

过程装备与控制工程 专业实验指导书

郑州大学化工实验中心
过程装备与控制工程实验室

2007年10月

前 言

化工过程机械专业是一个传统的工科专业，为国家的经济建设培养了许多优秀的专业技术人才，为我国的石油化学工业的建设与发展作出了突出贡献。随着经济建设的发展及工业结构的调整，对传统专业也进行调整与改革，从1998级起，全国“化工过程机械”专业改为“过程装备与控制工程”专业，并增设了有关控制方面的课程，以培养面向21世纪的知识面广、创新能力强、综合素质高的大学生。

为实现“过程装备与控制工程”专业的本科教学目的，培养“厚基础、宽专业、高素质、高能力”创新人才，对专业课程体系进行了构建，对专业实验进行了改造与建设，提升了专业实验装备技术水平，构建了以“过程设备及控制系统”为专业特色的综合实验系统，以全面培养学生的工程素养，提高学生科技创新能力。

过程装备与控制工程专业的实验装置，有两套多功能综合实验装置（内外压力容器基本实验综合装置，换热器多功能综合实验装置）与单台实验装置若干。

内外压力容器基本实验综合实验项目有：

- (1) 内压薄壁容器应力测定实验；
- (2) 外压薄壁容器稳定性实验；
- (3) 离心泵恒转速性能测定实验；
- (4) 恒流量控制实验；
- (5) 恒压力控制实验；
- (6) 液位对象特征测定实验。

换热器多功能综合实验项目：

- (1) 换热器壳体应力测定实验；
- (2) 换热器管程和壳程压力降测定实验；
- (3) 换热器换热性能实验；
- (4) 流体传热系数测定实验；
- (5) 离心泵恒转速性能测定实验；
- (6) 恒压力控制实验；
- (7) 恒流量控制实验；
- (8) 换热器出口温度串级控制实验。

通过本课程的实践教学环节，使学生加深对专业课程有关内容的理解与掌握，掌握专业实验方法和一些的基本测试技术，提高学生的动手能力和工程实践能力，培养学生观察问题、分析问题与解决问题的能力，从而全面提高和培养学生的科技创新与实践创新能力，同时也培养学生的团结协作能力。

本课程的学习要求为：要求学生实验前预习，明确实验目的、实验原理、实验步骤与方法，了解实验所使用的装置与仪器。在实验过程中，积极听实验指导教师的讲解，并主动思考，实验操作积极主动，细致认真，实验记录完整。实验后及时提交实验报告。对实验报告的要求，根据每个实验的内容特点及有关要求来完成，做到认真规范，内容详实。

实验报告要求：

- 一，采用统一格式的封面；
- 二，实验报告按要求顺序装订；
- 三，每项实验报告内容，一般应包括一些内容：
 - 1.实验目的；
 - 2.实验原理；
 - 3.实验装置（要求绘出实验装置示意图，并对各部分进行说明）；
 - 4.实验方法与步骤、实验数据（实验各种测定数据记录值，建议以表格的形式）；
 - 5.数据处理与分析（进行有关分析与计算，包括理论值与实验值的误差分析）；
 - 6.结果分析、讨论及建议。

参与本次实验讲义修订工作的主要教师有：刘利平、李洪亮、王定标、张循良、陈俊英等，此外还有一些专业教师对本实验课程提出了一些建议，在此表示感谢。本书编写过程中参阅的资料有：宋树波等主编《过程装备与控制工程专业实验》、贾高顺《化工机械专业实验》、北京化工大学编写的《过程装备与控制工程专业多功能综合实验指导书》及各种仪器说明书等。

编写时间仓促及编者水平有限，难免有不足和欠妥之处，恳请读者提出宝贵意见。

编者

2007年10月

目 录

实验一	内压薄壁容器应力测定.....	4
实验二	振动与隔振实验.....	9
实验三	超声波探伤.....	14
实验四	空气压缩机性能测定实验.....	22
实验五	外压薄壁容器稳定性实验.....	31
实验六	恒压力控制实验.....	34
实验七	液位对象特征测定实验.....	38
实验八	换热器管程和壳程压力降测定实验.....	46
实验九	换热器换热性能实验.....	48
实验十	流体传热系数测定实验.....	79

实验一 内压薄壁容器应力测定

一、实验目的

1. 了解薄壁容器在内压的作用下，容器壳体、封头的应力分布情况；
2. 验证薄壁容器应力计算的理论公式；
3. 掌握应力电测法的实验操作技能，包括应变片粘贴、灵敏系数和横向效应系数的测定，了解电阻应变仪等仪器的工作原理、使用方法，内压薄壁容器应力测量。

二、实验内容

对各种典型的顶盖、筒体及其不连续处的应力进行测试。顶盖可以是椭圆形、半球形、锥形、平板等，可选其中的一、两种进行测试。

三、实验原理及方法

本实验是测定内压薄壁容器外壁上的应力，并与理论计算值进行比较，分析产生误差的原因，然后对实验结果进行讨论。

1. 实验前的准备

- (1) 了解测试对象的技术参数，包括几何尺寸、材料性能及机械性能指标。
- (2) 测点选择 在容器外壁上给定的区域内选择测量点。
- (3) 布片方案 由于本实验要测量的容器外表面均处于平面应力状态，而且两主应力方向已知，故每测量点的布片数为两片，其方向分别为径向和周向。
- (4) 应变片桥接方式 因容器是受单一载荷作用，而且是在室内进行测试，故采用同一温度补偿片的半桥测量方式，并由预调平衡箱实现多点测量。

2. 现场实验工作

- (1) 测点表面的打磨、划线和清洗脱脂处理；
- (2) 应变片的粘结，应变片与连接线的焊接与固定；
- (3) 应变片与应变仪的连接；
- (4) 静态电阻应变仪、预调平衡箱的调整与操作；
- (5) 容器加载测量，记录数据。

3. 数据处理及应力计算

(1) 原始测量数据整理

首先进行原始数据的整理，并进行系统修正误差计算。如进行灵敏系数K值的计算，应变片横向效应的修正计算，连接导线电阻的修正计算，电阻应变片不符合标准值的修正计算。上述这些计算，根据实际情况选用。

(2) 应力计算公式

根据修正计算后的主应变，可计算出设备的主应力，应力计算公式为：

$$\sigma = \frac{E}{1-\mu} \left(\epsilon_1 + \mu \sum_{i=2}^n \epsilon_i \right) \quad (1-1)$$

$$\sigma = \frac{E}{\pi} \left(\sum_{i=1}^n \epsilon_i \right) \quad (1-2)$$

(3) 测量误差计算

根据压力容器理论，分别计算各部分的理论应力值，并计算其相对误差：

$$\delta \sigma = \frac{\sigma - \sigma_{理}}{\sigma_{理}} \cdot 100\% \quad (1-3)$$

四、实验装置

实验装置如图1-1所示。

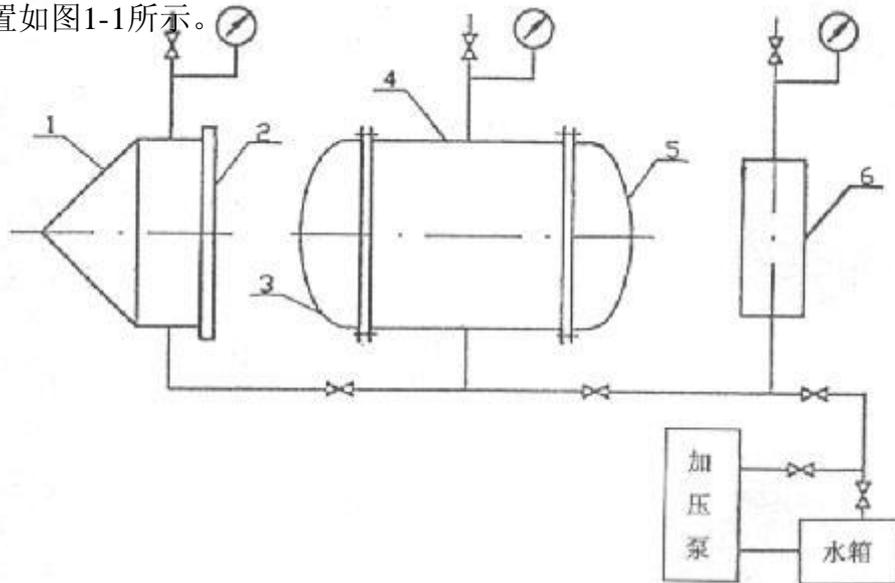


图1-1 内压力容器应力测定实验装置

- 1—45℃锥形封头（内径400mm，厚度3.55mm）； 2—平盖（直径400mm，厚度21mm）；
 3—标准椭圆形封头（内径400mm，厚度4.78mm）； 4—圆形筒体（内径400mm，厚度4.78mm）；
 5—标准蝶形封头（内径400mm，厚度4.78mm）； 6—圆筒体（内径158mm，厚度2.5mm）

实验中所用设备的材料均为碳钢。

实验中所用的仪器主要有：静态电阻应变仪、欧兆表以及贴片工具等。

五、实验步骤

1. 贴应变片。根据选择的测点和布片方案，进行表面打磨、划线定位，清洗表面脱脂，粘结应变片，并对其进行固定及防护等。
2. 检查贴好的应变片质量。用欧兆表（即摇表）检查应变片电阻丝与金属工件表面之间的绝缘度。其绝缘电阻不得低于100MΩ。
3. 连线。用相同长度与相同型号的导线，连接应变片与静态应变仪，导线进行固定。

静态应变仪上连线方式按照“单臂”连接的方式。经指导老师同意后，接通应变仪电源，预热半小时左右。

4. 检查调整静态应变仪各测点的灵敏度系数K值。

5. 加压测量。关闭有关阀门，对被测容器利用试压泵进行加压至0.1Mpa，测定各测量点的应变值读数。

6. 按步骤4，依次进行加压至0.2MPa、0.3MPa和0.4MPa，测定各种载荷下的应变值。在对实验容器每次进行加载时，应注意卸载后，再加载，以便消除应变片初受载荷的永久变形，使滞后误差趋于稳定。

7. 测量结束后，系统卸载。

六、实验报告内容要求

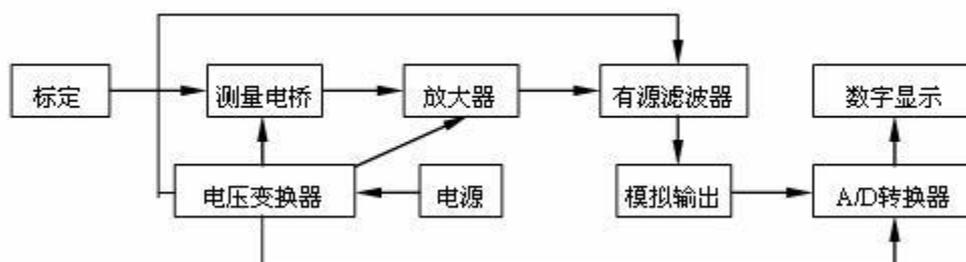
1. 容器测点位置分布图；
2. 各种载荷下的时实际测量的应变读数；
3. 根据测试条件进行系统误差的修正计算；
4. 各测点应力值的计算；
5. 用压力容器理论计算各测点的应力理论值；
6. 测量值的误差计算；
7. 实验结果讨论（主要为产生误差的原因分析）。

七、CM-1A-20型数字静态应变仪使用说明

CM-1A-20型数字静态应变仪北戴河电子仪器厂CM系列静态应变仪的一种，它主要用于实验应力分析及静力强度研究中测量结构及材料任意点变形的应力分析，其主要特点是：测量点数多，操作简单，携带方便，可进行单臂、半桥或全桥测量，K值连续可调，是应力测试的仪器。配用相应的传感器，可测力、压力、扭矩、位移等物理量。

1. 结构与工作原理

CM-1A-20数字静态应变仪由测量桥，放大器，滤波器，A/D，单片机，数字显示，电源等部分组成。其原理方框图如下：



2. 主要技术指标

测量范围：0~19000 $\mu\epsilon$ ；分辨率：1 $\mu\epsilon$ ；基本误差：测量值的 $\pm 0.2\% \pm 2$ 个字；稳定性：

A: 零点漂移 $< \pm 4 \mu\epsilon / 4h$; 温度漂移 $\leq \pm 1 \mu\epsilon / C$; 灵敏度变化: 测量值的 $\pm 0.1\% \pm 2$ 个字; 应变系数: K值可调范围为0.5-9.9; 主机可测点数: 20点; 预调平衡范围: 约 $+19000 \mu\epsilon$; 适调应变电阻值范围: 120~1K Ω ; 可方便的进行单臂、半桥、全桥测量; 桥压: $2V_{DC}$; 电源: AC220V $\pm 10\%$ 50Hz; 工作环境: 0 $^{\circ}C$ ~40 $^{\circ}C$ 相对湿度30%~85%; 外型尺寸: 330mm(D) \times 370mm(W) \times 170mm(H)

3. 具体使用说明

本仪器共20点, 单臂时10点一个公共补偿。在确定采用那种测量方法(单臂测量、半桥测量、全桥测量)后进行连线, 具体要求是:

① 单臂测量的联接: 顶部面板的“变换器(单臂)”插头插好; 补偿接线端子的A₀与D₀之间连接补偿应变片, 10个点的A、B间接测量应变片。

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

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

4. 按键功能及使用

面板图及各按键功能如下:



按一次“总清”键, 是对各测点自动进行清零。

按一次“复零”键, 是对面板上正显示的测点进行清零。

按一次“巡检”键, 是对各测点自动循环一次进行测量。

按一次“打印”键, 是对巡检测量的值通知微型打印机打印数据。打印步骤: 接通仪器后面板打印机电源开关, 前面板打印机灯亮, 巡检、打印出纸停止后, 按打印机面板“SEL”键, 灯灭 后按“LF”键一下, 打印纸上面的数据全部出来后, 再按“LF”键一下, 按“SEL”键灯亮后等待下一次打印。

“测量”键是一个双功能键, 开机后数字表显示测点号及其初始应变值, 按一次该键数字表显示测点号及K值(应变值与K值显示最显著的差别是应变值无小数点, K值显示是2.000左右的数值)。

“P / K增”和“P / K减”两个功能键与“测量”键配合使用，来调节测点、K值大小设置，例如，若“测量点P”显示为“01”，按一下“测量”键，显示第1点K值为2.000，而实际使用的应变片K值是2.180，这时按“P / K增”键不放，K值将以0.001增量增长，为了力口快调节速度，在增长5个数值后，K值将以0.005增量增长，增长5个数值后，K值将以0.010增量增长...，数据直至接近显示2.180后，松开“P / K增”键一下，再按“P / K增”或“P / K减”键微调节K值到显示2.180为止。按一下“测量”键后K值可永久保存。

5. 测量

连连接好后打开电源，仪器进行自检，8位数码管发亮，数字面板表左部1~2点显示测点点数P，第3点显示正负号，第4~8点显示应变值或K值(仪器的应变片灵敏度系数)。预热半小时，检查每个测量点初始不平衡值，如是较小不平衡数值时，表示此点连接正确。出现大的不平衡数值时，应查明应变片或导线是否断、短路或其他异常情况，根据具体情况排除故障。经此检查正确后按“总清”键进行清零。清零后给测件加载，加载完成后按“巡检”键，仪器以每秒约1点的速率进行测量，可按“打印”键打印出数据，也可按“P / K增”和“P / K减”键从数字表读数。

6. 应变式传感器与本仪器的配合使用举例

例如压力传感器与本仪器的配合使用：第一次使用前应进行一次标定，把传感器的桥压输入端的两条线接往CM-1A静态应变仪的某一点(如第10点)的A、C端，传感器的电压输出端的两条线接往这一点的B、D端。将表头调到显示第10点的数值，按“复零”键后，用标准压力机给出一标准力，如20KN，查看第10点显示的数据比标准力值大还是小，如果大于标准力，按照调节K值的方法调大K值，如果小于标准力，调小K值，按“测量”键返回到显示应变值状态查看数据，如未达到标准值，重新调整K值。通过对K值的几次修改直至数字表头上第10点的显示值与标准值相同后，此时第10点的K值就是对应此传感器的专用系数。实际测量时先将第10点复零，给传感器一定压力后，第10点的显示值即是传感器所受压力值。

7. 使用注意事项

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

(2) 仪器应尽可能在0℃~40℃的温度环境中使用，避免阳光强烈照射。

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

(4) 要求测量片与温度补偿片的阻值尽量选用一致，所用的连接导线为屏蔽电缆，线径和长度相同，这样便于桥路平衡及减少干扰。

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

实验二 振动与隔振实验

一、实验目的

1. 分析振动产生的原因及其危害，消除或减弱振动经常采用的方法；
2. 分析螺旋弹簧的隔振原理，了解弹簧减振器的作用；
3. 测定振动设备不平衡离心力传给基础的力，掌握测定方法；
4. 掌握实验测试系统的组成及各种仪器的原理和使用方法。

二、实验原理

一般机器振动的原因，主要是由于转子质量的不平衡所产生的不平衡离心力所致。在通常的情况下，机器的振动有害。强烈的振动将产生噪声污染和有损于建筑物的动载荷，影响机器设备的使用寿命和工作性能，严重时使零件失效，甚至造成破坏与事故，因此应防止和减弱振动。

消除振动的措施有：消除振源、避开共振区，增加阻尼、隔振等。对于高速旋转的机器部件，必须分别做静、动平衡检验，并且应在结构的设计、零部件的加工检验、设备的装配、安装等环节，都要考虑防振问题。

本实验是采用螺旋弹簧减振结构，振体（机器与底板）质量为 m 通过弹簧变形而把力传给基础，故基础的受力 $R=KX$ ，其最大值为：

$$R_{\max} = KX_0 \quad (2-1)$$

式中： K —弹簧的刚度系数；

X_0 — 弹簧的振幅。

$$R_{\max} = \frac{P_0}{1 - \gamma^2} \quad (2-2)$$

又知：

式中： γ — 工作机角速度，1/sec；

γ_0 — 该系统固有的自振频率，1/sec； $\gamma_0 = \sqrt{\frac{K}{m}}$ ，其中， K 为弹簧的刚度系数，N/m； m 为振动体的质量，kg。

P_0 — 不平衡离心力，N；

$P_0 = m_{\text{偏}} e \gamma^2$ ，其中， $m_{\text{偏}}$ 为偏心质量载荷，kg； e 为偏心距离，m； γ 为工作机角速度，1/sec。

隔振弹簧的选用原则：

+

(1) 当弹簧很硬时，其 γ_0 很大，从而使 $\gamma \rightarrow 0$ ， $R_{\max} \approx P_0$ ，这时基础受力最大，隔振器不起作用。

(2) 当弹簧较软时, 其 λ 较小, R_{\max} 也变小, 当小到 λ_0 时, 弹簧也起不到隔振作用。如果弹簧很软, 使 λ 继续降低, 即 λ_0 增大, R_{\max} 的绝对值也继续变小, 最后则降为“0”。由此可见, 采用较软的弹簧, 在 $\lambda_0 \rightarrow \infty$, $R_{\max} \rightarrow 0$ 。

(3) 一般取; $\lambda = (1 \sim 1.5) \lambda_0$, $R_{\max} = (1 \sim 1.5) P_0$ 。具有较好的减振效果。本实验选用的一组弹簧, 可使 R_{\max} 降为 P_0 的 1/7。

在测定 R_{\max} 时, 本实验采用电阻应变原理, 自制了三个拉应力传感器, 将此三个传感器固定在测试系统的下面, 装配关系见实验装置示意图2-1所示。

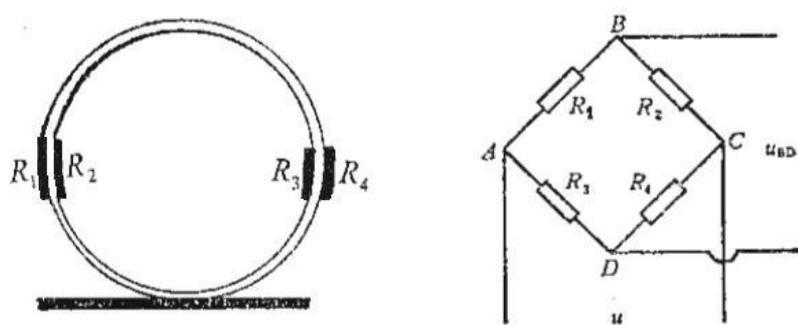


图2-1 传感器装配关系示意图

传感器受力后, 其阻值改变, 电桥失去平衡, 有电信号输出, 经实验校正。该传感器输出的电信号与外力 P 是成线性的关系, 将电信号送入动态电阻应变仪, 经放大后送入光线示波器记录下振动波形, 供计算分析使用。

电测计算方法如下:

三个传感器连成三个电桥, 采用全桥测量。电机启动前, 先进行标定。先将三个电桥调平衡, 进行静态标定。如加3kgf的力, 可记录下三个振动子的总偏移量为A。再启动电机, 记录下振动波形。在一个周期内找到三个振动子的最大总偏移量B, 这个B就是通过弹簧减振后作用在基础的最大力 R_{\max} 而引起的振动。

根据3Kgf : A = R_{\max} : B 得:

$$R_{\max} = \frac{3 \text{kgf} \cdot B}{A}$$

其中A、 B_{\max} 可根据实验记录波形 (如图2-2) 获得。

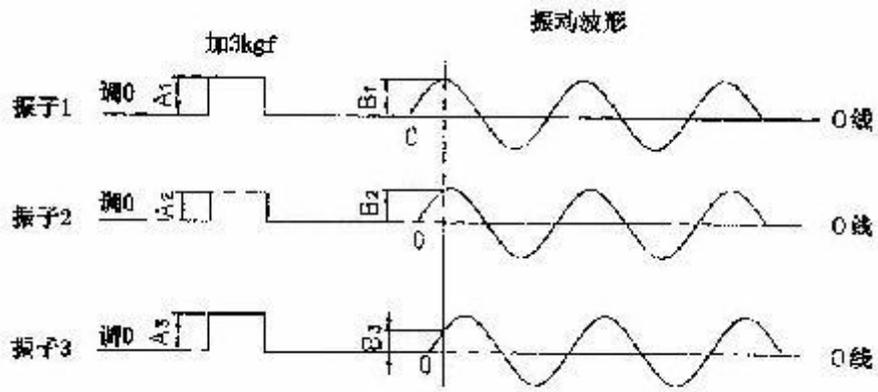


图2-2 振动实验记录波形

加了3kgf后的总偏移量 A , $A = A_1 + A_2 + A_3$,

启动振幅后的振幅总偏移量 $B = B_1 + B_2 + B_3$
 B ,

三、实验装置

1. 实验装置

振动与隔振实验装置如图2-3所示。

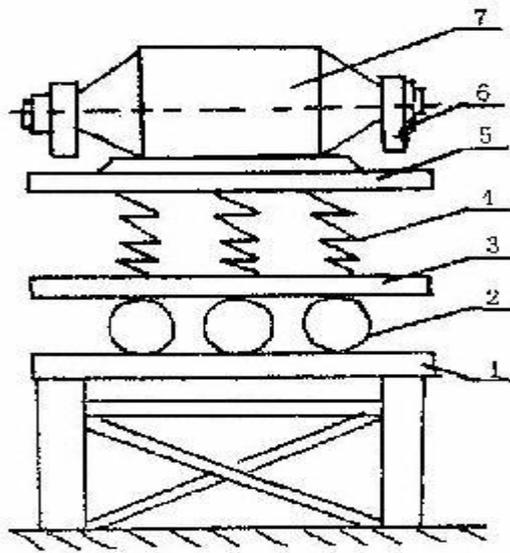


图2-3 振动与隔振实验装置

- 1— 底座； 2—拉压力传感器； 3—托板； 4—减振弹簧；
 5— 振动系统； 6— 电机； 7— 偏心叶片

实验中用到的仪器有：动态应变仪、EMA-2000型—A瞬态波形存储记录仪。

2. CS—1A型动态应变仪

CS系列动态应变仪配接不同类型的应变片及应变片式传感器，可以实现应力、拉压力、速度、加速度、位移、扭矩等多种物理量的测量。具有性能稳定，噪声低、频带宽的特点。

CS—1A型动态应变仪面板及技术性能指标见下图：



型 号	CS-1A
量程(2V 桥)	0~±30000 $\mu\epsilon$
桥压 V_{DC}	2、4、8
平衡方式	自动
平衡时间	2 秒
平衡范围	约±5000 $\mu\epsilon$
灵敏度(2V 桥)	5V/1000 $\mu\epsilon$
增 益	0、1/20、1/10、1/5、1/2、1
校准($\mu\epsilon$)	100、200、500、1K、2K
低通滤波(Hz)	10、100、300、1K、10K、F
频响范围(Hz)	100K
桥路电阻(Ω)	60~1K
线性度误差	<±0.1%
输出(峰值 V)	10
信噪比	>50dB
通道组合	通道任选
特 点	通用型

测量前的准备与仪器调节：

(1) 桥压选择；

(2) 桥路连接 四只应变片与桥盒的连接，采用全桥连接方法。桥盒是应变测量元件与信号适调放大器（动态应变仪）连接的桥梁。必须使用 120 Ω 的应变片，才能保证电桥平衡。在实际测量时，应变片与连线、桥盒连接柱之间的短路线都要尽可能用烙铁焊接。

(3) 应变片灵敏系数的修正 本仪器设计使用的应变片系数 $K=2.00$ ，若使用灵敏度系

数为 K_p 的应变片，实际的应变值 ϵ_p 应为：
$$\sum_p = K P \quad \sum_c, \text{ 式中 } \epsilon_c \text{ 为测量应变值。}$$

(4) 零点调平衡

(5) 低通滤波器挡位的选择；

(6) 量程选择；

(7) 校准值给定；

(8) 预热 为了保证稳定运行，电路应预热10~15分钟，对于小应变或长时间测量，则需要预热30~60分钟。

四、实验方法

本实验是由装有一偏心叶片的电机转动产生不平衡离心力，在振动系统下面装有弹簧，弹簧下面装有传感器，连接到与动态应变仪和光线示波器，以测出振动力经弹簧减振后传给基础的力。

实验步骤如下：

1. 开机前的准备

(1) 选用一组弹簧，装在振动板的下面，固定好，本实验采用销钉固定，电机装上偏心叶片。

(2) 仪器按要求连线、调节，预热10分钟。

2. 静态信号标定

应变仪衰减选为10，加3kgf力进行实际标定，记录下标定动态信号。

3. 动态测定

由于设备上部振动较厉害，开机前再次检查机器各部分有无松动，人员远离振源。把衰减调为最大，开机后听其声音，若不正常应立即停机检查，待机器正常后，应变仪保持与静态信号标定同样的衰减值，记录下波形。然后后应将衰减调为最大停机。

由于在开机与停机时都有共振区，应把衰减调为最大，避免仪器的损坏，因此应先调仪器后开机。

五、实验数据处理

(1) 力学计算用参数

参数	N	m	$m_{偏}$	e	K
数据					

计算数值取小数点后两位。

(2) 实验测量数据

数据 $B = B_1 + B_2 + B_3$

根据振动波形图，取一个周期内，三振子的最大总偏移量 B_{max} 进行计算。

(3) 实验结果讨论

六、思考题：

1. 引起振动的原因有哪些？减弱或消除振动的措施有哪些？
2. 隔振弹簧选用应注意什么？
3. 减小 R_{max} 的主要措施有哪些？

实验三 超声波探伤

一、实验目的

1. 熟悉超声波探伤仪的使用方法；
2. 了解测定仪器的性能和探头组合的探测性能；
3. 掌握一般的探伤方法，并能对缺陷进行较为准确的定位、定量和定性。

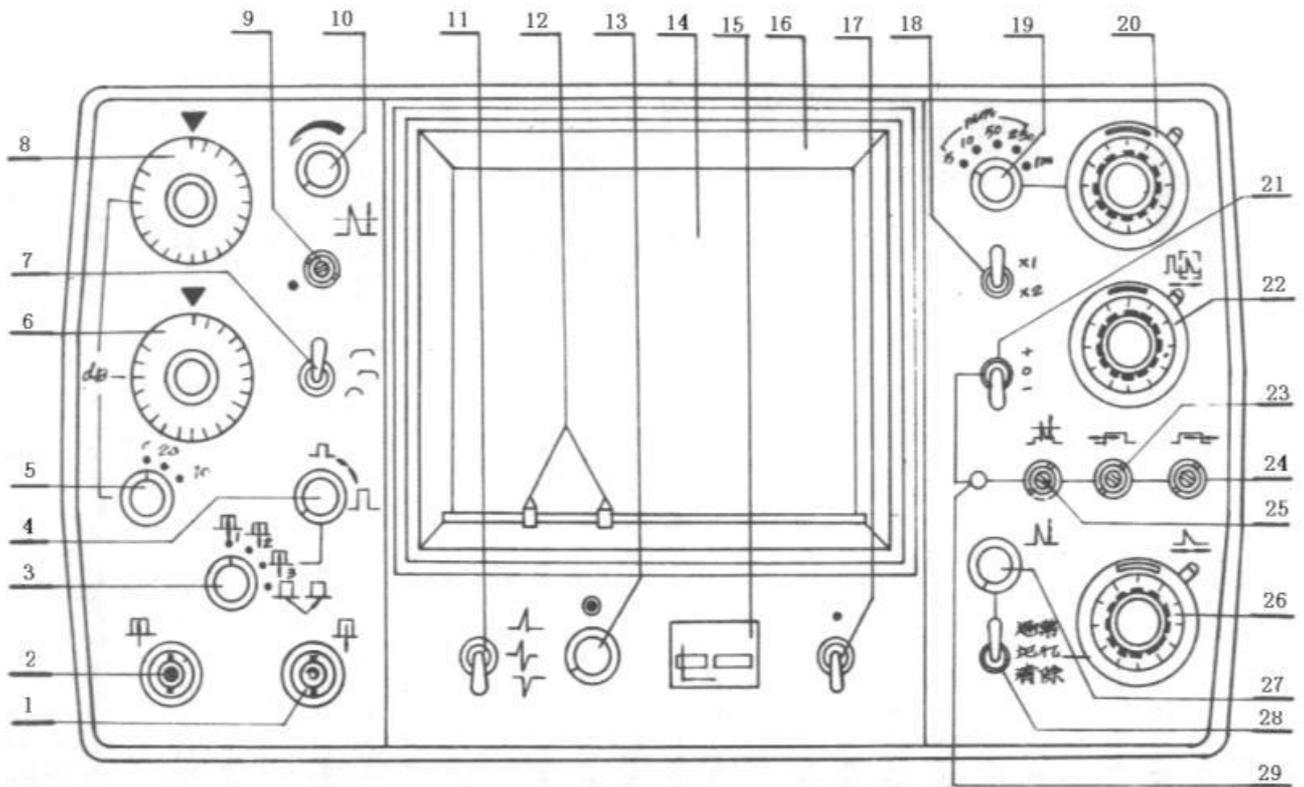
二、实验内容

1. 测定仪器性能，水平线性和垂直线形。
2. 测定仪器与探头组合的探测性能，灵敏度、盲区和分辨力。
3. 纵波探伤及其缺陷定位、定量与定性。
4. 斜探头的零部位校正和声程调节。
5. 绘制距离—波幅曲线，了解其应用。

三、实验设备与试块

1. 实验设备

CTS—26 型超声波探伤仪。探伤仪面板如下图。



CTS—26 型面板图

- | | | | | | |
|----------|----------|----------|-------------|-----------|--------------|
| 1. “发”插座 | 4. 发射强度 | 8. 细调衰减器 | 12. 定位游标 | 19. 扫描量程 | 23. “报警”闸门起位 |
| 2. “收”插座 | 5. 粗调衰减器 | 9. 抑制 | 13. 聚焦 | 20. 扫描微调 | 24. “报警”闸门宽度 |
| 3. 工作方式: | 6. 微调衰减器 | 10. 增益 | 14. 示波管 | 21. 报警功能 | 25. “报警”阈值 |
| 甲1 单1 | 7. 频段选择 | 11. 检波方式 | 15. 电源电压指示器 | + : 进波报警 | 26. “记忆”水平校准 |
| 甲2 单2 | ┌ 频段1 | ┌ 正向 | 16. 遮光罩 | 0 : 报警电源关 | 27. “记忆”垂直校准 |
| 甲3 单3 | └ 频段2 | └ 双向 | 17. 电源开关 | - : 失波报警 | 28. “记忆”选择 |
| 甲4 双 | ┌ 频段3 | └ 负向 | 18. 重复频率 倍乘 | 22. 脉冲移位 | 29. 报警指示灯 |

2. 实验试块

CTX—A. (图3-1), CTX—B. (图3-2), 自做试块如图3-3和图3-4.

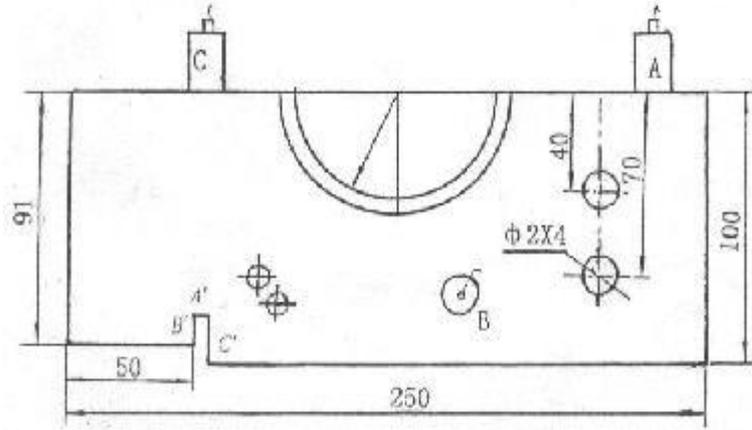


图3-1 CTX—A.试块 ($\delta=25\text{mm}$)

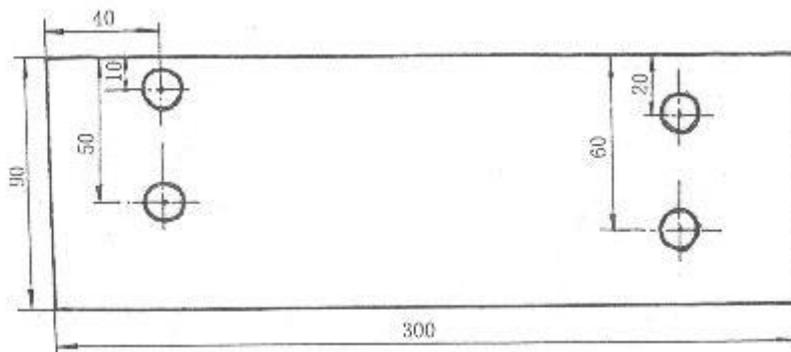


图3-2 CTX—B.试块 ($\delta=60\text{mm}$)

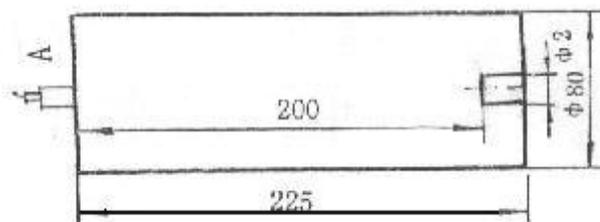


图3-3 灵敏度试块

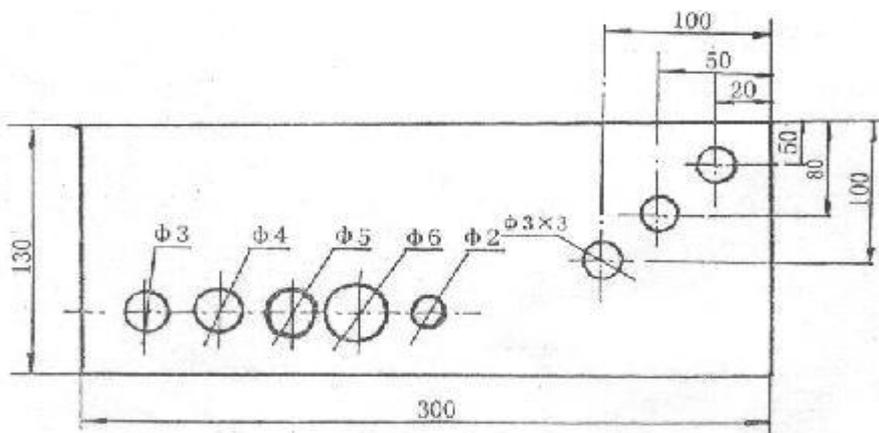


图3-4 比较试块 ($\delta=20\text{mm}$)

四、实验方法

1. 仪器水平零点的调节

水平零点—波形的始端（探头的入射点）与荧光屏上的刻度零点重合。

使用单探头工作，选取 $\phi 20$ 、 $\phi 16$ 、 $\phi 14$ ，工作频率为2.5MC的直探头。

将探头电缆接于“发”的插座上，而探头开关拨至“单”的位置，电源接通后，在CTK—A试块的加适量的机油后，把探头放置其上，调节“水平”和深度“粗调”旋钮，使其底波位于10格处（代表100mm），对于“辉度”、“聚焦”、“增益”、“衰减”、“抑制”等旋钮适当调节，以达到波形清晰而无杂波为原则。

2. 水平线性误差的测定

水平线性 — 扫描线上读出的各个缺陷反射波距离和各个实际声程距离的线性关系（正比关系）。

同1所述，只将探头放在CTK—A的B处，“抑制”置于“0”，调节深度“细调”旋钮，使其荧光屏上只出现4个回波（ B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 ），并显示在时间轴上，如图4-5所示。将 B_1 、 B_4 分别对应于时间轴上的刻度25和100，此时 B_2 、 B_3 的波幅上升点分别应在50、75处，若出现偏差距离为 a_2 和 a_3 ，则其中的最大偏差为 a_{\max} ，时间轴全刻度为 b ，则水平线性误差为：

$$L = \frac{|a_{\max}|}{0.75b}$$

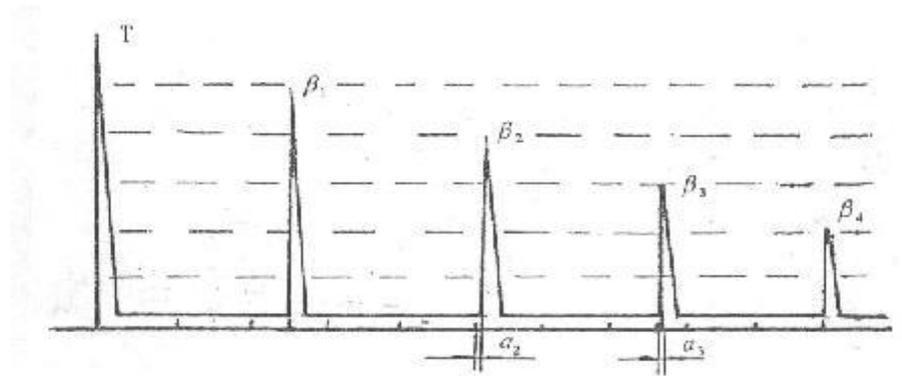


图 3-5 水平线性误差测定图

3. 灵敏度的测定

灵敏度 — 在一定的探测范围内，能探出最小缺陷能力。（相对）

同1，将探头放在图4-3试块A面，定出底波，将“抑制”置于“0”，“增益”置于最大，然后在A面上移动探头，放在柱心上，探出缺陷孔，调节衰减器，使平底孔反射波高为100%，此时记下衰减器的读数。此值即为灵敏度余值。

4. 盲区的测定

盲区——仪器和探头组合后，能发现由探头入射点能够探出缺陷的最小距离。

接3探测灵敏度记下衰减余量后，仪器上各个旋钮不动，将探头放在图8-4的试块A处，此时若在荧光屏上清晰地显示出 $\phi 2$ 平底孔的反射波（反射波的前沿与水平线清晰相交）。

此时测量出探头所对准的孔底到探头的接触面的距离，该值为该探头和仪器组合的盲区。如放在A处荧光屏上显示。可移动到B处-----。以显示清晰为至。

5.分辨力的测定

分辨力——在荧光屏上能够辨认工作内两相邻缺陷的能力。

测定方法为：同4 将探头放在CTK—A试块C处，“抑制”置于“0”，“增益”深度“粗调”，“细调”放在适当位置，将探头左右移动，看其A’、B’、C’三处的反射波形状，根据波形在荧光屏如图4-6所示，读出a、b，则分辨力：

$$F = \frac{a}{(91 \sim 85) b} \text{ mm}$$

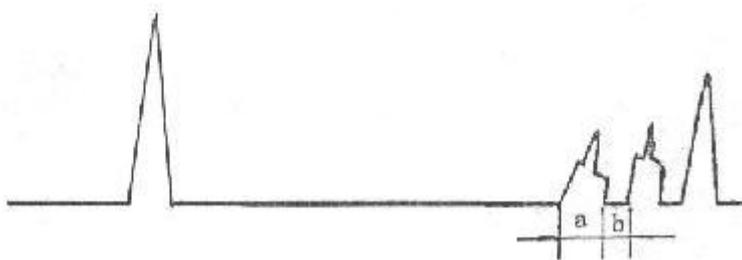


图 3-6 荧光屏上的波形示意图

6.纵波探伤法 — 探钢件

(1) 探前准备

① 对于工件表面要测部位，若能用机械加工，则应先进行加工，表面光洁度应达到一定的要求，若不能加工，则应使表面去掉铁锈，脏物用砂布磨光，满足一定的光洁度要求。

② 根据工件的大小、形状，估计一般容易出现的位置，选择探头、频率，准备好试块、机油和钢板尺等工具之类。

(2) 探测程序

① 调节水平零点同1。

② 调灵敏度

根据工件的作用,按照国家标准(在工件内部，合格品不允许有最大缺陷)和工件厚度为依托，进行灵敏度调节，调节灵敏度时，灵敏度试块的厚度必须等于被测工件厚度。所以在测量时，先将探头放在灵敏度试块上，调节仪器“水平”深度“粗调”、“细调”、“增益”、“抑制”、“衰减”等旋钮，使其荧光屏上出现清晰的始波、底波（始波对准“0”，底波对准“10”）。人工缺陷波（人造缺陷是根据标准按工件合格与否所造），可达满幅的50%，而刚好无杂波，即为灵敏度调好。

③ 探伤

按上述将探头放在被测工件上，从一端开始缓慢向另一端移动，探头移动区要互相重叠，以防漏掉缺陷，发现缺陷时，探头挺止前进，在缺陷附近（前后左右）移动。找出缺

陷在荧光屏上的位置，用钢板尺量出探头中心到一端面的距离，此处编号为缺陷1。再往前移动探头，照此法将所测部位探完，记下缺陷数（1、2、3、-----）。

④ 缺陷的定位

同前将探头移到缺陷L，前后左右移动，进一步核对上面测得的数字。根据荧光屏的

读数和钢板尺的测量数，就可定出缺陷的位置来。缺陷的垂直位置为： $\frac{X_F}{X_B} = \frac{h}{150}$ ，水平位置为钢板尺读数。假设工件如图3-7。

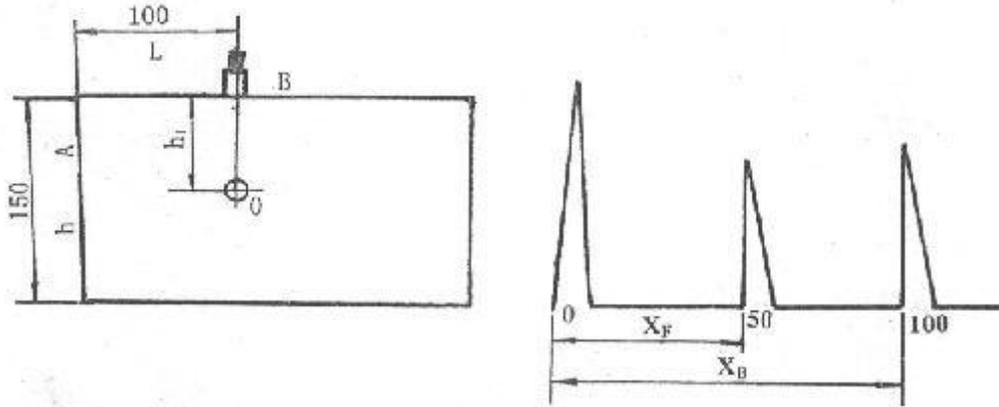


图 3-7 工件及缺陷定位

$$\frac{X}{X_B} = \frac{h}{150}$$

$$h = \frac{50}{100} \cdot 150 = 75 \text{ (mm)}$$

由 $\frac{X}{X_B} = \frac{h}{150}$ 则： $h = \frac{50}{100} \cdot 150 = 75$ mm
即缺陷1在距A端面100mm，距B端面75mm深处。

⑤ 缺陷的定量分析

a. 试块比较法 仍同前将探头放在缺陷1处，观察缺陷波在荧光屏上的显示情况，如伤波超过50%，说明此缺陷大于对照试块中的人工缺陷，此工件可报废或是次品，其确定次品的程度还要根据人工缺陷孔的大小对照。

b. 半波法 同前将探头放在缺陷1处，探头围绕伤波最高峰前后左右移动。探头往前，波峰从最高下降一半时此点为b，然后同样将探头左右移动距离，再根据荧光屏上波幅的高低、宽窄，就可确定缺陷的大小和形状。

⑥ 缺陷的定位分析

缺陷的定位、定量分析后，根据缺陷的大小、形状和伤波的形状，再根据工件加工工艺，各步易于造成各种缺陷的原因综合分析。锻件易出现白点，气孔裂纹，非金属夹杂疏松等。铸件易出现缩孔、非金属夹杂物、疏松等。

白点：缺陷波呈纵集状，数个波同时出现，波峰清晰。尖锐有力，有重复呈现的现象。

缩孔：缺陷波高大，在缺陷波前后尚有些微弱的反射波，当缺陷较大时，底波严重衰减或消失。

气孔：缺陷波形尖锐、陡峭、波根清晰。

疏松：使底波明显降低甚至消失。

将上述过程认真进行，并定位、定量、定性分析无误差后，填写探伤报告，即为结束。

六、实验结果

1. 对某型超声波仪器性能的评定：水平线性误差。
2. 仪器和探头组合性能、灵敏度、盲区、分辨力。
3. 对工件进行探伤的方法，探测结果有无缺陷。缺陷的位置大小、性质如何？

七、实验报告

1. 对_____型超声波仪器性能评定；水平线性误差为_____。
2. 仪器_____型与探头组合性能；探头规格_____。
 - (1) 灵敏度：探测深度200毫米 ϕ 2平底孔，回波高度为5格时仪器的灵敏度余量为_____dB。
 - (2) 探测2000毫米 ϕ 2平底孔灵敏度条件下的盲区是_____毫米。
 - (3) 分辨力为_____。
3. 工件探伤报告单（另填）
4. 讨论与建议。

附：实验记录表

1. 仪器水平零点调节：仪器_____，探头_____；

2. 水平线性误差测定： $a_1 =$ _____； $a_2 =$ _____；

$$L = \frac{|a_{\max}|}{0.75b} = \underline{\hspace{2cm}}$$

3. 灵敏度测定：仪器_____，探头_____；
试件规格_____；衰减器读数_____ dB。

4. 盲区测定 盲区_____ mm。

5. 分辨力测定 $a =$ _____； $b =$ _____；

$$F = \frac{\square}{(91 \ 85) \frac{b}{a}} = \underline{\hspace{2cm}}。$$

6. 工件探伤（定位、定量、定性）

缺陷1 $X_{e1} =$ _____； $X_b =$ _____； $h =$ _____；

$$h = X_{e1} \cdot h = \underline{\hspace{2cm}}；$$

$$L_1 = \underline{\hspace{2cm}}；$$

相当于_____ mm孔；性质_____。

缺陷2 $X_{e2} =$ _____； $L_2 =$ _____；

$$h_2 = X_{e2} \cdot h = \underline{\hspace{2cm}}；$$

$$X_b = \underline{\hspace{2cm}}；$$

相当于_____ mm孔；性质_____。

缺陷3 $X_{e3} =$ _____； $L_3 =$ _____；

$$h = X_{e3} \cdot h = \underline{\hspace{2cm}}；$$

$$X_b = \underline{\hspace{2cm}}；$$

相当于_____ mm孔；性质_____。

实验四 空气压缩机性能测定实验

一、实验目的与要求

本实验是通过调节压缩机的排气压力，测量压缩机的性能并绘制压缩机的性能曲线。具体要求如下：

1. 改变储气罐出口阀的开度，测定在不同压力比 ε 下的排气量 Q_0 、轴功率 N_e 、计算出相应压力比下的绝热效率 η_{ad} ；
2. 根据实验数据及计算结果绘制压缩机的综合性能曲线； $Q_0-\varepsilon$ ； $N_e-\varepsilon$ ； $\eta_{ad}-\varepsilon$ 曲线；
3. 对压缩机的运行工况进行分析和讨论；
4. 绘制压缩机的示功图（封闭图形）。

二、主要实验设备

1. 实验装置如图一所示。
2. 压缩机性能参数：
 - 1) 型号：11ZA-1.5/8 立式一级双缸单动水冷固定式空气压缩机；
 - 2) 气缸直径：D=153 毫米
 - 3) 活塞行程：S=114 毫米
 - 4) 排气量： $Q_0=1.5$ 立方米 / 分(额定工况下)
 - 5) 轴功率： $N_z < 12$ 千瓦(额定工况下)
 - 6) 转速： $n=500$ rpm
 - 7) 额定排气压力： $P_2=0.8$ Mpa(表)
3. 三相交流异步电动机 型号：Y160L₁-4-T
 - 1) 额定功率 13 kW
 - 2) 转速 1460 rpm
 - 3) 额定电压 V=380V
 - 4) 额定电流 I=26.22A
 - 5) 频率 50Hz
 - 6) 电机效率 $\eta=0.882$
 - 7) 功率因数 $\cos\varphi=0.88$
 - 8) 皮带传动效率 $\eta_c=97\%$
4. 辅助装置
 - 1) 控制箱和操作台
 - 2) 储罐：容积 V=0.3 米³；直径 D=600 毫米 高度 H=1.725 米
 - 3) 冷却器
 - 4) 低压箱及喷嘴 喷嘴直径 d=19.05 mm
 - 5) 导管及调节阀

5. 主要测量仪器及仪表

- 1) 干湿温度计
- 2) 喷嘴流量测量装置
- 3) 压力变送器
- 4) 温度变送器
- 5) 磁电式齿轮转速传感器
- 6) 涡轮流量传感器
- 7) 工控机

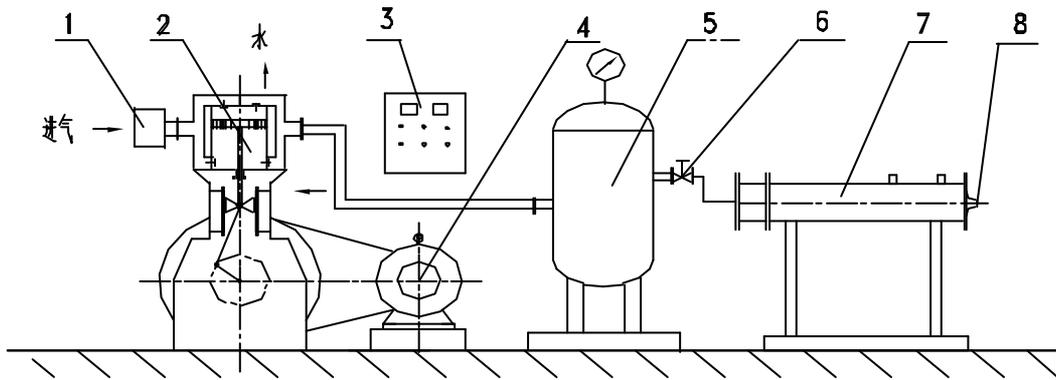


图 4-1 空气压缩机性能实验装置简图

- | | | | |
|--------|----------|----------|-------|
| 1— 吸气阀 | 2— 空压机 | 3— 电气控制箱 | 4— |
| 电动机 | | | |
| 5— 储气罐 | 6— 出口调节阀 | 7— 低压箱 | 8— 喷嘴 |

三、实验方式与步骤

1. 方法：本实验用调节压缩机储罐出口调节阀来改变压力比 ϵ 大小，以得到不同的排气量、功率、效率；

根据 GB3853-83《一般用容积式空气压缩机性能试验方法》标准规定，采用喷嘴测量压缩机的排气流量，标准喷嘴系数为 C。

2. 步骤：

(1) 启动测量装置：启动工控机，运行“压缩机试验”程序，点击“试验”按钮进入试验条件输入画面，输入实验条件。点击“确认”按钮进入试验画面；

(2) 压缩机启动：a. 盘车——用手转动皮带轮一周以上；b. 将储气罐出口调节阀完全打开；c. 顺时针转动电气控制箱上的“电源开关”，“电源指示”灯亮；d. 打开冷却水阀门，电气控制箱上的“安全指示”灯亮；e. 按下绿色“启动电机”按钮，启动压缩机，“运转指示”灯亮；

(3) 点击“清空数据”按钮，

(4) 调储气罐出口调节阀，改变排气压力，等试验系统稳定后，记录各项数据（记

录数据之前，应先)。运转中，如发现有不正常现象应及时停车；

(5) 停车：按下红色“关闭电机”按钮，关闭压缩机；逆时针转动电气控制箱上的“电源开关”，“电源指示”灯灭。关冷却水阀门；将储罐内压缩空气自然放空（注意：此时不得转动储气罐出口调节阀）。

四、数据整理

1. 实测排气量计算

喷嘴法测量排气量计算公式

$$Q_0 = 1129 \cdot C \cdot d_0^2 \cdot \sqrt{\frac{P_0}{P_1} \cdot \frac{T_1}{T_0}} \quad (4-1)$$

式中：d₀——喷嘴直径，本实验用喷嘴 d₀=0.01905 m；

C——喷嘴系数，所用喷嘴系数用线图和喷嘴系数表查出，见图二和表 4-1；

T₀——吸气温度，K；

p₁——吸气压力，pa；

T₁——喷嘴前温度，K；

P₀——实验现场大气压，pa；（1bar=1000mbar=1.02×10⁵pa）

Δp——喷嘴前后压差，pa；（1mmH₂O=9.087 Pa）

Q₀——排气量，m³/min；

		表 4-1 喷嘴系数表													
喷嘴		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
直径	19.05	0.968	0.971	0.974	0.976	0.977	0.978	0.979	0.980	0.982	0.983	0.984	0.985	0.986	0.987
	mm														

2. 电机输出功率的计算

$$N_e = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \eta / 1000 \quad \text{kW}$$

式中 U——电压，v；

I ——电流，A；

cosφ——功率因数，cosφ=0.88

η——电机效率，η=0.882

3. 轴功率 N_z 的计算

$$N_z = N_e \cdot \eta_c$$

(4-3)

式中η_c——皮带效率，η_c=0.97

4. 理论绝热功率 N_{ad} 的计算

$$N_{ad} = \frac{G_1 R_1 T_{s1}}{k-1} \left[\frac{p_2}{p_1} \right]^{\frac{k-1}{k}} \cdot \frac{1}{60} \quad (\text{kW}) \quad (4-4)$$

式中：R₁——吸气状态下的气体常数，kJ/kg K；

$$R_1 = \frac{0.2869}{8} \frac{1 - 0.378 \pi_{s1}}{P_1}$$

式中：p_{s1}——吸气温度的饱和水蒸汽压，Pa；（可查《化工原理》）

p₁——吸气压力，Pa；

φ——相对湿度

T_{s1}——吸气温度的，K；

p₂——排气压力，pa；

k——气体绝热指数；空气 k = 1.4

G₁——压缩空气的质量流量，kg / min；

$$G_1 = Q_{0 \times 0.961 X_a} + G_s$$

式中：ρ_a——吸气状态下的空气密度，kg / m³；（可查《化工原理》）

G_s——冷凝水量，kg / min；

$$G_s = \frac{1 - \lambda_{\pi}}{\lambda_{\pi}} \cdot \rho_{s1} \cdot P_1 \cdot Q_0$$

式中：ρ_{s1}——吸气状态下的饱和水蒸汽密度，kg / m³；（可查《化工原理》）

Q₀——排气量，M³ / min；

λ_φ——凝析系数

$$\lambda_{\pi} = \frac{P_1 - \pi_1 \cdot P_{s1}}{P_2 - P_2} \cdot \frac{P_2}{P_1}$$

φ_r——吸入空气的相对湿度

P_{s1}——吸气温度的饱和水蒸汽压，pa；

P_{s2}——喷嘴前温度下的饱和水蒸汽压，pa；

5. 压缩机效率(绝热轴效率)

$$\eta_{ad} = \frac{N_{ad}}{N_z}$$

N_{ad}——理论等熵功率 kw

N_z——轴功率 kw

η_{ad}——压缩机等熵轴效率

五、实验数据

1. 将实验数据填入表 4-2

室温 t₁ _____ (°C)

当地大气压力 P_1 _____ (毫巴)
 相对温度 ϕ _____ % :

表 4-2 实验数据纪录表

序号	吸气压力 kPa	排气压力 MPa	吸气温度 °C	喷嘴前温 度 °C	喷嘴前后 压差 kPa	电压 (V)	电流 (A)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

2. 按表 4-3 中计算公式计算各项数据并将结果填入表 4-3 内。

3. 用坐标纸绘制压缩机性能曲线

横坐标——压力比 ε ; 纵坐标——排气量 Q_0 、轴功率 N_z 、绝热轴效率 η_{ad}

表 4-3 实验数据整理表

名称	符号	公 式	单位	测量点数据						
吸气压力	p_1	(绝压——大气压)	Pa							
排气压力	p_2	(绝压)	Pa							
名义压力比	ε	p_2/p_1	—							
喷嘴前后 力差	Δp	—	Pa							
喷嘴前温度	T_1	$t \text{ } ^\circ\text{C} + 273$	K							
吸气温度	T_1	$t \text{ } ^\circ\text{C} + 273$	K							
		$\frac{T_1}{T_2} \sqrt{\frac{p_2}{p_1}}$								
实测排气量	Q_0	$1129 C d^3 \frac{p_1}{T_1}$	m^3/min							
电压	U	—	V							
电流	I	—	A							
电机输出 率	N_e	$3I \times U \times \cos\phi \times 10^{-3}$	26							

压缩机轴
功
率
 N_z $N_e \times 10^{-3} \times \eta_c$ ($\eta_c = 0.97$)

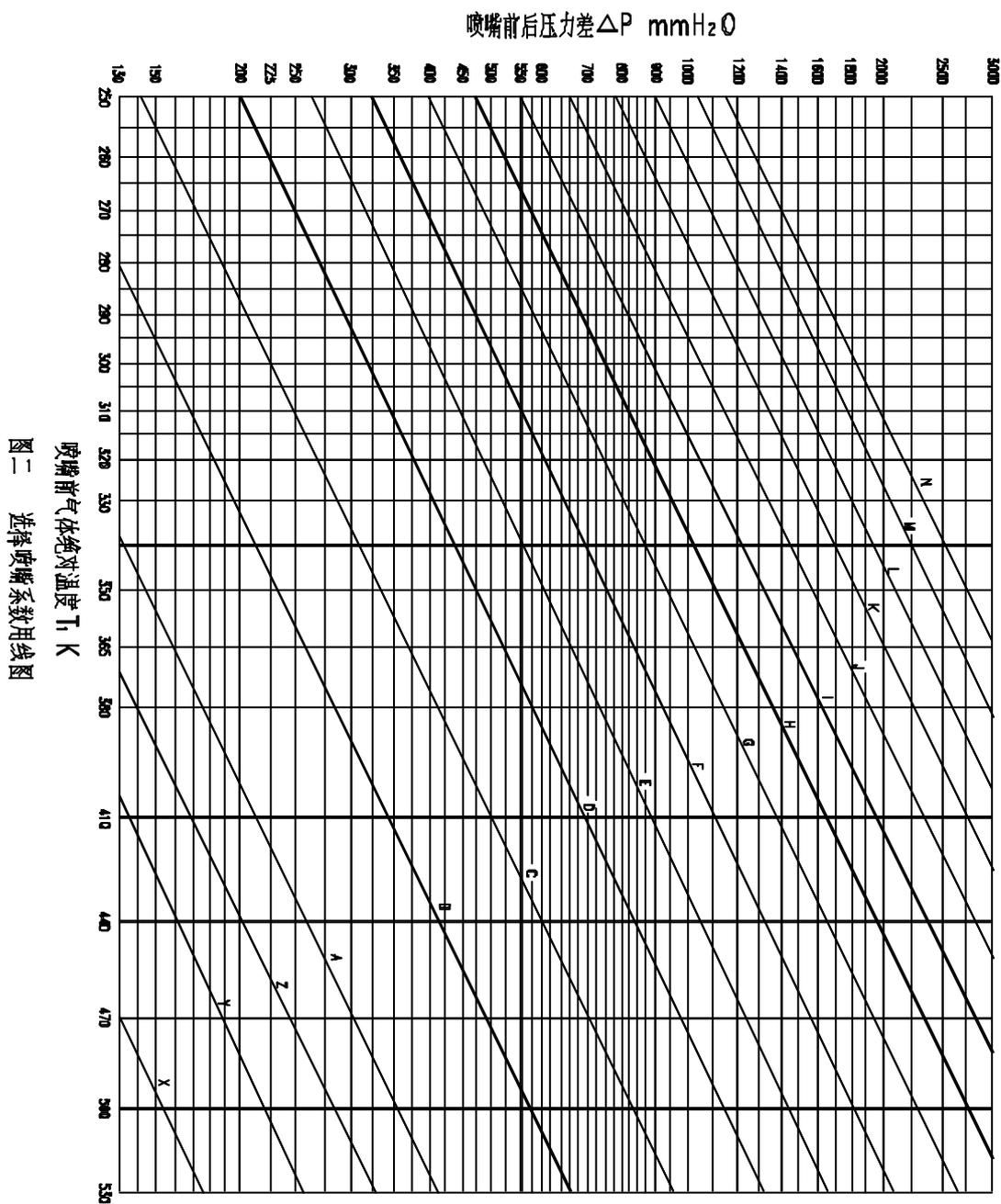
kw

kw

喷嘴前温度 下饱和水	p_2	(可查《化工原理》)	Pa										
蒸汽压力 吸气温度下	p_{s1}	(可查《化工原理》)	Pa										
饱和水蒸汽 压力		_____											
析水系数	λ_{Φ}	$\frac{p_1 \cdot \Pi - p_s \cdot p}{p_2 \cdot p_2 - p_1}$	_____										
		$1 - \lambda_{\Pi}$											
冷凝水量	G_s	$\lambda_{\Pi} \cdot p_{s1} \cdot p_1 \cdot Q_0$	Kg/min										
进口气体 质量 流量	G_i	$Q_0 \cdot \rho_a + G_s$	Kg/min										
吸气状态 下 气体密度	ρ_a	(可查《化工原理》)	Kg/m ³										
		$\left[\frac{p_1}{p_2} \right]^{\frac{k-1}{k}}$											
		T^x											
等熵功率	N_{ad}	$G_i \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[\frac{p_1}{p_2} \right]^{\frac{k-1}{k}} - 1$	kw										

压缩机效率 η_{ad} 既绝热轴效率 N_{ad}/N_z

—

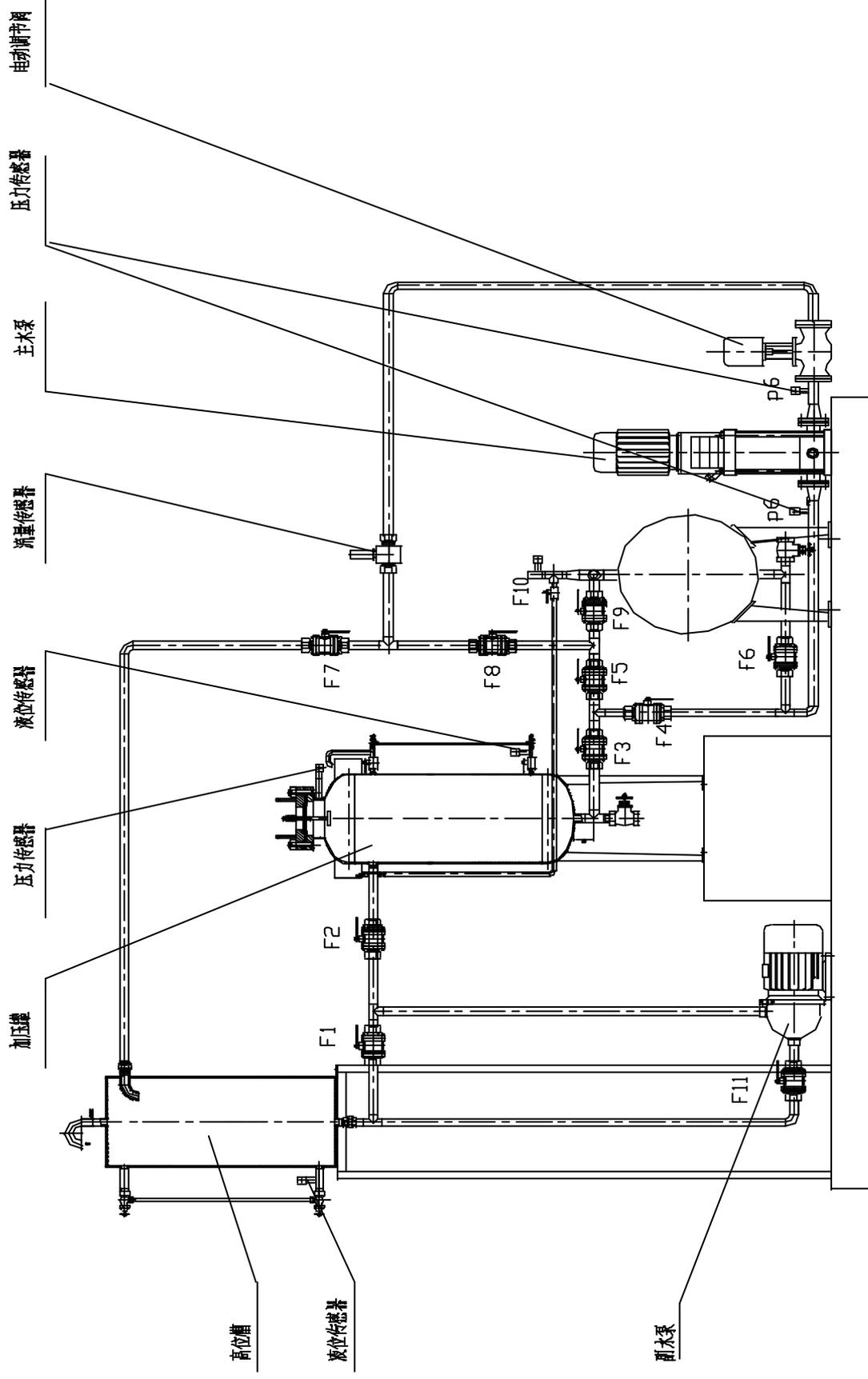


六. 实验报告要求

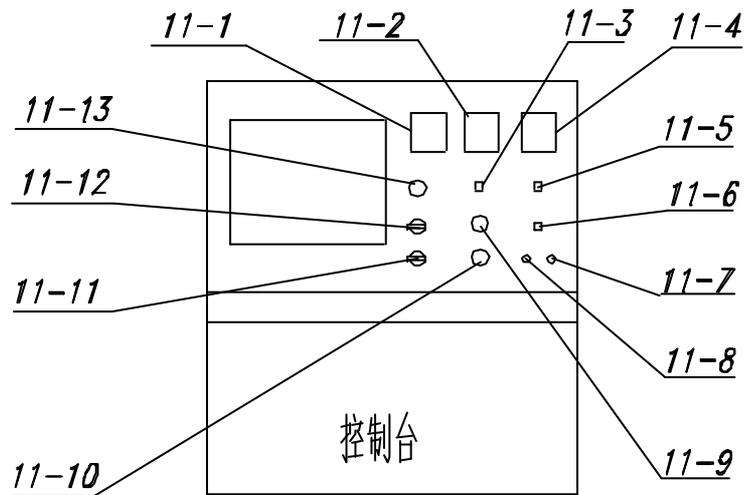
1. 根据实验目的与要求，详细填写两个表格并绘制曲线图；
2. 解答讨论题；
3. 分析图形，找出最佳压力比范围。

七. 讨论题

1. 压缩机的排气压力是怎样形成的？
2. 喷嘴法测量排气量的基本原理是什么？
3. 通过绘制的曲线图，分析该压缩机的最佳操作压力比范围。
4. N_z 与 N_{ad} 之间的差异反映了压缩机的什么损失？



内外压力容器基本实验综合装置实验台示意图



图中：

11-1——转速显示；

11-2——主水泵流量显示 Q ；

11-3——流量自动/手动控制按钮，弹起时为手动，按下后为自动；

11-4——主水泵出口压力显示 P_2 ；

11-5——压力自动/手动控制按钮，弹起时为手动，按下后为自动；

11-6——控制方式按钮，弹起时为 TDCS 控制，按下后为 DDC 控制；

11-7——压力调节旋钮（调节主水泵的转速）；

11-8——流量调节旋钮（调节电动调节阀的开度）；

11-9——主水泵开按钮；

11-10——主水泵关按钮；

11-11——副水泵关按钮；

11-12——主水泵运行选择开关，向左为变频调速运转方式，向右为直接运转方式，中间为空档；

11-13——总控制开关，顺时针转为开，逆时针转为关。

说明：此控制面板与换热器多功能综合实验控制面板上的各按钮指示功能基本相同，以便于使用。

实验五 外压薄壁容器的稳定性实验

一、实验目的

1. 实测圆筒形容器失稳时的临界压力值，并与不同的理论公式计算值进行比较；
2. 观察外压薄壁容器失稳后的形态和变形的波数。

二、基本原理

圆筒形容器在外压力作用下，常因刚度不足失去自身的原来形状，即被压扁或产生折皱现象，这种现象称为外压容器的失稳。容器失稳时的外压力称为该容器的临界压力。对圆筒形容器丧失稳定时截面形状由圆形跃变成波形，其波形数可能是 2、3、4、5、……等任意整数。

外压圆筒依其临界长度为界为长圆筒、短圆筒和刚性圆筒。

1. 筒的临界长度公式为：

$$L_{\text{临}} = 1.17 D \sqrt{\frac{D}{S_0}} \quad (5-1)$$

$$L_{\text{临}} = \frac{1.13 ES_0}{\sigma_s \sqrt{\frac{D}{S_0}}} \quad (5-2)$$

式中：D——圆筒的中径，mm；

S_0 ——圆筒的计算壁厚，mm；

E——材料的弹性模数，MPa；

σ_s ——筒体材料的屈服极限，MPa；

当圆筒长度 $L > L_{\text{临}}$ 时，属于长圆筒；

当圆筒长度 L ： $L'_{\text{临}} < L < L_{\text{临}}$ 时，属于短圆筒；

当圆筒长度 $L < L'_{\text{临}}$ 时，属于刚性圆筒。

L——圆筒计算长度（系指圆筒两个刚性构件间的距离）

本试验中试件的计算长度 L 是指从顶盖下表面到试件底部的圆弧过渡部分的¹距离₂

处。

2. 筒的临界压力计算公式

- (1) 长圆筒的临界压力计算公式

$$P_{\text{临}} = \frac{2E}{1 - \nu^2} \left(\frac{S_0}{D} \right)^3 \quad (5-3)$$

- (2) 短圆筒的临界压力计算公式

R.V.Mises 公式

$$P_{\text{临}} = \frac{ES}{2.59} \left(\frac{D}{L} \right)^3 \left(\frac{1}{n^2} + \frac{1}{n^2 L^2} \right) \quad (5-4)$$

B.M.Pamm 公式

$$P_{\text{临}} = \frac{ES^2}{2.59} \frac{D}{LD S_0} \quad (5-5)$$

式中： μ ——材料的波桑系数；
 R ——圆筒的中间面半径，mm；
 n ——波数；
 L ——圆筒的计算长度，mm。

(3) 利用外压圆筒的图算法计算其临界压力。

3. 波形数的计算公式

$$n = \frac{7.06}{L} \sqrt{\frac{D}{S_0}} \quad (5-6)$$

三、实验装置

过程设备与控制基本实验综合实验台

四、实验步骤

(一) 测量试件参数

1. 实际长度、圆弧处内部高度、翻边处高度					
2. 外直径、内直径					
3. 壁厚					

将所测尺寸填入下表内：

表 5-1 试件尺寸记录表

单位：mm

试件编号	外径	内径	壁厚	实际长度	圆弧处内面高度	翻边处高度	计算长度
------	----	----	----	------	---------	-------	------

1

2

(二) 实验台阀门操作

1. 打开 F1、F3、F5、F6、F8、F10，关闭 F2、F4、F7、F9；

(三) 控制台操作：

1. 向右扳动控制台面板上的总控开关 11-13，启动控制台；

2. 操作台面板 11-3 开关置于手动位置，顺时针旋转 11-7 旋钮，打开电动调节阀；
3. 将开关 11-6 旋至“变频启动”位置；按下开关 11-9，启动变频器；
4. 顺时针旋转“压力调节”旋钮 11-8，启动主水泵，将加压罐内充水至上封头与接管连接处，并通过调节“压力调节”旋钮 11-8 维持该处水位不变。
5. 试件装入加压罐内，要注意的是使垫圈要紧贴试件上端翻边处的四周，以防泄漏，然后对称地拧紧螺母；
6. 启动工控机，在桌面上打开“基本实验主程序”，点击“实验选择”按钮，选择“外压薄壁容器的稳定性实验”菜单，点击“进入”按钮，进入“外压薄壁容器的稳定性实验”画面，点击“开始实验”按钮，进入实验画面；
 7. 单击“开始”按钮，单击“纪录”按钮，
8. 旋转“压力调节旋钮”11-8，使主水泵给加压罐缓慢加压，直至试件失稳为止。
9. 试件时稳后，迅速按下开关 11-10，关闭水泵。将“压力调节旋钮”11-8 回零，以免水从加压罐溢出；
10. 取出试件，观察和记录失稳后的波形及特点。

五、实验报告内容及要求

1. 简述实验目的；
2. 按比例绘制方式件失稳前后的横断面形状图；
3. 用 R. V. Mises 公式、B. M. Pamm 公式和图算法分别计算试件的临界压力值。
4. 用近似公式计算试件变形波数。
5. 将理论计算值和实测值填入下表内。

表 5-2 实验数据表

试件型号	试件尺寸 mm					实测 $P_{\text{临}}$ MPa		理论计算 $P_{\text{临}}$			波数	
	L	D	S	L/D	D/S	仪表测	目测	Mises	Pamm	图算法	实测	计算
1	90.00	90.00	0.3	1.00	300.00	0.40	0.04	0.00	0.00		6	6

2

6. 对实验结果进行讨论和分析。

实验六 恒压力控制实验

一、实验目的

1. 测定离心泵恒压力控制系统在阶跃干扰作用下，离心泵出口压力的过渡过程，利用最大偏差、余差、衰减比、振荡周期和过渡时间等参数评价离心泵恒压力控制系统的控制质量。
2. 掌握比例度 P 、积分时间 I 参数在压力控制系统中的作用和对过渡过程品质指标的影响。

二、实验装置

过程设备与控制基本实验综合实验台

三、实验原理

离心泵恒压力控制系统图如图 6-1 所示。

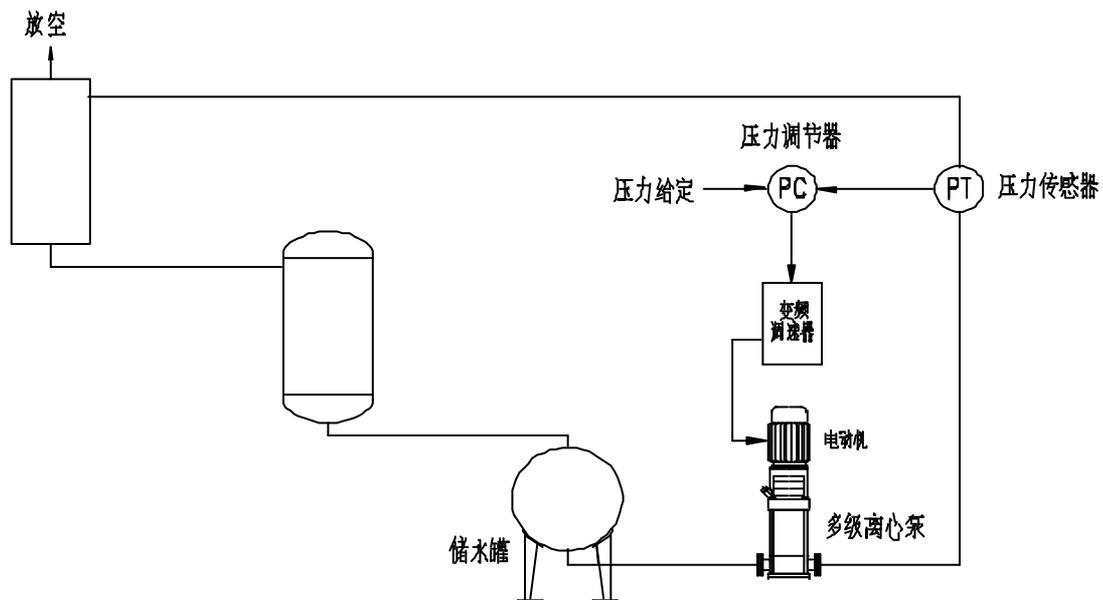


图 6-1 离心泵恒压力控制系统图

离心泵恒压力控制系统为单回路简单控制系统。安装在离心泵出口管路上压力传感器 PT 将离心泵出口压力转换成电压信号，经放大器放大后输出至工业调节器 PC ， PC 将压力信号与压力给定值比较后，按 PI 调节规律输出 $4\sim 20\text{mA}$ 信号，驱动变频调速器控制电机的转速，达到恒定离心泵出口压力的目的。离心泵恒压力控制系统方框图如图 6-2 所示。

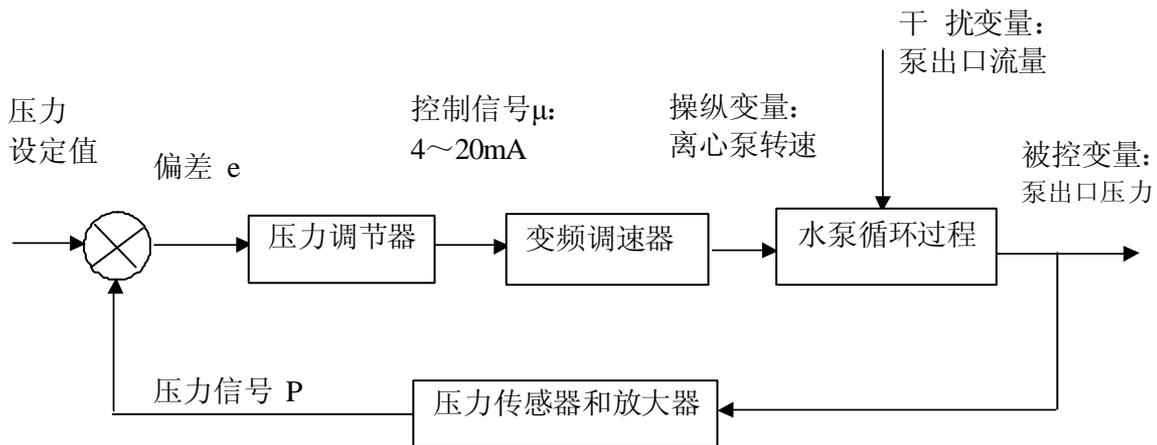


图 6-2 恒压力控制系统方框图

控制参数如下：

1. 被控变量 y ：离心泵出口压力 P 。
2. 给定值(设定值) y_s ：对应于被控变量所需保持的工艺参数值，在本实验中取 0.4 MPa 。
3. 测量值 y_m ：由传感器检测到的被控变量的实际值，在本实验中为离心泵出口压力值 P 。
4. 操纵变量：实现控制作用的变量，在本实验中为离心泵转速 n 。使用交流变频调速器作为执行器对离心泵转速进行控制。交流变频调速器的输入信号范围： $4\sim 20\text{mA}$ ；输出： 380V ， $0\sim 50\text{Hz}$ 。
5. 干扰(或外界扰动) f ：干扰来自于外界因素，将引起被控变量偏离给定值。在本实验中采用突然改变泵出口流量的方法，人为模拟外界扰动给被控变量造成干扰。
6. 偏差信号 e 被控变量的实际值与给定值之差， $e=y_s-y_m$ 。

y_m ——离心泵出口压力值 P ；

y_s ---离心泵出口压力设定值。

3. 控制信号 u 工业调节器将偏差按一定规律计算得到的量。

离心泵恒压力控制系统采用比例积分控制规律(PI)对离心泵出口压力进行控制。比例积分控制规律是比例与积分两种控制规律的组合，数学表达式为：

$$\square u t = K_p [() + \frac{1}{T^I} \int_0^t ()] \quad (6-1)$$

PI 规律将比例控制反应快和积分控制能消除余差的优点结合在一起，因而在生产中得到了广泛应用。

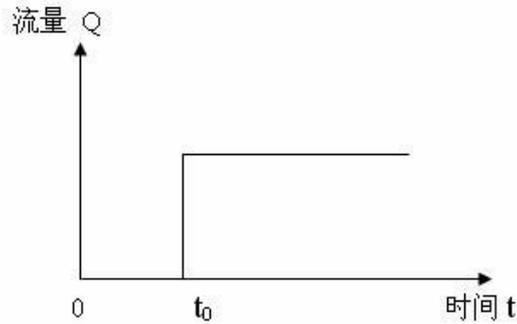


图 6-3 阶跃干扰信号

假定在时间 $t=0$ 之前，系统稳定，且被调参数---离心泵的出口压力 P 等于设定值。若在 $t=0$ 时刻，外加流量阶跃干扰（图 3-3），离心泵出口压力开始变化并按衰减振荡的规律经过一段时间后，离心泵出口压力逐渐趋于稳定。完成了一次过渡过程。

四、实验步骤

（一）实验台阀门操作

打开阀门 F1、F2、F3、F4、F6、F7、F9、F10，关闭阀门 F5、F8、F11；

（二）控制台操作

1. 向右扳动控制台面板上的总控开关 11-13，启动控制台；
2. 流量自动/手动控制按钮 11-3 置于手动位置，顺时针旋转 11-7 旋钮，打开电动调节阀；
1. 启动工控机，在桌面上打开“基本实验主程序”，点击“实验选择”按钮，选
2. 择“离心泵恒压力控制实验”菜单，点击“进入”按钮，进入“离心泵恒压力控制实验”画面，点击“清空数据库”按钮，清空数据库；
3. 向左扳动选择开关“11-6”，将水泵运行设置成变频启动方式；
4. 点击实验画面上的“仪表设置”按钮，进入“控制参数设置”画面，设置压力表参数：设定值 $SV=0.3\text{MPa}$ ，比例带 $P=70$ ，积分常数 $I=3$ ；
5. 调节流量调节旋钮“11-8”，使流量表“11-2”显示值为 0.3 L/s ；
6. 按下水泵启动按钮“11-9” 启动变频器，顺时针旋转压力调节旋钮“11-7”使主水泵开始运转，至主水泵压力表“11-4”升至 0.3MPa 左右；
7. 按下压力自动/手动控制按钮“11-5”， 等待泵出口压力稳定在设定值附近；
10. 待泵出口压力稳定后，点击“清空数据库”按钮，再点击“开始记录”按钮，开始记录数据；
11. 调节阀门 F7 使压力改变 0.05MPa 左右，造成人为干扰，观察压力恢复过程；待压力过渡过程结束后，点击“停止记录”按钮，再点击“数据处理”按钮，进入“离心泵恒压力控制实验”画面；
12. 点击“数据处理”按钮，从数据库读出实验数据，生成实验曲线；
13. 点击“导出数据”按钮，可生成实验数据文本文件，输入文件名称及文件类型后，按

“保存”按钮，保存数据文件。

14. 点击“打印”按钮，打印实验数据和实验曲线。

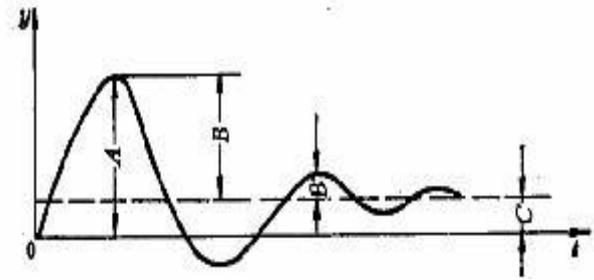
15. 重复第 5 步，改变控制参数 P、I 值，可得到不同的过渡过程。

16. 点击“退出”按钮，退出实验程序。

五、计算过渡过程质量指标

1. 最大偏差 A: 被调参数的最大值。

2. 余差 $e(\infty)$: 当过渡过程终了时，被调参数所达到的新的稳态值与给定值之差:



$$e(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} [y(t) - y_s] \quad (6-2)$$

3. 衰减比 n: 过渡过程曲线上同方向的相邻两个波峰之比:

$$n = B : B' \quad (6-3)$$

一般 n 在 4~10 之间为宜。

4. 振荡周期: 过渡过程同向两波峰(或波谷)之间的间隔时间叫振荡周期或工作周期，在衰减比相同的情况下，周期与过渡时间成正比，一般希望振荡周期短一些为好。

5. 过度时间 t_s : 从干扰作用发生的时刻起，直到系统重新建立新的平衡时止，过渡过程所经历的时间

六、要求

1. 写出实验报告。

2. 回答思考题。

思考题

1. 离心泵恒压力控制系统在流量阶跃干扰作用下，比例度 P 的大小对过渡过程会产生什么影响?

2. 离心泵恒压力控制系统在流量阶跃干扰作用下，积分常数 I 的大小对过渡过程会产生什么影响?

实验七 液位对象特征测定实验

一、实验目的

1. 分别测定单容有自恒特性和单容无自恒特性以及双容液位在阶跃扰动下的液位特征。
2. 掌握被控对象特征测试的意义，掌握测取被控对象特征的方法。

二、基本原理

被控对象的特性是由生产工艺过程和工艺设备决定的。被控对象的特性就是当被控对象的输入变量发生变化时，其输出变量随时间的变化规律。在连续生产过程中，最基本的关系是物料平衡和能量平衡。

1. 有自恒特性的单容液位对象

有自恒特性的单容液位对象如图 7-1 所示

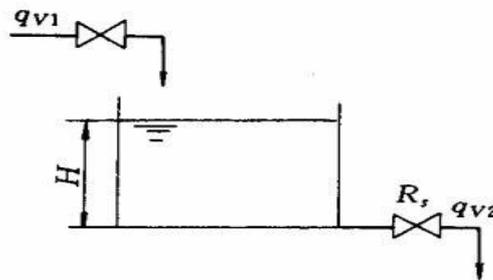


图 7-1 有自衡特性的单容液位对象

水槽中的水位在任何时刻的变化均满足下面的物料平衡关系：

$$qv1 - qv2 = \frac{dV}{dt} \quad (7-1)$$

式中：

V---水槽内液体的贮存量(液体的体积)

qv1 ---进水流量

qv2 ---出水流量

dV / dt---贮存量对时间的变化率

设水槽的横截面积为 A，描述单容水槽被控对象的微分方程式为：

$$A \frac{dH}{dt} + \frac{H}{R_s} = \frac{qv1}{R_s} \quad (7-2)$$

$$T \cdot \frac{dH}{dt} + H = K \cdot qv1 \quad (7-3)$$

$$T = A R_s, \quad K = R_s, \quad qv2 = \frac{H}{R_s}$$

式中： R_s ---出水阀阻力系数， $R_s = \frac{H}{qv}$ ，为精确测定 R_s ，可在初始稳定状态和最

终稳定状态测量，求两次测量的平均值；

A ---水槽的横截面积， m^2

T ---时间常数, s

K ---被控对象的放大系数, s/ m^2

2. 无自衡特性的单容液位对象

无自恒特性的单容液位对象如图 7-2 所示

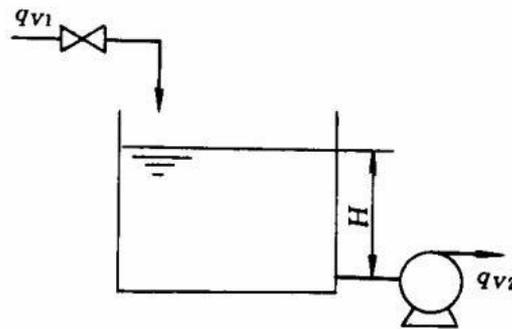


图 7-2 无自衡特性的单容液位对象

由于泵的出口流量 qv_2 不随液位变化而变化，因此对象的动态方程为：

$$\square qv_1 = A \frac{dH}{dt} \quad (7-4)$$

在 t_0 时刻之前，被控对象处于平衡状态， $qv_1=qv_2$ 。假定在 t_0 时刻水槽的流入量突然有一个阶跃变化 $\square qv_1$ ，

$$H = \frac{\square qv_1}{A} (t - t_0) \quad (7-5)$$

由于水槽的流出量不变，所以当流入量突然增加 $\square qv_1$ 时，液位 H 将随时间 t 的推移恒速上升，不会重新稳定下来，直至水槽顶部溢出，既无自衡特性。

无自衡特性的被控对象在受到扰动作用后不能重新恢复平衡。

3. 双容液位对象

双容水槽是两个串联在一起的水槽，如图 7-3 所示。

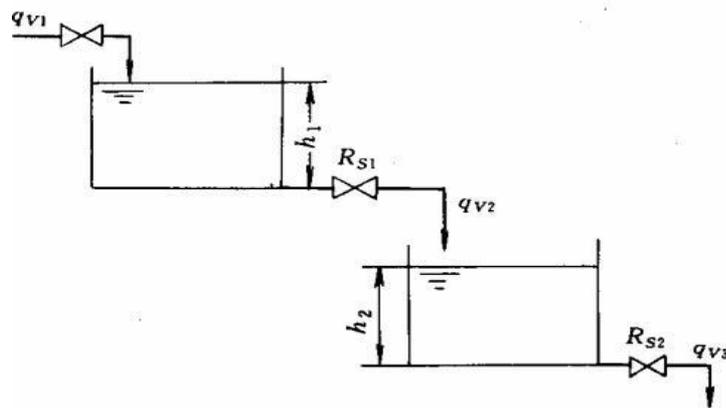


图 7-3 双容液位对象

两个水槽之间的连通管具有阻力，因此这两个水槽的液位不同。来水 q_{v1} 首先进入水槽 1，然后再通过水槽 2 流出。水的流入量 q_{v1} 由阀 1 控制，流出

量 q_{v2} 决定于阀 2 的开度(根据用户的需要改变)，被控变量是水槽 2 的液位 h_2 。根据物料平衡方程，双容水槽被控对象的二阶微分方程式为：

$$\oplus \frac{d^2 h_2}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dh_2}{dt} + h_2 = \oplus \frac{K q_{v1}}{2} \quad (7-6)$$

式中：

T_1 为水槽 1 的时间常数， $T_1 = A_1 R_{s1}$

其中： A_1 ——水槽 1 的横截面积； R_{s1} ——水槽 1 出水阀的阻力系数；

T_2 为水槽 2 的时间常数， $T_2 = A_2 R_{s2}$

其中： A_2 ——水槽 2 的横截面积； R_{s2} ——水槽 2 出水阀的阻力系数；

K 为被控对象的放大倍数， $K = R_{s2}$

三、实验装置

过程设备与控制基本实验综合实验台

四、有自恒特性的单容液位对象实验步骤

(一) 实验台阀门操作

关闭 F4、F8、F11，打开 F1、F2、F3、F5、F6、F7、F9、F10；

(二) 控制台操作

1. 向右扳动控制台面板上的总控开关 11-13，启动控制台；

2. 流量自动/手动控制按钮 11-3 置于手动位置，顺时针旋转“流量调节”旋钮 11-7，打开电动调节阀；

3. 向左扳动选择开关“11-6”，将水泵运行设置成变频启动方式；按下“主水泵开”按钮 11-9，启动变频器；

4. 调节“压力调节”旋钮 11-7，使主水泵的转速恒定在 2000 r.p.m.；

5. 启动实验程序，进入有自恒特性的单容液位实验程序；

6. 调节阀门 F2, 改变水槽 1 (高位槽) 的出水流量 q_{v2} , 使水槽 1 的水位稳定在 100mm,

记录进水流量 q_{v1} (q_{v2}) 和水槽 1 的液位 h_1 ;

7. 在液位实验程序画面中, 先点击“清空数据库”, 然后点击“记录数据”;

8. 顺时针迅速旋转压力调节旋钮 11-7 使主水泵转速增加至 2200 r.p.m;

9. 调解阀 7 和 F2, 使流量在 0.35L/S; 观察水槽 1 上的玻璃管液面计和屏幕上的液位记录曲线, 至液位重新平衡;

10. 点击“停止记录”按钮; 打印液位曲线。

11. 逆时针旋转压力调节旋钮 11-7, 关闭主水泵。

五、无自恒特性的单容液位对象实验步骤

(一) 实验台阀门操作

关闭 F1、F4、F8, 打开 F2、F3、F5、F6、F7、F9、F10、F11;

(二) 控制台操作

1. 向右扳动控制台面板上的总控开关 11-13, 启动控制台;

2. 流量自动/手动控制按钮 11-3 置于手动位置, 顺时针旋转“流量调节”旋钮 11-7, 打开电动调节阀;

3. 向左扳动选择开关“11-6”, 将水泵运行设置成变频启动方式; 按下“主水泵开”按钮 11-9, 启动变频器;

4. 调节“压力调节”旋钮 11-7, 使主水泵的转速恒定在 2000 r.p.m.;

5. 启动实验程序, 进入无自恒特性的单容液位实验程序;

6. 按下开关 11-12, 启动副水泵;

7. 调节球阀 F2, 改变水槽 1 (高位槽) 的出水流量 q_{v2} , 使水槽 1 的水位稳定在 100mm, 记录进水流量 q_{v1} (q_{v2}) 和水槽 1 的液位 h_1 ;

8. 在液位实验程序画面中, 先点击“清空数据库”, 然后点击“记录数据”;

9. 顺时针迅速旋转压力调节旋钮 11-7 使主水泵转速增加至 2200 r.p.m;

10. 观察水槽 1 上的玻璃管液面计和屏幕上的液位记录曲线, 至液位达到水槽 1 (高位槽) 液面计上限时; 点击“停止记录”按钮; 按下“副水泵关” 11-11 按钮, 关闭副水泵; 逆时针旋转压力调节旋钮 11-7, 再按下“主水泵关” 11-10 按钮, 关闭主水泵。

11. 打印液位曲线;

六、双容液位对象实验步骤

(一) 实验台阀门操作

关闭 F4、F8、F11, 打开 F1、F2、F3、F5、F6、F7、F9、F10;

(二) 控制台操作

1. 向右扳动控制台面板上的总控开关 11-13, 启动控制台;

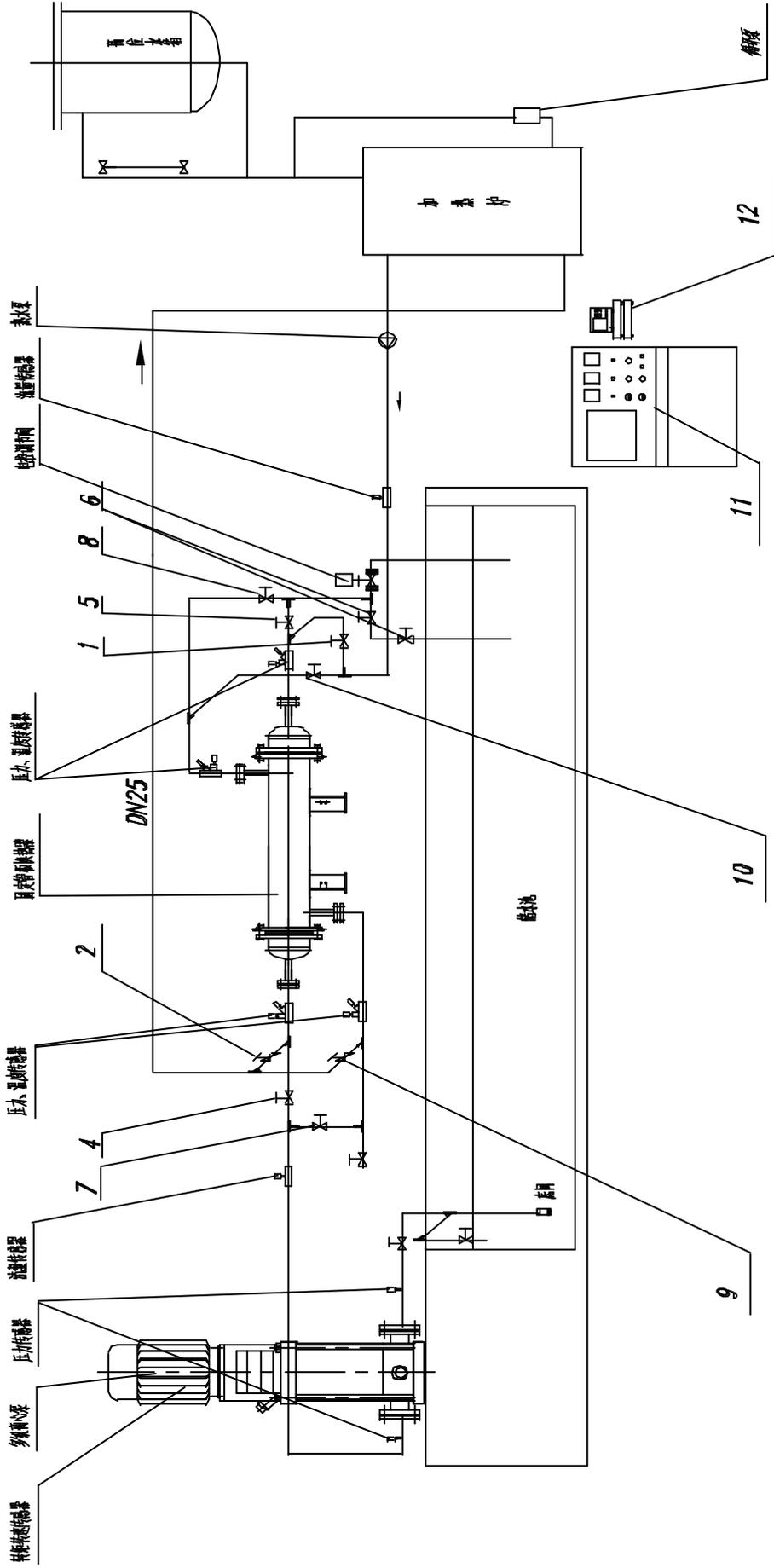
2. 流量自动/手动控制按钮 11-3 置于手动位置, 顺时针旋转“流量调节”旋钮 11-7, 打开电动调节阀;

3. 向左扳动选择开关“11-6”，将水泵运行设置成变频启动方式；按下“主水泵开”按钮 11-9，启动变频器；
4. 启动实验程序，进入双容液位实验程序；
5. 调节球阀 F2，改变水槽 1（高位槽）的出水流量 q_{v2} ，使水槽 1、水槽 2 的水位均稳定在 100mm 左右，记录进水流量 q_{v1} (q_{v2})、水槽 1 的液位 h_1 和水槽 2 的液位 h_2 ；
6. 在液位实验程序画面中，先点击“清空数据库”，然后点击“记录数据”；
7. 顺时针迅速旋转压力调节旋钮 11-7 使主水泵转速增加至 2200 r.p.m；
9. 观察水槽 1、水槽 2 上的玻璃管液面计和屏幕上的液位记录曲线，至液位重新平衡；
10. 点击“停止记录” 按钮；打印液位曲线。
11. 逆时针旋转压力调节旋钮 11-7，再按下“主水泵关” 11-10 按钮，关闭主水泵。

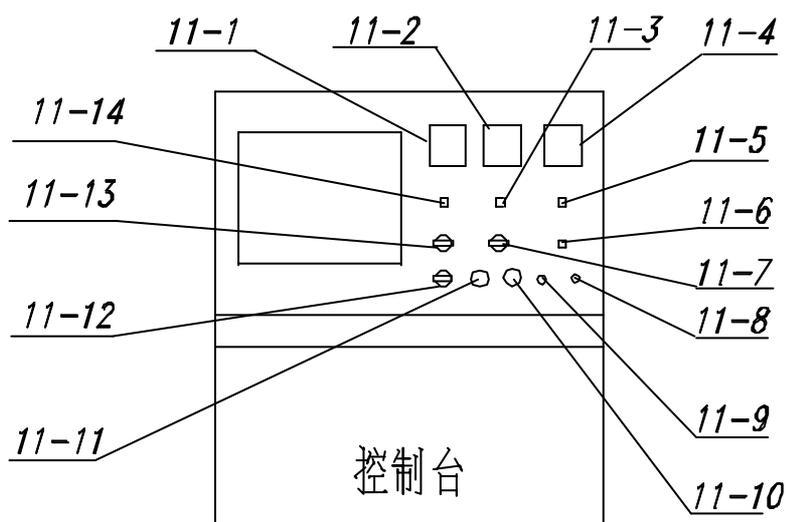
七、实验报告内容及要求

1. 简述实验目的、实验原理。
2. 计算有自恒特性的单容液位对象的出水阀的阻力系数 R_s 、时间常数 T 和被控对象的放大系数 K ；
3. 计算双容液位对象中水槽 1 的出水阀阻力系数 R_{s1} 、水槽 2 的出水阀阻力系数 R_{s2} ，水槽 1 的时间常数 T_1 、水槽 2 的时间常数 T_2 ；被控对象 h_2 的放大倍数；
4. 列出双容水槽被控对象的二阶微分方程式；
5. 用作图法求出容量滞后时间 τ_c （在响应曲线的拐点处作切线，切线与时间轴的交点与被控变量开始变化的起点之间的时间间隔就是容量滞后时间 τ_c ）。

换热系统多功能综合装置安装流程图



- 1—热液体管程入口阀；2—热液体管程出口阀；4—冷液体管程入口阀；5—冷液体管程出口阀；
- 6—管流量调节阀；7—冷液体壳程入口阀；8—冷液体壳程出口阀；9—热液体壳程入口阀；10—热液体壳程出口阀；
- 11—控制台；12—YI-静态应变仪。



图中：

- 11-1——管程出口温度显示 t_2 ；
- 11-2——冷水泵流量显示 Q_1 ；
- 11-3——流量自动/手动调节按钮，弹起时为手动，按下后为自动；
- 11-4——离心泵出口压力显示 P_2 ；
- 11-5——压力自动/手动调节按钮，弹起时为手动，按下后为自动；
- 11-6——控制方式选择按钮，弹起时为 DCS，按下后为 DDC；
- 11-7——水泵运行选择开关，向左为变频调速运转方式，向右为全速运转方式，中间为空档；
- 11-8——压力调节旋钮（调节电动调节阀的开度）；
- 11-9——流量调节旋钮（调节冷水泵的转速）；
- 11-10——冷水泵关按钮；
- 11-11——冷水泵开按钮；
- 11-12——循环泵开关按钮，顺时针转为开，逆时针转为关；
- 11-13——热水泵开关按钮，顺时针转为开，逆时针转为关
- 11-14——总控制开关，顺时针转为开，逆时针转为关。

实验八 换热器管程和壳程压力降测定实验

一、实验目的

1. 测量换热器管程和壳程的流体压力损失；
2. 分析压力损失和流速之间的关系。

二、实验装置

过程设备与控制多功能实验台

三、实验原理

流体流经换热器时会出现压力损失，它包括流体在流道中的损失和流体进出口处的局部损失。通过测量管程流体的进口压力 p_1 、出口压力 p_2 ，便可以得到管程流体流经换热器的总压力损失 $\Delta p = p_1 - p_2$ ；通过测量壳程流体的进口力 p_{s1} 、出口压力 p_{s2} ，便可以得

到壳程流体流经换热器的总压力损失 $\Delta p = p_{s1} - p_{s2}$ 。

四、实验步骤

1. 打开冷流体管程入口阀 4、冷流体管程出口阀 5，其他阀门关闭，使冷流体走管程；
2. 打开自来水阀门灌泵，保证离心泵中充满水，开排气阀放净空气；
3. 关水，启动泵，调节压力调节旋钮，调整转速使 $P_2=0.7\text{MPa}$ ；
4. 调节出口流量调节阀 6，依次改变冷流体流量从 1.8L/s 到 3.0L/s；
5. 清空数据库，记录数据；
6. 关泵，切换管路，打开冷流体壳程入口阀 7、冷流体壳程出口阀 8，其他阀门关闭，使冷流体走壳程；
7. 调节出口流量调节阀 6，改变冷流体流量从 0.4 L/s 到 2.4L/s；
8. 清空数据库，记录数据。

五、数据记录和整理

让冷水走管程，并改变流量 V ，测量管程流体的进出口压力 p_1 、 p_2 ，计算压力损失 $\Delta p = p_1 - p_2$ ；切换管路，让冷水改走壳程，并改变流量 V ，测量壳程流体的进出口压力 p_{s1} 、 p_{s2} ，计算压力损失 $\Delta p = p_{s1} - p_{s2}$ 。将测量和计算出的结果填入数据表 8-1 中。

表 8-1 实验测量和计算结果

序号	管 程				壳 程			
	V_1 (L/s)	$p_{,1}$ (MPa)	$p_{,2}$ (MPa)	$\Delta p_{,V_s}$ (MPa)	(L/s)	$p_{,1}$ (Mpa)	$p_{,2}$ (Mpa)	$\Delta p_{,}$ (MPa)
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

六、要求

1. 写出实验报告。
2. 根据所测流量 V_1 和 V_2 ，参照实验五附录计算管程流体流经换热器的压力损失并与实验结果进行比较。以流量为横坐标，压力损失为纵坐标，作 $\Delta P_{,V_s}$ 的理论及 $\Delta P_{,V_s}$ 实验曲线，对所得曲线进行分析。
3. 回答思考题。

思考题

1. 如何降低换热器中的阻力损失？
2. 管程压力损失有多项组成，分析比较它们的相对大小。
3. 通过实验四和实验五，说明提高换热器中流体流速的优、缺点。

实验九 换热器换热性能实验

一、实验目的

1. 测试换热器的换热能力；
2. 了解传热驱动力的概念以及它对传热速率的影响。

二、实验装置

过程设备与控制多功能实验台

三、基本原理

换热器工作时，冷、热流体分别处在换热管的两侧，热流体把热量通过管壁传给冷流体，形成热交换。当若换热器没有保温，存在热损失，则热流体放出的热量大于冷流体获得的热量。

热流体放出的热量为：

$$Q = m c_p (T_1 - T_2) \quad (9-1)$$

式中：

$$Q = m c_p (T_1 - T_2)$$

Q ——单位时间内热流体放出的热量，kW；

m ——热流体的质量流率，kg/s；

c_p ——热流体的定压比热，kJ/kg K，在实验温度范围内可视为常数；

T_1 、 T_2 ——热流体的进出口温度，K 或 $^{\circ}\text{C}$ 。

冷流体获得的热量：

$$Q = m_s c_{ps} (t_2 - t_1) \quad (9-2)$$

$$Q = m_s c_{ps} (t_2 - t_1)$$

式中： Q ——单位时间内冷流体获得的热量，kJ/s=kW；

m_s ——冷流体的质量流率，kg/s；

c_{ps} ——冷流体的定压比热，kJ/kg K，在实验温度范围内可视为常数；

t_1 、 t_2 ——冷流体的进出口温度，K 或 $^{\circ}\text{C}$ 。

损失的热量为：

$$\Delta Q = Q - Q_s \quad (9-3)$$

冷热流体间的温差是传热的驱动力，对于逆流传热，平均温差为

$$\Delta t_m = \frac{t_1 - t_2}{\ln(t_1/t_2)} \quad (9-4)$$

式中： $\Delta t_1 = T_1 - t_2$ 、 $\Delta t_2 = T_2 - t_1$ 。

$$\ln(\Delta t_1/\Delta t_2)$$

本实验着重考察传热速率 Q 和传热驱动力 Δt_m 之间的关系。

四、实验步骤

实验前，首先设定初始炉温，待炉温达到设定值后，开始以下步骤。

1. 打开热流体管程入口阀 1、热流体管程出口阀 2，出口流量调节阀 6、冷流体壳程入口阀 7、冷流体壳程出口阀 8，其他阀门关闭，使热流体走管程、冷流体走壳程；
2. 打开灌泵，保证离心泵中充满水，开排气阀放净空气；转动（11-6）水泵运行选择开关为调速运转方式；
3. 关自来水阀门，启动泵。调节压力调节旋钮（11-7），调整转速使压力保持在 0.4Mpa。
4. 调节热流体管程进口阀 1，同时观察实验画面，使热流体流量保持 0.3L/s 不变；
5. 调节出口流量调节阀 6，使冷流体流量保持 1.0L/s 不变；
6. 清空数据库；
7. 关闭热水泵，开循环泵，待炉内水温均匀后，关循环泵开热水泵；
8. 待冷流体的进出口温度 t_1 、 t_2 及热流体的出口温度 T_2 稳定后记录数据；
9. 改变热流体温度，重复步骤 7；
10. 停止实验。

五、数据记录和整理

保持热流体流量 V_1 及冷流体流量 V_2 不变，改变热流体的进口温度 T_1 ，测量冷流体的进出口温度 t_1 、 t_2 及热流体的出口温度 T_2 ，根据公式（9-1）和（9-2）分别计算热流体放出的热量 Q_1 和冷流体获得的热量 Q_2 ，并由式（9-3）计算损失的热量，根据公式（9-4）计算平均温差 Δt_m ，将测量和计算出的结果填入数据表 9-1 中。

表 9-1 实验测量和计算结果

序号	T_1 (°C)	T_2 (°C)	t_1 (°C)	t_2 (°C)	Q_1 (kW)	ΔQ (kW)	Δt_m (°C)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

六、要求

1. 写出实验报告。
2. 以平均温差 Δt_m 为横坐标，热流体放出的热量 Q_1 和热损失 ΔQ 分别为纵坐标作图，对

所得曲线进行分析。

3. 回答思考题。

思考题

1. 热量是如何损失的？怎样才能减少热量损失？
2. 在工程上，很多换热器都采用逆流工艺流程，为什么？
3. 通过有关实验，说明提高换热器中流体平均温差的优、缺点。

实验十 流体传热系数测定实验

一、实验目的

1. 测定换热器的总传热系数；
2. 了解影响换热器换热性能的参数。

二、实验装置

过程设备与控制多功能实验台

三、基本原理

换热器的传热速率 Q 可以表示为：

$$Q = KA\Delta t_m \quad (10-1)$$

式中： Q ——单位时间传热量，W；

K ——总传热系数，W/m² K；

A ——传热面积， $A = \pi d_o n l$ ，m²；

Δt_m ——平均温差，K 或 °C。

在本实验以及以后的实验中： $d_o=0.014\text{m}$ 、 $n=29$ 、 $l=0.792\text{m}$ 分别为换热管的外径、根数和换热长度。

对于逆流传热，平均温差为：

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln(\Delta t_1/\Delta t_2)} \quad (10-2)$$

式中： $\Delta t_1 = T_1 - t_2$ 、 $\Delta t_2 = T_2 - t_1$

T_1 、 T_2 ——热流体的进出口温度，K 或 °C；

t_1 、 t_2 ——冷流体的进出口温度，K 或 °C。

由式 4-1 可得：

$$K = \frac{Q}{A\Delta t_m} \quad (10-3)$$

Q 可由热流体放出的热量或冷流体获得的热量进行计算，即：

$$Q = m_1 c_{p1} (T_1 - T_2) \quad (10-4)$$

$$\text{或 } Q = m_2 c_{p2} (t_2 - t_1)$$

式中有符号说明见实验九。 $Q = m_2 c_{p2} (t_2 - t_1)$ (10-5)

根据式 (10-3) 和式 (10-4) 或 (10-5) 就可以测定在实验条件下的总传热系数 K 。

由于温度传感器测得的数据可能并不是换热器流体入口和出口的温度，因此，要进行管路热量损失计算，需要求出换热器流体入口和出口的温度。

四、实验步骤

1. 打开热流体管程入口阀 1、热流体管程出口阀 2、管程流量调节阀 6、冷流体壳程入口阀 7、冷流体壳程出口阀 8，其他阀门关闭，使热流体走管程、冷流体走壳程；
2. 打开自来水阀门灌泵，保证离心泵中充满水，开排气阀放净空气；
3. 关水，启动泵，调整转速使之恒定不变；
4. 调节热流体管程出口阀 2，使热流体流量保持 0.2L/s 或 0.3L/s 不变；
5. 调节管程流量调节阀 6，改变冷流体流量从 0.4L/s 到 1.2L/s；
6. 清空数据库；
7. 改变热流体的进口温度 T_1 ，待温度达到 T_1 开循环泵，后关循环泵开热水泵，待冷流体的进出口温度 t_1 、 t_2 及热流体的出口温度 T_2 稳定后记录数据。

五、数据记录和整理

保持热流体流量 V_2 及温度 T_1 不变，改变冷流体流量 V_1 ，测量冷、热流体的进出口温度 t_1 、 t_2 、 T_1 、 T_2 ，根据式 (10-2) 计算平均温差 Δt_m ，根据式 (10-4) 计算热流体放出的热量 Q_2 ，根据式 (10-5) 计算冷流体获得的热量 Q_1 ，根据式 (10-3) 计算总传热系数 K 。将测量和计算出的结果填入数据表 10-1 中。

表 10-1 实验测量和计算结果

序号	V_2 (L/s)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	t_1 (°C)	t_2 (°C)	V_1 (L/s)	Δt_m (°C)	K (W/m ² K)
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

六、要求

1. 写出实验报告。
2. 根据所测参数，参照实验四附录计算总传热系数 K 并与实验结果进行比较。以流量为横坐标，总传热系数 K 为纵坐标，作 $V_1 \square K$ 的理论与实验曲线，对所得曲线进行分析。

3. 回答思考题。

思考题

1. 总传热系数 K 和流体对流传热系数 α 及污垢热阻 R 有怎样的关系，为什么流体流量大小会影响总传热系数 K ?
2. 有些换热器被设计成多管程或多壳程，试根据本实验结果说出其中的道理？

安全专业实验讲义

目 录

前 言.....	64
实验室安全守则.....	65
实验室工作规则.....	66
意外事故的处理.....	67
实验教学的要求.....	68
实验一 闪点和燃点的测定.....	69
实验二 接地电阻的测定.....	73
实验三 着火性实验.....	77
实验四 可燃固体的燃烧实验.....	81
实验五 禁水性物质实验.....	83
实验六 超声波测厚.....	85
实验七 可燃固体氧指数的测定.....	89
实验八 气体爆炸实验.....	94
实验九 内压薄壁容器应力测定.....	98
实验十 振动与隔振实验.....	103

前 言

《安全工程专业实验》讲义是随着安全工程专业课程体系的建设和改革，按照“厚基础、宽专业、高素质、高能力”教学目标要求，基于基本专业知识体系的构建而编写的，本专业实验既有相关专业的实验项目，又有本专业特有的专业技术实验，是一门理论性和实践性很强的新兴学科。

本课程是安全工程本科生的专业基础课，通过本课程的学习，使学生掌握实验的基本方法和技巧，巩固专业理论知识。本课程的目的，是通过专业实验的实践环节，使学生加深对专业课程有关内容的理解与掌握，掌握专业实验方法和一些基本实验技术，让学生充分的了解和掌握实验设备、仪器的工作原理，给学生更多的时间进行实验的设计，增加学生实验的内容，提高学生的动手能力和科技创新能力，同时培养学生的团结协作能力。

本课程的教学活动要求学生课前预习，明确实验目的，掌握概念与仪器、设备的工作原理；重点掌握实验的方法与技能，掌握实验操作规程和数据采集与分析的理论基础，熟悉相关的理论计算；在实验过程中，应积极听实验指导教师的讲解，主动思考，熟悉测试技术，实验操作积极主动，细致认真，能逐步编制实验方案，实验记录完整。实验后及时提交实验报告。对实验报告的要求，根据每个实验的内容特点及有关要求完成，做到认真规范，内容详实。

参与本实验讲义由高晓蕾、刘诗飞等教师参照国内兄弟院校相关实验讲义编写。实验九、十的讲义由过程装备与控制工程专业实验中心提供，在此表示衷心感谢。

编者时间仓促，又水平有限，难免又不足和欠妥之处，恳请读者提出宝贵意见。

编者

2007年12月

实验室安全守则

1. 贯彻“安全第一，预防为主”方针，严格执行院、系的各项安全规章。
2. 严格执行压力容器使用操作规程。经常检查钢瓶及连接管路的气密性，防止气体泄漏，可燃气体放空时必须引至室外。
3. 存放或使用易燃物质的实验室严禁明火，有毒物质的使用和处理需在通风橱内进行
4. 了解常用化学试剂的贮存、使用知识、严禁随意混合不明性质的化学试剂。切实注意防止火焰、爆炸、化学灼伤、创伤和中毒等事故发生。
5. 注意用电安全，防止人身触电及设备仪器损坏事故。

6. 熟悉一旦发生意外事故时应采取的措施。
7. 最后离开实验室的人员注意检查各仪器控制开关、水、电、气总开关及门窗是否关好。特别要注意防止水害，杜绝无人操作运行等。

实验室工作规则

1. 学生进行实验，必须做好实验的预习，否则教师有权取消学生本次实验的资格。
2. 学生在实验室内必须遵守纪律。保持安静，集中精神，认真操作，仔细观察，如实记录。
3. 爱护实验仪器、设备，严格按照操作规程进行实验。若发现异常，应立即停止使用，并报告指导教师，及时排除，若有损坏必须如实并及时登记，按章赔偿。
4. 遵守试剂取用规则，注意节约药品，材料以及水、电、气等。实验过程中应养成良好的工作习惯。保持整洁的实验环境。
5. 废纸、火柴梗等应倒入垃圾箱内；废液应倒入废液缸内，严禁倒入水槽，以防止水道堵塞和腐蚀。

6. 实验完毕，应立即关闭仪器控制开关及水、电、气开关，并将仪器洗涤干净，整理好实验台，搞好实验室的清洁卫生。
7. 实验室的仪器，药品，材料和工具等不得擅自带离实验室，更不得据为己有，一经发现，给予相应处罚。
8. 实验过程中，未经指导教师允许，不得擅自离开实验室。

意外事故的处理

1. 割伤。应用蒸馏水洗净伤口，搽 L 红药水和紫药水，并撒消炎粉包扎好，若为玻璃割伤，应先挑出伤口里的玻璃碎片，再进行相关处理。
2. 烫伤。先用凉水冲洗降温，再搽上烫伤药。
3. 受碱或酸灼伤。先用凉水冲洗，若为碱液，再用 1% 硼酸溶液冲洗；若为酸液，则用 1% 碳酸氢钠溶液冲洗，最后再用水洗。
4. 吸入刺激性或有毒气体时，应立即到室外呼吸新鲜空气，有毒药品严禁入口或接触皮肤，以防中毒。
5. 触电。首先切断电源，必要时进行人工呼吸。
6. 起火。应首先切断电源，迅速移走易燃物品等以防火灾蔓延；与此同时，选用合适的灭火方法，小火可用湿布、石棉布或砂子等覆盖燃烧物；有机溶液燃烧时，大多数情况下严禁用水灭火，可用干粉或二氧化碳灭火器灭火；电器设备着火时不能用泡沫灭火器，只能用二氧化碳或干粉灭火器灭火；实验人员的衣服着火时，切勿惊慌乱跑，应赶快脱下衣服，或用石棉布覆盖着火处。

实验教学的要求

一、预习

为使实验顺利地进行并收到预期效果，实验前应做好充分准备，预习要做到以下几点： 1. 明确实验目的。

2. 阅读实验指导书及有关的教材、参考书，掌握实验原理、实验内容和步骤；明确实验中应记录的数据和注意事项。

3. 认真思考实验中发现的问题。

4. 每位学生都必须准备一本装订好的实验记录本，并编上页码，用于实验时作原始记录。

5. 实验要求：在实验记录本上简单扼要地写明实验目的、内容和步骤，实验注意事项和观察的现象、原始数据记录项目及表格等，作为预习报告，若不符合要求或草率者需重写后方能进行实验。

二、实验

学生在实验中应做到：

1. 按实验指导书提供的方法，步骤认真操作，仔细观察实验现象。

2 按照要求及时并如实记录原始数据，实验现象和结果。

3. 实验过程中应勤于思考，发现问题，进行分析并加以解决。

4. 实验完成后，原始记录经教师检查，认为符合要求后，按实验室工作规则结束实验，经教师同意后，方可离开实验室。

三、实验报告

实验结束后，要求在规定的时间内写出实验报告。其内容包括：实验目的、简单原理、实验装置或仪器、实验数据及处理、现象及讨论等。经指导教师审查，如实验报告不符合要求，必须重做实验或重写报告。

实验一 闪点和燃点的测定

一 实验目的

- 1、掌握闪点、开口闪点、闭口闪点、燃点的定义；
- 2、掌握可燃液体的划分方法，掌握闪点、燃点与物质危险性的关系；
- 3、掌握爆炸极限的定义；
- 4、掌握闪点、燃点的测定方法。

二 实验内容

使用闪点测定仪器测定矿、植物油开、闭口闪点及燃点。

三 实验原理

将相对定量的待测物质加入闪点测定仪，按国家标准规定的升温速率对待测物质进行升温操作，在接近闪点的温度区，按规定的频率对试样上方蒸汽进行点燃，当试样上方蒸汽与火焰接触发生闪火时的最低温度即为闪点。

继续加热试样，当试样加热到能被接触的火焰点燃，并燃烧不少于 5 秒时的温度，称为燃点。

四 实验仪器

- 1、开口闪点自动测定仪；
- 2、闭口闪点自动测定仪；
- 3、液化气钢瓶；
- 4、电火花点火器。
- 5、大气压计



图 1 开口闪点测定仪



图 2 闭口闪点测定仪

五 实验步骤

1、实验前准备

1) 试样准备:

当试样的水分大于 0.1% 时, 必须脱水。脱水处理的方法是在试样中加入新煅烧并冷却的食盐、硫酸钠或无水氯化钙, 以达到干燥试样的目的。

闪点低于 100℃ 的试样脱水时不必加热; 其他试样允许加热至 50~80℃ 时用脱水剂脱水。脱水后, 取试样的澄清部分供试验使用。

2) 仪器准备:

① 测定前应对放置试样的坩锅用溶剂油或其它溶剂进行洗涤, 并应充分洁净和干燥。

② 检查液化气钢瓶与闪点测定仪的连接是否正确。

2、实验操作步骤

1) 检查仪器是否安装正确;

2) 根据试样特性设定仪器工作程序;

3) 检查燃气连接管和接头是否无泄漏;

4) 将待测试样倒入洁净的坩锅中, 试样的上液面应与规定刻度线平齐;

5) 启动仪器工作程序, 加热坩锅, 使试样温度逐渐升高温度, 当试样温度达到预计闪点前 40℃ 时, 应控制升温速度为每分钟升高 4 ± 1 ℃;

6) 当试样温度达到预计闪点前 20℃ 时, 试样温度每升高 1℃, 仪器点火扫描杆点火头对试样上方蒸汽进行自动扫描一次;

7) 扫描火苗使试样表面的蒸汽产生点燃时的温度即为所测闪点, 测试结果可有打印机自动打印。

8) 测得试样的闪点之后, 如果还需要测定燃点, 应继续对外坩锅进行加热, 使试样的升温速度为每分钟升高 (4 ± 1) ℃。然后, 用点火器的火焰进行点火试验。试样接触火焰后立即着火并能继续燃烧不少于 5 秒, 此时立即从温度计读出温度作为燃点的测定结果。

9) 关闭燃气瓶总阀, 关闭电源。

3、大气压力对闪点和燃点影响的修正

进行闪点 (或燃点) 测定时应同时记录当时的大气压力, 并对测试结果进行数据校正。

1) 开口闪点 (或燃点) 的大气压力校正

① 大气压力低于 99.3 kPa (745mmHg) 时试验所得的闪点或燃点 t_0 应按下式进行修正 (精确到 1℃):

$$t_0 = t + \Delta t$$

式中 t_0 — 相当于 101.3 kPa (760mmHg) 大气压力时的闪点或燃点, °C;

t — 在试验条件下测得的闪点或燃点, °C;

Δt — 修正数, °C。

② 大气压力在 (72.0~101.3) kPa [(540~760) mmHg] 范围内, 修正数 $\Delta t / ^\circ\text{C}$ 可按以下两式) 计算:

$$\Delta t = (0.000152t + 0.028) (101.3 - P) \times 7.5$$

$$\Delta t = (0.000152t + 0.028)(760 - P_1)$$

式中 P —— 试验条件下的大气压力, kPa;

t —— 在试验条件下测得的闪点或燃点(300℃以上仍按 300℃计), °C;

0.00015, 0.028 —— 试验常数;

7.5 —— 大气压力单位换算系数;

P_1 —— 试验条件下的大气压力, mmHg。

注: 对 64.0~71.9 kPa ((480~539mmHg)大气压力范围, 测得闪点或燃点的修正数也 Δt 也可参照采用以上两式进行计算。此外, 修正数 Δt 还可以从下表查出。

闪点或燃点 t/°C	在下列大气压力 P/kPa(mmHg)时的修正值 Δt /°C										
	72.0 (540)	74.6 (560)	77.3 (580)	80.0 (600)	82.6 (620)	85.3 (640)	88.0 (660)	90.6 (680)	93.3 (700)	96.0 (720)	98.6 (740)
100	9	9	8	7	6	5	4	3	2	2	1
125	10	9	8	8	7	6	5	4	3	2	1
150	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
175	12	11	10	9	8	6	5	4	3	2	1
200	13	12	10	9	8	7	6	5	4	2	1
225	14	12	11	10	9	7	6	5	4	2	1
250	14	13	12	11	9	8	7	5	4	3	1
275	15	14	12	11	10	8	7	6	4	3	1
300	16	15	13	12	10	9	7	6	4	3	1

2) 开口闪点(或燃点)的精密度和重复性要求

(1) 同一操作者重复测定的两个闪点（或燃点）结果之差不应大于下列数值

闪点, t / °C	≤ 150 °C	> 150 °C
重复性, t / °C	4 °C	6 °C

(2) 同一操作者重复测定的两个闪点（或燃点）结果之差不应大于 6 °C。

3) 闭口闪点的大气压力校正

(1) 观察和记录大气压力，按下式计算在标准大气压力 101.3kPa (760mmHg) 时闪点修正数 $\Delta t / \text{C}$ ：

$$\Delta t = 0.25 (101.3 - P_1)$$

$$\Delta t = 0.0345 (760 - P_2)$$

式中 P —— 实际大气压力。P₁ 的单位为千帕 (kPa)；P₂ 的单位为 mmHg。

(2) 观察到的闪点数值加修正数，修正后的数据以整数报结果，此外，修正数 Δt 还可以从下表查出：

不同大气压力范围的闪点修正值 Δt

大气压力 P/mmHg	修正数 $\Delta t / \text{C}$
630~658	+4
659~687	+3
688~716	+2
717~745	+1
775~803	-1

4) 闭口闪点的精密度和重复性要求

(1) 重复性 同一操作者重复测定两个结果之差，不应超过以下数值：

闪点范围, t / °C	104 或低于 104 °C	高于 104 °C
允许差数, t / °C	2	6

(2) 再现性 由两个实验室提出两个结果之差，不应超过以下数值：

闪点范围, t / °C	104 或低于 104 °C	高于 104 °C
允许差致, t / °C	4	8

5) 数据报告

(1) 取重复测定两个闪点结果的算术平均值，作为试样的闪点。

(2) 取重复测定两个燃点结果的算术平均值，作为试样的燃点。

六 注意事项

- 1) 实验中坩锅和被测物料温度较高，应注意防止发生热烫伤；
- 2) 实验中使用有液化气，实验过程中嗅到异味应及时关闭液化气钢瓶的根部角阀，并向实验老师报告。
- 3) 不要乱动电气接头，不要使用潮湿的手或物品触摸电线和设备，防止触电。
- 4) 燃点测定后及时熄灭。

七 思考题

- 1) 闪点、燃点有什么区别，它们与物质的危险性有什么关系；
- 2) 燃烧有几种类型？燃烧的必须具备的三要素是什么；
- 3) 列出可能构成物质危险性的几种物理性质名称；
- 4) 可燃液体根据闪点高低是如何分类的；
- 5) 什么是爆炸浓度极限。

实验二 接地电阻的测定

一 实验目的

- 1、掌握接地电阻测量仪的使用方法；
- 2、掌握接地电阻测量的意义；
- 3、了解常用的避雷和防静电危害的方法。

二 实验内容

使用接地电阻测量仪测定指定物品的接地电阻值。

三 实验仪器与工作原理

接地电阻测量仪外形如下图，由手摇发电机、电流互感器、滑线电阻器及检流计等组成，附件有辅助探棒导线等。仪器的工作原理为基准电压比较原理。仪器的电路图见图 1，仪器外形图见图 2。

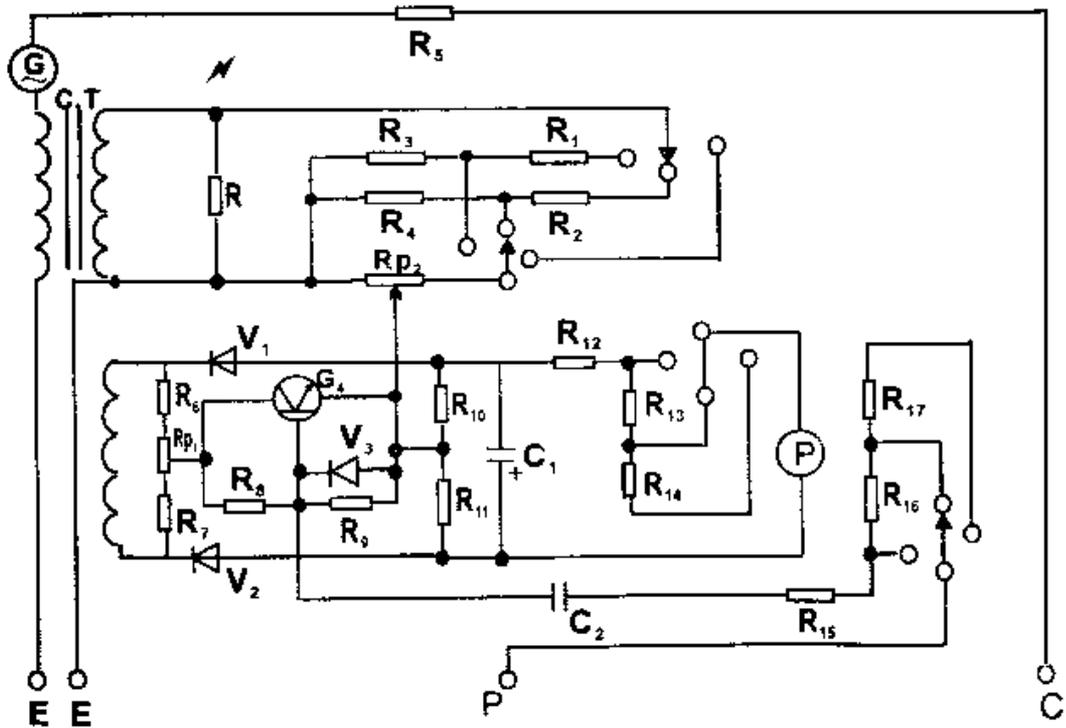


图 1 接地电阻测量仪电路图

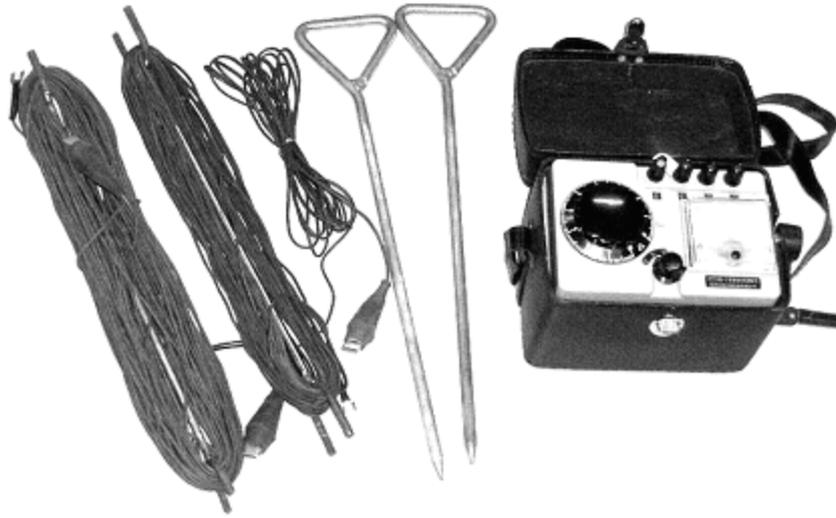


图 2 接地电阻测量仪外形图

四 测量接地电阻时仪器的接线方式

进行接地电阻测量时，仪器的 E 端钮接 5 m 导线，P 端钮接 20 m 导线，C 端钮接 40 m 导线，导线的另一端分别接被测物接地极 E'，电位探棒 P' 和电流探棒 C'，且 E'、P'、C' 应保持直线，其间距为 2.0 m。

① 测量大于等于 1Ω 接地电阻时仪器的连接方式见图 3，需将仪表上 2 个 E 端钮连接在一起。

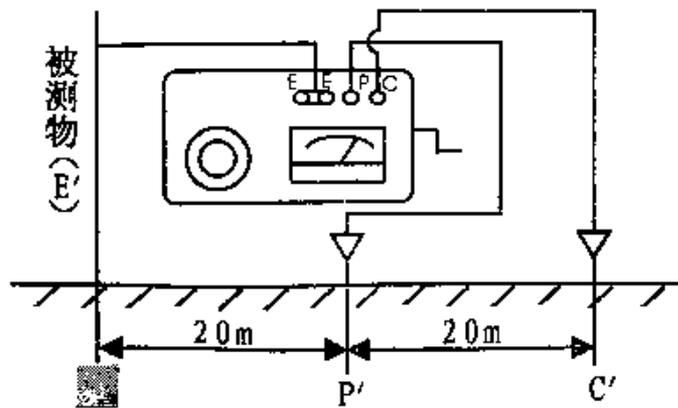


图 3 测量大于等于 1Ω 接地电阻时仪器的连接方式

② 测量小于 1Ω 接地电阻时仪器的连接方式见图 4，需将仪表上 2 个 E 端钮导线分别连接到被测连接体上，以消除测量时连接导线电阻对测量结果引入的附加误差。

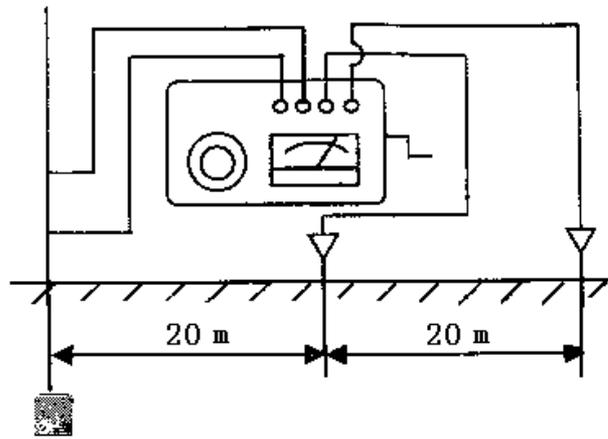


图 4 测量小于 1Ω 接地电阻时仪器的连接方式

③ 测量低电阻导体时仪器的连接方式见图 5，需将仪表上 2 个 E 端钮短接在一起，然后分别连接到被测物上。

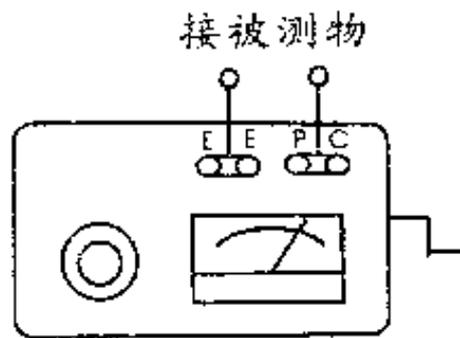


图 5 测量低电阻导体时接地电阻时仪器的连接方式

五 仪器的操作步骤

- 1) 确认仪器端接线正确无误；
- 2) 将仪器水平放置，调整检流器至机械零位；
- 3) 将仪器的“倍率开关”置于最大倍率档，逐渐加快摇柄转速，使其达到 150 转/分。当检流计指针向一个方向偏转时，旋动刻度盘，使检流计指针指在“0”上。此时刻度盘上读数乘上倍率档即为被测电阻值。
- 4) 如刻度盘读数小于 1 时，仍未取得平衡，可将倍率开关置于小一档的位置。直到调节到完全平衡为止。

六 注意事项

- 1) 禁止在有雷电或被测物体带电时进行测量。;
- 2) 向地面固定探棒时, 小心手、脚被砸伤。
- 3) 仪器携带、使用时应小心轻放、避免剧烈震动。
- 4) 若发现仪表检流计指针有抖动现象, 可变化摇柄转速, 以消除抖动现象。
- 5) 若仪表的检流计灵敏度过低, 可在探棒周围注水或盐水以湿润。

七 思考题

- 1) 避雷接地电阻值应小于多少欧姆; 可燃液体储罐接地电阻值应小于多少欧姆;
- 2) 可燃液体管线接地电阻值应小于多少欧姆, 接地电阻值过大有什么危害; 可以采用什么安全措施。
- 3) 接地的作用是什么? 什么是接地电阻?
- 4) 在测接地电阻时, 有哪些因素造成接地电阻不准确, 如何避免?
- 5) 为什么在测接地电阻时, 要求测量线分别为 20 m 和 40 m。
- 6) 被保护的电器设备的接地端是否可以不断开测试, 对测试仪表或被保护设备有什么影响?

实验三 着火性实验

一 实验目的

测定固体无机物对外部点火源的反应, 推断其着火的安全性。

二 实验内容

采用简单易行的 BAM 着火性实验来判断固体无机物的安全性。

三 实验原理

本实验把一定质量的试样与不同的点火源接触，观察其是否着火，并依据样品着火的难易程度，来判断其危险性。

四 实验仪器及样品

1. 实验仪器

手枪式燃气点火器，导火索，气体打火机，电烙铁，无机绝热板或瓷砖，大铁夹，秒表，天平等。

2. 实验样品

依据实验目的，选用一些常用的实验样品，主要包括：硫、磷以及它们与其他无机物的混合物等。

3. 实验场所

进行实验的场所应保持温度在 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ，湿度 $50 \pm 10\%$ ，常压且近于无风的状态，因燃烧而产生有毒气体时，实验处应有通风设备；在不易判断燃烧的情况下，必要时应减弱实验场所的亮度。

五 实验步骤

1. 实验准备

(1) 供实验用的物品（试样）原则上应保持市场上流通时的形状，但块状的物体体积超过 3 cm^3 ，采用切断或破碎的方法使样品的体积为 3 cm^3 左右，并把破碎好的样品放于硅胶干燥器中常温下保存 24 小时以上。

(2) 检查各实验仪器是否完好。

2. 实验方法

称取质量为 3g 的试样置于 10cm 以上、边长 12~15cm 的四方形无机绝热板或瓷砖上。

(1) 铈—铁火花实验：用手枪式燃气点火器的铈—铁火花，距试样 5m 处喷射。

(2) 导火索实验：用 5cm 的导火索末端喷出的火焰对距 5mm 处的粉末状试样点火，看是否能点着，共做 5 次。为防导火索受潮，实验前应置于保干器中。

(3) 小燃气火焰实验，用长 200mm、宽 5mm 的气体打火机火焰尖端对试样点火，看在 10 S 内点燃，共实验 5 次。

(4) 赤热铁棒实验：用直径 5mm 的电烙铁，加热至 800°C 与试样进行接触时间不超过 10 S，看是否点着，每次实验时都要重新加热电烙铁。

六 实验记录

(1) 易着火性物质：即在铈—铁火花和导火索实验中能立即点着，或用小燃气火焰在 1S 内能点着的物质。

(2) 着火性物质：即小燃气火焰实验中需 1S 以上才能点着，或赤热电烙铁实验能点着的物质；

(3) 难点着物质：即以上四种实验中都点不着的物质。

实验数据记录表

方法 试样		铈—铁火花					导火索实验					小燃气实验					赤铁棒实验				
试样 一	着火 否																				
	时																				

七 注意事项

(1) 由于本实验中应用到一些明火和高温物体，因此在实验过程中应按规定操作，并戴好防护用具，以防止被烧伤和灼伤。

(2) 本实验接触一些电气设备，一定要注意用电安全。

八 思考题

- (1) 什么是着火性，着火性是哪些物质的重要性质，为什么？
- (2) 为什么将着火性实验作为确认反应性化学物质危险性的基础筛选实验之一；
- (3) 试样中哪些为易着火性物质、着火性物质、难点着物质；
- (4) 固体的着火性可采用哪些条件的变化进行测定；
- (5) 常用的着火性实验有哪些；
- (6) 怎样通过着火性实验判断固体无机物的危险性；
- (7) 对于着火性物质有哪些防护方法或措施。

实验四 可燃固体的燃烧实验

一 实验目的

- (1) 了解可燃固体的定义与分项；
- (2) 了解可燃固体的着火与燃烧特性；
- (3) 学习可燃固体燃烧性的试验方法。

二 实验原理

当堆放的可燃固体粉末与加热的金属丝接触时，如果金属丝的温度等于或高于该固体的燃点，固体粉体会着火燃烧。

三 实验装置与材料

1. 实验装置

电加热的铂金属丝、变压器以及石棉板。

2. 实验材料

经干燥、粉碎后的固体粉末。

四 实验步骤

- (1) 将试样在石棉板上摆成长 4cm，宽 2cm、容积约为 15 毫升的堆体。
- (2) 用红热的铂金属丝接触堆一端的表面。如点不着，可将红热铂金属丝插入试样中保持 5 分钟。如果试样放出气体，可以试验能否用火柴点燃气体。

五 结果与讨论

试样的燃烧性可分为六个危险等级（见下表）

表 6-1 试样的燃烧性危险等级

	反应类型	等级	标准物质
点火后	不着火	1	食盐
不传播火焰	着火后立即熄灭	2	硬脂酸锌
	几乎不发生局部燃烧或火焰传播，但有局部红热	3	氯化醋酸钠
传播火焰	红热但没有火花，或缓慢分解而没有火焰	4	H-酸
	伴有火花及可见火焰的缓慢和平静的燃烧	5	硫磺、重铬酸铵
	带火焰的快速燃烧或不带燃烧的快速分解	6	黑火药

六 注意事项

实验过程中，加热源温度较高，应注意安全，防止烫伤。

七 思考题

- (1) 可燃固体的着火与燃烧特性是什么；

- (2) 固体物质发生燃烧的物理条件和化学条件，金属燃烧的特点是什么；
- (3) 简述可燃固体燃烧性的试验方法。可燃固体的有哪几种燃烧形式；
- (4) 粉尘爆炸的条件、特点及影响因素；
- (5) 物质阻燃处理的基本原理是什么；

实验五 禁水性物质实验

一 实验目的

判断固体或液体物质与水接触是否会产生可燃性气体或发火而导致危险。

二 实验原理

将一定质量的被试物质与一定量的纯水混合，在一定温度下使其发生危险。观察反应产物是否有气体，并依据所产生的气体量判断其危险性排序。

三 实验仪器及样品

1. 实验仪器

(1) 玻璃仪器

恒压分液漏斗，圆底烧瓶，气体导管，酸式滴定管，温度计，水封用的结晶皿；

(2) 实验仪器

电子继电器，点接触式温度计，加热环，磁力搅拌器（带搅拌子），升降台，铁架台等。

2. 实验样品

铝粉、镁粉、锌粉等。

四 实验步骤

1. 实验准备

(1) 将仪器安装好

(2) 称取 0.5g~1g 的实验样品，样品的称取应尽量避免损失，采用先称量圆底烧瓶的质量，再加入样品的方式；

(3) 在恒压分液漏斗中加入 50ml 纯水；

(4) 将结晶皿 1 的水温加至 50℃，并通过调节点接触式温度计使其稳定；

(5) 调节酸式滴定管的零点。

2. 实验方法

(1) 在结晶皿 1 的水温稳定后，迅速将恒压分液漏斗中的水加入圆底烧瓶，并开始搅拌；

(2) 记录室温、气温；

(3) 在开始反应 1 小时中每隔 15min 记录一次酸式滴定管的读数，得到反应开始产生的气体量；

(4) 反应开始 1 小时后终止实验，并确定最终读数；

(5) 重复上述实验过程 3 次，取最大气体产生量为该样品的气体产生量；

(6) 更换一种样品，重复实验过程 (1) ~ (4)，再得到一个不同样品的气体量。

(7) 通过实验，按下表作出详细记录

数据记录表

实验日期

室温：

初始水温：

样品名称	时间	样品量 (g)	反应水量 (°C)	反应水温 (°C)	气体发生量 (ml)	备注
实验结果	样品 1 的最大气体发生量; 样品 2 的最大气体发生量; 样品 3 的最大气体发生量; 样品危险性排序:					

五 注意事项

- (1) 实验结束后，先将滴定管中的气体放空；
- (2) 将实验仪器分拆并进行清洗；
- (3) 因本实验选用的是金属粉末，在与水反应时产生一定量的氢气，在实验过程中应严禁明火，特别是实验结束后的放空过程；
- (4) 本实验接触一些电气设备，如电子继电器、加热环和搅拌装置等，要非常注意用电安全；
- (5) 本实验的关键是气体不能从装置中泄漏，故气密性必须在实验前进行确认，在一些关键部位涂抹凡士林保证气密性。

六 思考题

- (1) 什么是禁水性物质；
- (2) 禁水性物质可产生的危险有害性有哪些；
- (3) 怎样判断禁水性物质与水接触后产生的危险，禁水性物质的图示标志是什么；
- (4) 实验室怎样贮存禁水性物质；
- (5) 危害物质的主要分类有哪些；
- (6) 针对禁水性物质的燃烧特性，说出金属灭火剂的原理。

实验六 超声波测厚

一、实验目的

1. 掌握超声波测厚的基本原理和方法；
2. 掌握超声波检测仪的使用，并能正确测定典型材料的厚度。

二、实验原理

超声波是频率高于 20kHz，不能听到的波。用于超声检测的频率范围 $20\text{kHz} < f < 100\text{MHz}$ 。金属材料超声检

测频率 0.5~20MHz。对固体来说，各种波形的超声波均可用来检测。声速 c 、波长 λ 、频率 f 者之间关系为 $c=f\lambda$ 。

超声波测厚仪工作原理见图 1。利用超声脉冲反射法进行测厚，超声波在同一均匀介质中传播时，声速为常数，在不同介质的界面上则具有反射特性。当发射的脉冲通过换能器发射晶片经延迟块接触被测件表面时，超声脉冲即射向被测件，并以一固定声速向被测件深处传播。在达到被测件的另一面时，反射回来被另一接收晶片所接收。这样只要测出从发射到接收超声脉冲所需的时间。扣除经延迟的来回时间，再乘上被测件的声速常数。就是超声脉冲在被测件中所经历的来回距离，也就是代表了厚度值。此数值在测厚仪上直接显示读得。

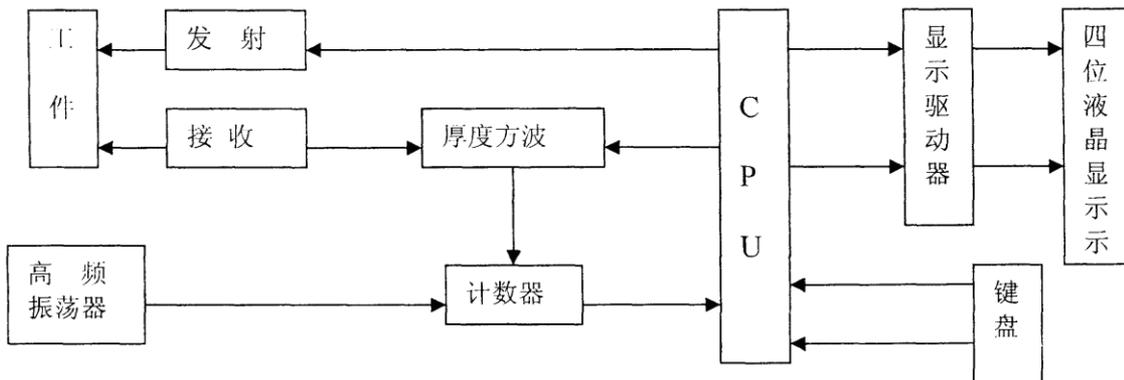


图 1 超声波测厚仪工作原理

三、实验装置

测厚用的仪器见图 2，键盘功能键见图 3。仪器测量范围：(1)1.2~225.0mm(钢)；(2)管材测量下限：020×3mm(钢)；测量误差： $\pm(1\% H+0.1)$ mm，H 为被测物实际厚度。

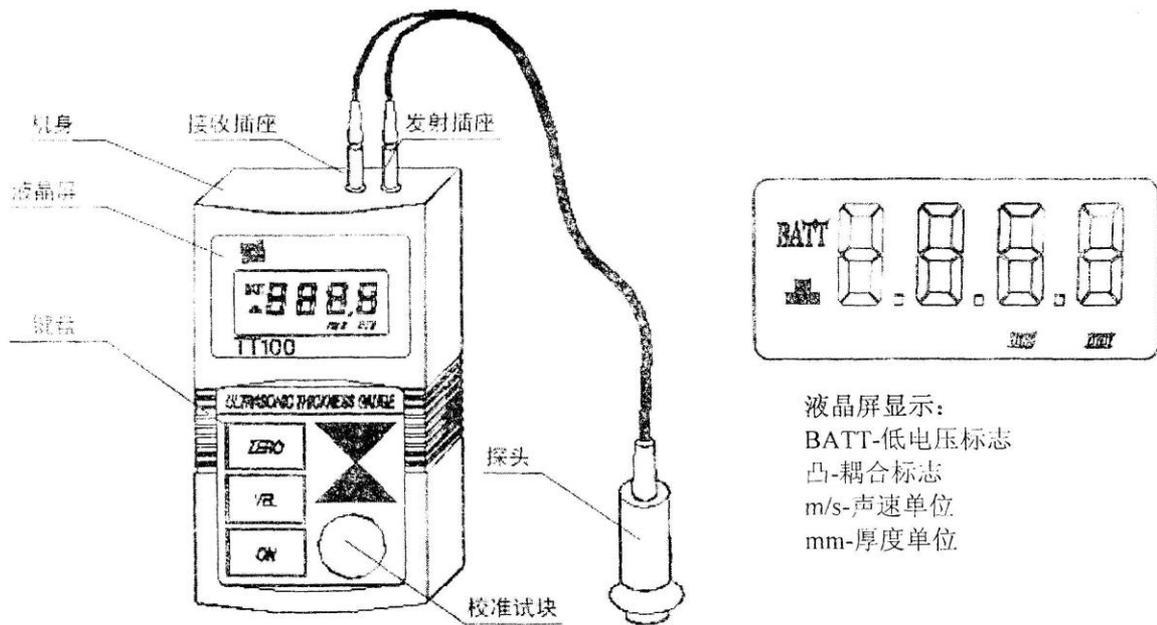


图 2 超声波测厚仪外形图

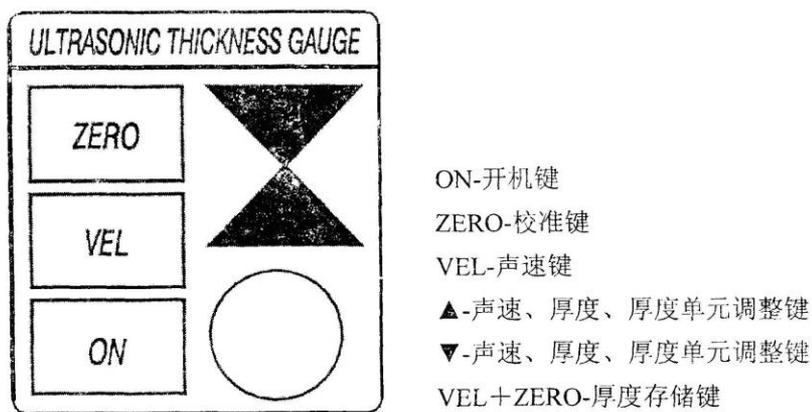


图 3 键盘功能键

四、主要仪器、材料和试剂

仪器：TT100 型超声波测厚仪；镀铬游标卡尺；砂纸。

材料：各种材料的试样。

试剂：甘油耦合剂。

五、实验步骤

1. 超声测厚

(1) 测量准备

将探头插头插入主机探头插座中，按 ON 键开机，全屏幕显示数秒后显示上次关机前使用的声速。此时可开始测量。

(2) 声速的调整

如果当前屏幕显示为厚度值，按 VEL 键进入声速状态，屏幕将显示当前声速存储单元的内容。每按一次，声速存储单元变化一次，可循环显示多个声速值。如果希望改变当前显示声速单元的内容，用 ▲ 或 ▼ 调整到期望值即可，同时将此值存入该单元。

(3)校准

在每次更换探头、更换电池之后应进行校准。此步骤对保证测量准确度十分关键。如有必要，可重复多次。将声速调整到 5900m/s 后按 ZERO 键，进入校准状态，在随机试块上涂耦合剂，将探头与随机试块耦合，屏幕显示的横线将逐条消失，直到屏幕显示 4.0mm 即校准完毕。

(4)测量厚度

将耦合剂涂于被测处，将探头与被测材料耦合即可测量，屏幕将显示被测材料厚度。

说明：当探头与被测材料耦合时，显示耦合标志。如果耦合标志闪烁或不出现，说明耦合不好。拿开探头后，厚度值保持，耦合标志消失。

2. 测量声速

如果希望测量某种材料的声速，可利用已知厚度试块测量声速。与测量厚度步骤相似，用游标卡尺或千分尺测量试块，准确读取厚度值，将探头与已知厚度试块耦合，直到显示出一厚度值，拿开探头后，用 ▲或▼键将显示值调整到实际厚度值，然后按 VEL 键即可显示出被测声速，同时该声速被存入当前声速存储单元。

3. 厚度值存储

(1)存储

按住 VEL 键，再按 ZERO 键，进入厚度存储状态，显示某一厚度存储单元号，此时可用上、下调节键找到所需单元(用▲键或▼键可循环显示(0~9 单元)。测量厚度的同时，将测值存入单元。每测一次新值即将旧值刷新，该单元记录的是最后一次测量的值。按 VEL 键可退出厚度存储状态。

(2)查看存储内容

按住 VEL 键，再按 ZERO 键，显示当前厚度存储单元号，用▲或▼键找到要查看的单元(用▲或▼键可循环显示 0~9 单元)，再操作一次即显示该单元的内容。此时测量也可将新测的值存入该单元。按 VEL 键可退出厚度存储状态。

六、注意事项

1. 探头表面为丙烯树脂，对粗糙表面的重划很敏感，因此在使用中应轻按。
2. 被测物表面不应超过 60℃，否则探头不能再用。
3. 灰尘(铁屑，碳粒等)的侵入会引起麻烦，应经常清理。
4. 及时更换电池

出现低电压指示标志后，应及时更换电池，按下述方式更换 (1)等待机器自动关机； (2)打开电池仓盖(用拇指压下仓盖，再退出)； (3)取出电池，放入新电池，注意极性。

5. 油灰尘的附着会使探头缆线逐渐老化，使其断裂，使用后应清除缆线上的污垢。
6. 仪器长时间不使用时应将电池取出，以免电池漏液，腐蚀电池盒与极片。
7. 严格避免碰撞、潮温等。

七、实验数据记录

实测结果记录：试样材料、形状、测定部位。实测厚度，普通量具测得厚度值，误差。

实验日期: 年 月 日			室温: °C										
被测物		测试点 (mm)											
		1		2		3		4		5		6	
名称	形状	超声	游标	超声	游标	超声	游标	超声	游标	超声	游标	超声	游标
		误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm
		误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm
		误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm	误差: mm

八、思考题

说明产生误差的原因。

实验七 可燃固体氧指数的测定

一、实验目的

1. 明确氧指数的定义及其用于评价高聚物材料相对燃烧性的原理;
2. 了解 HC-2 型氧指数测定仪的结构和工作原理;
3. 掌握运用 HC-2 型氧指数测定仪测定常见材料氧指数的基本方法;
4. 评价常见材料的燃烧性能。

二、实验原理

费尼莫(Fennimore)和马丁(Martin)于 1966 年提出了采用氧指数法判断聚合物材料的可燃性的方法。这种方法重现性好,而且能给出数字结果,所以氧指数技术发展很快,很多国家相继用它作为评价聚合物材料可燃性试验的方法,例如 ASTM D2863、JISK7201 等均使用氧指数作为评价标准。

物质燃烧时,需要消耗大量的氧气,不同的可燃物,燃烧时需要消耗的氧气量不同,通过对物质燃烧过程中消耗最低氧气量的测定,计算出物质的氧指数值,可以评价物质的燃烧性能。所谓氧指数(Oxygen Index),是指在规定的试验条件下,试样在氧氮混合气流中,维持平稳燃烧(即进行有焰燃烧)所需的最低氧气浓度,以氧所占的体积百分数表示。

氧指数：
$$OI = \frac{[O_2]}{[N_2] + [O_2]} \times 100\% \quad (1)$$

氧指数：
$$OI = \frac{[O_2]}{[N_2] + [O_2]} \times 100\%$$

式中 $[O_2]$ ——测定浓度下氧的体积流量，L/min；

$[N_2]$ ——测定浓度下氮的体积流量，L/min。

氧指数的测试方法，就是把一定尺寸的试样用试样夹垂直夹持于透明燃烧筒内，其中有按一定比例混合的向上流动的氧氮气流。点着试样的上端，观察随后的燃烧现象，记录持续燃烧时间或燃烧过的距离，试样的燃烧时间超过 3min 或火焰前沿超过 50mm 标线时，就降低氧浓度，试样的燃烧时间不足 3min 或火焰前沿不到标线时，就增加氧浓度，如此反复操作，从上下两侧逐渐接近规定值，至两者的浓度差小于 0.5%。

三、实验试样

1. 材料：有机塑料
2. 试样尺寸：试样应符合表 1 中的尺寸的要求。

表 1 氧指数试样尺寸规格

类别	材料形状	宽 (mm)	厚 (mm)	长 (mm)
A	自支撑塑料	6.5±0.5	3.0±0.5	70~150
B	软载塑料	6.5±0.5	2.0±0.5	70~150
C	泡沫塑料	12.5±0.5	12.5±0.5	125~150
D	薄膜或织物	50±0.5	自身厚度	140±5

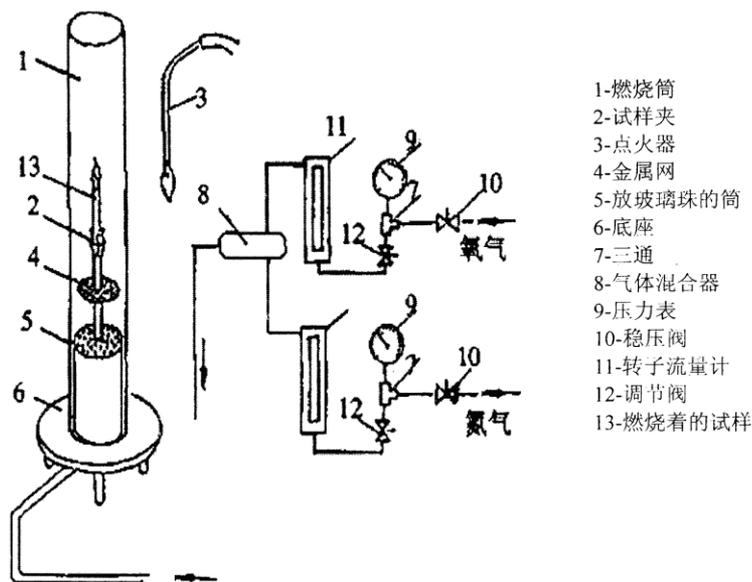
3. 试样数量：每组应制备 10 个标准试样

4. 外观要求：试样表面清洁、平整光滑，无影响燃烧行为的缺陷，如：气泡、裂纹、飞边、毛刺等。

5. 试样的标线：距离点燃端 50mm 处划一条刻线。

四、实验装置

氧指数实验法的试验装置的构造见图 1，其外形如图 2。是由燃烧筒和供气部分组成。燃烧筒是一个内径不小于 75mm、长度不小于 450mm 的耐热玻璃管，其底部用直径为 3~5mm 的玻璃珠充填，充填高度为 100mm。玻璃珠上方放一金属网，以遮挡燃烧试样燃烧时的滴落物。试样夹安装在燃烧筒的轴心位置上。供气系统由压力表、稳压阀、调节阀、管路和转子流量计等组成。计量后的氧气和氮气经气体混合器由底部进入燃烧筒，燃烧筒内混合气体流速控制在 4 ± 1 cm/s。



1-燃烧筒
2-试样夹
3-点火器
4-金属网
5-放玻璃珠的筒
6-底座
7-三通
8-气体混合器
9-压力表
10-稳压阀
11-转子流量计
12-调节阀
13-燃烧着的试样

图 1 氧指数测试装置

五、实验步骤

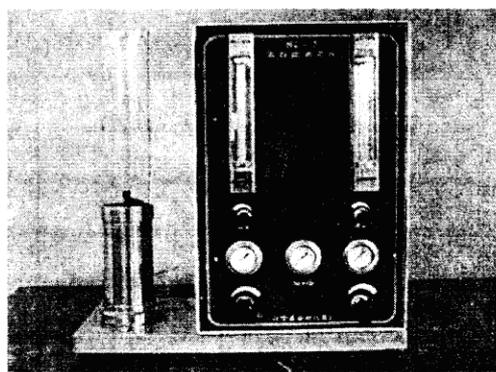


图 2 HC-2 型氧指数测定仪外观图

1. 根据 GB / T2406 所规定的燃烧柱内混合气体流速($4 \pm 1 \text{ cm/s}$), 含氧燃烧柱的截面积, 计算出气体的总流量, 再分别计算出不同比例氧和氮的流量。根据计算规定总流量为 10 L/min ;

2. 取标准试样 10 根 (试样规格见表 1)。对每根进行测量并记录, 在试样一端 50 mm 处划线, 将另一端插入入燃烧柱内试样夹中;

3. 根据资料或经验选定试验所需最初氧的浓度。如果不了解, 可在空气点燃试样, 注意观察燃烧情况。如试样燃烧很快, 氧的最初浓度选为 18% , 如果试样在空气中点燃后离火马上熄灭, 则根据点火的离火后熄灭的情况选择氧的浓度 25% 或更高的氧浓度;

4. 开启氧、氮钢瓶阀门, 调节减压阀, 压力为 $0.2 \sim 0.3 \text{ MPa}$ 。调节微量调节阀, 得到稳定流速的氧、氮流通过转子流量计指示, 看浮子上平面。并调节至工作位置, 与此同时检查仪器压力表指针是否在 0.1 MPa 处, 否则, 应调节到规定压力。 $\text{N}_2 + \text{O}_2$ 压力表不大于 0.03 MPa 或不显示压力为正常, 超过此压力则应检查燃烧柱内是否有结炭、气路堵塞现象、直至符合要求为止。应注意: 在调节氧气、氮气浓度后, 必须用调节好流量的氧氮混合气流冲洗燃烧筒至少 30 s (排出燃烧筒内的空气)。

5. 点燃试样: 用点火器从试样的顶部中间点燃(点火器火焰长度为 $1 \sim 2 \text{ cm}$), 勿使火焰碰到试样的棱边和侧表面。在确认试样顶端全部着火后, 立即移去点火器, 开始计时或观察试样烧掉的长度。点燃试样时, 火焰作用的时间最长为 30 s , 若在 30 s 内不能点燃, 则应增大氧浓度, 继续点燃, 直至 30 s 内点燃为

止。

6. 确定临界氧浓度的大致范围：点燃试样后，立即开始记时，观察试样的燃烧长度及燃烧行为。若燃烧终止，但在 1 s 内又自发再燃，则继续观察和记时。如果试样的燃烧时间超过 3min，或燃烧长度超过 50mm(满足其中之一)，说明氧的浓度太高，必须降低，此时记录实验现象记“×”，如试样燃烧在 3min 和 50mm 之前熄灭，说明氧的浓度太低，需提高氧浓度，此时记录实验现象记“O”。如此在氧的体积百分浓度的整数位上寻找这样相邻的四个点，要求这四个点处的燃烧现象为“OO××”。例如若氧浓度为 26% 时，烧过 50mm 的刻度线，则氧过量，记为“×”，下一步调低氧浓度，在 25% 做第二次，判断是否为氧过量，直到找到相邻的四个点为氧不足、氧不足、氧过量、氧过量，此范围即为所确定的临界氧浓度的大致范围。

7. 在上述测试范围内，缩小步长，从低到高，氧浓度每升高 0.4% 重复一次以上测试，观察现象，并记录。

8. 根据上述测试结果确定氧指数 OI 。

六、实验数据记录

1. 实验数据记录

实验次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
氧浓度，%										
氮浓度，%										
燃烧时间										
燃烧长度 (mm)										
燃烧结果										

说明：第二、三行记录的分别是氧气和氮气的体积百分比浓度（需将流量计读出的量计算为体积百分比浓度后再填入）。第四、五行记录的燃烧长度和时间分别为：若氧过量(即烧过 50mm 的标线)，则记录烧到 50mm 所用的时间；若氧不足，则记录实际熄灭的时间和实际烧掉的长度。第六行的结果即判断氧是否过量，氧过量记“×”，氧不足记“O”。

2. 结果计算

根据上述实验数据计算试样的氧指数值 OI ，即取氧不足的最大氧浓度值和氧过量的最小氧浓度值两组数据计算平均值。

3. 材料性能评价

表 2 列出部分聚合物材料的氧指数。大量试验证明，氧指数在 27~60 之间的材料，在空气中一般都能自熄。同本消防厅规定氧指数在 26 以上为难燃塑料

表 2 若干聚合物的氧指数 (OI)

聚合物名称	OI	聚合物名称	OI
聚甲醛	15	羊毛	25
聚环氧乙烷	15	聚碳酸酯	27
聚甲基丙烯酸甲酯	17	Nomex (商)	28.5
聚丙烯腈	18	(聚间苯二甲酰间苯二胺)	
聚乙烯	18	聚苯醚	29
聚丙烯	18	聚砒	30
聚异戊二烯	18.5	聚酚醛树脂	35
聚丁二烯	18.5	聚酚醛树脂	40
聚苯乙烯	18.5	氯丁橡胶	41.5
纤维素	19	聚苯丙咪唑	42
聚对苯二甲酸乙二酯	21	聚氯乙烯	44
聚乙烯醇	22	聚偏氯乙烯	60
尼龙 66	23	碳 (石墨)	95
Penlon (商)	23	聚四氟乙烯	
(聚 3'3 (氯甲基) 环氧丙烷)			

根据氧指数通常把纤维织物分为三级, 即氧指数在 20 以下的一般认为是易燃的, 25~31 之间认为是阻燃的, 在 35~40 之间认为是不燃的。普通纤维的氧指数在 15~20 之间。

日本 JISA1201 规定: OI>30 定为难燃 1 级, OI 在 27~30 定为难燃 2 级, OI 在 24~27 定为难燃 3 级, OI 在 21~24 定为难燃 4 级, OI<21 定为难燃 5 级。

七、思考题

1. 氧指数对于研究物质的燃烧和爆炸性能有何意义?
2. 实验中如果 N₂+O₂ 压力表显示值超过了 0.03MPa, 则有可能是哪些因素造成的?
3. HC-2 型氧指数测定仪适用于哪些材料的测定?如何提高实验数据的测试精度?

实验八 气体爆炸实验

一、实验目的

1. 通过密闭的单个容器内气体燃烧爆炸实验使学生巩固学习和掌握最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率、爆炸极限等基本概念，熟悉压力传感器和火焰传感器的基本原理和使用方法，掌握气体燃烧爆炸实验的基本技能和实验方法，通过实验使学生了解密闭容器气体燃烧爆炸压力发生、发展乃至消亡的整个过程；

2. 通过密闭的连通容器内气体燃烧爆炸实验使学生了解实际工业装置气体爆炸过程的基本规律，了解此类装置气体爆炸过程所表现出来的局部动力学特征，即“压力累积效应”。使学生了解爆炸过程的压力、火焰传播速度的分布规律以及爆炸过程发展的各种影响因素，使学生重点了解连接管道长度、气体浓度和点火位置对爆炸过程的影响；

3. 通过容器与开口管道连通装置内气体燃烧泄爆实验使学生了解气体泄爆原理以及泄爆过程的基本规律，使学生了解泄放面积和泄爆压力对容器内气体爆炸发展过程的影响。

二、实验方案

(一)单个容器和连通容器气体爆炸和泄爆实验

1. 主要测量参数

爆炸压强和火焰传播速度。

2. 实验装置设计

整套装置可通过法兰或螺栓连接，容器和管道上设有传感器或点火孔及端盖，管道可拆卸，每两节管道均安放在托架上。

3. 研究内容

研究单个容器或连通容器内气体爆炸强度的各种影响因素，包括点火位置(壁面处和中心点火)、火焰

传播方向(火焰从容积大的容器向容积小的容器传播和或从容积小的容器向容积大的容器传播)、连接管道长度、气体反应活性(气体种类)、气体浓度等。

4. 实验介质

取工业中常见烃类气体：甲烷(低反应活性)、丙烷、乙烯(中等反应活性)和乙炔(高反应活性)。

5. 不同气体填充率的实现

针对每种直径管道设计一个端盖，这样充气时可预先将端盖盖住端口，然后抽真空，充入一定配比浓度的气体后(常压)卸下端盖，用较薄的软木塞塞住端口，然后连接装置的其余部分。

6. 气体爆炸实验系统

系统框图见图 1。

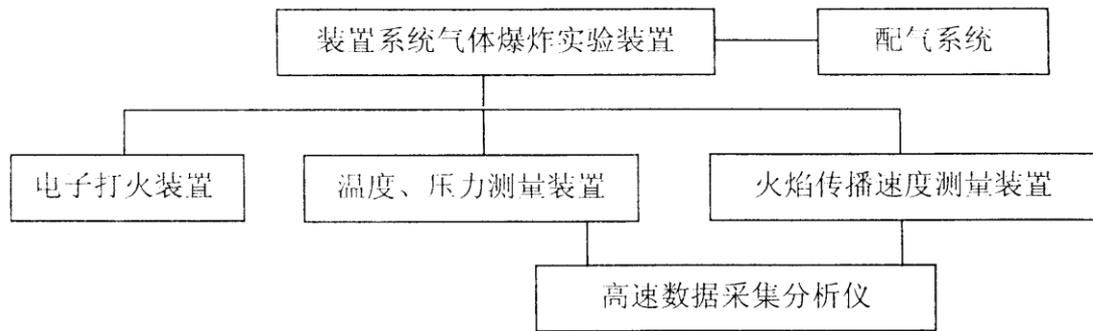


图 1 密闭装置系统气体爆炸实验系统

(1)数据采集系统

采用 USB 总线数据采集器(型号：UA305)或 ISA 总线采集控制器(型号：UA1 04H)及可编程软件分析系统，采样频率为 333kHz，分辨率为 12bit，精度为 0.04%(满量程)。

(2)火焰阵面(速度)测量装置

火焰传感器采用光敏三极管，采样速度为 1 微秒。或使用火焰探头或电离探针测试火焰速度。

(3)压力测量装置

压力传感器选用 YD205 型石英压电传感器，采样速度为 1 微秒，每次实验分别在附图 1 中蓝色标记处布置 8 个传感器(5 个压力传感器和 3 个火焰传感器)。

(4)点火装置

采用弱点火方式，点火能量采用工业上常见的 1 00mJ 的能量。采用电子点火器实现爆炸实验中的可燃气体点火。

(5)配气系统

实验时用配气仪配置给定浓度的可燃气体与空气的混合气体。

(二)一端开口的装置系统气体爆炸实验

1. 主要测量参数

爆炸压强和火焰传播速度。

2. 实验容器设计

设计制作 20l 和 100l 体积的两个球形容器，采用直径为 80mm 的连接管道。

3. 研究内容

研究影响一端开口的装置系统气体爆炸强度的各种影响因素，包括点火位置(壁面处和中心点火)、连接管道长度、气体反应活性(气体种类)、气体浓度等。

4. 在配气系统中，刚配气仪配置给定浓度的可燃气体与空气的混合气体。

(三)装置系统气体爆炸泄放实验

1.主要测量参数

爆炸压强和火焰传播速度。

2. 实验容器设计

分别在预先设计的泄爆口上装上不同泄爆压力的爆破片。

3. 研究内容

研究方案(一)中各种因素对装置内气体爆炸过程的影响。

4. 实验方案同上。

三、实验仪器

1. 高速数据采集器

USB 总线数据采集器(型号~UA305)

ISA 总线采集控制接口卡(型号: UAIO4H)

高速数据采集仪

2. 压力传感器

压力传感器选用 YD205 型石英压电传感器，采样速度为 1 微秒

3. 火焰传感器

火焰传感器采用光敏三极管，采样速度为 1 微秒。

4. 气体钢瓶(带减压阀、稳流阀)

20kg 甲烷钢瓶、丙烷钢瓶、乙烯钢瓶、乙炔钢瓶各 1 个。

稳流阀：(型号: WLF-01)南京市江宁区分析仪器厂

5. 输气管线

输气软管(粗细与钢瓶配套)

6. 点火装置

电子点火器(自制)、5 号电池 4 节、铜芯细导线 5m、万用表、点火针 2 根

7. 可燃气体测爆仪

8. 传感器连接导线 100m

9. 真空表、真空泵

10. 电子计算机

11. 配气仪

12. 爆破片

泄放口直径为 50mm，泄爆压力分别为 0.15MPa、0.2MPa、0.3MPa、0.4MPa、0.8MPa。

13. 装置本体

包括两个爆炸容器和连接管道、双层法兰(既可密闭也可装爆破片，装点火器)、另开 3 个孔(气体入口、传感器装设孔、与管道连接孔)、2 个管道托架。

四、实验步骤

实验操作步骤如下：

1. 按照实验装置示意图装配好实验系统(包括各类传感器、点火装置和配气系统的置 10~20min(使气体混合均匀)；
2. 调试测试系统中各通道至工作状态；
3. 打开电子计算机电源，接好数据采集卡数据端口连线，等待信号；
4. 清理人员至安全距离之外，准备引爆；
5. 点火引燃气体，数据采集；
6. 保存数据到计算机硬盘；
7. 拆线，关闭计算机及其它设备。拆下各类传感器，并装好保护帽；
8. 清理实验现场，检查实验仪器是否完好无损。

由于该实验涉及到安全工程和消防工程专业课程的综合知识与相关课程知识，综合性比较强。实验既可以检验学生对专业知识掌握的熟练程度，又可以和工业实践相结合，使学生了解工业气体燃烧爆炸原理和基本规律。

五、实验安全措施

1. 每次实验须由多人完成，实验过程中如若出现意外情况可向领导及上级汇报。
2. 实验室要保证足够的通风，并配置可燃气体测爆仪实时检测可燃气体浓度，每次实验前可检测可燃气体浓度，一旦浓度超标立即关闭电源，停止实验，并采取有效措施降低其浓度。
3. 实验操作人员离爆炸实验装置 5m 以外(点火开关引线、计算机、电源开关均离爆炸装置 5m 以外)。
4. 实验结束后认真检查钢瓶阀门和电源是否关闭，实验装置及环境中可燃气体浓度是否在安全范围之内。

六、实验注意事项

由于实验所用的仪器大多为精密仪器，因此必须注意以下事项，防治仪器损坏：

1. 高速瞬态记录仪必须严格按照说明书执行操作顺序(先打开计算机电源，再插入数据连线；先拔出数据连线，再关闭计算机电源)。各类精密仪器每次通电时间不宜超过 30 分钟，实验完毕后不要忘记关闭，以防止被烧坏；
2. 保护好传感器，用完后一定要拧上保护帽；
3. 配气时一定要控制好流量，掌握好时间。

七、思考题

1. 在气体爆炸试验中应注意哪些事项?在何种情况下测量的结果可视为无效测量?
2. 如何计算管道系统内气体爆炸火焰传播速度?
3. 跟单个容器相比, 连通容器气体爆炸有什么不同?为什么?

实验九 内压薄壁容器应力测定

一、实验目的

1. 了解薄壁容器在内压的作用下, 容器壳体、封头的应力分布情况;
2. 验证薄壁容器应力计算的理论公式;
3. 掌握应力电测法的实验操作技能, 包括应变片粘贴、灵敏系数和横向效应系数的测定, 了解电阻应变仪等仪器的工作原理、使用方法, 内压薄壁容器应力测量。

二、实验内容

对各种典型的顶盖、筒体及其不连续处的应力进行测试。顶盖可以是椭圆形、半球形、锥形、平板等, 可选其中的一、两种进行测定。

三、实验原理及方法

本实验是测定内压薄壁容器外壁上的应力, 并与理论计算值进行比较, 分析产生误差的原因, 然后对实验结果进行讨论。

1. 实验前的准备

- (1) 了解测试对象的技术参数, 包括几何尺寸、材料性能及机械性能指标。
- (2) 测点选择 在容器外壁上给定的区域内选择测量点。
- (3) 布片方案 由于本实验要测量的容器外表面均处于平面应力状态, 而且两主应力方向已知, 故每测量点的布片数为两片, 其方向分别为径向和周向。
- (4) 应变片桥接方式 因容器是受单一载荷作用, 而且是在室内进行测试, 故采用同一温度补偿片的

半桥测量方式，并由预调平衡箱实现多点测量。

2. 现场实验工作

- (1) 测点表面的打磨、划线和清洗脱脂处理；
- (2) 应变片的粘结，应变片与连接线的焊接与固定；
- (3) 应变片与应变仪的连接；
- (4) 静态电阻应变仪、预调平衡箱的调整与操作；
- (5) 容器加载测量，记录数据。

3. 数据处理及应力计算

(1) 原始测量数据整理

首先进行原始数据的整理，并进行系统修正误差计算。如进行灵敏系数K值的计算，应变片横向效应的修正计算，连接导线电阻的修正计算，电阻应变片不符合标准值的修正计算。上述这些计算，根据实际情况选用。

(2) 应力计算公式

根据修正计算后的主应变，可计算出设备的主应力，应力计算公式为：

$$\sigma_{\theta} = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{\theta} + \mu\varepsilon_{\varphi}) \quad (9-1)$$

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{\varphi} + \mu\varepsilon_{\theta}) \quad (9-2)$$

(3) 测量误差计算

根据压力容器理论，分别计算各部分的理论应力值，并计算其相对误差：

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma - \sigma_{理}}{\sigma_{理}} \times 100\% \quad (9-3)$$

四、实验装置

实验装置如图1-1所示。

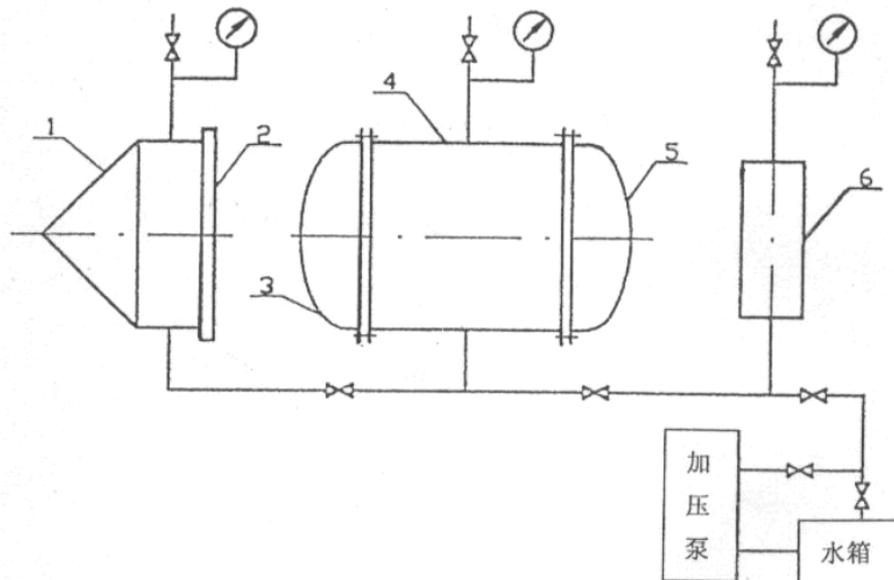


图1 内压力容器应力测定实验装置

1—45℃锥形封头（内径400mm，厚度3.55mm）； 2—平盖（直径400mm，厚度21mm）；

- 3—标准椭圆形封头（内径400mm，厚度4.78mm）； 4—圆形筒体（内径400mm，厚度4.78mm）；
5—标准蝶形封头（内径400mm，厚度4.78mm）； 6—圆筒体（内径158mm，厚度2.5mm）

实验中所用设备的材料均为碳钢。

实验中所用的仪器主要有：静态电阻应变仪、欧兆表以及贴片工具等。

五、实验步骤

1. 贴应变片。根据选择的测点和布片方案，进行表面打磨、划线定位，清洗表面脱脂，粘结应变片，并对其进行固定及防护等。
2. 检查贴好的应变片质量。用欧兆表（即摇表）检查应变片电阻丝与金属工件表面之间的绝缘度。其绝缘电阻不得低于100MΩ。
3. 连线。用相同长度与相同型号的导线，连接应变片与静态应变仪，导线进行固定。静态应变仪上连线方式按照“单臂”连接的方式。经指导老师同意后，接通应变仪电源，预热半小时左右。
4. 检查调整静态应变仪各测点的灵敏度系数K值。
5. 加压测量。关闭有关阀门，对被测容器利用试压泵进行加压至0.1Mpa，测定各测量点的应变值读数。
6. 按步骤4，依次进行加压至0.2MPa、0.3MPa和0.4MPa，测定各种载荷下的应变值。在对实验容器每次进行加载时，应注意卸载后，再加载，以便消除应变片初受载荷的永久变形，使滞后误差趋于稳定。
7. 测量结束后，系统卸载。

六、实验报告内容要求

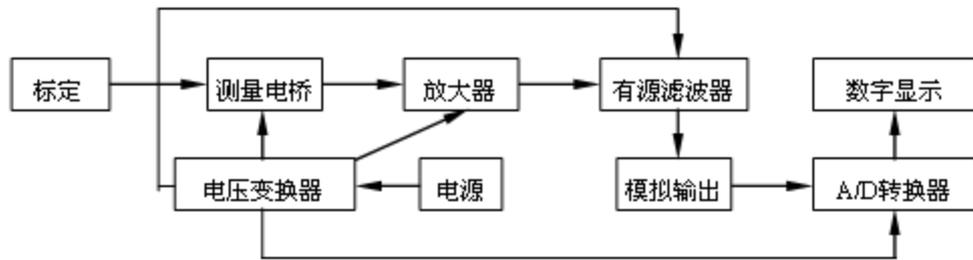
1. 容器测点位置分布图；
2. 各种载荷下的时实际测量的应变读数；
3. 根据测试条件进行系统误差的修正计算；
4. 各测点应力值的计算；
5. 用压力容器理论计算各测点的应力理论值；
6. 测量值的误差计算；
7. 实验结果讨论（主要为产生误差的原因分析）。

七、CM-1A-20型数字静态应变仪使用说明

CM-1A-20型数字静态应变仪北戴河电子仪器厂CM系列静态应变仪的一种，它主要用于实验应力分析及静力强度研究中测量结构及材料任意点变形的应力分析，其主要特点是：测量点数多，操作简单，携带方便，可进行单臂、半桥或全桥测量，K值连续可调，是应力测试的仪器。配有相应的传感器，可测力、压力、扭矩、位移等物理量。

1. 结构与工作原理

CM-1A-20数字静态应变仪由测量桥，放大器，滤波器，A/D，单片机，数字显示，电源等部分组成。其原理方框图如下：



2. 主要技术指标

测量范围：0~19000 $\mu\epsilon$ ；分辨率：1 $\mu\epsilon$ ；基本误差：测量值的 $\pm 0.2\% \pm 2$ 个字；稳定性：A：零点漂移 $\leq \pm 4\mu\epsilon / 4h$ ；温度漂移 $\leq \pm 1\mu\epsilon / C$ ；灵敏度变化：测量值的 $\pm 0.1\% \pm 2$ 个字；应变系数：K值可调范围为0.5-9.9；主机可测点数：20点；预调平衡范围：约+19000 $\mu\epsilon$ ；适调应变电阻值范围：120~1K Ω ；可方便的进行单臂、半桥、全桥测量；桥压：2V_{Dc}；电源：AC220V $\pm 10\%$ 50Hz；工作环境：0 $^{\circ}$ C~40 $^{\circ}$ C相对湿度30%~85%；外型尺寸：330mm(D) \times 370mm(W) \times 170mm(H)

3. 具体使用说明

本仪器共20点，单臂时10点一个公共补偿。在确定采用那种测量方法(单臂测量、半桥测量、全桥测量)后进行连线，具体要求是：

- ① 单臂测量的联接：顶部面板的“变换器(单臂)”插头插好；补偿接线端子的A₀与D₀之间连接补偿应变片，10个点的A、B间接测量应变片。
- ② 半桥测量的联接：顶部面板的“变换器(半桥)”插头插好，10个点的A、B间与B、C间接测量应变片。
- ③ 全桥测量的联接：顶部面板的“变换器”插头拔下。10个点的A点接桥路的电压正极，C点接桥路电压的负极、B点和D点接桥路输出的正极和负极。

4. 按键功能及使用

面板图及各按键功能如下：



按一次“总清”键，是对各测点自动进行清零。

按一次“复零”键，是对面板上正显示的测点进行清零。

按一次“巡检”键，是对各测点自动循环一次进行测量。

按一次“打印”键，是对巡检测量的值通知微型打印机打印数据。打印步骤：接通仪器后面板打印机电源开关，前面板打印机灯亮，巡检、打印出纸停止后，按打印机面板“SEL”键，灯灭 后按“LF”键一下，打印纸上面的数据全部出来后，再按“LF”键一下，按“SEL”键灯亮后等待下一次打印。

“测量”键是一个双功能键，开机后数字表显示测点号及其初始应变值，按一次该键数字表显示测点号及K值(应变值与K值显示最显著的差别是应变值无小数点，K值显示是2.000左右的数值)。

“P/K增”和“P/K减”两个功能键与“测量”键配合使用，来调节测点、K值大小设置，例如，若“测量点P”显示为“01”，按一下“测量”键，显示第1点K值为2.000，而实际使用的应变片K值是2.180，这时按“P/K增”键不放，K值将以0.001增量增长，为了力口快调节速度，在增长5个数值后，K值将以0.005增量增长，增长5个数值后，K值将以0.010增量增长…，数据直至接近显示2.180后，松开“P/K增”键一下，再按“P/K增”或“P/K减”键微调节K值到显示2.180为止。按一下“测量”键后K值可永久保存。

5. 测量

连线接好后打开电源，仪器进行自检，8位数码管发亮，数字面板表左部1~2点显示测点点数P，第3点显示正负号，第4~8点显示应变值或K值(仪器的应变片灵敏度系数)。预热半小时，检查每个测量点初始不平衡值，如是较小不平衡数值时，表示此点连接正确。出现大的不平衡数值时，应查明应变片或导线是否断、短路或其他异常情况，根据具体情况排除故障。经此检查正确后按“总清”键进行清零。清零后给测件加载，加载完成后按“巡检”键，仪器以每秒约1点的速率进行测量，可按“打印”键打印出数据，也可按“P/K增”和“P/K减”键从数字表读数。

6. 应变式传感器与本仪器的配合使用举例

例如压力传感器与本仪器的配合使用：第一次使用前应进行一次标定，把传感器的桥压输入端的两条线接往CM-1A静态应变仪的某一点(如第10点)的A、C端，传感器的电压输出端的两条线接往这一点的B、D端。将表头调到显示第10点的数值，按“复零”键后，用标准压力机给出一标准力，如20KN，查看第10点显示的数据比标准力值大还是小，如果大于标准力，按照调节K值的方法调大K值，如果小于标准力，调小K值，按“测量”键返回到显示应变值状态查看数据，如未达到标准值，重新调整K值。通过对K值的几次修改直至数字表头上第10点的显示值与标准值相同后，此时第10点的K值就是对应此传感器的专用系数。实际测量时先将第10点复零，给传感器一定压力后，第10点的显示值即是传感器所受压力值。

7. 使用注意事项

- (1) 请用户在使用本仪器前要仔细阅读使用说明书，避免连线和操作错误，给测量带来困难。
- (2) 仪器应尽可能在0℃~40℃的温度环境中使用，避免阳光强烈照射。
- (3) 避免在高温条件下使用，并尽量远离磁场源(电机，大变压器)，使仪器少受干扰。
- (4) 要求测量片与温度补偿片的阻值尽量选用一致，所用的连接导线为屏蔽电缆，线径和长度相同，这样便于桥路平衡及减少干扰。
- (5) 测量片与补偿片不受阳光曝晒、高温辐射的影响，补偿片应贴在与试件相同的材料上，与测量片保持同样的温度，应变片对地绝缘电阻应在500MΩ以上。

实验十 振动与隔振实验

一、实验目的

1. 分析振动产生的原因及其危害，消除或减弱振动经常采用的方法；
2. 分析螺旋弹簧的隔振原理，了解弹簧减振器的作用；
3. 测定振动设备不平衡离心力传给基础的力，掌握测定方法；
4. 掌握实验测试系统的组成及各种仪器的原理和使用方法。

二、实验原理

一般机器振动的原因，主要是由于转子质量的不平衡所产生的不平衡离心力所致。在通常的情况下，机器的振动有害。强烈的振动将产生噪声污染和有损于建筑物的动载荷，影响机器设备的使用寿命和工作性能，严重时使零件失效，甚至造成破坏与事故，因此应防止和减弱振动。

消除振动的措施有：消除振源、避开共振区，增加阻尼、隔振等。对于高速旋转的机器部件，必须分别做静、动平衡检验，并且应在结构的设计、零部件的加工检验、设备的装配、安装等环节，都要考虑防振问题。

本实验是采用螺旋弹簧减振结构，振体（机器与底板）质量为 m 通过弹簧变形而把力传给基础，故基础的受力 $R=KX$ ，其最大值为：

$$R_{\max} = KX_o \quad (10-1)$$

式中： K — 弹簧的刚度系数；

X_o — 弹簧的振幅。

又知：

$$R_{\max} = \frac{P_o}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2} \quad (10-2)$$

式中： ω — 工作机角速度，1/sec；

ω_0 — 该系统固有的自振频率，1/sec； $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}}$ ，其中， K 为弹簧的刚度系数，N/m； m 为振动体的质量，kg。

P_0 — 不平衡离心力，N；

$P_0 = m_{\text{偏}} e \omega^2$ ，其中， $m_{\text{偏}}$ 为偏心质量载荷，kg； e 为偏心距离，m； ω 为工作机角速度，1/sec。

隔振弹簧的选用原则：

(1) 当弹簧很硬时，其 ω_0 很大，从而使 $\frac{\omega}{\omega_0} \rightarrow 0$ ， $R_{\text{max}} \rightarrow P_0$ ，这时基础受力最大，隔振器不起作用。

(2) 当弹簧较软时，其 ω_0 较小， R_{max} 也变小，当小到 $\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = 2$ 时， $R_{\text{max}} = -P_0$ ，这时弹簧也起不到隔振作用。如果弹簧很软，使 ω_0 继续降低，即 $\frac{\omega}{\omega_0}$ 增大， R_{max} 的绝对值也继续变小，最后则降为“0”。由此可见，采用较软的弹簧，在 $\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \gg 2$ 时，隔振效果较好。 $\frac{\omega}{\omega_0} \rightarrow \infty$ ， $R_{\text{max}} \rightarrow 0$ 。

(3) 一般取： $\omega_0 = \left(\frac{1}{4} \sim \frac{1}{5}\right)\omega$ ，有 $R_{\text{max}} = \left(\frac{1}{16} \sim \frac{1}{20}\right)P_0$ ，具有较好的减振效果。本实验选用的一组弹簧，可使 R_{max} 降为 P_0 的 $\frac{1}{17}$ 。

在测定 R_{max} 时，本实验采用电阻应变原理，自制了三个拉应力传感器，将此三个传感器固定在测试系统的下面，装配关系见实验装置示意图3-1所示。

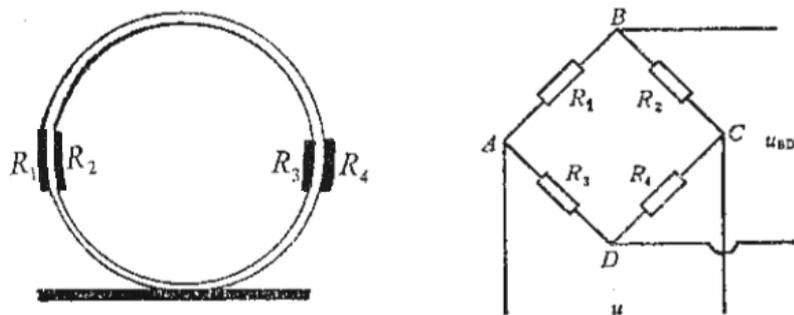


图1 传感器装配关系示意图

传感器受力后，其阻值改变，电桥失去平衡，有电信号输出，经实验校正。该传感器输出的电信号与外力 P 是成线性的关系，将电信号送入动态电阻应变仪，经放大后送入光线示波器记录下振动波形，供计算分析使用。

电测计算方法如下：

三个传感器连成三个电桥，采用全桥测量。电机启动前，先进行标定。先将三个电桥调平衡，进行静态标定。如加3kg的力，可记录下三个振动子的总偏移量为 A 。再启动电机，记录下振动波形。在一个周期内找到三个振动子的最大总偏移量 B ，这个 B 就是通过弹簧减振后作用在基础的最大力 R_{max} 而引起的振

动。

根据 3kgf : $A = R_{\max}$: B 得:

$$R_{\max} = \frac{3\text{kgf} \times B_{\max}}{A}$$

其中 A 、 B_{\max} 可根据实验记录波形 (如图2) 获得。

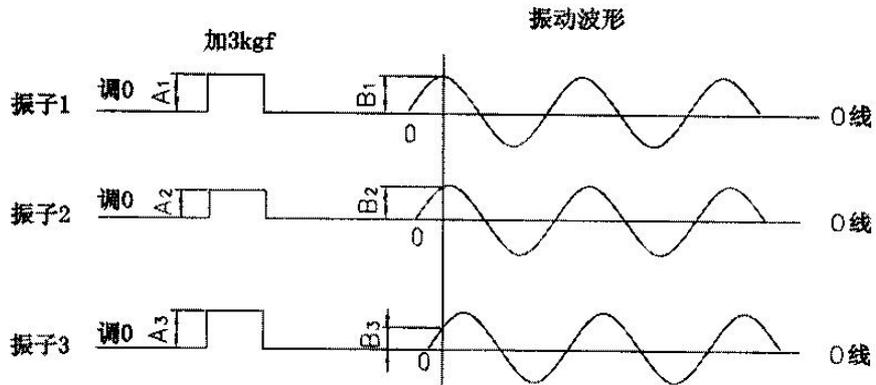


图2 振动实验记录波形

加了 3kgf 后的总偏移量 A , $A = A_1 + A_2 + A_3$

启动振幅后的振幅总偏移量 B , $B = B_1 + B_2 + B_3$

三、实验装置

1. 实验装置

振动与隔振实验装置如图3所示。

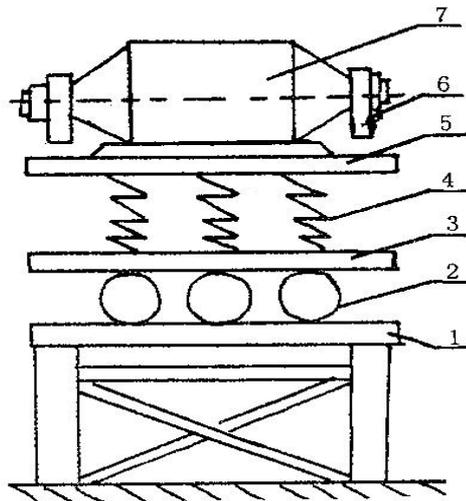


图3 振动与隔振实验装置

1— 底座; 2— 拉压力传感器; 3— 托板; 4— 减振弹簧;

5— 振动系统; 6— 电机; 7— 偏心叶片

实验中用到的仪器有: 动态应变仪、EMA-2000型—A瞬态波形存储记录仪。

2. CS—1A型动态应变仪

CS系列动态应变仪配接不同类型的应变片及应变片式传感器，可以实现应力、拉压力、速度、加速度、位移、扭矩等多种物理量的测量。具有性能稳定，噪声低、频带宽的特点。

CS — 1A
型动态应变仪
面板及技术性能
指标见下图：

测量前的
准备与仪器调
节：

(1) 桥
压选择；
(2) 桥
路连接 四只
应变片与桥盒
的连接，采用
全桥连接方
法。桥盒是应
变测量元件与
信号适调放大



型 号	CS-1A
量程(2V 桥)	0~±30000 $\mu\epsilon$
桥压 V_{DC}	2、4、8
平衡方式	自动
平衡时间	2 秒
平衡范围	约±5000 $\mu\epsilon$
灵敏度(2V 桥)	5V/1000 $\mu\epsilon$
增 益	0、1/20、1/10、1/5、1/2、1
校准($\mu\epsilon$)	100、200、500、1K、2K
低通滤波(Hz)	10、100、300、1K、10K、F
频响范围(Hz)	100K
桥路电阻(Ω)	60~1K
线性度误差	<±0.1%
输出(峰值 V)	10
信噪比	>50dB
通道组合	通道任选
特 点	通用型

器（动态应变仪）连接的桥梁。必须使用 120 Ω 的应变片，才能保证电桥平衡。在实际测量时，应变片与连线、桥盒连接柱之间的短路线都要尽可能用烙铁焊接。

(3) 应变片灵敏系数的修正 本仪器设计使用的应变片系数 $K=2.00$ ，若使用灵敏度系数为 K_p 的应变片，实际的应变值 ϵ_p 应为： $\epsilon_p = \frac{2.00}{K_p} \epsilon_c$ ，式中 ϵ_c 为测量应变值。

(4) 零点调平衡

(5) 低通滤波器挡位的选择；

(6) 量程选择；

(7) 校准值给定；

(8) 预热 为了保证稳定运行，电路应预热10~15分钟，对于小应变或长时间测量，则需要预热30~60分钟。

四、实验方法

本实验是由装有一偏心叶片的电机转动产生不平衡离心力，在振动系统下面装有弹簧，弹簧下面装有传感器，连接到与动态应变仪和光线示波器，以测出振动力经弹簧减振后传给基础的力。

实验步骤如下；

1. 开机前的准备

- (1) 选用一组弹簧，装在振动板的下面，固定好，本实验采用销钉固定，电机装上偏心叶片。
- (2) 仪器按要求连线、调节，预热10分钟。

2. 静态信号标定

应变仪衰减选为10，加3kgf力进行实际标定，记录下标定动态信号。

3. 动态测定

由于设备上部振动较厉害，开机前再次检查机器各部分有无松动，人员远离振源。把衰减调为最大，开机后听其声音，若不正常应立即停机检查，待机器正常后，应变仪保持与静态信号标定同样的衰减，记录下波形。然后后应将衰减调为最大停机。

由于在开机与停机时都有共振区，应把衰减调为最大，避免仪器的损坏，因此应先调仪器后开机。

五、实验数据处理

(1) 力学计算用参数

参数	n	m	$m_{\text{偏}}$	e	K
数据					

计算数值取小数点后两位。

(2) 实验测量数据

数据 $B = B_1 + B_2 + B_3$

根据振动波形图，取一个周期内，三振子的最大总偏移量 B_{max} 进行计算。

(3) 实验结果讨论

六、思考题：

1. 引起振动的原因有哪些？减弱或消除振动的措施有哪些？
2. 隔振弹簧选用应注意什么？
3. 减小 R_{max} 的主要措施有哪些？

化工热力学（工程）实验指导书

（修订版）

二零零八年一月

前 言

本课程为化学工程与工艺、制药工程、过控、热能、安全等专业必修实验和选修实验，主要面向三年级本科生开设，内容涉及到热力学基础数据的测定与关联；热力学第一定律、热力学第二定律的应用；溶液热力学性质的测定与预测；相平衡数据的测定；过程热力学分析等。实验类型有验证型、综合性、开发型和设计性。必修实验主要根据《化工热力学》课程的教学大纲并结合生产和科研技术的发展，开设3~4个较高水平的实验，使学生掌握在化工生产、生物化工、生物制药各领域方向的能量的转化和合理地利用能量。

(1) 学习化工热力学实验中基础数据的测试及测试监控所用的仪器、设备等，并能根据物质基础数据本身的特殊性，确定采用的测试方法和仪器、设备等。(2) 掌握用计算机编程处理热力学实验数据。(3) 掌握使用气相色谱仪进行物性分析的定性、定量方法，熟悉气相色谱在物性测定、含量测定等方面的应用。(4) 通过制冷循环实验了解过程热力学分析的基本原理。本课程采用课堂讲授与实验操作相结合的方式进行。实验操作由学生在教师指导下独立完成。实验前学生要进行预习并写出预习报告，在实验中要掌握仪器、仪表的使用方法，要求学生独立完成操作，记录实验数据并独立完成数据处理、实验报告及结果分析，要求对实验结果进行讨论并得出合理的解释与结论。一般要求选修实验每组1~7名学生，必修实验每组1~4名学生。

由于水平所限，本讲义的缺点难免，希望谅解。

在修订过程中，黄强、王海峰、班春兰都做了大量的工作，同时得到任保增的支持，在此表示致谢

实验一 二氧化碳临界状态观测及 p-v-t 关系测定实验

一、实验目的

1. 了解 CO₂ 临界状态的观测方法，增加对临界状态的感性认识。
2. 加深对课堂所讲的工质的热力学状态等基本概念的理解。
3. 掌握 CO₂ 的 p-v-t 关系的测定方法，学会用实验测定实际气体状态变化规律的方法和技巧。
4. 学会活塞式压力计、恒温器等部分热工仪器的正确使用方法。

二、实验内容

1. 测定 CO_2 的 $p-v-t$ 关系。在 $p-v$ 坐标图中绘出低于临界温度($t = 20^\circ\text{C}$)、临界温度($t=31.1^\circ\text{C}$)和高于临界温度($t=50^\circ\text{C}$)的三条等温曲线，与标准实验曲线及理论计算值相比较，并分析差异原因。

2. 观测临界状态

(1) 临界状态附近汽液两相模糊的现象。

(2) 汽液整体相变现象。

(3) 测定 CO_2 的 t_c 、 p_c 、 v_c 等临界参数并将实验所得的 v_c 值与理想气体状态方程和范德华方程的理论值相比较，简述其差异原因。

实验设备由压力台、恒温器和试验本体及防护罩组成。

实验设备系统图：

CO₂ 实验台本体图

三、实验原理

1. 对简单可压缩热力系统，当工质处于平衡状态时，其状态参数 p 、 v 、 t 之间有：

$$F(p, v, t) = 0 \quad \text{或} \quad t = f(p, v) \quad (1)$$

本实验就是根据 (1)，采用定温方法来测定 CO₂ 的 $p-v$ 之间的关系。从而找出 CO₂ 的 $p-v-t$ 的关系。

2. 实验中由压力台送来的压力油进入高压容器和玻璃杯上半部，迫使水银进入预先装了 CO₂ 气体的承压玻璃管。CO₂ 被压缩，其压力和容积通过压力台上的活塞的进、退来调节，温度由恒温器供给的水套里的水温来调节。

3. 实验工质二氧化碳的压力由装在压力台上的压力表读出（如要提高精度可由加在活塞转盘上的平衡砝码读出，并考虑水银柱高度的修正）。温度由插在恒温水套中的温度计读出。比容首先由承压玻璃管内二氧化碳柱的高度来度量，而后再根据承压玻璃管内径均匀、截面积不变等条件换算得出。

四、实验步骤

1. 实验过程的注意事项：

- (1) 实验过程中改变不同的实验压力，通过活塞压力计即可实现，改变不同的实验温度用恒温水浴
- (2) 及其电节点温度计来实现，其中电节点温度计仅用于调节温度。
- (3) 做各条定温时，实验压力 $p < 10\text{MPa}$ ，实验温度 $t \leq 50^\circ\text{C}$ 。
- (4) 实验中取 h 时，水银柱液面高度的读数要注意，应使视线与水银柱半圆型液面的中间一齐。
- (5) 实验中加压及减压过程一定要缓慢均匀。

2. 测定承压玻璃管内 CO₂ 的质面比常数 k 值。

由于充进承压玻璃管内的 CO₂ 质量不便测量，而玻璃管内径或截面积 (A) 又不易测准，因而实验中采用间接办法来确定 CO₂ 的比容，认为 CO₂ 的比容 v 与其高度是一种线性关系，具体如下：

(1) 已知 CO₂ 液体在 20°C 、 10MPa 时的比容： $v(20^\circ\text{C}, 10\text{MPa}) = 0.00117\text{m}^3/\text{kg}$

(2) 如前操作实地测出本实验台 CO₂ 在 20°C 、 10MPa 时 CO₂ 液柱高度 $\Delta h^*(\text{m})$ （注意玻璃水套上刻度的标记方法）

(3) 由 (1) 可知： $v(20^\circ\text{C}、9.8\text{MPa}) = \frac{\Delta h^* A}{m} = 0.00117\text{m}^3/\text{kg}$

$$\therefore \frac{m}{A} = \frac{\Delta h^*}{0.00117} = k(\text{kg}/\text{m}^3)$$

那么任意温度，压力下 CO₂ 的比容为： $v = \frac{\Delta h}{m/A} = \frac{\Delta h}{k} = (\text{m}^3/\text{kg})$

式中 $\Delta h=h-h_0$ ， h —任意温度、压力下水银柱高度， h_0 —承压玻璃管内径顶端刻度

3. 测定低于临界温度 $t=20^{\circ}\text{C}$ 的等温线:

- (1) 使用电节点温度计调节恒温水浴温度 $t=20^{\circ}\text{C}$ 要保持恒温。
- (2) 压力记录从 4MPa 开始，当玻璃管内水银升起来后，应足够缓慢地摇进活塞螺杆，以保证定温条件，否则来不及平衡，读数不准。
- (3) 两相区内两毫米高度变化记录一次压力值，两相区外，两个压力变化记录一次高度值。
- (4) 注意加压后 CO_2 的变化，特别是注意饱和压力与饱和温度的对应关系，液化、汽化等现象，要将测得的实验数据及观察到的现象一并填入实验原始记录表。

4. 测定 31.1°C 临界等温线，观察临界现象。

重复3的步骤测出临界等温线，并在该曲线的拐点处找出临界压力 p_c 和临界比容 v_c ，并将数据填入实验原始记录表。

a)整体相变现象：由于临界点时，汽化潜热等于零，饱和汽线和饱和液线合于一点，所以这时汽液的相互转变不像临界温度以下时逐渐积累，需要一定的时间，表现为一个渐变的过程；而是当压力稍有变化时，汽、液以突变的形式相互转化。

b)汽、液两相模糊不清现象：处于临界点的 CO_2 ，气、液具有共同参数(p, v, t)因而不能区别此时 CO_2 是气态还是液态的。如果说它是气体，那么这个气体是接近了液态的气体；如果说它是液体，那么这个液体又是接近气态的液体。下面就用实验证明这个结论。因为这时是处于临界温度下，如果按等温线过程进行来使 CO_2 压缩或膨胀，那么管内是什么也看不到的。现在我们按绝热过程来进行，首先在压力等于 7.8MPa 附近突然降压， CO_2 状态点由等温线沿绝热线降到液区，管内 CO_2 出现了明显的液面，这就说明，如果这时管内的 CO_2 是气体的话，那么这种气体离液区很接近可以说是接近液态的气体；当我们在膨胀之后，突然压缩 CO_2 时，这个液面又立即消失了，这就告诉我们这时 CO_2 液体离气区也是非常近的，可以说是接近气态的液体，既

然此时的 CO_2 既接近气态又接近液态，所以只能处于临界点附近。可以这样说，临界状态饱和汽、液分不清。这就是临界点附近汽液模糊不清的现象。

5. 测定高于临界温度 $t=50^{\circ}\text{C}$ 时的等温线，将数据填入实验原始记录表。

五、绘制等温曲线与比较

1. 按实验原始记录表中的数据仿照 CO_2 标准曲线图在 $p-v$ 图上画出三条等温线。
2. 按实验测得的等温线与 CO_2 标准曲线图所示的标准等温线比较，并分析之间的差异及原因。
3. 将实验测定的临界比容 v_c 与理论计算值一并填入下表并分析之间的差异及原因。

临界比容 v_c [m^3 / kg]

标准值	实验值	$v_c = RT / p_c$	$v_c = 3RT_c / 8p_c$
0.00216			

六、实验报告要求

1. 简述实验原理及过程。各种实验的原始记录。
2. 计算及在 $P-V$ 图上画出等温线。将实验测得的等温线与标准等温线比较，并分析其差异及原因。
3. 将实验测得的饱和温度和饱和压力的对应值与有关资料上的数据进行比较，作 $P-t$ 图。
4. 分析比较临界比容的实验值与标准值及理论计算值之间的差异及原因,并简述实验收获及对实验改进。

实验二 用气相色谱法测定无限稀释溶液的活度系数

色谱法是一种分离技术。它以其具有高分离效能、高检测性能、分析时间快速而成为现代仪器分析方法中应用最广泛的一种方法。它的分离原理是，使混合物中各组分在两相间进行分配，其中一相是不动的，称为固定相，另一相是携带混合物流过此固定相的流体，称为流动相。色谱法分类：按流动相的物态，色谱法可分为气相色谱法（流动相为气体）和液相色谱法（流动相为液体）；再按固定相的物态，又可分为气固色谱法（固定相为固体吸附剂）、气液色谱法（固定相为涂在固体上或毛细管壁上的液体）、液固色谱法和液液色谱法等。按固定相使用的形式，可分为柱色谱法（固定相装在色谱柱中）、纸色谱法（滤纸为固定相）和薄层色谱法（将吸附剂粉末制成薄层作固定相）等。按分离过程的机制，可分为吸附色谱法（利用吸附剂表面对不同组分的物理吸附性能的差异进行分离）、分配色谱法（利用不同组分在两相中有不同的分配来进行分离）、离子交换色谱法（利用离子交换原理）和排阻色谱法（利用多孔性物质对不同大小分子的排阻作用）等。

一、实验目的

- 1、测定溶质的比保留体及无限稀释下的活度系数
- 2、测定两溶质的相对挥发度。
- 3、了解气相色谱法的基本原理，熟悉操作技术。

二、实验的基本原理

气相色谱法是一种物理分离方法，也就是说样品在色谱柱中不发生任何的化学反应，它主要依靠样品中各组分在二个相对移动相中不同分配，而使其分离。对于气相色谱主要依靠固定液对于样品

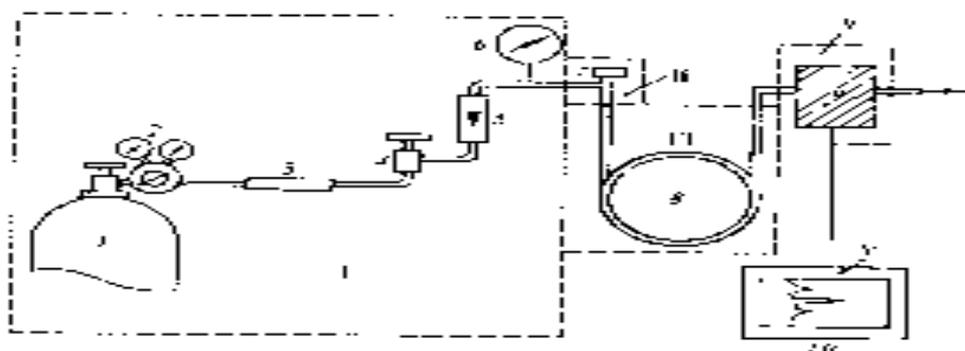


图2-1 气相色谱流程图

1. 高压钢瓶 2. 减压阀 3. 载气净化干燥管
4. 吸附剂 5. 流量计 6. 压力表 7. 进样器
8. 色谱柱 9. 检测器 10. 记录仪

中各组分不同的溶解能力而使其分离。其简单流程如图 2-1 所示。

三、气相色谱仪组成

任何气相色谱仪无论它的结构、外形如何多种多样，它的组成总是包括五个基本部分。

1. 载气系统：载气携带试样通过色谱柱，载气在柱内形成压力梯度，压力与压力梯度是试样在柱内运动的动力，载气系统的要求是提供纯净、稳定、能被计量的载气，一般由气源钢瓶、减压阀和流量计等组成。
2. 进样汽化系统：起到引入试样与使试样瞬间汽化的作用。
3. 色谱柱：它是实现试样色谱分离的场所，它由色谱柱管、柱内填充物等组成。
4. 检测器：对柱后已分离的组成进行检测与测量。
5. 记录仪：记录由检测器产生的信号，以便进行试样的定性、定量分析工作。

(2) 半峰宽度 $Y_{1/2}$ 又称半宽度或区域宽度, 即峰高为一半处的宽度, 它与标准偏差的关系为:

$$Y_{1/2} = 2\sigma \sqrt{2 \ln 2} = 2.35\sigma$$

(3) 峰底宽度 Y 自色谱峰两侧的转折点所作切线在基线上的截距, 如图 2-2 中的 IJ 所示。它与标准偏差的关系为: $Y = 4\sigma$

五. 基本理论及计算公式

首先我们对色谱柱作如下的合理假设:

- 1、样品进样量是非常小的, 因此可以假定样品中各组分在固定液中是无限稀释的, 并服从亨利定律, 分配系数是一常数。
- 2、色谱层析温度控制精度可达正负 0.1 度, 所以可假设色谱柱是等温的。
- 3、组分在汽相和液相中的量极小, 而且在汽相和液相中的扩散十分迅速, 处于瞬间平衡状态, 故可假设柱内任何点均达到汽—液平衡。
- 4、当色谱仪为常压操作时, 气相可按理想气体处理。

从而推导出以下的理论计算式:

$$\text{无限稀释活度系数 } r^\infty = T_0 R / M_L P_1^s V_g^0$$

式中: R 气体常数 $62.36 \times 10^3 \text{ mmHg} \cdot \text{ml/molK}$ 、 M_L 固定液的分子量、

P 溶质在柱温下的饱和蒸汽压 (mmHg)

采用查表的方法或采用 Antoine 方程计算。 $\text{Log} P^s = A - (B / (C + T))$

式中: A 、 B 、 C 为 Antoine 参数。 V_g^0 溶质在柱中的比保留体积 (ml/g)

$$V_g^0 = (F_\infty (t_R - t_0) / W_L) * ((P_0 - P_w) / P_0) * (3 (P_i / P_0)^2 - 1) / (2 (P_i / P_0)^3 - 1) * T_0 / T_r$$

式中: F_∞ 用皂沫流量计测定的载气流速, (ml/min)

t_R 溶质在柱中的保留时间, (min);

t_0 死时间, (min)、 W_L 柱内固定液的重量, (g); T_r 室温, (K);

T_0 273.15K

P_1 、 P_0 分别为柱入口和出口压力, (mmHg)

P_w 室温下水的饱和蒸汽压, (mmHg)

六. 实验步骤

1. 系统检漏

将色谱柱管装入色谱仪上, 打开氢气钢瓶总阀, 开启减压阀, 再打开稳压阀调至所需要的压力, 然后将尾气出口堵死, 注视流量计转子有否迅速降至为零, 转子迅速降至为零为不漏气, 若转子下降较慢, 则必须用皂液检漏, 观察系统中各接头是否有气泡冒出, 至所有接头都不漏气, 才能开机。

2. 数据测定:

(1) 完成系统检漏后, 将尾气接在流量计上, 以测定流量用, 然后开启色谱仪电源开关, 打开

检测室和层析室的电源开关, 检测室温度 180°C , 柱温 110°C , 汽化温度 180°C 。

(2) 待温度稳定后, 打开热导池, 将桥电流调至 150mA , 打开记录仪, 待基线走直后, 进行样品测定, 进样量 0.1 — 2 微升, 每人进样一次

(3) 用皂沫流速计从尾气口测定载气流速, 测定三次, 取平均值即可。

(4) 实验结束, 先关电, 后关气, 按操作步骤相反的顺序关闭所有开关后, 最后关闭钢瓶总阀, 待总压力表为零

实验三 汽—液平衡数据的测定及数据处理

汽—液平衡关系是精馏、吸收等单元操作的基础数据。汽—液平衡数据不能由理论计算得到，需要由实验测定。汽—液平衡数据的实验测定方法有两类：一类是间接法-其中有露点法、泡点法和总压法等，这些方法不能直接测定汽相组成，而是由 Gibbs-Duhem 方程进行计算出来。另一类是直接法—其中有静态法、流动法和循环法等，它是直接测定一定压力（或温度）下的汽—液两相组成和温度（或压力）。本实验用汽—液平衡平衡釜，采用循环法测定一定压力下的二元物质的汽—液平衡数据。通过对汽—液平衡数据的测定，可以为化学工业中的精馏、吸收等过程的工艺设计以及设备计算提供理论依据。准确的汽—液平衡数据对建立最佳的工艺条件、节约能耗、降低生产成本具有十分重要的意义。准确的汽—液平衡数据可以对溶液理论研究中建立的各种模型的准确程度进行检验和验证。

一、 实验目的

- 1、通过对常压下乙醇（1）—水（2）二元体系平衡数据的测定，了解和掌握使用双循环法汽—液平衡釜测定二元体系汽液平衡数据的方法。
- 2、求解活度系数方程式中的参数，并进行汽—液平衡数据的关联。
- 3、由给定的 Wilson 能量参数，应用 Wilson 方程在计算机上进行编程计算，推算出实验的计算值，并对自己所测得的数据进行验证。
- 4、学会检验实验测定汽—液平衡数据的可靠性。

二. 汽液平衡数据测定的原理

本实验采用循环法^[1]测定汽液平衡数据。基本原理是：如图 1 所示，当体系达到平衡时，两个容器的组成不随时间变化，这时从 P 和 R 两个容器内取样分析，即可得到一组汽液平衡数据。

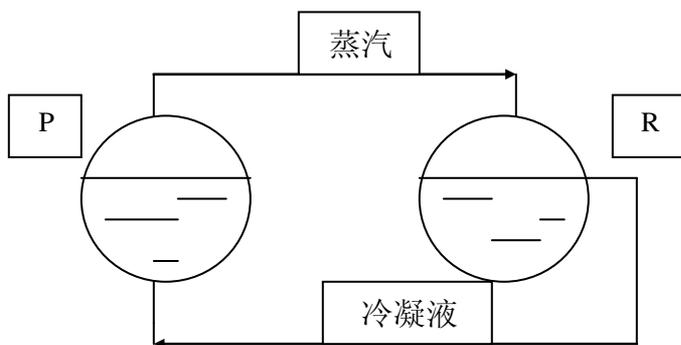


图 1 循环法原理示意图

根据相平衡原理，当汽—液两相达到平衡时，除了两相的温度、压力相等外，任一组分在两相中的逸度必须相等，

即 $\hat{f}_i^v = \hat{f}_i^l$

汽相： $\hat{f}_i^v = \hat{\phi}_i y_i p$

液相： $\hat{f}_i^l = r_i x_i \hat{f}_i^0$

式中： $\hat{\phi}_i$ ——组分 i 在汽相中的逸度系数

\hat{f}_i^0 ——组分 i 在标准状态时的逸度

x_i 、 y_i ——分别为组分 i 在液相和汽相中的摩尔分数

r_i ——组分 i 在液相中的活度系数

p ——体系压力（对于本实验取大气压）

对于低压条件下的汽—液平衡数据，汽相可以认为是理想气体混合物，即 $\hat{\phi}_i = 1$ 。

如果选取体系温度、压力下的纯组分 i 作为标准态，同时忽略压力对液体逸度的影响，则有： $\hat{f}_i^0 = p_i^s$

p_i^s ——组分 i 在平衡温度下的饱和蒸汽压，其数值可由 Antoine 方程进行计算

$$\ln p_i^s = A_i - \frac{B_i}{T + C_i}$$

式中： A_i 、 B_i 、 C_i 为物质常数，具体数值在讲义中已经给出。P 的单位是 Pa。T 的单位是 K

从而可以得到低压条件下汽—液平衡的关系式： $y_i p = r_i x_i p_i^s$

通过实验测得等压条件下的汽—液平衡数据，然后根据汽—液平衡方程 $y_i p = r_i x_i p_i^s$ ，即可计算出不同组成下的活度系数 r_i 。

体系的活度系数与组成之间的关系可以采用 Wilson 方程进行关联，即

$$\ln y_1 = -\ln(x_1 + \Lambda_{12}x_2) + x_2 \left(\frac{\Lambda_{12}}{x_1 + \Lambda_{12}x_2} - x_2 \frac{\Lambda_{21}}{x_2 + \Lambda_{21}x_1} \right)$$

$$\ln y_2 = -\ln(x_2 + \Lambda_{21}x_1) + x_1 \left(\frac{\Lambda_{21}}{x_2 + \Lambda_{21}x_1} - x_1 \frac{\Lambda_{12}}{x_1 + \Lambda_{12}x_2} \right)$$

Wilson 方程配偶参数：

$$\Lambda_{12} = \frac{V_2^l}{V_1^l} \exp[-(g_{12} - g_{11})/RT] \quad \Lambda_{21} = \frac{V_1^l}{V_2^l} \exp\{-(g_{21} - g_{22})/RT\}$$

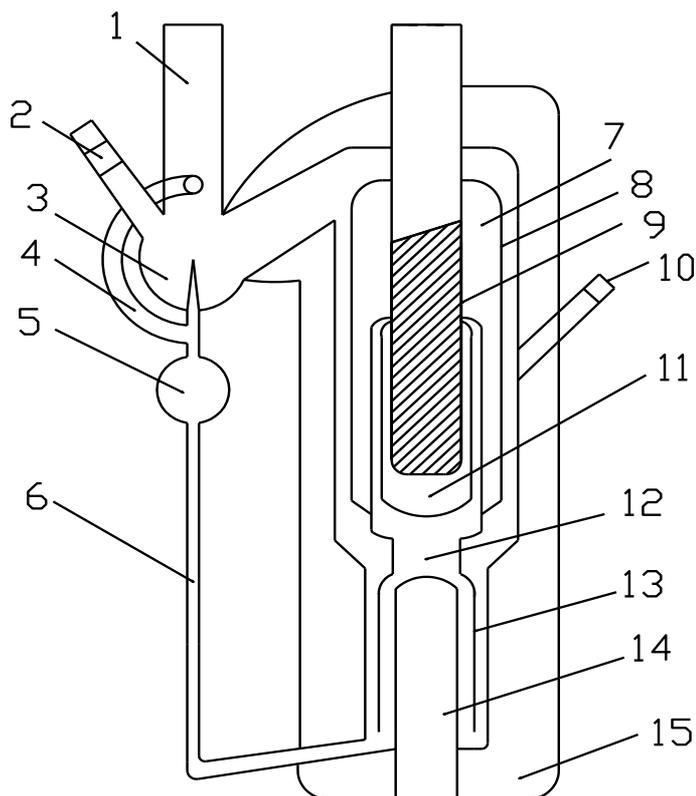
式中： V_1^l 、 V_2^l ——分别为组分 1、组分 2 的摩尔体积， $V_1^l = 58.68$ 、 $V_2^l = 18.07$ 。

$(g_{12} - g_{11})$ 、 $(g_{21} - g_{22})$ ——为能量参数，其值分别为 1645.136J/mol 、 3875.484J/mol 。

二、实验装置

本实验采用改进的 Ellis 平衡釜，该装置使用范围广、操作简便、平衡时间短，装料量约为 45ml ，温度测量采用 $1/10^\circ\text{C}$ 精密温度计。（具体结构见装置），

2. 实验装置图



- 1—磨口
- 2—汽相取样口
- 3—汽相贮液槽
- 4—连通管
- 5—缓冲球
- 6—回流管
- 7—平衡室
- 8—钟罩
- 9—温度计套管
- 10—液相取样口
- 11—液相贮液槽
- 12—提升管
- 13—沸腾室
- 14—加热套管
- 15—真空夹套

图 汽液平衡釜示意图

三、实验步骤

- 1、从加料口加入 5ml 乙醇和 40ml 水，并打开冷却水；
- 2、接通电源，调节变压器或电流，缓慢加热至物料沸腾；
- 3、观察平衡釜上的温度，待达到温度不变时，说明汽液两相达到相平衡，继续稳定 20 分钟后，记录平衡温度，通过汽相和液相的取样口用注射器取样约 2.0ml 。
- 4、从釜中取出约 5ml ，再加入乙醇或水约 5ml ，以改变釜内混合液的组成，待达到新的平衡后，测定另一组相平衡温度、压力和汽液组成。此步骤重复操作，进行第二组、第三组数据的测定。
- 5、将取出的样品用阿贝折光仪测定其折光指数，然后通过 $n_d^{30} \sim x$ 标准曲线查得 x 、 y 值。
- 6、实验结束后，先将变压器电压调到零，然后关闭电源，同时切断折光仪及恒温水浴电源，待平衡釜内温度降低后，关闭冷却水，整理好实验室卫生后，方可离开。

四、实验数据处理

实验四 蒸汽压缩制冷循环参数测定

一、实验目的

1. 了解制冷装置的主要部件及其功能，加深制冷循环感性认识。
2. 了解实际制冷循环与理论制冷循环的差异。
3. 加深对节流及各循环的状态变化的认识。
4. 了解在不同的蒸发温度下（冷凝温度不变）制冷系数、制冷量的变化。
5. 掌握制冷参数的测定，进行制冷循环的热力计算。
6. 熟悉提高制冷系数可采用的方法。

二、实验原理

蒸汽压缩制冷循环是采用低沸点物质作制冷剂，通过制冷剂在等温等压下液化与汽化的相变过程来实现等温、等压的放热或吸热过程。

制冷机由压缩机、冷凝器、节流阀和蒸发器组成，制冷循环有下列四个基本过程组成：

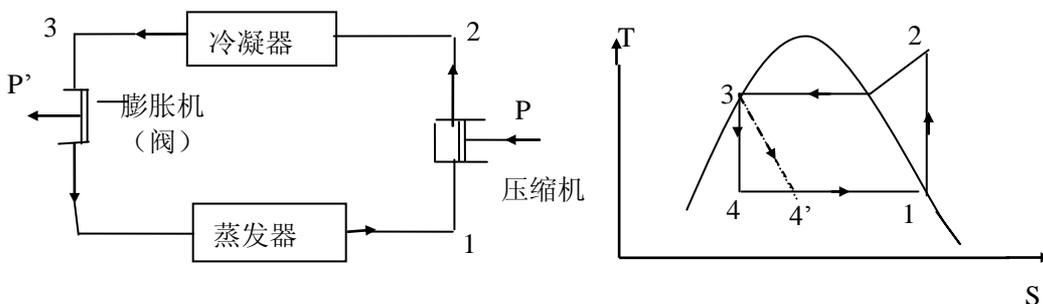
- (1) 压缩过程。制冷剂经过压缩机压缩由低温、低压的饱和蒸汽或过热蒸汽变成高温高压过热蒸汽，在压缩机中完成。
- (2) 冷凝过程。压缩后的过热蒸汽在冷凝器中准等压冷却，冷凝成饱和液体，又进一步冷却成为过冷液体。
- (3) 节流膨胀过程。冷凝后的制冷剂在节流阀中绝热膨胀、压力、温度同时降低，并有部分液体汽化，膨胀前后焓值相等。
- (4) 制冷剂蒸发产生冷量过程。两相状态的制冷剂在蒸发器中准等压汽化、吸收热量、直至完全变成干饱和蒸汽或过热蒸汽再进入压缩机，从而完成循环。

三、制冷循环

1. 理想制冷循环

理想制冷循环是不考虑在循环过程中的各种不可逆因素，即在压缩机压缩过程不考虑摩擦等不可逆因素，认为压缩过程是可逆的，所以是等熵压缩。在冷凝过程不考虑冷凝器内部流动阻力损失，即冷凝过程是等压过程，在膨胀过程可以用膨胀机，若忽略了膨胀机的不可逆因素，膨胀是等熵的。在蒸发过程如果不考虑蒸发器中的压力损失，则整个过程为等压过程。

如图 4.6 所示，左图为制冷循环原理，右图为理想制冷循环在 T-S 图上的表示。



说明：循环 1-2-3-4-1 为用膨胀机的制冷循环在 T-S 图上的表示

循环 1-2-3-4'-1 为用膨胀阀的制冷循环在 T-S 图上的表示

图 4.6 制冷循环原理

2. 实际循环：

实际循环和理论循环相比，情况更复杂一些，它要考虑循环过程中的各种不可逆因素，其中压缩机中压缩不是等熵压缩，而是增熵压缩，耗功量增大。在冷凝器中由于考虑到压力损失，从冷凝器进口到出口不是等压过程，而是一个降压过程，在凝结过程中，实际是一个饱和压力和饱和温度不断降低的过程，同时放出热量，由于压损不大，饱和压力和饱和温度降低的幅度不大。在膨胀过程中，由于膨胀机制造困难，造价高，回收能量少，故一般都用节流阀或毛细管代替，其过程是一个典型的不可逆过程，在该过程中压力、温度降低，熵增加。在蒸发器中由于有压损存在，从蒸发器进口到出口，蒸发压力一直在降低，实际上其饱和压力和饱和温度也跟着降低，同时吸收热量，实现制冷，同时连接管道也会产生压力损失，对循环也会影响，如下图。

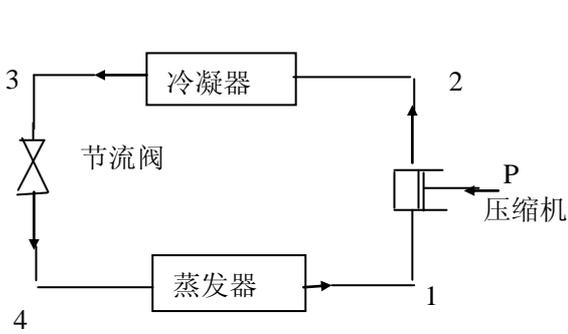


图 3

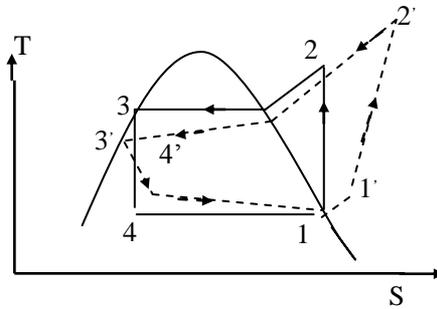


图 4

说明：图 4 中的循环 1-2-3-4-1 为理想制冷循环在 T-S 图上的表示

图 4 中的循环 1'-2'-3'-4'-1' 为实际制冷循环在 T-S 图上的表示，由于是不可逆的循环，用虚线表示符合工程热力学的作图习惯。

图 3 和图 4 实际制冷循环原理
P 绝对压力

图 5 是制冷循环在 P-h 图上的表示
其中循环 1-2-3-4-1 为理想制冷循环在 P-h 图上的表示，循环 1'-2'-3'-4'-1' 为实际循环在 P-h 图上的表示

3' 和 4' 是垂线，且应标箭头

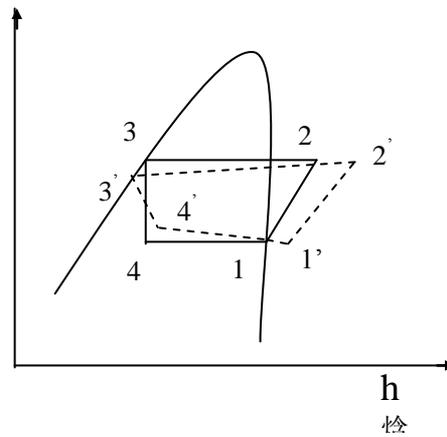


图 5

3. 实验装置的制冷循环原理：

a. 实验装置的制冷循环原理流程图如图 4.7

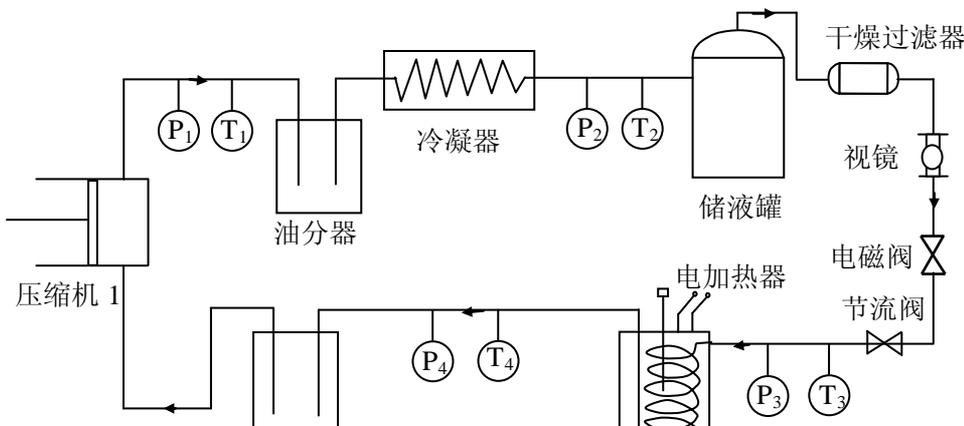


图 4.7 制冷循环装置流程图

b.实验装置中各部件的作用：

(1) 压缩机：压缩机是整个制冷系统的核心。其作用是消耗电能来提高制冷剂的压力和温度。

(2) 油分离器：作用是把冷冻油和制冷剂 F_{22} 蒸汽分离开来。制冷剂在从压缩机出来时带有一定的冷冻油。如果冷冻油过多地进入冷凝器，会在冷凝器内表面形成一个油膜，该油膜会阻止制冷剂的散热，不利于制冷剂的冷却。

(3) 冷凝器：主要作用是把汽态制冷剂 F_{22} 变为液态制冷剂 F_{22} ，放出热量。

(4) 储液罐：稳定整个系统的流动，及时补充或储存系统中的制冷剂，保证在变工况下流出的是液体制冷剂 F_{22} 。

(5) 干燥过滤器：去除系统中的杂质及水分，防止冰堵及脏堵。

(6) 视镜：通过视镜可以观察到制冷剂的流动情况（液态或气态），判断制冷剂充注量是否合适。同时检查制冷剂含水量是否在规定的范围内。

(7) 电磁阀：阻止停机后液体进入蒸发器，避免在下次启动时损害压缩机（低温时，防止液击）。

(8) 节流阀：节流阀在工程上叫热力膨胀阀或电子膨胀阀，是制冷设备的关键部件。其作用是节流，使常温高压的液态制冷剂变为低温低压的汽液两态的制冷剂，从而使工质的温度低于常温，使工质具有制冷能力。

(9) 汽液分离器：在正常设计范围内，一般进入压缩机的制冷剂都是汽态；由于液体不可压缩，液体进入压缩机后会产生液击，破坏压缩机的阀片及转动机构。为防止变工况下液体进入压缩机，故设立汽液分离器，把汽体分离出来进入压缩机。液体在分离器中经吸热汽化后再进入压缩机，

保证压缩机的安全。

(10) 量热器：

量热器内装有蒸发器、电加热管、油泵电机。量热器是一个绝热容器，它四周用绝热材料包裹，可以看作与外界绝热（传热量很小）。

电加热产生的热量和电机产生的热量抵消蒸发器放出的冷量，使量热器内载冷剂温度稳定。

在量热器内：

蒸发器放出冷量 Q_0 (制冷量)

电加热管放出热量 Q_1

油泵电机（搅拌电机）加入系统热量 Q_2

在系统稳定时,根据能量平衡 $Q_0 = Q_1 + Q_2$

Q_1 和 Q_2 可以测出，从而间接求出 Q_0 ，由 Q_0 及各状态点在 P-h 图上求出的各参数，可以进行热力计算。

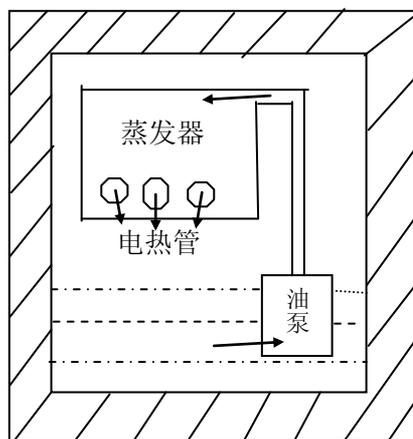


图 6 量热器结构

四、参数测定

制冷系数及制冷量的计算

原理：根据逆向卡诺循环

$$\text{制冷系数} = Q_0/W = T_1 / (T_2 - T_1)$$

其中： Q_0 —从低温吸收的热量； W —制冷系统耗功

T_1 —低热源的绝对温度； T_2 —高热源的绝对温度；

可知制冷系数与 T_1 和 $T_2 - T_1$ 有关, 当 T_2 一定时, T_1 越高, 制冷系数就越大, 制冷量就越大, 就是说制冷量随低温温度的提高而增大。

我们设计一个量热器, 如图 6 所示。

调整发热量 Q_1 (调电热器电压)。 Q_1 和 Q_2 之和越大, 蒸发器内温度越高, 这时, 制冷系数增大, 制冷量 Q_0 也增大, 在一定范围内达到平衡, $Q_0 = Q_2 + Q_1$ 。

降低 $Q_1 + Q_2$, 使蒸发器温度降低, 制冷系数也降低, Q_0 也降低, 组成一个在较低温度下的稳定制冷循环。所以, 通过改变不同的加热量可以得到不同蒸发温度下的制冷循环及其参数、制冷量。

五、实验步骤

1. 打开总电源

2. 启动蒸发器油泵 (或搅拌器)

3. 启动压缩机

4. 观察蒸发器油温的变化, 等油温下降到 $-10^\circ\text{C} \sim -19^\circ\text{C}$ (参考值) 时, 调整加热调压器的电压到 $140\text{V} \sim 150\text{V}$ 左右, 并打开加热开关, 使蒸发器中的油被加热, 油温开始上升, 等到油温稳定以

后 (10 分钟, 油温不变), 记录 P_1 、 T_1 ; P_2 、 T_2 ; P_3 、 T_3 ; P_4 、 T_4 , 电加热电流 I_a , 电加热电压 V_a , 蒸发器泵电压 V_b 、电流 I_b 、功率因数 $\cos\varphi_c$ 、油温 t 和当地大气压力。

5. 观察 F_{22} 流动情况

从视液镜可以看到制冷剂 F_{22} 的流动情况, 特别是在压缩机启动和停止时更明显。

6. 停机: 按下搅拌停止按键, 全机皆停, 关闭总电源, 整理实验仪器及实验台。(收氟: 关闭储液罐上供液阀门, 观察 P_4 , 当 $P_4 \leq 0$ (表压力), 关闭压缩机的进口阀门, 这样就可以把制冷剂 F_{22} 收集在高压部分, 以免长期不用时泄露。)

七、数据处理

1. 由氟里昂 F_{22} 的 $P-h$ 图, 查出蒸发温度为 t_0 时, 制冷机的单位制冷量 (KJ/kg)

2. 计算出制冷机的制冷量 Q_0 单位 W (J/S)

3. 计算制冷剂的循环量, 求出压机耗功、冷凝器散热量、冷凝器单位热负荷、压机单位耗功、压机内效率, 及原理中能求出的参数。

4. 求制冷系数、工质过冷度、工质过热度。

5. 改变温度后, 重复以上计算, 比较计算结果有何不同。

数据计算

1. 测求出制冷量

由能量平衡 $Q_0 = Q_1 + Q_2$

其中 $Q_1 = I_a V_a$

$Q_2 = I_b V_b \cos\varphi_b$

$Q_0 = Q_1 + Q_2 = I_a V_a + I_b V_b \cos\varphi_b$

2. 制冷系数求取

A 理想情况

如左图所示, 在理想情况下, 忽略去压损

$p_1 = p_2 = p_1'$ 压机出口压力

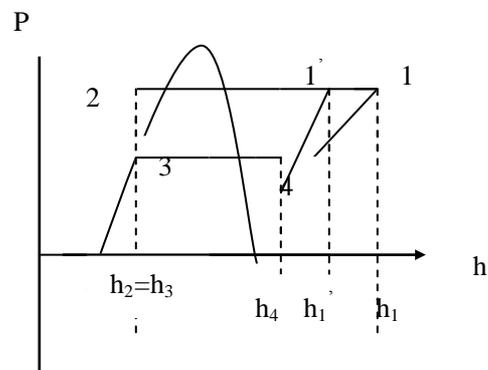
$p_3 = p_4$ 节流后压力

由等压线 $p_2(p_1)$ 和等温线 T_2 确定 2 点, 对应从 $P-h$ 图上查出 h_2 (kJ/kg)

由等焓线 h_2 等压线 p_3 确定节 3 点, 对应 $h_3 = h_2$

由等压线 $p_3(p_4)$, 等温线 T_4 确定节 4 点, 对应从 $P-h$ 图上查出 h_4 , S_4

由等熵线 S_4 交于等压线 p_1 于 $1'$ 点, 对应的焓为 h_1'



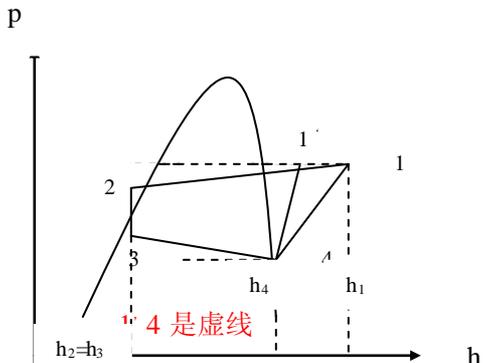
理想情况下 单位制冷量 $q_0 = h_4 - h_3$

冷凝器单位热负荷 $q_k = h_1 - h_2$

单位耗功 $w_0 = h_1 - h_4$

理想情况下 制冷系数 $\varepsilon = \frac{q_0}{w_0} = \frac{h_4 - h_3}{h_1 - h_4}$

B. 实际循环情况 其循环在 p-h 图上表示如下图



由于压缩机，故 $p_1 > p_2$, $p_3 > p_4$ 实际熵 $S_2 > S_1$

由等压线 P_1 等温线 T_1 在 p-h 图上确定 1 点求出 h_1 ；由等压线 P_2 等温线 T_2 在 p-h 图上确定 2 点求出 h_2 ；由等压线 P_3 等温线 T_3 在 p-h 图上确定 3 点求出 h_3 ；由等压线 P_4 等温线 T_4 在 p-h 图上确定 4 点求出 h_4 。

1) 循环单位制冷量 $q_0 = h_4 - h_3$

2) 循环单位耗功 $w_0 = h_1 - h_4$

3) 冷凝器单位热负荷 $q_k = h_1 - h_2 = h_1 - h_3$

4) 制冷系数 $\varepsilon = \frac{q_0}{w_0} = \frac{h_4 - h_3}{h_1 - h_4}$

5) 制冷剂流量 $q_m = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{Q_1 + Q_2}{q_0} = \frac{I_a V_a + I_b V_b \cos \varphi_b}{h_4 - h_3}$

6) 制冷量 $Q_0 = I_a V_a + I_b V_b \cos \varphi_b = q_0 q_m$

7) 冷凝器热负荷 $Q_k = q_m q_k$

8) 制冷循环压比 $\frac{p_2}{p_3}$, 压机压比 $\frac{p_1}{p_4}$

9) 压机实际耗功率 $P_c = (h_1 - h_4) q_m$

15) 性能系数 $cop = \varepsilon = \frac{Q_0}{P_c}$ 其中 $P_c = P_{c+系统其它部件用电功率}$ (风机功率)

八、讨论

1. 该装置是氟里昂类最复杂的一个装置，根据使用工质不同和工况不同，可以去掉中间的某些装置。请问哪几个设备是任何制冷装置不可缺少的？
2. 为什么 $P_1 > P_2$, $P_3 > P_4$?
3. 为什么 $T_3 > T_4$?
4. 蒸发温度不同时，为什么会引起制冷系数变化，在能满足制冷温度前提下，是不是制冷温度越低越好，对家庭用冰箱有什么启示。
5. 你对装置改进有什么建议和意见。

6. 将制冷循环过程画在本书附的 F22 的压焓图上, 标出对应的 P、T、h 值 (注意纵坐标为 $\lg P$, 不是等分的), 随报告一起交。
7. 装订时使用打印的统一封面。
8. 附件所用的 R₂₂ 的压焓图 (1)、R₂₂ 的压焓图 (2)、K₂₂lgP—h 图
9. 蒸汽压缩制冷循环参数测定实验数据记录表