



鄭州工程技術學院

ZHENGZHOU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

材 料 力 学 工 程 力 学

实验指导书

土木工程学院实验中心制

目 录

§1 拉伸实验.....	1
§2 压缩实验.....	13
§3 扭转实验.....	21
§4 电测法测定材料的弹性模量 E 和泊松比 μ 实验.....	29
§5 梁弯曲电测实验	37
§6 弯扭组合主应力电测实验.....	43
§7 压杆稳定实验.....	51

§1 拉 伸 实 验

1、概述

常温、静载作用下（应变速率 $\leq 10^{-1}$ ）的轴向拉伸实验是测量材料力学性能中最基本、应用最广泛的实验。通过拉伸实验，可以全面地测定材料的力学性能，如弹性、塑性、强度、断裂等力学性能指标。这些性能指标对材料力学的分析计算、工程设计、选择材料和新材料开发都有极其重要的作用。

2、实验目的

2.1 测定低碳钢的下列性能指标：两个强度指标流动极限 σ_s 、强度极限 σ_b ，两个塑性指标断后伸长率 δ 、断面收缩率 φ ；测定铸铁的强度极限 σ_b 。

2.2 观察上述两种材料在拉伸过程的各种实验现象，并绘制拉伸实验的 $F-\Delta L$ 曲线。

2.3 分析比较低碳钢（典型塑性材料）和铸铁（典型脆性材料）的力学性能特点与试样破坏特征。

2.4 了解实验设备的构造和工作原理，掌握其使用方法。

2.5 了解名义应力应变曲线与真实应力应变曲线的区别，并估算试件断裂时的应力 σ_k 。

3、实验原理

对一确定形状试件两端施加轴向拉力，使有效部分为单轴拉伸状态，直至试件拉断，在实验过程中通过测量试件所受荷载及变形的关系曲线并观察试件的破坏特征，依据一定的计算及判定准则，可以得到反映材料拉伸试验的力学指标，并以此指标来判定材料的性质。为便于比较，选用直径为10mm的典型的塑性材料低碳钢 Q235 及典型的脆性材料灰铸铁 HT200 标准试件进行对比实验。常用的试件形状如图 1.1 所示，实验前在试件标距范围内有均匀的十等分线。



图 1.1 常用拉伸试件形状

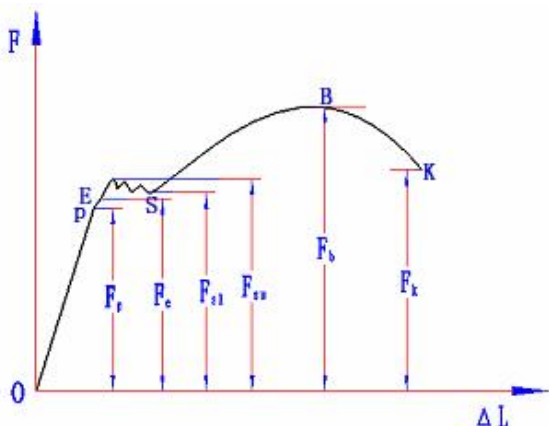


图 1.2 低碳钢拉伸 $F-\Delta L$ 曲线

F_p -比例伸长荷载； F_e -弹性伸长荷载； F_{s1} -上屈服荷载；

F_{s2} -下屈服荷载； F_b -极限荷载； F_k -断裂荷载

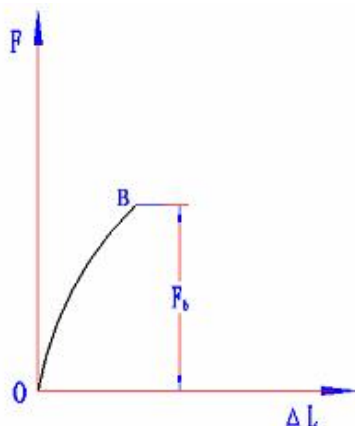


图 1.3 铸铁拉伸 $F-\Delta L$ 曲线

F_b -极限荷载

典型的低碳钢(Q235)的 $F - \Delta L$ 曲线和灰口铸铁 (HT200) 的 $F - \Delta L$ 曲线如图 1.2、图 1.3 所示。

低碳钢 Q235 试件的断口形状如图 1.4 所示，



图 1.4 低碳钢 Q235 试件拉伸实验断口形式

铸铁 HT200 试件的断口形状如图 1.5 所示，



图 1.5 铸铁 HT200 试件拉伸实验断口形式

观察低碳钢的 $F - \Delta L$ 曲线，并结合受力过程中试件的变形，可明显地将其分为四个阶段：弹性阶段、屈服阶段、强化阶段、局部变形阶段。

(1) 弹性阶段 OE

在 OE 阶段中的拉力和伸长成正比关系，表明低碳钢的应力与应变为线性关系，遵循胡克定律。故 P 点的应力称为材料的比例极限，如图 1.2 所示。若当应力继续增加达到材料弹性极限 E 点时，应力和应变间的关系不再是线性关系，但变形仍然是弹性的，即卸除拉力后变形恢复。工程上对弹性极限和比例极限并不严格区分，而统称为弹性极限，它是控制材料在弹性变形范围内工作的有效指标，在工程上有实用价值。

(2) 屈服阶段 ES

当拉力超过弹性极限到达锯齿状曲线时，拉力不再增加或开始回转并震荡，这时在试样表面上可看到表面晶体滑移的迹线。这种现象表明在试件承受的拉力不继续增加或稍微减少的情况下试件继续伸长，称为材料的屈服，其应力称为屈服强度(流动极限)。拉力首次回转前的最大力(上屈服力 F_{su})及不计初始瞬时效应(即不计载荷首次下降的最低点)时的最小力(下屈服力 F_{sl})所对应的应

力为上、下屈服强度。由于上屈服强度受变形速度及试件形式等因素的影响有一定波动，而下屈服强度则比较稳定，故工程中一般只测定下屈服强度。其计算公式为： $\sigma_{sL} = F_{sL} / S_0$ 。屈服应力是设计材料许用应力的一个重要指标。

(3) 强化阶段 SB

过了屈服阶段以后，试件材料因塑性变形其内部晶体组织结构重新得到了调整，其抵抗变形的能力有所增强，随着拉力的增加，伸长变形也随之增加，拉伸曲线继续上升。SB 曲线段称为强化阶段，随着塑性变形量的增大，材料的力学性能发生变化，即材料的变形抗力提高，塑性变差，这个阶段称为强化阶段。当拉力增加，拉伸曲线到达顶点时，曲线开始返回，而曲线顶点所指的最大拉力为 F_b ，由此求得的材料的抗拉强度极限为 $\sigma_b = F_b / S_0$ ，它也是衡量材料强度的一个重要指标。实际上由于试件在整个受力过程中截面面积不断发生变化，按公式 $\sigma_b = F_b / S_0$ 得到抗拉强度极限为名义值， σ_b 并非为荷载为最大值时的真实应力，也非整个拉伸过程中的最大应力，从拉伸实验的 $F - \Delta L$ 曲线可以看出，试件并非在最大荷载时断裂。试件在拉过最大荷载甚至颈缩后，仍有确定的承载力，低碳钢拉伸的过程中试件的应变持续增加，而应变是由应力引起的，低碳钢拉伸的过程同样也是一个应力持续增加的过程，试件的最大应力应为试件断裂时的应力。

虽然，按公式 $\sigma_b = F_b / S_0$ 得到抗拉强度极限为名义值，但这种计算办法有利于工程设计，有着普遍的工程意义。

(4) 颈缩和断裂阶段 BK

对于塑性材料来说，在承受拉力 F_b 以前，试样发生的变形各处基本上是均匀的。但在达到 F_b 以后，变形主要集中于试件的某一局部区域，该处横截面面积急剧减小，这种现象即是“颈缩”现象，此时拉力随之下降，直至试件被拉断，其断口形状成杯锥状。试件拉断后，弹性变形消失，而塑性变形则保留在拉断的试件上。利用试件标距内的塑性变形及试件断裂时的荷载来计算材料的断裂伸长率、断面收缩率及断裂应力的估算值。

$$\text{断裂伸长率: } \delta = \frac{L_k - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中， δ - 延伸率， L_0 - 原始标距， L_k - 断后标距。

$$\text{断面收缩率: } \varphi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \times 100\%$$

式中， φ - 断面收缩率， A_0 - 原始截面面积， A_k - 断后最小截面面积。

需注意的是， A_0 是指试件的最小截面面积，对圆形横截面试样，测量时应在标距的两端及中间三处两个垂直方向测量直径，取其算术平均值，取用三处测得的最小截面面积作为 A_0 。

$$\text{断裂应力估算值: } \sigma_k = F_k / A_k$$

式中， σ_k - 断裂应力估算值， F_k - 断裂荷载， A_k - 断裂处最小截面面积。

由延伸率 δ 的定义可以看出， δ 为标距长度范围内延伸量的平均值，实际上由于试件的颈缩导致试件在标距范围内的变形并不均匀，若事先在试件表面做等长的标记，将试件分成等长的多段小标距，断裂后会发现，小标距离颈缩点越近变形越大，离颈缩点越远变形越小，且呈对称分布，最终趋于变形均匀。这样同样材质、同样直径的试件采用不同的标距进行计算时会有不同的 δ ，为了

使材料拉伸实验的结果具有可比性与符合性，国家已制订统一标准(简称国标)GB6397—86《金属拉伸试验试样》、GB228—87《金属拉伸试验方法》。规定拉伸试件分为比例和定标距两种，表面分为经机加工试样和不经机加工的全截面试件，通常多采用经机加工的圆形截面试件或矩形截面试件比

例试样标距 L_0 按公式 $L_0 = K\sqrt{S_0}$ 确定，式中 S_0 为试件的截面面积，系数 K 通常为 5.65 或 11.3，

并圆整到 10mm/5mm 的倍数，以方便制作标距，前者称为短试件，后者为长试件。材料力学性能检测通常采用直径为 10mm 的试件，短、长试件的标距 L_0 等于 50mm 及 100mm，即 $L_0 = 5d_0$ 或 $L_0 = 10d_0$ ，对应的延伸率分别定义为 δ_5 和 δ_{10} 。通常，延伸率小的材料多采用短标距试件，延伸率大的材料多采用长标距试件。

同样由于低碳钢试件颈缩变形的不均匀性和梯次递减的特性，同样的试件，当断口在中间时和断口在靠近边缘时会有一定的差异，这样不利于数据的相互比较，为减小由于断口位置导致的误差，GB228—87 规定：

若断口距标距端点的距离小于或等于 $L_0/3$ 时，则需要用“移位法”来计算 L_K 。其方法是：以断点为中心，利用长段上相对应的变形格的长度加到短段已有的变形格上，使短段的计算变形格数为 $N/2$ 或 $N/2-1$ 个（ N 为原始有效标距的个数），加上长段的 $N/2$ 或 $N/2+1$ 个格数的长度，就为断裂后的计算长度 L_K 。其原理如图 1.6：金属材料塑性断裂变形示意图

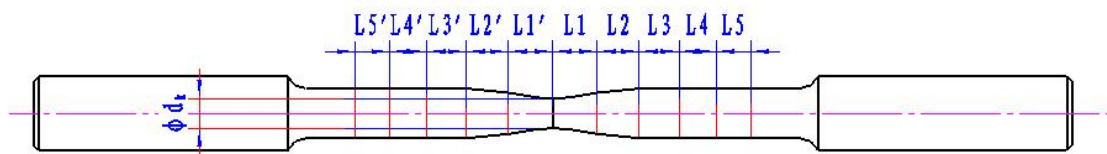


图 1.6 金属材料塑性断裂变形示意图

在上图中，假定断口在试件的中间，则有 $L1 \approx L1'$ ， $L2 \approx L2'$ ， $L3 \approx L3'$ ……， $L1 > L2 > L3$ ……。这样通过移位处理就可以减小由于试件断裂位置不同引起的误差。图 1.7 为金属材料移位处理示意图

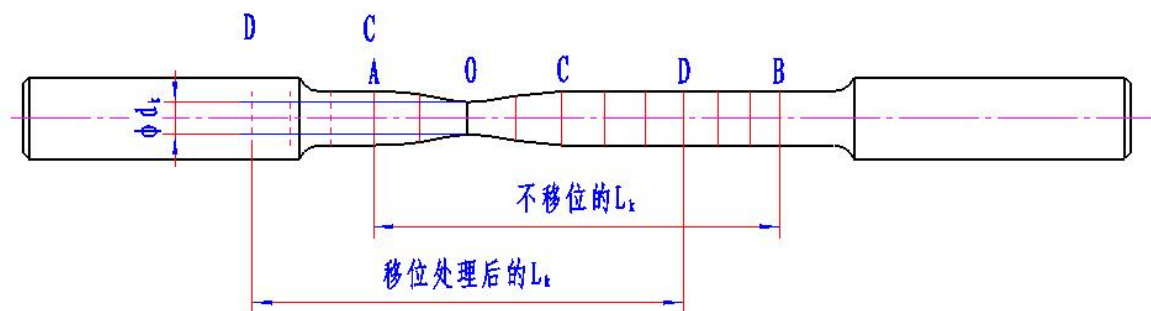


图 1.7 移位处理示例

从上图可以看出：不进行移位处理时 $L_K = L_{AD} + L_{DB}$ ，进行移位处理后 $L_K = L_{AD} + L_{CD}$ ，由于试件断裂的不均匀性可知： $L_{CD} > L_{DB}$ ，因此经移位处理后的 L_K 大于未移位处理的 L_K ，且其更接近于断点

在试件中间的情形，这样有利于提高实验结果的相符性及可比性。据此，若试件断裂点不再标距范围内，则应重新进行实验。

这样通过对低碳钢拉伸实验过程中 $F - \Delta L$ 曲线的分析就可以得到反映低碳钢抵抗拉伸荷载的力学性能指标：屈服强度： σ_s ，抗拉强度： σ_b ，延伸率： δ_5 / δ_{10} ，断面收缩率： φ ，断裂应力： σ_k 。

通过断裂应力估算值 σ_k 的计算，并将其与抗拉强度 σ_b 相比较，可以明显地看出 $\sigma_k > \sigma_b$ ，究其原因在于，试件的断裂是由于试件的变形（单位长度的变形称为应变）达到极限，而应变是由应力引起的，也即在没有应力增加的前提下，应变是不会增加的。由于公式 $\sigma_k = F_k / A_k$ 中， A_k 为断裂后的测量值，且试件颈缩过程中有一定的应力分布不均匀现象，所以， σ_k 为估算值，但其较接近真值。

同样通过对铸铁试件 $F - \Delta L$ 曲线的分析就可以得到反映铸铁抵抗拉伸荷载的相应力学性能指标，对于典型的脆性材料铸铁，观察其 $F - \Delta L$ 曲线可发现在整个拉伸过程中变形很小，无明显的弹性阶段、屈服阶段、强化阶段、局部变形阶段，在达到最大拉力时，试样断裂。观察实验现象可发现无屈服、颈缩现象，其断口是平齐粗糙的，属脆性破坏但由于铸铁在拉伸实验过程中没有表现出塑性指标，所以，在拉伸实验过程中我们只能测得其抗拉强度： σ_b 。

4、实验方案

4.1 实验设备、测量工具及试件

YDD-1 型多功能材料力学试验机（图 1.8）、150mm 游标卡尺、标准低碳钢、铸铁拉伸试件（图



图 1.8 YDD-1 型多功能材料力学试验机

1.1)。

YDD-1 型多功能材料力学试验机由试验机主机部分和数据采集分析两部分组成，主机部分由加载机构及相应的传感器组成，数据采集部分完成数据的采集、分析等。

试件采用标准圆柱体短试件，为方便观测试件的变形及判定延伸率，试验前需用游标卡尺测量出试件的最小直径，并根据试件的最小直径（ d_0 ）确定标距的长度（ L_0 ，需进行必要的圆整），并在标距长度内均匀制作标记，为方便数据处理，通常将标距长度 10 等份刻痕。常用的标记方式有：机械刻痕、腐蚀刻痕、激光刻痕等。图 1.1 为已进行刻痕处理的低碳钢拉伸短试件。

4.2 装夹、加载方案

安装好的试件如图 1.9 所示。实验时，装有夹头的试件通过夹头与试验机的上、下夹头套相联接，上夹头套通过铰拉杆与试验机的上横梁呈铰接状态，实验时，当油缸下行带动下夹头套向下移动并与夹头相接触时，试件便受到轴向拉力。加载过程中通过控制进油手轮的旋转来控制加载速度。

4.3 数据测试方案

试件所受到的拉力通过安装在油缸底部的拉、压力传感器测量，变形通过安装在油缸活塞杆内的位移传感器测量。

4.4 数据的分析处理

数据采集分析系统，实时记录试件所受的力及变形，并生成力、变形实时曲线及力、变形 X-Y 曲线，图 1.10 为实测低碳钢拉伸实验曲线，图 1.11 为实测铸铁拉伸实验曲线

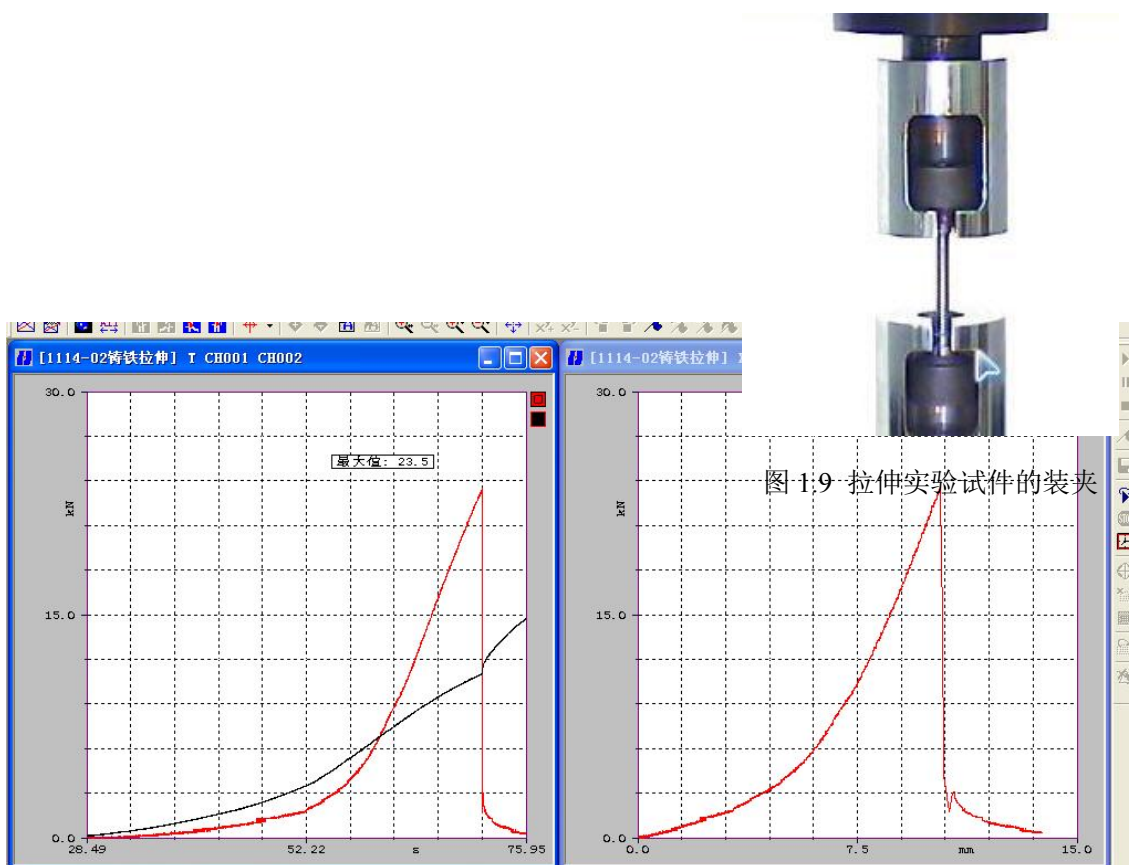


图 1.11 实测铸铁拉伸实验曲线

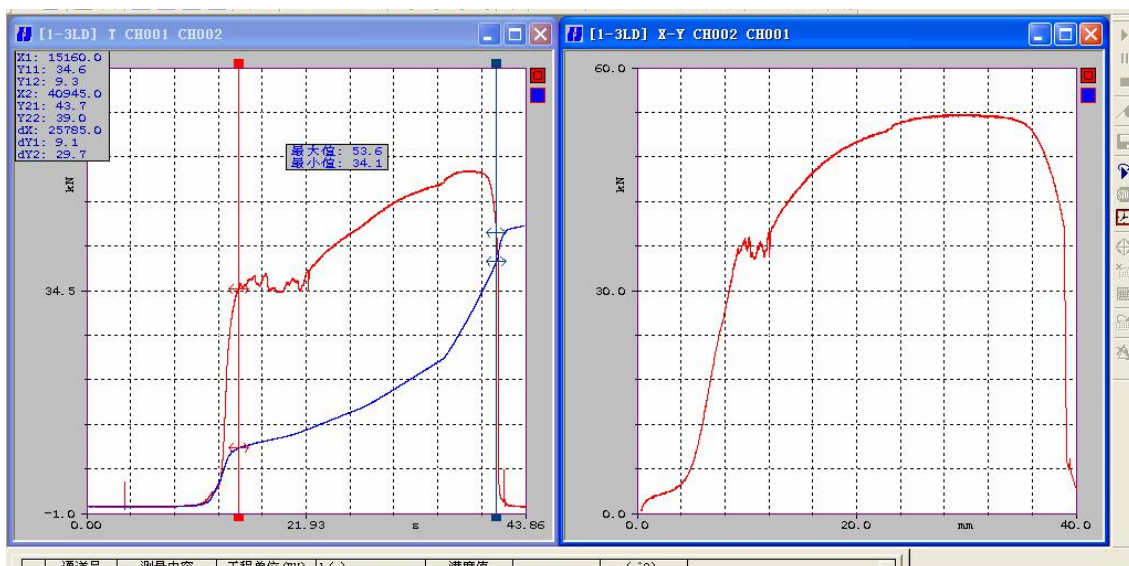


图 1.10 实测低碳钢拉伸实验曲线

在图 1.10 中左窗口，力、变形实时曲线，上部曲线为试件所受的力，下部曲线为试件的变形。右窗口，力、变形的 X-Y 曲线，从力变形的 X-Y 曲线可以清晰地区分低碳钢拉伸的四个阶段，弹性阶段、屈服阶段、强化阶段和颈缩断裂阶段。在左窗口中，通过移动光标可以方便地读取我们所需要的数据，屈服荷载 F_s 、极限荷载 F_b 、断裂荷载 F_k 。

实验中需要的其它数据，原始标距断裂后的长度 L_K 、断裂处最小截面面积 A_K ，依据实验要求由游标卡尺直接或间接测量。

在图 1.11 中，透过移动光标可得到铸铁拉伸的极限荷载 F_b ，通过峰值光标或利用统计功能可方便得到极限荷载。

得到相关数据后，依据实验原理，就可以得到我们所需要的力学指标。

5、完成实验预习报告

在了解实验原理、实验方案及实验设备操作后，就应该完成实验预习报告。实验预习报告包括：明确相关概念、预估试件的最大载荷、明确操作步骤等，在完成预习报告时，有些条件实验指导书已给出（包括后续的试验操作步骤简介）、有些条件为已知条件、有些条件则需要查找相关标准或参考资料。通过预习报告的完成，将有利于正确理解及顺利完成实验。

有条件的同学可以利用多媒体教学课件，分析以往的实验数据、观看实验过程等。

完成实验预习报告，并获得辅导教师的认可，是进行正式实验操作的先决条件。

6、实验操作步骤简介

6.1 试件原始参数的测量及标距的确定

实验采用标准短试件，试件形状见图 1.6，用游标卡尺在标距长度的中央和两端的截面处，按两个垂直的方向测量直径，取其算术平均值，选用三处截面中最小值进行计算。依据测得的直径确定标距长度（ $5.65\sqrt{S_0}$ ），为方便标距均匀分格，建议将原始标距 L_0 圆整到最接近的 10mm/5mm 的倍

数，并在原始标距长度 L_0 范围内标记十等分格用于测量试件破坏后的伸长率。

6.2 装夹试件

6.2.1 旋转上夹头套使之与上横梁为铰接状态。

6.2.2 用楔形片将试件的两端安装到夹头内，图 1.12 为试件装夹示意。



图 1.12 试件装夹示意

6.2.3 调整试验机下夹头套的位置，操作步骤：关闭“进油手轮”，打开“调压手轮”，选择“油泵启动”，“油缸上行”，打开“进油手轮”，下夹头套上行，此时严禁将手放在上、下夹头套的任何位置，至合适位置后，关闭“进油手轮”。

6.2.4 将带有夹头的试件安装到上下夹头套内。

6.2.5 调整下夹头套至拉伸位置。操作步骤：选择“拉伸下行”，打开进油手轮，下夹头套下行，控制下夹头套移动速度，下夹头进入下夹头套，当试件夹头和夹头套的间隙在 2-3mm 时，关闭“进油手轮”，此时试件可以在夹头套内灵活转动。关闭“调压手轮”，试件装夹完毕。

6.3 连接测试线路

按要求联接测试线路，一般第一通道选择测力，第二通道选择测位移。连线时应注意不同类型的传感器的测量方式及接线方式。连线方式应与传感器的工作方式相对应。

6.4 设置数据采集环境

6.4.1 进入测试环境

按要求联接测试线路，确认无误后，打开仪器电源及计算机电源，双击桌面上的快捷图标，提示检测到采集设备→确定→进入如图 1.12 所示的测试环境。

6.4.2 设置测试参数

测试参数是联系被测物理量与实测电信号的纽带，设置正确合理的测试参数是得到正确数据的前提。测试参数由系统参数、通道参数及窗口参数三部分组成。其中，系统参数包括测试方式、采样频率、报警参数及实时压缩时间等；通道参数反映被测工程量与实测电信号之间的转换关系，由测量内容、转换因子及满度值等组成；窗口是指为了在实验中显示及实验完成后分析数据而设置的曲线窗口，曲线分为实时曲线及 X-Y 函数曲线两种。

检测到仪器后，系统将自动给出上一次实验的测试环境。

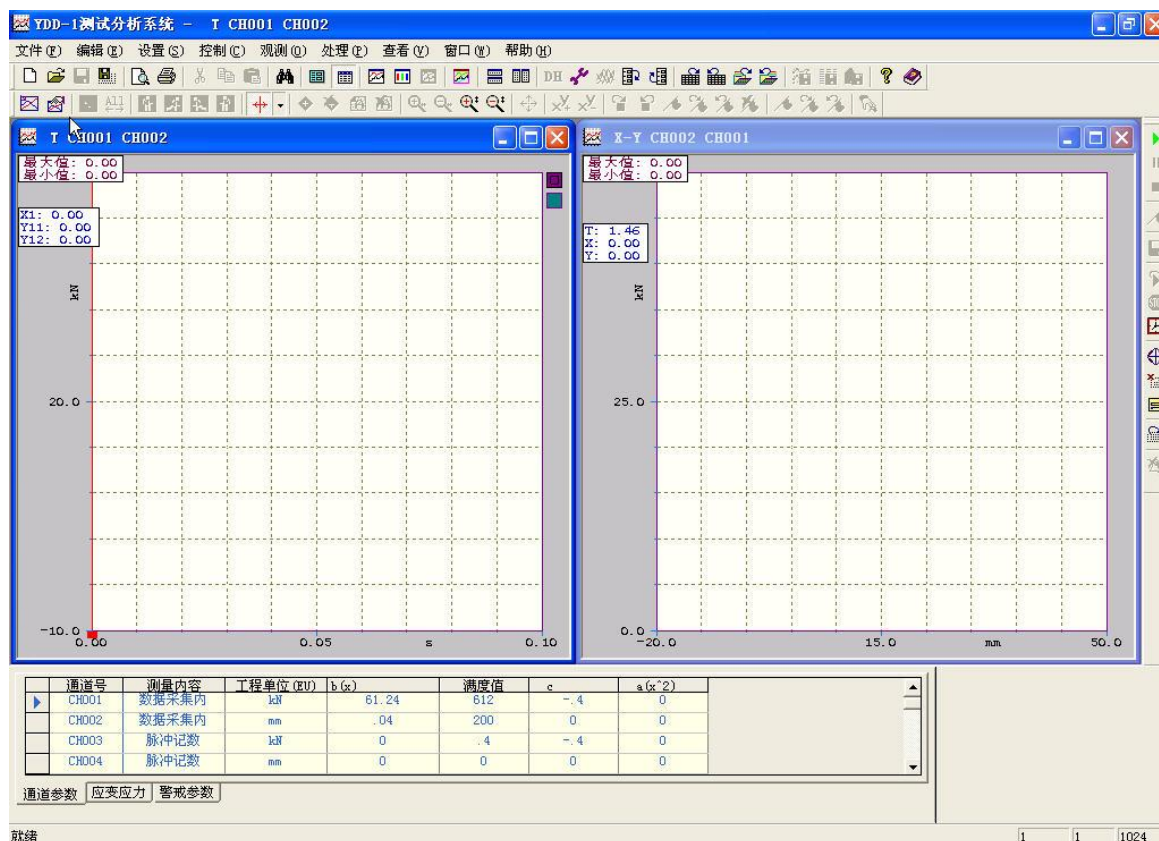


图 1.12 数据采集分析环境

第一项、通道参数

通道参数位于采集环境的底部，反映被测工程量与实测电信号之间的转换关系，由通道号、测量内容、工程单位、转换因子及满度值组成。

通道号：与测试分析系统的通道一一对应。一般选择 1 通道测量试件所受的荷载，2 通道测量试件的变形。

测量内容：由被测电信号的类型决定，由数据采集内（电压测量）、应力应变、脉冲计数等组成。由于，荷载、位移通道所测信号均为传感器输出的电压信号，故均选择：数据采集内（电压测量）。

工程单位：被测物理量的工程单位。荷载-kN，变形-mm。

转换因子：转换因子由 a、b、c 三个系数组成，其与被测物理量（Y）及传感器输出的电压（X，单位 mV）有如下的关系：

$$Y = aX^2 + bX + c$$

需要说明的是：由于试验机所采用的传感器类型并不相同，及同一类型的传感器个体之间存在差异，不同试验机的转换因子并不相同。如当通过拉、压力传感器直接测量试件所受的荷载时，只需选择修正比例系数 b 即可，且拉、压实验具有相同的系数；而当通过测量油缸油压间接测量试件的荷载时，由于油缸活塞杆运行时的摩擦力、及油缸拉压面积的不等，需要选择 b、c 两个系数，且拉、压时，两个系数各不相同。

因此，在输入相关系数时，一定要确保数据的正确性。

满度值：即通道的量程，每一通道均有不同的量程，需选择与被测信号相匹配的量程。荷载通道的量程为 2.5/10mV，变形通道的量程为 5000mV。需要注意的是，满度值通常显示工程单位的满度值，即满度值受修正系数的影响。

第二项、采样参数

“采样参数”存放在菜单栏中的“设置”下拉菜单中，包括测试方式、采样频率及实时压缩时间等。

单击“设置”，选择采样参数。其中测试方式包括拉压测试和扭转测试两种方式，拉压测试方式采用定时采样的方式，采样频率即为其记录数据的频率；扭转测试是以脉冲触发的方式记录数据，采样频率为其判断脉冲有无的频率。拉伸实验时，将采样参数设置成如右图参数：采样频率：“20-100Hz”，“拉压测试”。



第三项、窗口参数

窗口是指为了在实验中显示及实验完成后分析数据而设置的曲线窗口，位于整个数据采集分析环境的中部，曲线分为实时曲线及 X-Y 函数曲线两种，每个实时曲线窗口可显示四条实时曲线，每个 X-Y 函数曲线窗口可显示两条 X-Y 函数曲线。在拉伸实验中主要应用 X-Y 函数曲线窗口及实时曲线窗口，X-Y 函数曲线窗口用以观测试件所受力与变形的关系，即 $F - \Delta L$ 关系曲线，实时曲线窗口以时间为横坐标，实时显示 1024 个数据。

窗口参数的设置包括窗口的新建、关闭、排列、绘图方式、图例、曲线颜色、文字颜色、统计信息、坐标等，各参数的选择可通过菜单栏或按相应的快捷键进入。拉伸试验可以开设两个数据窗口，左窗口，力、变形实时曲线，右窗口，力、变形的 X-Y 曲线，并设定好窗口的其它参数如坐标等。

设置坐标参数的时，需对被测试件的极限承载力及变形进行预估，这样可以得到较好的图形比例。对于直径为 10mm 的低碳钢（Q235）试件，计算其极限承载力不超过 45KN，变形不超过 50mm，故设置其纵横坐标的上限均为 50KN(mm)，考虑到初始零点并非绝对零值，故将其坐标的下限设置成一较小的负值。实际上在数据采集的过程中我们可以随时在不中断数据采集的前提下进行窗口参数的修改，但在实验前对所采数据进行相应的判断并设置较为合理的窗口，还是很有必要的。

对比当前各参数与实际的测试内容是否相符，若相符进入“6.4.3 数据预采集”，如不符，则应选择正确的参数或通过引入项目的方式引入所需要的测试环境。具体操作：打开“文件”选择“引入项目”，引入所需要的采集环境。

6.4.3 数据预采集

6.4.3.1 采集设备满度值对应检查

检查采集设备各通道显示的满度值是否与通道参数的设定值相一致，如不一致，需进行初始化硬件操作，单击菜单栏中的“控制”，选择“初始化硬件”，就可以实现采集设备满度值与通道参数设置满度值相一致。

6.4.3.2 数据平衡、清零

单击菜单栏中的“控制”，选择“平衡”，对各通道的初始值进行硬件平衡，可使所采集到的数据接近于零，然后，单击菜单栏中的“控制”，选择“清除零点”，“清除零点”为软件置零，可将平衡后的残余零点清除。此时若信号有无法平衡提示，说明通道的初始值过大，尤其是试件变形通道容易出现此情况，说明下夹头套的位置过于靠下，可将下夹头套的位置适当上行即可。对于平衡前有过载指示，平衡后指示消失的情形，说明仪器本身记忆的初始平衡值过大，属正常情况。

6.4.3.3 启动采样

单击菜单栏中的“控制”，选择“启动采样”，选择好数据存储的目录，便进入相应的采集环境，采集到相应的零点数据，此时启动油泵，选择“压缩上行”或“拉伸下行”，打开“进油手轮”，使下夹头套上行或下行，此时所采集到的数据便会发生相应的变化，将下夹头套调整到拉伸位置。此时从实时曲线窗口内便可以读到相应的力和位移的零点数据，证明采集设备正常工作。单击菜单栏中的“控制”，选择“停止采样”，停止采集数据，并分析所采集的数据，确认所设置各参数的正确性。

这样就完成了数据采集环境的设置。

6.5 加载测试

在试件装夹完毕，并确定数据采集系统能正常工作后，就可以进行加载测试了。具体操作步骤如下：

首先需要确定试验机的状态，“进油手轮”关闭，“调压手轮”关闭。

然后选择“油泵启动”，“拉伸下行”，完成后，开始数据采集，选择“控制”——“平衡”——“清除零点”，“启动采样”。左窗口，采集到的零点数据，打开“进油手轮”进行加载测试，控制加载速度，注意观察各阶段实验现象，起始阶段应缓慢加载。试件受力后，首先是弹性阶段试件所受的荷载与试件的变形呈线性关系。接着进入屈服阶段此时试件所受的力在一定范围内浮动震荡而位移不断地向前增加，这就是低碳钢的屈服现象。离开了屈服阶段后，进入了强化阶段。此时应旋转“进油手轮”加快加载速度，可以看到试件的变形明显加快。注意捕捉颈缩点，颈缩后，为观察颈缩现象，应放慢加载速度，注意捕捉颈缩点，及观看颈缩现象。当出现颈缩后，放慢加载速度，至试件断裂后，关闭“进油手轮”，“停止采样”，“油泵停止”，“拉压停止”。

这样就完成了实验的加载测试过程。

7、分析数据完成实验报告

7.1 验证数据

设置双窗口显示数据，左窗口实时曲线、右窗口力-位移 X-Y 曲线。单击左窗口，横向压缩数据，显示全数据；单击右窗口，X-Y 增加数据，显示力-位移 X-Y 曲线。从低碳钢拉伸实验曲线中应清晰区分低碳钢拉伸的四个阶段，铸铁则无屈服阶段。

7.2 读取数据

7.2.1 荷载数据的读取

图 1.10 中，采用双光标可以方便地得到低碳钢拉伸的屈服荷载和极限荷载。选择并移动单光标，结合试件的变形，读出试件的断裂荷载。需要注意的是由于数据的采集及分析均在计算机上进行，

数据的位数可以任意设置，因此读数位数可能没有正确反映试验机的分辨率，读数时首先需确定该通道的分辨率，然后对所读的数据进行相应的取舍。

铸铁无屈服荷载，极限荷载的读取同低碳钢。

7.2.2 试件变形指标的读取

首先，将断裂后的试件从上下夹头套中取出，观察断口形式。然后将断裂后的试件对接，用游标卡尺测量断口直径，垂直方向测量两次，然后测量断裂后试件的标距。为了方便测量，我们也可以把试件先取出，然后再测量，采用专门的取出垫块，将带有夹头的试件断口向上放在垫块上，用试件断口保护套套住试件，用锤子敲击试件保护套，便可将断裂后的试件取出，当然，试件的取出工作需要在地面上进行。

需要注意的是：当断口距标距端点的距离小于或等于 $L_0/3$ 时，则需要用“移位法”来计算 L_K 。

7.3 分析数据

通过实验前的测量及实验后的数据读取就得到了我们所需要的数据，代入相应的公式或计算表格即可得到拉伸的各项力学指标。

7.4 完成实验报告

通过观察试验现象、分析试验数据就可以进行试验报告的填写了，完成实验报告的各项内容。并总结试验过程中遇到的问题及解决方法。

需要注意的是对于通过计算得到的力学性能指标，其有效数字的位数应能反映试验的精度，即只允许其最后一位为不确定值，且不确定值的大小在试验机的精度范围内，为方便数据处理及便于比较，国标 GB228-87 规定了测试结果的修约要求：

测 试 项 目	数 值 范 围	修 约 到
σ_s 、 σ_b	$\leq 200\text{MPa}$	1 MPa
	$> 200 \sim 1000\text{ MPa}$	5 MPa
	$> 1000\text{ MPa}$	10 MPa
δ	$\leq 10\%$	0.5%
	$> 10\%$	1%
φ	$\leq 25\%$	0.5%
	$> 25\%$	1%

8、实验操作注意事项

- 1、在紧急情况下，没有明确的方案时，按急停按钮；
- 2、上夹头套应处于活动铰状态，但不应旋出过长，夹头套与上横梁垫板之间的间隙应在 3-10mm 之间；
- 3、调整下夹头套开口位置时，需在油缸上行或下行的状态下进行，此时应特别注意手的位置；
- 4、试件装夹时应确保试件在夹片中有全长的工作长度；
- 5、在装夹试件确定油缸位置时，严禁在油缸运行时手持试件在夹头套中间判断油缸的位置；
- 6、装夹试件时要调整好试件与下夹头套的间隙，间隙在 5-10mm 之间较为合适；
- 7、正式采集数据时，应在试件夹头与试件夹头套间隙较小的时候进行重新平衡、清零，这样可使所采集的曲线的起始点较为接近零点；
- 8、实验初始阶段加载要缓慢，以免试件屈服阶段变形不充分；
- 9、进行数据采集的第一步为初始化硬件，初始化完成后应确认采集设备的量程指示与通道参数的设定值一致；且平衡后各通道均无过载现象；
- 10、在通过旋转加载控制手轮控制加载速度时，应首先关闭加载控制手轮，然后加载，且旋转的圈数不应超过 5 圈，以免将进油阀芯旋出；
- 11、在将试件从夹头中取出时应采用专用的拆卸工具，并注意对断口的保护。

9、相关专业概念

9.1 材料牌号的定义

9.2 材料的破坏强度的命名、许用强度的概念

9.3 低碳钢拉伸应力应变曲线与荷载位移曲线的关系

9.4 其它典型材料的拉伸破坏特点

9.5 有效数字位数的确定及不规范用法的汇总

9.7 加载速度对实验结果的影响

9.8 冷作硬化现象

9.9 主要参考文献

§2 压缩实验

1、概述

实验表明，工程中常用的金属塑性材料，其受拉与受压是所表现出来的强度、刚度和塑性等力学性能是大致相同的。但广泛使用的脆性材料如铸铁、砖、石等，其抗拉强度很低，但抗压强度却很高。为便于合理选用工程材料，以及满足金属成型工艺的要求，测定材料受压时的力学性能是十分重要的。因此，压缩实验和拉伸实验一样，也是测定材料在常温、静载、单向受力状态下力学性能的最常用最基本的实验之一。

2、实验目的

2.1 测定低碳钢压缩实验的屈服极限 σ_s ；

2.1 测定铸铁压缩实验的抗压强度 σ_b ；

2.3 观察并比较低碳钢（塑性材料的代表）和铸铁（脆性材料的代表）在压缩时的变形和破坏现象。

3、实验原理

对一确定形状试件（详见试件的制作）两端施加轴向压力，使试件实验段处于单轴压缩状态，试件产生变形，在不断压缩过程中不同材料的试件会有不同的实验现象，在实验过程中通过测量试件所受荷载及变形的关系曲线并观察试件的破坏特征，依据一定的计算及判定准则，可以得到反映材料压缩试验的力学指标，并以此指标来判定材料的性质。为便于比较，选用如图 2.1 所示直径相同的典型塑性材料低碳钢 Q235 及典型的脆性材料灰铸铁 HT200 标准试件进行对比实验。



图 2.1 压缩试件

典型的低碳钢(Q235)的 $F - \Delta L$ 曲线和灰口铸铁（HT200）的 $F - \Delta L$ 曲线如图 2.2、图 2.3 所

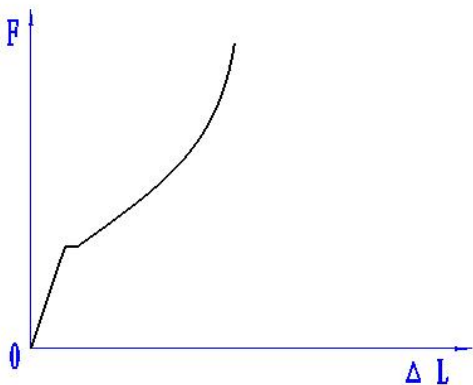


图 2.2 低碳钢压缩 $F - \Delta L$ 曲线

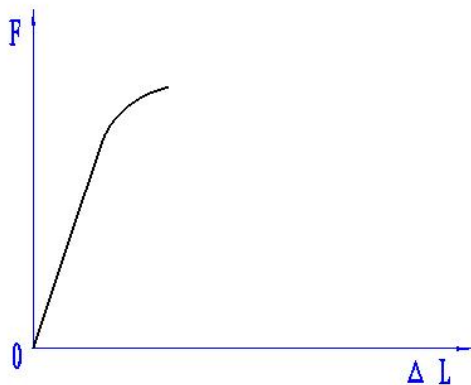


图 2.3 铸铁压缩 $F - \Delta L$ 曲线

示。

低碳钢 Q235 试件的压缩变形过程如图 2.4 所示，铸铁 HT200 试件的压缩破坏形状如图 2.5 所示。



图 2.4 低碳钢 Q235 试件压缩实验变形过程



图 2.5 铸铁 HT200 试件压缩实验破坏现象

观察 $F-\Delta l$ 曲线，及试件的变形可发现，低碳钢 $F-\Delta l$ 曲线有明显的拐点，称之为屈服点，以此点计算的屈服强度 $\sigma_s = F_s / S_0$ ，其值与拉伸时屈服强度接近，继续加载，试件持续变形，由中间稍粗的鼓形变成圆饼形，但并不发生断裂破坏。铸铁的 $F-\Delta l$ 曲线无明显拐点，当压力增大时，试件表面出现交错的剪切滑移线，试件中间略微变粗，持续加压剪切滑移线明显增多、增宽，最终试样在与轴线大约成 $45^\circ \sim 55^\circ$ 的方向上发生断裂破坏，此时施加的压力达到最大值，并以此值定义铸铁的抗压强度 $\sigma_b = F_b / S_0$ 。

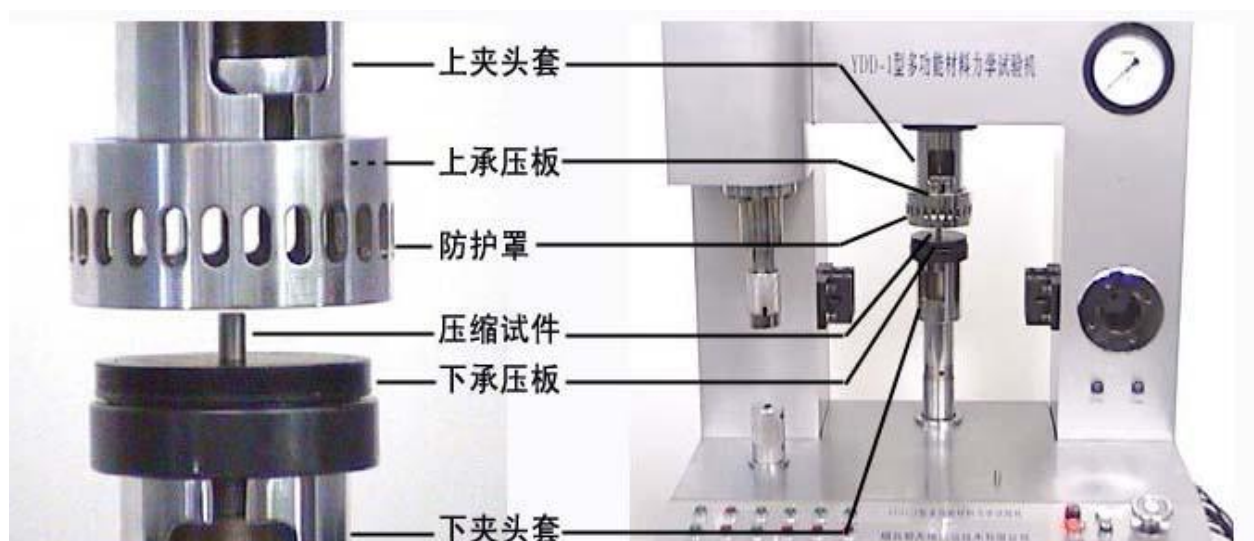
实验表明材料受轴向力产生压缩变形时，在径向上会产生一定的横向延伸，尤其是到屈服点以后这种变形更为明显，但由于试件两端面与试验机垫板间存在摩擦力，约束了这种横向变形，故压缩试样在变形时会出现中间鼓胀现象，塑性材料试件尤其明显。为了减少鼓胀效应的影响，通常的做法是除了将试样端面制作得光滑外，还在端面上面涂上润滑油以进一步减小摩擦力，但这并不能完全消除此现象。

4、实验方案

4.1 实验设备、测量工具及试件

YDD-1 型多功能材料力学试验机（图 1.8）、150mm 游标卡尺、标准低碳钢、铸铁压缩试件（图 2.1）。

YDD-1 型多功能材料力学试验机由试验机主机部分和数据采集分析两部分组成，主机部分由加载机构及相应的传感器组成，数据采集部分完成数据的采集、分析等。



试件采用标准圆柱体短试件，为方便观测试件的变形及测量低碳钢试件的真实应力，试验前需用游标卡尺测量出试件的最小直径（ d_0 ）及高度（ H_0 ）。

4.2 装夹、加载方案

安装好的试件如图 2.6 所示。压缩试验时，试件放在下承压板的中央，当控制下承压板上行，试件和上部承压板接触时就会对试件施加一轴向压力。压缩试验时，上承压板为一固定承压板，下承压板为一活动铰承压板，在加载过程中起到自动找正的作用，从而保证试件处于单轴受压状态。加载时通过控制进油手轮的旋转来控制加载速度。

4.3 数据测试方案

同拉伸实验一样，试件所受到的压力通过安装在油缸底部的拉、压力传感器测量，变形通过安装在油缸活塞杆内的位移传感器测量。与拉伸试验所不同的是，在压缩实验中我们所测得的力及位移均为负值。

4.4 数据的分析处理

数据采集分析系统，实时记录试件所受的力及变形，并生成力、变形实时曲线及力、变形 X-Y 曲线，图 2.7 为实测低碳钢压缩实验曲线，图 2.8 为实测铸铁压缩实验曲线。

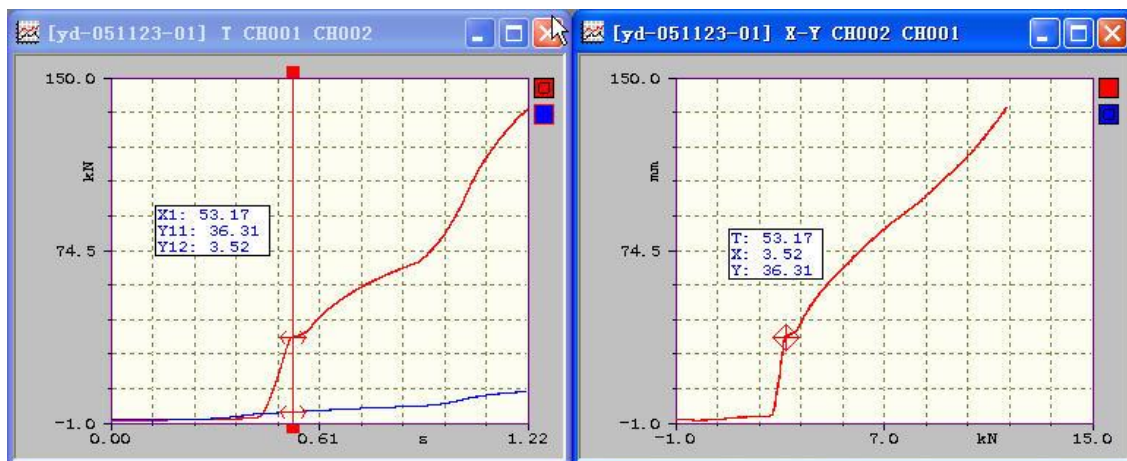


图 2.7 实测低碳钢压缩实验曲线

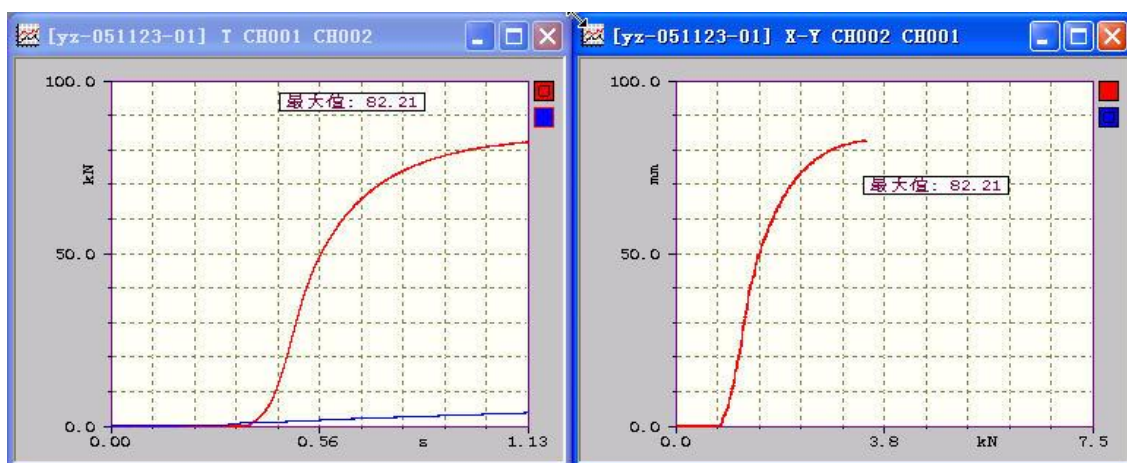


图 2.8 实测铸铁压缩实验曲线

左窗口为力和变形的实时曲线窗口，右窗口为力和变形的 X-Y 曲线窗口。通过移动光标可以方便地读取我们所需要的数据。

得到相关数据后，依据实验原理，就可以得到我们所需要的力学指标。

5、完成实验预习报告

在了解实验原理、实验方案及实验设备操作后，就应该完成实验预习报告。实验预习报告包括：明确相关概念、预估试件的最大载荷、明确操作步骤等，在完成预习报告时，有些条件实验指导书已给出（包括后续的试验操作步骤简介）、有些条件为已知条件、有些条件则需要查找相关标准或参考资料。通过预习报告的完成，将有利于正确理解及顺利完成实验。

有条件的同学可以利用多媒体教学课件，分析以往的实验数据、观看实验过程等。

完成实验预习报告，并获得辅导教师的认可，是进行正式实验操作的先决条件。

6、实验操作步骤简介

6.1 试件原始参数的测量

用游标卡尺在试件的中央按两个垂直方向多次测量试件的直径以及试件的原始高度，并将实验数据填入实验表格。

6.2 装夹试件

6.2.1 实验预压

操作步骤：打开“压力控制手轮”，选择“启动油泵”、“压缩上行”，打开“进油手轮”，油缸活塞杆上行，上、下承压板接触，压力表显示当前力值，旋转“调压手轮”，荷载变化，证明加载设备正常工作。

6.2.2 试件安装

打开“压力控制手轮”、选择“拉伸下行”，至下夹头运行至试件安装位置，关闭“进油手轮”、将试件放在下部承压板的中央、选择“压缩上行”、打开“进油手轮”，油缸活塞杆上行至试件上部距离上部承压板 1-2mm 时关闭“进油手轮”，关闭“调压手轮”。这样就完成了试件的装夹。

6.3 连接测试线路

按要求联接测试线路，同拉伸实验，一般第一通道选择测力，第三通道选择测位移。

6.4 设置数据采集环境

6.4.1 进入测试环境

按要求联接测试线路，确认无误后，打开仪器电源及计算机电源，双击桌面上的快捷图标，提示检测到采集设备进入测试环境。检测到仪器后，系统将自动给出上一次实验的测试环境。

6.4.2 设置测试参数

测试参数是联系被测物理量与实测电信号的纽带，设置合理的测试参数是得到正确数据的前提。测试参数由系统参数、通道参数及窗口参数三部分组成。

第一项、通道参数

选择第一通道测量试件所受的压力，第三通道测油缸活塞杆位移。需要选择及输入的参数有：测量内容、工程单位、修正系数，并选择相应的满度值。

需要注意的是：

1、同拉伸试验相比，压缩试验数据均为负值，为理解方便，我们习惯于将相关修正系数设置为负值，这样读取的荷载及变形就为正值。

2、由于试验机所采用的传感器类型并不相同，及同一类型的传感器个体之间存在差异，不同试验机的转换因子并不相同。如当通过拉、压力传感器直接测量试件所受的荷载时，只需选择修正比例系数 b 即可，且拉、压实验具有相同的系数；而当通过测量油缸油压间接测量试件的荷载时，由于油缸活塞杆运行时的摩擦力、及油缸拉压面积的不等，需要选择 b 、 c 两个系数，且拉、压时，两个系数各不相同。

第二项、采样参数

采样频率：“20-100Hz”，“拉压测试”。

第三项、窗口参数

可以开设两个数据窗口，左窗口为力、变形的实时曲线窗口，右窗口为力、变形的 X - Y 曲线窗口，并设定好窗口的其它参数如坐标等。在对坐标参数的设置时，需对被测试件的极限承载力及变形进行预估，这样可以得到较好的图形比例。

对比当前各参数与实际的测试内容是否相符，若相符进入“6.4.3 数据预采集”，如不符，则应选择正确的参数或通过引入项目的方式引入所需要的测试环境。具体操作：打开“文件”选择“引

入项目”，引入所需要的采集环境。

6.4.3 数据预采集

6.4.3.1 采集设备满度值对应检查

检查采集设备各通道显示的满度值是否与通道参数的设定值相一致，如不一致，需进行初始化硬件操作，单击菜单栏中的“控制”，选择“初始化硬件”，就可以实现采集设备满度值与通道参数设置满度值相一致。

6.4.3.2 数据平衡、清零

单击菜单栏中的“控制”，选择“平衡”，对各通道的初始值进行硬件平衡，可使所采集到的数据接近于零，然后，单击菜单栏中的“控制”，选择“清除零点”，“清除零点”为软件置零，可将平衡后的残余零点清除。此时若信号经平衡后的数值过大，会有相应提示。

此时，仪器的相应通道会有过载指示，说明通道的初始值过大，尤其试件变形通道容易出现此情况，说明下夹头套的位置过于靠下，可将下夹头套的位置适当上行即可。对于平衡前有过载指示，平衡后指示消失的情形，说明仪器本身记忆的初始平衡值过大，属正常情况。

6.4.3.3 启动采样

单击菜单栏中的“控制”，选择“启动采样”，选择数据存储的目录，便进入相应的采集环境，采集到相应的零点数据，此时从实时曲线窗口内便可以读到相应的力和位移的零点数据，证明采集设备能正常工作。单击菜单栏中的“控制”，选择“停止采样”，停止采集数据，并分析所采集的数据，确认所设置的各参数正确无误。这样就完成了数据采集环境的设置。

6.5 加载测试

在试件装夹完毕，并确定数据采集系统能正常工作后，就可以进行加载测试了。具体操作步骤如下：

首先需要确定试验机的状态，“进油手轮”关闭，“调压手轮”关闭。

然后选择“油泵启动”，“压缩下行”，完成后，开始数据采集，选择“控制”-“平衡”-“清除零点”，“启动采样”。左窗口，采集到的零点数据，打开“进油手轮”进行加载测试，控制加载速度，注意观察各阶段实验现象，起始阶段应缓慢加载。打开进油手轮进行加载测试，同时注意观察试件屈服、变形等实验现象，开始时应当慢一点。首先是弹性阶段试件所受的荷载与试件的变形呈线性关系，接着便是屈服阶段，试件很快就离开了屈服阶段，控制进油手轮持续加载，这时可以增大进油手轮的开启程度以增大试件所受的荷载。至 120KN，关闭“进油手轮”，“停止采样”，“油泵停止”，“拉压停止”。观察试件的变形。打开“调压手轮”，“停止采样”，选择“拉伸下行”油缸活塞杆下行，取出试件。比较试件压缩前后的变化。

7、分析数据完成实验报告

7.1 验证数据

首先双窗口显示全部实验数据，左窗口实时曲线、右窗口力-位移 X-Y 曲线。从低碳钢压缩实验曲线中应清晰区分低碳钢压缩的屈服点，铸铁则无屈服点。

7.2 读取数据

7.2.1 荷载数据的读取

低碳钢压缩实验中，选择单光标，选择左右图光标同步，放大左图屈服阶段，读取屈服荷载。当然也可以像拉伸试验一样采取双光标读出屈服荷载。将得到的数据，填入到相应表格。这样就得到了屈服极限 σ_s 。

铸铁压缩实验中，无屈服荷载，极限荷载的读取同低碳钢。

7.2.2 试件变形指标的读取

用游标卡尺测量压缩后试件的最大直径及高度，填入到相应表格，以得到此次低碳钢压缩实验过程中的最大应力。这样就完成了数据分析的过程。

7.3 分析数据

通过实验前的测量及实验后的数据读取就得到了我们所需要的数据，代入相应的公式或计算表格即可得到压缩的各项力学指标。

$$\text{低碳钢屈服强度} \quad \sigma_s = F_s / S_0$$

$$\text{铸铁的强度极限} \quad \sigma_b = F_b / S_0$$

对于铸铁试件而言，由于其无屈服现象，故其不存在流动极限 σ_s 。

对于低碳钢试件而言，由于在压缩过程中试件的面积不断增大，承受的荷载持续增加，习惯上认为低碳钢试件无极限承载力，但假如计算时考虑试件面积的变化，会发现达到一定荷载后，压缩过程的应力应变曲线趋于平缓。在实际实验时，可以通过利用在压缩过程中测得的试件高度的变化来求得试件的对应面积，这样就可以得到压缩过程的 $\sigma - \varepsilon$ 曲线，实际分析时往往将数据转化为 Matlab 格式后进行分析处理，另外，在荷载较大时需考虑机架变形引起的测试误差，可通过在不加试件压缩的情况下测得机架变形与荷载的对应关系，在实际分析数据时去掉此系统误差，这样就可以较准确地得到低碳钢压缩时的 $\sigma - \varepsilon$ 曲线。实测的低碳钢压缩过程的 $F - \Delta L$ 与 $\sigma - \varepsilon$ 曲线的比较如图 2-9 所示。

实际上由于低碳钢试件在压缩过程中变形并不均匀，应力沿试件的高度并非均匀分布。可以用试件压缩过程的最大荷载除以试件压缩过程的最大面积近似求得压缩过程的最大应力。

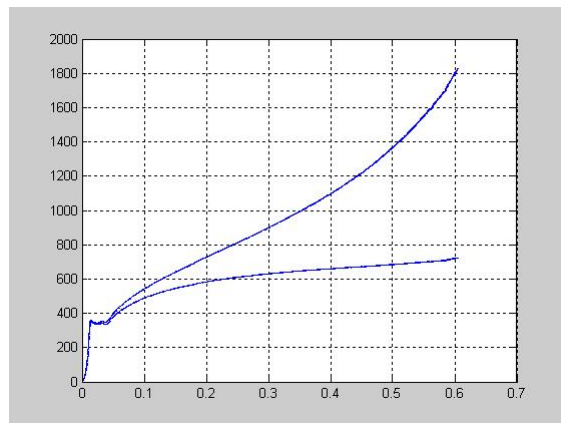


图 2.9 实测低碳钢压缩实验 $F - \Delta L$ 曲线与 $\sigma - \varepsilon$ 曲线比较

7.4 完成实验报告

通过观察实验现象、分析实验数据就可以进行实验报告的填写了，完成实验报告的各项内容。并总结实验过程中遇到的问题及解决方法。

8、实验注意事项

- 1、在紧急情况下，没有明确的方案时，请按急停按钮；
- 2、上夹头套应处于固定状态，夹头套与上横梁应紧密接触；
- 3、若要调整试件的位置应先停止油缸运行，严禁在油缸运行时调整试件的位置；
- 4、加载控制手轮、压力控制手轮均为针阀，轻轻用力即可关闭，过大的用力会导致阀芯被拧断或长期使用后关闭不严，故关闭加载控制手轮、压力控制手轮时一定要轻轻关闭即可；
- 5、装夹试件时要调整好试件与上夹头套的间隙，间隙在 2-3mm 之间较为合适；
- 6、实验初始阶段加载要缓慢，以免试件屈服阶段变形不充分；
- 7、在压缩低碳钢试件时要注意观察试件及夹头套的偏移，若横向偏移较大则应停止实验。

§3 扭 转 试 验

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。扭转变形是构件的基本变形之一，因此扭转实验也是材料力学基本实验之一。

2、实验目的

- 1、测定低碳钢的扭转屈服强度 τ_s 及抗扭强度 τ_b 。
- 2、测定铸铁的抗扭强度 τ_b 。
- 3、观察、比较低碳钢和铸铁在扭转时的变形和破坏现象，分析其破坏原因。

3、实验原理

对一确定形状试件两端施加一对大小为 M_e 的外力偶，试件便处于扭转受力状态，此时试件中的单元体处于如图 3.1 所示的纯剪应力状态。

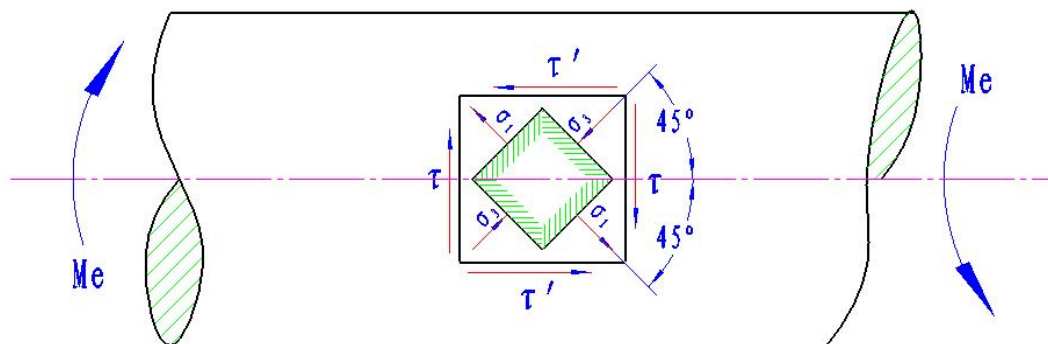


图 3.1 纯剪应力状态

对单元体进行平衡分析可知，在与试样轴线成 45° 角的螺旋面上，分别承受主应力 $\sigma_1 = \tau$ ， $\sigma_3 = -\tau$ 的作用，这样就出现了在同一个试件的不同截面上 $\sigma_{\text{拉}} = -\sigma_{\text{压}} = \tau$ 的情形。这样对于判断材料各极限强度的关系提供了一个很好的条件。

图 3.2 为低碳钢 Q235 扭转实验扭矩 T 和扭转角 ϕ 的关系曲线，图 3.3 为铸铁 HT200 试件的扭转实验扭矩 T 和扭转角 ϕ 的关系曲线。图 3.4 为低碳钢和铸铁扭转破坏断口形式

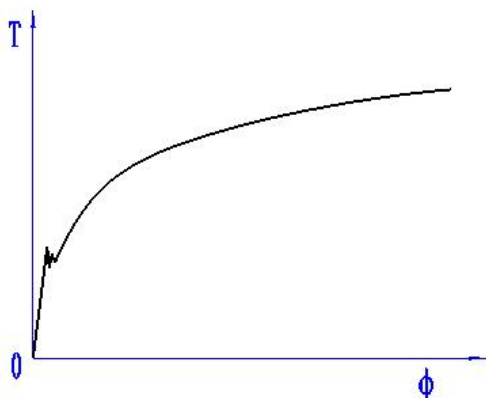


图 3.2 低碳钢 Q235 扭转 $T-\phi$ 曲线

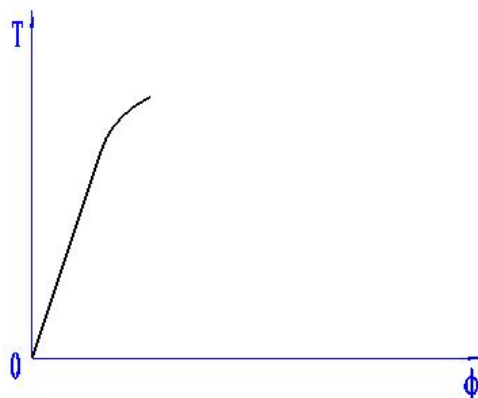


图 3.3 铸铁 HT200 扭转 $T-\phi$ 曲线

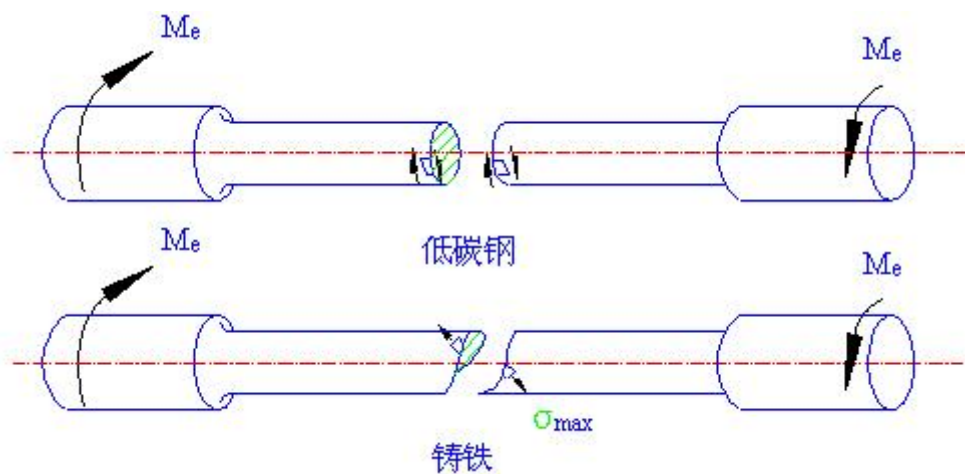


图 3.4 低碳钢和铸铁扭转破坏断口形式

由图 3.2 低碳钢扭转 $T-\phi$ 曲线可以看出，低碳钢 Q235 的扭转 $T-\phi$ 曲线类似于拉伸的 $F-\Delta L$ 曲线，有明显的弹性阶段、流动屈服阶段及强化阶段。在弹性阶段，根据扭矩平衡原理，由剪应力产生的合力矩需与外加扭矩相等，可得剪应力沿半径方向的分布 τ_ρ 为：

$$\tau_\rho = \frac{T^* \rho}{I_p}$$

在弹性阶段剪应力的变化如图 3.5 所示

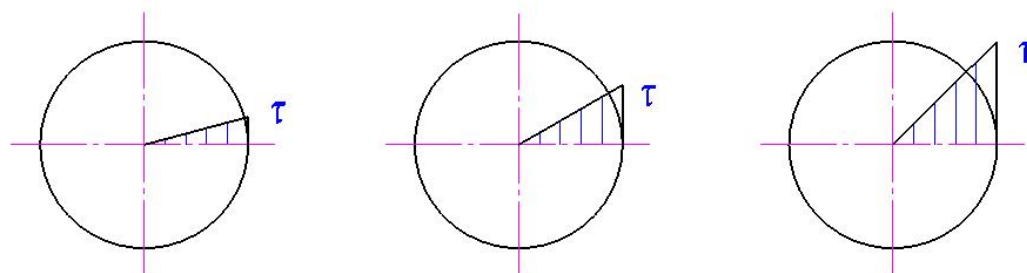


图 3.5 低碳钢扭转试件弹性阶段应力分布变化

在弹性阶段剪应力沿圆半径方向呈线性分布，据此可得

$$\tau_{\max} = \frac{T^* r}{I_p} = \frac{T}{W_p}$$

当外缘剪应力增加到一定程度后，试件的边缘产生流动现象，试件承受的扭矩瞬间下降，应力重新分布至整个截面上的应力均匀一致，称之为屈服阶段，在屈服阶段剪应力的变化如图 3.6 所示

称达到均匀一致时的剪应力为剪切屈服强度 (τ_s)，其对应的扭矩为屈服扭矩，习惯上将屈服

段的最低点定义为屈服扭矩，同样根据扭矩平衡原理可得：

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

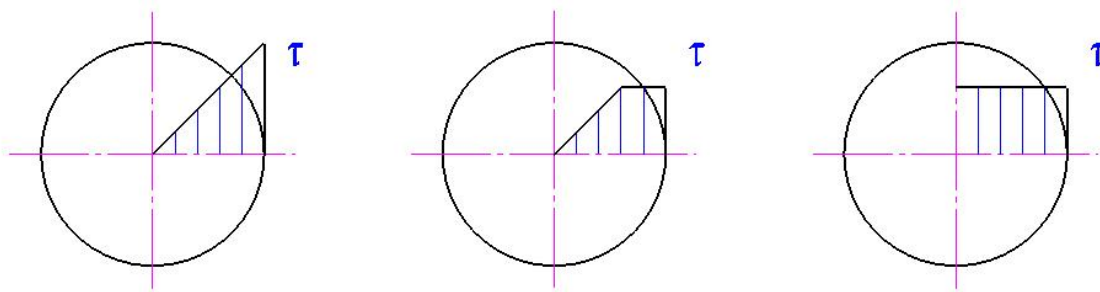


图 3.6 低碳钢扭转试件屈服阶段应力分布变化

应力均匀分布后，试件可承受更大的扭矩，试件整个截面上的应力均匀增加，直至试件剪切断裂，如图 3.4 所示，最大剪应力对应的扭矩为最大扭矩，定义最大剪应力为剪切强度。

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

通过以上的分析可知：在低碳钢的扭转时，可以得到剪切强度极限，但由于不同材料的破坏形式并不一致，其剪切强度的计算公式并不相同，鉴于此，为方便不同材料力学特性的比较，国标《金属扭转实验方法》（GB/T10128-1988）规定，材料的扭转屈服点和抗扭强度按公式 $\tau_s = T_s / W_p$ ， $\tau_b = T_b / W_p$ 计算。需要注意的是，国标定义的强度为抗扭强度而非剪切强度。

由图 3.2 铸铁扭转 $T-\phi$ 曲线可以看出，铸铁 HT200 的扭转 $T-\phi$ 曲线类似于拉伸的 $F-\Delta L$ 曲线，没有屈服阶段及强化阶段。从图 3.1 纯剪应力状态及图 3.4 铸铁扭转破坏断口形式可以看出，铸铁试件是沿与轴线成 45 度螺旋面方向被拉伸破坏的，也就是说，在图 3.1 纯剪应力状态单元体中，拉应力首先达到拉伸强度值。其抗扭强度的计算同低碳钢试件，且此时抗扭强度等于最大扭矩时的最大剪应力（即边缘剪应力）。

由以上分析可知：铸铁的扭转破坏是由于拉应力引起的拉伸破坏，通过扭转实验可间接测得铸铁试件的拉伸强度，但无法得到其剪切强度。

4、实验方案

4.1 实验设备、测量工具及试件

YDD-1 型多功能材料力学试验机（图 1.8）、150mm 游标卡尺、标准低碳钢、铸铁扭转试件（图 3.7）。

YDD-1 型多功能材料力学试验机由试验机主机和数据采集分析系统两部分组成，主机部分由加载机构及相应的传感器组成，数据采集部分完成数据的采集、分析等。

试件采用两端为扁形标准扭转试件，按国标《金属扭转实验方法》（GB/T10128-1988）的规定制



图 3.7 常用扭转试件

作，试件的两端与试验机的上、下扭转夹头相联接。为方便观测试件的变形，试验前需用游标卡尺测量出试件的最小直径（ d_0 ）。为方便观测试件的变形、观察实验现象实验前在试件上作一组如图 3.7 所示的矩形框标记。

4.2 装夹、加载方案

安装好的试件如图 3.8 所示。试件两端为扁形，扭转试验时，试件的两端与试验机的上、下扭转夹头相联接，夹头中间有矩形加载槽。上夹头通过花键轴与扭矩传感器联接，花键轴在扭矩传感器中可上下滑动，以适合安装试件。下夹头通过双键与试验机的扭转轴相联接。扭转时，扭矩传感器固定不动，扭转电机带动下夹头转动，试件受到扭转。

4.3 数据测试方案

扭矩通过上夹头-花键轴传至扭矩传感器，试件的转角通过安装在扭转轴上的光电编码器转化为电压方波信号，转轴每转过一个确定的角度，光电编码器就输出一个方波信号，这样，通过记录方波的数量就可以知道试件的转角，扭转时，数据采集系统每检测到一个方波就记录一次数据，并将方波数量代表的转角作为 X 轴，扭矩作为 Y 轴显示数据，这样就得到了扭转试验的扭矩-转角曲线。

4.4 数据的分析处理

数据采集分析系统，实时记录试件所受的扭矩及转角，并生成扭矩、转角实时曲线。图 3.9 为实测低碳钢 Q235 扭转实测曲线，图 3.10 为实测铸铁 HT200 的扭转实测曲线。

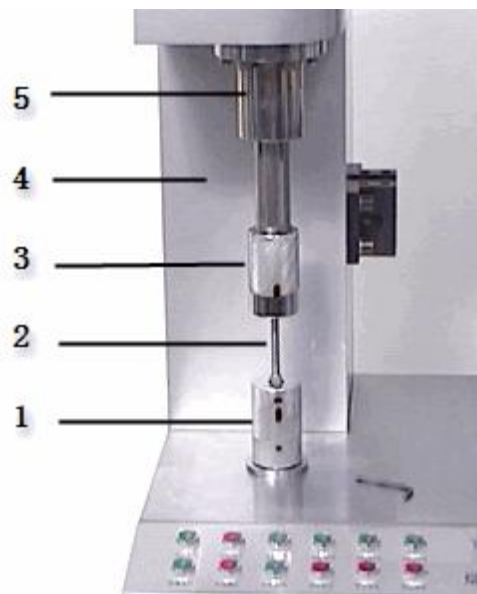


图 3.8 扭转实验试件的装夹
1、3-扭转上下夹头，2-扭转试件，
4-左立柱，5-扭矩传感器



3.9 实测低碳钢扭转 $T-\phi$ 曲线

在图 3.9 低碳钢 Q235 扭转实验曲线中，横坐标-试件的转角，纵坐标-试件所受的扭矩，从扭矩-转角曲线可以清晰地区别低碳钢扭转实验的弹性阶段、屈服阶段，并可方便地读取屈服扭矩、极限扭矩。

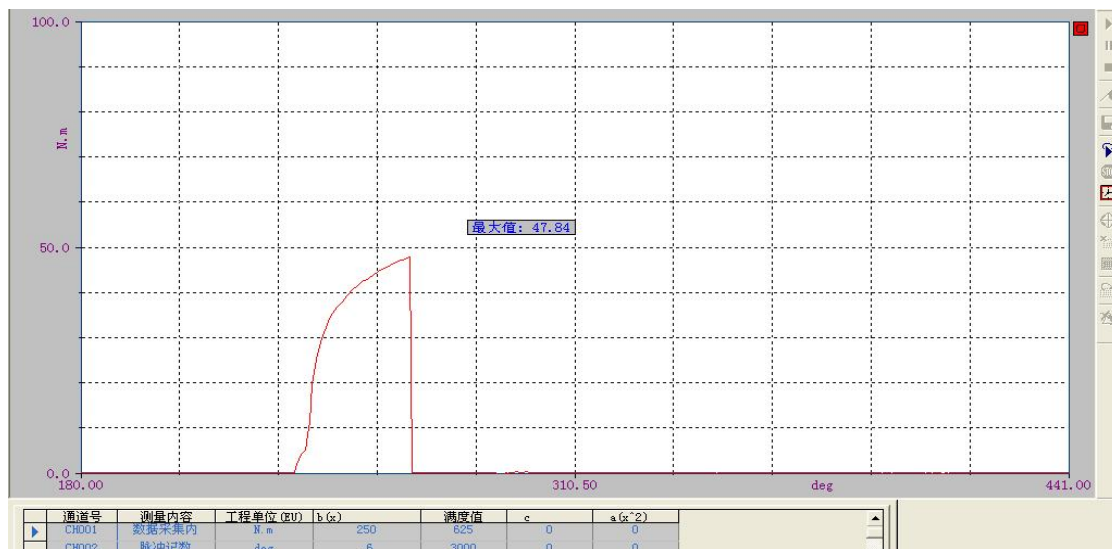


图 3.10 实测铸铁扭转 $T - \phi$ 曲线

得到相关数据后，依据实验原理，就可以得到我们所需要的力学指标。

5、完成实验预习报告

在了解实验原理、实验方案及实验设备操作后，就应该完成实验预习报告。实验预习报告包括：明确相关概念、预估试件的最大载荷、明确操作步骤等，在完成预习报告时，有些条件实验指导书已给出（包括后续的实验操作步骤简介）、有些条件为已知条件、有些条件则需要查找相关标准或参考资料。通过预习报告的完成，将有利于正确理解及顺利完成实验。

有条件的同学可以利用多媒体教学课件，分析以往的实验数据、观看实验过程等。

完成实验预习报告，并获得辅导教师的认可，是进行正式实验操作的先决条件。

6、实验操作步骤简介

6.1 试件原始参数的测量及标距的确定

实验采用标准短试件，试件形状见图 3.7，用游标卡尺在标距长度的中央和两端的截面处，按两个垂直的方向测量试件的直径，填入实验表格取三组数据平均值的最小值进行计算。计算出扭转试件的抗扭截面系数 W_p 。

为了更好的观察实验现象，实验前，在扭转试件表面制作一组矩形框标记，实验中应注意观察矩形框的变化。

6.2 连接测试线路

按要求联接测试线路，一般第 2 通道选择测扭矩，第八通道选择测转角，第七通道进行扭转方向判断。连接试验机上的转角传感和扭转传感接口。联线时应注意不同类型传感器的测量方式及接

线方式。联线方式应与传感器的工作方式相对应。

6.3 设置数据采集环境

6.3.1 进入测试环境

首先检测仪器。检测到仪器后，系统将自动给出上一次实验的测试环境。或通过文件-引入项目，引入所需要的采集环境。

6.3.2 设置测试参数

测试参数是联系被测物理量与实测电信号的纽带，设置合理的测试参数是得到正确数据的前提。测试参数由系统参数、通道参数及窗口参数三部分组成。其中，系统参数包括测试方式、采样频率、报警参数、实时压缩时间及工程单位等；通道参数反映被测工程量与实测电信号之间的转换关系，由测量内容、转换因子及满度值等组成；窗口是指为了在实验中显示及实验完成后分析数据而设置的曲线窗口，曲线分为实时曲线及 X-Y 函数曲线两种。

第一项、系统参数

采样频率： 50-200Hz，当每个脉冲为 0.6 度时最好选择 50Hz，当每个脉冲为 0.144 度时最好选择 200Hz。

测试方式：扭转测试。

实时压缩时间：300 秒。

若进行反复扭转实验时需设置换向判断通道及报警通道。通常情况下 8CH 固定用于转角脉冲计数，7CH 用于转角方向判断，反复扭转时可选择扭矩或转角通道作为报警通道，并选择相应的报警值。

需要注意的是：

- 1、传感器的接线一定要与通道的参数设置相对应，8CH 固定用于转角测试。
- 2、报警通道与报警的选择与实验的类型有关，并需与试验机的控制方式相结合，在进行反复扭转实验时，需启动试验机扭转自动控制功能。

第二项、通道参数

通常选择 2CH 测扭矩，7CH 进行扭转方向判断，8CH 固定选择测转角。需要选择及输入的参数有：测量内容、工程单位、修正系数，并选择相应的满度值。

需要注意的是：

- 1、需将 8CH（固定选择测转角）通道的测量内容设置为“脉冲计数”，且“脉冲计数”功能只有在系统参数中将测试方式设置为“扭转测试”时方可选择，且只有一个通道可选为“脉冲计数”。选为“脉冲计数”的通道需将其满度值设为 5000mV，由于 a、c 均为 0，显示值为 $5000 \times b$ ，b 为每个脉冲代表的转角。如当 $b=0.6$ 时满度值指示值为 3000， $b=0.144$ 时满度值指示值为 720。

- 2、7CH 为方向判断通道，测量内容选择为“电压测量”（或“数据采集内”），b 可选为 1，满度值为 5000 mV。

第三项、窗口参数

可以开设两个数据窗口，左窗口为扭矩、转角的实时曲线窗口，右窗口为扭矩、转角的 X-Y 曲线窗口，并设定好窗口的其它参数如坐标等。坐标参数设置时，需对被测试件的极限扭矩及变形进

行预估，这样可以得到较好的图形比例。

需要注意的是：

- 1、在扭转测试时，数据的记录方式是以脉冲为触发的，即使在普通绘图方式时，窗口的横坐标是转角而不是时间，且转角只有正值，即使在反向扭转时，转角也是一直在增加的。
- 2、在进行反复扭转实验时，在 X-Y 方式下，转角有正负之分，正向扭转为正，反向扭转为负。

对比当前各参数与实际的测试内容是否相符，若相符进入“6.4.3 数据预采集”，如不符，则应选择正确的参数或通过引入项目的方式引入所需要的测试环境。

6.3.3 数据预采集

6.3.3.1 采集设备满度值对应检查

检查采集设备各通道显示的满度值是否与通道参数的设定值相一致，如不一致，需进行初始化硬件操作，单击菜单栏中的“控制”，选择“初始化硬件”，就可以实现采集设备满度值与通道参数设置满度值相一致。

6.3.3.2 数据平衡、清零

单击菜单栏中的“控制”，选择“平衡”，对各通道的初始值进行硬件平衡，可使所采集到的数据接近于零，然后，单击菜单栏中的“控制”，选择“清除零点”，“清除零点”为软件置零，可将平衡后的残余零点清除。

由于传感器输出的电压在平衡时可能为一较高的电压，对于平衡范围较小的测试系统有时会超出采集系统的平衡范围，此时若信号经平衡后的数值过大，在“清除零点”时会有相应提示，且仪器的相应通道会有过载指示，说明通道的初始值过大，尤其是脉冲计数通道容易出现此情况，说明脉冲计数通道电压处于高电平，此时应启动扭转启动，然后停止，重新“平衡”、“清零”，观察“过载指示”是否清除，若未清除重复上述操作，直至“过载指示”清除为止。对于平衡前有过载指示，平衡后指示消失的情形，说明仪器本身记忆的初始平衡值过大，属正常情况。

6.3.3.3 启动采样

单击菜单栏中的“控制”，选择“启动采样”，选择数据存储目录，便进入相应的采集环境，此时并没有采到数据，这是因为数据采集系统每检测到一个方波就记录一次数据，扭转电机没有启动时，光电编码器没有转角输出，采集系统并不记录数据。选择“正向扭转”，启动电机正向扭转，数据采集系统显示采集到的零点数据，X-Y 图中，转角正向增加，用手扭动扭转上夹头，采集到的扭矩就产生了相应的变化，正向扭矩为正值，反之为负值。此时，选择“反向扭转”，启动电机反向扭转，X-Y 图中，转角负向减少。通过安装在控制面板右下角的调速旋钮就可以调节扭转的转速，顺时针时转速增加，逆时针转速降低，证明采集系统和设备均能正常工作。

单击菜单栏中的“控制”，选择“停止采样”，停止采集数据，并分析所采集的数据，确认所设置的各项参数正确。

这样就完成了数据采集环境的设置。

6.4 装夹试件

在确信设备和采集环境运行良好后，便可以进行试件的装夹，安装时，将试件的一端安装在上

夹头内，下拉上夹头，使试件的另一端接近下夹头，通过控制电机正反向转动，调整下夹头位置，使试件可以方便的进入下夹头，向下轻推上夹头，松手后，依靠摩擦力保证上夹头不被拉回。反复扭转时，需使用夹头紧定螺钉。

这样便完成了试件的装夹。

6.5 加载测试

在试件装夹完毕，并确定数据采集系统能正常工作后，就可以进行加载测试了。具体操作步骤如下：

选择“控制”-“平衡”-“清除零点”-“启动采样”，选择好存储目录后便开始采集数据。实验时可以通过显示实时数据全貌窗口来观测试件扭转全过程，单击“显示数据全貌”图标，调入显示数据全貌窗口，重排显示窗口，选择被测通道，调整窗口坐标。然后选择“正向扭转”，开始数据采集，试件很快进入屈服阶段，并很快进入强化阶段。注意观察标距线的变化，横向标距线的距离不变，竖向标距线变成螺旋线而且间距变短。由于标距线的距离不断伸长，原来清晰的标距线变得不太清晰。持续扭转，试件断裂后，将上夹头拉起，停止采集数据，停止扭转。取出断裂试件，观察端口形式及标距线的变化。注意观察实验各阶段现象及标记线的变化。

反复扭转时，需启动扭转自动控制功能，并根据需要在测试过程中调整报警参数。

7、分析数据完成实验报告

7.1 验证数据

首先关闭“显示数据全貌”窗口，在扭矩-转角窗口显示全部实验数据，并验证数据的正确性。从低碳钢扭转实验曲线中应能清晰地看到低碳钢扭转时的屈服及强化阶段，铸铁则无屈服阶段。

7.2 读取数据

选择双光标，放大左图屈服阶段，读取屈服扭矩 T_s ，极限扭矩 T_b 及转角 ϕ 。

7.3 分析数据

将得到的实验数据填入到相应表格，屈服扭矩，极限扭矩，这样就得到了抗扭屈服强度，抗扭强度，剪切屈服强度以及剪切强度。

需要注意的是：

在分析数据时需特别注意区别抗扭强度与剪切强度的区别，抗扭强度的定义是针对荷载类型定义的，有利于不同材料间的相互比较，但无法反映材料真实的应力状态。剪切强度是按材料破坏时的应力状态定义的，能够反映材料破坏时的真实应力状态，但不同材料破坏时的应力状态并不相同，计算时不同材料需根据材料的破坏特征确定计算公式。

7.4 完成实验报告

通过观察试验现象、分析试验数据就可以进行试验报告的填写了，依据实验原理，将所测得各参数带入相应的计算公式即可得到相应的力学指标。但在各参数的测量过程中，应明确各参数的准确定义，并尽可能减小测量误差。完成实验报告的各项内容。并总结试验过程中遇到的问题及解决方法。

8、实验注意事项

1、在紧急情况下，没有明确的方案时，请按急停按钮；

- 2、扭转实验的测试方式为“扭转测试”；
- 3、进行数据采集的第一步为初始化硬件，初始化完成后应确认采集设备的量程指示与通道参数的设定值一致；且平衡后各通道均无过载现象；
- 4、在进行通道参数设置时，需对测量内容为“脉冲计数”的通道进行复选确定。
- 5、在正式装夹试件实验前，需先打开扭转启动，手拧上夹头确定采集系统正常工作后进行试件装夹；
- 6、试件装夹时应先装上夹头再装下夹头。

§4 电测法测定材料的弹性模量 E 和泊松比 μ 实验

1、概述

弹性模量 E （也称杨氏模量）是表征材料力学性能中弹性段的重要指标之一，它反映了材料抵抗弹性变形的能力。泊松比 μ 反映了材料在弹性范围内，由纵向变形引起的横向变形的大小。在对构件进行刚度稳定和振动计算、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。而弹性模量 E 和泊松比 μ 只能通过实验来测定。

2、实验目的

- 1、测定低碳钢的弹性模量 E 和泊松比 μ ；
- 2、验证胡克定律；
- 3、了解电阻应变片的工作原理及贴片方式；
- 4、了解应变测试的接线方式。

3、实验原理

弹性模量 E 和泊松比 μ 是反映材料弹性阶段力学性能的两个重要指标，在弹性阶段，给一个确定截面形状的试件施加轴向拉力，在截面上便产生了轴向拉应力 σ ，试件轴向伸长，单位长度的伸长量称之为应变 ε ，同样，当施加轴向压力时，试件轴向缩短。在弹性阶段，拉伸时的应力与应变的比值等于压缩时的应力与应变的比值，且为一定值，称之为弹性模量 E ， $E = \frac{F/S_0}{\Delta L/L} = \sigma/\varepsilon$ 。

在试件轴向拉伸伸长的同时，其横向会缩短，同样，在试件受压轴向缩短的同时，其横向会伸长，在弹性阶段，确定材质的试件拉伸时的横向应变与试件的纵向应变的比值等于压缩时横向应变与试件的纵向应变的比值，且同样为一定值，称之为泊松比 μ ， $\mu = \left| \frac{\Delta L_{\text{横}} / L_0}{\Delta L_{\text{纵}} / L_0} \right| = \left| \frac{\varepsilon_{\text{横}}}{\varepsilon_{\text{纵}}} \right|$ 。

这样，弹性模量 E 和泊松比 μ 的测量就转化为拉、压力和纵、横向应变的测量，拉、压力的测量原理同拉、压实验，应变的测量采用电阻应变片电测法原理。

电阻应变片可形象地理解为按一定规律排列有一定长度的电阻丝，实验前通过胶粘的方式将电阻应变片粘贴在试件的表面，试件受力变形时，电阻应变片中的电阻丝的长度也随之发生相应的变化，应变片的阻值也就发生了变化。实验中我们采用的应变片是由两个单向应变片组成的十字形应变花，所谓单向应变片，就是应变片的电阻值对沿某一个方向的变形最为敏感，称此方向为应变片的纵向，而对垂直于该方向的变形阻值变化可忽略，称此方向为应变片的横向。利用应变片的这个特性，在进行应变测试时，我们所测到只是试件沿应变片纵向的应变，其不包含试件垂直方向变形所引起的影响。对于单向电阻应变片而言，在其工作范围内，其电阻的变化与试件的变形有如下的关系：

$$\frac{\Delta R}{R} = K_{\text{应}} \frac{\Delta L}{L} = K_{\text{应}} \varepsilon \quad (1)$$

$K_{\text{应}}$ 称为电阻应变片的灵敏度系数，不同材料的电阻应变片有着不同的灵敏度系数，常用应变片的灵敏度系数 $K_{\text{应}}$ 一般在 2.1 左右，即使同一批应变片的灵敏度系数也并非相同，例如，我

们在该实验中所粘贴的电阻应变片的阻值 $R = 120.2 \pm 0.3\Omega$ ， $K = 2.19 \pm 1\%$ 。通常应变片应变极限为 $\varepsilon \leq 2\%$ ，但有些特制的应变片其应变极限可达到 20%。

由于常用钢材当应力达到弹性极限时， $\varepsilon < 0.2\%$ ，所以我们可以采用粘贴应变片的方式来测量试件的应变，这样对试件应变的测量就转化成了对应变片 $\Delta R/R$ 的测量。常用的测量方式是采用惠斯登电桥进行测量。其原理如图 4.1 所示。

电桥由四个桥臂电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 组成，供桥电压由 A、C 点输入，输出电压为 U_{DB} 。假定

电桥的初始状态为 $R_1/R_2 = R_4/R_3$ ，此时电桥输出电压 $U_{DB} = 0$ ，称之为平衡电桥。极限情况为 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 。

现在我们假定， $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ，电阻应变片 R_1 粘贴在被测试件上，其余应变片粘贴在非受力试件上，在不考虑非受力原因引起的应变片电阻变化时，认为其为恒定值。这样应变片 R_1 由于试件变形产生 ΔR 的变化时，输出电压 U_{DB} 也会产生相应的变化， ΔU_{DB} ，由于电桥初始状态为平衡电桥，即 $U_{DB} = 0$ ，故有：

$$\begin{aligned} \Delta U_{DB} &= U_{DC} - U_{BC} = \frac{1}{2}E - \frac{E}{R_1 + \Delta R + R_2}R_2 = \frac{1}{2}E - \frac{E}{2R + \Delta R}R = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R}E \\ &= \frac{\Delta R/R}{4 + 2\Delta R/R}E \end{aligned} \quad (2)$$

由于， ΔR 很小，所以 $\lim(4 + 2\Delta R/R) = 4$ ，因此

$$\Delta U_{DB} = \frac{\Delta R/R}{4}E = \frac{K_{\text{应}}\varepsilon_1}{4}E = K_{\text{应}}K_{\text{仪}}\varepsilon_1 \quad (3)$$

通过计算机数据采集系统，对桥路输出的电压进行放大、离散采集及数据二次运算，就可以得到被测试件的应变 ε 。

$$\varepsilon = K_{\text{应}}K_{\text{仪}}\varepsilon_1$$

调整 $K_{\text{仪}} = 1/K_{\text{应}}$ ，则， $\varepsilon = \varepsilon_1$ ，

同样可以推导，电阻应变片 R_2 粘贴在被测试件上，其余应变片粘贴在非受力试件上时，有

$$\varepsilon = -\varepsilon_2$$

当四个电阻应变片全部粘贴在被测试件上时，有

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 \quad (4)$$

在实际测试中，我们把粘贴在试件上变形的应变片叫做工作片，把粘贴在非受力构件上在实验中不变形的应变片称之为补偿片，因为在实际的测试过程中，引起应变片电阻变化的不仅仅是 ε ，温度、湿度等的变化均能导致电阻应变片电阻的变化。例如，对于截面均匀的导体，当导体的材料

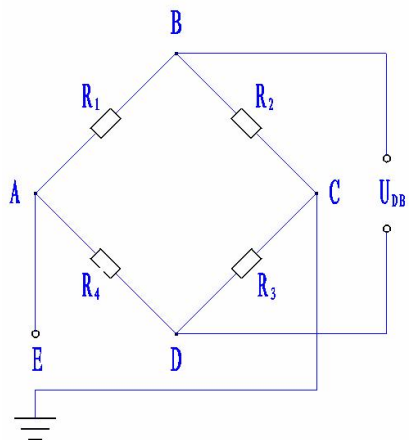


图 4.1 惠斯登电桥原理图

温度一定时

$$R = \rho_0 (1 + \alpha T) \frac{L}{S} \quad (5)$$

式 (5) 中, ρ_0 为材料在 0°C 时的电阻率, α 为材料的电阻温度系数。

这些由非试件变形等原因导致的电阻变化, 对于工作片和补偿片产生的影响往往是相同的, 由式 (4) 可以看出, 由于工作片与补偿片在不同的桥臂上, 相同的变化量会相互抵消, 所以在测试过程中通过将补偿片粘贴在与工作片具有相同材质的构件上, 且与工作片处于相同的工作环境中, 这样就可以使补偿片感知与工作片相同的环境变化, 产生大致相同的电阻变化, 从而减小由于在测试过程中环境变化导致的测试误差, 其中最主要的是补偿由于温度变化引起电阻的变化, 故通常称补偿片为温度补偿片。

这样通过给每一个工作片粘贴一个温度补偿片就可以减小由于环境变化引起电阻的变化而导致的测试误差, 但这意味着随着工作片的增加, 补偿片也需要等量的增加, 这样就变得不方便和不经济, 实际我们通常采用测量通道共用温度补偿片, 通道分时切换测量的工作方式。但这种测量方式需有切换开关, 采样速率较低。在较高速的多点采样时, 多采用补偿通道的补偿方式, 组桥时, 工作应变片与补偿片分别与标准电阻组成独立的半桥, 补偿通道等同于一独立通道, 数据采集时, 测量通道的数据与补偿通道的数据相减就可以起到补偿的作用, 这样就可以实现多个工作片共用一个补偿片的补偿方式, 习惯上称之为 1/4 桥。

在实际测试中, 温度补偿片可以补偿由于环境变化引起的误差, 但有些误差是温度补偿片无法消除的, 例如在弹性模量实验轴向拉伸时, 由于制作精度及装夹等原因会产生附加弯矩, 使得在试件两侧对称粘贴的应变片一侧大于理论值而另一侧小于理论值, 且误差两绝对值基本相等, 根据桥路误差补偿原理, 此时采用单一通道半桥补偿时不仅无法去掉该误差, 反而将被测量的理论值补偿掉。对于此类理论值相同, 而误差方向相反的应变的测量, 桥臂为单片时, 需采用全桥的补偿方式, 在半桥或 1/4 桥时需采用将两应变片串联起来组成一个桥臂的工作方式, 原理图如图 4.2 所示, 图中, $R_{\text{纵前}}$ 为粘贴在测试试件前侧的纵向应变片, $R_{\text{补前}}$ 为粘贴在补偿试件前侧的纵向应变片, 其余以此类推, R_3 、

R_4 为仪器内部提供的标准电阻, 一般为 120Ω 。这样相对于只测单面应变片的测量方式就可以减小拉伸时由于试件附加弯曲等原因导致的试件前后面变形不均匀导致的误差。应变片在半桥补偿方式时测得的电阻的变化比值为 $2\Delta R / 2R = \Delta R / R$, 等于测得的单片应变值, 当组成 1/4 桥时, 由于补偿电阻为仪器内置电阻, 电桥为非平衡电桥, 此时测得的应变值需根据串联后的阻值进行相应的修正, 通常计算机数据采集系统均带应变片阻值修正功能, 修正时只需输入串联后的阻值即可。实际

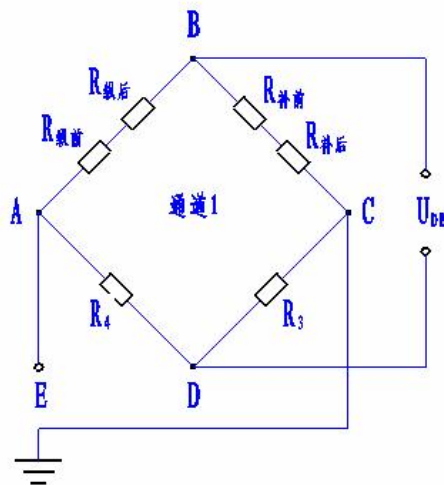


图 4.2 应变片串联半桥补偿原理图

上，影响应变测量的不仅有应变片的阻值，电阻应变片的灵敏度系数、导线电阻等均可对测试结果产生影响，在测试参数中输入相应的数值即可消除其带来的误差。

用游标卡尺测得试件的截面尺寸，从而得到试件的截面面积，通过拉压力传感器测得试件所受的荷载，用电阻应变片电测法得到试件的应变，将上述值代入到相应的公式，即可得到该材料的弹性模量 E 和泊松比 μ 。

4、实验方案

4.1 实验设备、测量工具及试件：

YDD-1 型多功能材料力学试验机（图 1.8）、150mm 游标卡尺、弹性模量泊松比试件（图 4.3）。

YDD-1 型多功能材料力学试验机由试验机主机部分和数据采集分析两部分组成，主机部分由加载机构及相应的传感器组成，数据采集部分完成数据的采集、分析等。

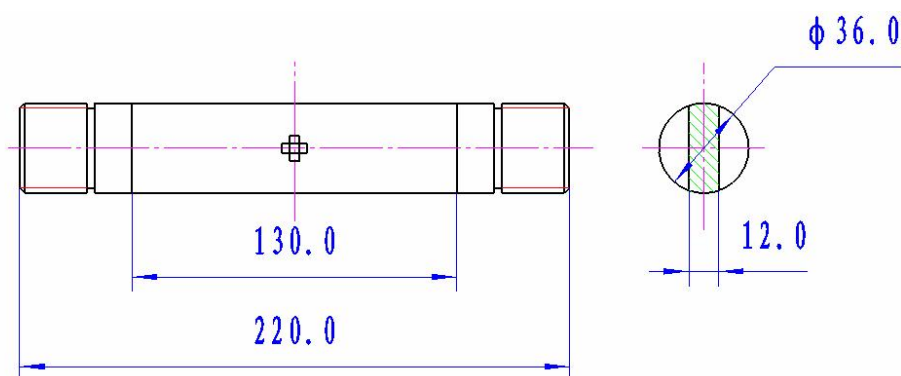


图 4.3 弹性模量泊松比实验

试件采用钢制类似矩形截面的试件，两个面为矩形，另外两个面为半圆形，试件的两端有加载用的凸台或螺母，试件有两种，单向拉伸试件和双向拉压试件，单向拉伸试件只能施加轴向拉力，双向拉压试件可以施加轴向拉、压力。在两个矩形面的中央，粘贴有十字形电阻应变片，用以测量试件的纵、横向应变。

4.2 装夹、加载方案

安装好的试件如图 4.4 所示。实验时，弹模试件的两端通过凸台或螺母与试验机的上下夹头套相连接，可传递拉力或压力。下夹头下行时，试件受拉，下夹头套上升时，试件受压。

需要注意的是：在单一拉伸加载时，为保证试件受力均匀，应将上夹头套设置成同拉伸实验一



图 4.4 弹模试件的装夹

样的铰接状态，而在交变加载时需将上夹头套设置成同压缩实验一样的固接状态，以免在拉压转换时，连接上夹头套的拉杆与试验机上横梁肋板挤压变形。

实验时拉、压加载的换向可通过控制由缸上、下行按钮实现，也可以通过设置通道报警功能自动换向。通过控制进油手轮的旋转来控制加载速度。

4.3 数据测试方案

拉、压力的大小测试同拉压试验。应变通过粘贴的电阻应变片测量，应变测量的相关原理及连线方式参见“应变测试及等强度梁实验”。为减小变形不对称的影响，实验中往往采用应变片串联的桥路方式。即将前后两相同方向的应变片串联起来以消除附加弯矩产生的影响。

4.4 数据的分析处理

数据采集分析系统，实时记录试件所受的力及应变，并生成力、变形实时曲线及力、应变 X-Y 曲线、纵向应变-横向应变 X-Y 曲线，图 4.5 为在 YDD-1 型多功能材料力学实验机上测 45#钢弹性模量 E 和泊松比 μ 的实测曲线。中间窗口，荷载、应变实时曲线，右窗口，荷载应变关系曲线，纵坐标-荷载，横坐标-纵向应变、横向应变，左窗口，纵、横向应变的关系曲线，纵坐标-纵向应变，横坐标-纵向应变。

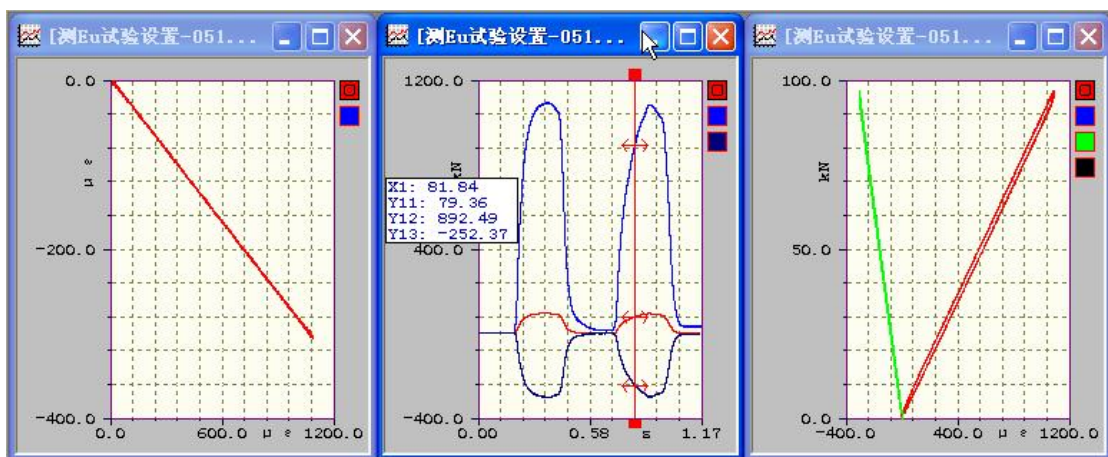


图 4.5 45#钢弹性模量 E 和泊松比 μ 的实测曲线

为了验证所采集的数据为试件在弹性段的数据，我们采用按荷载分级处理数据的方式，以验证试件是否处于弹性变形阶段。读数时，采用单光标，以荷载值为分级标准，选取适当的级差，依次读取相应的荷载及应变。需要注意的是为了避免零点误差，第一级荷载一般不从零点开始，一般将荷载级差作为零点荷载。

将测得的数据代入到相应的公式，即可得到该材料的弹性模量 E 和泊松比 μ 。

5、完成实验预习报告

在了解实验原理、实验方案及实验设备操作后，就应该完成实验预习报告。实验预习报告包括：明确相关概念、预估试件的最大载荷、明确操作步骤等，在完成预习报告时，有些条件实验指导书已给出（包括后续的实验操作步骤简介）、有些条件为已知条件、有些条件则需要查找相关标准或参考资料。通过预习报告的完成，将有利于正确理解及顺利完成实验。

有条件的同学可以利用多媒体教学课件，分析以往的实验数据、观看实验过程等。

完成实验预习报告，并获得辅导教师的认可，是进行正式实验操作的先决条件。

6、实验操作步骤简介

6.1 试件原始参数的测量

实验采用圆柱体铣平试件，试件形状及尺寸见图 4.3，用游标卡尺在粘贴应变片中部的两侧，多次测量试件的直径 D 和厚度 H ，计算试件的截面面积 S_0 。并查相关资料，预估其弹性段极限承载力。

6.2 试件装夹

与拉伸试验试件的装夹类似，首先确定试验机的状态，单向拉伸时，上部转接套处于铰接状态，拉压交变加载时，上部转接套处于固接状态。下转接套安装在转换杆上，“进油手轮”关闭、“压力调整手轮”打开。

调整试验机下夹头套的位置，操作步骤：关闭“进油手轮”，打开“调压手轮”，选择“油泵启动”，“油缸上行”，打开“进油手轮”，下夹头套上行，此时严禁将手放在上、下夹头套的任何位置，至合适位置后，关闭“进油手轮”。将上下夹头套开口的位置对齐，将试件沿上下夹头套的开口部位安装到上下夹头套内。调整下夹头套至拉伸位置使得试件加载凸台(或螺母)与夹头套的间隙在 2-3mm 时，关闭“进油手轮”，此时试件可以在夹头套内灵活转动。关闭“调压手轮”，试件装夹完毕。

6.3 连接测试线路

按要求联接测试线路，一般第一通道测拉、压力，连接到试验机的拉、压力传感器接口上。其余通道选择测应变，应变的测试采用双片串联的方式，首先用短路线将两个纵向和两个横向应变片分别串连起来，包括补偿应变片，然后，采用快速插头连接的方式，将被测应变片依次联接到测试通道中，联接时注意应变片的位置与测试通道的对应关系，补偿方式可以采用共用补偿片（1/4 桥），也可以采用自带补偿片（半桥）的方式。采用不同的补偿方式在选择通道参数时需对应不同桥路测量方式，1/4 桥为方式 1，半桥为方式 2。1/4 桥的接线方式如图 4.6 所示。

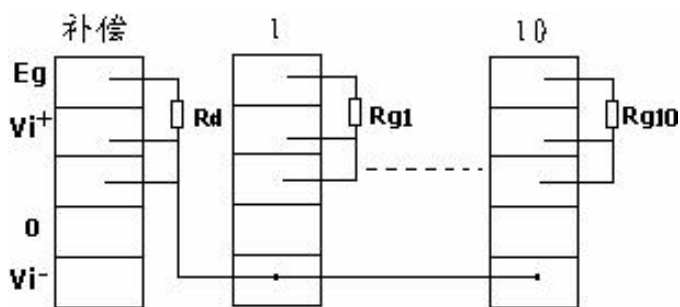


图 4.6 1/4 桥接线方式

6.4 设置数据采集环境

6.4.1 进入测试环境

首先检测仪器。检测到仪器后，系统将自动给出上一次实验的测试环境。或通过文件-引入项目，引入所需要的采集环境。

6.4.2 设置测试参数

测试参数是联系被测物理量与实测电信号的纽带，设置正确合理的测试参数是得到正确数据的前提。测试参数由系统参数、通道参数及窗口参数三部分组成。其中，系统参数包括测试方式、采样频率、报警参数、实时压缩时间及工程单位等；通道参数反映被测工程量与实测电信号之间的转换关系，由测量内容、转换因子及满度值等组成；窗口是指为了在实验中显示及实验完成后分析数据而设置的曲线窗口，曲线分为实时曲线及 X-Y 函数曲线两种。

第一项、系统参数

采样频率：“20-100Hz”，“拉压测试”，需要特别注意的是，测材料弹性模量和泊松比试验是一个非破坏性试验，我们需要通过设置报警通道来保护试件。试验时，当实测数据达到报警设定值时，油缸就会按照指定的要求反向运行或停止运行，报警通道一般设置为测力通道，报警值由试验预估最大荷载确定，例如，当控制最大纵向应变为 $800 \mu \varepsilon$ 时，所加的拉、压力应小于 100KN，此时，设置报警参数上限为 100KN，下限-100KN 时，就可以保证最大应变不超过 $800 \mu \varepsilon$ ，以保证试件的安全。

第二项、通道参数

1CH 测量试件所受的拉、压力，同拉、压试验设置相同的修正系数。另外，选出两个通道测量应变，对于设置为应力应变的通道需将其修正系数设置为“1”。点击“应力应变”进入应力应变测试参数设置，由于采用共用补偿片，需要输入桥路类型-选择“方式一”，当选择“方式一”时需要输入的参数有：应变计电阻、导线电阻、灵敏度系数、工程单位，并选择相应的满度值。应变通道的参数设置如图 4.7 所示。

通道号	桥路类型	应变计电阻	导线电阻(总)	灵敏度系数	泊松比	弹性模量	修正系数	工程单位	满度值
CH003	方式1	240	.2	2.13	0	0	1	$\mu \varepsilon$	10572.18
CH004	方式1	240	.2	2.13	0	0	1	$\mu \varepsilon$	10572

图 4.7 应变通道参数设置

第三项、窗口参数

可以开设三个数据窗口，中间窗口，荷载、应变实时曲线，右窗口，纵坐标-荷载，横坐标-纵向应变和横向应变，左窗口，纵坐标-横向应变，横坐标-纵向应变。并设定好窗口的其它参数如坐标等。

6.4.3 数据预采集

6.4.3.1 采集设备满度值对应检查

检查采集设备各通道显示的满度值是否与通道参数的设定值相一致，如不一致，需进行初始化硬件操作，单击菜单栏中的“控制”，选择“初始化硬件”，就可以实现采集设备满度值与通道参数设置满度值相一致。

6.4.3.2 数据平衡、清零

单击菜单栏中的“控制”，选择“平衡”，对各通道的初始值进行硬件平衡，可使所采集到的数据接近于零，然后，单击菜单栏中的“控制”，选择“清除零点”，“清除零点”为软件置零，可将平衡后的残余零点清除。

6.4.3.3 启动采样

单击菜单栏中的“控制”，选择“启动采样”，选择数据存储的目录，便进入相应的采集环境，采集到相应的零点数据，此时启动油泵，选择“压缩上行”或“拉伸下行”，打开“进油手轮”，使下夹头套上行或下行，此时所采集到的数据便会发生相应的变化，将下夹头套调整到拉伸位置。此时从实时曲线窗口内便可以读到相应的力和位移的零点数据，证明采集环境和设备均能正常工作。

单击菜单栏中的“控制”，选择“停止采样”，停止采集数据，并分析所采集的数据，确认所设置的各参数是否正确。

这样就完成了数据采集环境的设置。

6.5 加载测试

在确信采集环境和设备运行良好以后，便可以开始正式的加载测试了。首先设置试验机所处的状态，关闭“进油手轮”，关闭“调压手轮”，选择“拉压自控”、“油泵启动”、“拉伸下行”，前面已经设置好了采集环境，只需要“控制”、“平衡”、“清除零点”、“启动采样”，测试到零点数据。打开“进油手轮”进行拉伸加载，实验过程中通过进油手轮的旋转来控制加载速度。从中间窗口内可以读到试件所受的力以及试件的纵向应变和横向应变，至合适拉伸值时打开“压力控制手轮”，选择“压缩上行”，至力归零后，关闭“压力控制手轮”，通过“进油手轮”控制加载速度，进行压缩加载，至合适压缩值时打开“压力控制手轮”选择“拉伸下行”，至力归零后，关闭“压力控制手轮”，进行拉伸加载，通过旋转“进油手轮”控制加载速度。加载至合适值后，再卸载，进行压缩加载。这样循环测试到 3-4 组正确的数据后，在试件处于非受力的状态下就可以关闭“进油手轮”，停止采样。“油泵停止”，“拉压停止”，“自控停止”。这样就完成了加载测试的过程。

当然，也可以通过通道报警功能，控制拉压自动换向加载，由于在自动换向时，系统处于高压状态，试件有突然卸载现象。

7、数据分析

7.1 验证数据

首先回放一下试验加载的全过程，然后把数据调进来，显示全部数据，预览全部数据，观察数据的变化规律，验证数据的正确性。

7.2 读取数据

弹性模量和泊松比电测试验采用分级读数的方式验证，共分 5 级，依据试验过程中的最大荷载，确定级差，为消除起始点误差的影响，一般将级差荷载作为零点荷载。通过数据移动及局部放大功能，显示所需要的一段数据，采用光标拖动与方向键微移光标相结合的方式，选取合适的荷载值，同时读取该荷载下的纵向应变和横向应变，填入试验表格，然后依次读取下一级的荷载及其对应的应变值，填入试验表格。

需要注意的是：由于采用拉、压双向加载测试，分析数据时需要分析两组数据，拉伸段，压缩段。对于用油压传感器测力的系统，测力通道需根据拉压段输入不同的系数。

7.3 分析数据

通过实验前的测量及实验后的数据读取就得到了我们所需要的数据，代入相应的公式或计算表格即可得到弹性模量 E 和泊松比 μ 。需要注意的是，由于采用拉、压双向加载测试，分析数据时需要分析两组数据，拉伸段、压缩段，并注意正反向数据的比对。

7.4 完成实验报告

通过观察试验现象、分析试验数据就可以进行试验报告的填写了，完成实验报告的各项内容。并总结试验过程中遇到的问题及解决方法。

8、实验注意事项

- 1、在紧急情况下，没有明确的方案时，按急停按钮；
- 2、上夹头套应处于活动铰状态，但不应旋出过长，夹头套与上横梁间隙应在 3-10mm 之间；
- 3、在装夹试件确定油缸位置时，严禁在油缸运行时手持试件在夹头套中间判断油缸的位置；
- 4、装夹试件时要调整好试件下部螺母与下夹头套的间隙，间隙在 3mm 左右较为合适；
- 5、实验初始阶段加载要缓慢；
- 6、进行数据采集的第一步为初始化硬件，初始化完成后应确认采集设备的量程指示与通道参数的设定值一致；且平衡后各通道均无过载现象；
- 7、试件装夹及拆卸过程中应注意对应变片、接线板及测试线的保护。

§5 梁弯曲正应力电测实验

1、概述

梁是工程中常用的受弯构件。梁受弯时，产生弯曲变形，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，在工程检验中，也经常通过测量梁的主应力大小来判断构件是否安全，也可采用通过测量梁截面不同高度的应力来寻找梁的中性层。

2、实验目的

- 1、用应变电测法测定矩形截面简支梁纯弯曲时，横截面上的应力分布规律。
- 2、验证纯弯梁的弯曲正应力公式。
- 3、观察纯弯梁在双向交变加载下的应力变化特点。

3、实验原理

梁纯弯曲时，根据平面假设和纵向纤维之间无挤压的假设，得到纯弯曲正应力计算公式为：

$$\sigma = \frac{My}{I_z}$$

式中： M —弯矩 I_z —横截面对中性层的惯性矩 y —所求应力点的纵坐标（中性轴为坐标零点）。

由上式可知梁在纯弯曲时，沿横截面高度各点处的正应力按线性规律变化，根据纵向纤维之间无挤压的假设，纯弯梁中的单元体处于单纯受拉或受压状态，由单向应力状态的胡克定律 $\sigma = \varepsilon * E$ 可知，只要测得不同梁高处的 ε ，就可计算出该点的应力 σ ，然后与相应点的理论值进行比较，以验证弯曲正应力公式。

4、实验方案

4.1 实验设备、测量工具及试件：

YDD-1 型多功能材料力学试验机（图 1.8）、150mm 游标卡尺、四点弯曲梁试件（图 5.1）。

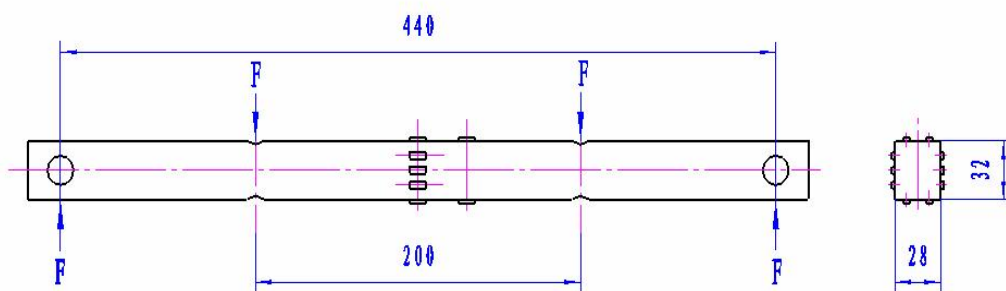


图 5.1 四点弯曲梁试件

YDD-1 型多功能材料力学试验机由试验机主机部分和数据采集分析两部分组成，主机部分由加载机构及相应的传感器组成，数据采集部分完成数据的采集、分析等。

图 5.1 实验中用到的纯弯梁，矩形截面，在梁的两端有支撑圆孔，梁的中间段有四个对称半圆形分配梁加载槽，加载测试时，两半圆型槽中间部分为纯弯段，在纯弯段中间不同梁高部位、在离开纯弯段中间一定距离的梁顶及梁底、在加工有长槽孔部位的梁顶及梁底均粘贴电阻应变片。

4.2 装夹、加载方案

安装好的试件如图 5.2 所示。试验时，四点弯曲梁通过销轴安装在支座的长槽孔内，形成滚动铰支座。梁向下弯曲时，荷载通过分配梁等量地分配到梁上部两半圆形加载槽，梁向上弯曲时，荷载通过分配梁等量地分配到梁下部两半圆形加载槽，分配梁的两个加载支滚，一个为滚动铰支座，一个为滑动铰支座，这样就可保证梁在弯曲加载时不产生其它附加荷载。分配梁通过加载大销轴与弯曲、弯扭转接套联接，转接套通过保险小销轴与油缸活塞杆上的短转换杆联接，这样当控制油缸活塞杆下行时，梁便向下弯曲，梁上部受压，下部受拉，当控制油缸活塞杆上行时，梁便向上弯曲，梁上部受拉、下部受压。为使梁在反复弯曲过程中有一过渡阶段及安装方便，保险小销轴与油缸活塞杆上的短转换杆联接采用长槽联接的方式。

实验时上、下弯曲加载的换向可通过控制油缸上、下行按钮实现，也可以通过设置通道报警功能自动换向。通过控制进油手轮的旋转来控制加载速度。

4.3 数据测试方案

实验时，拉、压力的大小测试同拉、压实验，测力传感器直接测量油缸活塞杆的拉压力，并通过计算得到梁纯弯段的弯矩。通过在不同梁高部位粘贴电阻应变片来测量该位置的应变，从而可以得到该梁高处的应力。实验时，为减小由于梁变形不对称引起的测量误差，在梁两侧对称粘贴应变片，实验时采用将相同位置的应变片串联测量的测试方式。为便于不同梁高应变的比较，应变的测量采用共用补偿片的测量方式。

4.4 数据的分析处理

数据采集分析系统，实时记录试件所受的力及应变，并生成力、应变实时曲线及力、应变 X-Y 曲线，图 5.3 为在 YDD-1 型多功能材料力学试验机上实测的力、应变实时曲线。



图 5.2 试件的装夹

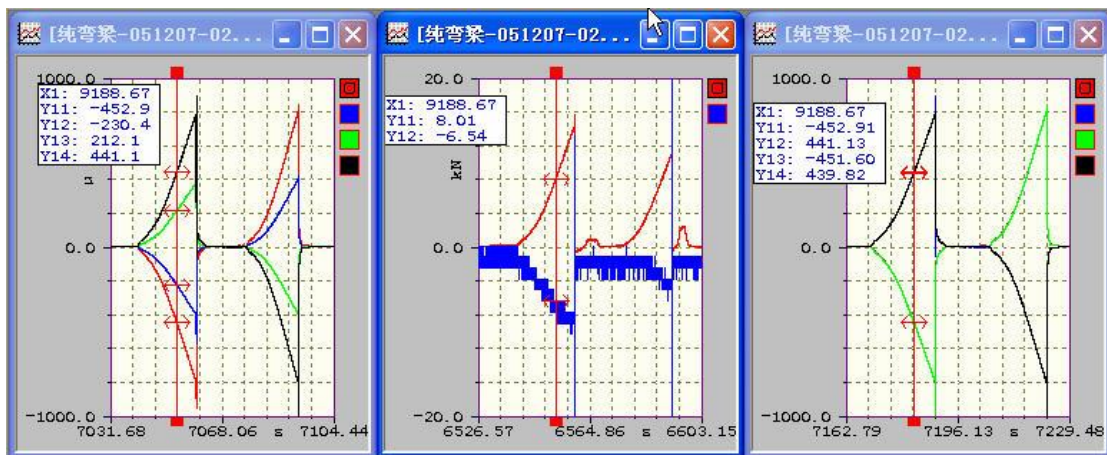


图 5.3 实测的力、应变实时曲线

此左窗口显示梁纯弯段中间部位梁高不同位置处的应变，右窗口内显示了梁纯弯段内不同部位最大应力的比较，中间窗口内显示的是试件所受的力和中性层处的应变。

5、完成实验预习报告

在了解实验原理、实验方案及实验设备操作后，就应该完成实验预习报告。实验预习报告包括：明确相关概念、预估试件的最大载荷、明确操作步骤等，在完成预习报告时，有些条件实验指导书已给出（包括后续的实验操作步骤简介）、有些条件为已知条件、有些条件则需要查找相关标准或参考资料。通过预习报告的完成，将有利于正确理解及顺利完成实验。

有条件的同学可以利用多媒体教学课件，分析以往的实验数据、观看实验过程等。

完成实验预习报告，并获得辅导教师的认可，是正式进行实验操作的先决条件。

6、实验操作步骤简介

6.1 试件原始参数的测量

梁四点弯曲正应力电测实验是典型的验证性试验，实验中不仅需要准确地测量梁所受的荷载及不同高度的应变，同时，为控制加载及试验完成后进行实验误差分析，实验前准确计算出梁不同高度应变的理论值，也是试验的重要组成部分。在实验过程中需要测量的原始参数有：梁的截面高度 h ，宽度 b ，支座跨距 l 、分配梁支座跨距 a 以及各应变片距梁中性轴的距离。在实验过程中需要已知的原始参数有：材料的弹性模量 E 、电阻应变片的灵敏度系数 K 、阻值 R 、导线电阻等。

6.2 试件装夹

6.2.1 调定系统的工作压力

打开“压力调节手轮”，关闭“进油手轮”，“油泵启动”“拉伸下行”打开进油手轮至正常工作位置，油缸活塞杆下行至最低位置，此时压力表指示的压力就是系统工作时的最大压力，通过调整“压力控制手轮”的位置调节系统工作压力至要求值，梁纯弯曲正应力电测试验时，系统的工作压力设定为2MPa。关闭“进油手轮”、“油泵停止”、“拉压停止”。

6.2.2 安装试件

第一步，将短转换杆安装到油缸活塞杆的螺孔内，并调整转换杆上圆孔的位置，使圆孔正对试验机前方，调整时，控制油缸上行或下行，将圆柱销穿在短转换杆内，控制油缸上行或下行，调整圆孔的方向。

第二步，将弯曲、弯扭转接套安装到短转换杆上，并通过保险销轴连接。销轴采用由后至前的安装的方式，以利于实验中观察保险销轴在转接套长槽孔中的位置。加载时保险销轴可在弯曲、弯扭转接套的长槽孔内上下滑动。下弯时，通过销轴传力，上弯时，短转换杆直接推动弯曲、弯扭转接套。

第三步，将分配梁组合体平放到弯曲、弯扭转接套联接开口内。

第四步，将试验梁通过销轴联接到弯曲支座上，并调整实验梁使之基本在正中位置。

第五步，手提分配梁组合体，安装

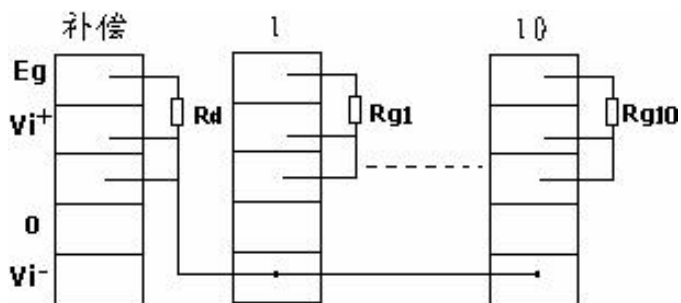


图 5.4 1/4 桥接线方式

四个分配销轴。

第六步，关闭“进油手轮”，选择“油泵起动”、“压缩上行”，打开“进油手轮”控制油缸上行至合适位置，关闭“进油手轮”，安装加载大销轴。调整油缸活塞杆位置使保险销轴处于弯扭加载套的中间部位，此时试件处于非受力状态，关闭“进油手轮”、“油泵停止”、“拉压停止”。

6.3 连接测试线路

按要求联接测试线路，一般第一通道测拉、压力，连接到试验机的拉、压力传感器接口上。其余通道选择测应变，采用共用补偿片的 1/4 桥方式，如图 5.4 所示，应变的测试采用双片串联的方式。首先用短路线将相同梁高的两片应变片串连起来，包括补偿应变片，联接采用快速插头联接的方式，然后，将被测应变片依次连接到测试通道中，联接时注意应变片的位置与测试通道的对应关系，依次接入梁顶部应变片、梁上部 $h/4$ 处的应变片，中性层处的应变片，梁下部 $h/4$ 处的应变片，梁底应变片，梁顶部离开跨中一定距离的应变片，梁底部离开跨中一定距离的应变片等。

6.4 设置数据采集环境

6.4.1 进入测试环境

首先检测仪器。检测到仪器后，系统将自动给出上一次实验的测试环境。或通过文件-引入项目，引入所需要的采集环境。

6.4.2 设置测试参数

测试参数是联系被测物理量与实测电信号的纽带，设置正确合理的测试参数是得到正确数据的前提。测试参数由系统参数、通道参数及窗口参数三部分组成。其中，系统参数包括测试方式、采样频率、报警参数、实时压缩时间及工程单位等；通道参数反映被测工程量与实测电信号之间的转换关系，由测量内容、转换因子及满度值等组成；窗口是指为了在实验中显示及实验完成后分析数据而设置的曲线窗口，曲线分为实时曲线及 X-Y 函数曲线两种。

第一项、系统参数

采样方式：采样频率一般选择“20-100Hz”，“拉压测试”，需要特别注意的是，纯弯梁实验是一个非破坏性试验，我们需要通过设置报警通道来保护试件。试验时，当实测数据达到报警设定值时，油缸就会按照指定的要求反向运行或停止运行，报警通道一般设置为测力通道，报警值由试验预估最大荷载确定，例如，当控制弯梁最大应变为 $800 \mu \epsilon$ 时，所加的拉、压力应小于 12KN，此时，设置报警参数上、下限为 $\pm 12\text{KN}$ 时，就可以保证量最大应变不超过 $800 \mu \epsilon$ ，以保证试件的安全。

第二项、通道参数

通道选择测量油缸活塞杆的拉压力，同拉压试验一样设置相应的修正系数。其余通道选择应力应变的测量方式，需要输入桥路类型-选择“方式一”，选择“方式一”时需要选择：应变计电阻、导线电阻、灵敏度系数、工程单位。

第三项、窗口参数

可以开设三个数据窗口，测量油缸活塞杆的拉压力与中性层应变的窗口、纯弯段中间不同梁高的应变窗口、纯弯段内不同位置最大应变窗口。并设定好窗口的其它参数如坐标等。

6.4.3 数据预采集，验证报警参数

6.4.3.1 数据预采集

确定采集设备各通道显示的满度值是否与通道参数的设定值相一致后，选择“控制”-“平衡”-“清零”-“启动采样”，输入相应的文件名，选择好存储目录以后便进入了相应的采集环境。此时从实时曲线窗口内便可以读到相应的零点数据，证明采集环境能正常工作。

6.4.3.2, 验证报警参数

关闭“进油手轮”，选择“拉压自控”，“拉压下行”打开“进油手轮”，控制加载速度，缓慢加载，注意观察保险销的位置，至上限报警值时油缸活塞杆自动反向向上运行，同样，当向上加载至下限报警值时，油缸活塞杆自动向下运行，证明报警功能可用。

并同时验证在该报警值下的应变值。若报警值不满足要求，可适时修改至合适值。验证完成后，观察保险销轴的位置，当保险销轴处于弯扭转接套的中间位置时，关闭进油手轮，停止采集数据。这样就完成了数据采集环境的设置。

若设备无通道报警功能时需设置限位开关的位置来控制自动反向运行，并进行验证。

6.4 加载测试

在确信设备和采集环境运行良好以后便可以开始正式的加载试验了。首先设置一下试验机所处的状态，关闭“进油手轮”，选择“拉压自控”“油泵启动”，“拉伸下行”。前面已经设置好了采集环境，这里只需要选择“控制”，“平衡”，“清除零点”，“启动采样”。采集到我们所需要的零点数据。

打开“进油手轮”，进行加载，在加载时，应注意观察保险销轴的位置，当试件不受力时，可以加快加载速度，当试件接近受力时应放慢加载速度。利用通道报警自动反向运行功能或手动换向方式控制拉、压反复加载，采集到准确的三组反复弯曲数据后，当试件不受力时就可以关闭“进油手轮”、选择“拉压停止”、“油泵停止”按钮，然后停止采集数据。

7、分析数据完成实验报告

7.1 验证数据

首先回放试验加载的全过程，把数据调进来，显示全部数据，预览全部数据。将测力窗口设置成X-Y记录方式，X轴梁顶应变、梁底应变，Y轴-测力通道。以验证应变与荷载的线性关系，及正反向弯曲时，应变的变化规律。

7.2 读取数据

验证梁弯曲正应力电测实验采用分级读数的方式分析数据，共分5级，依据试验过程中的最大荷载，确定级差，为消除起始点误差的影响，将第一级荷载（2kN）作为起始数据。将测力窗口重新恢复为普通绘图方式，通过数据移动及局部放大功能，将多个窗口显示同样一段数据，采用光标同步的方式进行同步读数，读数时，将主动光标放在测力窗口，采用光标拖动与方向键微移光标相结合的方式，选取合适的荷载值，此时应注意光标读数的小数点位数，测力通道：2位，应变通道：1位。

需要注意的是：

由于采用拉、压双向加载测试，分析数据时需要分析两组数据，拉伸弯曲段，压缩弯曲段。对于用油压传感器测力的系统，测力通道需根据拉、压段输入不同的修正系数。

7.3 分析数据

将读取的数据，依次填入到相应的数据分析表格或代入到相应的公式进行计算，将实测值与计

算值相比较，分析误差原因。需要注意的是，由于采用交变加载，分析数据时需要分析两段正反向加载数据，并分别填入到相应的表格中，注意正、反向数据的对比。

7.4 完成实验报告

通过观察试验现象、分析试验数据就可以进行试验报告的填写了，完成实验报告的各项内容。并总结试验过程中遇到的问题、解决方法及对该实验的改进建议。

在填写原始数据及实验结果时需要注意数据的读数需正确反映试验设备的分辨率，计算结果有效数字的位数应能反映实验的精度等。

8、实验注意事项

- 1、在紧急情况下，没有明确的方案时，按急停按钮；
- 2、打开实验机通过溢流阀或打开压力控制手轮设定系统的最大工作压力，以不超过3MPa为宜；实验时可先打开压力控制手轮以确保试件安全；
- 3、调整竖向加力转接套开口位置时，需在油缸上行或下行的状态下进行，此时应特别注意手的位置；
- 4、在设置通道报警参数时应采用渐增的方式，可先设置一较小的报警值，证明计算及报警系统可用后再设置相应的实验报警值。
- 5、在验证通道报警参数时需确保试件的安全，需有明确的报警失效的控制方案，如：在开口很小的情况下控制进油手轮，使得可随时关闭进油手轮；手放在“拉压停止”或“油泵停止”按钮上，可随时停止加载等。
- 6、加载测试完成后，严禁出现数据采集停止而油泵仍在工作的情形，因为此时通道的报警功能已经失效，实验最大荷载处于非受控状态，试件极易损坏。正确的操作是：“采集到准确的三组反复弯曲数据后，当试件不受力时就可以关闭“进油手轮”、选择“拉压停止”、“油泵停止”按钮，然后停止采集数据”。