

材 料 力 学 实 验

（试用版）



烟台大学工程力学实验教学中心

2024 年 8 月

《材料力学》开放式实验教学方案（试行）

《材料力学》实验是材料力学课程教学的重要实践性环节之一。开放式实验教学有利于培养学生的独立思考能力及创新精神，为保证实验教学有序进行，现制定该试行方案，要求所有上课同学认真了解并切实执行该方案内容，同时欢迎提出相应的修改建议。

1. 开放方式及时间安排

采用集中授课与开放授课相结合的方式。集中时间按课表安排进行，大部分为周六及周日，开放式实验教学的时间为开课周次其余时间的下午、晚上以及所有集中教学完成后的两个周的下午及晚上。采用学生助教辅助教学模式，助教人员的培训时间提前在集中教学的前两周进行。

2. 开放式实验的流程

2.1 查阅相关资料，完成预习报告

实验课前，需单独预习实验指导书，了解实验目的、实验原理、实验步骤、试验机的使用方法、数据处理方法、实验注意事项等，可到工程力学实验教学中心网站进行相关资料查找，网站汇总了相关设计手册、国家标准、学术论文等文献资料，以及实验过程视频讲解、实验过程动画演示、数据采集分析环境、以往数据、虚拟仿真资源等与实验教学有关的内容，学生实验前利用该平台了解实验过程、分析以往实验数据，完成实验预习报告。

预习报告及实验报告均分级进行，A-E5 个级别，主要以理论层次进行划分，可多次修改，实验成绩取最后成绩，因此对于没有把握的部分一定不要盲目回答或照抄。

2.2 提交预习报告，回答相关问题

在上实验课时，分组提交实验预习报告，由实验指导教师或助教人员检查预习报告情况，并按如下方式处理：

- 1) 实验预习报告通过审核，进行分组实验。
- 2) 实验预习报告首次检查不合格，若在 30 分钟内修改后经检查通过的可继续完成实验。
- 3) 其余情况在其它开放时间内预约实验。

2.3 分组实验

实验分组进行，每组 3-4 人，首次实验可自行结合，但以后的实验尽可能保持小组成员的一致性，实验报告中须如实填写小组成员组成。实验中根据自身的情况，调整实验各部分需要的时间，并尽可能在规定时间内完成实验，对于不能在规定时间内完成实验的同学，需在其它开放时间内预约完成实验。实验小组每个成员要分工明确、密切配合、仔细观测实验现象，严格按规程操作，如实记录实验数据。

2.4 实验后续工作

实验完成后，需将实验现场恢复到实验前的状态。如有物品损坏或丢失应及时上报，并作相应记录。同时填写设备使用记录。

2.5 完成实验报告

依据相应的要求，准确填写实验原始数据，计算实验结果，回答实验报告中的相关问题，完成实验报告。

2.6 实验报告整改

设计了实验报告批改系统，可将批改内容分批、分色打印到实验预习、实验报告的批改框中，对做错的题目需及时整改，并申请二次或多次批改，直到合格为止。

3. 实验评分原则

3.1 实验课成绩记入考试成绩，满分 10 分，计分方式为所有实验的最低分。每个实验满分 10 分，每个实验由预习报告、实验报告及实验完成情况三部分组成，成绩取预习报告、实验报告的最低分，实验完成情况决定实验成绩是否有效。

3.2 实验预习报告中出现下列情况之一者，该项成绩按 0 分计。

- 1) 照抄或提供样本供他人照抄的;
- 2) 上实验课前未完成实验预习报告;
- 3) 由于实验预习报告不合格导致不能在规定时间内完成实验。

3.3 实验过程中须尽量保持安静并严格按照实验指导书中要求的操作规程进行, 有异议时须先征求辅导人员的意见, 并以辅导人员的意见为准。出现下列情况之一者, 该项成绩按 0 分计。

- 1) 由于未按规定操作, 导致人员受伤或设备损坏的。
- 2) 由于未按规定操作, 导致试件已经破坏未采集到准确实验数据, 需重新进行实验的。
- 3) 不遵守课堂纪律、从事其它与实验无关操作等导致干扰他人实验的。
- 4) 不听从实验助教人员指挥或与实验助教人员发生争吵的。
- 5) 其它不利于实验教学正常进行的事件。

3.4 须按有关要求认真填写实验报告, 报告中不允许出现低级或原则错误。出现下列情况之一者, 该项成绩按 0 分计。

- 1) 照抄或提供样本供他人照抄的。
- 2) 捏造虚假实验数据、原始数据出现重大偏差未能及时发现或找不到准确原因的、实验结果(结论)有严重错的、未按要求对实验结果进行修约处理的。
- 3) 字迹潦草, 报告不整洁的。
- 4) 其它低级或原则性错误。

4. 开放式实验预约方式

开放式实验预约采用网上预约与书面预约相结合的方式, 需提交规定格式的书面预约报告, 审核通过后持实验预习报告进行实验。

5. 实验课须遵守的其它规定

5.1 迟到学生不得进行实验, 需约定其它时间进行实验。

5.2 由于操作失误导致需追加试件进行补做的破坏性实验, 当堂不得补做, 改为开放时时间补做。

6. 开放实验教学学生助教规定

6.1 实验助教人员是开放实验教学的重要组成部分, 上课时与实验指导教师具有同等的权利。

6.2 开放式实验教学需要大量的辅导人员, 各班课代表为助教的必须参加人员, 需全程参加本班的集中式的实验教学, 有特殊情况的, 委托其它班级助教顶替, 且需提前申请。同时非常欢迎有能力、责任心强的同学加入到实验教学的助教中, 想参加的同学可通过课代表联系。原则上要求助教的学习成绩在班级需要排在前 10, 达不到此要求的需要单独提交申请。

6.3 助教同学的培训时间为两周, 在集中实验之前进行, 想参加的同学需提前填写所有实验预习报告, 培训后择优录用, 根据具体情况安排指导班级, 中间无正当理由不得退出。

6.4 助教人员需认真负责, 全程参与实验教学的各个环节, 由于助教人员不认真导致的教学质量问题, 该助教的实验成绩为 0, 助教补助为 0, 助教补助暂定为每节实验课 10 元。

7. 实验地点

实验地点为工程力学实验教学中心材料力学实验室, 具体房间号为实验大楼 BB108 房间。

8. 未尽事项按学校有关规定执行。

9. 相关资源信息

9.1 工程力学实验教学中心网址: <http://lxsy.ytu.edu.cn>

9.2 实验教师: 吴江龙, 手机: 13356920078, E-mail: 13356920078@126.com

烟台大学工程力学实验教学中心

2024 年 8 月

材料力学实验教学目的等相关事宜说明

实验历来就是工科专业重要的教学环节，是理论教学不可或缺的重要补充方式，为方便学生理解实验教学的作用、了解我们实验教学的方式，确保通过实验教学能有所收获，决定把我对实验教学作用的一点认识结合学生的疑问做个总结，希望能有助于同学们对实验教学重要性的理解、有助于学生顺利完成实验、有助于科学思维模式的培养。

1、普通大学工科专业本科培养的是专业人才还是材料

要讨论这个问题，我们首先要有一个对专业人才的定义：我们可以简单定义为在某个行业中能及时发现问题、能正确分析问题、能组织资源解决问题的人。我们国家在计划经济年代，大学教学是精英教育，教学模式主要学习的是苏联模式，大学生的培养以专业培养为主，实践环节很多，因此合格的大学毕业生还是具有一定的解决实际问题能力的，可称之为专业人才，尤其是研究生则更是如此。随着改革开放，高校毕业生分配制度的取消，高校招生不断扩招，教学模式主要学习的是美国模式，采用轻专业、重基础的培养模式，大学本科教学的主要目的是基本专业素质的培养，很明显这种模式有利于拓宽学生的就业范围及未来的上升空间，大学毕业生不再是专业标识明确的专业人才，而是有可能成为多方面专业人才的材料，也即大学教育培养的是可能性，培养的是可能成为人才、可能成为多专业人才的材料。

2、专业人才的核心支撑是什么

那么如何才能做到在工作中能及时发现问题、能正确分析问题、能组织资源解决问题呢？很显然，需要对所从事的工作有本质的认识，也即能把所面对的事情简化成一个模型，明确模型的组成要素、明确各要素变化时对结果的影响方向及量级、明确各要素之间的相互关系。这么模型越简单越方便用于指导工程实践，就能提高事情做成的必然性，减少偶然性，优秀工程人才一个重要的指标就是能在看似重复的工作中把工作做的越来越好、越来越快，这就是不断提升、不断进步的过程，我觉得这就是工匠精神的具体表现，也就是我们所说的大学生要终生学习、不断进步的培养目标。其实这个过程也就是模型不断简化、优化趋近真实的过程，而能够建立合适模型并能不断优化的根本原因就是对本质的理解，这个本质，就是理论。也即一个所谓专业人才核心的支撑还是理论，因此大学的教育的核心还是培养学生如何快速准确掌握理论与正确应用理论。

3、理论是什么

我认为理论可简单地认为是解释，对事物表象与内在原因的解释，“横看成岭侧成峰，远近高低各不同”，既是解释，就有视角问题、就有不同层次，就一定有发展过程，这是客观的，任何一个科学的理论体系的建设都有一个螺旋上升的过程，而且都在路上。

为方便理解这个发展过程，我们按人类和自然规律相互作用关系归结为如下几个层次：感知理论-了解理论（要素及影响趋势）-验证理论（数值关系验证）-掌握理论（边界分析）-应用理论-发展理论。而且理论也是不断发展的，今天是研究的理论，过一阵就是基本概念了，同样，同一个概念对不同的人而言、对同一个人不同时期而言，其和理论的关系也是不一样的，这就是一个动态的发展过程，其实这也是我们不断学习、不断研究的原动力。

4、实验教学在理论学习中的作用是什么

其实这个问题很简单，只要看一下学习理论的几个层次，你就会发现要真的搞懂，那个环节也离不开实践、离不开实验验证的，只有实践验证过了的，才能明确关系、明确边界，才能正确指导实践。实验是模型化的实践，是实践的特例，是格物致知过程的再现，学习理论的过程若能附以实验教学，也就搭起了理论联系实践的桥梁。

其实实验的过程，不仅仅是简单验证的过程，实验的过程也是一个检验自身理论水平

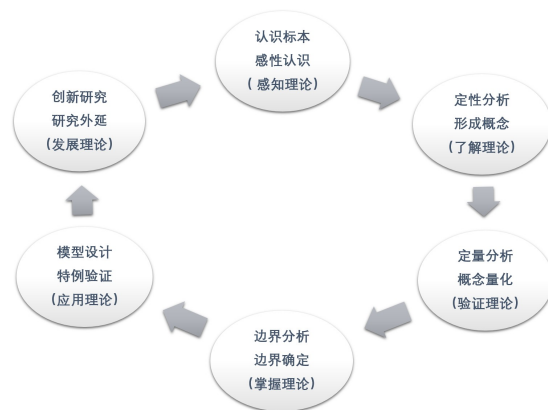
的过程，对同一实验的同认识水平、能做多复杂的实验，真实地反映你的理论层次，而理论水平的层次决定了你能解决工程问题的性质。譬如：当你对楼房结构有感性认识（感知理论）时，你搞房产销售就没有问题；你对楼房结构概念（了解理论、验证理论）清晰了，你指导施工就没有问题；你能进行量化计算（掌握理论、应用理论）了，你搞设计就没有问题；你能发现理论的局限性，并能完善理论（发展理论）时，你搞研究也就没有问题了。

通过实验，我们能检验自己的理论水平，对比工作要求，我们能明确差距，这就有了定位和方向，据此，我们若能清楚知道自己所从事的工作需要具备的理论层次、自己目前精熟的理论层次，知道自己应该学习那些理论、学到何种层次，并知道如何去学习，这时你就有自主学习能力了，我觉得大学生最关键的能力就是这个自主学习能力，这个把知识转化成能力的能力，这是解决工程问题的基础。

5、我们如何进行实验教学层次设置的

既然理论是多层次的，不同的学生在指定时间内能到的理论水平也是有上限的，因此实验教学要根据学生的情况服务于多层次理论教学的，对应不同层次的理论，我们设计不同类型的实验项目，基本对应关系如下：

认识标本实验-感性认识-感知理论
 定性分析实验-形成概念-了解理论
 定量分析实验-概念量化-验证理论
 边界分析实验-边界确定-掌握理论
 模型设计实验-特例验证-应用理论
 创新研究实验-研究外延-发展理论



多层次的目的是使每个学生都能找到合适的起点和终点，在各自理论层面上做到精熟学习，能正确应用理论，并保留上升通道。

6、虚实结合实验是咋回事

一个概念的建立、一个关系的验证、一个边界的确定都是要进行系列实验的，譬如我们进行材料强度测试实验，就有一个试件截面尺寸对强度影响的问题，但实验教学时我们不可能进行大量多组实验验证，但不进行多组实验又不方便总结实验规律，为这个问题，我们采用虚实结合的方式。虚拟实验进行大面积仿真，确定边界、确定关键点，真实实验通过验证关键点证明仿真结果的正确性，所谓虚定面、实证点，虚实结合、虚实互补。

7、因何设置实验预习报告及报告分层设置

实验的过程是一个验证的过程，若实验前我们没有一个需要验证的关系，没有自己想法，那实验就成了说教，因此希望每个同学都是带着假定和疑问来的，这就是我们设置实验预习报告的初衷。实验预习报告须独立完成，报告每道题目的完成时间约为一个小时，这样每个实验的预习时间大约需要 3-5 天的时间，一定要留有足够的时间。

实验预习报告、实验报告同样是多层次的，分别有不同的层级标识，分为 A-E 级，A-感性认识及前置基本概念、B-基本概念及规范标准对应解释、C-概念量化、D-边界分析及设备操作关键点、E-研究类实验。实验成绩按层级打分，A-40 分，每级增加 20 分，D 级 100 分，要取得该级的比分需保证该级及该级以下所有级别的题目全部通过，E 级

为加分级，只要有一道 E 级的题目通过，即可在原有的基础上升一级。实验预习报告、实验报告成绩均分及级评价，同一个实验取两个报告的低值，最终成绩取所有实验的最低值，以体现精熟学习的要求。所有报告均允许多次修改，成绩按最后一次修改的情况进行评定，以鼓励不断进取的精神。

8、材料力学的主要任务是什么

材料力学一般定义为专业基础课，也就意味着力学发展到今天，一般不会再用它解决专业问题的，尤其是复杂结构、复杂应力状态的问题，我觉得非力学专业本科生学习材料学的主要目的是基本专业概念的建立，明确概念的定义、来源及适用范围（局限性），为后续相关专业课的学习打下坚实的基础。

9、材料力学学习需要建立哪些基本概念

非力学类专业学生材料力学主要的研究对象是构件的应力分布、强度、变形、稳定性等问题，这和材料力学的发展历程有关，材料力学最开始的目的就是为了进行构件设计的强度、刚度、稳定性校核，要进行校核就必然需要给出一系列技术指标，而这些技术指标的定义就行材料力学最为基本的概念，如强度类的指标中就有各种“抗*强度”，强度就是极限的意思，针对材料力学性质的不同，会定义不同的强度，如抗拉强度、抗拉屈服强度等，一个概念的准确定义及适用范围就是我们需要了解的基本概念。由于材料力学的发展是建立在实验基础上的，而且经历了较长的发展阶段，因此很多教材中出现定义不清晰、适用范围扩大化、倾向性分析不清晰等。觉得在学习时一定要注意如下问题：

1) 单元体为本：这是材料力学进行应力分布分析的基础，是通往有限元分析的桥梁，是材料力学最合理的内核。有了单元体就可以依据力平衡、力矩平衡的准则分析构件不同部位的应力状态。任何宏观的变化，都是单元体群体变化的累积，有限元分析法就是把构件分解成有限的单元进行分析，这个有限单元的大小、形状都需要根据构件形状、荷载特点进行合理划分，这样才能兼顾计算精度与速度。

2) 应力与应变：目前材料力学对应力的定义指的是直接应力，之所以这样假定，主要是因为应力是平衡外荷载用的，此时应力、应变是共生的，有应力一定有直接对应的应变。由于材料的泊松效应，这样的定义会带来一个有应变却没有应力的问题，此时应力和应变就不是共生的了，这是材料力学单元体应力应变分析方式导致的，因此在通过应变分析应力时，一定要搞清这个应变是咋来的。

3) 应力分布：之所以要建立单元体的基本概念，就是为了说明内力是如何平衡外力的，在外荷载作用下材料会发生变形，这个变形会导致内力（应力），而这个内力在弹性段和材料的变形成线性关系的，而变形需要按一定几何关系进行协调的，如是不同类型构件针对不同类型荷载就产生了不同的应力分布。

4) 变形：除强度校核外，变形控制也是构件设计的重要控制指标，将单元体的变形累积起来的变形就是构件的变形，需要注意的是这个变形由正应力引起的变形和切应力引起的变形两部分组成。

3) 材料破坏的种类及原因：材料的破坏分为断裂破坏与屈服破坏两种，而能引起材料断裂破坏的只有拉应变和切应力。因此，当分析材料断裂破坏的原因时，一定要分析垂直断裂面的拉应变（可能是由于拉应力引起的，也可以不是）、平行于断裂面的切应力那个达到极限了。

4) 强度名义值与真值：由于定义的局限性与材料的复杂性，材料强度检测的很多实验定义的强度并不代表该应力的极值，材料会由于自身特性的原因可能在进行不同类型实验时，导致其破坏的真实原因可能是一样的，如 LY12 铝合金由于其抗剪能力不足，拉、压实验均为剪切破坏，但强度仍称抗拉拉、抗压强度；同样 HT200 铸铁扭转时导致试件

断裂的是拉应力，但强度仍称为抗扭强度，也即抗强度所代表的是名义强度，那个名义应力不一定就是导致材料破坏的直接应力。因此，为避免误导，在检测强度指标时一律称抗强度。这就要求在进行破坏原因分析与不同抗强度比较时，首先要应用单元体分析法确定破坏类型、确定名义强度和破坏应力、应变的关系，然后根据等效破坏的准则，分析材料不同抗强度之间的关系，明确抗强度的局限性。做到能根据材料的力学特性寻找最合理的强度检测指标，并由此抗强度推算出材料其它抗强度，这对于正确选用与校核材料是非常重要的。

5) 强度理论的核心：强度理论的目的方便进行强度校核，核心是相当应力，即在求得某点主应力状态下，如何根据材料特性求得相当于材料单轴受力状态下的应力，以判断改点应力是否达到极限状态，这里有两个关键问题，一个是相当应力、一个是根据材料性质确定用哪个理论。

相当应力的依据是根据材料的破坏形态可以判定破坏原因（因素），只要材料的破坏形态是一样的，那么引起材料破坏的因素就应是等大的。引入相当应力的目的就是通过这个等大因素建立复杂应力状态下主应力和单轴拉伸状态下主应力的关系，以方便设计人员应用材料拉伸的实验结果进行强度校核。过程如下：通过单元体分析的方法分别找到单轴拉伸应力状态、复杂应力状态下主应力和破坏因素的关系，依据破坏因素因素等量准则，可得到复杂应力状态相当于单轴拉伸应力状态的相当应力。这样，复杂应力状态对于该破坏因素的破坏能力也就清楚了。

如3)所言，材料的破坏有两个形态，一个是断裂，一个是屈服，目前公认的能导致材料发生断裂的破坏的原因有两个，一个是拉应变一个是切应力；导致材料屈服的原因则是形状改变能密度和切应力。材料性质不同，拉应变与切应力的极限及比值就不同，在相同的应力状态下就会出现不同的破坏形式，我们在计算相当应力时就要根据材料得这个特点去确定依据哪个强度理论计算相当应力进行校核，而不是简答地找一个自己认为最安全的。

10、强度理论的适用性

目前材料力学所讲述的强度理论有四种，和材料的破坏状态有着明确的对应关系的，第一（最大正应力）、第二（最大线应变）强度理论适合脆性材料最大线应变断裂的场合，两者的本质是一样的，第一可理解成是第二的特例。

第三强度理论最大切应力理论适合材料抗剪能力不足的情况，给出了一个简单计算方法而已，其实完全可以根据单元体应力状态求出最大切应力，然后进行切应力校核就是，因此，严格意义上讲第三强度理论不应称之为理论，而应该是一个简化算法。但问题是我们的所给出的强度指标都是带抗字的，而抗强度多为名义值，因此早期为方便设计人员校核，还是定义了这么一个算法，通过这个算法就可以把切应力校核转化为主应力校核，这个转换的桥梁就是单元体。一言以蔽之，第三强度理论不是理论，是切应力校核转化成主应力校核的简化算法而已。

第四强度理论形状改变能密度理论是目前对材料塑性变形最为适合的，根据等效相当的原则，结合不同荷载下试件的应力分布，结合单元体应分析，我们可以得到对类似 Q235 的塑性材料而言，抗压屈服强度一定等于抗拉屈服强度，抗扭屈服强度也和抗拉屈服强度有着明确的数值关系。

通过对强度理论适用性的分析，我们可以清晰理解相当的含义及目的，这样，当我们对材料有充分的了解后，检测材料力学特性时，我们就可针对检测任务需求选择最为直接的强度测试方案，其它的强度指标可由该强度指标根据单元体分析采用相当准则求得。我们也可根据材料性质设计不同截面变化的试件以求得我们需要的极限应力。这样，我们就会对单元体分析原理、对强度理论有了正确的理解。

11、对实验原理的理解

目前大多数材料力学实验指导书中所讲述的实验原理往往是倾向于对实验加载方案的解释，更多的是对设备工作原理的陈述，我们的理解是实验原理应该是实验模型（试件）、加载方案的设计如何行成一个我们期望的应力分布状态，也即这个应力分布状态是如何平衡外力的、在这个应力状态下试件的变形是如何产生的、根据实验材料的特性在这种应力状态下试件会发生哪种形式的破坏。我觉得只有这样，才能方便学生强化单元体的概念，才能通过单元体把不同的实验有机地联系起来，所谓不同的实验只是想法提供一个比较理想的应力分布状态而已，为了达到这个目的，我们就需要设计不同的实验模型与实验方案。

12、实验模型多层设置

对构件进行应力如何平衡外力、变形来源、破坏形式进行分析的思维模式对以后的学习非常有利，每门专业课程的核心基本概念都可简化成特定的模型进行特定的加载方案，这件事该清楚了，基本概念也就建立起来了。

如前所述，为了能使多层次的学生都能得到正反馈，都能快乐学习，我们就需要设置不同层次的实验项目，而这个不同层次实验项目的支撑就是实验模型，实验模型是一个广义的概念，我们把所有实验对象都归结为实验模型，包括一个简单的试件，为方便模型层次展示，我们把模型分为三种，理想模型（也称简化模型，验证假定、算法，建立基本专业概念），也可以是变参量的理论模型（多参量系列变化模型，展示变量对结果的影响，强化基本概念，明确趋势），也可以是工程模型（相似模型-分析设计特点，寻找优化方向、判断损伤、破坏原因）。

有了这个设计理念，不仅可方便学生多层次理解理论，而且学生也可根据自己理解设计实验模型、实验教具，这对基本概念的理解、对边界分析有极大帮助，也为我们后续的周培源力学大赛、大学生结构大赛等打下深厚的基础，注意积累就容易形成了一个开放式创新平台。

实验教具、实验模型制作部分同样可计入开放性实验学时部分，每个项目 16-32 个学时。

13、实验分类

根据专业认知特点，我们把实验分为如下几个模块：强度测试、强度理论适用性分析、应力应变测试原理、应力分布测试、应变式传感器、变形测试、稳定性测试、理论局限性分析等几个部分。简单分类：强度、应力分布、变形与稳定。

14、理论局限性的问题是咋回事

材料力学的很多概念都是建立在实验的基础上的，受当时材料种类、认识水平的限制，局限性肯定是有的，譬如前面提到的各种抗强度为名义值的问题，只是建立了一个设计计算标准，那个名义应力不一定就是导致材料破坏的直接应力。类似的问题还有很多，通过实验分析，你能感受到很多原来以为想当然的理论都是具有局限性的，有的甚至会制约你后续的深入学习，因此非常希望那些学有余力的同学能进行几个所谓的研究性实验，研究理论的局限性，并设计合适的实验模型、教具验证你的假定，这样，你也就设计了一个新的实验，即加深你对概念的理解，也方便后来人的学习，此时你会发现你的自信心将会获得极大提高。

15、助教是咋回事

学习的过程其实是一个交流的过程，在交流中明确差距与方向的过程，学习从来就不是一蹴而就的事，最容易实现的方式就是小步快跑，不断得到正反馈，这就需要交流双方水平差距不是很大，而且交流通畅，同学之间的交流恰恰就是这种情况，不服的精神、朝夕相处的交流。我始终觉得老师在课堂上能给教会的只是一部分学生，学生之间的相

互交流、相互鼓励是最终解决问题必由之路。我们把那些理解能力好、动手能力强的学生提前进行培训，在实验前查看学生的预习报告，给出意见；实验过程中，能辅导学生进行设备操作，协助与完成实验；同时还要进行报告批改工作、整理报告中的问题，组织讨论，进行多回合的批改。在这个过程中，期望达到讨论热烈、共同进步的效果。

16、选做实验是咋回事

根据我院 17 版大纲要求，学生大学期间所有开放实验课时需要达到 64 个学时，以期学生更多接触实践，提高学生解决实践能力能力的同时提升理论水平，提高理论学习的兴趣。为此，材料力学增加了一些掌握理论、应用理论的实验项目，主要目的是为了强化学生对理论的理解，每个实验 8 学时，所有实验要求与必做实验等同。目前提供的实验项目有：弯扭组合综合实验，压杆稳定综合实验，拉、压、扭综合分析强度理论适用性实验。同学们也可根据自己的需求提出要求的实验项目，我们更希望学生能根据自己对理论局限性的理解设计出新的开放性实验项目，包括虚拟仿真资源的建设。

17、做好实验的心态

综上所述，实验具有检验理论水平、提升理论水平、理论联系实践等都多重作用，不同理论层次的学生需要的锻炼方向不同，因此，要做好一个实验，一定要根据自身情况，因地制宜，方能取得好的效果。这里只能方向性地给个建议。

1) 预习先行，建立模型：实验的过程是一个比对的过程，若自己没有模型，比对也就无从谈起了，因此认真做好预习报告，建立自己的实验样本模型就是首先要做好的事。

2) 明确层次，逻辑闭环：通过预习报告的完成，基本就能确定自己当前的理论水平，此时要做到的就是一定要把这个层面的问题彻底解决，能做到融会贯通，逻辑闭环，只有这样，才算是基本掌握该层次的理论。此时，能够把不明确的高层级问题行成孤岛，你的水平就像水，活水一定是联通的。理论就是山峰，当孤立的山峰越来越少了、越来越矮了，你的理论水平也就越来越高了，路也越来越宽了。

3) 积极实践、自然提升：理论只是一种解释，任何一件事情一定还有更精确、更适合你应用的解释，我们实验的目的就是要找到这个我们能够掌握、能够应用的解释，因此一定要敢于应用自己所掌握的理论，应用其解释（简化）方方面面的事情，事事讲逻辑、逻辑讲闭环，积累久了，你就会发现自己能够办事情做的越来越好了，理论水平也就不自觉地提高了，也就可以做更大的事情了。其实这个过程的物理解释就是在低层面不断融会贯通，不断提速，速度积累到一定程度，具有足够的能量，也就会突破这个层次了。

“路漫漫其修远兮，吾将上下而求索”，人工智能时代已悄然而来，从事简单重复性工作的人越来越少，人类发明的潜能将会得到极大释放，做真实自己、做出彩自己越来越成为大众追求，真心希望同学们能通过实验培养出求真务实的学风，在求真务实的过程中准确定位自己的理论水平、不断提高自己理论层次，并注意学科之间的融会贯通，努力成为“规格严格、功夫到家”合格材料，并以此追求 具有“独立之精神、自由之思想”的专业人才。

烟台大学工程力学实验教学中心

2022 年 10 月

吴江龙

手机：13356920078

E-mail:13356920078@126.com



目 录

§1 金属材料拉伸实验	1
-------------------	---



§2 金属材料压缩实验	14
-------------------	----



§3 金属材料扭转实验	22
-------------------	----



§4 电测法测定材料的弹性模量 E 和泊松比 μ 实验	31
---	----



§5 梁弯曲正应力电测实验	40
---------------------	----



§6 弯扭组合主应力电测实验	47
----------------------	----



§7 压杆稳定实验	55
-----------------	----

§8 通过综合分析材料拉、压、扭强度指标，判定材料强度理论适用性实验63

附录 2-1：YDD-1 型多功能材料力学试验机72

附录 2-2：动静态数据采集分析系统.....83

§1 金属材料拉伸实验

1、概述

常温、静载作用下（应变速率 $\leq 10^{-3}$ ）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

感性认识：

- 1) 观察不同性质材料在拉伸实验过程中变形破坏的过程，并绘制拉伸实验的 $F-\Delta l$ 曲线。
- 2) 观察低碳钢、铸铁、铝合金等不同材料断口形式，分析导致此断口的原因。

基本概念：

- 1) 明确评定材料基本特性的指标有哪几类，这些指标哪些直接反映材料的力学特性。
- 2) 明确圆截面试样采用垂直两次取平均值计算截面面积的依据。
- 3) 明确试件标距的确定准则，明确标距对材料延伸率的影响。
- 4) 明确导致材料断裂破坏的应变种类，以及对应的应力种类。
- 5) 明确评定材料强度指标有哪些，测试这些指标需要进行哪些实验项目。
- 6) 明确抗强度定义的计算方式的局限性，明确该计算方式的工程意义及不足之处。
- 7) 明确材料延伸率测试中移位处理的目及依据。
- 8) 明确材料强度是一个范围值，明确材料强度与加工过程中材料成型厚度的关系。
- 9) 明确材料强度与试样直径的关系。
- 10) 明确强度指标的修约准则。
- 11) 明确加载速率对强度指标影响。
- 12) 明确夹持部分过渡圆弧对不同材料强度的影响。
- 13) 明确材料牌号的命名准则。

概念量化：

- 1) 测定材料的两个强度指标：流动极限 σ_s 、强度极限 σ_b 。
- 2) 测定材料的两个塑性指标：断后伸长率 δ 、断面收缩率 φ ；测定铸铁的强度极限 σ_b 。
- 3) 测量材料的弹性模量 E 、泊松比 μ 。
- 4) 比较同一试件采用不同标距时对延伸率的差异。

科学研究：

- 1) 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 。
- 2) 根据低碳钢拉伸实验时冷作硬化实验多次加载、卸载曲线的关系，分析并测试在此过程中材料弹性模量的变化。

测试技术：

- 1) 了解实验设备的构造和工作原理，掌握拉压加载操作流程，尤其是初始平衡位置的选择。
- 2) 了解数据采集分析系统的测试原理，掌握其正确的连线、测试流程，掌握数据采集、分析基本操作。
- 3) 了解引伸计的工作原理，掌握其正确的安装、测试流程。
- 4) 了解拉伸冷作硬化实验的卸载加载要求，掌握试验机操作流程。

5) 掌握试件断裂荷载的读取方式，能准确读取试件的断裂荷载。

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等分线。

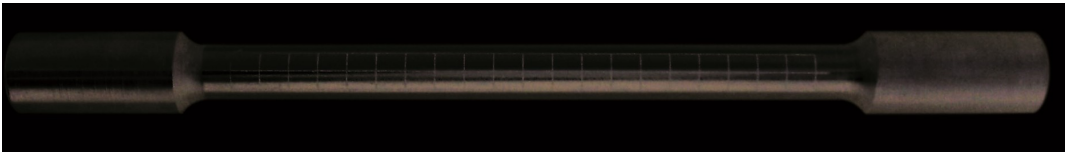


图 1.1 常用拉伸试件形状

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。

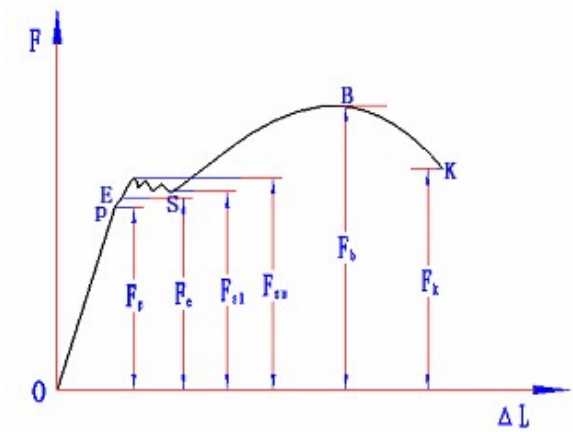


图 1.2 低碳钢拉伸 $F - \Delta L$ 曲线

F_p -比例伸长荷载； F_e -弹性伸长荷载； F_{su} -上屈服荷载；
 F_{sl} -下屈服荷载； F_b -极限荷载； F_k -断裂荷载

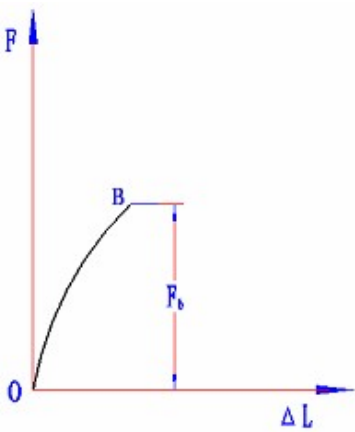


图 1.3 铸铁拉伸 $F - \Delta L$ 曲线

F_b -极限荷载

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 OP 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，但这种计算方法有利于工程设计，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 - 延伸率， A_0 - 原始截面面积， A_k - 断后最小截面面积。

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

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的均值，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，前者称为短试件，

后者为长试件。对于直径为 10mm 的试件而言，短、长试件的标距 L_0 应分别等于 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

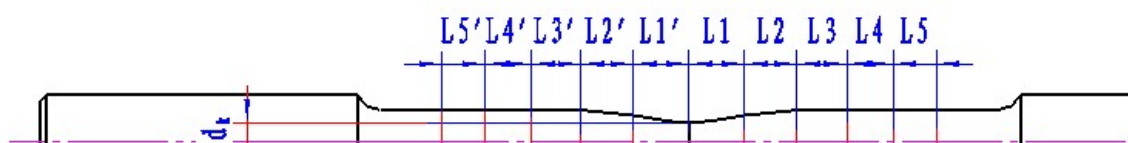


图 1.6 金属材料塑性断裂变形示意图

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

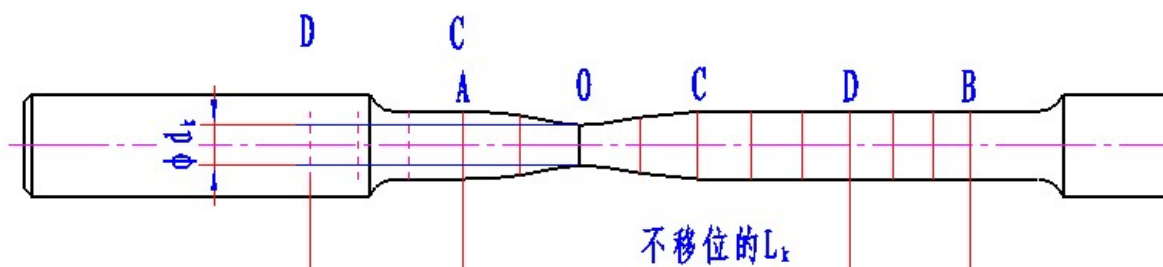


图 1.7 移位处理示意图

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。

通过断裂应力估算值 σ_k 的计算，并将其与名义拉伸强度 σ_b 相比较，可以明显地看出 $\sigma_k > \sigma_b$ ，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。

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 。

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 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 , 需进行必要的修约)，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。



图 1.9 拉伸实验试件的装夹

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

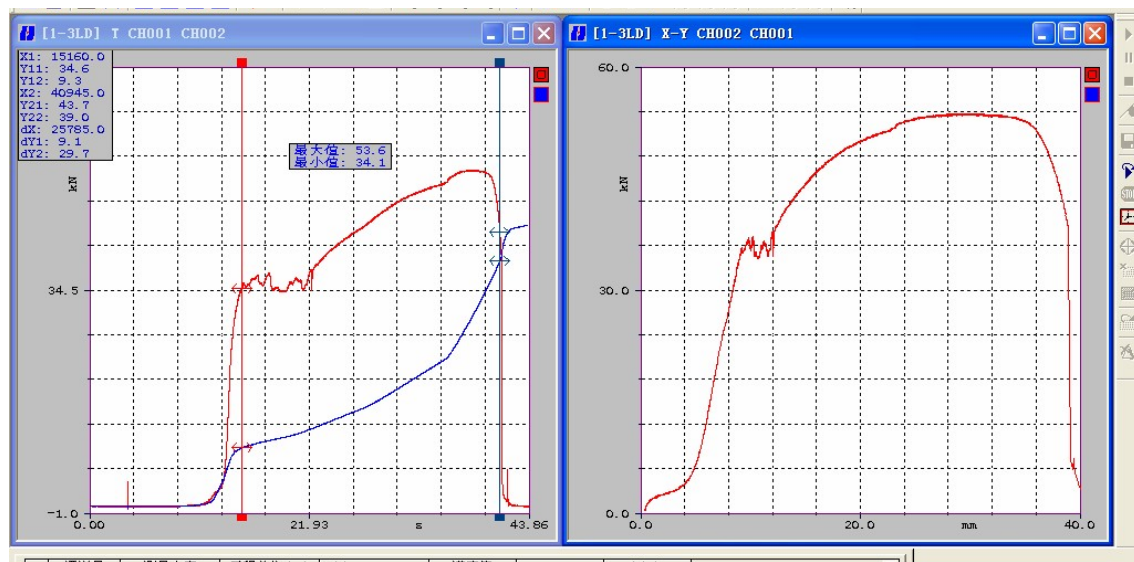


图 1.10 实测低碳钢拉伸实验曲线

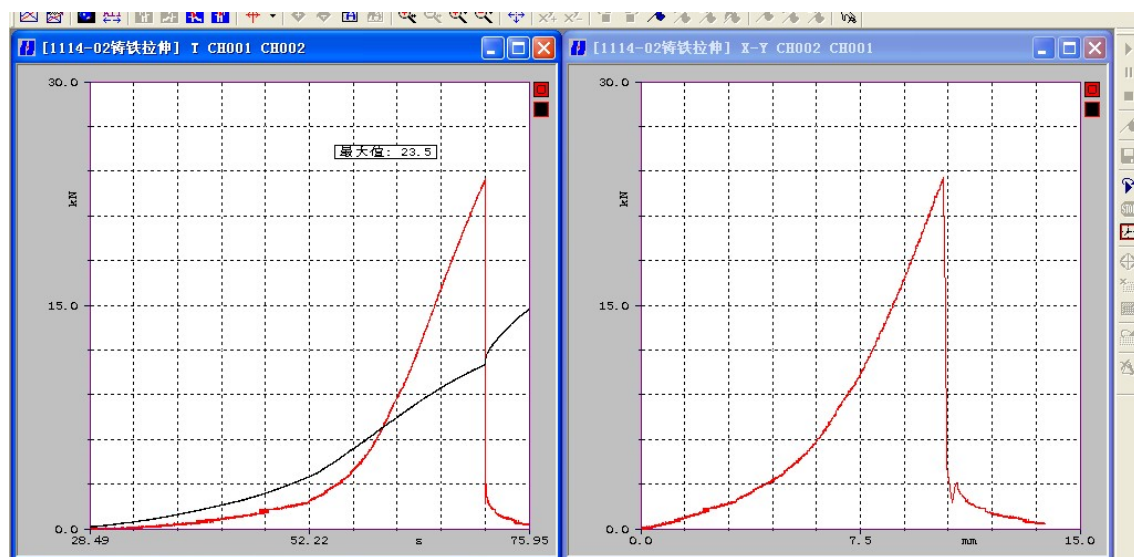


图 1.11 实测铸铁拉伸实验曲线

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（ $5.65\sqrt{S_0}$ ）并修约到最接近的 5mm 的倍数的长度，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。

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，1CH 选择测力，3CH 道选择测位移。连线时应注意不同类型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

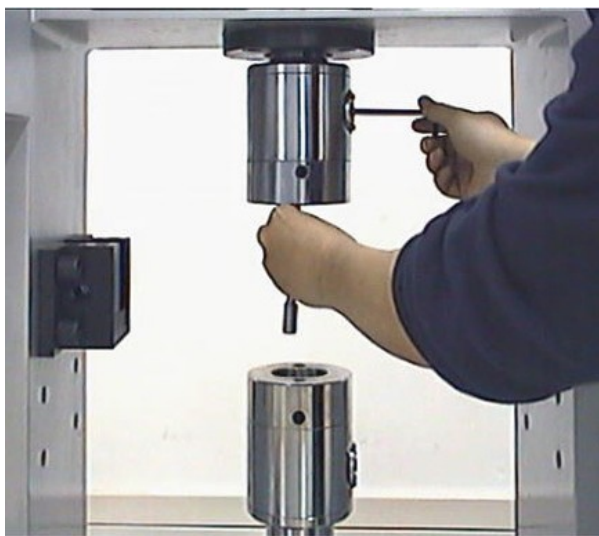


图 1.12 试件装夹示意

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 1.13 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。

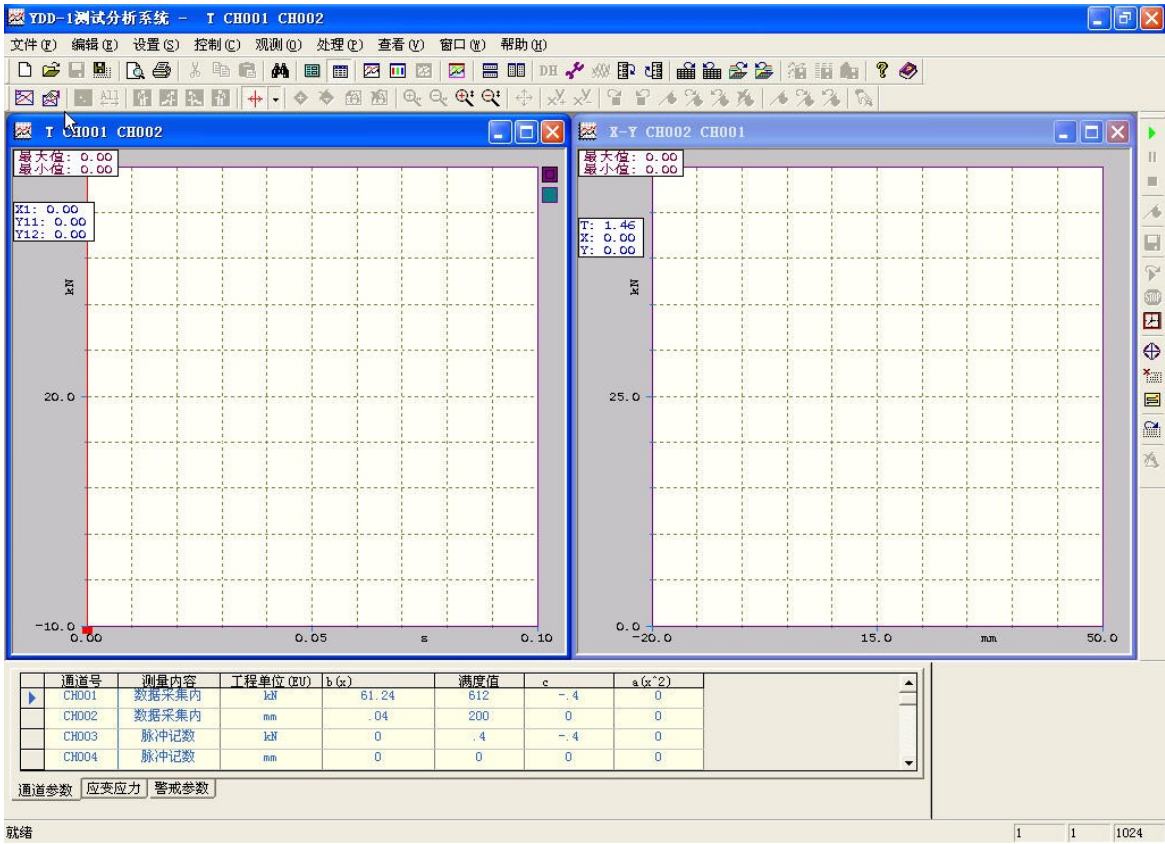


图 1.13 数据采集分析环境

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，3 通道测量试件的变形（位移）。

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。

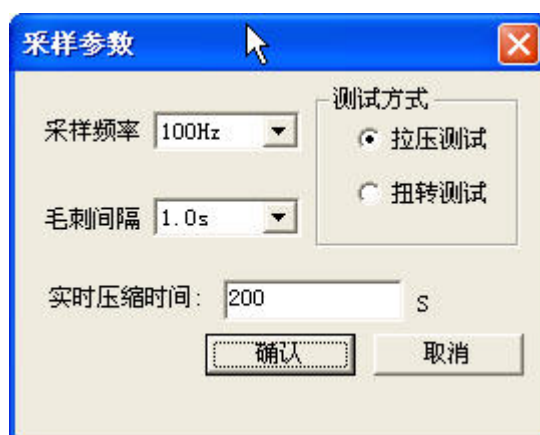
因此, 在输入相关系数时, 一定要确保数据的正确性。

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“5.4.3 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。

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，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。

需要注意的是由于数据的采集及分析均在计算机上进行，数据的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。而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。

§2 金属材料压缩实验

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

感性认识：

- 1) 观察不同性质材料在压缩实验过程中变形破坏的过程，并绘制拉伸实验的 $F-\Delta l$ 曲线。
- 2) 观察并比较在压缩实验中低碳钢（塑性破坏）和铸铁、铝合金（脆性破坏）的变形和破坏现象观察不同材料断口形式，分析导致此断口的原因。

基本概念：

- 1) 明确压应力导致试件发生断裂破坏的几种形式。
- 2) 明确低碳钢在压缩过程中承载力可持续性增加的主要原因。
- 3) 明确低碳钢压缩过程中真实应力的测量方式。

概念量化：

- 1) 测定材料的两个强度指标：流动极限 σ_s 、强度极限 σ_b 。
- 3) 定点测量低碳钢压缩试验过程中真实应力，分析应力变化规律。

科学研究：

- 1) 了解名义应力应变曲线与真实应力应变曲线的区别，测得低碳钢压缩过程中较为真实的线 $\sigma-\varepsilon$ 曲线。
- 2) 根据低碳钢压缩实验时多次加载、卸载曲线的关系，分析并测试在此过程中材料弹性模量的变化。

测试技术：

- 1) 了解实验设备的构造和工作原理，掌握拉压加载操作流程，尤其是初始平衡位置的选择。
- 2) 了解数据采集分析系统的测试原理，掌握其正确的连线、测试流程。
- 3) 了解压缩实验反复卸载、加载控制要求，掌握试验机操作流程。

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 所示。

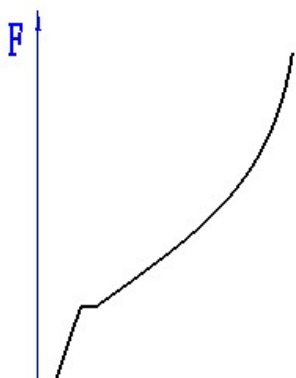


图 2.2 低碳钢压缩 $F - \Delta L$ 曲线

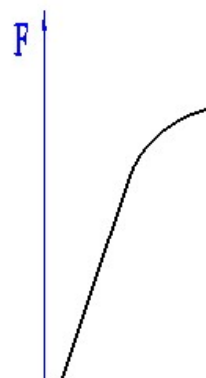


图 2.3 铸铁压缩 $F - \Delta L$ 曲线

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。



图 2.6 压缩实验试件的装夹

- 1.拉、压上夹头 2.压缩上承压板（带防护罩）3.压缩试件
- 4.压缩下承压板 5.压缩下承压板 6.拉、压下夹头

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。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。

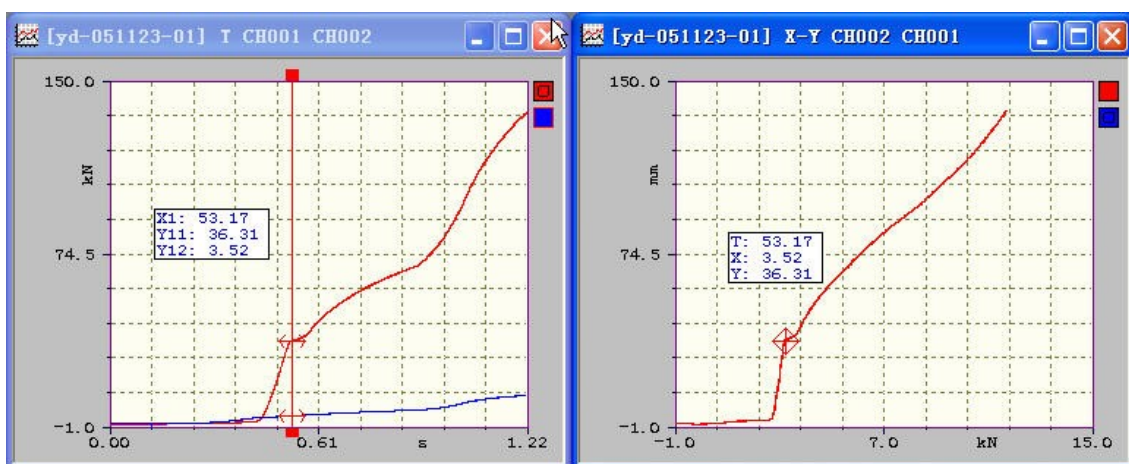


图 2.7 实测低碳钢压缩实验曲线

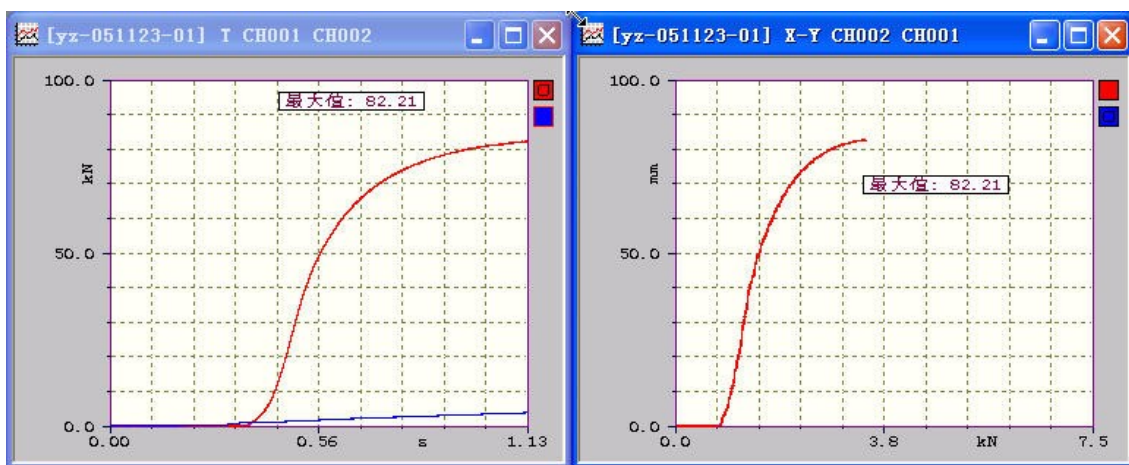


图 2.8 实测铸铁压缩实验曲线

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所需要的数据。

得到相关数据后，依据实验原理，就可以得到所需要的力学指标。

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，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“5.4.3 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。

低碳钢屈服强度 $\sigma_s = F_s / S_0$

铸铁的强度极限 $\sigma_b = F_b / S_0$

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。

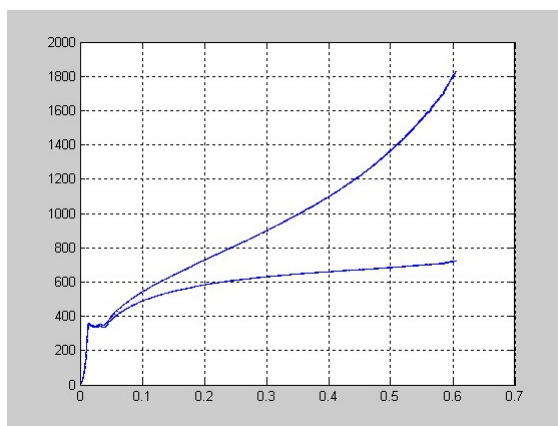


图 2.9 实测低碳钢压缩实验 $F - \Delta L$ 曲线与 $\sigma - \varepsilon$ 曲线比较

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，过于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 金属材料扭转实验

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

感性认识：

- 1) 观察不同性质材料在扭转实验过程中变形、破坏的过程，并绘制拉伸实验的 $T - \phi$ 曲线。
- 2) 观察并比较在扭转实验中低碳钢（塑性破坏）和铸铁、铝合金（脆性破坏）的变形和破坏现象观察不同材料断口形式，分析导致此断口的原因。

基本概念：

- 1) 明确切应力导致试件发生断裂破坏的几种形式。
- 2) 明确低碳钢在扭转过程中试件长度是否变化。
- 3) 明确低碳钢在扭转过程中导致名义应力与真实应力不等的原因。

概念量化：

- 1) 测定材料的两个强度指标：流动极限、强度极限。
- 3) 测量低碳钢扭转试验过程中真实屈服应力、极限应力。

科学研究：

- 1) 了解名义应力应变曲线与真实应力应变曲线的区别，测得低碳钢扭转过程中较为真实的线曲线。
- 2) 按螺旋线长度计算低碳钢扭转过程中的延伸率，并与拉伸实验的延伸率进行比较。

测试技术：

- 1) 了解实验设备的构造和工作原理，掌握拉压加载操作流程，尤其是脉冲计数测量转角的原理及参数设置。
- 2) 了解数据采集分析系统的测试原理，掌握其正确的连线、测试流程。
- 3) 了解正方向反复扭转实验控制要求，掌握试验机操作流程。

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。

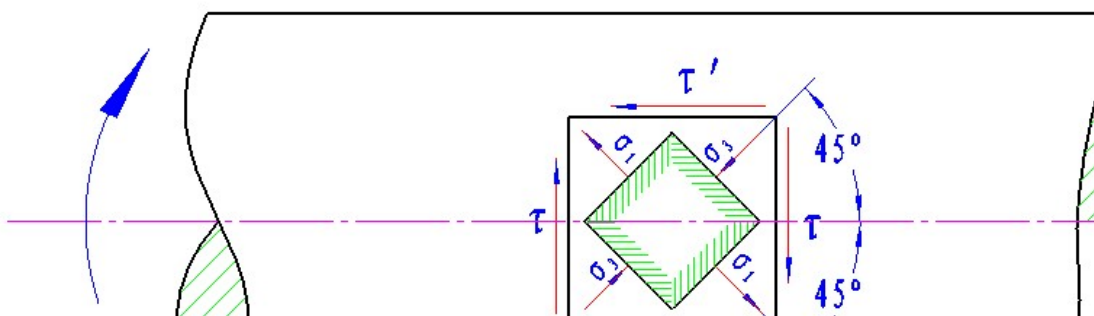


图 3.1 纯剪应力状态

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

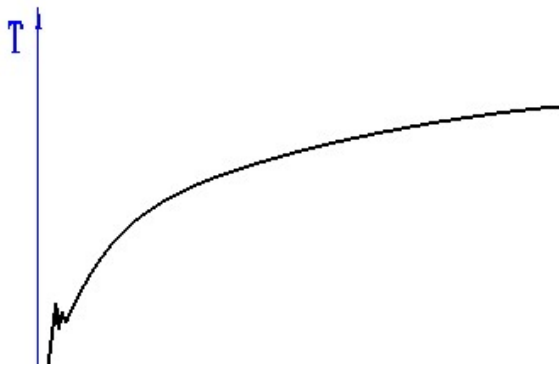


图 3.2 低碳钢 Q235 扭转 $T-\phi$ 曲线



图 3.3 铸铁 HT200 扭转 $T-\phi$ 曲线

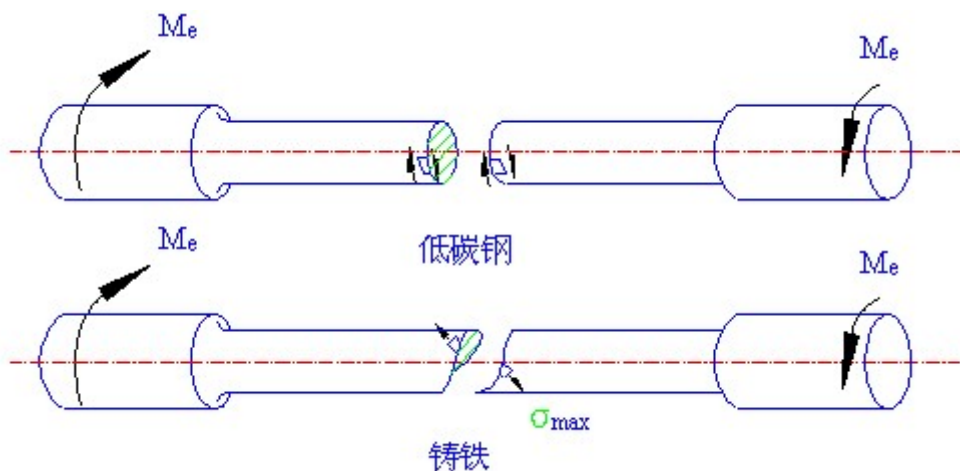


图 3.4 低碳钢和铸铁扭转破坏断口形式

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

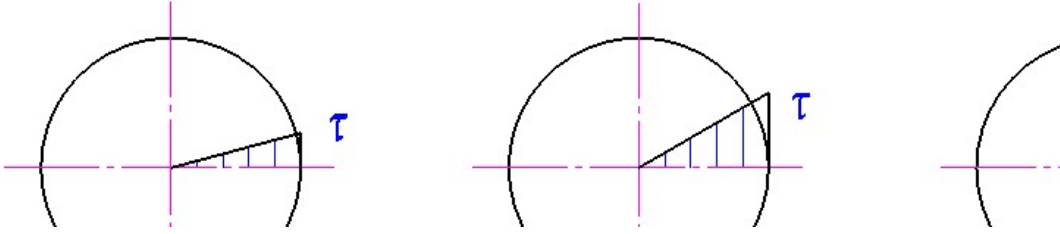


图 3.5 低碳钢扭转试件弹性阶段应力分布变化

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：

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

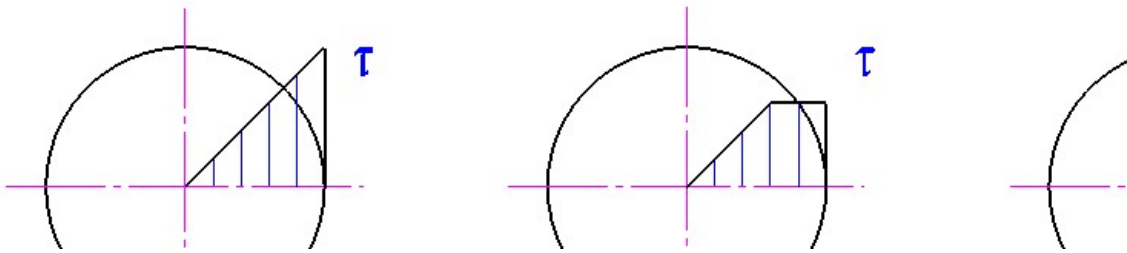


图 3.6 低碳钢扭转试件屈服阶段应力分布变化

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° 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。



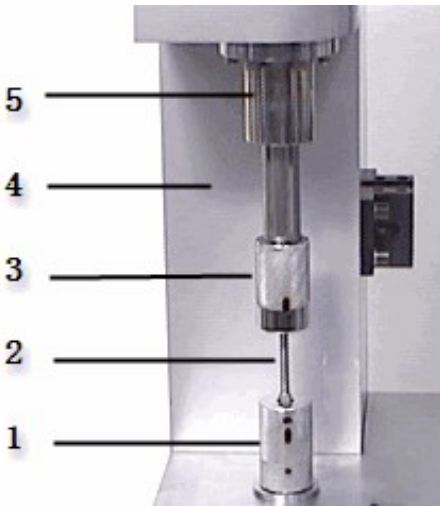
图 3.7 常用扭转试件

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



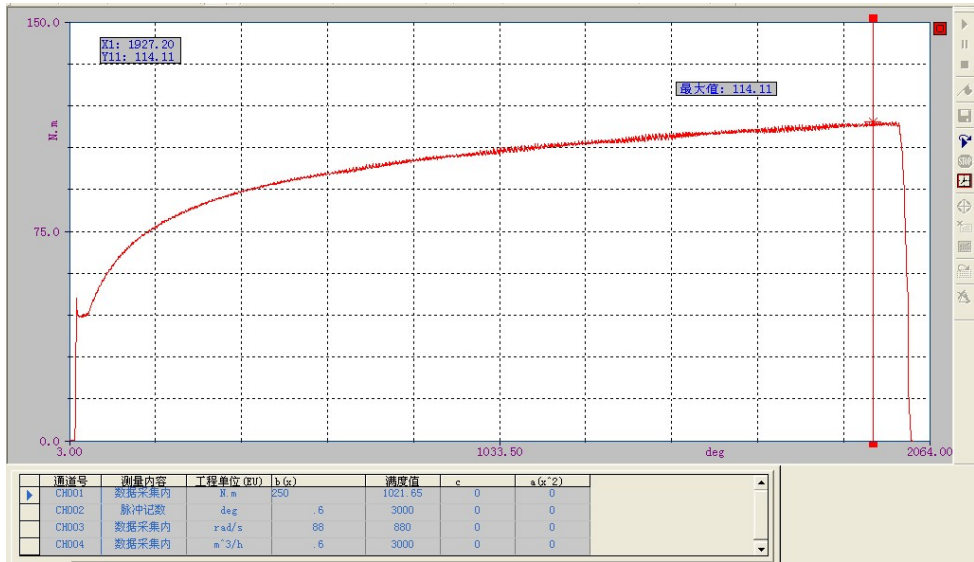
1、3-扭转上下夹头， 2-扭转试件，
4-左立柱，5-扭矩传感器

图 3.8 扭转实验试件的装夹

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。



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。

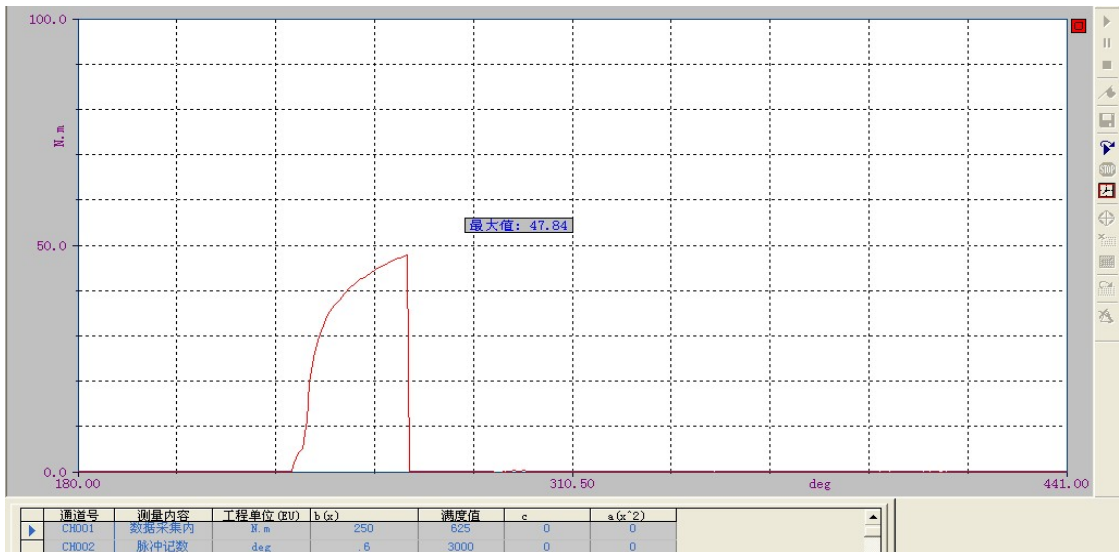


图 3.10 实测铸铁扭转 $T-\phi$ 曲线

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 3 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 3CH 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 $5000*b$, 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。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。

需要在实验过程中调节转速时，可以旋转“扭转调速”转轮：顺时针旋转电机转速加快，反之降低，直至停止。实验时可根据不同试验阶段进行相应调整。

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，但无法反映性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，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灵敏度系数不同，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，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 $R_1/R_2 = R_3/R_4$ ，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：

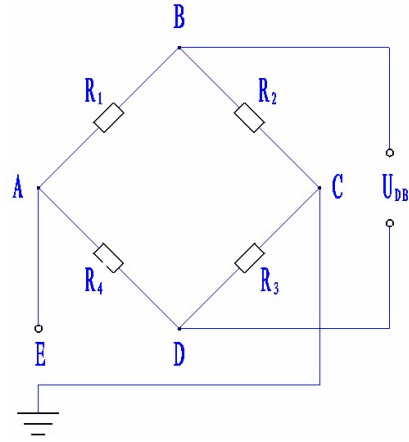


图 4.1 惠斯登电桥原理图

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

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，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， $R_{纵前}$ 为粘贴在测试试件前侧的纵向应变片， $R_{补前}$ 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消除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。

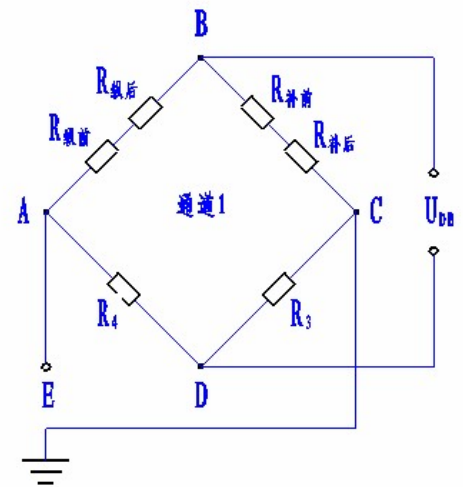


图 4.2 应变片串联半桥补偿原理图

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。

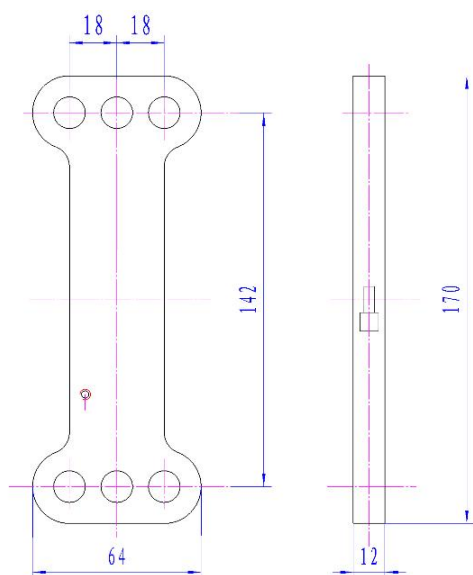


图 4.4 安装好的弹模试件图



4.3 弹性模量泊松比实验试件尺寸

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。

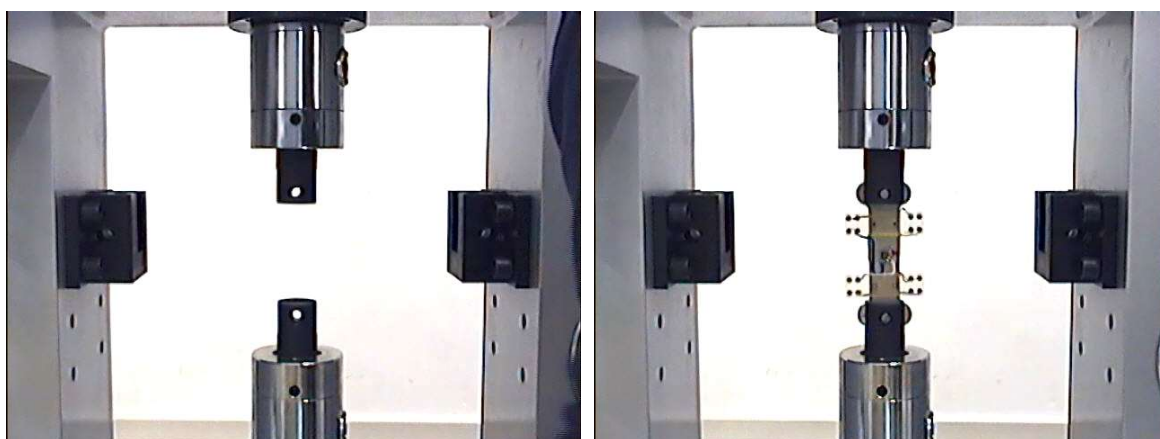


图 4.4 弹模试件的装夹过程

（左图：将连接件安装在夹头上 右图：将弹模试件安装在连接件上）

实验时拉、压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

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 型多功能材料力学试验机上测 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-

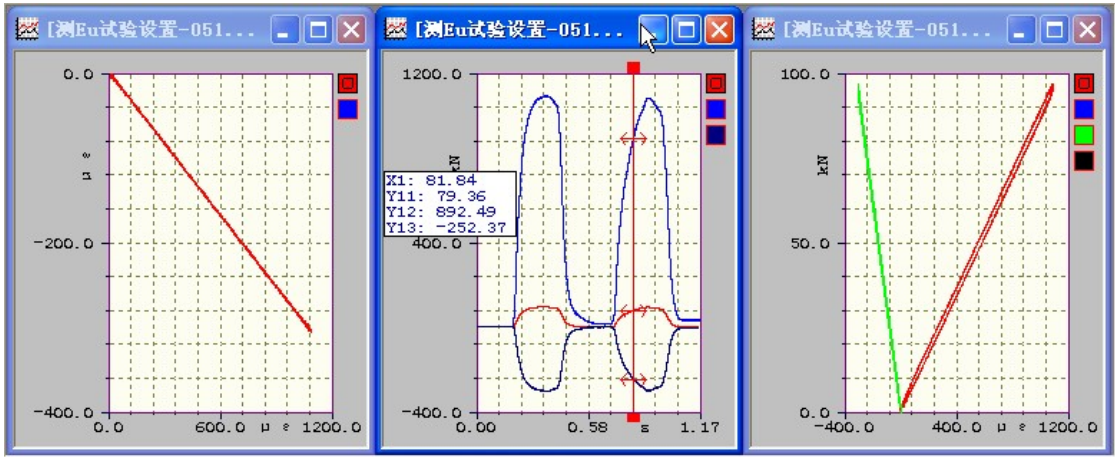


图 4.5 45#钢弹性模量 E 和泊松比 μ 的实测曲线

纵向应变。

为了验证所采集的数据为试件在弹性段的数据，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。

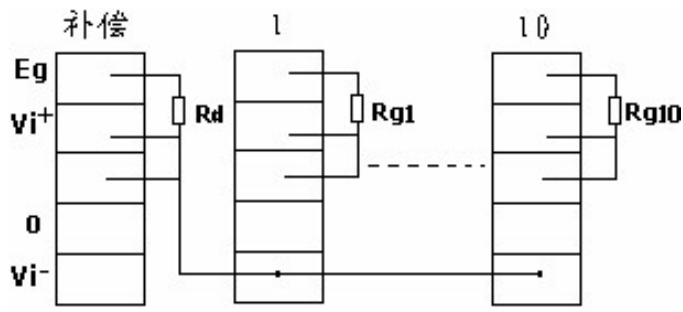


图 4.6 1/4 桥接线方式

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，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	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，请按急停按钮；

- 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。
- 8、在 09 年前的试验机上进行纯弯梁等电测类实验时，实验操作人员可能未按照规定操作，没有及时关闭进油手轮而先停止数据采集时，试验机油缸活塞杆可能仍在向上或向下动作，此时容易造成试件特别是纯弯梁试件的不可逆损坏。因此进行如下升级：

在数据采集分析系统中增加了同步停止辅助功能，当实验人员首先停止数据采集时，数据采集分析系统自动发送一个电压控制信号，使运行中的试验机油缸活塞杆停止动作 5 秒钟并报警，提示操作人员关闭进油手轮，避免试件损坏。

注意：操作者仍然应该在关闭试验机后，停止数据采集。

§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）。

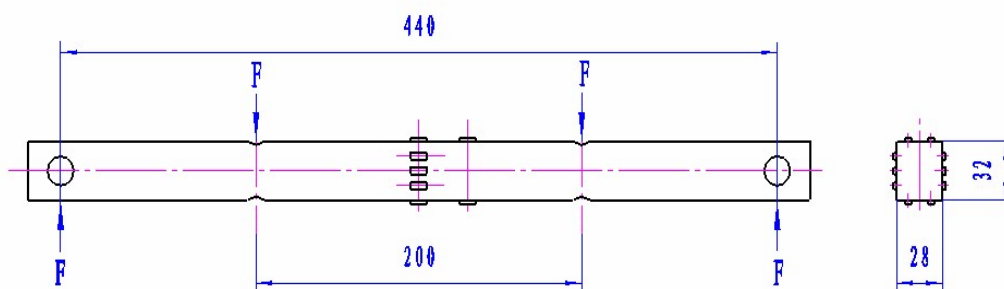


图 5.1 四点弯曲梁试件

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。

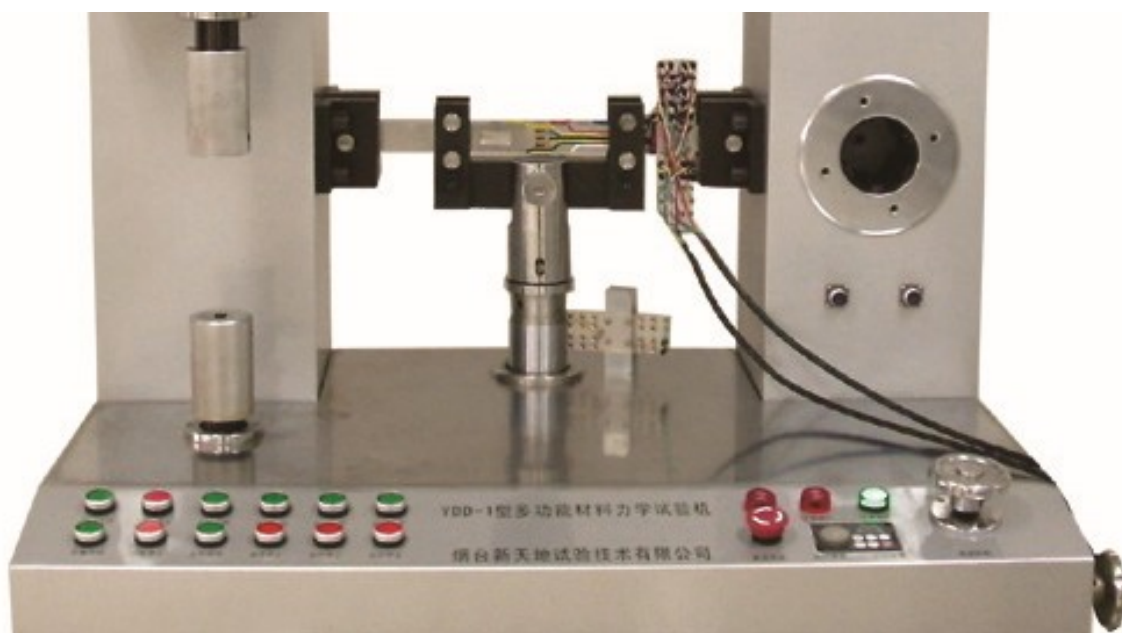


图 5.2 试件的装夹

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。

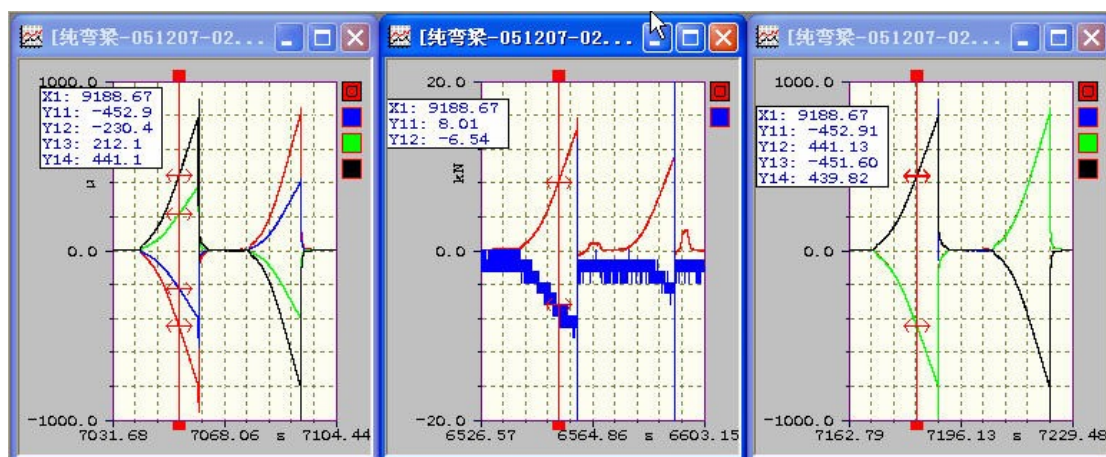


图 5.3 实测的力、应变实时曲线

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”。

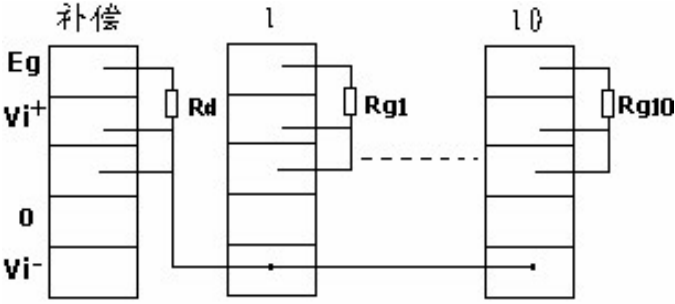


图 5.4 1/4 桥接线方式

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联起来，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，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 $800 \mu \varepsilon$ 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 $800 \mu \varepsilon$ ，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

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、打开试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、调整竖向加力杆开口位置时，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。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”。

§6 弯扭组合主应力电测实验

1、概述

在工程实际中，构件在荷载作用下往往发生两种或两种以上的基本变形，即组合变形。经简化后，构件表面处于平面应力状态，薄壁圆筒在弯扭组合变形下的试验就是一个典型代表。

2、实验目的

- 1、用应变电测法测定二向应力状态下的主应力大小及方向，并与理论值进行比较；
- 2、掌握用应变花测量某一点主应力大小及方向的方法；
- 3、通过在不同的特征部位粘贴应变片及双向交变加载，反映不同的受力形式引起的应变及其方向的变化。

3、实验原理

通过对应力单元体的分析可知，要得到平面应力状态下单元体主应力大小及方向需要知道单元体两垂直方向的应力的方向及剪应力大小及方向。在弹性模量电测实验时，通过粘贴两垂直方向的应变片从而测得 $\varepsilon_{\text{纵}}$ 、 $\varepsilon_{\text{横}}$ ，并有， $\sigma_{\text{纵}} = \varepsilon_{\text{纵}} \times E$ ，也就是说该纵向应力可以通过该方向的应变直接得到，但不能将此推广为：“任意方向的应力与该方向的应变为简单的 $\sigma_{\alpha} = \varepsilon_{\alpha} \times E$ 关系”。譬如：在弹性模量电测实验中有 $\sigma_{\text{纵}} = \varepsilon_{\text{纵}} \times E$ 是正确的， $\sigma_{\text{横}} = \varepsilon_{\text{横}} \times E$ 则是错误的，因为，在单向拉压状态时， $\sigma_{\text{横}} = 0$ ， $\varepsilon_{\text{横}}$ 是由 $\varepsilon_{\text{纵}}$ 而不是由 $\sigma_{\text{横}}$ 引起的， $\varepsilon_{\text{横}} = \varepsilon_{\text{纵}} \times \mu$ 。由泊松比的定义可知，在双向应力状态下，与任意应力方向同向的应变包含垂直方向应变引起的分量，此时的应力不能简单由 $\sigma_{\alpha} = \varepsilon_{\alpha} \times E$ 来求得。同样，在平面应力状态下， ε_{α} 还包含剪应变 γ 引起的分量。

为简化分析，取如图 6.1 所示的单元体进行分析，依据胡克定律可得

$$\begin{aligned}\varepsilon_1^* &= \frac{1}{E}(\sigma_1 - \mu\sigma_2) \\ \varepsilon_2^* &= \frac{1}{E}(\sigma_2 - \mu\sigma_1)\end{aligned}\quad (6-1)$$

式中， σ_1 -最大主应力， σ_2 -最小主应力， ε_1^* -最大主应力（ σ_1 ）方向的线应变， ε_2^* -最小主应力（ σ_2 ）方向的线应变， E -弹性模量， μ -泊松比。

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1^* + \mu\varepsilon_2^*) \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2^* + \mu\varepsilon_1^*)\end{aligned}\quad (6-2)$$

为方便不同方向应变的表述，设定测点坐标系，定义测点处的应变分量分别为 ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} ，定义与 X 轴夹角为 α 方向的应变为 ε_{α} ，并规定 α 角以逆时针转动为正。则有：

$$\varepsilon_{\alpha} = \varepsilon_x \cos^2 \alpha + \varepsilon_y \sin^2 \alpha + \gamma_{xy} \sin \alpha \cos \alpha \quad (6-3a)$$

经三角函数关系变换后，得到

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \cos 2\alpha + \frac{1}{2}\gamma_{xy} \sin 2\alpha \quad (6-3b)$$

可以看出, 所得的 ε_α 表达式与平面应力状态下 σ_α 的表达式类同, 据此可得到如图 6-1 所示横坐标为 ε , 纵坐标为 $-\gamma/2$ 的应变圆, 此应变圆可表示出平面应力状态下一点处不同方向应变的变化规律。

由于在平面应力状态下, σ_1 与 σ_2 为主应力, 在此平面内 $\tau=0$, 故其, $\gamma=0$, 由应变单元体分析可知, 在 $\gamma=0$ 时, ε_1^* 、 ε_2^* 为主应变, 即 $\varepsilon_1^* = \varepsilon_1$, $\varepsilon_2^* = \varepsilon_2$ 。这样, 主应力的测量就可以转化为主应变的测量。

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1)\end{aligned}\quad (6-4)$$

通过图 6-1 所示平面应力状态下应变圆可知:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{2}[(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{2}[(\varepsilon_x + \varepsilon_y) - \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}] \\ 2\alpha_0 &= \arctan \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y}\end{aligned}\quad (6-5)$$

在实际测量中, 可以直接测量到 ε_x 、 ε_y , 但无法直接测得 γ_{xy} , 但由三点可确定唯一的圆可知, 只要知道任意三个方向的线应变就可以确定唯一的应变圆, 在实际测量中, 为粘贴及确定主应力(变)方向方便, 往往采用直角应变花或等角应变花。通常直角应变花的粘贴方式如图 6-2 所示。

由 α 角方向的线应变公式 (6-3a) 可得:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \varepsilon_a \\ \varepsilon_y &= \varepsilon_c\end{aligned}\quad (6-6)$$

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)$$

将式 (6-6) 代入 (6-5) 可得

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{2}\left\{(\varepsilon_a + \varepsilon_c) + \sqrt{2[(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2]}\right\} \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{2}\left\{(\varepsilon_a + \varepsilon_c) - \sqrt{2[(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2]}\right\}\end{aligned}\quad (6-7)$$

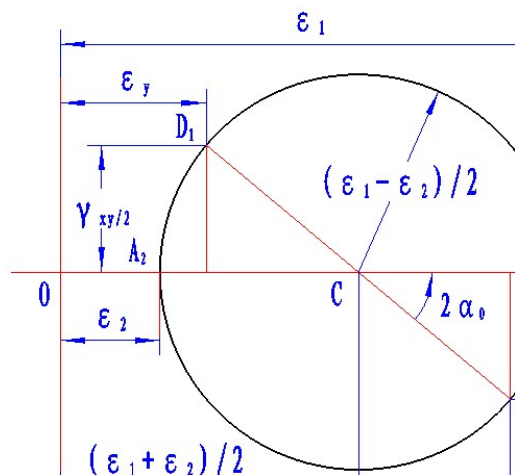


图 6-1 平面应力状态下应变圆

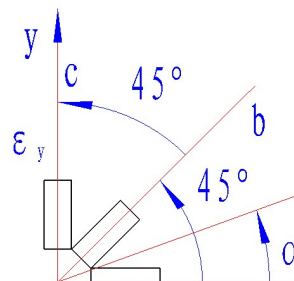


图 6-2 直角应变花垂直粘贴方式

$$2\alpha_0 = \arctan \frac{2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)}{\varepsilon_a - \varepsilon_c}$$

将式 (6-7) 代入 (6-4) 可得

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2} \left[\frac{1+\mu}{2} (\varepsilon_a + \varepsilon_c) + \frac{\sqrt{2}(1-\mu)}{2} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2} \right] \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2} \left[\frac{1+\mu}{2} (\varepsilon_a + \varepsilon_c) - \frac{\sqrt{2}(1-\mu)}{2} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2} \right]\end{aligned}\quad (6-8)$$

实际测试时, 有时采用如图 6-3 所示的粘贴方式, 此时, 由于三个应变片的相互位置关系未发生变化, 主应变 ε_1 、 ε_2 的计算公式同式 (6-7), 主应力的计算公式同式 (6-8), 主应变的方向与应变片 a 的夹角 α_a 可表示为

$$2\alpha_a = \arctan \frac{2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \quad (6-9)$$

而, $\alpha_0 = \alpha_a - 45^\circ$, 故有

$$\begin{aligned}2\alpha_0 &= 2\alpha_a - 90^\circ \\ \tan(2\alpha_0) &= \frac{-1}{\tan(2\alpha_a)}\end{aligned}\quad (6-10)$$

由式 (6-7) 得

$$\tan(2\alpha_a) = \frac{2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \quad (6-11)$$

将 (6-9) 代入到 (6-8) 可得

$$2\alpha_0 = \arctan - \left(\frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)} \right) \quad (6-10)$$

这样便得到了直角应变花倾斜 45 度粘贴时的主应力 (变) 与 X 轴的夹角。

主应力测试时, 有时还用如图 6-4 所示的等角应变花, 同直角应变花主应变的推导方式, 可得其主应变及方向的表达式:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} + \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_a)^2} \\ \varepsilon_2 &= \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} - \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_a)^2} \\ 2\alpha_0 &= \arctan \frac{\sqrt{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}\end{aligned}\quad (6-11)$$

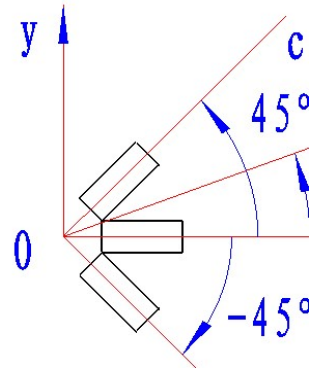


图 6-3 直角应变倾斜 45 度粘贴方式

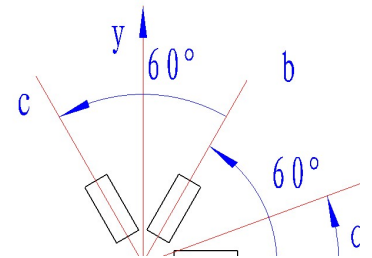


图 6-4 等角应变花的粘贴方式

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、500mm 钢板尺、弯扭组合试件（图 6.5）。

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。

试件敏感部分截面为圆环形，实验前需要测量的原始参数有：试件截面尺寸 D 、 d ，弯曲力臂 L_{w1} 、 L_{w2} ，扭转力臂 L_n 。

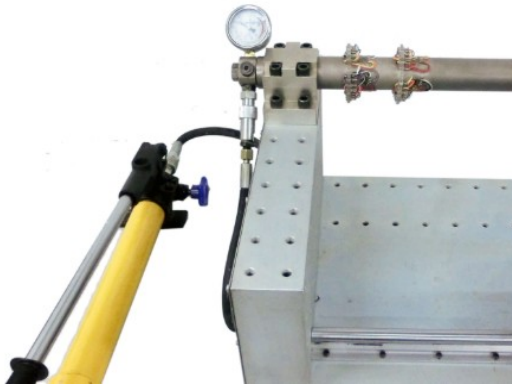


图 6-5 弯扭组合试验台

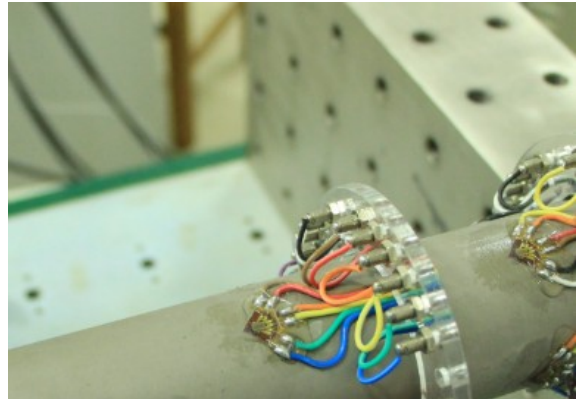


图 6-6 弯扭组合应变花

4.2 装夹、加载方案

安装好的试件如图 6.6 所示。弯扭组合体的固定端插入到试验机右立柱的固定孔内，悬臂梁的自由端为长槽孔，通过销轴与油缸活塞杆相联接，通过油缸活塞杆的上下移动，对试件进行交变加载，加载的换向及速度控制同拉伸实验。同梁弯曲实验一样，为保证试件的安全，需设置相应的报警保护装置。

4.3 数据测试方案

与拉、压试验相同，可以测得悬臂梁施力点的荷载，据此荷载，就可以得到弯扭组合试件上任一截面的弯矩、扭矩、剪力，及悬臂梁上任一截面的弯矩及剪力。通过在弯扭组合试件表面粘贴 45 度角应变花，测三向应变，利用广义胡克定律，可得到该点主应力大小及方向，将其与计算值相比较，验证广义胡克定律。应变的测量采用共用补偿片的测量方式。另外，通过在弯扭管的特征部位定向粘贴应变花的不同补偿方式，可测量在反复荷载作用下的应变，得到特征点应变随弯曲、扭转的变化规律。

4.4 数据的分析处理方案

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 6.7 为一个弯扭组合主应力及等强度梁电测实验荷载、应变实测曲线，中间窗口-荷载的实时曲线，左窗口-等强度梁应变实时曲线，右窗口-弯扭组合试件某测点的三向应变。数据读数利用光标同步分级读数的方式。

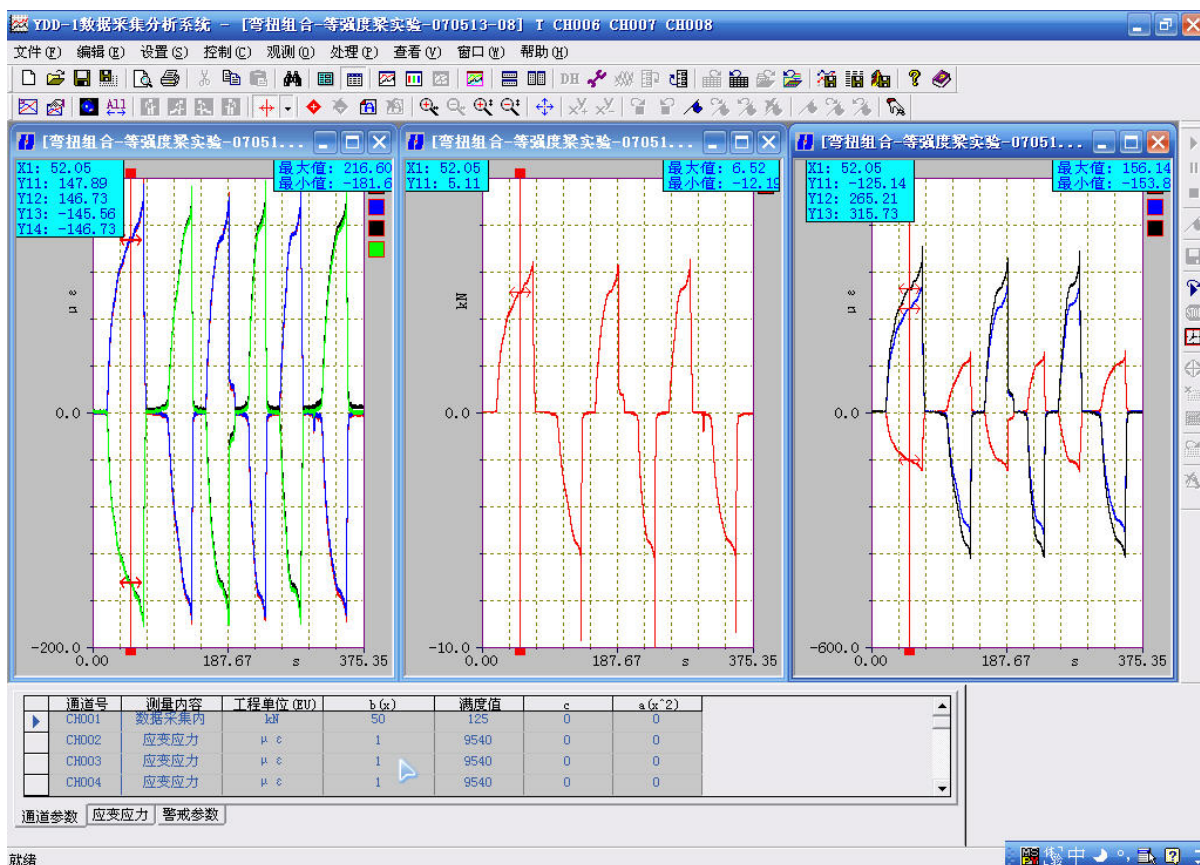


图 6.7 弯扭组合等强度梁实测实验曲线

如前所述，通过测得的集中荷载，就可以得到弯扭组合试件上任一截面的弯矩、扭矩、剪力，及悬臂梁上任一截面的弯矩及剪力。通过在弯扭组合试件表面粘贴 45 度角应变花，测三向应变，利用广义胡克定律，可得到该点主应力大小及方向，将其与计算值相比较，验证广义胡克定律

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、计算试件在安全应力下的最大荷载、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 测量试件原始参数确定安全荷载

实验需要已知的原始参数有：材料的弹性模量 E 、泊松比 μ ；电阻应变片的灵敏度系数 K 、阻值 R 、导线电阻等，需要的原始参数：试件截面尺寸 D 、 d ，弯曲力臂 L_{n1} 、 L_{n2} ，扭转力臂 L_w 。并根据最大应力计算试件的安全荷载。

需要注意的是，有些原始参数有确定的设计值，只有在装夹中使其满足设计值实验装置才能满足设计要求，如等强梁加载力臂（扭转力臂） L_n 。有些参数需调整到设计值，如弯曲力臂 L_{w1} 、 L_{w2} 。

6.2 装夹试件

6.2.1 调定系统的压力

为确保试件安全及方便控制加载速度，在所需荷载较小时，须设定系统工作压力。在油缸活塞杆无连接件的情况下，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，使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，弯扭组合主应力及等强度梁电测实验中，系统的工作压力设定为 2MPa。调整完成后，关闭“进油手轮”、“油泵停止”、“拉压停止”。

6.2.1 安装试件

第一步，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，圆孔正对试验机前方。

第二步，将弯扭组合体的固定端插入到试验机右立柱的固定孔内，并安装调节丝杠。

第三步，将等强度梁安装到弯扭组合体的受力端的花键槽内，测量并调整其与工作应变片的距离使之满足设计值 L_{w1} 、 L_{w2} 。

第四步，将弯扭转接套安装到短转换杆上，注意弯扭转接套开口的位置，并通过保险销轴联接，销轴采用由后到前的安装方式，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扭转接套的长槽孔内上下滑动。下行时，通过保险销轴传力给弯扭转接套，上行时，短转换杆直接推动弯扭转接套。

第五步，控制油缸活塞杆上行，使弯扭转接套的圆孔与等强度梁的长槽孔平齐，安装加力销轴，加力销轴可在弯扭转接套内转动，在等强度梁长槽孔内滑动。

第六步，旋转调节丝杠调整弯扭组合体固定端在右立柱中的位置，使得加力销轴作用在等强度梁的“等强度施力点”上，调整油缸活塞杆的位置，使得保险销轴位于弯扭转接套长槽孔的中间部位。

这样就完成了试件装夹，安装好的试件如图 6.6 所示。

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，其余通道测应变。连线时应注意不同类型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。应变的测试采用单片共用补偿片的方式，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、方向与测试通道的对应关系。

6.4 设置采集环境

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 6.8 所示的测试环境。同前面的实验一样，首先检测仪器，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

第一项：系统参数

采样方式：采样频率：“20-100Hz”，“拉压测试”，需要特别注意的是，弯扭组合实验是一个非破坏性试验，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，报警值由实验预估最大荷载确定，例如，当控制弯扭管根部最大应变不超过 $600 \mu \epsilon$ 时，所加的拉、压力应小于 8KN，此时，设置**报警参数上限为 8KN，下限为-8KN**，就可以保证测点最大应变不超过 $600 \mu \epsilon$ ，以保证试件的安全。

第二项：通道参数

测量油缸活塞杆的拉压力通道，同拉压实验设置相同的修正系数。其余通道测量应变，对于设置为应力应变的通道需将其修正系数“b”设置为“1”。进入应力应变测试，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。

第三项：窗口参数

可以开设多个数据窗口，其中中间窗口为测力窗口，其余每个窗口测量一组电阻应变片，并按顺序排列，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”，“油泵启动”，“拉压下行”，打开“进油手轮”，油缸活塞杆下行，注意观察保险销的位置，控制加载速度，缓慢加载，至上限报警值时油缸活塞杆自动反向向上运行，同样，当油缸活塞杆上行加载至下限报警值时，油缸活塞杆也会自动反向下行，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加载套的中间位置时，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。

首先关闭“进油手轮”，选择“油泵启动”，“拉伸下行”。前面已经设置好了采集环境，这里只需要平衡，清除零点，启动采样。采集到所需要的数据。

打开“进油手轮”，进行加载，加载应注意观察保险销轴的位置，当保险销轴不受力时，可以加快加载速度，当保险销轴接近受力时应放慢加载速度。在拉伸下行加载过程中是通过保险销轴传力的，在加载过程中注意观察实验数据的正确性。至上限报警时，油缸活塞杆会自动反向上行，在上行加载时通过短转换杆将力传递给弯扭转接套，给试件进行加载。至下限报警值时，油缸活塞杆同样会自动反向下行。在实验过程中也可采用手动换向的加载方式，并注意控制“进油手轮”以控制加载速度。

采集到准确的三组反复弯扭数据后，当保险销轴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

首先显示全部数据，回放加载测试数据，将测力窗口设置成 X-Y 记录方式，X 轴--应变通道，Y 轴--测力通道。以验证应变与荷载的线性关系，及正反向加载时，应变的变化规律。

7.2 读取数据

弯扭组合主应力及等强度梁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，将荷载级差作为起始数据。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。

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应能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试验的精度等。

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、有些原始参数有确定的设计值，只有在装夹中使其满足设计值实验装置才能满足设计要求，如等强梁加载力臂（扭转力臂） L_n 。有些参数需调整到设计值，如弯曲力臂 L_{w1} 、 L_{w2} 。
- 3、打开试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；
- 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况，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扭数据后，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 压杆稳定实验

1、概述

压杆失稳是压杆稳定平衡状态的改变，压杆失稳的过程是压杆的稳定平衡状态由直线平衡状态向弯曲平衡状态改变的过程，若失稳过程中荷载可控，压杆将建立弯曲平衡状态，其承载力为临界荷载；若失稳过程中荷载不可控，压杆将无法建立弯曲平衡状态，横向变形持续增加直至压杆屈服破坏。工程实际中，经常会出现由于局部压杆的失稳导致整个结构瞬间破坏的情形，就是这个道理。

2、实验目的

1、测量不同支撑约束条件下压杆的临界荷载，验证欧拉公式；

2、通过有侧向干扰的压杆稳定实验，证明在材料没有失效的情况下，压杆失稳实际上是由一种平衡状态过渡到另一种平衡状态，即同一个压杆，在相同的荷载下有两个平衡状态，失稳是指平衡状态的改变，而非失去平衡状态；

3、了解工程中压杆失稳破坏的机理，明白为何工程中压杆失稳往往是瞬间的破坏；

3、实验原理

如图 7.1 (a) 所示的理想中心受压直杆，在压杆受轴向压力 F 作用下，施加侧向干扰荷载 F' ，此时，在轴向压力 F 与横向干扰荷载 F' 的共同作用下，压杆会发生如图 7.1-a 所示的弯曲变形。

实验表明，当轴向压力 F 不大时，撤去横向干扰荷载 F' 后，压杆将恢复其原来的直线平衡状态，如图 7.1-b 所示，说明，此时压杆的直线平衡状态是稳定的平衡状态；当轴向压力增加到一定的临界值时，重复同样的横向干扰实验，压杆将保持弯曲平衡状态，而无法恢复到原来的直线平衡状态，如图 7.1-c 所示，说明，此时压杆的直线平衡状态是不稳定的平衡状态，而弯曲平衡状态是稳定的平衡状态。由此可见，受轴向压力作用的压杆的平衡状态

有两种，一种是直线平衡状态，一种是弯曲平衡状态，在不同的

轴向压力作用下，一种平衡状态是稳定的，另外一种是不稳定的。在轴向压力较小时，直线平衡状态是稳定的，弯曲平衡状态是不稳定的，当轴向压力达到一临界值时，直线平衡状态是不稳定的，弯曲平衡状态是稳定的。我们把压杆的直线平衡状态由稳定平衡状态转化为不稳定平衡状态时所受压力的临界值，称为临界压力，用 F_{cr} 表示。并定义：中心受压直杆在临界压力 F_{cr} 作用下，直线平衡状态由稳定平衡状态转化为不稳定平衡状态（或称直线平衡状态丧失稳定性）为“压杆失稳”，简称“失稳”。

这里需要注意的是，压杆失稳实际上是指压杆稳定平衡状态的改变，而非压杆破坏，也即压杆在失稳状态下，只要其应力没有达到屈服应力，压杆仍可保持平衡状态，仍有确定的承载力，且其承载力高于临界压力 F_{cr} 。但由于当压杆失稳后，压杆最大应力与荷载的关系由原来的线性关系转变成类似幂函数关系，使得此时压力稍有增加，应力便会急剧增加，故习惯上定义压杆的临界压力为压杆的极限安全承载力，有时被误称为“极限承载力”。实际上，理想细长压杆在直线平衡状态且没有侧向干扰的情况下，其可承受轴向压力远大于临界压力，但当其在弯曲平衡状态时，其可承受的压力接近临界压力。

现以两端铰支的压杆失稳后挠曲线中点挠度 δ 与压力 F 之间的关系说明此问题。

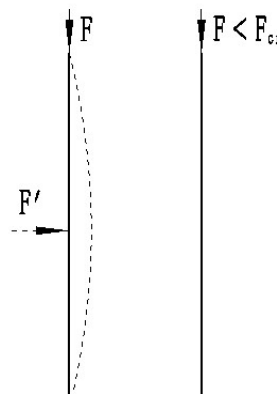


图 7.1 压杆的平衡状态

两端铰支的压杆在轴向压力 F 作用下失稳后的曲线形态如图 7.2 所示, 利用压杆失稳时挠曲线的精确微分方程得到挠曲线中点挠度 δ 与轴向压力 F 之间的近似关系为

$$\delta = \frac{2\sqrt{2}l}{\pi} \sqrt{\frac{F}{F_{cr}} - 1} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{F}{F_{cr}} - 1 \right) \right] \quad (7-1)$$

式中 $F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$ 为由欧拉公式得到的压杆两端铰支的失稳临界压力。

依公式 1 绘出的 $F-\delta$ 关系曲线如图 7.3 所示, 可以看出, 当 $F \geq F_{cr}$ 时, 压杆在微弯平衡状态下, 虽压力与挠度虽然存在一一对应关系, 但当 F 增加很小的情况下, 横向挠度 δ 迅速增加, 压杆所处的平衡状态接近于随遇平衡状态, 因此往往定义 F_{cr} 即为压杆失稳的安全荷载。实验中可以通过横向挠度 δ 的突然增加来判断压杆是否失稳。

由于压杆失稳时试件由直线状态突然变为弯曲状态, 即试件前后两侧面上的应变增加方向在试件失稳的瞬间发生改变。因此, 实验中也可通过测量压杆前后两侧面上应变的方式来判断杆件是否失稳。由公式(1)得压杆失稳后中间截面的弯矩 M 为:

$$M = F\delta = \frac{2\sqrt{2}Fl}{\pi} \sqrt{\frac{F}{F_{cr}} - 1} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{F}{F_{cr}} - 1 \right) \right] \quad (7-2)$$

此时, 试件上的应力由压应力与弯曲应力两部分组成, 因此, 中间截面前后两侧面上的应力 σ 可由下式求得:

$$\sigma_{1,2} = -\frac{F}{A} \pm \frac{M}{W} = -\frac{F}{A} \pm \frac{2\sqrt{2}Fl}{W\pi} \sqrt{\frac{F}{F_{cr}} - 1} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{F}{F_{cr}} - 1 \right) \right] \quad (7-3)$$

压杆在整个实验过程中为单向应力状态, 故有:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\sigma}{E} = -\frac{F}{EA} \pm \frac{M}{EW} = -\frac{F}{EA} \pm \frac{2\sqrt{2}Fl}{EW\pi} \sqrt{\frac{F}{F_{cr}} - 1} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{F}{F_{cr}} - 1 \right) \right] \quad (7-4)$$

依公式 7-4 绘出的理想压杆的 $F-\varepsilon$ 关系曲线如图 7.4 所示, 可以看出, 当 $F < F_{cr}$ 时, 压杆前后两侧的应变相同且与压力 F 成线性关系, 当 $F \geq F_{cr}$ 时, 两侧应变的增加方向相反, 据此, 同样可方便找到压杆的失稳点。

以上所讲的均是指对理想压杆而言的, 实际上, 理想的压杆是不存在的, 实验中所用的试件都有一定的初始弯曲, 这样, 如何在实验中使得由初始弯曲的压杆保持直线受压平

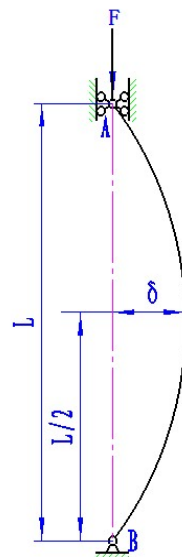


图 7.2 压杆失稳后弯曲平衡状态

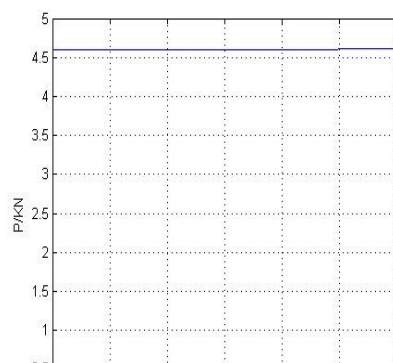


图 7.3 理想压杆的 $F-\delta$ 关系曲线

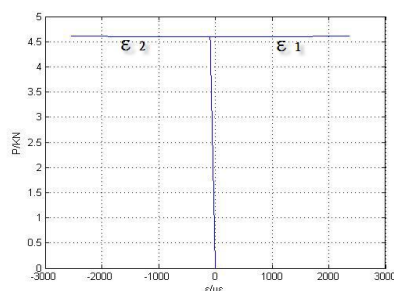


图 7.4 理想压杆的 $F-\varepsilon$ 关系曲线

衡状态，就成能够为实验成败的关键。另外，使压杆由直线平衡状态转化为弯曲平衡状态的条件是侧向干扰，选择合适的侧向干扰也是实验的重要组成部分。

鉴于此，采用应变测试判断法的实验方案，通过监测压杆两侧应变的大小来判断压杆是否处于直线受压状态，在压杆的中间设置一调直支撑，该支撑可调节压杆中间点位置，使得压杆两侧的应变相等，证明压杆处于直线受压状态。此时，施加侧向干扰，压杆弯曲，干扰去除后若恢复为直线平衡状态，则说明施加干扰前压力小于临界压力，若干扰去除后保持弯曲平衡状态，则说明施加干扰前的压力大于或等于等于临界压力，且弯曲平衡后压杆所承受的当前压力等于或略大于临界压力，可据此确定该压杆的临界压力。

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、150mm 游标卡尺、压杆稳定实验装置（图 7.5）。

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。

试件采用矩形截面的试件，两端铰接，材质：65Mn，弹性模量：210Gpa 左右。在两侧面的中央，粘贴有电阻应变片，用以测量试件的应变。

在实验装置的两侧面有压杆侧向调节及干扰装置。其位置可上下调整。

4.2 装夹、加载、安全控制方案

4.2.1 装夹

安装好的试件如图 7.5 所示。实验时，压杆的两端通过轴承与上下支座相连接。当对轴承的转动不进行约束时，支承形式就为铰接，当对轴承进行防转约束时，支承形式就为固接。

4.2.2 加载

控制油缸活塞杆上行时，试件受压，加载的速度控制及压力的大小由进油首轮及压力调节手轮联合控制。侧向控制及侧向力干扰通过控制侧向调节装置及干扰装置完成。

4.2.3 安全控制

在实验过程中需设置位移报警控制，当压杆轴向位移达到一定值时停止加载或控制油缸活塞杆反向运行，以保证压杆工作在弹性阶段。

4.3 数据测试方案

压力的大小测试同压缩实试验。应变通过粘贴的电阻应变片测量，应变测量采用 1/4 桥的接线方式。

实验时也可采用将前后两侧面应变片串联起来的测试方式，这样直线平衡时测得的应变理想值为零，实稳瞬间应变突然增加。但这样做无法测得在直线平衡状态下应变，也就无法通过直线平衡状态

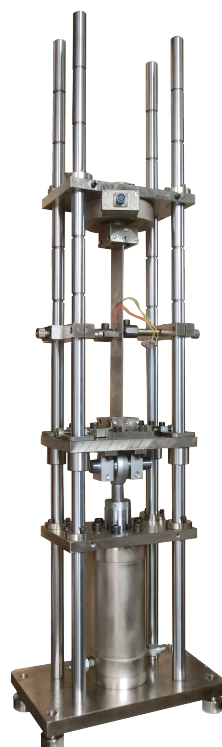


图 7.5 压杆稳定实验装置

的应变实测压杆的弹性模量。

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应变，并生成力、应变实时曲线及力、应变 X-Y 曲线，图 7.6 为在 YDD-1 型多功能材料力学试验机上实测的压杆的 $F-\varepsilon$ 关系曲线。

从图中可明显看出：

(1) 在直线平衡状态时，两侧的应变相同，且与压力成线性关系，并据此可实测压杆的弹性模量 E 。

(2) 在压力当 $F < F_{cr}$ 时，施加侧向干扰压杆弯曲，干扰撤除后，压杆恢复原来的直线平衡状态，说明此时直线平衡状态为稳定平衡状态。

(3) 在压力当 $F > F_{cr}$ 时，施加侧向干扰压杆弯曲，不等撤除干扰，弯曲量迅速扩大，应变同样迅速分向增加，直至压力降低到一稳定值后，压杆处于弯曲平衡状态。此时，若稍施加压力，应变明显增加。

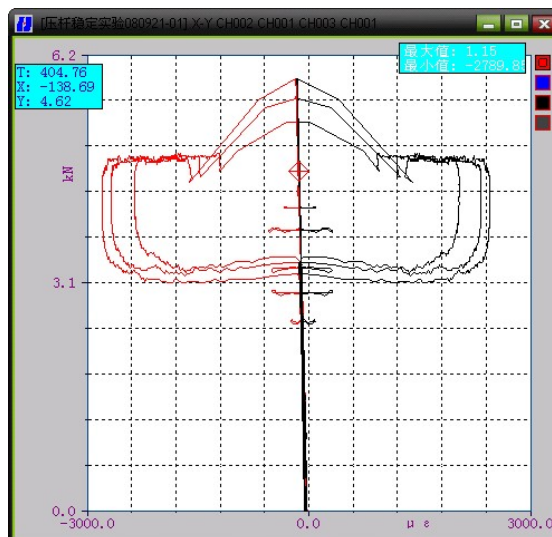


图 7.6 实测压杆的 $F-\varepsilon$ 关系曲线

(4) 在压杆失稳后，虽弯曲平衡状态为稳定平衡状态，但从 $F-\varepsilon$ 曲线可以看出，在 F 增加很小的情况下，应变迅速增加，压杆所处的平衡状态接近于随遇平衡状态，故此时压杆所受的的压力接近（实际上是略大于）压杆失稳的临界荷载 P_{cr} ，在工程精度范围内可定义此时的压力为压杆失稳的临界压力 P_{cr} 。

(5) 多次实验时，虽每次在直线平衡状态的压力不同，但失稳到弯曲平衡状态时，依 (4) 得到的临界压力 P_{cr} 是稳定的，故此判断临界压力 P_{cr} 的方案可行。

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、最大轴向变形、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

实验采用如图 7.5 所示矩形截面形状的试件，用游标卡尺在粘贴应变片中部的两侧，多次测量试件的宽度 B 和厚度 H ，计算试件的截面面积 S_0 。并查相关资料，预估其直线平衡状态下弹性段极限承载力及失稳临界压力。

6.2 试件装夹

6.2.1 调定系统的压力

首先确定试验机的状态，上部转接套处于固接状态，卸掉下转接套及相关连接部分。为确保试件安全及方便控制加载速度，在所需荷载较小时，须设定系统工作压力。在油缸活塞杆无连接件的情

况下，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，使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，压杆稳定中，系统的工作压力设定为 20kN。调整完成后，关闭“进油手轮”、“油泵停止”、“拉压停止”。

6.2.2 安装试件

第一步，将压杆稳定实验装置整体安装到油缸活塞杆上，旋转实验装置，使实验装置与油缸活塞杆紧密结合。

第二步，通过转动油缸活塞杆，调整压杆与试验机框架至合适的位置关系，以方便实验过程中控制侧向调整及干扰装置。

第三步，控制油缸活塞杆上行，使压杆稳定实验装置的受力点与上夹头套的施力点相距 2-3mm，关闭进油手轮，此时承压转接件可在转接套内灵活转动。调整完成后，“油泵停止”、“拉压停止”。

这样就完成了试件装夹，安装好的试件如图 7.5 所示。

6.2.3 调整压杆的工作状态

根据实验需要，调整压杆的支承

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压力，第三通道测油缸过活塞杆位移，其余通道测应变。连线时应注意不同类型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。应变的测试采用单片共用补偿片的方式，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、方向与测试通道的对应关系。

6.4 设置采集环境

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 7.6 所示的测试环境。同前面的实验一样，首先检测仪器，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

第一项：系统参数

采样方式：采样频率：“20-100Hz”，“拉压测试”，需要特别注意的是，压杆稳定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。压杆稳定实验报警通道一般设置为油缸活塞杆位移通道，报警值由实验预估最大轴向位移确定。

注意：在报警参数的设置中需考虑加载转接件与夹头套的间隙，此间隙装夹试件时要调整好隙，间隙在 2-3mm 左右较为合适。

第二项：通道参数

测量压力、位移的通道，设置同压缩实验设置相同的通道参数。其余通道测量应变，对于设置为应力应变的通道需将其修正系数“b”设置为“1”。进入应力应变测试，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。

第三项：窗口参数

可以开设两个数据窗口，左窗口，荷载、应变实时曲线，右窗口，纵坐标-荷载，横坐标-压杆前侧应变和后侧应变，并设定好窗口的其它参数如坐标等。

6.4.3 数据预采集，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”，“油泵启动”，“压缩上行”，打开“进油手轮”，油缸活塞杆上行，注意观察加载转接件的位置，控制加载速度，缓慢加载，至位移下限报警值时油缸活塞杆自动反向向下运行，证明报警功能可用。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，观察加载转接件的位置，当加载转接件处于加载套的中间位置时，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

6.4.1 确定设备工作状态

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。首先关闭“进油手轮”，选择“油泵启动”，“压缩上行”。前面已经设置好了采集环境，选择平衡，清除零点，启动采样。采集到我们所需要的数据。

6.4.2 初始调直

打开“进油手轮”，进行加载，加载应注意观察加载转接件的位置，当加载转接件不受力时，可以加快加载速度，当加载转接件接近受力时应放慢加载速度使轴向压力为缓慢加载状态，至20%估计临界压力时，关闭进油手轮，比较两侧应变片的应变值，此时应变由于初始弯曲的作用，两侧应变应不等，据此判断压杆的弯曲方向，将压杆外凸一侧的调直装置的顶杆旋出与压杆相接触，缓慢调节，至两侧面的应变相等后停止。

6.4.3 持续加载，并施加侧向干扰

继续缓慢加载，并不断微调侧向调直装置，至压力达到80%临界力可开始施加侧向干扰荷载，观测压杆平衡状态的变化情况。然后继续进行加载-调直-干扰的循环，直至压杆出现平衡状态的改变（即压杆失稳现象）后，关闭“进油手轮”停止加载。

6.4.4 持续加载，并施加侧向干扰

观测此时压杆的平衡状态的特点，稍加压力后，应变会较大的增加。

6.4.5 重复实验

卸载后，重复上述加载过程，比较临界压力的稳定性，采集到准确的三组数据后，可停止实验。当加载转接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。

6.4.6 进行其它类型压杆稳定的实验

依据实验需要，可进行两端固支；一端固支、一端铰支以及有中间辅助支承的压杆稳定实验。

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

读取数据的方式同弹性模量和泊松比电测试验，包括压力及应变的读取。在用直线平衡状态数据计算弹性模量时，可采用分级读数的方式。在读取临界压力时可采用双光标读最小值的方式。

7.3 分析数据

7.3.1 验证理论公式

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 ，经计算可得压杆理论临界力，并与和临界压力 P_{cr} 相比较，可验证不同条件下欧拉公式的正确性，寻找实验误差产生的原因及可能的解决方法。

7.3.2 明确压杆失稳的真正含义，明确失稳与破坏的关系

从实验中可明显看出，压杆失稳实际上是指压杆在侧向干扰的作用下，压杆稳定平衡状态的改变，压杆由原来的直线平衡状态转变为弯曲平衡状态，只要其应力没有达到屈服应力，压杆仍可保持平衡状态，仍有确定的承载力，压杆也就不会破坏。

侧向干扰在压杆失稳中是诱因，是必不可少的，理想的直杆在没有侧向干扰的情况下其承载压力高于临界压力。

失稳的准确含义是指压杆在侧向干扰的作用下，压杆的直线平衡状态由稳定平衡状态转为不稳定平衡状态，与之相对应的是弯曲平衡状态由不稳定平衡状态转为稳定平衡状态；而破坏是指压杆的最大应力达到屈服应力。因此，压杆失稳多发生在压应力没有达到屈服应力的情况下（实际上屈服后的压杆也有失稳的现象），失稳后压杆也不一定破坏。

7.3.3 根据压杆失稳的特点，分析工程中压杆失稳多导致失稳突发破坏的原因

从图 7.6 实测的压杆的 $F-\varepsilon$ 关系曲线可以看出，虽压杆失稳后仍可保持平衡状态且有确定的承载力，但此确定承载力明显低于失稳前的荷载，且此时，荷载-应变（应力）关系曲线基本为水平直线，即荷载稍有增加，应力便会有较大的增加。这样，当压杆失稳后，加在压杆上的荷载若不能及时减小到压杆可承受的范围内，压杆的应力将会迅速达到屈服应力，导致压杆的破坏。而工程中的实际情况往往是在压杆失稳的瞬间，不仅荷载无法降低，而且由于失稳过程的重力冲击，往往会出现一旦失稳，需要压杆承受的荷载不仅不会减小，而且还需增加的情形，这样，就导致了压杆失稳破坏的瞬间性。

如在 2001 年，美国“911 事件”中，世界贸易中心大厦在遭撞机事件后，并没有立即倒塌，而是在起火 45 分钟后从起火点层依次向下破坏（后遭撞机事件的大厦），分析原因，是因为火灾的高温使得着火层材料的弹性模量及屈服强度降低，导致着火层压杆的临界压力下降，发生压杆失稳现象，失稳后荷载无法减小，这样就导致失稳的加速，最终材料屈服破坏，破坏过程产生的冲击荷载使得下一层在更大荷载下失稳屈服破坏，依次向下，最终以梯次加快的速度破坏。

需要注意的是，在整个事件中，先遭撞机事件的大厦（以下称 1#大厦）并没有先“倒塌”（应为失稳屈服破坏），而是在后遭撞机事件的大厦（以下称 2#大厦）“倒塌”后才“倒塌”的，分析其原因，因为 2#大厦遭撞机的部位较低，也即压杆的承受压力较大，易发生失稳现象，稍有干扰即可失稳。1#大厦的由于遭撞机部位较高，在 2#大厦“倒塌”前，火灾对其产生的影响并没有使其压杆达

到临界状态或屈服状态，由于 2#大厦倒塌的震动导致的着火层荷载增加，诱发了 1#大厦的着火层的压杆的失稳屈服，最终导致其先着火，后破坏。

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、上夹头拉杆应处于固结状态；
- 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加载转接件与夹头套的间隙，间隙在 2-3mm 左右较为合适，并在报警参数的设置中考虑此间隙。
- 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。

§8 通过综合分析材料拉、压、扭强度指标，判定材料强度理论适用性实验

1、概述

不同性质的材料力学性能不同，一种材料在进行不同类型的实验时可能会有相同的破坏形式，以相当应力为纽带可以得到材料不同强度指标之间的关系，从而更好理解各强度理论的来源及其适用范围。

2、实验目的

2.1、学会灵活使用应力单元体的分析方法分析一点处的应力状态。

2.2、学会引入应力单元体的分析方法结合试件的破坏形式，分析出 HT200 灰铸铁、LY12 铝合金、Q235 低碳钢试件在不同加载形式下的破坏应力。

2.3、通过以相当应力为纽带推导分析每种实验材料不同强度指标之间的关系，与实测数据比较验证强度理论的适用性，从而更深入的理解强度理论。

3、实验原理

在进行构件设计时，通常采用最小化的设计原则，因此在确定构件关键尺寸时，首先需进行强度校核。随着现代有限元计算机分析技术的日益成熟，我们可方便得到构件在不同荷载作用下危险点的单元体应力状态，并得到危险点各相当应力的大小，将其与许用应力相比较就可以得到该设计的安全系数，但通常的情况是，选用不同的相当应力（强度理论）进行校核时所得安全系数并不相同有时甚至有较大差异，而不同性质的材料在不同的应力状态下对强度理论有不同的适用性，因此，能否正确选择合适相当应力进行校核就成了评价设计是否合理的关键。

应用应力单元体的分析方法可以分析出试件任意一点处不同截面上应力的情况，因此，实验分析时根据试件的破坏形式结合单元体应力分析结果可分析出试件的真实破坏应力。强度理论分析的前提条件是假定材料的破坏因素相同时，则其相当应力是相等的，即相当于单轴拉伸时的拉应力。因此，对同一种材料，可以设计两个或多个主应力单元体应力状态不同但具有相同破坏因素的实验，此时，选择不同的强度理论进行分析，对应每个强度理论有多个相当应力，若对应某一强度理论的多个相当应力相等且等于单轴拉伸时的拉应力，则说明该材料适合应用该强度理论进行校核。由单元体分析可知，主应力单元体与强度指标应力单元体是等价的，也即主应力与强度指标应力之间就有确定的数学关系，这样通过相当应力的纽带作用就可以把不同实验的强度指标联系起来。

不同强度理论根据试件的不同破坏因素把主应力按不同的方式折合成单轴拉伸引起该破坏时的拉应力，称之为相当应力 σ_r 。相当应力是强度理论的核心，不同强度理论给出了材料不同破坏因素的假设。

第一强度理论即最大拉应力理论假定最大拉应力即 σ_1 是引起材料脆性断裂的因素，即不论处于什么样的应力状态下，只要构件内一点处的最大拉应力 σ_1 （即 σ_I ）达到材料的极限应力 σ_u ，材料就发生脆性断裂。至于材料的极限应力 σ_u 可通过单轴拉伸试样发生脆性断裂的试验来确定。脆性断裂的判据为：

$$\sigma_1 = \sigma_u$$

则相当应力为：

$$\sigma_{r1} = \sigma_1$$

此强度理论是由兰卡恩在 19 世纪中期提出，主要适用于脆性材料以拉应力为主的情况。但实际材料的断裂均是由伸长线应变达到其极限值引起的，由于材料变形泊松现象的存在，能产生伸长线应变

的不仅仅有拉应力，而此强度理论只考虑了主应力 σ_1 对材料变形的影响，当主应力 σ_2 、 σ_3 较大时此强度理论便不再适用，有一定的局限性。例如石料或混凝土等材料在轴向压缩试验的情形，如端部无摩擦，试件将沿垂直于压力的方向发生断裂，这一方向就是最大伸长线应变的方向，而第一强度理论无法解释该类现象，而以最大伸长线应变作为试件断裂因素的第二强度理论显然更符合此类实验。

第二强度理论即最大伸长线应变理论假定最大伸长线应变 ε_1 是引起材料脆性断裂的因素，即不论材料处于什么样的应力状态下，只要构件内一点处的最大伸长线应变 ε_1 （即 ε_1 ）达到了材料的极限值 ε_u ，材料就发生脆性断裂。材料的极限值 ε_u 可通过单轴拉伸试样发生脆性断裂的试验来确定。若材料直到发生脆性断裂都可近似地看作线弹性，即服从胡克定律，则脆性断裂的判断依据为：

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_u = \frac{\sigma_u}{E} = \frac{\sigma_b}{E}$$

由于材料的泊松现象，处于空间应力状态下一点处的最大伸长线应变为：

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)}{E}$$

$$\text{则 } \frac{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)}{E} = \frac{\sigma_b}{E}$$

则相当应力为：

$$\sigma_{r2} = \sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)$$

最大伸长线应变理论是根据法国 J.-V.彭赛列的最大应变理论改进而成的，适用于脆性材料以拉应力为主的情况。习惯上将它与最大拉应力理论合称为第一类强度理论，主要应用于脆性材料的设计校核中。而对应用更为广泛的以塑性屈服或发生显著的塑性变形作为失效标志塑性材料的设计校核的理论称之为第二类强度理论，最典型的为最大切应力理论和形状改变能密度理论。其中最大切应力理论（又称第三强度理论）主要适合于对以剪切破坏为主的材料进行校核。

第三强度理论即最大切应力理论假定最大切应力 $\tau_{\max}$ 是引起材料塑性屈服的因素，即不论处于什么样的应力状态下，只要构件内一点处的最大切应力 $\tau_{\max}$ 达到了材料屈服时的极限值 τ_u ，该点处的材料就发生屈服。材料屈服时切应力的极限值 τ_u ，可以通过单轴拉伸试样发生屈服时（45°斜截面上的最大剪应力）来确定。按照这一强度理论，则屈服判断为：

$$\tau_{\max} = \tau_u = \frac{\sigma_s}{2}$$

在复杂应力状态下一点处的最大切应力为：

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

$$\text{则 } \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_s}{2}$$

则相当应力为：

$$\sigma_{r3} = \sigma_1 - \sigma_3$$

最大切应力理论在 1868 年由亨利·特雷斯卡提出，该理论没有考虑中间主应力 σ_2 的影响，所以对于复杂应力状态下的单元体，不能保证解释合理性。目前，同时考虑三个主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 的影响较为精确的理论为形状改变能密度理论（又称为第四强度理论）。

第四强度理论即形状改变能密度理论假定形状改变能密度 ν_d 是引起材料屈服的因素，即不论处于什么样的应力状态下，只要构件内一点处的形状改变能密度 ν_d 达到了材料的极限值 ν_{du} ，该点处的材料就发生塑性屈服。对于像低碳钢一类的塑性材料，因为在拉伸实验时当正应力达到 σ_s 时就出现明显的屈服现象，故可通过拉伸实验来确定材料的 ν_{du} 值。则按照这一强度理论，屈服判据为：

$$\nu_d = \nu_{du} = \frac{(1+\nu)}{6E} \times 2\sigma_s^2$$

复杂应力状态下，单元体的形状改变能密度为：

$$\nu_d = \frac{(1+\nu)}{6E} \times \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]$$

则屈服判据可改写为：

$$\frac{(1+\nu)}{6E} \times \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] = \frac{(1+\nu)}{6E} \times 2\sigma_s^2$$

则相当应力为：

$$\sigma_r = \sigma_s = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]}$$

第四强度理论由胡勃在 1904 年提出，后来由冯米泽斯和亨齐分别完善，因此，习惯上称米泽斯屈服准则，把 σ_{r4} 称之为米泽斯应力。第四强度理论比第三强度理论更符合以拉压屈服为主的钢材类材料的屈服判定，因此在工程实际中得到了广泛的应用。

在常规的拉伸、压缩、扭转实验中得到反映材料基本力学性能的强度指标，通过强度指标可以得到试件破坏时的单元体应力状态，通过强度指标之间的关系来判定该材料适合用哪一强度理论设计校核。本实验分别对三种典型材料 HT200 灰铸铁、LY12 铝合金、Q235 低碳钢进行拉伸、压缩、扭转实验，根据测得的强度指标，分析不同材料强度理论的适用性。

对 HT200 灰铸铁试件分别进行拉伸、扭转实验，观察试件的断口形式发现试件拉伸时沿横截面平口断裂，扭转时沿与轴线成 45° 角的螺旋曲面破坏。试件断口如图 8.1 所示，相应的单元体应力状态如图 8.2 所示。



图 8.1 a HT200 灰铸铁试件拉伸破坏断口

b HT200 灰铸铁试件扭转破坏断口

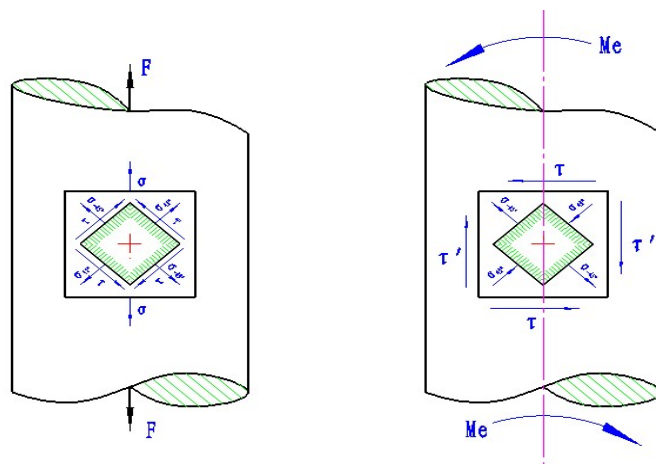


图 8.2 a HT200 灰铸铁试件拉伸单元体应力状态 b HT200 灰铸铁试件扭转单元体应力状态

应用应力单元体分析方法分析试件在拉伸、扭转时的应力状态，结合试件的破坏形式可判断出试件在拉伸、扭转时的破坏应力均为最大拉应力，即 HT200 灰铸铁为伸长线应变为破坏因素的脆性断裂，符合第二强度理论。将拉伸、扭转时的三个主应力分别代到第二强度理论中，试件拉伸时危险点处的相当应力为 $\sigma_{b(\text{抗拉})}$ ，试件扭转破坏时危险点处的相当应力为

$\sigma_{r2} = \sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3) = (1 + \nu)\tau_{b(\text{抗扭})}$ ，可以看出两种应力状态下的相当应力基本相等，从而验证 HT200

灰铸铁在拉伸、扭转时适合用第二强度理论校核，并由此可以得到拉伸时脆性断裂的材料其抗拉强度与抗扭强度的关系为 $\sigma_{b(\text{抗拉})} = (1 + \nu)\tau_{b(\text{抗扭})}$ 。HT200 灰铸铁的泊松比 ν 取值一般在 0.23-0.27 之间，若

取中间值，可得 $\tau_{b(\text{抗扭})} = 0.8 \sigma_{b(\text{抗拉})}$ 。而若将三个主应力代到第一强度理论中，则得到 HT200 灰铸铁

的抗拉强度与抗扭强度之间的关系为 $\sigma_{b(\text{抗拉})} = \tau_{b(\text{抗扭})}$ ，可以看出第二强度理论比第一强度理论更安

全。

对 LY12 铝合金试件分别进行拉伸、压缩、扭转实验，观察试件的断口形式发现拉伸、压缩时试件都是与轴线成 45° 的斜截面破坏，扭转时沿横截面破坏。试件断口如图 8.3 所示，相应的单元体应力状态如图 8.4 所示。



图 8.3 LY12 铝合金试件拉、压、扭断口

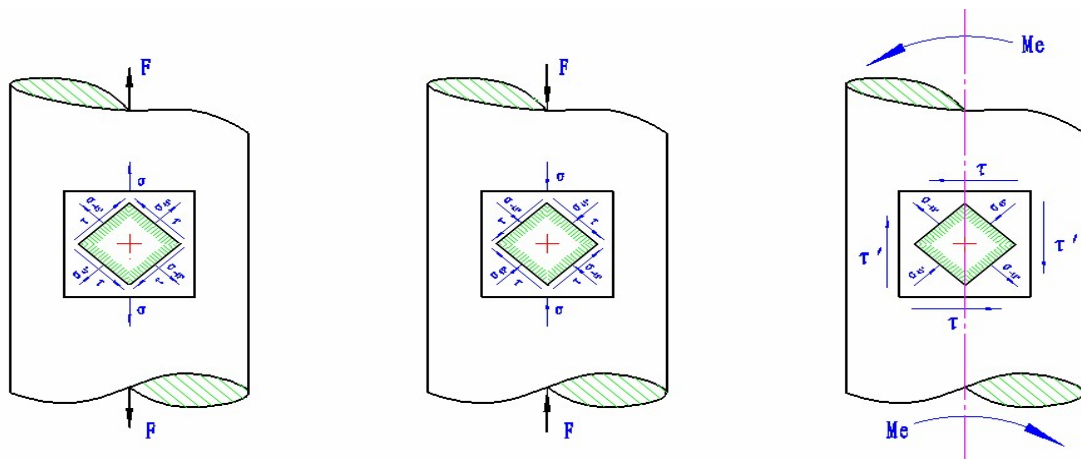


图 8.4 LY12 铝合金试件拉、压、扭单元体应力状态

应用应力单元体的分析方法分析试件在拉伸、压缩、扭转时的应力状态，结合试件的破坏形式可判断出试件在拉伸、压缩、扭转时的破坏应力均为最大切应力。即最大切应力是材料破坏的主要因素，符合第二类强度理论。将拉伸、压缩、扭转时的三个主应力分别代到第三、第四强度理论的相当应力中。在第三强度理论下，试件拉伸破坏时危险点处的相当应力为 $\sigma_{r3} = \sigma_0 = \sigma_{b(\text{抗拉})}$ ，试件压缩破坏时

危险点处的相当应力为 $\sigma_{r3} = \sigma_0 = \sigma_{b(\text{抗压})}$ ，试件扭转破坏时危险点处的相当应力为

$\sigma_{r3} = (\sigma_1 - \sigma_3) = 2\tau_{s(\text{抗扭})}$ ，可以看出三种应力状态下的相当应力基本相等。而在第四强度理论下，三

种应力状态下的相当应力不相等。从而验证 LY12 铝合金在拉伸、压缩，扭转时适合用第三强度理论校核。

对 Q235 低碳钢试件分别进行拉伸、扭转实验，观察试件的断口形式发现拉伸时试件沿与轴线成 45° 的斜截面破坏，扭转时沿横截面破坏。应用应力单元体分析方法分析试件在拉伸、扭转时的应力状态，结合试件的破坏形式可判断出试件在拉伸、扭转时的破坏应力均为最大切应力。所以，Q235 低碳钢是以最大切应力为破坏因素的塑性屈服，符合第二类强度理论。将拉伸、扭转时的三个主应力分别代到第三、第四强度理论的相当应力中。在第四强度理论下，试件拉伸破坏时危险点处的相当应力为 $\sigma_{r4} = \sigma_0 = \sigma_{b(\text{抗拉})}$ ，试件扭转破坏时危险点处的相当应力为

$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = \sqrt{3}\tau_{s(\text{抗扭})}$ ，可以看出两种应力状态下的相当应力

基本相等。从而验证 Q235 低碳钢的拉伸、扭转实验适合用第四强度理论校核。

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、150mm 游标卡尺、标准 LY12 铝合金拉伸、压缩、扭转试件。

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。

拉伸、压缩试件都采用标准圆柱体短试件，扭转试件采用两端为扁形标准扭转试件，为方便数据处理，在进行拉伸、压缩、扭转实验前需用游标卡尺分别测量出试件的最小直径（ d_0 ）。

4.2 装夹、加载方案

LY12 铝合金拉伸、压缩、扭转实验的装夹、加载方案可分别参考 Q235 低碳钢、HT200 灰铸铁的拉伸、压缩、扭转实验，此处不再重复。

4.3 数据测试方案

进行拉伸、压缩实验时，试件所受到的拉力、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。进行扭转实验时，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矩轴上的光电编码器转化为电压方波信号，具体可参考 HT200 灰铸铁、Q235 低碳钢的扭转实验。

4.4 数据的分析处理

对于 LY12 铝合金的拉伸、压缩实验，数据采集分析系统，实时记录试件所受的力与变形，并生成力、变形实时曲线及力、变形 X-Y 曲线。图 8.5 为实测 LY12 铝合金拉伸实验曲线，图 8.6 为实测 LY12 铝合金压缩实验曲线。

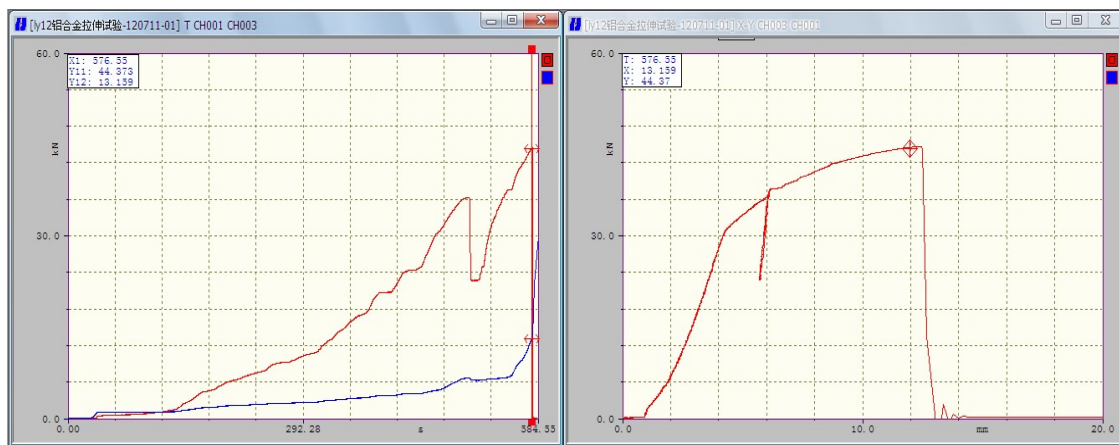


图 8.5 实测 LY12 铝合金拉伸实验曲线

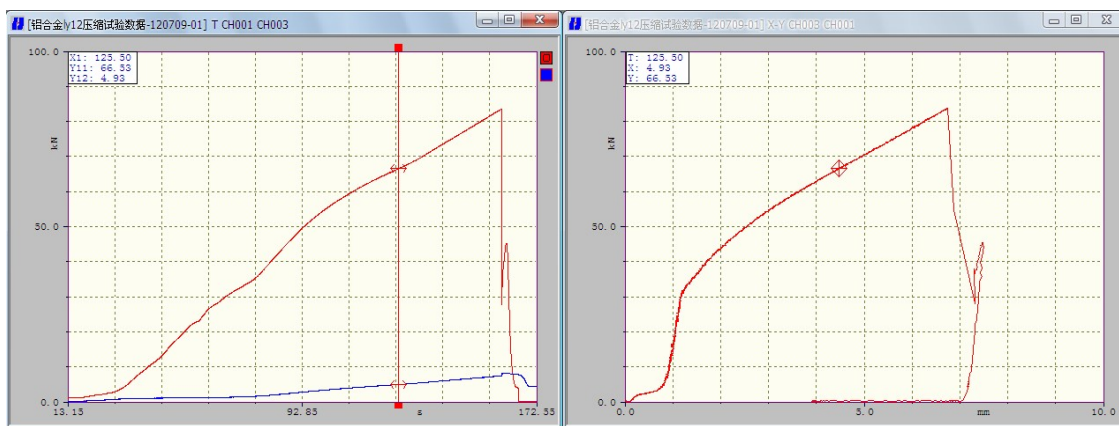


图 8.6 实测 LY12 铝合金压缩实验曲线

在图 8.5 和图 8.6 中左窗口显示的是力、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。右窗口显示的是力、变形的 X-Y 曲线，X 轴为加载力，Y 轴为变形。在左窗口中透过移动光标可分别得到 LY12 铝合金的抗拉极限荷载、抗压极限荷载。

对于扭转实验，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 8.7 为实测 LY12 铝合金扭转实验曲线。

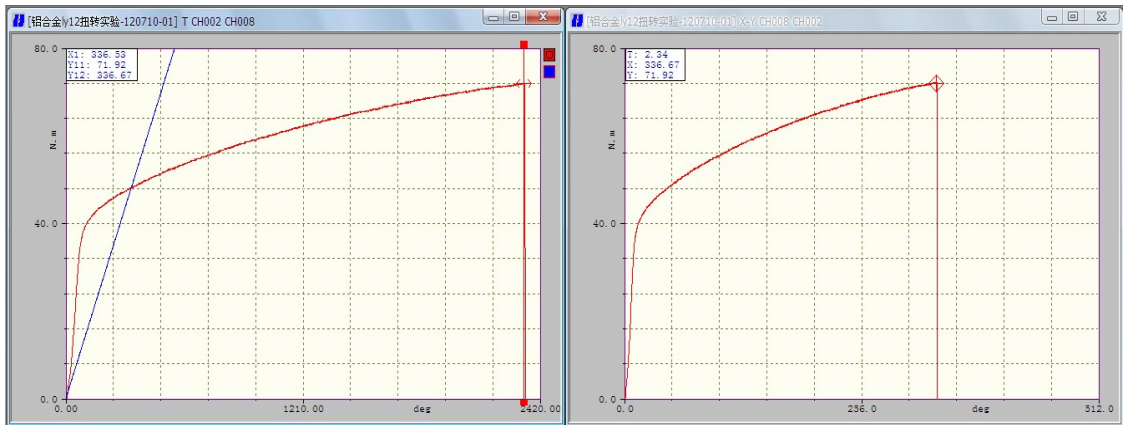


图 8.7 实测 LY12 铝合金扭转实验曲线

在左窗口中，透过移动光标可得到 LY12 铝合金的极限扭矩。

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

拉伸、压缩、扭转实验均采用标准 LY12 铝合金试件，试件形状同 HT200 灰铸铁试件。进行拉伸、压缩、扭转实验之前，用游标卡尺在试件标距长度的中央和两端截面处，按两个垂直方向分别测量拉伸、压缩、扭转试件的直径，选用三处截面算术平均值的最小值 d_0 进行计算。

6.2 连接测试线路

按要求连接测试线路，进行拉伸、压缩实验时，一般第一通道选择测拉、压力，第三通道选择测位移。进行扭转时，一般第二通道选择测扭矩，第七通道进行扭转方向判断，第八通道选择测转角。连接试验机上的接口，连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工作方式相对应。

6.3 设置数据采集环境

本实验包括拉伸、压缩、扭转实验，实验时按拉伸、压缩、扭转实验顺序分别进行。可以通过文件-引入项目，引入所需要的数据采集环境。查阅相关资料，预测各坐标大小范围。然后设置测试相关参数。具体操作步骤参考低碳钢、灰铸铁拉伸、压缩、扭转实验步骤。

6.4 装夹试件、加载测试

拉伸实验时，旋转上夹头套使之与上横梁为铰接状态，调整试验机下夹头套的位置将带有夹头的

试件安装到上下夹头套内，然后进行加载测试。压缩实验时，旋转上夹头套使之与上横梁为固结状态，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，调整至合适状态后进行加载测试。扭转实验时，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，使试件进入下夹头，完成试件的安装后便可进行加载测试，实验时可以通过显示实时数据全貌窗口观测时间扭转全窗口。具体操作步骤可参考低碳钢、灰铸铁拉伸、压缩、扭转实验步骤。

7、分析数据完成实验报告

7.1 验证数据

7.1.1 验证 LY12 铝合金拉伸、压缩实验数据。

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。观察数据的变化规律，拉伸、压缩曲线均无屈服阶段，弹性阶段过后直接进入强化阶段，达到某一值后曲线急剧下降为零。

7.1.2 验证 LY12 铝合金扭转实验数据。

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，LY12 铝合金扭转实验扭矩-转角曲线无屈服阶段，弹性阶段过后直接进入强化阶段，达到某一值后曲线急剧下降为零。

7.2 荷载数据的读取

7.2.1 读取 LY12 铝合金拉伸、压缩实验中抗拉极限荷载 $F_{b(抗拉)}$ 、抗压极限荷载 $F_{b(抗压)}$ 。

在实测铝合金拉伸、压缩实验曲线中，选择并移动单光标，选择左右图光标同步，读出试件的抗拉极限荷载 $F_{b(抗拉)}$ 和抗压极限荷载 $F_{b(抗压)}$ ，将得到的数据填到相应的表格。

7.2.2 读取 LY12 铝合金扭转实验中极限扭矩 T_b 。

在实测铝合金扭转 $T-\phi$ 曲线中，选择双光标，读取极限扭矩 T_b 。

7.3 分析数据

将测得的数据代入公式 (16)、(17)、(18) 得 LY12 铝合金的抗拉强度 $\sigma_{b(抗拉)}$ 、抗压强度 $\sigma_{b(抗压)}$ 及抗扭强度 τ_b 并填入相应的表格。选择合适的强度理论，然后将实测数据代到三种应力状态的相当应力中去，比较是否相等，并推导出材料各强度指标之间的关系。

$$\sigma_{b(抗拉)} = \frac{F_{b(抗拉)}}{\frac{\pi d_0^2}{4}} = \frac{4F_{b(抗拉)}}{\pi d_0^2} \quad (16)$$

$$\sigma_{b(抗压)} = \frac{F_{b(抗压)}}{\frac{\pi d_0^2}{4}} = \frac{4F_{b(抗压)}}{\pi d_0^2} \quad (17)$$

$$\tau_b = \frac{T_b}{W_p} = \frac{T_b}{\frac{\pi d_0^3}{16}} = \frac{16T_b}{\pi d_0^3} \quad (18)$$

HT200 灰铸铁、Q235 低碳钢的分析过程与 LY12 铝合金的相同，可参考以上分析 HT200 灰铸铁、Q235 低碳钢的实验数据，判定它们分别适合用哪一强度理论校核。

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、解决方法及对该实验的改进意见。

8、实验注意事项

8.1、在紧急情况下，没有明确的方案时，请按急停按钮。

8.2、在拉伸、压缩与扭转实验转换时，注意测试线路连接时与各通道的对应关系。

8.3、在引入低碳钢或灰铸铁拉伸、压缩、扭转实验项目后，为更好的测量实验数据，观察实验现象，根据查阅资料，重新设定拉压力、扭矩坐标的最大值、最小值。

8.4、装夹试件时，首先要确定试验机的状态。拉伸时，上夹头套应处于活动状态，但不应旋出过长，夹头套与上横梁垫板之间的间隙在 3—10mm 之间。压缩时，上夹头套应处于固定状态，夹头套与上横梁应紧密接触。

8.5、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。

公式编辑：

$$\sigma_{b(\text{抗拉})} = (1 + \nu) \tau_{b(\text{抗扭})}$$

附录2-1: YDD-1型多功能材料力学试验机

1.概述

YDD-1 型多功能材料力学试验机是针对当前高校材料力学实验教学领域设备陈旧、台套数少的特点而开发的新型实验教学设备,它将传统的拉、压、弯、扭等加载方式组合在一台试验机上完成,并结合现代传感技术及数据采集与处理技术对所有被测参量实现电测量。同时配备先进的数据采集分析和摄像设备,可在实验过程中将实验数据和实验现象同步保存,利于学生在实验后分析实验数据,重放实验现象。配备了网络教学功能,可实现网络同步教学,并为开放式实验教学打下基础。与传统实验设备相比具有以下特点:

1. 最为基本的拉压、扭转、弯扭实验组合在同一设备上完成;
2. 加载采用双向液压油缸提供拉压力加载;
3. 所有被测参量均采用电测量的方式,配有数据采集设备及相应的操作及学习软件;
4. 实时显示各种测量曲线;
5. 配有专为《材料力学》实验教学设计的交变加载梁弯曲、交变加载弯扭杆、交变加载弹性模量、压杆稳定等实验的配件;
6. 油缸活塞杆设有自动反向运行控制及油压保持功能;
7. 单通道采样频率高,最高为 200Hz;

2.技术指标

最大拉伸荷载:	100	kN
最大压缩荷载:	150	kN
拉伸夹头净距:	0~300	mm
压缩垫板净距:	0~255	mm
扭转夹头净距:	50~190	mm
拉伸夹头夹持范围:	$\Phi 10-18$	mm
扭转试件装夹尺寸:	12×20	mm
拉伸荷载分辨率:	1.5/6	kg
油缸活塞杆位移分辨率:	0.012	mm
扭矩分辨率:	0.08/0.32	N*m
转角分辨率:	0.144/0.6	度
测量通道数:	8	
量 程:	$\pm 2.5\text{mV}$ 、 $\pm 10\text{mV}$ 、 $\pm 5000\text{mV}$	
最高采样频率:	200Hz	
准 确 度:	1 级	

3.机构原理

试验机由加载机构、传感装置及数据采集三部分组成:

加载机构:指完成对试件进行装夹、加载的所有相关机构的总称,也称之为主机;

传感装置:指将被测物理量以电信号形式向外传输的各类传感器;

数据采集部分：指对各类传感器输出的电信号进行预处理、采集、保存、分析的装置，硬件部分由 YDD-1 型测试分析仪、微型计算机组成。



图 1 多功能材料力学试验机整机组成

3.1 加载机构

提供最基本的拉伸、压缩、扭转三种加载形式，其它的加载形式如弯曲、弯扭组合等由上述加载形式通过相应的装置转换生成。

拉、压加载由液压油缸提供，扭转加载由电机带动减速机实现。加载装置包括机架、动力装置、装夹装置及控制装置等。

机架为型钢组成的门式结构,由左右立柱、上下横梁及中间支架组成。

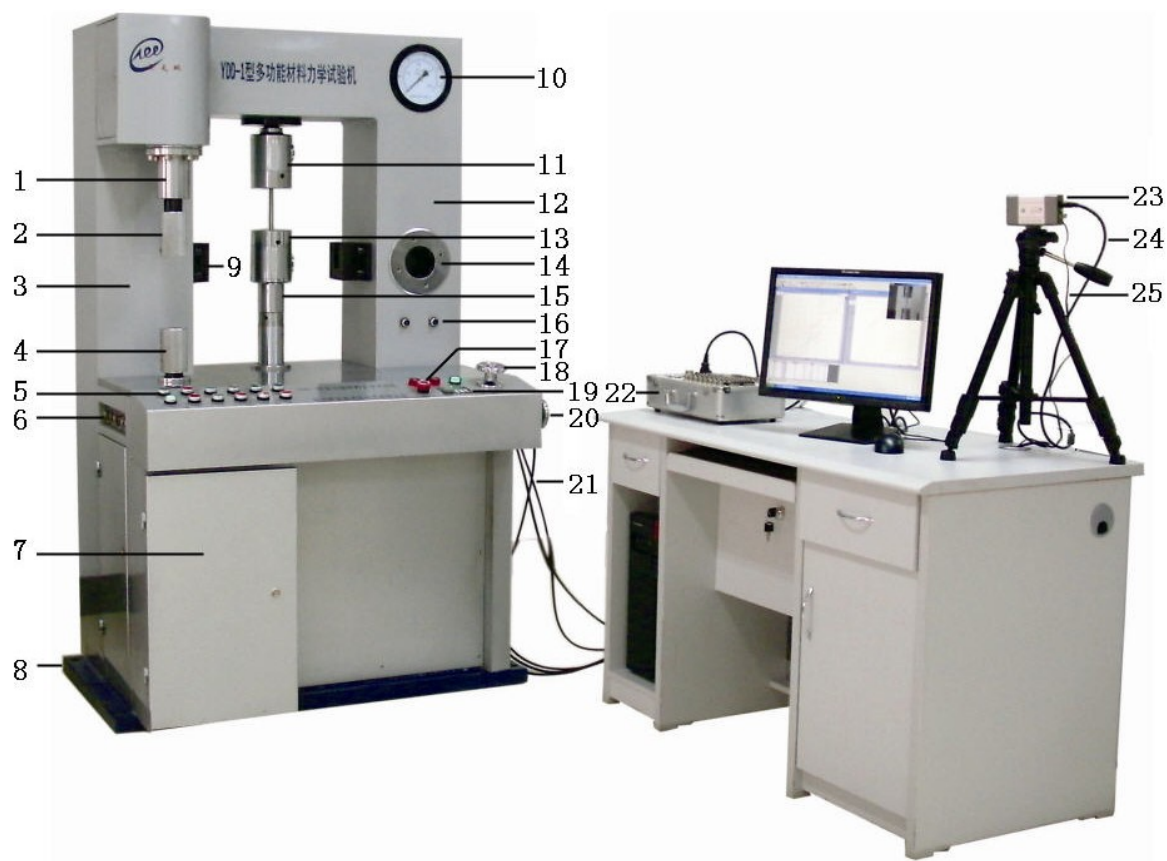
拉压定端固定在上横梁上,带有拉压力传感器的油缸安装在门式结构的下横梁上。

在左立柱上部设置前凸支撑板固定扭矩传感器,扭转上夹头通过扭转轴可在扭矩传感器内上下滑动并传递扭矩,与扭转下夹头相连的扭转减速机安装在中间支架上。

弯曲梁支座固定在两立柱的内侧,可实现铰支、固支两种支座形式。在右立柱中部设有弯扭杆根部固定端安装套。这样,安装不同的试件及夹头,通过油缸活塞杆的上下移动,就实现了拉、压、弯和弯扭组合等加载形式,通过电机带动减速机实现了扭转加载。

泵站部分安装在工作平台的下部右侧,在工作平台前侧左下部设有电气控制箱,控制按钮设置在工作平台的前侧。

拉伸、压缩、扭转实验试件为国标试件,试件夹头以安装方便、体积最小为原则。



1 扭矩传感器	10 液压表	23 扭转调速旋钮
2 扭转上夹头	11 拉、压上夹头	24 回油手轮
3 试验机左立柱	12 试验机右立柱	25 传感器线
4 扭转下夹头	13 拉、压下夹头	数据采集分析系统
5 控制按钮	14 弯扭组合法兰端	高清摄像一体机
6 传感器信号输出插座	15 油缸活塞杆	S 端子线
7 电器柜	16 扩展输出端（备用）	适配器供电线
8 试验机底座	17 急停按钮	
9 梁弯曲支座	18 进油手轮	
	19 20 21 22	

3.2 可实现实验项目简介

3.2.1 拉伸实验：拉伸试件的装夹采用两瓣锥型夹紧方式，实验时首先将上夹头旋松为铰接状态，然后再将装有夹头的试件安装在上下夹头内（一般先装上夹头部分），当控制油缸活塞杆带动下夹头下行时，试件便受到拉力。



拉伸试验

3.2.2 压缩实验：采用具有自动找正功能的球面垫板，实验时将试件找正放在垫板中央，当控制油缸活塞杆带动下夹头上行时，试件便受到压力。



压缩实验（上部承压板固结）

3.2.3 扭转实验：试件装夹采用将两端铣平的试件直接插入带锥矩形槽口的方式，带锥矩形槽口对试件具有轴向定位及自动找正的功能，启动正向或反向扭转，试件便受到扭矩。



扭转实验

3.2.4 测定材料弹性模量和泊松比电测实验：试件为带有偏心加载孔矩形截面的试件，可进行拉压交变加载及偏心拉、压实验。试件装夹及加载控制同拉伸实验。



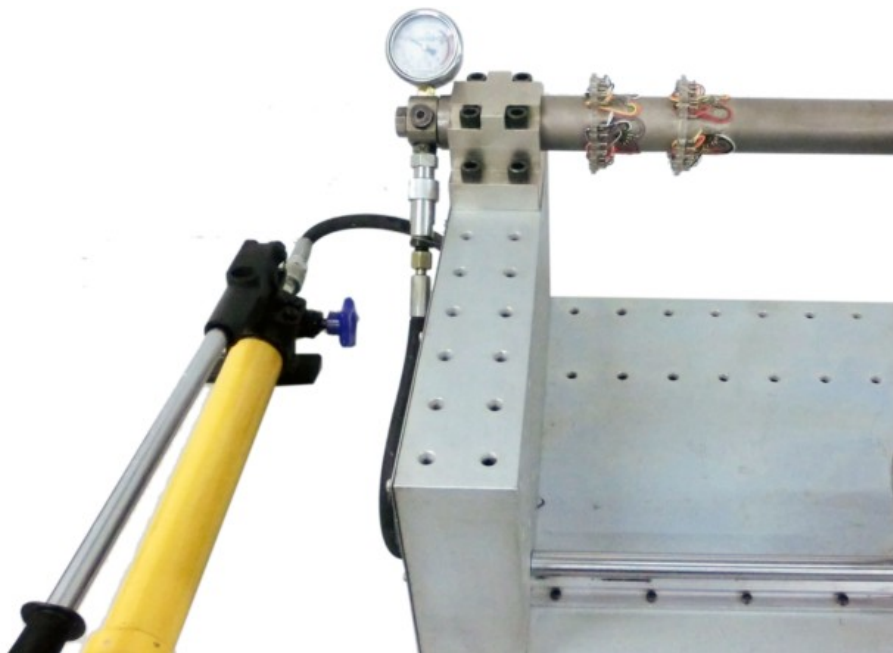
弹性模量和泊松比电测实验

3.2.5 弯曲正应力电测实验：采用四点弯曲梁试件，两端通过销轴与弯曲支座相联，加载分配梁通过销轴与油缸活塞杆相联接，这样当控制油缸活塞杆上下移动时，梁便受到反复弯曲加载。



弯曲正应力电测实验

3.2.6 弯扭组合主应力与等强度梁电测实验：



弯扭组合主应力与等强度梁电测实验

3.2.7 压杆稳定实验：压杆失稳是压杆稳定平衡状态的改变，压杆失稳的过程是压杆的稳定平衡状态由直线平衡状态向弯曲平衡状态改变的过程，若失稳过程中荷载可控，压杆将建立弯曲平衡状态，其承载力为临界荷载；若失稳过程中荷载不可控，压杆将无法建立弯曲平衡状态，横向变形持续增加直至压杆屈服破坏。



带侧向支撑的压杆稳定实验

3.3 加载控制

控制装置包括电气及液压控制，设有：

- ①电源开关控制；
- ②紧急停止控制；
- ③油缸活塞杆上下行方向控制；
- ④油缸活塞杆（上下行）自动反向控制；
- ⑤油缸活塞杆上下行速度控制（进油手轮）；
- ⑥油缸压力控制（压力控制手轮）；
- ⑦正反向扭转控制；
- ⑧正反向扭转自动换向控制；
- ⑨转速调节控制等。

其中“油缸活塞杆上下行限位控制”、“油缸活塞杆自动反向控制”在弯曲正应力电测实验、弯扭组合主应力电测实验中能对被测试件起到较好的安全保护及自动反向加载的作用。

3.4 传感部分

采用各种类型的传感器将各种非电量转化成电量来测量。主要包括以下传感器：

- ①拉、压力传感器、
- ②油缸活塞杆位移传感器、
- ③扭矩传感器、

④转角光电编码器、

⑤应变计。

拉、压力传感器：采用轮辐式传感器，一端固定在油缸底部，一端固定在试验机底板上，可直接测量拉压力的大小及方向，即可直接测量试件所受荷载的大小。

油缸活塞杆位移传感器：采用差动变压器式位移传感器，采用内装的形式，一端固定在油缸底部，一端与活塞杆相联，输出为 $-5V\sim+5V$ 伏特电压信号。

扭矩传感器：采用中空式结构形式，法兰端固定在左立柱顶端，为扭转的定端，敏感元件通过滑轴与扭转固定夹头相联，输出为电阻应变的形式。

转角光电编码器：采用增量式空心轴光电编码器，动端安装在扭转减速机输出轴上，定端固定在机架上，以输出方波的数量反映转角的大小。

应变计：采用 BE 系列薄式应变计，主要用于材料弹性模量和泊松比的实验、扭转测 G、弯曲正应力电测实验、弯扭组合主应力电测实验、压杆稳定实验中应变的测试。

3.5 数据采集与处理部分

数据采集与处理部分采用前置机与计算机相结合的方式。前置机为 YDD-1 数据采集分析系统，设置八个通道（CH），每个通道均可对应变、电压进行测量，且可设置不同的比例系数、常量等，以适应不同种类、不同系数的被测量。

其中第 7、8 通道又可用于扭转实验时对转角进行测量，7CH 用于正反转判断，8CH 用于转角脉冲测量。

YDD-1 数据采集分析系统实时将测得数据传输给计算机，计算机则利用其高速运算功能对采集来的信号进行后续处理，以实时曲线、X-Y 函数曲线、棒图等方式显示测量结果，并可以转化成多种格式的数据文件。

为方便双向加载的自动转换及确保实验的安全，设置了通道上下限报警功能，可任选一个通道作为报警通道，当选择拉压自动控制后，报警时，油缸活塞杆会自动反向运行；当选择扭转自动控制后，报警时，扭转电机会自动反向运行；在未选择自动控制的情况下，报警时，当前的动作（拉、压或扭转）停止。

4. 操作步骤

本试验机为多功能试验机，每项实验虽（试件的类型、加载的方式、测量的参量及实验过程）各不相同，但都由：准备试件、测量试件原始参数、系统工作压力调定、装夹试件、连接测试线路，设置采集环境、设定限位、加载测试、后续处理等全部或几部分组成。

4.1 准备试件

为利于反映材料在受力状态下的力学性能，不同的实验对试件有不同的要求，合理的试件形状及加载测试方案是成功完成实验的前提。

4.2 测量试件原始参数

测量试件与该实验有关的原始数据，并做好记录。

4.3 系统工作压力调定

对于非破坏性实验，如纯弯梁实验等为防止由于学生误操作导致的试件损坏，须将系统的压力调至安全范围内。

首先根据不同的实验需要计算安全荷载大小，并调整系统油压。如弯扭组合实验极限承载力不超

过 15kN，为保证试件及实验设备的安全，应将液压系统的最大输出荷载调至小于 15kN。调整时，打开加载控制手轮至常用加载位置，轻轻关闭压力控制手轮，将油缸上行或下行至极限位置，通过调节压力控制手轮开口的大小，将压力表的读数调整至指定值。

试件装夹时应保持压力控制手轮的位置不动，实验过程中若发现荷载不足或过大，可轻轻旋紧或旋松压力控制手轮，以调整系统的压力，但调节过程要缓慢进行，并确保在调节过程中，进油手轮处于打开的位置，因为只有在进油手轮处于打开位置的时候，压力表指示的压力才是真正的系统压力。

4.4 装夹试件

试件的装夹是试件加载的前提，不同类型的实验试件的装夹方式不同。本试验机试件夹头可以满足实验教学用标准试件的安装要求，并以安装方便、体积最小为原则：

- ① 伸试件的装夹采用两瓣锥型夹紧方式；
- ② 扭转试件装夹采用将两端铣平的试件直接插入带锥矩形槽口的方式；
- ③ 定材料弹性模量和泊松比实验的试件采用螺母与凸台交替受力的方式；
- ④ 双向弯曲正应力电测实验、双向弯扭组合主应力电测实验、双向等强度梁的加载均采用销轴联接的方式；
- ⑤ 压杆稳定实验的加载同压缩实验。

4.5 连接测试线路

根据不同的测试任务及通道的特性，连接相应的测试线路。

仪器的量程：

1、2 通道：2.5/10mV；其余通道：10/5000mV。

工作滤波频率为 1-7 通道 28Hz，8 通道 56 Hz。

需要注意的是：在扭转实验时，7CH 为转向判断通道，需连接转向判断电压通道，8CH 为转角脉冲测试通道，需与转角脉冲通道相连接。

4.6 设置采集环境

采集准备包括：采样参数的设置、通道参数的设置、窗口参数（数据显示方式）的设置等。在试件处于非受力状态时，进行平衡及清零处理，确认满足要求后启动数据采集。

采样参数的设置包括：

加载类型（拉压/扭转）、采样频率、实时压缩时间、报警通道及参数的选择等。其中，报警通道及参数的选择对于保证实验的安全，提高实验的自动化程度有着重要的作用。报警时，采集设备会输出一开关量，用于控制油缸停止或反向运行。设置报警参数时需特别注意报警参数与报警动作的协调性。



4.7 安全设定

在所有实验过程中，操作人员都应在停止试验机运行后，结束计算机数据采集。

对于小荷载非破坏性实验（如压杆稳定等），或交变加载的实验（如弯扭组合实验、纯弯梁实验等）为防止由于学生误操作导致的试件损坏，实验前须将系统的压力调至安全范围内。方法参见 4.3。

数据采集分析系统中还设置有同步停止辅助功能：当实验人员首先停止数据采集时，数据采集分析系统会自动发送一个电压控制信号，使运行中的试验机油缸活塞杆停止动作 5 秒钟并报警，提示操作人员关闭进油手轮，避免试件过载。

注意：操作者仍然应该在关闭试验机后，停止数据采集。

这样，对于一个实验就设置了“系统工作压力”、“通道报警”两级保护措施。

4.8 加载测试

在门式框架内相对于试验机上横梁而言，油缸活塞杆下行便产生拉的趋势；油缸活塞杆上行便产生压的趋势。相对于扭转定端，当扭转电机启动后便产生一扭转的趋势。不同的实验加载类型各不相同，但基本的加载方式仅为拉、压及扭转。其它类型的加载如梁弯曲、弯扭组合等都由基本的拉、压加载方式直接或间接实现。所以对试件的加载的控制过程实际上是控制油缸活塞杆上、下运行及扭转电机启动、停止的过程。

4.8.1 拉、压加载

确定油缸活塞杆上、下行状态的控制元素有：油缸活塞杆运行方向、油缸活塞杆运行速度、工作压力、限位报警后是否自动换向等。其中，油缸活塞杆运行方向、油缸活塞杆运行速度、工作压力是必选项。

对应的电气及液压控制元件为：“压缩上行”按钮、“拉伸下行”按钮、“油泵启动”按钮、“油泵停止”按钮、“进油控制”手轮、“压力控制”手轮、“自控启动”按钮、“自控停止”按钮。

各电气及液压控制元件的具体功能为：

① “油泵启动”按钮：按下此按钮，油泵启动；

② “油泵停止”按钮：按下此按钮，油泵停止；

③进油控制手轮：控制油缸活塞杆上、下行的速度。逆时针旋转加载速度加快，顺时针旋转加载速度减慢，直至关闭；

④压力控制手轮：控制拉、压油缸的最大油压。顺时针旋转压力增大，直至关闭压力最大；逆时

针旋转压力减小；

⑤“压缩上行”按钮：无论活塞杆当前是停止或下行状态，按下活塞杆上行按钮，油缸活塞杆运行时都将向上运行；

⑥“拉伸下行”按钮：无论活塞杆当前是停止或上行状态，按下活塞杆下行按钮，油缸活塞杆运行时都将向下运行；

⑦拉压自控按钮：按下此按钮，油缸活塞杆运行限位动作后自动转换运行方向。即当上行限位器动作后，油缸活塞杆自动下行，反之亦然。

4.8.2 扭转加载

确定扭转加载的控制元件有：扭转方向、扭转启动、停止等。

对应电气及液压控制件为：“正向扭转”按钮、“反向扭转”按钮、“加载停止”按钮。

各电气控制元件的具体功能为：

“正向扭转”按钮：按下此按钮，扭转电机正向（逆时针）扭转加载；

“反向扭转”按钮：按下此按钮，扭转电机反向（顺时针）扭转加载；

“加载停止”按钮：按下此按钮，正在扭转的电机将停止；同时正在运行的油缸活塞杆将停止运行；

“扭转自控按钮”：按下此按钮，扭转报警动作后自动反向扭转；

“扭转调速”转轮：顺时针旋转电机转速加快，反之降低。操作面板上匹配有电机供电频率数显窗口。实验时可根据不同实验阶段进行相应调整。



扭转调速面板

附录2-2：动静态数据采集分析系统

型号：YDD-1 型

生产厂家：烟台新天地试验技术有限公司 江苏东华测试技术股份有限公司



YDD-1 型数据采集分析系统

1、概述：

YDD-1 型数据采集分析系统是由烟台新天地试验技术有限公司和江苏东华测试股份有限公司联合研制的一款针对本科实验教学的动静态数据采集分析系统。该系统由数据采集箱、微型计算机及支持软件组成，可自动、准确、可靠、快速测量大型结构、模型及材料应力试验中多点的静态及变化缓慢的应力应变值。广泛应用于机械制造、土木工程、桥梁建设、航空航天、国防工业、交通运输等领域。若配接适当的应变式传感器，也可对多点力、压力、扭矩、位移、温度等物理量进行测量。

特点：

- * 和笔记本电脑的1394口进行数据通讯, 最大程度上满足了对便携式仪器的要求, 可方便地应用于野外测试;
- * 以PC机为基础的硬件和软件环境, 从应变计到实验报告, 试验结果一次生成;
- * 兼容中文视窗 WinNT/2000/XP/Win7 操作系统;
- * 每通道独立放大器, 大大提高了抗干扰能力;
- * 多通道并行同步采样;
- * 直流供桥, 自动平衡;
- * 内置 $120\ \Omega$ 标准电阻, 用户可方便完成全桥、半桥、1/4 桥的状态设置;
- * 每台仪器之间的扩展距离最大为 100m, 方便分布式采集;
- * 平衡结果保存对意外断电具有恢复功能;
- * 每台计算机最多可控制 128 个测点。

2、技术指标：

- 2.1 测量点数及控制方式：每台采集箱 8 点，每台计算机可控制 16 台采集箱；
- 2.2 供桥电压：2V(DC)；
- 2.3 每测点采样速率 (Hz)：1、2、5、10、20、50、100、200；
- 2.4 满度值 (测量范围)： $\pm 10000 \mu \varepsilon$ 、 $\pm 50000 \mu \varepsilon$ (电压输入 $\pm 10\text{mV}$ 、 $\pm 50\text{mV}$)；
- 2.5 示值分辨率： $1 \mu \varepsilon$ (电压输入 $1 \mu \text{V}$)；
- 2.6 测量方法：应变片、传感器；
- 2.7 软件功能采集方式：手动采集、连续采集、监测采集、触发采集
- 2.8 测量内容： $\mu \varepsilon$ 、kg、N、kN、t、MPa、mm、 $^{\circ}\text{C}$ 等 (用户可自定义工程单位)；
- 2.9 桥式传感器下拉压力及位移：0.01%/F.S
- 2.10 零漂： $3 \mu \varepsilon / 1\text{h}$ (输入端短路, 最高灵敏度, 恒温)；
- 2.11 自动平衡范围： $\pm 10000 \mu \varepsilon$ (应变计阻值误差 $\pm 2\%$)；
- 2.12 适用应变计阻值：50~10000 Ω 任意设定；
- 2.13 长导线电阻修正范围：0.0~100 Ω ；
- 2.14 应变计灵敏度系数：1.0~3.0 自动修正；
- 2.15 计算机接口：1394；
- 2.16 电源：220V $\pm 10\%$ 50Hz $\pm 2\%$ ；
- 2.17 采集箱尺寸：350mm(长) $\times$ 270mm(宽) $\times$ 105mm(高)。

3、工作原理：

3.1 系统组成：

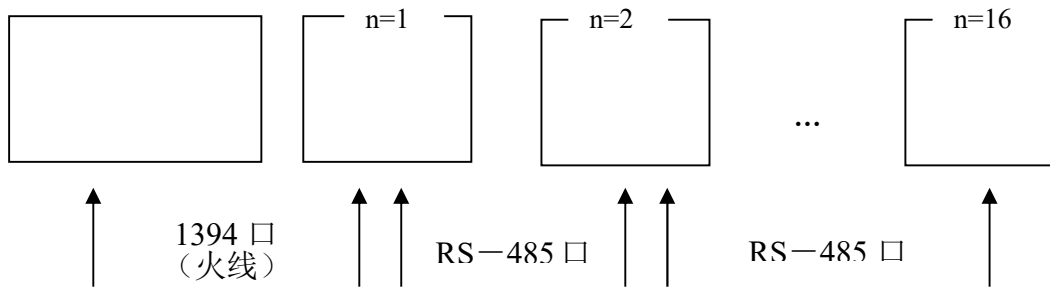
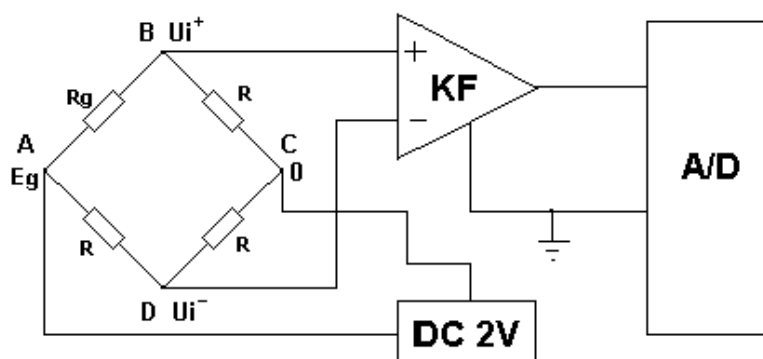


图 1 系统框图

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



图中: R_g 为测量片电阻, R 为固定电阻, K_F 为低漂移差动放大器增益,

因 $V_i = 0.25 E_g K \varepsilon$,

即 $V_o = K_F V_i = 0.25 K_F E_g K \varepsilon$,

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

式中: V_i 为直流电桥的输出电压

E_g 为桥压 (V)

K 为应变计灵敏度系数

ε 为输入应变变量 ($\mu \varepsilon$)

V_o 为低漂移仪表放大器的输出电压 (μV)

K_F 为放大器的增益

当 $E_g = 2V$ $K = 2$ 时 $\varepsilon = V_o / K_F$ ($\mu \varepsilon$)

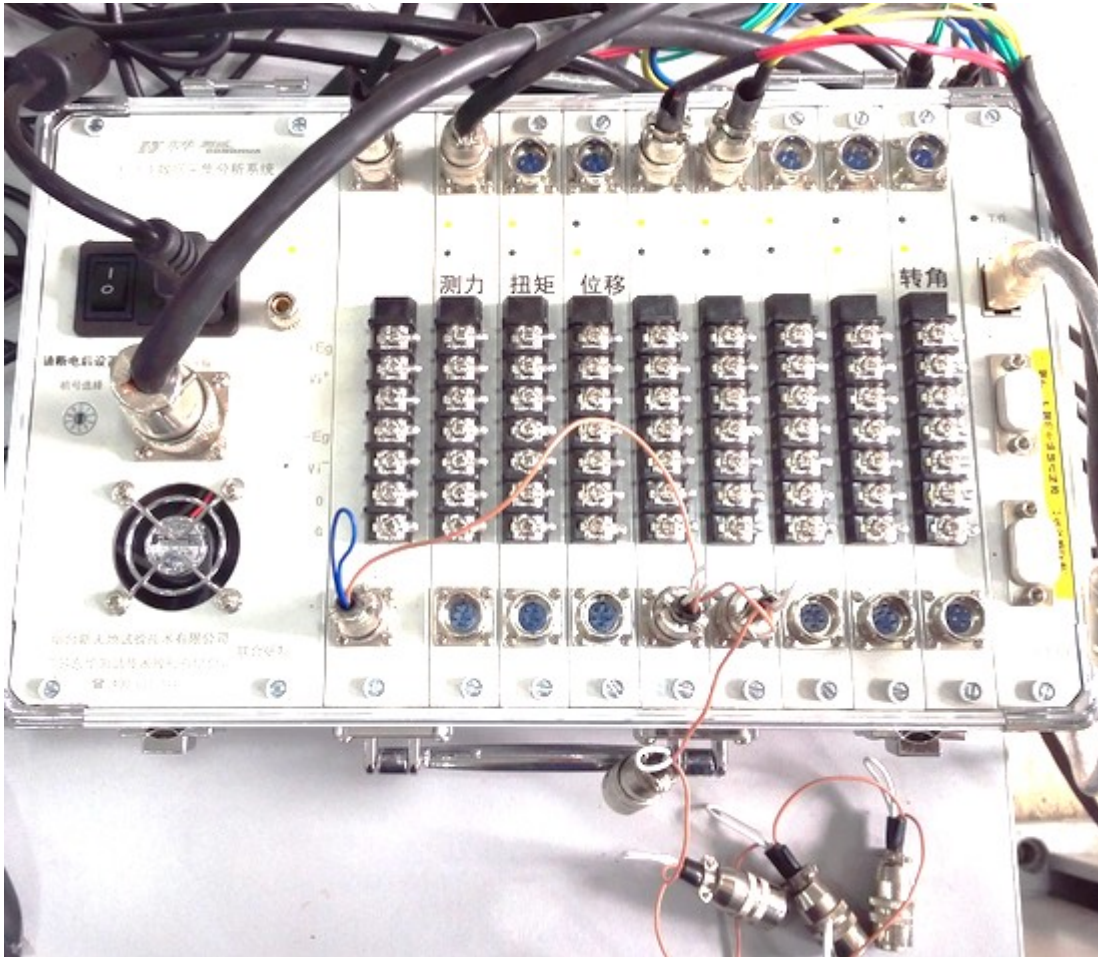
对于 1/2 桥电路

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

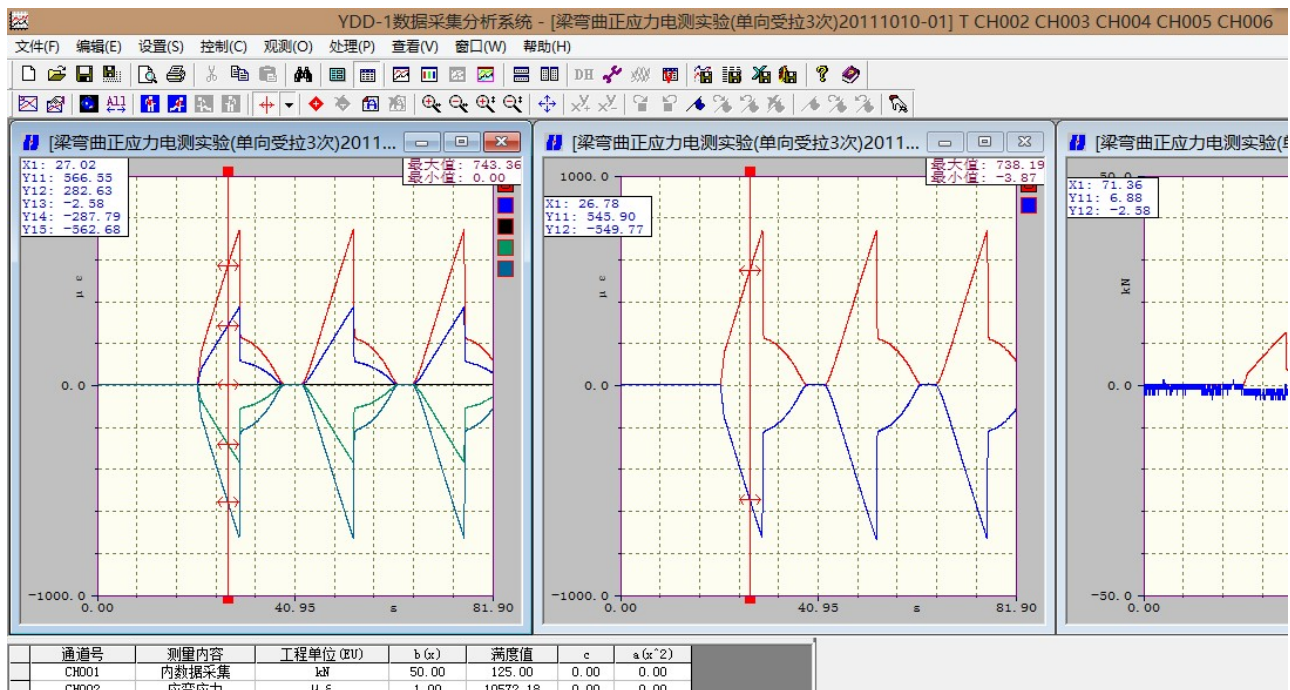
对于全桥电路

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

这样, 测量结果由软件加以修正即可。



配套使用 1/4 桥快速插头可快速准确完成 1/4 桥接桥



软件操作界面