使一切机构复原。

2、注意事项

(1) 试验机开机前后，送油阀一定要置于“关闭”位置，加载、卸载及回油均须缓慢进行。

(2) 拉伸试样安装后，不得再调整下夹头的位置。

(3) 机器开动后，操作者应密切注意加载情况。一有异常情况立即停止，不得擅自离开。试验中不得触动摆锤。

2.3 微机控制电子式万能材料试验机

电子式万能试验机是一种把电子技术和机械传动相结合的新型试验机，它具有准确的加力速度和侧力范围，能实现恒载荷、恒应变、恒位移自动控制；配用电脑，使试验机的操作自动化，试验程序化；试验曲线可在电脑屏幕上直接显示，试验结果可以直接打印。本实验室为 WDW-100E 型电子万能试验机，其外形如图 2.3 所示。

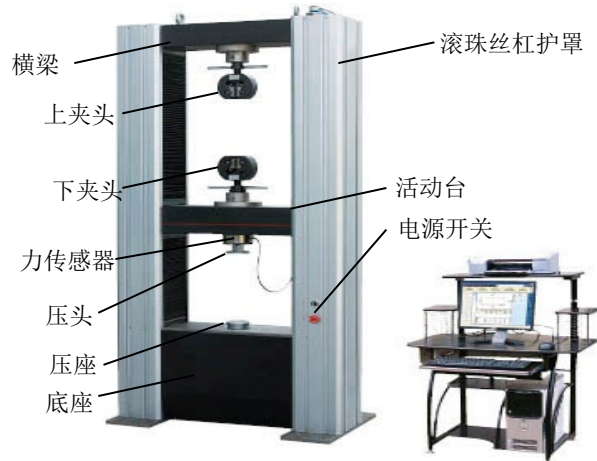


图 2.3 WDW-100E 型电子式万能试验机外观图

2.3.1 构造原理

1、主机部分

电子万能试验机主机主要由负荷机架、传动系统、夹持系统和位置保护装置四部分组成，如图 2.4 所示。

(1) 负荷机架

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

(2) 传动系统

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

(3) 夹持系统

对于 100kN 和 200 kN 规格的电子万能试验机，在拉伸夹具的上夹头均安装有万向连轴对于 100kN 和 200 kN 规格的电子万能试验机，在拉伸夹具的上夹头均安装有万向连轴节，它的作用是消除由于上、下拉伸夹具的不同轴度误差带来的影响，使试样在拉伸过程中只受到沿轴线方向的单向力，并使该力准确地传递给负荷传感器。

(4) 位置保护装置

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

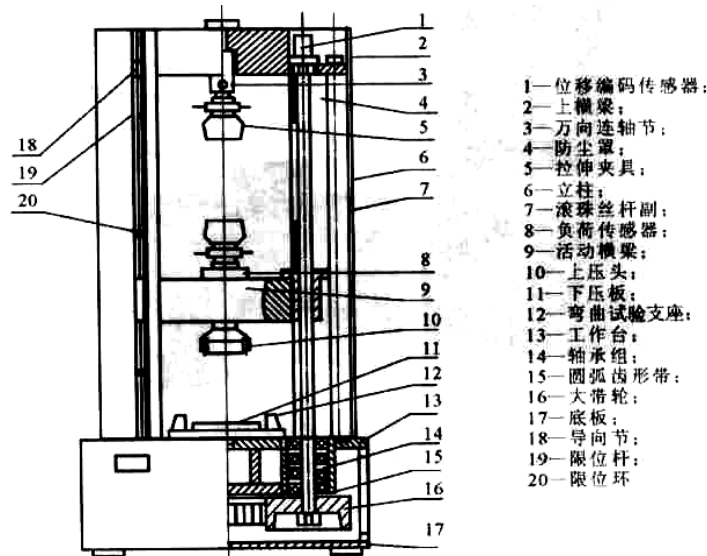


图 2.4 电子万能试验机主机结构简图

2、测量系统

电子万能试验机测量系统包括载荷测量、试样变形测量和活动横梁的位移测量三部分。

(1) 载荷测量

载荷测量是通过负荷传感器来完成的。负荷传感器为应变片式拉、压力传感器，由于这种传感器以电阻应变片为敏感元件，并将被测物理量转换成为电信号，因此便于实验测量数字化和自动化。应变片式拉、压力传感器有圆筒式、轮辐式两种类型，本试验机采用轮辐式传感器。

轮辐式拉、压力传感器的弹性元件为四根应变梁，从图中可知轮辐处受到载荷 F 作用后，四根应变梁受到剪切力，在梁的 45° 的方向和 -45° 方向分别受到拉应变和压应变，故与传感器受拉方向成 45° 方向贴四枚应变片 R_1, R_2, R_3, R_4 与传感器受拉力方向成 -45° 方向贴四枚应变片 R_5, R_6, R_7, R_8 ，然后把对称且同一方向的应变片两两串联组成测量电桥。

(2) 变形测量

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

(3) 位移测量

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

2.3.2 操作步骤

(1) 试验机准备：打开电子万能试验机，打开电脑主机开关，运行试验程序。

(2) 试验机操作练习：将电脑与试验机连接，利用远控盒的上升、下降、停止键和速度旋钮，练习横梁升、降。利用程序界面上升、下降、停止按钮，设定速度，练习横梁升、降。

(3) 试样录入：设定本次试验组编号，输入每个试样标距、直径。检查试验参数。

(4) 安装试件：先夹试件的上端，之后将试验力清零，上升横梁到合适位置，再夹紧试件下端，试件上下夹紧后试验力就不能清零了。

(5) 正式试验：点击“开始”按钮，启动拉伸试验程序，进行试件拉伸。观察载荷-变形曲线和试件变形，直至试件拉断，程序自动结束试验并保存试验结果。取下试件，量取试件断后标距与最小直径，观察断口形貌。

(6) 试验结果分析：点击“数据管理”按钮，进入本次试验组，查看试验结果，有问题时则需重算。在曲线菜单里，选择同组同类型多个曲线叠加，将各个试件载荷-变形曲线置以同一坐标内。确定试验结果无误后，打印试验结果。

(7) 试验结束：退出试验程序，关闭电脑，关闭试验机。

2.4 XL3418K2 型材料力学开放式创新组合试验台

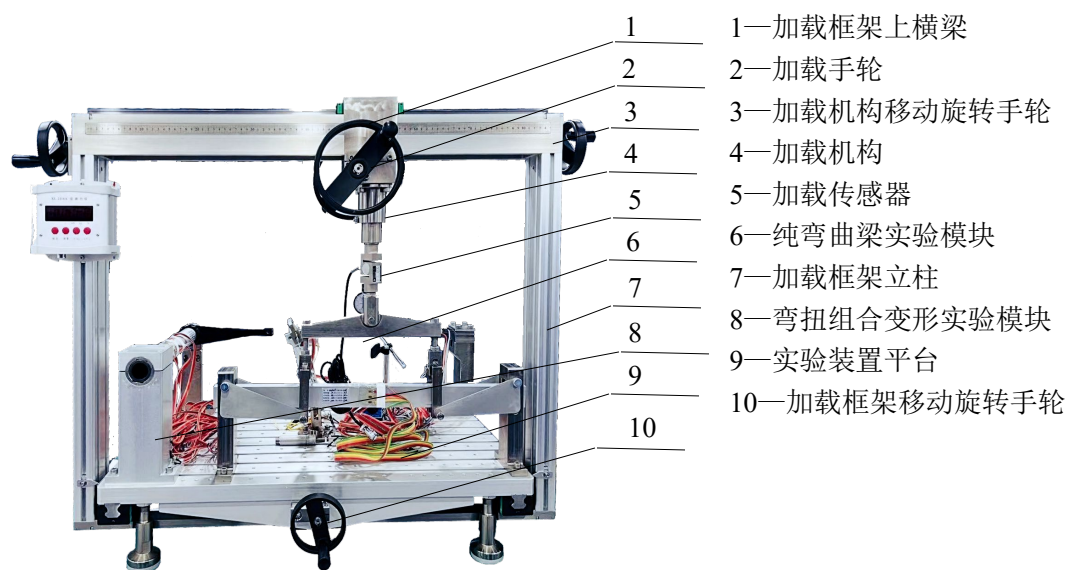


图 2.5 XL3418K2 型材料力学组合试验台

2.4.1 概述

基本实验与创新组合实验统一布局在一个实验台上，整体结构稳重美观，布局合理，外表细腻光滑，没有尖锐边角，移动方便。各杆件防锈抗腐蚀，坚固耐用，拆装组合方便。实验台采用蜗杆机构以螺旋千斤进行加载，本设备还可根据需要增设其它实验，实验数据可由计算机处理。

多种材料力学实验集中到一个台上进行，使用时稍加变动，即可进行教学大纲规定内容的多项实验，在保留了原有的基础实验上增加了由多根杆件搭接的桁架结构，横向压杆和组合梁组合的框架结构。桁架可任意组合拆卸。学生可以根

据事先设计好的桁架模型在实验台上进行组合，通过实验加以验证。

实验装置框架设计采用封闭型钢及铸件组成，表面经过细致处理并通过喷塑工艺提高抗腐蚀能力，结构坚固耐用；实验台承载能力可达到 20kN 以上。实验台采用蜗杆机构以螺旋千斤进行加载，加载稳定、操作省力，实验效果好。创新实验桁架安装方便操作简单，为了滑动和固定方便，采用高精度滑轨。基础实验试件表面经防锈抗腐蚀处理；材料选用不锈钢，接点材料选用不锈钢加工，采用线切割工艺，从而保证装配精度；试件上应变片采用专用应变胶粘贴，提高测试精度和使用寿命。实验台配有多格段试件箱；为移动方便，在原有铸铁脚座基础上增加了 4 个万向脚轮。

2.4.2 主要技术指标

- (1) 试件最大作用载荷：~10kN
- (2) 加载机构作用行程：60mm
- (3) 手轮加载转矩：0~2.6N.m
- (4) 加载速度：0.12mm/转（手轮）
- (5) 外形尺寸(mm)：950×700×1800
- (6) 重量：~180kg

2.4.3 实验装置可完成实验项目

- (1) 纯弯曲梁的正应力分布规律实验
- (2) 空心圆管弯扭组合电测实验
- (3) 材料弹性模量 E，泊松比 μ 的测定实验
- (4) 弹性压杆稳定实验
- (5) 偏心拉伸实验
- (7) 电阻应变片灵敏系数标定实验
- (8) 等强度梁实验

2.5 WNJ 系列微机控制扭转试验机

2.5.1 概述

WNJ 系列微机控制扭转试验机采用计算机控制，伺服电机驱动，主要用于金属材料的扭转力学性能测试，具有加载平稳，测量准确，控制方式多样的特点。外形尺寸 1800×450×1300mm，总功率 0.55kw，最大扭矩 500N.m，最大位移 800mm。

2.5.2 结构

该机采用一体结构，主要由动力端，移动端，防护罩，机架四部分组成，结构简图如图 2.6 所示。动力端外部有带显示器的钣金壳体，壳体上安装显示器、电源开关、急停开关，手动盒面板等；移动端有直线导轨、滑台、扭转传感器，三角卡盘等，如图 2.7 所示；机架焊接结构，底部带万向轮与蹄脚。

2.5.3 使用方法

推动设备移动端到底部，用棘轮扳手更换合适的夹爪，把试样放置在三角卡盘内，夹持合适的长度，在用棘轮扳手锁死试样；把设备移动端向前推，让试样

端部进入到动力端卡盘合适深度,在用棘轮扳手锁死试样,用扳手锁死固定螺钉,关闭防护罩。按软件操作

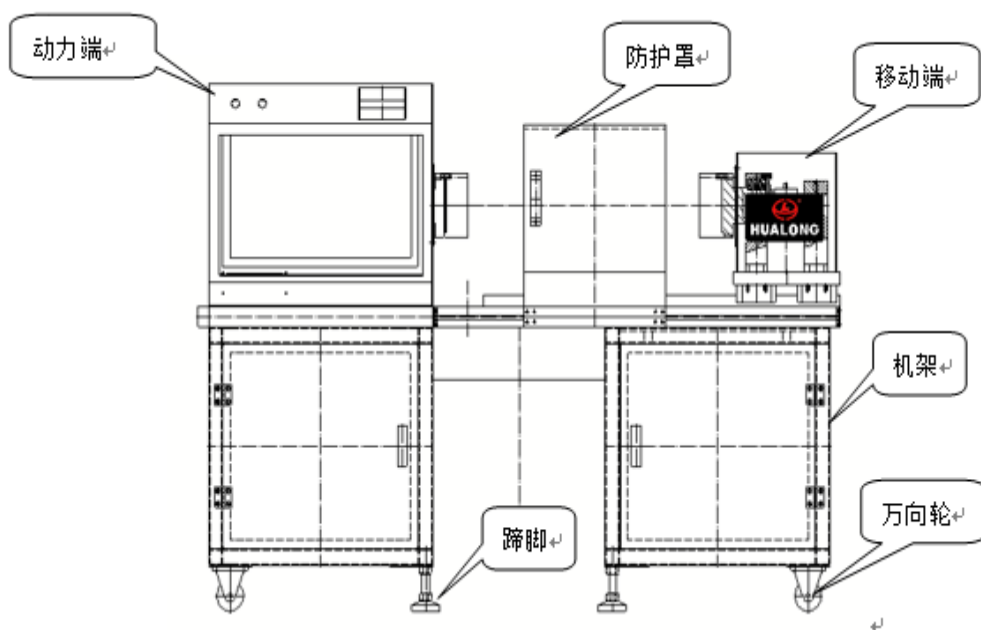


图 2.6 WNJ 系列微机控制扭转试验机结构简图

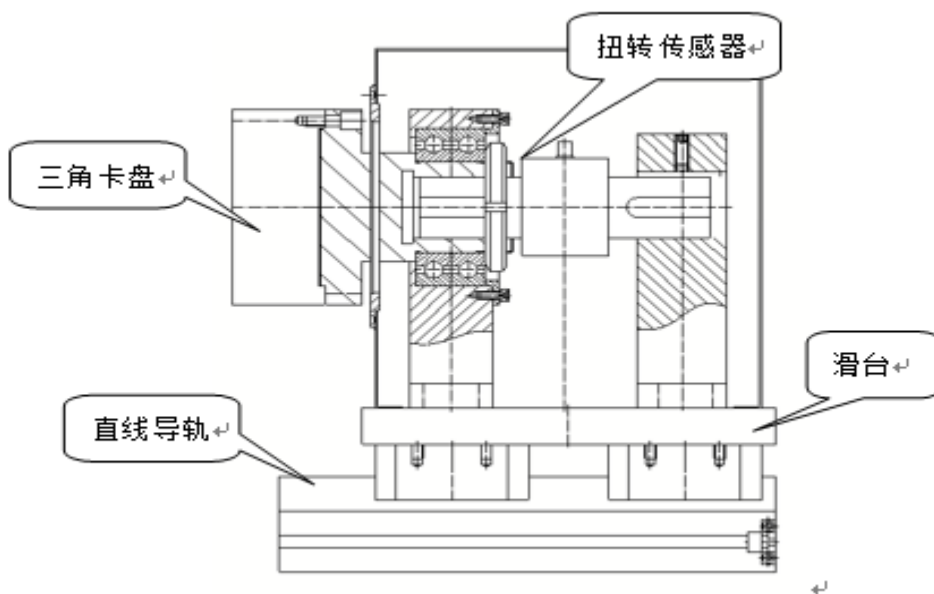


图 2.7 移动端结构示意图图

2.6 静态电阻应变仪

2.6.1 概述

国产静态电阻应变仪有几种类型,按采用的放大元件可分为电子管式、晶体管式和集成电路式三种;按供桥电源可分为交流电桥和直流电桥两种;按应变值

显示方式可分为刻度盘读数、数字显示和自动打印三种。它主要用于实验应力分析及静力强度研究中测量结构及材料任一点变形的应力分析。现以 XL2101C 型程控静态电阻应变仪为例，介绍其结构和使用方法。

XL 2101C 型程控静态电阻应变仪共 12 个通道，具备六个显示窗，查看所有通道的数据仅需一次“通道切换”按键即可完成。观测时如载荷发生变动，则直接影响各点的应变读数而产生误差。

2.6.2 结构及工作原理

1、XL2101C 型程控静态电阻应变仪由测量桥，校准桥，放大器，滤波器，A/D 数字显示，电源等组成。其原理方框图如图 2.8 所示。

2、组桥方式全面，可组 1/4 桥、半桥、全桥，适合各种力学实验。

3、量桥是按 120Ω 电阻设计（见图 2.9）。

4、计算公式： $\Delta U=1/4K\varepsilon U$ U-供桥电压； ε -被测应变；K-应变片灵敏系数

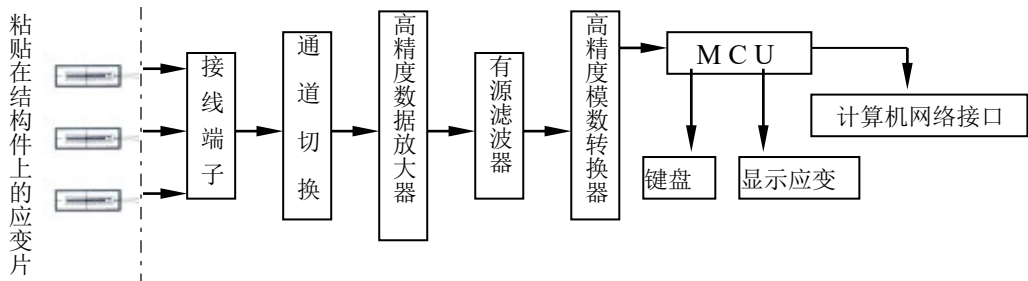


图 2.8 XL2101C 型静态电阻应变仪原理方框图

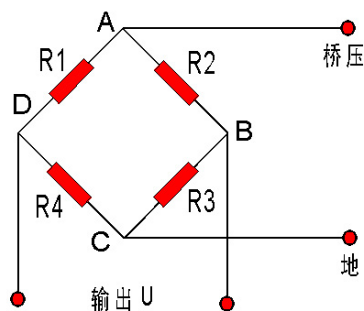


图 2.9 电桥原理示意图

2.6.3 主要技术指标

- | | |
|------------|--|
| 1、测量范围： | 应变 $0\sim\pm 19999\mu\varepsilon$ |
| 2、零点不平衡范围： | $\pm 25000\mu\varepsilon$ |
| 3、分辨率： | $1\mu\varepsilon$ |
| 4、桥路电阻： | $60\sim 1K\Omega$ |
| 5、桥压： | DC 2V |
| 6、系数设定范围： | 1.00~3.00 |
| 7、组桥方式： | 1/4 桥、半桥、全桥 |
| 8、主机测点： | 12 |
| 9、零点漂移： | $\pm 3\mu\varepsilon/4$ 小时； $\pm 1\mu\varepsilon/^\circ\text{C}$ |
| 10、非线性： | $\pm 0.02\%\text{F.S}$ |

- 11、自动扫描速度： 12 点/秒
- 12、测量方式： 六点手动
- 13、工作模式： 本机自控/计算机监控
- 14、显示方式： 7 位 LED——2 位测点序号、5 位测量值
- 15、电源： AC 220V ($\pm 10\%$) 50Hz
- 16、功耗： 约 10W
- 17、外形尺寸(mm): 300×320×125(宽×深×高)

2.6.4 使用方法

1、准备工作

(1) 根据测试要求，使用 1/4 桥(半桥单臂、公共补偿)、半桥或全桥测量方式。建议尽可能采用半桥或全桥测量，以提高测试灵敏度及实现测量点之间的温度补偿。

(2) 打开仪器上面板，会看到接线部分，接线方法参见图 2.10~图 2.12。

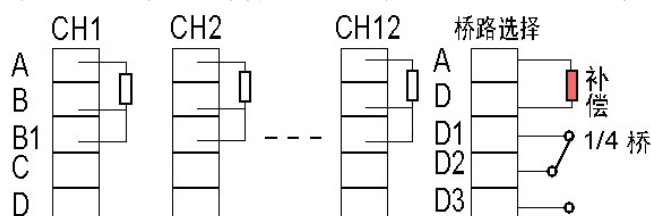


图 2.10 1/4 桥接线方法

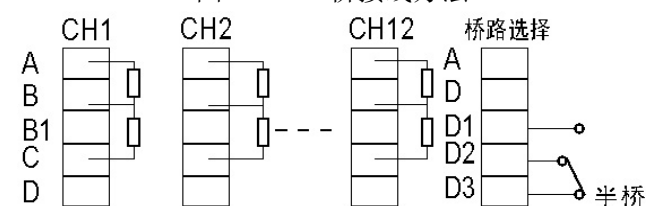


图 2.11 半桥接线方法

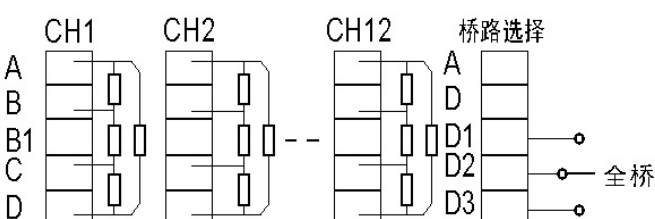


图 2.12 全桥接线方法

2、打开电源，预热 20 分钟，把功能键开关置于核准位置。

3、调整平衡电位器，使各个点的表头读数为零。

4、测量

(1) 按下“自动平衡”键，约 2 秒。在显示期间，系统自动对 CH01~CH12 全部测点进行预读数法自动平衡。平衡完毕后返回测量状态。

(2) 完成应变测量模块的预调平衡操作后，即可根据进行的力学实验要求进行测试了。期间只需要使用者通过“通道切换”操作根据所连接应变片的测点选择观测屏幕即可。即：CH01~CH06、CH07~CH12。

(3) 当应变测试模块的 LED 显示“-----”时，表示该测点输入过载或平衡失败，请检查应变片或接线是否正常。

(4) 测试完毕关闭 XL2101C 静态电阻应变仪电源。

2.7.5 使用注意事项

1、1/4 桥测量时，测量片与补偿片阻值、灵敏系数应相同；同时温度系数也应尽量相同（选用同一厂家同一批号的应变片）。

2、接线时如采用线叉请旋紧螺丝；同时测量过程中不得移动测量导线。

3、长距离多点测量时，应选择线径、线长一致的导线连接测量片和补偿片。同时导线应采用绞合方式，以减少导线的分布电容。

4、仪器应尽量放置在远离磁场源的地方。

5、应变片不得置于阳光曝晒下；同时测量时应避免高温辐射及空气剧烈流动的影响。

6、应选用对地绝缘阻抗大于 $500\text{M}\Omega$ 的应变片和测试电缆。

3 电阻应变片测量技术

电阻应变片测量技术（又称应变电测法，简称电测法）是一种非电量电测技术。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（静态）或输出给记录仪记录（动态）。再根据应力应变关系，将测得的应变值换算成应力值，达到对构件进行实验应力分析的目的。应变电测法、光弹性法、脆性涂层法、云纹法、全息干涉法、散斑干涉法和声弹性法等同属实验应力分析方法。实验应力分析方法和应力分析理论，是解决构件强度问题的两种途径。这两种方法互为补充、相互促进，理论方法必须以实验为基础，理论计算结果要用实验进行检验。而实验方法必须以理论为指导，在制定实验方案，分析处理实验结果时，还必须用理论作依据。

应变电测法是工程中最常用的应力分析方法之一，它具有以下特点：

- 1、灵敏度高。能测量小于 $1\mu\varepsilon$ （微应变 $1\mu\varepsilon=1\times 10^{-6}$ ）的微小应变。
- 2、适应性强。应变片可测应变范围为 $1\sim 2.2\times 10^5\mu\varepsilon$ （ $1\times 10^{-6}\sim 2.2\times 10^{-1}$ ）的应变，可测应变频率为 $0\sim 200\text{kHz}$ ，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 1000r/min 和运动的构件上取得信号，还可以进行远距离遥测。
- 3、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 1~3%，动态测量误差在 3~5% 范围内。
- 4、自动化程度高。科学技术的发展，为应变电测法提供了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 的静态应变仪和自动分析处理动态应变信号的系统。
- 5、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而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。

事物都是一分为二的，应变电测法的缺点是：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。另外，在高磁场条件下不能采用电测法。

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、液体下和旋转、运动构件应变测量的唯一方法。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广泛应用。

3.1 电阻应变片的工作原理及分类

3.1.1 工作原理

当金属丝伸长或缩短时，其电阻也随之增大或减小，应变片就是利用这一特性制成的敏感元件。应变片一般由敏感栅、基底、粘结剂和引线制成。粘结剂将敏感栅与基底连成一体；基底起固定敏感栅形状、传递应变和绝缘的作用；敏感栅则实现将应变转变成电阻变化的功能；引线的用途是便于和导线焊接。图 3.1 所示为箔式应变片结构，图中 l 是应变片标距， $x-x$ 为灵敏轴线（即应变片轴线），

应变片对沿灵敏轴线的应变最敏感。箔式应变片采用厚度为 0.003~0.01mm 的应变合金为敏感栅材料，经热处理后，涂刷一层有机粘结剂，粘结剂聚合处理后形成基底；然后用光刻腐蚀工艺获得敏感栅，焊上引线再涂一层保护层制成。

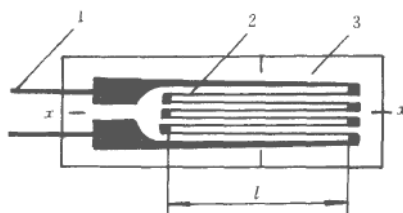


图 3.1 箔式应变片

1-引线 2-敏感栅 3-基底

如将应变片粘贴到标定试样上，使试样产生已知应变，测量应变片的电阻变化，就会发现在一定的应变范围内，应变片的相对电阻变化与试样的应变之间保持线性关系，即

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (3.1)$$

式中， R 是应变片电阻， ΔR 为应变片感受应变后的电阻变化， ε 是试样沿应变片灵敏轴线方向的应变， K 称为应变片灵敏系数，在一定应变范围内，它为常数。

3.1.2 应变片分类

应变片的分类方法较多，通常根据敏感栅材料、形状、数量，应变片的标距、基底、工作温度和用途等分类。常见的有以下几种分类方法：按敏感栅所用材料可分为金属栅和半导体栅两大类；按敏感栅形状，可分为绕线式、箔式和短接式；按敏感栅数量，可分为单轴应变片和多轴应变片（又称应变花）；按敏感栅标距，可分为短标距、中标距和长标距三种；按基底材料，可分为胶基、纸基、金属基和其他（玻璃纤维、云母等）基底几种；按使用温度可分为常温片、中温片、高温片和低温片。此外，还有一些特殊用途的应变片，如测应力集中应变片、残余应力测量片、水下应变片、裂纹扩展片、测温片等。图 3.2~图 3.4 所示分别为绕线式、短接式和半导体应变片结。其中绕线式、短接式合称为丝式应变片。图 3.5 所示为常用的三种箔式应变花。

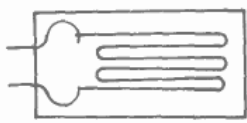


图 3.2 绕线式应变片



图 3.3 短接式应变片

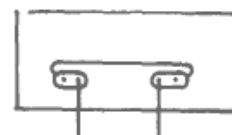
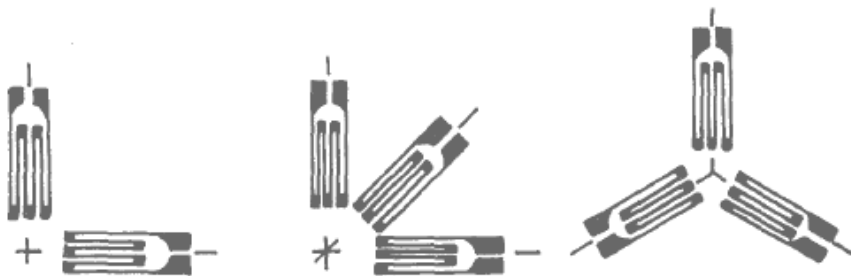


图 3.4 半导体应变片



(a) 90°应变花

(b) 45°应变花

(c) 60°应变花

图 3.5 箔式应变花

3.2 电阻应变片的工作特性

应变片的工作特性由实验测定，它反映了应变片性能的优劣，下面简要介绍常温应变片工作特性的定义及测定方法。

3.2.1 应变片的工作特性

1、应变片电阻

应变片在未安装时，在室温环境下所测得的电阻值，可准确到 0.1Ω 。应变片标称电阻有 60Ω 、 120Ω 、 350Ω 、 500Ω 、和 1000Ω 几种。其中以 120Ω 为标准值。应变片制造厂家在产品出厂前对应变片电阻进行逐个测量，并按阻值分装。包装盒上注明的是同一包应变片的平均电阻值及相对于平均电阻值的最大偏差。

2、灵敏系数 K

应变片安装在承受单向应力试样（纯弯曲梁、等强度梁或单向拉伸试样）上，其灵敏轴线与应力方向一致，使试样产生已知的标准应变（ $1000\mu\epsilon$ ），此时应变片电阻的相对变化（ $\Delta R/R$ ）与试样应变（ ϵ ）之比，定义为应变片灵敏系数 K。应变片灵敏系数主要决定于敏感栅材料，与敏感栅形状、尺寸、基底和制造工艺也有关，金属栅应变片的值大都在 2.0 左右。应变片灵敏系数由抽样试验测定，抽样率为 1%~5%。应变片包装盒上给出的是本包应变片灵敏系数的平均值和相对标准误差。根据误差理论，灵敏系数 K 和相对标准误差 δ 由下式计算：

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}$$
$$\delta = \frac{S}{\bar{K}} = \frac{\sqrt{(K_i - \bar{K})^2 / n - 1}}{\bar{K}} \times 100\% \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3.2)$$

式中，n 为应变片抽样数， K_i 为抽样试验各片测得的灵敏系数， \bar{K} 为本批应变片灵敏系数的平均值，S 为标准误差。

3、横向效应系数

应变片因感受横向（垂直于灵敏轴线）应变而产生电阻变化的现象，称为横向效应。应变片横向效应大小用横向效应系数 H 来表征，并由实验测定。方法是将两个应变片安装到能产生单向应变的标定试样上，其中片 1 沿应变方向安装，片 2 垂直于应变方向安装，使试样产生单向应变（约 $1000\mu\epsilon$ ），此时片 2 与片 1 的电阻变化率之比定义为应变片的横向效应系数 H，即

$$H = \frac{(\Delta R/R)_2}{(\Delta R/R)_1} \quad (3.3)$$

横向效应系数还有另一种定义。设应变片的轴线方向为 x 方向，与其垂直的方向为 y 方向。在进行横向效应系数测定时，片 1 的电阻变化由 x 方向的应变产生，记为 ΔR_x 。由式（3.1）得：

$$\frac{\Delta R_x}{R} = K_x \epsilon \quad (3.4)$$

式中， K_x 称为应变片的轴向灵敏系数，它与在单向应力状态下测得的应变片灵敏系数 K 是两个不同的参数。对于片 2，电阻变化由 y 方向的应变产生，同理有：

$$\frac{\Delta R_y}{R} = K_y \varepsilon \quad (3.5)$$

式中， K_y 称为应变片的横向灵敏系数。由式 (3.3) 得

$$H = \frac{\Delta R_y / R}{\Delta R_x / R} = \frac{K_y}{K_x} \quad (3.6)$$

因此，应变片的横向效应系数 H 也可定义为应变片横向灵敏系数与轴向灵敏系数的比值。现在再来分析测定应变片灵敏系数的情况，由式 (3.4) 和式 (3.5)，应变片的电阻变化率可写成

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x \varepsilon_1 + K_y \varepsilon_2 = K_x \varepsilon (1 - \mu_0 H) \quad (3.7)$$

由式 (3.2) 和式 (3.7) 得

$$K = K_x (1 - \mu_0 H) \quad \text{或} \quad K_x = K / (1 - \mu_0 H) \quad (3.8)$$

式中， μ_0 为标定试样的泊松比。

在没有能产生单向应变的试样时，可用纯弯曲梁或等强度梁代替。片 1 和片 2 分别沿试样的轴向和横向安装，设试样的轴向应变为 ε_x ，横向应变为 ε_y 。由式 (3.4)、式 (3.5) 并根据叠加原理可写出片 1 和片 2 的应变 ε_1 、 ε_2 ；

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\Delta R_1}{R_1} = K_x \varepsilon_x + K_y \varepsilon_y \\ \varepsilon_2 &= \frac{\Delta R_2}{R_2} = K_x \varepsilon_y + K_y \varepsilon_x \end{aligned} \quad (3.9)$$

由式 (3.9)，并 $\varepsilon_y = -\mu_0 \varepsilon_x$ ，可得横向效应系数

$$H = \frac{\varepsilon_2 + \mu_0 \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \mu_0 \varepsilon_2} \quad (3.10)$$

应变片的横向效应系数与敏感栅的形状和标距长度有关，标距愈小，栅条数愈多， H 值愈大。横向效应系数也是抽样实验测定的，但不是每批都测量，仅在改变了敏感栅的材料、形状和尺寸时，应重新测量。 H 值一般不在包装盒上注明。

4、应变极限

在室温条件下，给安装有应变片的试样施加的应变逐渐增加，当应变片的指示应变与试样实际应变相差 10% 时，此时试样的应变定义为应变片的应变极限。

5、疲劳寿命

对安装在试样上的应变片，在一定幅值的交变应变作用下，应变片不损坏，且指示应变与试样应变之差不超过规定值时的应变循环次数，定义为应变片的疲劳寿命。

6、机械滞后

对安装有应变片的试样进行加载，使其应变达同一水平时，然后卸载到零，计算应变片在加、卸载过程中指示应变的差值，取其各种应变水平下的最大差值，定义为应变片的机械滞后。

7、蠕变

在温度恒定条件下，使安装有应变片的试样产生恒定的应变，在规定的时间内，应变片指示应变下降的幅值，定义为应变片的蠕变值。

8、绝缘电阻

安装在试样上的应变片，其引线 with 试样之间的电阻，定义为应变片的绝缘电阻。测量绝缘电阻时所用的电压不应大于 100V。

常温应变片的分级标准见下表 3-1

表 3-1 常温电阻应变片分级标准

工作特性	说明	质量等级		
		A	B	C
应变片电阻/ Ω	对平均值的最大偏差	0.2	0.4	0.8
灵敏度系数/%	对平均值的相对标准误差	1	2	3
横向效应系数/%	对平均值的相对标准误差	1	2	4
应变极限/ $\mu\epsilon$		10000	8000	6000
疲劳寿命/次	应变循环次数	10^7	10^6	10^5
机械滞后/ $\mu\epsilon$		5	10	20
蠕变/ $(\mu\epsilon \cdot h^{-1})$		5	15	25
绝缘电阻/ $M\Omega$		1000	500	500

3.2.2 常用应变片介绍

1、绕线式应变片

它是最早出现的应变片形式，敏感栅用直径为 0.02~0.05mm 的应变合金丝材绕制而成，以纸为基底，用挥发性有机粘结剂将丝栅与基底粘合而成。特点是制造简便，既可手工也可半机械化生产。绕线式应变片难以制成小标距应变片，横向效应系数较大，工作特性的分散性较大，且纸基易吸潮，使用温度也低于箔式应变片。绕线式应变片已很少在常温下使用，仅在中、高温条件下应变测量中尚采用这种形式。

2、箔式应变片

箔式应变片的敏感栅薄而柔软，易于传递应变，栅条的横向部分宽度比纵向部分宽度大得多，因而横向效应系数小。由于光刻技术的发展，箔式应变片的栅条均匀、尺寸准确，故性能稳定，灵敏系数的分散性小。现已能制成标距小至 0.2mm 的箔式片和敏感栅图案特殊的应变片，如用于测扭矩的应变片，用于测薄膜应力的应变片等。箔式应变片敏感栅的表面积大，易于散热，可允许通过比丝式应变片大几倍的电流，因而可获得较大的输出信号。箔式应变片的蠕变和机械滞后特性也优于丝式应变片，其绝缘电阻高于纸基应变片，耐湿性能也优于纸基

应变片。箔式应变片特别适用于常温下的静、动态应变测量和制作传感器。由于箔栅的投影面积大，高温下的漏电流大，故不适用于高温下的应变测量。

3、短接式应变片

敏感栅的纵向是应变合金丝材，横向是较粗的铜丝。纵、横交叉点为熔焊连接，按规律切断一部分铜丝使之成为栅状，然后粘上基底制成短接式应变片。短接式应变片的特点是横向效应系数小，但制造较麻烦，由于焊点多，故疲劳寿命低。短接式应变片主要用于温度自补偿应变片。

4、半导体应变片

将半导体材料沿一定方向割成细条作敏感栅，再焊上内、外引线，粘上基底即可制成半导体应变片。半导体应变片的优点是，灵敏系数大，约是金属栅应变片的 50 倍。这意味着在相同的应变水平下，可获得比金属栅应变片大 50 倍的信号，可使测量电路大为简化，这在航空、航天领域是至关重要的。半导体应变片的缺点是，灵敏系数的非线性大，且拉、压时的灵敏系数不相同；电阻温度系数也比金属栅的大 50 倍左右，使温度补偿困难。此外，半导体材料柔软性差，不能粘贴到曲面上。这些问题都限制了半导体应变片的使用。当前半导体应变片仅用于制作传感器和在特殊条件下进行力学量的测量，并要采用特殊的非线性补偿电路才能进行测试。

3.2.3 应变片的选用

应变片种类、规格很多，只有选用合适的应变片，才能获得最佳的测量结果。选用应变片时，一般应遵循以下原则。

1、应变片标距的选择

在均匀应变场或应变梯度小的构件上测量，应采用标距为 3~10mm 的中标距应变片，中标距应变片比其他标距的应变片性能要好且分散性较小。在应变梯度大或有应力集中的区域测量时，应选用小于 3mm 的小标距应变片，以获得更接近于测点真实应变的测量值。在非均质材料上测量时，应选用长标距的应变片。如在混凝土构件上测量，应变片的标距应大于混凝土骨料颗粒直径的 4 倍。

2、基底的选择

基底的材料决定了应变片的工作温度，不能超过允许温度范围使用常温片，也不能将中、高温应变片在常温下使用，前者会损坏应变片或导致大的测量误差，后者不仅不经济，其测量精度也低于常温片。

3、敏感栅个数的选择

在单向应力状态下测量时，用单轴应变片；在平面应力状态下主应力方向已知时，用二轴 90° 应变花测量，应变花的二轴沿主应力方向粘贴；在平面应力状态下或主应力方向未知时，用三轴 90° 或 45° 应变花测量。

4、电阻值选择

用于应变测量，应选用 120Ω 的应变片，因应变仪的电桥是按 120Ω 桥臂电阻设计的，采用其他阻值时，对测量结果要进行修正。如用于制作传感器，且有配用的二次仪表测量时，可选用高阻值的应变片。此时，可提高供桥电压，以获得大的输出信号。同一电桥上使用的应变片或采用公共补偿的一组应变片，其阻值相差最好小于 0.2Ω，以便于电桥预调平衡。在曲面上粘贴应变片时，应变片的阻值会发生变化，凸面会使应变片电阻值增大，凹面会使应变片电阻值减小，且曲率愈大，电阻改变也愈大，这点应予以注意，以免造成电桥不能平衡。

5、根据应变片使用环境来选择

在长期的应变测量中或是制作应变式传感器时，应选用胶基箔式应变片，敏感栅材料应是康铜（铜、镍合金）或卡玛（镍、铬、铝、铁合金）等应变合金，这两种合金的电阻温度系数小，故受环境温度影响也较小。

3.3 电阻应变片的粘贴工艺

电测应力分析中，构件表面的应变通过粘结层传递给应变片。测量数据的可靠性很大程度上依赖于应变片的粘贴质量，这就要求粘结层薄而均匀，无气泡，充分固化，既不产生蠕滑又不脱胶。应变片的粘贴全由手工操作。要达到位置准确、质量优良，全靠反复实践积累经验。应变片的粘贴工艺包括下列几个过程：

1、应变片的筛选

应变片的丝栅或箔栅要排列整齐无弯折，无锈蚀斑痕，底基不能有局部破损。经筛选后的同一批应变片(包括工作片和补偿片)，要用数字万用表或电桥逐片测量电阻值，按多数应变仪和预调平衡的要求，共电阻值相差不应超过 0.6Ω 。

2、试样表面处理

为使应变片粘贴牢固，试样粘贴应变片的部位应刮去油漆层，打磨锈斑，除去油污。表面为贴片而经过处理的面积应大于应变片底基面积的 3 倍。若表面过于光滑，则用细砂布打出与应变片轴线成 45° 的交叉纹路。打磨平整后，用划针沿贴片方位划出定位坐标线。贴片前，用蘸有丙酮(或酒精)的药棉清洗试样的打磨部位，直至药棉上不见污渍为止。待丙酮挥发、表面干燥，方可进行贴片。

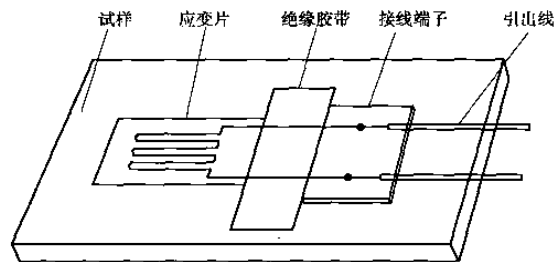
3、应变片粘贴

常温应变片的黏结剂有 502(或 501)快干胶、环氧树脂胶等。在寒冷或潮湿的环境下，贴片前，最好用电吹风使试样贴片部位加热至 $30\sim 40^\circ\text{C}$ 。贴片时，在粘贴表面先涂一薄层黏结剂，用手指捏住(或镊子钳住)应变片的引出线，在基底上也涂上黏结剂，即刻放置于试样上，且使应变片基准线对准刻于试样上的定位坐标线。盖上聚氯乙烯透明薄膜，用拇指沿应变片轴线朝一个方向滚压，手感由轻到重，挤出气泡和多余的胶水，保证粘结层尽可能薄而均匀，且避免应变片滑动或转动。必要时加压 $1\sim 2\text{min}$ ，使应变片粘牢。经过适宜的干燥时间后，轻轻揭去聚氯乙烯薄膜，观察粘贴情况。如在敏感栅部位有气泡，应将应变片铲除，清理后重新贴片；若敏感栅部位粘牢，只是基底边缘翘起，则只要在局部补充粘贴即可。

应变片粘贴后要待黏结剂完全固化才可使用。不同种类的黏结剂固化要求各异，502 胶可自然固化，但加热到 50°C 左右可加速固化。加热一般用恒温箱、反射炉、红外线灯或电吹风等。黏结剂固化前，用镊子把应变片引线拉起，使它不与试样接触。紧靠应变片底部粘贴绝缘胶带，将应变片引线与试样隔离开。

4、导线的连接和固定

连接应变片和应变仪导线，一般用聚氯乙烯双芯多股铜导线，如图 3.6 所示。



3.6 应变片粘贴

在强磁场环境中测量。最好用多股屏蔽线，水下测量的塑料导线的外皮不能有局部损伤。导线与应变片引出线的连接最好用接线端子片作为过渡。接线端子片用502胶固定在试样上，导线头和接线端子片上的铜箔都预先挂锡。然后将应变片引出线和导线焊接在端子片上。不论用何种方法连接都不能出现“虚焊”。最后，用胶带将导线固定在试样上。

5、应变片的防潮保护

粘贴好的应变片，如长期暴露在空气中，会因受潮降低粘结牢度，减小绝缘电阻，严重的会造成应变片剥离脱落。因此应敷设防潮保护层。常温下防潮剂有中性凡士林，703，704，705 硅橡胶，环氧树脂，石蜡等。防潮保护层涂敷之前，可把涂敷部位加热至 40~50 度，保护层厚 1~2mm，周边超出应变片 10~20 mm，最好将焊锡头及接线端子片等都埋入防潮保护剂中。

3.4 应变电桥原理

通常构件的应变一般在 10^{-3} ~ 10^{-6} 之间，而常规电阻应变计的灵敏系数在 2.0 左右，所以由应变而引起的应变片电阻的变化非常小，难以直接测量。因此，常用电桥电路把应变片阻值的微小变化转换成输出电压的变化，目前均采用惠斯顿电桥电路。

3.4.1 电桥的平衡条件

惠斯顿电桥如图 3.7 所示，图中 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 是电桥的四个桥臂， U 为桥压， U_{DB} 是电桥的输出电压。设流经 R_1 的电流为 I_1 ，流经 R_4 的电流为 I_2 。输出电压为

$$U_{DB} = U_{AB} - U_{AD} = I_1 R_1 - I_2 R_4 \quad (3.11)$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R_2}, \quad I_2 = \frac{U}{R_3 + R_4}, \text{ 代入 (3.11) 得}$$

$$U_{DB} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) U = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U \quad (3.12)$$

当 $U_{DB} = 0$ 时，称电桥处于平衡状态。由于桥压 $U \neq 0$ ，所以电桥的平衡条件为

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (3.13)$$

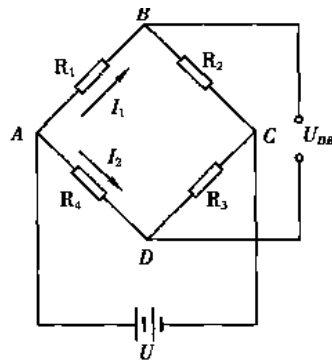


图 3.7 惠斯登电桥

3.4.2 桥臂电阻值改变与输出电压的关系

设电桥 4 个桥臂的电阻改变量分别为 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 和 ΔR_4 ，由式 (3.12) 得电桥的输出电压为

$$U_{DB} + \Delta U_{DB} = U \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} \quad (3.14)$$

在电测法中，若电桥的 4 个桥臂均为粘贴在构件上的应变片，构件受力后，电阻应变片的电阻变化 ΔR_i ($i=1, 2, 3, 4$) 与 R_i 相比，一般是非常微小的。因而式(3.14)中 ΔR_i 高次项可以省略。分母中 ΔR_i 相对于 R_i 也可以省略。于是

$$U_{DB} + \Delta U_{DB} = U \frac{R_1 R_3 + R_1 \Delta R_3 + \Delta R_1 R_3 - (R_2 R_4 + R_2 \Delta R_4 + R_4 \Delta R_2)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (3.15)$$

由式 (3.15) 减去 (3.12) 得

$$\Delta U_{DB} = U \frac{R_1 \Delta R_3 + \Delta R_1 R_3 - R_2 \Delta R_4 - R_4 \Delta R_2}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (3.16)$$

这就是因电桥桥臂电阻发生变化而引起的电桥输出端的电压变化。如果电桥的 4 个桥臂为相同的 4 枚电阻应变片，其初始电阻都相等，即 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ ，则式(3.16)变为

$$\Delta U_{DB} = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right) \quad (3.17)$$

将 $\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon$ 代入 (3.17) 则有

$$\Delta U_{DB} = \frac{KU}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (3.18)$$

应变仪的读数为

$$\varepsilon_{\text{仪}} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 \quad (3.19)$$

式(3.19)表明，由应变片感受到的应变 $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4$ ，通过电桥可以线性地转变为电压的变化 ΔU_{DB} 。三种电桥接法的输出电压分别为：

$$1/4 \text{ 桥接法: } \Delta U_{DB} = \frac{KU}{4} \varepsilon_1$$

$$\text{半桥接法: } \Delta U_{DB} = \frac{KU}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$$

$$\text{全桥接法: } \Delta U_{DB} = \frac{KU}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

此外，在温度补偿、消除偏心荷载的影响、提取所需应变成分等场合，都要用到电桥输出这一特性。式(3.18)是在桥臂电阻改变很小，即小应变条件下得出的，在弹性变形范围内。其误差低于 0.5%，可见有足够的精度。

3.5 电桥接法

工程中的构件，常在几种组合变形状态下工作，如拉一弯、拉一扭、弯一扭、拉一弯一扭等组合变形。此时，构件中的应力也是复合的。如需测量其中一种变形在构件中产生的应力，单靠应变片本身是无能为力的，但通过合理的布置应变片的粘贴方位，并采用正确的电桥接法，就可达到预期目的，下面举例说明。

例 1、应变式力传感器的弹性元件，当受到偏心压力作用时，相当于在轴线方向作用有压力。为消除偏心的影响，在弹性元件上对称地粘贴了 4 个应变片，如图 3.8 所示，将线路接成全桥。

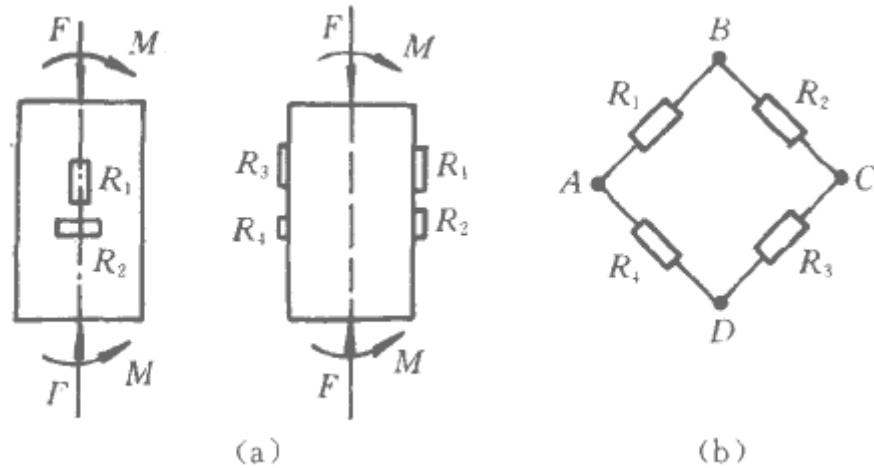


图 3.8 力传感器的布片和电桥接法

根据力学分析应有以下协调关系：

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1F} = \varepsilon_{3F} & & \varepsilon_{2F} = \varepsilon_{4F} = -\mu\varepsilon_{1F} \\ \varepsilon_{1M} = -\varepsilon_{3M} & & \varepsilon_{2M} = -\varepsilon_{4M} = -\mu\varepsilon_{1M} \end{aligned} \quad (3.20)$$

式中 ε_{1F} 、...、 ε_{4F} 表示压力 F 产生的应变； ε_{1M} 、...、 ε_{4M} 表弯矩 M 产生的应变。将各应变片的应变代入式(3.12)得到下式：

$$\Delta U = \frac{KU}{4}(2\varepsilon_{1F} - 2\varepsilon_{2F}) = \frac{KU}{2}(1 + \mu)\varepsilon_{1F} \quad (3.21)$$

此时，电桥的输出电压已消除了偏心的影响，其值是单个应变片在理想受力状态（没有偏心）时输出电压的 $2(1 + \mu)$ 倍。比值 $2(1 + \mu)$ 称为桥臂系数。

例 2、一圆轴受扭矩 T 和拉力 F 的作用，现需分别测量由扭矩 T 和拉力 F 产生的应变。

1、测扭矩 T 产生的剪应变（剪应力）

应变片只能测量线应变而不能测量剪应变。若需要测量剪应力时，应对构件的应力应变状态进行分析，找出剪应力与正应力之间的关系，通过测量正应力达到测量剪应力的目的。对于本例，圆轴受扭矩 T 作用时，其横截面上最大剪应力 τ_{\max} 和圆轴表面上与轴线成 $\pm 45^\circ$ 方向上的正应力 σ 存在以下关系： $\tau_{\max} = \sigma_{45^\circ} = -\sigma_{-45^\circ}$ 。如能测出 σ_{45° 和 $-\sigma_{45^\circ}$ ，则 τ_{\max} 即可测出。为此，按图 3.9 (a) 布置应变片。图 3.9 (b) 是贴片位置展开图；图 3.9 (c) 是电桥接法图。

根据力学分析可知：

$$\varepsilon_{1T} = -\varepsilon_{2T} = \varepsilon_{3T} = -\varepsilon_{4T} \qquad \varepsilon_{1F} = \varepsilon_{2F} = \varepsilon_{3F} = \varepsilon_{4F} \qquad (3.22)$$

将各应变片的应变代入(3.18)得到:

$$\Delta U = k\varepsilon_1 U \qquad (3.23)$$

此时, 电桥输出电压仅与扭矩 T 有关, 且桥臂系数等于 4。

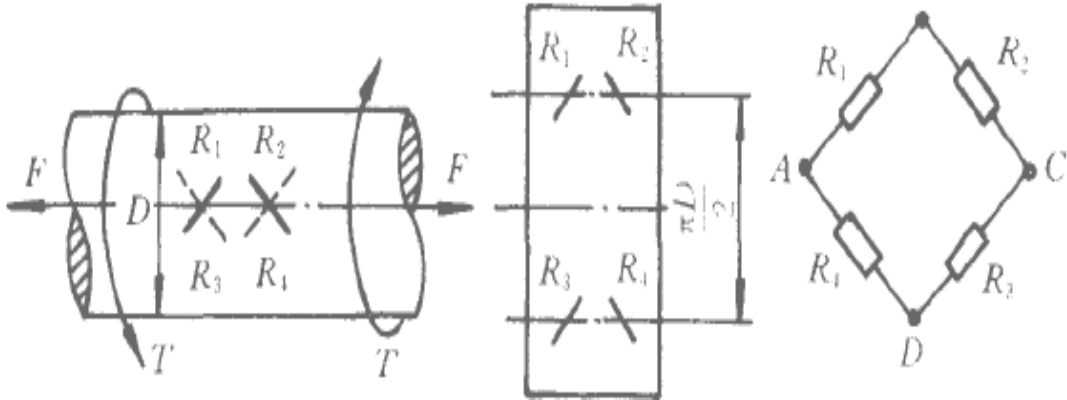


图 3.9 拉-扭组合变形下, 测量剪应力时的布片位置和电桥接法

2、测拉力 F 产生的正应力

应变片的布片位置和电桥接法如图 3.10 所示, 图中 R_t 是温度补偿片。根据力学分析有:

$$\varepsilon_{1F} = \varepsilon_{2F} \qquad \varepsilon_{1T} = \varepsilon_{2T} = 0 \qquad (3.24)$$

将各应变片的应变代入(3.18)得到:

$$\Delta U = \frac{KU}{2} \varepsilon_{1F} \qquad (3.25)$$

此时, 电桥输出电压与扭矩无关, 且桥臂系数等于 2。

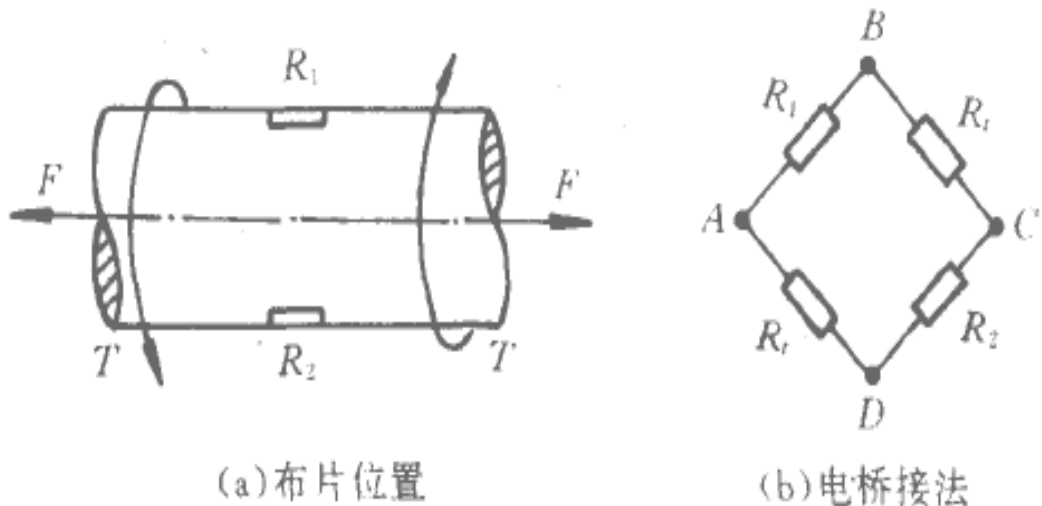
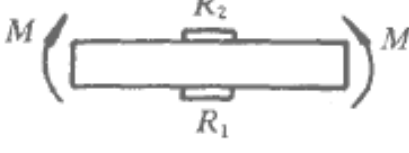
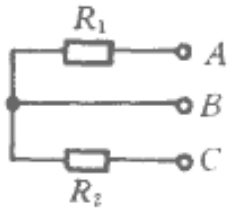
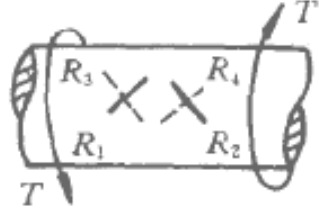
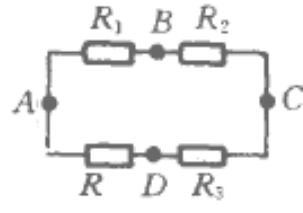
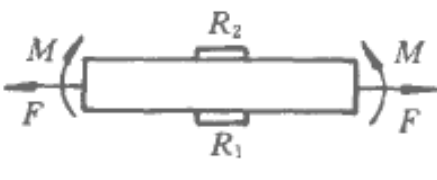
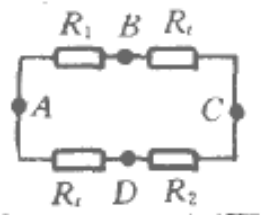
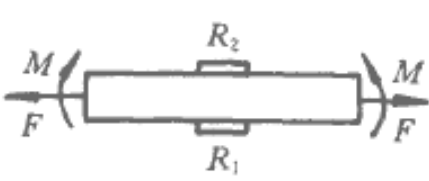
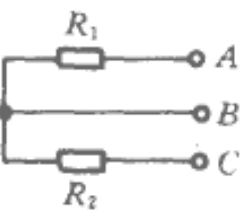
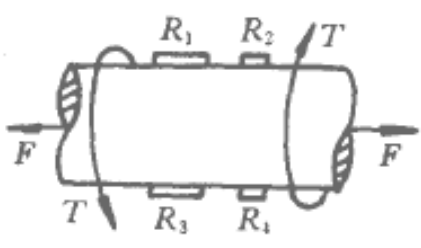
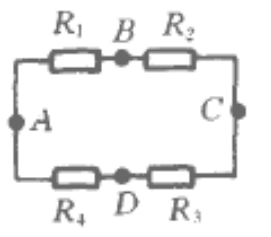
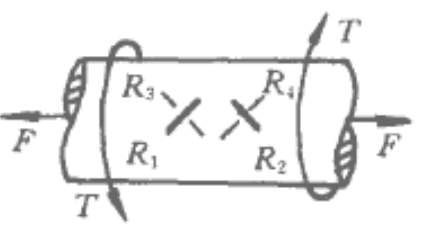
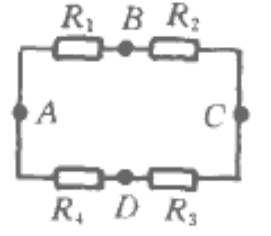


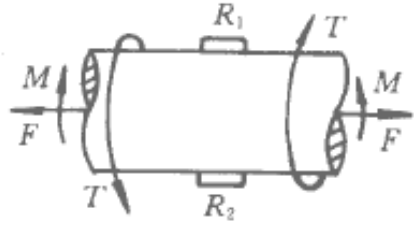
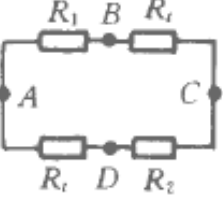
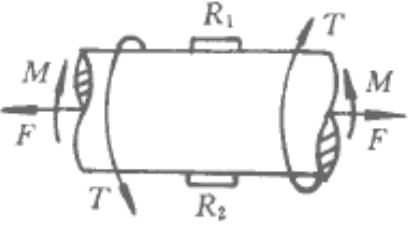
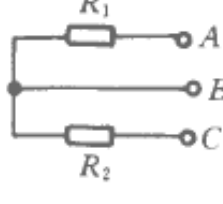
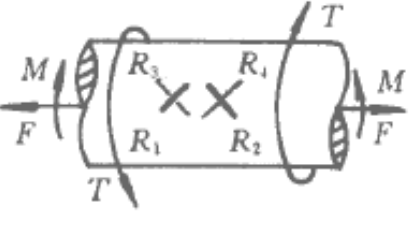
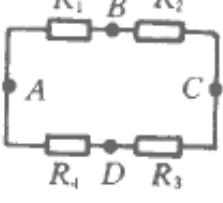
图 3.10 拉-扭组合变形下, 测量拉伸正应力时的布片位置和电桥接法

常用的布片方案、电桥接法、应变仪读数与需测应变之间的关系，见表 3.2。

表 3-2 常温布片方案及电桥接法

荷载形式	需测应变	应变片的粘贴位置	电桥接法	仪器读数 ϵ_Y 与需测应变 ϵ 的关系
弯曲	弯曲			$\epsilon = \frac{\epsilon_Y}{2}$
扭转	扭转			$\epsilon = \frac{\epsilon_Y}{4}$
拉(压)弯组合	拉(压)			$\epsilon = \frac{\epsilon_Y}{2}$
	弯曲			$\epsilon = \frac{\epsilon_Y}{2}$
拉(压)扭组合	拉(压)			$\epsilon = \frac{\epsilon_Y}{2(1+\mu)}$
	扭转			$\epsilon = \frac{\epsilon_Y}{4}$

续表

载荷形式	需测应变	应变片的粘贴位置	电桥接法	仪器读数 ϵ_Y 与需测应变 ϵ 的关系
拉(压) 弯曲 扭转	拉(压)			$\epsilon = \frac{\epsilon_Y}{2}$
	弯曲			$\epsilon = \frac{\epsilon_Y}{2}$
	扭转			$\epsilon = \frac{\epsilon_Y}{4}$

注:表中 R_i 为温度补偿片。

3.6 静态应变测量

静态应变测量是工程应用和科学研究中常用的手段,也是材料力学实验中常用的测试方法。下面介绍常温下静态应变测量中有关问题的处理方法,这些处理方法也适用于动态和特殊条件下的应变测量。

3.6.1 准备工作

1、选择测点。首先对被测构件进行受力分析,然后找出应力大的危险截面和需研究的部位。如以测量最大应力为目的,则应在可能为最大应力的部位上布置测点;当要了解某一断面应力分布的规律时,就要沿断面上连续布置若干测点。若测点较多时,应画出测点布置图并编号,以便分析、测试和记录。

2、选择应变片。应变片的种类、型号很多,各有特点和适用范围。

3、选择合适的温度补偿方案。温度补偿片应采用与测量片同型号、同规格的应变片,并粘贴到与被测构件材料相同的补偿块上,补偿块应放置在与被测构

件相同温度的环境中，以获得最佳温度补偿效果。在室内温度很稳定的短时间测量中，也可采用单臂测量（其余三个臂均为固定电阻）。

4、测量前，对应变仪要进行性能检查，不合格者不能使用

5、应变片到应变仪的连线应尽可能短，最好采用绞成麻花状的双股多芯塑料软导线，切勿使用两股并列的导线，这种导线的线间电容大，稍长一点就会造成电桥电容不能平衡。在车间或电磁场很强的环境中测量，可用金属屏蔽线作连线，并将屏蔽网接地，应变仪外壳也应接地。

6、根据测量目的，拟定加载方案和测量步骤。

7、准备记录表格。

3.6.2 实测应变值的修正

在应变测量中，由于条件限制，会有一些条件不能满足，如应变仪的灵敏系数与应变片的不一样，或导线长度超过 10m，或应变片的电阻值不是标准值（120Ω）等等。此时，应变仪显示的应变并非测点的真实应变，需经修正才能得到真实应变。常用的修正方法有以下几种：

1、灵敏系数修正

设应变片的灵敏系数为 K ，应变仪的灵敏度系数为 $K_{\text{仪}}$ ，测点的真实应变为 ε ，应变仪显示应变为 $\varepsilon_{\text{仪}}$ 。根据应变片和应变仪的工作原理分别有：

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \qquad \frac{\Delta R}{R} = K_{\text{仪}}\varepsilon_{\text{仪}} \qquad (3.26)$$

上两式中，等号左右两边相等，于是有：

$$\varepsilon = \frac{K_{\text{仪}}}{K} \varepsilon_{\text{仪}} \qquad (3.27)$$

由式（3.27）可知，只有当 $K_{\text{仪}} = K$ 时 $\varepsilon_{\text{仪}} = \varepsilon$

2、导线电阻修正

联接应变片与应变仪的导线电阻，也是桥臂电阻的一部分，它的存在会降低电桥的灵敏度。一般当导线长度超过 10m，应进行导线电阻修正。设导线电阻为 r ，应变片电阻为 R ，由应变片工作原理知：

$$\Delta R = RK\varepsilon \qquad (3.28)$$

应变仪接测量片的桥臂的电阻为 $R+r$ ，由电桥工作原理有

$$\Delta R = (R+r)K\varepsilon_{\text{仪}} \qquad (3.29)$$

式（3.28）、式（3.29）两式右边应相等，则有

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{r}{R}\right)\varepsilon_{\text{仪}} \qquad (3.30)$$

3、横向效应修正

横向效应的影响，使得应变片只有在与标定灵敏系数完全相同的应力状态下测量时，所测得的应变才是真实应变，而在其他应力状态下测量，或虽是单向应力状态，但测量的是横向应变时，都会引入误差。在有些情况下，误差还相当大，

必须予以修正。这里以测量单向应力下横向应变为例，计算横向效应引起的误差及修正方法。

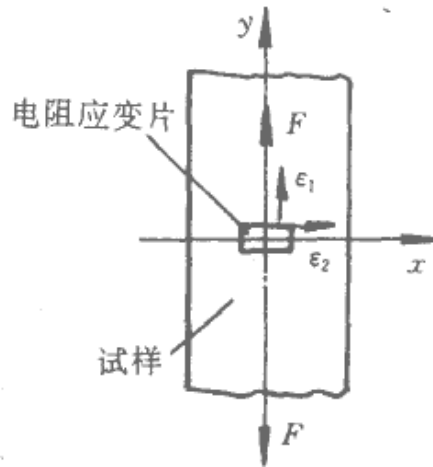


图 3.11 拉-扭组合变形下，测量剪应力时的布片位置和电桥接法

设试样处于单向应力状态下，应变片（轴线沿 x 方向）垂直于应力方向（轴线沿 y 方向）粘贴，如图 3.31 所示，则应变片的电阻变化率为

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x \varepsilon_2 + K_y \varepsilon_1 = K_x \varepsilon_2 \left(1 - \frac{H}{\mu}\right) \quad (3.31)$$

式中， μ 为试样的泊松比。

应变仪指示应变为：

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon_{\text{仪}} \quad (3.32)$$

上两式等号右端相等，则有

$$K \varepsilon_{\text{仪}} = K_x \varepsilon_2 \left(1 - \frac{H}{\mu}\right) \quad (3.33)$$

将式 $K = K_x (1 - \mu_0 H)$ 代入上式有

$$K \varepsilon_{\text{仪}} = \frac{K \varepsilon_2}{1 - \mu_0 H} \left(1 - \frac{H}{\mu}\right) \quad (3.34)$$

由此得到真实应变仪指示应变的关系为

$$\varepsilon_2 = \frac{(1 - \mu_0 H) \mu}{\mu - H} \varepsilon_{\text{仪}} \quad (3.35)$$

横向效应引起的误差为

$$e = \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \times 100\% \quad (3.36)$$

当应变片的横向效应系数 $H=0.01$ ， $\mu=\mu_0=0.285$ 时， $e=-3.23\%$ ；当 $H=0.03$ ， $\mu=\mu_0=0.285$ 时， $e=-9.75\%$ 。结果表明，横向应变的影响效应是不可忽视的。

表 3-3 列出使用应变花时，考虑横向效应影响的修正公式。

表 3-3 使用应变花时，横向效应修正计算公式

应变花形式	修正计算公式
直角应变花	$\varepsilon_{0^\circ} = Q(\varepsilon'_{0^\circ} - H\varepsilon'_{90^\circ})$
	$\varepsilon_{90^\circ} = Q(\varepsilon'_{90^\circ} - H\varepsilon'_{0^\circ})$
45°应变花	$\varepsilon_{0^\circ} = Q(\varepsilon'_{0^\circ} - H\varepsilon'_{90^\circ})$
	$\varepsilon_{45^\circ} = Q[(1+H)\varepsilon'_{45^\circ} - H(\varepsilon'_{0^\circ} + \varepsilon'_{90^\circ})]$
	$\varepsilon_{90^\circ} = Q(\varepsilon'_{90^\circ} - H\varepsilon'_{0^\circ})$
60°应变花	$\varepsilon_{0^\circ} = \frac{Q}{3}[(\varepsilon'_{0^\circ}(3+H) - 2H(\varepsilon'_{60^\circ} + \varepsilon'_{120^\circ}))]$
	$\varepsilon_{60^\circ} = \frac{Q}{3}[(\varepsilon'_{60^\circ}(3+H) - 2H(\varepsilon'_{0^\circ} + \varepsilon'_{120^\circ}))]$
	$\varepsilon_{120^\circ} = \frac{Q}{3}[(\varepsilon'_{120^\circ}(3+H) - 2H(\varepsilon'_{0^\circ} + \varepsilon'_{60^\circ}))]$

注：表中， $Q=(1-\mu_0H)/(1-H^2)$

4、应变片电阻修正

应变仪的指示应变是按桥臂电阻为 120Ω 标定的，当桥臂电阻不等于 120Ω 时，应变仪的指示应变就有误差。此时，应按应变仪使用说明书中给出的修正曲线查得修正系数 K_R ，代入下式计算：

$$\varepsilon = K_R \varepsilon' \quad (3.37)$$

如果以上几种修正计算都需要，则先由下式计算

$$\varepsilon = K_R \left(1 + \frac{r}{R}\right) \frac{K_{\text{仪}}}{K} \varepsilon' \quad (3.38)$$

再将计算的结果代入横向效应修正公式中计算，所得结果即为真实应变。

3.6.3 应力计算

1、单向应力状态下的应力计算公式为

$$\sigma = K\varepsilon \quad (3.39)$$

2.平面应力状态下，主应力方向已知，采用 90°应变花测量，由下式计算应力：

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_{0^\circ} + \mu\varepsilon_{90^\circ})$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_{90^\circ} + \mu\varepsilon_{0^\circ}) \quad (3.40)$$

3、平面应力状态下，主应力方向未知时，可采 45°或 60°应变花测量。

(1) 采用 45°应变花测量时的计算公式：

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{2} \left(\frac{A_1}{1-\mu} \pm \frac{1}{1+\mu} \sqrt{B_1^2 + C_1^2} \right)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{C_1}{B_1} \right) \quad B_1 > 0 \text{ 时}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{C_1}{B_1} \right) + 90^\circ \quad B_1 < 0 \text{ 时}$$

$$\text{式中, } A_1 = \varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{90^\circ}, \quad B_1 = \varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{90^\circ}, \quad C_1 = 2\varepsilon_{45^\circ} - A_1 \quad (3.41)$$

(2) 采用 60°应变花测量时的计算公式：

$$\sigma_{1,2} = E \left[\frac{A_2}{1-\mu} \pm \frac{1}{1+\mu} \sqrt{(\varepsilon_{0^\circ} - A_2)^2 + \frac{1}{3} B_2^2} \right]$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\sqrt{3} B_2}{C_2} \right), \quad C_2 > 0 \text{ 时}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\sqrt{3} B_2}{C_2} \right) + 90^\circ \quad C_2 < 0 \text{ 时}$$

$$\text{式中, } A_2 = \frac{(\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{60^\circ} + \varepsilon_{90^\circ})}{3}, \quad B_2 = \varepsilon_{60^\circ} - \varepsilon_{120^\circ}, \quad C_2 = 2\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{60^\circ} - \varepsilon_{120^\circ} \quad (3.42)$$

4 材料力学实验

本次认识实验旨在介绍金属材料常温力学性能的试验方法。指导初学者完成常用材料的力学性能试验，了解材料试验机的基本构造原理，正确掌握操作规范及使用方法。通过实际操作练习，使学生了解材料力学性能测试过程及我国的国家标准（简称国标），这为后续的各项实验打下坚实基础。

4.1 拉伸试验

4.1.1 概述

拉伸试验是测定材料力学性能的最基本最重要的实验之一。由本实验所测得的结果，可以说明材料在静拉伸下的一些性能，诸如材料对载荷的抵抗能力的变化规律、材料的弹性、塑性、强度等重要机械性能，这些性能是工程上合理地选用材料和进行强度计算的重要依据。

金属材料的拉伸试验须执行国标 GB/T228—2002(金属材料室温拉伸试验方法)之规定。金属材料的低温和高温拉伸试验分别执行国标 GB/T13239—2006 和 GB/T4338—2006。根据材料力学实验教学在内容安排上的习惯，本节只介绍金属材料在室温下的屈服强度、抗拉强度、断后伸长率和断面收缩率的测定方法。

4.1.2 试验目的

- 1、测定低碳钢（如 Q235 钢）的屈服强度 σ_{sl} 、抗拉强度 σ_b 、断后伸长率 δ 、断面收缩率 ψ 。铸铁的抗拉强度 σ_b 。
- 2、观察拉伸过程中的屈服、强化、颈缩和脆性断裂等现象，比较塑性材料(低碳钢)与脆性材料(铸铁)的强度及塑性特点和破坏形式。
- 3、比较低碳钢和铸铁两种材料的拉伸性能和断口情况。

4.1.3 试验设备和仪器

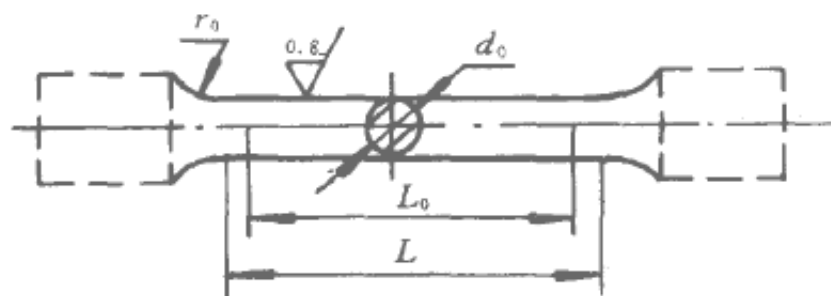
- 1、电子万能试验机
- 2、游标卡尺
- 3、试样划线器。

4.1.4 试样的制备

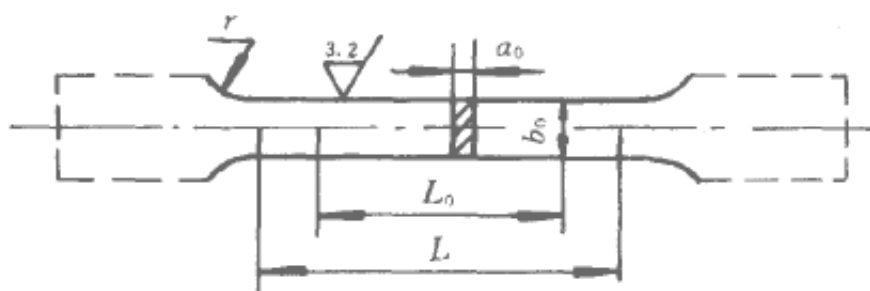
本试验按上述国标制备试样。拉伸试样系由夹持部分、过渡部分和平行部分构成。试样两端较粗部分为夹持部分，其形状和尺寸可根据材料试验机夹头情况而定；试样两夹持段之间的均匀部分为平行部分，即试验段部分。通常采用机加工的圆形截面试样，亦可采用矩形截面试样，如图 4.1 所示。

图中 L 为试样平行长度， L_0 为试样原始标距（即测量变形的工作长度）， d_0 为圆形试样平行长度部分原始直径， a_0 为矩形试样的原始厚度， b_0 为矩形试样平行部分原始宽度， S_0 为试样平行部分原始横截面积， r 为带头试样头部到平行部分过渡圆弧半径。拉伸试样分为定比例和定标距两种，比例试样系按公式 $L_0=K\sqrt{S_0}$ 计算而得的试样，式中系数 K 常为 5.65 或 11.3，前者称为短试样，

后者称为长试样。短、长试样的标距 L_0 应分别等于 $5d_0$ 或 $5.65\sqrt{S_0}$ 、 $10d_0$ 或 $11.3\sqrt{S_0}$ 。一般应采用短比例试样。定标距试样的原始标距 L_0 与原始横截面积 S_0 之间无上述比例关系，而是根据产品检验标准或供需双方协议来确定。本次试验采用圆形短比例试样。



(a)圆形试样



(b)矩形试样

图 4.1 拉伸试样图

4.1.5 试件制备

根据国标《金属材料室温拉伸试验方法（GB/T228—2002）》之规定：

1. 低碳钢（典型塑性材料）

在拉伸试验时，利用试验机的自动绘图装置可绘出试样所受的力与伸长量之间的关系图，即即图 4.2 所示的 $F-\Delta L$ 曲线，图中最初阶段呈曲线，是由于试样头部在夹具内有滑动及试验机存在间隙等原因造成的。分析时应将图中的直线段延长与横坐标相交于 O 点，作为其坐标原点。拉伸图形象地描绘出材料的变形特征及各阶段受力和变形间的关系，可由该图形的状态来判断材料弹性与塑性好坏、断裂时的韧性与脆性程度以及不同变形条件下的承载能力。但同一种材料的拉伸曲线会因试样尺寸不同而各异。为了使同一种材料不同尺寸试样的拉伸过程及其特性点便于比较，以消除试样几何尺寸的影响，可将拉伸曲线图的纵坐标（力 F ）除以试样的原始横截面面积 S_0 ，并将横坐标（伸长 ΔL ）除以试样的原始标距 L_0 ，这样得到的曲线便与试样尺寸无关，此曲线称为应力-应变曲线或 $\sigma-\varepsilon$ 曲线，如图 4.3 所示。从曲线上可以看出，它与拉伸图曲线相似，拉伸试验过程分为四个阶段，也同样表征了材料的力学性能。

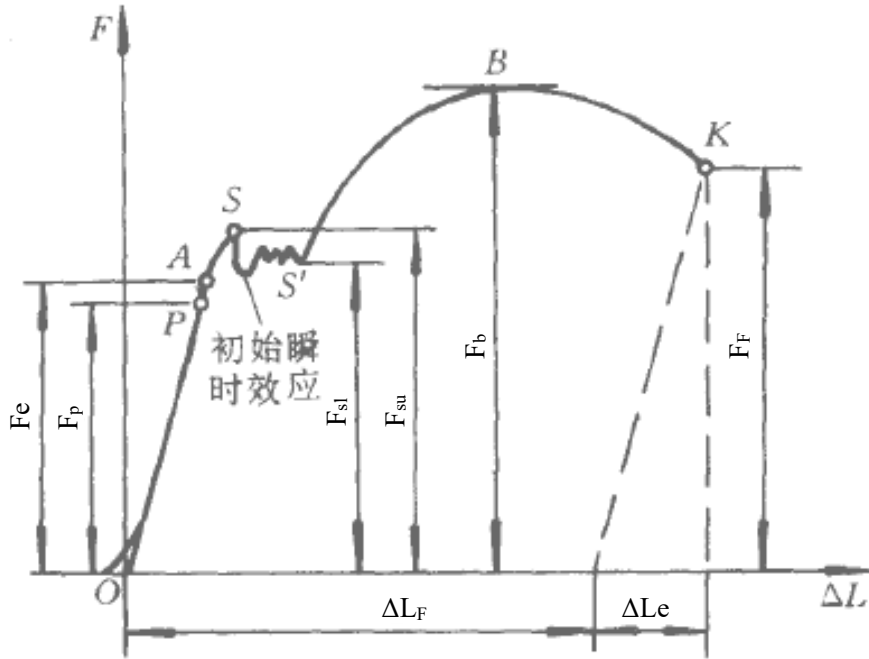


图 4.2 低碳钢拉伸图

F_p -比例伸长力； F_e -弹性伸长力； F_{su} -上屈服力； F_{sl} -下屈服力；

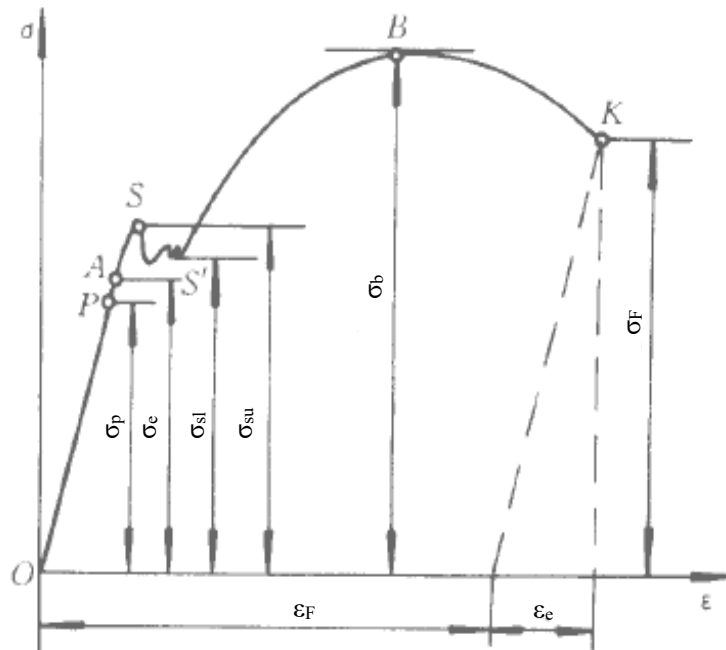


图 4.3 低碳钢的应力应变图

σ_p -比例极限； σ_e -弹性极限； σ_{su} -上屈服点； σ_{sl} -下屈服点；

σ_b -抗拉强度； σ_f -断裂应力； ε_F -断裂后塑性应变； ε_e -弹性应变

弹性阶段 OA，屈服阶段 AS'，强化阶段 S'B，颈缩和断裂阶段 BK。

2. 铸铁（典型脆性材料）

做拉伸试验时，利用试验机的自动绘图装置绘出铸铁的拉伸图，如图 4.4 所示。在整个拉伸过程中变形很小，无屈服、颈缩现象，拉伸图无直线段。曲线很快达到最大拉力 F_b ，试样突然拉力发生断裂，其断口是平齐粗糙的，是一种典型的脆性破坏断口，如图 4.5(b)所示。其抗拉强度（强度极限） $\sigma_b = F_b / S_0$ 。它远

小于低碳钢材料的拉伸强度。

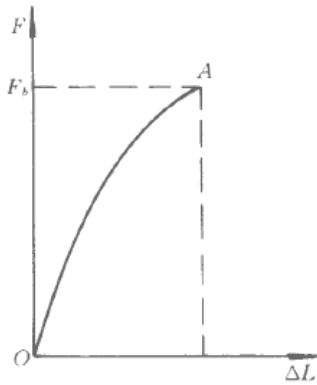


图 4.4 铸铁拉伸图

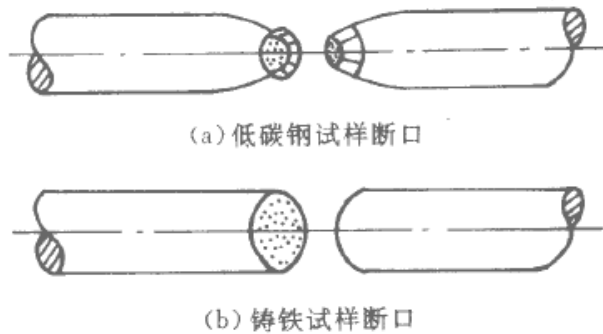


图 4.5 拉伸试样断口形貌图

4.1.6 试验步骤

1、根据试样的形状、尺寸和预计材料的抗拉强度来估算最大拉力，并以此力作为试验机示力度盘量程的 40%~80%，以选择合适的示力度盘和相应的摆锤。然后，选用与试样头部相适应的夹具。

2、用细砂布打磨低碳钢试样表面，使之光亮，在试样的原始标距长度 L_0 范围内用划线器等分 10 个分格点，并确定标距端点，以便观察标距范围内沿轴向变形的情况和试样破坏后测定断后伸长率。

3. 根据国标《金属材料室温拉伸试验方法 (GB/T228—2002)》中的规定，测定试样原始横截面积。本次试验采用圆形试样，应在标距的两端及中间处的两个相互垂直的方向上各测一次横截面直径，取其算术平均值，选用三处测得的直径最小值，并以此值计算横截面面积 S_0 , $S_0 = \pi d_0^2 / 4$ 。计算值修约到三位有效数字 (π 取三位有效数字)。

4. 安装试样，快速调节万能试验机的夹头位置，将示力度盘指针调零，并将自动绘图装置调整好。经指导教师检查后即可开始试验。

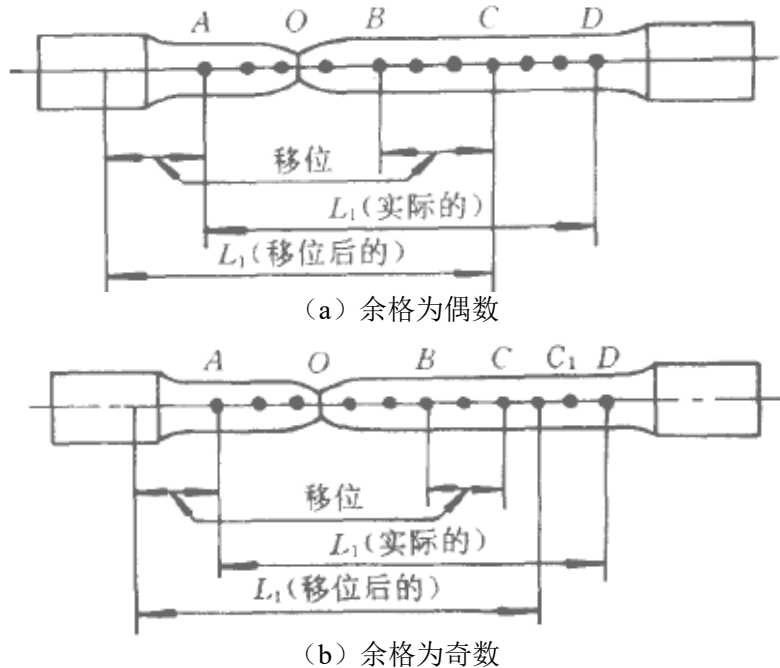


图 4.6 用位移法确定断后伸长率

5. 在加载试验过程中，要求均匀缓慢地进行加载。对于低碳钢试样的拉伸试验，要注意观察拉伸过程四个阶段中的各种现象。并记下屈服荷载 F_{sl} 值；最大载荷 F_b 。对于铸铁试样，只需测定其最大载荷 F_b 。试样被拉断后立即停机，并取下试样。

6. 对于拉断后的低碳钢试样，要分别测量断裂后的标距 L_1 和颈缩处的最小直径 d_1 按照国际 GB/T228—2002 中的规定测定 L_1 时，将试样断裂后的两段在断口处紧密地对接起来，尽量使其轴线位于一条直线上，直接测量原标距两端的距离。若断口处到最邻近标距端点的距离小于或等于 $(1/3)L_0$ 时，则需要用“移位法”来计算 L_1 。其方法是：在长段上从拉断处 O 取基本等于短段格数，得 B 点，接着取长段所余格数[偶数，图 4.6(a)]的一半，得 C 点，或者取所余格数[奇数，图 4.6(b)]分别减 1 与加 1 的一半，得 C 点和 C_1 点。移位后的 L_1 分别为： $AB+2BC$ 或者 $AB+BC+BC_1$ 。测定断面收缩率时，在试样颈缩最小处两个相互垂直的方向上测量其直径 d_1 ，取其算术平均值作为 d_1 计算其断面收缩率。

4.1.7 试验结果及数据处理

根据试验测定数据，可分别计算材料的强度指标和塑性指标。

1、低碳钢

强度指标：下屈服点： $\sigma_{sl} = F_{sl} / S_0$

抗拉强度： $\sigma_b = F_b / S_0$

塑性指标：断后伸长率： $\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$

断面收缩率： $\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$

2、铸铁

强度指标：抗拉强度 $\sigma_b = F_b / S_0$

3、绘出拉伸过程中的 F- ΔL 曲线，对试验中的各种现象进行分析比较，并写进试验报告中。

对于上述试验中的原始数据和试验结果数据要进行修约，以便使整理出的数据资料简明、清晰。具体修约的数据内容（见国标 GB/T228—2002 规定）：对于试样原始横截面面积的计算值应修约到三位有效数字；对于短比例试样的原始标距计算值应修约到最接 5mm 的倍数；对于长比例试样的原始标距计算值应修约到最接近 10mm 的倍数，如为中间数值则向较大一方修约；对于测定性能数值的修约按表 4-1 规定执行。

表 4-1 性能数值约修

测试项目	范 围	修约到
$\sigma_p, \sigma_r, \sigma_s$ $\sigma_{sl}, \sigma_{sl}, \sigma_b$	$\leq 200\text{N/mm}^2$	1N/mm ²
	$> 200 \sim 1000\text{N/mm}^2$	5N/mm ²
	$> 1000\text{N/mm}^2$	10N/mm ²
δ	$\leq 10\%$	0.5%
	$> 10\%$	1.0%
ψ	$\leq 25\%$	0.5%
	$> 25\%$	1.0%

4.1.8 实验报告要求

材料力学实验报告中应写明专业、班级、姓名、实验小组成员、试验日期和试验环境条件等。其具体内容应有：

- 1、试验名称；
- 2、试验目的；
- 3、试验设备和仪器；
- 4、试验原理和方法的简述；
- 5、试验数据记录(如表格、F- ΔL 曲线)、试验数据处理和试样断口形貌图；
- 6、试验误差和试验结果的讨论分析，回答本书中列出的思考题。

4.1.9 思考题

- 1、试比较低碳钢和铸铁试样拉伸时的主要力学性能及其实用价值。
- 2、试从低碳钢和铸铁试样的断口特征说明金属材料两种基本破坏形式的破坏特点。
- 3、两圆形截面拉伸试样分别为短比例和长比例试样，其原始直径相同，断后伸长率是否相同？

4.2 压缩试验

4.2.1 概述

在工程实际中，有些构件承受压力，而材料由于载荷形式的不同其表现的机械性能也不同，因此除了通过拉伸实验了解金属材料的拉伸性能外，有时还要作压缩实验来了解金属材料的压缩性能，一般对于铸铁、水泥、砖、石头等主要承受压力的脆性材料才进行压缩实验，而对于塑性金属或合金进行压缩实验是主要目的是为了材料研究。压缩试验同拉伸试验一样，也是测定材料在常温、静载、单向受力下的力学性能的最常用、最基本的实验之一。

4.2.2 试验目的

- 1、测定在压缩时低碳钢的屈服点 σ_{sc}
- 2、测定铸铁的抗压强度 σ_{bc} 。
- 2、观察它们的破坏现象，并比较这两种材料受压时的变形特性。

4.2.3 试验设备和仪器

- 1、万能试验机或压力试验机
- 2、游标卡尺等

4.2.4 试件制备

按照国标《金属材料压缩试验方法(GB/T7314-2005)》中的规定，金属料的压缩试样一般制成圆柱形，如图 4.7 所示，试样长度 L 一般为直径 d_0 的 2.5~3.5 倍， $d_0=10\text{mm}\sim 20\text{mm}$ 。亦可采用正方形柱体试样，如图 4.8 所示。试样端面应尽量光滑，以减少摩擦力对横向变形的影响。

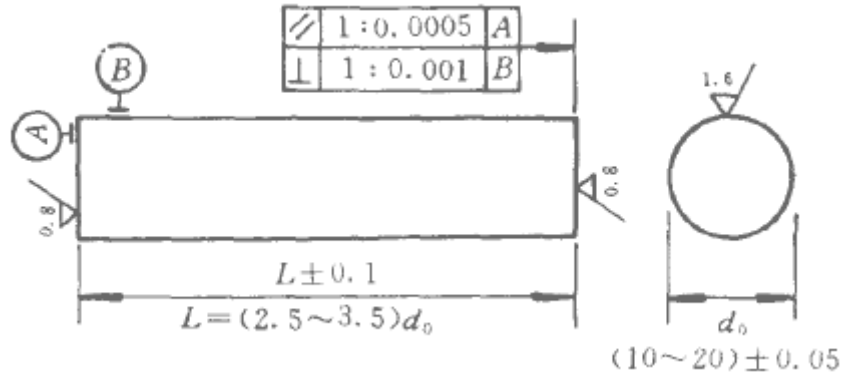


图 4.7 圆柱体试样

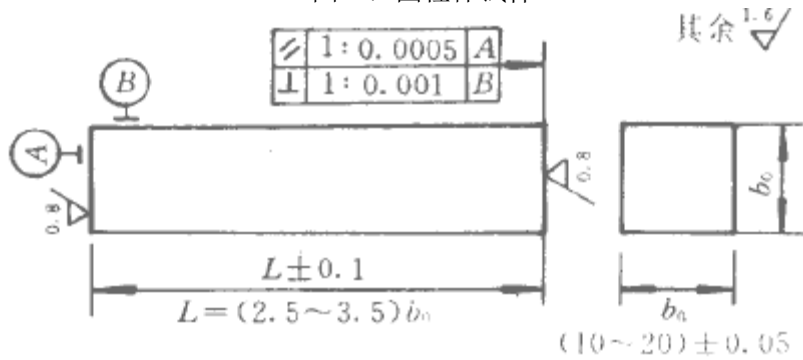


图 4.8 正方体圆柱试样

4.2.5 试验原理

1、低碳钢的压缩实验

低碳钢轴向压缩时会产生很大的横向变形，但由于试样两端面与试验机支承垫板间存在摩擦力，约束了这种横向变形，故试样出现显著的鼓胀，如图 4.9 所示。为了减少鼓胀效应的影响，通常的做法是除了将试样端面制作得光滑以外，还在端面涂上润滑剂以进一步减小摩擦力。塑性材料在压缩过程中的弹性模量、屈服点与拉伸时相同。但在到达屈服阶段时不像拉伸试验时那样明显，因此要仔细观察才能确定屈服载荷 F_{sc} ，从而得到压缩时的屈服点， $\sigma_{sc} = F_{sc} / S_0$ 。当继续加载时，试样越压越扁，由于横截面面积不断增大，试样抗压能力也随之提高，曲线持续上升，如图 4.10 所示。除非试样过分鼓出变形，导致柱体表面开裂。否则塑性材料将不会发生压缩破坏。因此，一般不测塑性材料的抗压强度（强度极限），而通常认为抗压强度等于抗拉强度。

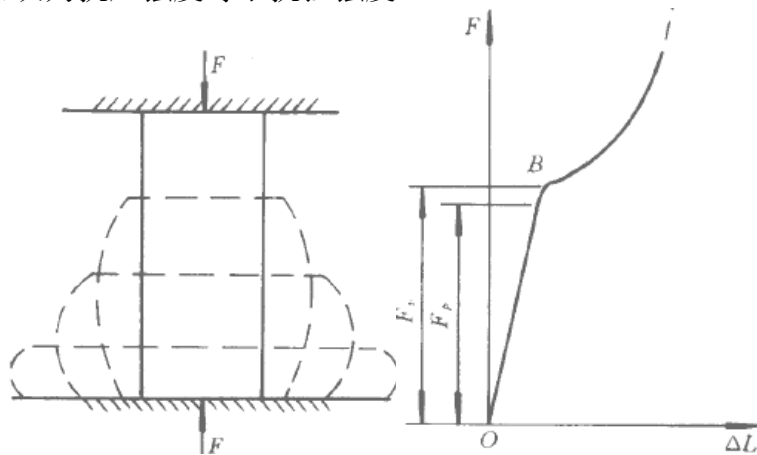


图 4.9 低碳钢压缩时的鼓胀效应图

图 4.10 低碳钢压缩曲线

2、铸铁的压缩实验

铸铁由于塑性变形很小，所以尽管有端面摩擦，鼓胀效应却并不明显，而是当应力达到一定值后，试样在与轴线大约成 $45^\circ \sim 55^\circ$ 方向上发生破裂，如图 4.11、图 4.12 所示。这是由于脆性材料的抗剪强度低于抗压强度，从而使试样被剪断。将压缩曲线上最高点所对应的压力值 F_{bc} 除以原试样横截面面积 S_0 ，即得铸铁抗压强度 $\sigma_{bc} = F_{bc}/S_0$ 。

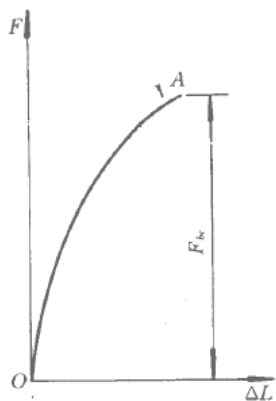


图 4.11 铸铁压缩曲线



图 4.12 铸铁压缩破坏示意图

4.2.6 实验步骤

- 1、用游标卡尺在试样两端及中间处两个相互垂直的方向上测量直径，并取其算术平均值，选用三处测量最小直径来计算横截面面积 S_0
- 2、根据低碳钢屈服载荷和铸铁最大实际压缩力的估计值（应是满量程的 40%~80%），选择试验机的示力度盘，并调整其指针对零。
- 3、调整好自动绘图装置。
- 4、将试样端面涂上润滑油后，再准确地置于试验机活动平台的支承垫板中心处。
- 5、调整试验机夹头间距，当试样接近上支承垫板时，开始缓慢、均匀加载。
- 6、对于低碳钢试样，将试样压成鼓形即可停止试验。对于铸铁试样，加载到试样破坏时（可以听见响声）立即停止试验，以免试样进一步被压碎。

4.2.7 试验结果及数据处理

根据试验记录，计算应力值。

- 1、低碳钢的屈服点强度指标： $\sigma_{sc} = F_{sc}/S_0$
- 2、铸铁的抗压强度指标： $\sigma_{bc} = F_{bc}/S_0$

4.2.8 实验报告要求

- 1、简述实验名称、目的要求和实验过程。
- 2、根据两种典型材料的压缩曲线，比较它们在压缩过程中的变形和破坏现象，给出强度指标和试样破坏简图。
- 3、分析试验误差原因，对试验结果进行讨论。

4.2.9 试验注意事项

- 1、严格遵守试验机操作程序，试验时如有异常现象应立即停机，并报告指导教师进行处理。
- 2、铸铁压缩试验时，试样周围要加防护罩，以防试样破裂时碎片飞出伤人。

4.3 电测法测定材料的弹性常数 E 和 μ

4.3.1 概述

弹性模量 E 是表征材料力学性能中弹性的重要指标之一，它反映了材料抵抗弹性变形的能力。在工程计算中，若构件进行刚度、稳定和振动等计算，都要用到弹性模量。它是通过实验方法来测量的。测定弹性模量的实验方法可分为引伸计法，电测法和图解法。

横向变形系数 μ 是材料固有的弹性常数。它反映了同一种材料在弹性范围内，横向应变与纵向应变的数量关系。因此，在研究构件的应力和变形时，要经常用到 E 和 μ 这两个弹性常数。和弹性模量 E 一样，泊松比 μ 也只能通过实验来测定，本实验采用应变测量技术来测量。

可以证明，同一材料的三个弹性常数 E、 μ 和 G(切变模量)满足关系 $G=E/[2(1+\mu)]$ 。据此，同时测定两个常数，即可确定第三个常数。

4.3.2 实验目的

- 1、测定试样的弹性模量 E 和泊松比 μ 。
- 2、了解电测法的基本原理及电阻应变仪的使用。
- 3、学会拟定实验加载方案和处理实验数据。
- 4、验证虎克定律

4.3.3 实验设备

- 1、静态电阻应变仪。
- 2、XL3418T 型材料力学创新组合试验台。
- 3、矩形截面拉伸试样及电阻应变片。

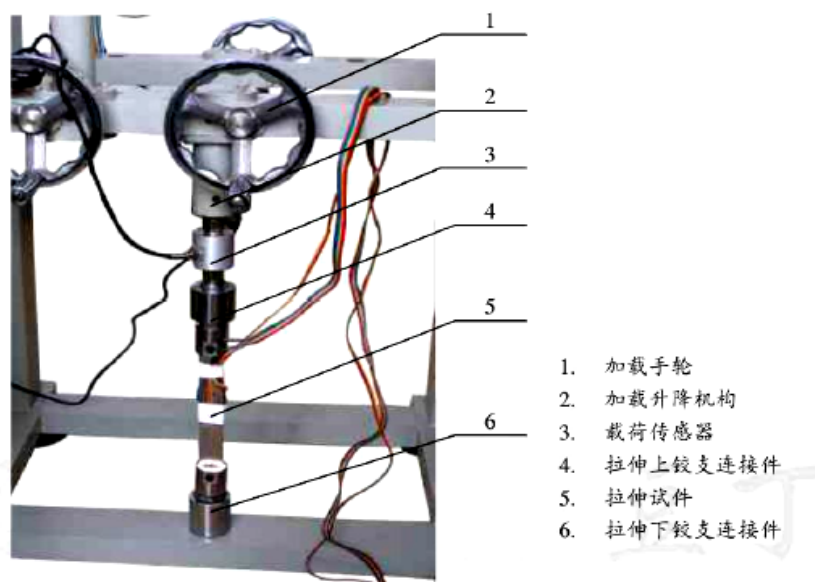


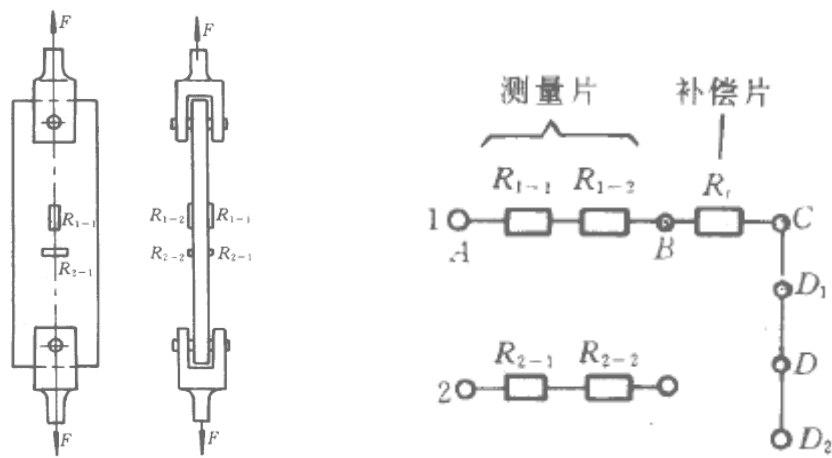
图 4.13 弹性常数 E 和 μ 测定实验装置

4.3.4 实验原理和方法

由虎克定律 $E=\sigma/\varepsilon$ 和泊松比 $\mu=|\varepsilon'/\varepsilon|$ 知，对材料弹性常数 E 和 μ 的测量，实质上就是要测取拉伸试样受载后相应的纵向（轴向）应变 ε 和横向应变 ε' 。现

选用电阻应变片作为测量元件，将它牢牢地粘贴在试样上。当试样受载变形时，电阻应变片也随之产生同样大小的变形，而使自身的电阻变化。这种极微小的变化，通过电阻应变仪，将它转换成电量信号并放大，再转换为应变量的大小。以上就是应变电测法的基本原理。

国标 GB/T22315-2008《金属材料弹性模量和泊松比试验方法》整合修订了国标 GB/T8653-1998 和 GB/T2015-1991，按国标 GB/T22315-2008 规定，如图 4.14(a)所示，在试样中部沿纵向（轴向）和横向各粘贴一电阻应变片 R_{1-1} 和 R_{2-1} ，位置也相应地粘贴应变片 R_{1-2} 和 R_{2-2} 。如图 4.14 (b) 所示，将应变片 R_{1-1} 和 R_{1-2} 串联在一块，作为纵向应变的测量片，接于电阻应变仪的测量电桥 A、B 接线端子上，所测得纵向应变为 R_{1-1} 和 R_{1-2} 平均值。同样，将 R_{1-2} 和 R_{1-2} 串联在一块，作为横向应变的测的量片，再接入测量电桥。试样通过圆柱销和“Y”形接头装于万能试验机上加载。



(a) 试样及其贴片 (b) 串联应变片和公共温度补偿片接法

图 4.14 测定 E 、 μ 的试样及其贴片位置、电桥接法

4.3.5 实验步骤

1、根据 GB/T22315-2008 要求来测量矩形试样原始横截面面积 S ，即应在标距的两端及中间处测量，取其三处横截面面积的平均值，并修约到三位有效数字，列入下表 4-2 中。

表 4-2 试样原始截面面积

试样尺寸	宽度 b/mm	$b_1=$	$b_2=$	$b_3=$	三处横截面 面积平均值 S_0/mm^2
	厚度 t/mm	$t_1=$	$t_2=$	$t_3=$	

2、依据最大载荷为试验机示力来度盘满量程的 40%~80%来选择合适的示力度盘和相应的摆锤；示力度盘调零。

3、安装试样。

4、采用多点半桥公共补偿法测量。按图 4.14(b)所示的线路，将应变片 R_{1-1} 和 R_{1-2} 串联， R_{2-1} 和 R_{2-2} 串联，温度补偿片 R_t 接于电阻应变仪的预调平衡箱上，调整电阻应变仪，使它们处于平衡状态。

5、开始实验时，加载应缓慢均匀。当载荷为 F_0 时，电阻应变仪应调到初始平衡位置，再分级加载，然后卸载到 0。然后算出其应变增量。当各级测量值基本相等时，就验证了符合虎克定律。若不符合，要分析原因改进之。与此同时，

还要将相应载荷下的 μ 值算出, 进行比较分析。载荷达到最大载荷后, 还要卸载到初始载荷, 此时电阻应变仪应回到初始平衡位置, 以检验实验的重复性。重复 2、3 步, 直至测得三次有效测量数据。

6、实验结束。卸载, 取下试样, 清理实验现场, 将试验机和应变仪复原。

4.3.6 实验数据处理

试件采用矩形截面试件, 为了消除偏心弯曲引起的测量误差, 在试件中央截面上, 沿前后两面的轴线方向分别对称地布有一对轴向应变片, 以测量轴向应变

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_1'}{2}, \quad \varepsilon' = \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_2'}{2}。$$

将应变值代入下式计算 E 和 μ :

$$E = \frac{\Delta P}{S_{0\text{均}} \Delta \varepsilon_{\text{均}}}, \quad \mu = \left| \frac{\Delta \varepsilon_{\text{均}}'}{\Delta \varepsilon_{\text{均}}} \right|$$

式中, $S_{0\text{均}}$ 为横截面积平均值, $\Delta \varepsilon_{\text{均}}$ 为纵向应变平均值, $\Delta \varepsilon_{\text{均}}'$ 为横向应变平均值。

4、在 σ 、 ε 坐标系中, 画出各级荷载下的实验数据点, 试观察诸点可否靠近一直线, 以检查是否满足虎克定律。

4.3.7 实验报告要求

1、简述实验名称、实验目的及要求、所用实验设备和实验过程 (含实验加载方案的拟定)。

2、给出弹性模量 E 和泊松比 μ 的测量值。

3、根据实验数据绘出 σ - ε 图, 看是否符合虎克定律, 并分析实验误差的原因。

4.3.8 思考题

1、本实验中电阻应变片的标距长短对测量结果有无影响? 为什么要设置温度补偿片? 如何设置?

2、为什么说本实验将两个应变片串联后, 作为一个测量片接于测量电桥, 测得是两个应变片的平均应变?

3、试简述机械式引伸计法测变形 (位移) 和电测法测应变的优缺点? 若本实验采用机械式引伸计法测量, 实验方案如何拟定?

4.4 扭转实验

4.4.1 概述

工程中有许多承受扭转变形的构件, 了解材料在扭转变形时的力学性能, 对于构件的合理设计和选材是十分重要的。材料在扭转变形下的力学性能只能通过试验来测定; 扭转变形是构件的基本变形之一。因此, 扭转试验也是材料力学基本实验之一。

4.4.2 试验目的

1、测定低碳钢的屈服点 (剪切屈服极限) τ_s 或下屈服 τ_{sl} 、抗点扭强度 (剪

切强度极限) τ_b 。

2、测定铸铁的抗扭强度 τ_b 。

3、观察、比较和分析上述两种典型材料受扭转时变形和破坏等现象。

4.4.3 试验设备

1、JNSG-144 型教学用扭转试验机；

2、游标卡尺等。

4.4.4 试样制备

根据国标《金属材料室温扭转试验方法(GB/T10128-2007)》中的规定，金属扭转试验所用试样截面为圆形，推荐采用直径为 10mm，标距分别为 50mm 和 100mm、平行长度 L_c 分别为 70mm 和 120mm 的试样。其头部形状和尺寸应按试验机夹头要求制备。如采用其他直径的试样，其平行长度应为标距加上两倍直径。扭转试样的形状和尺寸以及加工精度见图 4.15。

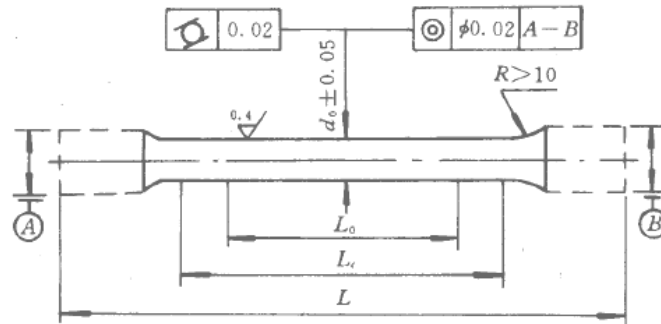


图 4.15 圆形扭转试样

4.4.5 试验原理

1、在低碳钢试样的扭转试验全过程中，由试验机自动绘图装置绘出其扭矩 T 和扭转角 φ 的关系曲线，如图 4.16 所示。

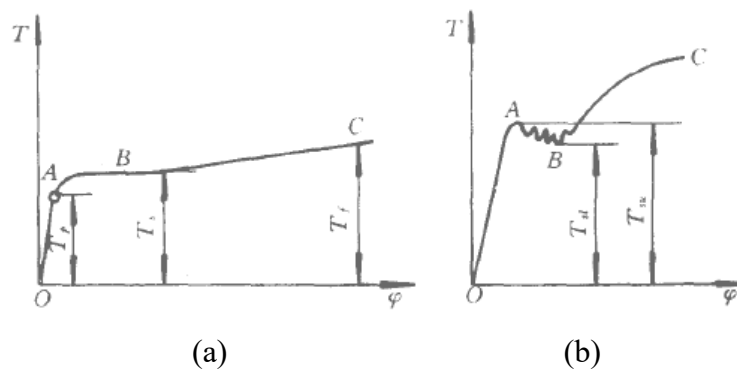


图 4.16 低碳钢的 $T-\varphi$ 曲线图

由该图知，在弹性变形 OA 直线段，试样横截面上的扭矩与扭转角成正比关系，材料服从切变虎克定律。在这阶段可测定切变模量 G 。而 AB 段为曲线部分，它表明低碳钢在扭转过程中，有明显的屈服现象产生。当首次扭转角增加而扭矩不增加（保持恒定）时的扭矩为屈服扭矩 T_s ，如图所示 4.16(a)所示，这时扭矩度盘上的指针几乎不再转动。另一种情况，屈服阶段为锯齿形曲线。度盘指针首次下降前的最大扭矩为上屈服扭矩 T_{su} 屈服阶段中最小扭矩为下屈服扭矩 T_{sl} ，如图 4.16(b)所示。本次试验测定屈服扭矩或下屈服扭矩。根据测定的屈服扭矩或下屈服扭矩按弹性扭转公式计算切(剪)应力，屈服点或下屈服点为： $\tau_s = T_s / W_T$

或 $\tau_{sl} = T_{sl} / W_T$ ，其中 W_T 为抗扭截面模量。对试样继续施加扭矩，直至扭断，如图 4.16(a) 中 BC 段。从试验机的扭矩度盘上可读出试样扭断前所承受的最大扭矩，按弹性扭转公式计算抗扭强度 $\tau_b = T_b / W_T$

2、铸铁试样扭转试验时，其扭矩 T 和扭转角 φ 的关系曲线如图 4.17 所示。从该图可以看出，试样从开始受扭直至破坏，近似为一直线，即无屈服现象产生，扭转角很小，破坏是突然发生的，断裂口处在与试样轴线约成 45 度角的螺旋面上。其最大扭矩为 T_b ，按弹性扭转公式计算抗扭强度 $\tau_b = T_b / W_T$ 。上述扭转试验要求在室温 10°~35° 条件下进行。

3、试样受扭时，材料处于纯切（剪）应力状态，如图 4.18 所示。在与试样轴线成 45° 角的螺旋面上，分别承受主应力 $\sigma_1 = \tau$ 和 $\sigma_3 = -\tau$ 的作用，由于低碳钢的抗扭强度小于抗拉强度，所以试样沿其横截面被剪断，断口平齐。而铸铁的抗拉强度小于抗扭强度，故试样沿其 45° 方向被拉断，断口成一螺旋面，如图 4.19 所示。

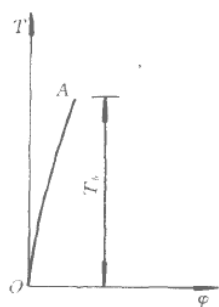


图 4.17 铸铁的 T-φ 曲线图

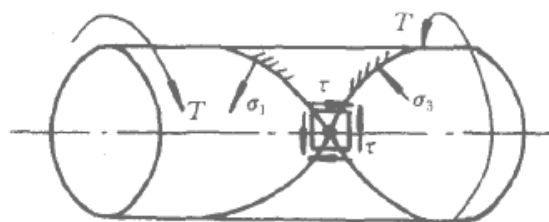
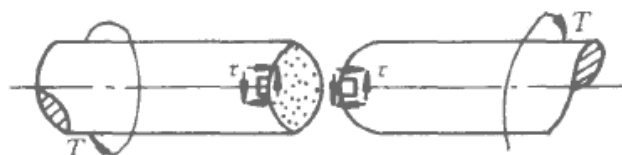
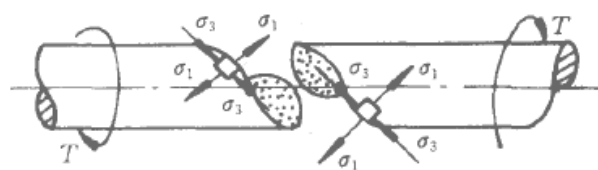


图 4.18 纯切应力状态



(a) 低碳钢试样断口



(b) 铸铁试样断口

图 4.19 受扭试样断口

4.4.6 试验步骤

1、测量试样直径。在标距两端及其中间处两个相互垂直方向上各测一次直径，并取其算术平均值，取三处测得直径的算术平均值中的最小值计算试样抗扭截面模量 W_T 。

2、估计试样的最终扭矩 T_p ，选择合适的扭矩度盘，调整扭矩度盘指针对零点。装好绘图纸并选择扭转速度 [屈服前应在 (6~30°) min 范围内，屈服后不大于 360°/min，且速度的改变应无冲击]。

3、安装试样，用粉笔在试样表面上划一条平行于试样轴线的直线，以便观

察受扭时的变形。

4、进行试验，观察试样在扭转过程中的各种现象。并记下试样扭转屈服时的扭矩 T_s 和破坏时的最大扭矩 T_b ，直至试样断裂。

5、取下试样。观察比较其断口，分析破坏原因。

6、将试验机复原，结束试验。

4.4.7 试验结果整理

根据测定低碳钢和铸铁的扭矩，按弹性扭转公式计算切应力，并将试验结果填表，对测得的性能数值 τ_b 、 τ_s 、 τ_{sl} 修约到 1MPa

低碳钢切变强度指标： $\tau_s = T_s / W_T$ 或 $\tau_{sl} = T_{sl} / W_T$ $\tau_b = T_b / W_T$

铸铁切变强度指标： $\tau_b = T_b / W_T$

4.4.8 试验报告要求

1、简述试验名称、目的、要求和试验过程

2、绘出低碳钢和铸铁扭转时 $T-\phi$ 曲线图，比较其力学性能的特点，并给出其强度指标。

3、比较分析上述两种典型材料在扭转破坏时的形式，绘出断口形状，指出各自破坏的原因。

4.4.9 思考题

1、低碳钢拉伸和扭转的断裂形式是否一样？分析其破坏原因。

2、铸铁在压缩和扭转时，其断口都与试样轴线成 45° 左右，破坏原因是否相同？

3、试根据拉伸、压缩和扭转三种试验结果，综合分析低碳钢与铸铁的力学性能。

4.5 矩形截面梁弯曲正应力电测实验

4.5.1 概述

梁是工程中常用的构件。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假设推导出来的，它的正确性以及能否推广到剪切变形梁，可以由本次实验提供的简单方法验证。

4.5.2 实验目的

1、用电测法测量矩形截面梁在纯弯曲、剪切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。

4.5.3 实验设备

1、静态电阻应变仪。

2、游标卡尺、钢尺。

3、纯弯曲梁装置（或悬臂梁装置）一套。

4、贴有电阻应变片的矩形截面梁和温度补偿块。

4.5.4 实验原理

在如图 4.20 (a) 所示的矩形截面梁纯弯曲段 AA 截面上或如图 4.20 (b) 所示的悬臂梁的邻近固定端 AA 截面上, 沿梁高度方向且平行于轴线粘贴 5 片电阻应变片, 每片间距为 $h/4$ (h 为梁的高度, 如图 4.20 (c) 所示)。当梁受载后, 电阻应变片随梁的弯曲变形而产生伸长或缩短, 使自身的电阻改变。通过力学量的电测法原理, 利用电阻应变仪可测出梁横截面上各测点的应变值 $\varepsilon_{\text{实}}$ 。再依据虎克定律即可求出相应各测点的应力值, 即 $\sigma_{\text{实}} = E\varepsilon_{\text{实}}$ 。纯弯曲矩形梁尺寸如图 4.21 所示。

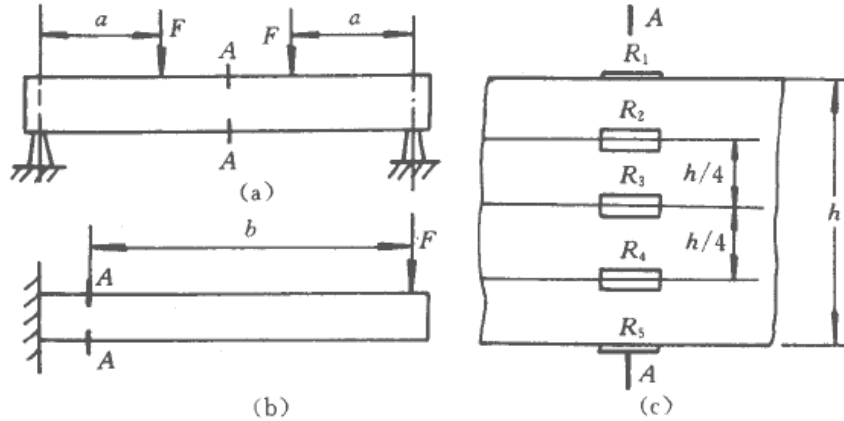


图 4.20 弯曲正应力试验装置及试样贴片位置图

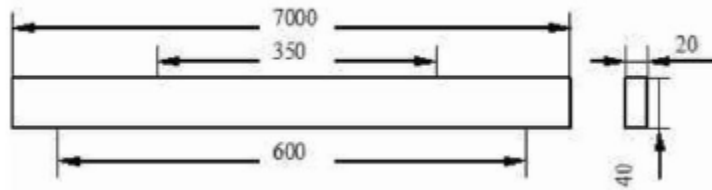


图 4.21 纯弯曲矩形梁外形尺寸、支撑及载荷间距离

实验采用等增量法, 即每增加等量的载荷 ΔF , 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 3~5 级, 最大载荷 F_{max} 的选取, 应依据梁的最大应力 $\sigma_{\text{max}} < (0.7 \sim 0.8) \sigma_s$ (σ_s 为材料的屈服点) 来定。当加载至最后一级, 测取各测点应变值后, 即卸载。本实验重复三次, 最后取三次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 $\sigma_{\text{理}} = My/I$ 的正确性 (M 为 AA 截面上弯矩, y 为测点离中性轴的距离, I 为 AA 截面对中性轴的惯性矩)。

4.5.5 实验步骤

1、测量矩形梁的截面尺寸 (宽度 b 、高度 h) 载荷作用点至支座距离 a (载荷作用点至测量截面的距离 b), 以及粘贴电阻应变片的位置尺寸等。

2、根据梁的截面尺寸及支座条件、材料的 σ_s 值, 确定分级加载时每级的大小和级次以及最大载荷值。

3、实验采用多点半桥公共补偿测量法, 将 5 个应变测量片和公共温度补偿片分别接到预调平衡箱上。根据电阻应变片所给出的灵敏系数 K 值调好电阻应变仪的灵敏系数。

4、依照静态电阻应变仪的操作使用方法, 利用给定的标准电阻对应变仪进

行检验并调平衡，然后再对诸测点预调平衡。实验时应变仪采用零读数法。

5、按照所拟定的加载方案逐级加载。每加一级载荷，相应测读一次各点的应变增量 $\Delta\varepsilon_i$ ，直至加到预计的最大载荷为止。然后，全部卸载，应变仪回到初始平衡状态。重复上述测试步骤三次，取其实测值的平均值。

6、实验结束，卸载。关闭应变仪，清理现场。

4.5.6 实验数据记录及其处理

1、将实验试样的弹性模量、梁的尺寸及其测点位置、应变片灵敏系数以及实验测得的有关载荷及其相应测点的应变值填入下表中，并计算其应变的平值，应力的实验值和理论值相对误差等也列入表 4-3 中。

表 4-3 弯曲正应力测量实验记录表

原始数据		截面宽度 d= mm		截面高度 h= mm		作用点至 支座距离 a= mm		弹性模量 E= MPa		电阻应变片 灵敏系数 K=	
		电阻应变仪读数/ $\mu\varepsilon$									
荷载/N		测点 1		测点 2		测点 3		测点 4		测点 5	
		读 数	差 数	读 数	差 数	读 数	差 数	读 数	差 数	读 数	差 数
第 一 次	F ₁ =										
	F ₂ =										
	F ₃ =										
第 二 次	F ₁ =										
	F ₂ =										
	F ₃ =										
第 三 次	F ₁ =										
	F ₂ =										
	F ₃ =										
应变平均值/ $\mu\varepsilon$											
实验值 $\sigma_{实}$ /MPa											
理论值 $\sigma_{理}$ /MPa											
相对误差 $\delta = \frac{\sigma_{实} - \sigma_{理}}{\sigma_{理}} \times 100\%$											

2、将各点的 $\sigma_{实}$ 和 $\sigma_{理}$ 描绘在同一坐标方格纸上，以便进行比较，检验应力理论计算公式的正确性。

4.5.7 实验报告要求

- 1、简述实验名称、实验仪器及实验过程（还要求绘出实验装置简图）。
- 2、列出上表弯曲正应力测量实验记录表，并绘出全部测点的应力实验值与理论值的图形，以示比较。
- 3、实验误差原因分析，对弯曲正应力公式使用条件进行讨论。

4.6 薄壁圆管在弯曲和扭转组合变形下的主应力测定

4.6.1 概述

在工程实际中，许多构件和零件在外力作用下，往往同时发生两种或两种以上的基本变形。经力学简化后，这些杆件表面一般处于平面应力状态，测定其表面的主应力大小和方向，对它们的强度分析有着重要意义。

4.6.2 实验目的

- 1、测量薄壁圆管在弯曲和扭转组合变形下，其表面 A 点处的主应力大小和方向。
- 2、掌握用应变花测量某一点主应力大小及方向的方法。
- 3、将测点主应力大小与该点主应力的理论值进行比较分析。

4.6.3 实验装置

1、弯扭组合变形实验装置如图 4.22 所示，装置上的薄壁圆铝管试样一端固定，另一端自由。在自由端装有与圆管轴线垂直的加力杆，该杆呈水平状态。载荷 F 作用于加力杆的自由端。此时，薄壁圆管受到弯矩和扭矩联合作用。在距其自由端为 L_1 的表面处，贴有一个 45° （或 60° ）应变花。设圆管的外径为 D ，内径为 d ，载荷作用点至圆管轴线的距离为 L_2 。

- 2、静态电阻应变仪。
- 3、游标卡尺、钢尺等。

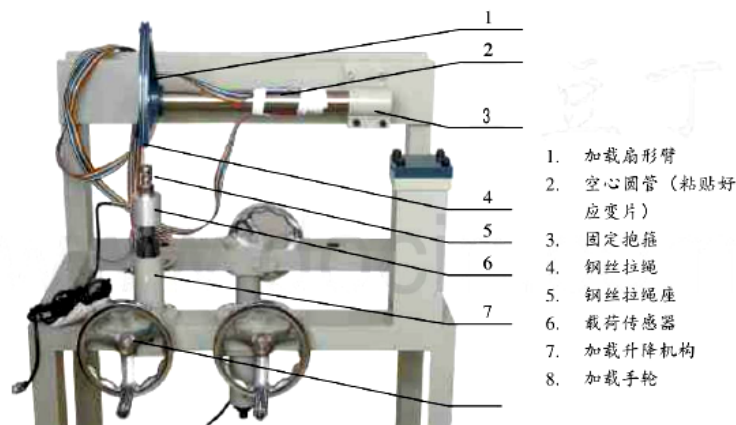


图 4.22 弯扭组合变形实验装置

4.6.4 实验原理

在平面应力状态下某一点的主应力及主方向可借助于贴在该点处的应变花来测定。本实验采用 45° 应变花，设其中 R_{0° 应变片沿圆管的轴向方位。由平面应变和应力分析得主应变和主应力分别为

$$\left. \begin{matrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_3 \end{matrix} \right\} = \frac{\varepsilon_{-45^\circ} + \varepsilon_{45^\circ}}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_{-45^\circ} - \varepsilon_{0^\circ})^2 + (\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{0^\circ})^2}$$

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{matrix} \right\} = \frac{E}{1-\mu^2} \left[\frac{1+\mu}{2} (\varepsilon_{-45^\circ} + \varepsilon_{45^\circ}) \pm \frac{1-\mu}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_{-45^\circ} - \varepsilon_{0^\circ})^2 + (\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{45^\circ})^2} \right]$$

其中材料弹性模量 E 和泊松比 μ 为给定值为； ε_{0° 为 R_{0° 应变片（即应变片轴线和圆管轴线平行）的应变测量值。 ε_{45° 和 ε_{-45° 的应变测量值分别为 R_{45° 和 R_{-45° 的应变测量值。

设最大主应力 σ_1 的方向与圆管轴线(亦即 R_{0° 应变片的轴线方向)的夹角为：

$$\tan 2\alpha_0 = \frac{\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{-45^\circ}}{2\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{-45^\circ} - \varepsilon_{45^\circ}}$$

这里应注意， σ_1 的方向判断原则是：它距最大应变值最近。

4.6.5 实验步骤

1、测量薄壁圆管试样的有关尺寸 (L_1 , L_2 , D , d) 并记录。材料常数 E 和 μ 由实验室给出。

2、采用多点半桥公共补偿法测量。将应变花的 3 个应变片和温度补偿片接到电阻应变仪的电桥上。

3、检查接线无误后，按应变仪的使用方法调整各测点电桥，使之处于平衡。

4、采用等增量法加载，级次为 5 级。用砝码加载，读取各测量为片的应变值。当达到最大载荷并记录相应应变值后，立即卸载，应变仪应当回到初始平衡状态。

5、重复三次实验，直至取得三次测量数据，并取其算术平均值或者用最小二乘法处理数据。

4.6.6 实验报告要求

- 1、写出实验名称、实验设备并绘制装置简图。
- 2、绘出实验圆管试样受力简图，简述实验过程。
- 3、算出测点 A 处的主应力的实测平均值和该点理论值，并加以比较，求出相对误差。
- 4、画出 A 点的应力状态图（主应力大小和方向）。

4.6.7 思考题

- 1、用电测法测量主应力时，其应变花是否可以沿测点的任意方向粘贴？为什么？
- 2、若将测点选在梁的中性层位置，则其主应力值将发生怎样的变化？这时应贴什么样的电阻应变片？能测出哪种应力？

4.7 弹性压杆稳定实验

4.7.1 概述

在工程实际中，压杆的稳定问题并不亚于强度问题，如果受压构件处于一个稳定平衡状态，则一切强度计算就失掉了意义。因此，加深压杆的稳定概念，验证临界力计算公式是十分重要的学习内容。本实验涉及临界力的测量与稳定曲线的自动记录系统。

4.7.2 实验目的

- 1、观察载荷增加到某一临界值 P_{cr} 时压杆丧失稳定的现象。
- 2、用电测方法测定两端铰支压杆的临界力 P_{cr} ，并与理论计算结果进行比较。

4.7.3 实验原理

根据欧拉小挠度理论，对于两端铰支的大柔度杆（低碳钢 $\lambda \geq \lambda_P = 100$ ），在轴向力作用下，压杆保持直线平衡最大的载荷，保持曲线平衡最小的载荷即为临界载荷 P_{cr} ，按照欧拉公式可得：

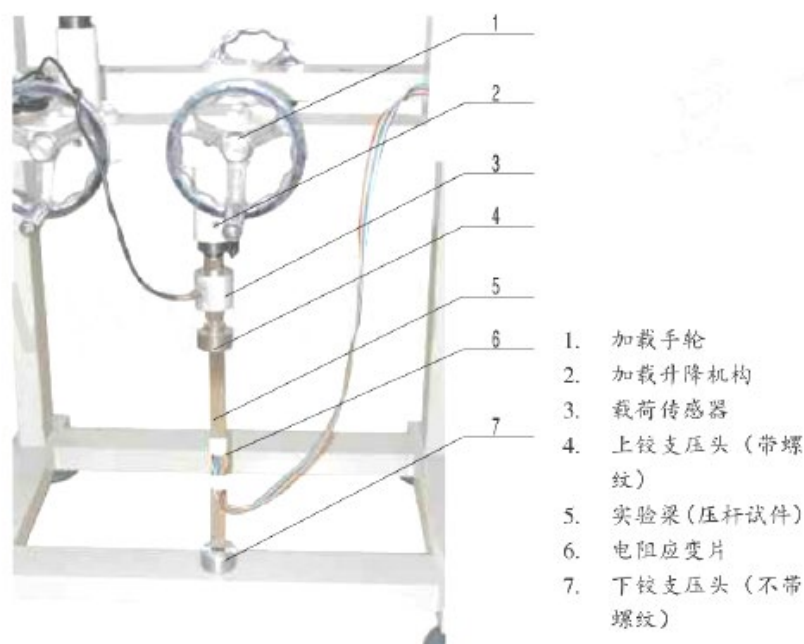
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EJ}{(\mu l)^2}$$

式中：E——材料的弹性模量； J——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 $\mu=1$ 。

4.7.4 实验设备

- 1、压杆稳定实验装置
- 2、游标卡尺。



4.23 压杆稳定实验装置

4.7.5 实验步骤

- 1、仔细安装，调整支座，使试验台稳定。
- 2、将测力传感器引出线连接于力的数字化仪或应变仪。
- 3、转动加力手轮，使传感器压头轻松地接触试件，调整百分表显示 0.00 mm 状态。
- 4、加载：
 - (1) 转动加力手轮加载，最初的几级荷载可加大些，记录每次应变仪读数及相对应的荷载值。
 - (2) 在位移-荷载、应变-荷载读数过程中，如果发现连续增加应变量 2 或 3 次，荷载值几乎不变，再增加应变量时，荷载值读数下降或上升，说明压杆的临界力已出现，应立即停止加载。
- 5、卸载、实验完毕，关闭电源和清理场地。
- 6、做好位移与应变读数的记录，在坐标纸上绘出压力-位移曲线。

4.7.6 实验报告要求

实验报告应包括实验记录、实验数据整理、理论分析，以及实验后的思考和问题。

4.7.7 思考题

- 1、临界荷载是在什么情况下测得的？
- 2、压杆失稳后，变形与荷载是否还是线性关系？
- 3、你认为在轴力-位移曲线的非线性阶段中，哪一点是合理的临界力值？
- 4、讨论 P_{cr} 实验值误差产生的原因。

5 实验数据处理

5.1 测量值的有效数字位数

在测量数据的表示和计算中,确定用几位有效数字是很重要的,它取决于测量手段(量具、仪器、仪表等)的分辨率。测量时应估读到仪表刻度上最小分格的分数,测量值的原始数据只应保留一位不准数字。如用精度为0.02mm的游标卡尺测量拉伸试样原始直径 d_0 ,其读数为10.13mm,末位数3是估读的,它可能有上下一个单位的出入,因此是不准确的。数字0可能是有效数字,也可能不是有效数字。如果另一处 d_0 为10.10mm。此时,0为有效数字,它反映测量值的精度,不能舍弃,如果将它表示为0.01010m,前面两个0不是有效数字。

5.2 有效数字的运算法则

在处理实验数据时往往需要对不同精度的有效数字进行运算,既要保证必要的精度,又要避免过繁的计算。原则上讲,运算值也只应保留一位不准数字。

1、记录测量值时,只保留一位可疑数字(即估读数)。

2、加减运算时,对参加运算的各测量值应统一小数点后的位数,并且是各测量值中小数点后位数最少者为准。

3、乘除运算时(包括乘方、开方),各因子保留的位数以有效位数最少的为准,运算结果保留的位数也只能与各因子中位数最少的相同。如为不同单位的量相乘除后得复合单位量,则各因子可保留原有位数进行运算,所得结果的位数,按该物理量的常用精度确定。

4、对于四个以上的数据,其算术平均值的有效数字可增加一位。

5、表示精度,一般只取一位有效数字,最多两位。

5.3 实验数据的尾数处理及修约规则

1、根据国标《标准化工作导则-编写标准的一般规定(GB11-81)》的附录C《数字修约规则》和国标《数值修约规则(GB8170-87)》,对实验数据、计算的数值需要进行修约,按下列“四舍六入五考虑”规则进行。它与多数国家的修约规则相同。

(1)在拟舍弃的尾数中,若左边第一个数字小于5(不包括5)时,则舍去,即保留的末位数不变。例如,将14.146修约到保留一位小数,应为14.1。

(2)在拟舍弃的尾数中,若左边第一个数字大于5(不包括5)时,则进1,即保留的末位数加1。例如,将24.3841,修约到保留一位小数,应为24.4。

(3)在拟舍弃的尾数中,若左边第一个数字等于5,其右边的数字并非全部为零时,则进1,即保留的末位数加1。例如,将1.0501修约到保留一位小数,应为1.1。

(4)在拟舍弃的尾数中,若左边第一个数字等于5,其右边的数字全部为零时,分为两种情况,保留的末位为偶数(包括零)时,末位数不变;保留末位为奇数时,末位数加1。例如,将0.4500、1.0500、0.3500修约到保留一位小数,应分别为0.4、1.0、0.4。

(5)所拟舍弃的尾数,若包含两位以上的数字,不得连续进行多次修约,应根据所拟舍弃尾数中左边第一个数字的大小,按上述规定一次修约出结果。例如,将15.45修约成整数,应为15。不正确的做法是:第一次修约为15.5,第二次修

约,16。

2、国标《金属材料室温拉伸试验方法 (GB/T228—2002)》中,规定了测定材料力学性能的数值修约标准,见本报告中的相关内容。

5.4 用最小二乘法处理实验数据

实际中,往往需要用解析式(即方程、经验公式)表达各试验物理量之间的函数关系,以便进行微分、积分、插值等多种运算,进一步揭示问题的本质。将试验数据整理成方程,通常采用线性回归方法。

如在材料力学实验中,常要求出载荷与变形间的关系。若以 x 表示力、弯矩、扭矩等,以 y 表示相应的变形,如伸长、缩短、应变、挠度、扭转角等,在弹性范围内,测量值 y 和自变量 x 应为线性关系。但实际上,由于存在偶然误差,一组测量值不可能同在某一条直线上。然而,可以采用数学方法对其进行直线拟合,即给每组测量值配上一条直线:

$$Y=ax+b \quad (5.1)$$

式中, Y 是直线上的值,区别于测量值 y_i 。称式(5.1)为线性回归方程,其中 a 、 b 称为回归系数。回归系数可由最小二乘法原理求出。从力学的观点,载荷为零,变形亦为零。即式(5.1)中 $b=0$, 其线性关系为:

$$Y=ax \quad (5.2)$$

如图 5.1 所示,数据点 y_i 与拟合直线 Y_i 之间存在一偏差量,即

$$\delta_i = y_i - Y_i \quad (5.3)$$

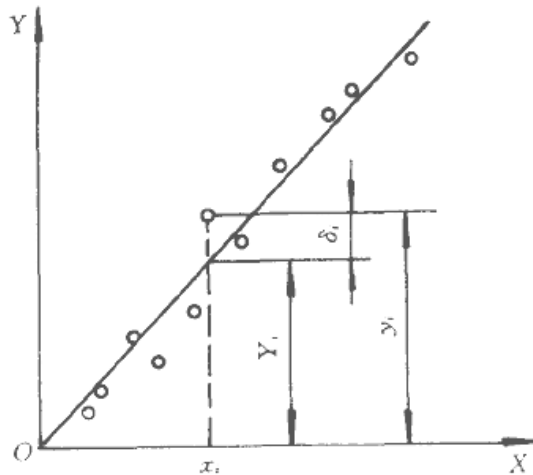


图 5.1 拟合数据点的直线

记全部偏差量的平方和为 Q , 则:

$$Q = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - Y_i)^2 \quad (5.4)$$

将式(5.2)代入式(5.4)得:

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i)^2 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5.5)$$

根据最小二乘法原理,“最佳”的直线条件是:各数据点与直线偏差的平方

和最小，即 Q 最小。令

$$\frac{dQ}{da} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i)(-x_i) = 0 \quad (5.6)$$

则

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (5.7)$$

因 x_i 、 y_i 为实验数据， a 即可确定，得出“最佳”直线 $Y=ax$ 。

如在测量材料的 E 、 μ 实验中，通过测量试样伸长 ΔL 来求弹性模量 E ，即以 x 代表力 F 、 y 代表 ΔL ，令 $Y=ax$ ，则：

$$a = \frac{L_0}{ES_0} \quad (5.8)$$

将式 (5.8) 代入式 (5.7) 得：

$$E = \frac{L_0}{aS_0} = \frac{L_0}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{\sum_{i=1}^n x_i y_i} = \frac{L_0}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n F_i^2}{\sum_{i=1}^n F_i \Delta L_i} \quad (5.9)$$

其他情况类推。

如果试验载荷是等增量加载，即 $F_i=i\Delta F$ ，代入式 (5.9) 得：

$$E = \frac{L_0}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n i^2}{\sum_{i=1}^n i \Delta L_i} \Delta F \quad (5.10)$$

其中 $i=1,2, \dots, n$ ， n 为加载级数。

参考文献

- [1] 孙训芳，方孝淑，关来泰. 材料力学. 第 6 版. 北京：高等教育出版社，2019.
- [2] 杜云海. 材料力学实验. 第 1 版. 郑州：郑州大学出版社，2013.
- [3] 侯德门，赵挺，殷民，丁春华，黄莺. 材料力学实验. 第 1 版. 西安：西安交通大学出版社，2011.