

# 化工原理实验

沈阳工业大学

2008年3月

## 内 容 提 要

本书是与《化工原理》教材配套使用的实验教材。分为绪论、化工原理基础实验、综合实验、演示实验、常用数据表五个部分，共编写了十八项实验内容，它包括了化工原理实验室目前开出的全部实验项目。本书在编写上力求理论联系实际，内容具体规范、条理清晰鲜明，语言流畅简练，易于理解和掌握。书中的图表、文字完全计算机编制。

本书实用性强，可作为化工类本、专科各专业的化工原理实验教材，也可作为实验指导教师及专业技术人员的参考书。

本书由郭海燕主编，王凤娟参加了绪论，基础实验一、七，综合实验一，演示实验一、二的编写，经李凤华审定。由于时间及水平有限，不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者  
2004年2月

绪论.....	4
一、实验须知 .....	4
1、化工原理实验的目的和要求 .....	4
2、实验注意事项 .....	4
二、实验数据记录与处理方法 .....	4
1、实验数据的测取及记录 .....	4
2、实验数据的整理与标绘 .....	5
3、实验误差 .....	5
三、化工原理实验的教学要求 .....	6
1、实验前的预习 .....	6
2、实验中的操作训练 .....	6
3、实验后的总结 .....	6
化工原理基础实验 .....	8
实验一  流体力学综合实验 .....	8
1、流体流动直管阻力的测定 .....	8
2、离心泵特性曲线测定 .....	13
2、离心泵特性曲线测定 .....	16
传热综合实验 .....	19
实验六  填料吸收塔传质实验 .....	24
实验七  筛板振动萃取塔液--液萃取实验.....	27
洞道干燥实验 .....	30

# 绪论

## 一、实验须知

### 1、化工原理实验的目的和要求

化工原理是化工类专业密切联系化工生产实际，实践性很强的一门技术基础课，化工原理实验则是学习、掌握和应用这门课程必不可少的重要环节。化工原理实验与一般实验不同之处在于它具有明显的工程特点。许多工程上复杂因素的分析，往往不能从理论上计算得到，须依据实验方法解决。通过实验，能达到如下目的：

- 1、巩固和加深对理论的认识和理解，验证有关化工单元操作的理论。
- 2、熟悉实验装置的结构、性能和流程，掌握一定的实验技能。
- 3、通过对实验数据的分析、整理及关联，培养学生编写实验报告，处理一般工程问题和进行科学研究的初步能力。

### 2、实验注意事项

- 1、遵守实验室的各项制度，听从指导教师的安排。
- 2、准时进入实验室，不准吸烟，不准大声喧哗。
- 3、爱护各种仪器设备，轻拿轻放，不要动用与本实验无关的仪器。
- 4、对实验中损坏的仪器应及时登记，并报告指导教师，等待处理。
- 5、格外注意水、电、汽的使用，防止触电及热灼伤发生。
- 6、保持实验室卫生，实验完毕，一切动用物品应恢复原样。
- 7、实验数据与记录经指导教师签字后方可离开实验室。

## 二、实验数据记录与处理方法

### 1、实验数据的测取及记录

- 1、测取数据力求准确，要求实事求是。取实验点原则上应步长一直，以使曲线上的点分布均匀。

2、对于明显不可靠的数据，经分析应予以弃去。

3、测取数据必须满足要求，不得遗漏，如大气压、室温、物料物性、设备尺寸等，必须清晰记录与表格中，以免事后混淆。

4、记事应记在事前准备好的记录中，不应记在活页纸或碎纸片上；不应将实验记录视为草稿，即便重抄一遍实验记录，也应保存原始记录以备查队。

5、所记录的数据应当是直接读的数据，不应经过计算再记，例如秒表停表时的读数为1分38秒，应记作1'38"，而不应记作98"。

## 2、实验数据的整理与标绘

整理数据的目的是将所测的数据用最合适的方法表达出来，以便明显显示出数据之间的关系和变化规律。数据处理常用的方法是将计算数据标绘在坐标纸上，在化工原理实验中，通常用到的坐标纸有直角坐标纸、半对数坐标纸、双对数坐标纸。

如绘制离心泵特性曲线，使用普通直角坐标纸，绘出  $Q \sim H$ 、 $Q \sim N$ 、 $Q \sim \eta$  的关系和变化规律。

当某组关系数据变化很大，而另一组数据变化不大时可用半对数坐标纸标绘，可避免用狭长的坐标纸。如流量计流量系数测定中，雷诺数  $Re$  与孔流系数  $C_0$  的关系就是这样。

化工原理实验大多以下列指数函数式表示：

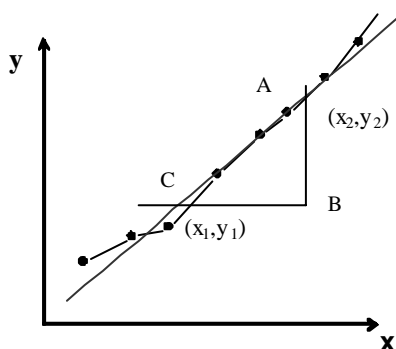
$$y = Ax^n$$

这时，采用对数坐标纸非常方便，因标绘在图上变量  $x$  与  $y$  是一条直线， $n$  是直线的斜率， $A$  就是  $y$  轴上的截距。

$$\text{斜率 } n = \frac{AB \text{ 线段长度}}{BC \text{ 线段长度}}$$

$$\text{截距 } A = \frac{y \text{ (线上任取一点)}}{x^n \text{ (该点对应值)}}$$

注意，用直线上任一点确定  $n$ 、 $A$  值时，不应取实验点，因为实验点往往只是位于直线附近，并非正好在直线上（参看下图）



## 3、实验误差

实验数据整理以后，呈现出一定的特性规律。应该与理论上的规律加以比较和分析，找

出引起误差的原因，这些原因，可能是粗心大意造成的疏忽误差，也可能是设备不完善或仪器系统误差，或者是由于测量本身随机性产生的偶然误差。要求每个学生能够通过自己的实验独立思考、分析、提出自己的见解。

## 三、化工原理实验的教学要求

化工原理实验对学生来说是第一次接触到用工程装置进行实验，学生往往感到陌生，无从下手。有的学生又因为是几个人一组而有依赖心理，为了切实受到教学效果，要求每个学生必须做到以下几点：

### 1、实验前的预习

学生实验前必须认真的预习实验讲义，清楚地了解实验目的、要求、原理及实验步骤，对于实验所涉及的测量仪表也要预习他们的使用方法。

学生在预习的基础之上写出实验预习报告，报告内容为实验目的，原理、装置情况、注意事项、要测的数据、要算的数据及疑难问题等。最后还要进行现场了解，做到心中有数。经指导教师提问检查合格后方可进行实验。

### 2、实验中的操作训练

实验操作是动手动脑的重要过程，学生一定要严格按照操作规程进行。要安排好测量点的范围，测试数目，哪些地方测点要取得密一些，等等。调试时要求细心，操作平稳。对于实验过程中的现象，仪表读数的变化要仔细观察，实验数据要记录在表格内，并注明单位、条件。实验现象要尽量详细描述记录在实验记录纸上，绝不能记在随便取来的零散纸上。有些当时不能理解的实验现象，若重复进行一遍仍然如此，需如实记录下来，待实验结束经过思考后，提出自己的看法和结论。学生应在实验操作中注意培养自己严谨的科学作风，养成良好的习惯。

### 3、实验后的总结

实验总结是以实验报告的形式完成的。实验报告是一项技术文件，是学生用文字表达技术资料的一种训练，不少学生对实验报告没有给与足够的重视，或者不会用准确的科学的数字和观点来书写报告，图形表达也缺乏训练，因此，对学生来说，需要严格训练编写实验报告的能力，这对今后写好研究报告和科研论文是必不可少的。

实验报告内容可在预习报告的基础上完成，实验报告应包括下列内容

- 1、实验目的
- 2、实验基本原理
- 3、实验设备、装置简图、流程图
- 4、原始数据表（应附数据设计方案）
- 5、计算示例（举出一个实验点完整的计算过程）

6、计算结果一览表及图

7、思考题

8、体会和讨论

实验报告必须书写工整，图形绘制必须用直尺或曲线板，必须用标准坐标纸做实验结果图。插图放在适当位置，最后要装订成册。报告册的封面要写明姓名、班级、实验时间、指导教师姓名及同组人。实验报告是考核实验成绩的主要方面，应认真对待。

# 化工原理基础实验

## 实验一 流体力学综合实验

### 1、流体流动直管阻力的测定

流体流动阻力大小涉及到输送机械的动力消耗和输送机械的选择。测定流体流动阻力对于化工设计、生产、科研具有重要意义。

#### 一、实验目的

- 1、了解流体在管道内摩擦阻力的测定方法；
- 2、确定摩擦系数  $\lambda$  与雷诺数  $Re$  的关系。

#### 二、基本原理

由于流体具有粘性，当在管内流动时，必须克服内摩擦力而损耗流体能量；当流体呈湍流流动时，质点间不断相互碰撞，引起质点间动量交换，从而产生了湍动阻力，也消耗了流体能量。流体的粘性和流体的涡流产生了流体流动的阻力。

在被测直管段的两取压口之间列出柏努力方程式，可得：

$$gZ_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gZ_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + h_f$$

由于流体在管径不变的水平管道内流动

$$Z_1 = Z_2, \quad u_1 = u_2$$

$$\text{则有 } h_f = \frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{\Delta P}{\rho}$$

流体在圆形直管内的流动阻力，可用下式表示：

$$h_f = \lambda \frac{L}{d} \times \frac{u^2}{2} = \frac{\Delta P}{\rho}$$

$L$ —两侧压点间直管长度(m)

$d$ —直管内径(m)

$\lambda$ —摩擦阻力系数

$u$ —流体流速 (m/s)

$\Delta P$ —直管阻力引起的压降 (Pa)，对于倒U型管压差计  $\Delta P = R (\rho_{\text{指示剂}} - \rho_{\text{流体}}) g$

$h_f$ —流体通过直管的阻力 (J/kg)



$$\lambda = \frac{2d}{L} \times \frac{\Delta P}{u^2}$$

整理得 
$$\lambda = \frac{2 \times 0.785^2 d^5}{L} \cdot \frac{\Delta P}{V^2} = A \frac{\Delta P}{V^2}$$

摩擦系数是一个受多种因素影响的变量，其规律与流体流动类型密切相关。流体流动类型通过雷诺准数 Re 的数值范围表示：

$$\text{Re} = \frac{du\rho}{\mu}$$

$$\text{Re} = \frac{d\rho}{\mu} \cdot \frac{V}{0.785} = BV$$

$\mu$ —流体粘度 (Pa·s)

$\rho$ —流体密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

本实验在管壁粗糙度、管长、管径、一定的条件下用水做实验，改变水流量，测得一系列流量下的  $\Delta P$  值，将已知尺寸和所测数据代入各式，分别求出  $\lambda$  和 Re，在双对数坐标纸上绘出  $\lambda \sim \text{Re}$  曲线。

### 三、实验装置与仪器

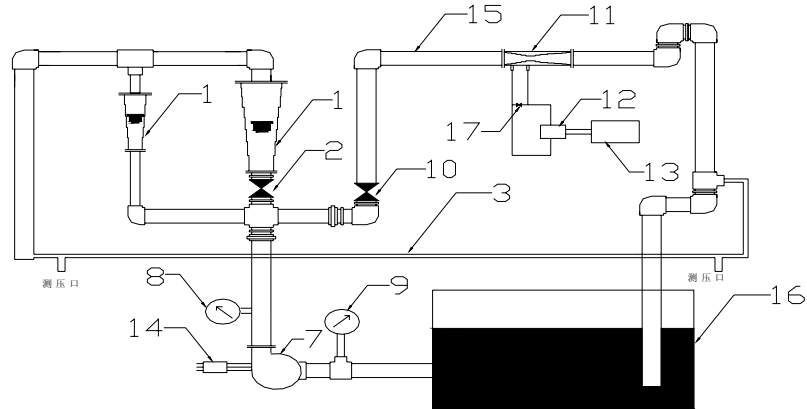
#### 1、实验装置

水泵将储水槽中的水抽出，送入实验系统，首先经转子流量计测量流量，然后送入被测直管段测量流体流动的阻力，经回流管流回储水槽，水循环使用。被测直管段流体流动阻力  $\Delta P$  可根据其数值大小分别采用变压器或空气—水倒置 U 型管即倒 U 型压差计来测量。

#### 2、设备的主要技术参数

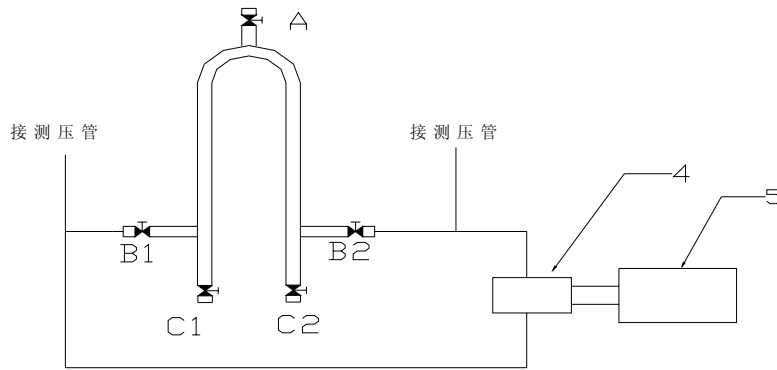
- (1) 被测直管： 管径 d: 0.0080(m) 管长 L: 1.6(m) 材料:紫铜管
- (2) 转子流量计： 型号 LZB—25 测量范围 100—1000 (L/h)  
                  型号 LZB—10 测量范围 10—100 (L/h)
- (3) 单项离心清水泵： 型号 WB70/055 流量 20—2000 (L/h)  
                          扬程:13.5~19(m) 电机功率:550 (W)  
                          电流:1.35(A) 电压:380 (V)

#### 3、实验装置简图（见下页）



图一 流体力学综合实验装置流程示意图

1. 转子流量计； 2, 10. 流量调节阀； 3. 直管阻力测试管； 4. 压差变送器；  
5. 显示仪表； 6. 倒置U型管； 7. 离心泵； 8. 压力表； 9. 真空表； 11. 文氏  
流量计； 12. 压差变送器； 13. 显示仪表； 14. 功率表； 15. 离心泵性能测  
试管路； 16. 水箱； 17. 平衡阀；



图二 测压管路图

#### 四、实验步骤:

- 1、将储水槽内注满水。
- 2、大流量状态下的压差测量系统,应先接电预热 10-15 分钟,记录仪表的初始值后,可启动泵做实验。
- 3、检查导压系统内有无气泡存在。当流量为 0 时打开 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub> 两个小阀门,若空气—水倒置 U 型管内两液柱的高度差不为 0,则说明系统内有气泡存在,需要排净气泡方可测取数据。  
排气方法: 打开出口阀门,将流量调至较大,排除导压管内的气泡。然后将空气—水倒置 U 型管液位调至“0”点,作为压差计备用。
- 4、测取数据的顺序可从大流量至小流量,反之也可,要求测 15~20 组数据,当流量读数小于 300L/h 后,建议用空气—水倒置 U 型管测压差  $\Delta P$ 。
- 5、待数据测量完毕,关闭流量调节阀,关泵,切断电源。

#### 五、使用实验设备应注意的事项:

- 1、调流量要慢、稳、准。
- 2、利用压力传感器测大流量下  $\Delta P$  时,应切断空气—水倒置 U 型管 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub> 两阀门否则带来数据误差。
- 3、在实验过程中每调节一次流量,应待流量和压差数值稳定以后方可记录数据。

4、若较长时间不做实验,启动离心泵之前应先转动泵轴使之灵活运转,否则烧坏电机。

## 六、数据处理:

1、利用所测数据计算出  $Re$ 、 $\lambda$  值并列表,按层流和湍流两种情况分别列出。

2、以  $Re$  为横坐标,  $\lambda$  为纵坐标,在双对数坐标纸上标绘出  $Re$  和  $\lambda$  的关系曲线,并与教材上图线进行比较,分析误差。

## 七、思考与讨论:

1、怎样检查管道内的气体是否排净?

2、怎样使转子流量计稳定?

3、实验结果讨论。

实验数据表



## 2、离心泵特性曲线测定

### 一、实验目的

- 1、熟悉离心泵的操作与结构；
- 2、测定离心泵在一定转速下的特性曲线。

### 二、基本原理

在一定转速下,离心泵的压头  $H_e$ , 轴功率  $N$  及效率  $\eta$  均随实际流量  $Q_e$  的大小而改变。因此泵的特性是由  $H = f(Q_e)$ ,  $N_e = f(Q_e)$  和  $\eta = f(Q_e)$  三条曲线来决定。而此三条曲线是经实验测得标绘出来。

#### 1、流量 $Q_e$ 的测定

通过调节阀门改变水流量的大小, 采用文式流量计测得压差, 求其相应的体积流量  $Q_e$  ( $m^3/s$ )

$$Q_e = C_0 \times A_0 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

#### 2、离心泵压头 $H_e$ 的测定

在离心泵的吸入口和压出口之间列柏努力方程

$$Z_{\lambda} + \frac{P_{\lambda}}{\rho g} + \frac{u_{\lambda}^2}{2g} + H_e = Z_{\text{出}} + \frac{P_{\text{出}}}{\rho g} + \frac{u_{\text{出}}^2}{2g} + H_{f(\lambda-\text{出})}$$

$$\because \text{离心泵 } d_{\lambda} = d_{\text{出}} \quad \therefore u_{\lambda} = u_{\text{出}}$$

又  $\because H_{f(\lambda-\text{出})}$  可忽略所以有

$$H_e = (Z_{\text{出}} - Z_{\lambda}) + \frac{P_{\text{出}} - P_{\lambda}}{\rho g} (m)$$

#### 3、离心泵轴功率的计算

本实验中近似地处理

$$\begin{aligned} \text{泵轴功率 } N_{\text{轴}} &= \text{电机输出功率} \\ &= \text{电机输入功率} \times \text{电机效率 } (\text{kw}) \\ &= \text{功率表读数 } N_{\text{电}} \times \text{电机效率 } \eta_{\text{电}} (\text{kw}) \end{aligned}$$

$$\text{即 } N_{\text{轴}} = N_{\text{电}} \cdot \eta_{\text{电}}$$

#### 4、离心泵总效率 $\eta$

$$\text{泵的有效功率 } N_e = \frac{H_e \cdot Q_e \cdot \rho \cdot g}{1000} = \frac{H_e \cdot Q_e \cdot \rho}{102} (\text{kw})$$

$$\eta = \frac{N_e}{N_{\text{轴}}}$$

以上式中:

$A_0$ —文丘里流量计喉管的横截面积 ( $m^2$ )

$C_0$ —流量系数  $C_0=1$

$\Delta P$ —文丘里流量计的压差 (kPa)

$Z_{\text{出}} - Z_{\lambda}$ —离心泵进出口管路的垂直距离 (m)

$P_{\text{出}} - P_{\lambda}$ —离心泵进出口管路的压强 (MPa)

$\rho$ —液体在操作温度下的密度 ( $kg/m^3$ )

### 三、实验装置与仪器

#### 1、实验装置及流程图(图见第一部分)

本实验用 WB70/055 型离心泵进行实验,其装置如图一、图二所示。用离心泵将储水槽内的水抽出,送入离心泵性能测定管路测量系统,然后由压出管排至水槽。在泵的吸入口和压出口处,分别装有真空表和压力表,以测量水进、出口处的压力。泵的出口管线上装有文氏流量计及调节阀,用来调节水的流量或管内压力。

#### 2、设备仪器及主要技术数据

- (1) 单项离心清水泵: 型号: WB70/055 流量: 20~200 (L/h)  
扬程: 13.5~19 (m)  
电机功率: 550(w) 电流: 1.35 (A) 电压: 380 (V)
- (2) 压差传感器: 型号: LXWY 测量范围: 200kPa
- (3) 数字电压表: 型号: PD139 测量范围: 0~200kPa
- (4) 功率表型号: PS139 测量范围: 0~2 kw
- (5) 离心泵进出口管路垂直距离: 200mm;
- (6) 电机效率: 60%;
- (7) 离心泵进出口管路直径: 25mm。
- (8) 文氏喉直径:  $d_v = 25\text{mm}$

### 四、实验方法

1、向储水槽内注水,直到水满为止。

2、在启动离心泵之前需做如下检查:

(1) 流量调节阀 10 和 2、离心泵出口压力表和真空表的调节阀、倒置U型管的阀门  $B_1$ 、 $B_2$  均应关闭。

(2) 流量测量压差变送器的平衡阀打开。

3、启动离心泵,打开阀门 10 至全开。稍停片刻,待流体赶净管路内的气泡后关闭平衡阀(在背面)。打开压力表及真空表的调节阀。

4、测取数据顺序可任选。流量从最大至流量为零应均匀取点 15~20 组数据。

5、数据测量完毕,关闭压力表、真空表的调节阀并把平衡阀打开。

### 五、使用实验设备应注意的事项

1、启动离心泵之前,一定要检查各处阀门。

2、流体在管路输送中不应有气存在。

3、测量数据时,流量传感器的平衡阀一定处于关闭状态,否则影响测量数据值。

4、离心泵不要长时间空转。

### 六、数据处理

1、将实验数据列表并计算出  $Q_e$ 、 $H_e$ 、 $N$  及  $\eta$ 。

2、在坐标纸上作出泵的特性曲线,即  $H_e \sim Q_e$ ,  $N \sim Q_e$ ,  $\eta \sim Q_e$  三条曲线并根据所得曲线,标出适宜操作区。

### 七、思考与讨论

1、对现有实验条件,泵的特性曲线能否改变?

2、管路排水口安装在水面之上和浸在水中实验有何影响?



## 2、离心泵特性曲线测定

### 一、实验目的

- 1、熟悉离心泵的操作与结构；
- 2、测定离心泵在一定转速下的特性曲线。

### 二、基本原理

在一定转速下,离心泵的压头  $H_e$ , 轴功率  $N$  及效率  $\eta$  均随实际流量  $Q_e$  的大小而改变。因此泵的特性是由  $H = f(Q_e)$ ,  $N_e = f(Q_e)$  和  $\eta = f(Q_e)$  三条曲线来决定。而此三条曲线是经实验测得标绘出来。

#### 1、流量 $Q_e$ 的测定

通过调节阀门改变水流量的大小, 采用文式流量计测得压差, 求其相应的体积流量  $Q_e$  ( $m^3/s$ )

$$Q_e = C_0 \times A_0 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

#### 2、离心泵压头 $H_e$ 的测定

在离心泵的吸入口和压出口之间列柏努力方程

$$Z_\lambda + \frac{P_\lambda}{\rho g} + \frac{u_\lambda^2}{2g} + H_e = Z_{\text{出}} + \frac{P_{\text{出}}}{\rho g} + \frac{u_{\text{出}}^2}{2g} + H_{f(\lambda-\text{出})}$$

$$\because \text{离心泵 } d_\lambda = d_{\text{出}} \quad \therefore u_\lambda = u_{\text{出}}$$

又  $\because H_{f(\lambda-\text{出})}$  可忽略所以有

$$H_e = (Z_{\text{出}} - Z_\lambda) + \frac{P_{\text{出}} - P_\lambda}{\rho g} (m)$$

#### 3、离心泵轴功率的计算

本实验中近似地处理

$$\begin{aligned} \text{泵轴功率 } N_{\text{轴}} &= \text{电机输出功率} \\ &= \text{电机输入功率} \times \text{电机效率 } (\text{kw}) \\ &= \text{功率表读数 } N_{\text{电}} \times \text{电机效率 } \eta_{\text{电}} (\text{kw}) \end{aligned}$$

$$\text{即 } N_{\text{轴}} = N_{\text{电}} \cdot \eta_{\text{电}}$$

#### 4、离心泵总效率 $\eta$

$$\text{泵的有效功率 } N_e = \frac{H_e \cdot Q_e \cdot \rho \cdot g}{1000} = \frac{H_e \cdot Q_e \cdot \rho}{102} (\text{kw})$$

$$\eta = \frac{N_e}{N_{\text{轴}}}$$

以上式中:

$A_0$ —文丘里流量计喉管的横截面积 ( $m^2$ )

$C_0$ —流量系数  $C_0=1$

$\Delta P$ —文丘里流量计的压差 (kPa)

$Z_{\text{出}} - Z_\lambda$ —离心泵进出口管路的垂直距离 (m)

$P_{\text{出}} - P_\lambda$ —离心泵进出口管路的压强 (MPa)

$\rho$ —液体在操作温度下的密度 ( $kg/m^3$ )



### 三、实验装置与仪器

#### 1、实验装置及流程图(图见第一部分)

本实验用 WB70/055 型离心泵进行实验,其装置如图一、图二所示。用离心泵将储水槽内的水抽出,送入离心泵性能测定管路测量系统,然后由压出管排至水槽。在泵的吸入口和压出口处,分别装有真空表和压力表,以测量水进、出口处的压力。泵的出口管线上装有文氏流量计及调节阀,用来调节水的流量或管内压力。

#### 2、设备仪器及主要技术数据

- (1) 单项离心清水泵: 型号: WB70/055 流量: 20~200 (L/h)  
扬程: 13.5~19 (m)  
电机功率: 550(w) 电流: 1.35 (A) 电压: 380 (V)
- (2) 压差传感器: 型号: LXWY 测量范围: 200kPa
- (3) 数字电压表: 型号: PD139 测量范围: 0~200kPa
- (4) 功率表型号: PS139 测量范围: 0~2 kw
- (5) 离心泵进出口管路垂直距离: 200mm;
- (6) 电机效率: 60%;
- (7) 离心泵进出口管路直径: 25mm。
- (8) 文氏喉直径:  $d_v = 25\text{mm}$

### 四、实验方法

1、向储水槽内注水,直到水满为止。

2、在启动离心泵之前需做如下检查:

(1) 流量调节阀 10 和 2、离心泵出口压力表和真空表的调节阀、倒置U型管的阀门  $B_1$ 、 $B_2$  均应关闭。

(2) 流量测量压差变送器的平衡阀打开。

3、启动离心泵,打开阀门 10 至全开。稍停片刻,待流体赶净管路内的气泡后关闭平衡阀(在背面)。打开压力表及真空表的调节阀。

4、测取数据顺序可任选。流量从最大至流量为零应均匀取点 15~20 组数据。

5、数据测量完毕,关闭压力表、真空表的调节阀并把平衡阀打开。

### 五、使用实验设备应注意的事项

1、启动离心泵之前,一定要检查各处阀门。

2、流体在管路输送中不应有气存在。

3、测量数据时,流量传感器的平衡阀一定处于关闭状态,否则影响测量数据值。

4、离心泵不要长时间空转。

### 六、数据处理

1、将实验数据列表并计算出  $Q_e$ 、 $H_e$ 、 $N$  及  $\eta$ 。

2、在坐标纸上作出泵的特性曲线,即  $H_e \sim Q_e$ ,  $N \sim Q_e$ ,  $\eta \sim Q_e$  三条曲线并根据所得曲线,标出适宜操作区。

### 七、思考与讨论

1、对现有实验条件,泵的特性曲线能否改变?

2、管路排水口安装在水面之上和浸在水中实验值有何影响?



# 传热综合实验

## 一、实验目的

- 1、通过实验掌握传热膜系数  $\alpha$  的测定方法。并分析影响  $\alpha$  的因素，
- 2、掌握确定传热膜系数准数关联式中的系数  $C$  和指数  $m$ 、 $n$  的方法。
- 3、通过实验提高对  $\alpha$  关联式的理解，了解工程上强化传热的措施。
- 4、掌握测温热电偶的使用方法。

## 二、基本原理

对流传热的核心问题是求算传热膜系数  $\alpha$ ，当流体无相变化时对流传热准数关联式一般形式为：

$$Nu = C Re^m Pr^n Gr^p$$

对强制湍流， $Gr$  准数可以忽略。  $Nu = C Re^m Pr^n$

本实验中，可用图解法和最小二乘法两种方法计算准数关联式中的指数  $m$ 、 $n$  和系数  $C$ 。

用图解法对多变量方程进行关联时，要对不同变量  $Re$  和  $Pr$  分别回归。为了便于掌握这类方程的关联方法，可取  $n = 0.4$ （实验中流体被加热）。这样就简化成单变量方程。两边取对数，得到直线方程：

$$\lg \frac{Nu}{Pr^{0.4}} = \lg C + m \lg Re$$

在双对数坐标系中作图，找出直线斜率，即为方程的指数  $m$ 。在直线上任取一点的函数值代入方程中得到系数  $C$ ，即

$$C = \frac{Nu}{Pr^{0.4} Re^m}$$

用图解法，根据实验点确定直线位置，有一定的人为性。

而用最小二乘法回归，可以得到最佳关联结果。应用计算机对多变量方程进行一次回归，就能同时得到  $C$ 、 $m$ 、 $n$ 。

可以看出对方程的关联，首先要有  $Nu$ 、 $Re$ 、 $Pr$  的数据组。

$$\text{雷诺准数} \quad Re = \frac{du\rho}{\mu}$$

$$\text{努塞尔特准数} \quad Nu = \frac{\alpha_1 d}{\lambda}$$

$$\text{普兰特准数} \quad Pr = \frac{\bar{C}_p \mu}{\lambda}$$

$d$  — 换热器内管内径 (m)

$\alpha_1$  — 空气传热膜系数 ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$\rho$  — 空气密度 ( $kg/m^3$ )

$\lambda$  — 空气的导热系数 ( $W/m \cdot ^\circ C$ )

$\bar{C}_p$  — 空气定压比热 ( $J/kg \cdot ^\circ C$ )

实验中改变空气的流量以改变准数  $Re$  之值。根据定性温度计算对应的  $Pr$  准数值。同时由牛顿冷却定律，求出不同流速下的传热膜系数  $\alpha$  值。进而算得  $Nu$  准数值。

因为空气传热膜系数  $\alpha_1$  远大于蒸汽传热膜系数  $\alpha_2$ , 所以传热管内的对流传热系数  $\alpha_1$  约等于冷热流体间的总传热系数  $K$ 。则有

牛顿冷却定律:  $Q = \alpha_1 A \Delta t_m$

$A$ —传热面积 ( $m^2$ ) (内管内表面积)

$\Delta t_m$ —管内外流体的平均温差 ( $^{\circ}C$ )

$$\Delta t_m = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

其中:  $\Delta t_1 = T - t_1$ ,  $\Delta t_2 = T - t_2$

$T$ —蒸汽侧的温度, 可近似用传热管的外壁面平均温度  $T_w$  ( $^{\circ}C$ ) 表示

$$T_w = 8.5 + 21.26 \times E$$

$E$ —热电偶测得的热电势 ( $mv$ )

传热量  $Q$  可由下式求得:  $Q = w \frac{C_p}{3600} (t_2 - t_1) = V \rho \frac{C_p}{3600} (t_2 - t_1)$

$w$ —空气质量流量 ( $kg/h$ )

$V$ —空气体积流量 ( $m^3/h$ )

$t_1, t_2$ —空气进出口温度 ( $^{\circ}C$ )

实验条件下的空气流量  $V$  ( $m^3/h$ ) 需按下式计算:

$$V = V_{t_1} \times \frac{273 + \bar{t}}{273 + t_1}$$

$V_{t_1}$ —空气入口温度下的体积流量 ( $m^3/h$ )

$\bar{t}$ —空气进出口平均温度 ( $^{\circ}C$ )

其中  $V_{t_1}$  可按下式计算  $V_{t_1} = 21.68 \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_{t_1}}}$

$\Delta P$ —孔板两端压差 ( $KPa$ )

$\rho_{t_1}$ —进口温度下的空气密度 ( $kg/m^3$ )

强化传热被学术界称为第二代传热技术, 它能减小初设计的传热面积, 以减小换热器的体积和重量; 提高现有换热器的换热能力; 使换热器能在较低温差下工作; 并且能够减少换热器的阻力以减少换热器的动力消耗, 更有效的利用能源和资金。强化换热的方法有多种, 本实验装置是采用在换热器内管插入螺旋线圈的方法来强化传热的。在近壁区域, 流体一面由于螺旋线圈的作用而发生旋转, 一面还周期性地受到线圈的螺旋金属丝的扰动, 因而可以使传热强化。

强化传热时,  $Nu_o = B Re^m$ , 其中  $B$ 、 $m$  的值因螺旋丝尺寸不同而不同。同样可用线性回归方法确定  $B$  和  $m$  的值。单纯研究强化手段的强化效果 (不考虑阻力的影响), 可以用强化比的概念作为评判准则, 即强化管的努塞尔特准数  $Nu_o$  与普通管的努塞尔特准数  $Nu$  的比。显然, 强化比  $Nu_o / Nu > 1$ , 而且它的值越大, 强化效果越好。

### 三、实验装置

#### 1、仪器设备

本实验采用套管式换热器，冷空气走管程，饱和水蒸汽走壳程。

##### (1)传热管参数

换热器内管内径 $d_i$ (mm)		19.25
换热器内管外径 $d_o$ (mm)		22.01
换热器外管内径 $D_i$ (mm)		50
换热器外管外径 $D_o$ (mm)		52.5
总管长(紫铜内管) $L$ (m)		1.30
测量段长度 $l$ (m)		1.00
强化换热器内管内插物 (螺旋线圈) 尺寸	丝径 $h$ (mm)	1
	节距 $H$ (mm)	40
加热釜	操作电压	$\leq 200$ 伏
	操作电流	$\leq 10$ 安

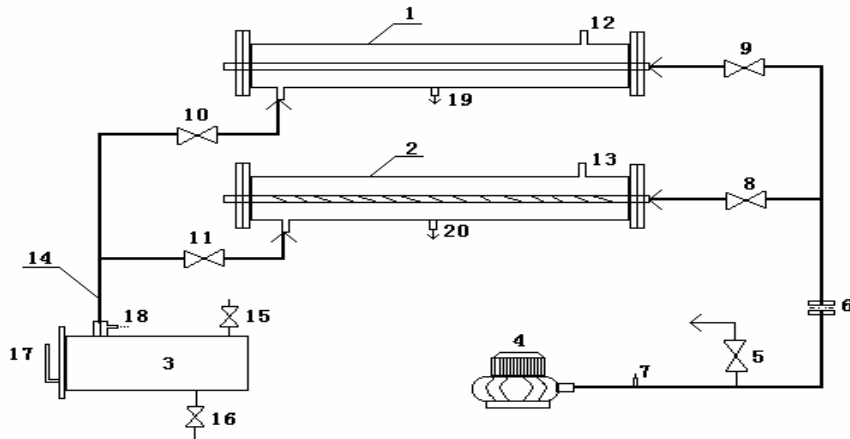
(2)不锈钢孔板流量计的孔径比  $m = 17\text{mm} / 44\text{mm} \approx 0.39$

(3)空气进、出口测量段的温度 $t_1$ 、 $t_2$ 采用电阻温度计测量，在显示仪表上直接读数。换热管的外壁面平均温度 $T_w$ 采用铜—康铜热电偶测量，在数字式毫伏计上显示数值 $E$ 。

(4)电加热釜使用体积为 7 升(加水至液位计的上端红线)，内装有一支 2.5Kw 的螺旋形电加热器，最高使用电压不超过 200 伏(由固态调节器调节)。

(5)漩涡气泵，XGB—2 型，电功率约 0.75Kw (三相电源)。

#### 2、实验装置流程图



空气-水蒸气传热综合实验装置流程图

- 1、普通套管换热器 2、内插有螺旋线圈的强化套管换热器 3、蒸汽发生器  
 4、漩涡气泵 5、旁路调节器 6、孔板流量计 7、风机出口温度测试点  
 8, 9、空气支路控制阀 10, 11、蒸汽支路控制阀 12, 13、蒸汽放空气口  
 14、蒸汽上升主管路 15、加水口 16、放水口 17、液位计  
 18、冷凝液回蒸汽发生器入口 19, 20、冷凝液回流口

## 四、实验方法及步骤

1、实验前的准备，检查工作。

- (1) 向电加热釜加水至液位计上端红线处。
- (2) 向冰水保温瓶中加入适量的冰水，并将冷端补偿热电偶插入其中。
- (3) 检查空气流量旁路调节阀是否全开，电压调节电位器是否旋至最左端(逆时针方向)。
- (4) 检查普通管支路各控制阀是否已打开。保证蒸汽和空气管线的畅通。
- (5) 接通电源总闸，设定加热电压，启动电加热器开关，开始加热。

2、实验开始。

(1) 一段时间后水沸腾，水蒸气自行充入普通套管换热器外管，观察蒸汽排出口有恒量蒸汽排出，标志着实验可以开始。

(2) 约加热十分钟后，可提前启动鼓风机，保证实验开始时空气入口温度 $t_1$  (°C) 比较稳定。

(3) 调节空气流量旁路阀的开度，使压差计的读数为所需的空气流量值(当旁路阀全开时，通过传热管的空气流量为所需的最小值，全关时为最大值)。

(4) 稳定 5~8 分钟左右可转动各仪表选择开关读取 $t_1, t_2, E$ 值。(注意：第一个数据点必须稳定足够的时间)

(5) 重复(3)与(4)共做 5~6 个空气流量值。

(6) 最小最大流量值一定要做。

(7) 整个实验过程中，加热电压可以保持不变，也可随空气流量的变化做适当的调节。

3、转换支路，重复步骤 2 的内容，进行强化套管换热器的实验。测定 5~6 组实验数据。

4、实验结束。

- (1) 关闭加热开关。
- (2) 过 5 分钟后关闭鼓风机，并将旁路阀全开。
- (3) 切断总电源。
- (4) 若需几天后再做实验，则应将电加热釜和冰水保温瓶中的水放干净。

## 五、实验注意事项

1、实验装置仪表柜上的拉门学生不得随便打开，以防触电。

2、实验前要在指导教师允许的情况下，检查冰水保温桶中是否有冰水混合物共存，检查热电偶的冷端，是否全部浸没在冰水混合物中。

3、蒸汽加热釜中的水位要保持在正常范围内。不可低于 1/2 液位，也不可高于 2/3 液位。

4、必须保证蒸汽上升管线的畅通。即在给蒸汽加热釜加热之前，两蒸汽支路控制阀之一必须全开。在转换支路时，应先开启需要的支路阀，再关闭另一支路，且开启和关闭控制阀必须缓慢，防止管线截断或蒸汽压力过大突然喷出。

5、也必须保证空气管线的畅通。即在接通风机电源之前，两个空气支路控制阀之一和旁路调节阀必须全开。在转换支路时，应先关闭风机电源，然后开启和关闭控制阀。

## 六、数据处理

1、根据实验结果，计算出  $\alpha_1$ 、 $Nu$ 、 $Re$  及  $Nu_0$  值，并列出结果数据一览表。

2、计算强化比  $Nu_0 / Nu$ 。

3、以 $Re$ 为横坐标， $Nu/Pr^{0.4}$ 为纵坐标，在双对数坐标纸上绘制一条直线，确定出 $C$ 、 $m$ 以及 $B$ 、 $n$ 值。再写出流体在圆管内做强制湍流流动时的传热膜系数半经验关联式。

## 七、思考与讨论

- 1、将实验得到的半经验准数关联式和公认式进行比较，分析造成偏差的原因。
- 2、本实验中管壁温度应接近加热蒸汽温度还是空气温度？为什么？
- 3、管内空气流动速度对传热膜系数有何影响？当空气流速增大时，空气离开热交换器时的温度将升高还是降低？为什么？
- 4、冷凝下来的蒸汽为何要及时排出？否则会导致什么后果？
- 5、试估算实验近似取 $\alpha_1=K$ 对 $K$ 造成的误差。（可取 $\alpha_2=8000W/m^2 \cdot ^\circ C$ ）

## 实验六 填料吸收塔传质实验

### 一、实验目的：

- 1、熟悉填料吸收塔的结构与操作；
- 2、掌握液相体积总传质系数 $K_L a$ 的测定方法。

### 二、实验原理：

本吸收系统采用的是二氧化碳——水物系，溶剂为自来水，溶质为纯二氧化碳气。塔底吸收液中 $CO_2$ 的浓度 $C_{A1}$  (mol/L或 $kmol/m^3$ )为：

$$C_{A1} = \frac{2C_{Ba(OH)_2} V_{Ba(OH)_2} - C_{HCL} V_{HCL}}{2V_{溶液}}$$

式中： $C_{Ba(OH)_2}$  ——沉淀处理移取的氢氧化钡的浓度 (mol/L)

$V_{Ba(OH)_2}$  ——沉淀处理移取的氢氧化钡的体积 ml

$C_{HCL}$  ——滴定过量氢氧化钡溶液消耗盐酸的浓度 (mol/L)

$V_{HCL}$  ——滴定过量氢氧化钡溶液消耗盐酸的体积为 (ml)

$V_{溶液}$  ——分析用吸收液的体积 (ml)

因自来水中含有少量的 $CO_2$ ，在本实验中不能忽略，所以塔顶清水中 $CO_2$ 的浓度也要分析。塔顶吸收液中 $CO_2$ 的浓度 $C_{A2}$  (mol/L)为：

$$C_{A2} = \frac{2C_{Ba(OH)_2} V_{Ba(OH)_2} - C_{HCL} V_{HCL}}{2V_{溶液}}$$

测出塔底溶液的温度  $t$ ，依据此温度查附表得亨利系数  $E$  (KPa)

计算溶解度系数 $H$  ( $Kmol / (m^3 \cdot KPa)$ )

$$H = \frac{\rho_s}{M_s} \cdot \frac{1}{E}$$

式中： $\rho_s$ 、 $M_s$  为溶剂水的密度和摩尔质量

计算塔底、塔顶溶液的平衡浓度：

$$C_{A1}^* = C_{A2}^* = C_A^* = HP_A^* = HP_{总}^*$$

由于 $CO_2$ 溶液浓度很低，按理想溶液处理。平均推动力 $\Delta C_{Am}$  ( $Kmol/m^3$ )为：

$$\Delta C_{Am} = \frac{\Delta C_{A2} - \Delta C_{A1}}{\ln \frac{\Delta C_{A2}}{\Delta C_{A1}}} = \frac{(C_{A2}^* - C_{A2}) - (C_{A1}^* - C_{A1})}{\ln \frac{C_{A2}^* - C_{A2}}{C_{A1}^* - C_{A1}}} = \frac{C_{A1} - C_{A2}}{\ln \frac{C_{A2}^* - C_{A2}}{C_{A1}^* - C_{A1}}}$$

因本实验采用的物系不仅遵循亨利定律，而且气膜阻力可以忽略不计，在此情况下，整个传质过程阻力都集中于液膜，即属液膜控制过程，则液相侧体积传质膜系数 $k_L a$ 等于液相体积传质总系数 $K_L a$  ( $Kmol/m^3 \cdot s$ )即：



$$k_L a = K_L a = \frac{V_L}{h\Omega} \cdot \frac{C_{A1} - C_{A2}}{\Delta C_{Am}}$$

式中： $V_L$  — 液相体积流量 (Kmol/s)

$h$  — 填料塔有效高度 (m)

$\Omega$  — 填料塔的截面积 ( $m^2$ )

填料塔的传质单元高度 $H_{OG}$  (m)

$$H_{OG} = \frac{V_L}{K_L a \cdot \Omega}$$

### 三、实验设备主要技术数据及其附件：

#### 1、设备参数：

(1) 风机：XGB-12 型，550W；

(2) 填料塔：玻璃管，内装  $\phi 6 \times 6mm$  拉西环不锈钢填料；填料塔内径  $D=0.037m$ ，吸收塔填料层高度  $Z=0.58m$ ；

(3) 填料塔：玻璃管，内装  $\phi 6 \times 6mm$   $\theta$  环不锈钢丝网填料；填料塔内径  $D=0.037m$ ，吸收塔填料层高度  $Z=0.6m$ ；

(4) 二氧化碳钢瓶一个、减压阀一个

#### 2、流量测量：

(1) 空气转子流量计：型号LZB-4 流量范围：0.01~0.16 $m^3/h$  精度：2.5%

(2) 空气转子流量计：型号LZB-10 流量范围：0.25~2.5 $m^3/h$  精度：2.5%

(3) 水转子流量计：型号 LZB-10 流量范围：10~100 l/h 精度：2.5%

#### 3、浓度测量：

吸收塔塔底、塔顶液体浓度分析：定量化学分析仪一套，离心机一台

#### 4、温度测量：

吸收塔塔底、塔顶液体温度测定：PT139 数字温度显示仪

### 四、实验方法及步骤：

1、打开所选用填料塔的气相和液相通路上的阀门，关闭另一填料塔的气相和液相通路上的阀门。

2、将水转子流量计及 $CO_2$ 转子流量计的调节阀开到最大。

3、打开水龙头并调节水量为 40L/h，稳定后打开 $CO_2$ 钢瓶阀门，调节减压阀缓慢增压至约 1 MPa，用 $CO_2$ 转子流量计的调节阀控制流量为 0.08 $m^3/h$ 。

4、气液两相流量稳定后 10 分钟，测定塔底的液相温度，同时用锥形瓶从取样口接出塔底吸收液，测定塔底溶液中 $CO_2$ 的浓度。

#### 5、 $CO_2$ 浓度的测定方法：

①用移液管吸取 0.1M的 $Ba(OH)_2$ 溶液 5ml，放入锥形瓶中；另用移液管移取吸收剂或吸收液 5ml放入锥形瓶中，震荡使其充分反应。

②将反应液全部装入离心机特用的带盖试管中（需 3 支试管），放入离心机，离心分离后除去碳酸钡白色沉淀，清液全部倒回干净的锥形瓶。

③滴入 2~3 滴甲基橙指示剂，用 0.1M 的盐酸滴定至终点。（原来的淡黄色变为淡粉色）记录消耗盐酸的体积量。

按下式计算溶液中CO<sub>2</sub>的浓度： (mol/L)

$$C_{\text{CO}_2} = \frac{2C_{\text{Ba(OH)}_2} V_{\text{Ba(OH)}_2} - C_{\text{HCL}} V_{\text{HCL}}}{2V_{\text{溶液}}}$$

### 五、使用仪器设备应注意的事项：

- 1、两塔不能同时使用，用一个另一个的水路阀门和气路阀门都要关严，不能分流。
- 2、做化学分析过程中，要细心严谨，各药品的移液管、吸耳球专用
- 3、做分析时要及时将锥形瓶盖严胶塞，以防止气体逸出，或空气中的CO<sub>2</sub>与Ba(OH)<sub>2</sub>接触产生反应。
- 4、离心机使用要注意安全，惯性消失后再打开离心机盖，专用试管要对称放入转角上。

### 六、实验数据处理：

- 1、计算溶液中CO<sub>2</sub>的浓度C<sub>A1</sub>、C<sub>A2</sub> (mol/L)
- 2、计算液相体积传质总系数K<sub>L</sub>a (Kmol/m<sup>3</sup>.s)
- 3、计算填料塔的传质单元高度H<sub>OG</sub> (m)

### 七、实验结果表：

第___套填料吸收塔传质实验数据表		
被吸收的气体_____； 吸收剂：_____； 塔内径：_____mm		
填料种类	θ 环	拉西环
填料尺寸 m		
填料层高度 m		
CO <sub>2</sub> 转子流量读数 m <sup>3</sup> /h		
水转子流量计读数 L/h		
沉淀处理CO <sub>2</sub> 用Ba(OH) <sub>2</sub> 的浓度 mol/L		
沉淀吸收前水溶液中CO <sub>2</sub> 用Ba(OH) <sub>2</sub> 的体积 ml		
沉淀吸收后水溶液中CO <sub>2</sub> 用Ba(OH) <sub>2</sub> 的体积 ml		
滴定用盐酸的浓度 mol/L		
滴定塔顶吸收液用HCL的体积 ml		
滴定塔底吸收液用HCL的体积 ml		
取样品水溶液的体积 ml		
塔底液相的温度 °C		
亨利常数E 10 <sup>8</sup> Pa		
塔底液相浓度C <sub>A1</sub> mol/L		
空白液相浓度C <sub>A2</sub> mol/L		
传质单元高度 H <sub>L</sub> m		
平衡浓度C <sub>A</sub> * 10 <sup>2</sup> kmol/m <sup>3</sup>		
平均推动力 ΔC <sub>Am</sub> kmol/m <sup>3</sup>		
液相体积总传质系数 K <sub>L</sub> a kmol/m <sup>3</sup> .s		

## 实验七 筛板振动萃取塔液--液萃取实验

### 一、实验目的：

- 1、加深对萃取操作过程及其机理的理解；
- 2、掌握传质单元数 $N_{OR}$ 、传质单元高度 $H_{OR}$ 的实验测定方法；
- 3、按萃余相计算体积总传质系数 $K_{XRA}$ ；
- 4、确定输入能量的振动频率Hz与萃取率 $\eta$ 及传质单元数 $N_{OR}$ 的关系。

### 二、实验原理：

本实验以水为萃取剂，从煤油中萃取苯甲酸。水相为萃取相，煤油为萃余相。

轻相入口处，苯甲酸在煤油中的浓度为0.01N左右，轻相由塔低进入作为分散相向上流动，经塔顶分离段后由塔顶流出。重相由塔顶进入作为连续相向下流动至塔低流出，轻重两相在塔内呈逆向流动。在萃取过程中，苯甲酸部分地从萃余相转移至萃取相。萃余相及萃取相进出口浓度由容量分析法测定。考虑到水与煤油完全不互溶，且苯甲酸在两相中的浓度都很低，可以认为在萃取过程中两相液体的体积流量不发生变化。

此图是萃取过程的物流简图

S为水流量	B为油流量
Y为水浓度	X为油浓度
下标E为萃取相	下标R为萃余相
下标t为塔顶	下标b为塔底

1、油相进口浓度 $X_{Rb}$  (kg<sub>酸</sub>/kg<sub>油</sub>)

$$X_{Rb} = \frac{NVM_{\text{苯甲酸}}}{\rho V_{fb}}$$

N—NaOH标准溶液的浓度 (mol/L)

V—滴定油相消耗的NaOH溶液的体积数 (mL)

$\rho$ —煤油的密度 (780kg/m<sup>3</sup>)

$V_{fb}$ —油相取样量 (mL)

2、油相出口浓度 $X_{Rt}$  (kg<sub>酸</sub>/kg<sub>油</sub>)

$$X_{Rt} = \frac{NVM_{\text{苯甲酸}}}{\rho V_{ft}}$$

3、塔底水相出口浓度 $Y_{Eb}$  (kg<sub>酸</sub>/kg<sub>油</sub>)

$$Y_{Eb} = X_{Rb} - X_{Rt}$$

4、塔顶水相进口浓度 $Y_{Et}$  (kg<sub>酸</sub>/kg<sub>油</sub>)

$$Y_{Et} = 0$$

5、油相平衡浓度 $X_R$  (kg<sub>酸</sub>/kg<sub>油</sub>)

$$X_R^* = Y_E / m$$

$m$ —平衡常数2.3

(因苯甲酸浓度很低小于2%，视为理想溶液)

6、进口油相浓度差 $\Delta X_{Rb}$  (kg<sub>酸</sub>/kg<sub>油</sub>)

$$\Delta X_{Rb} = X_{Rb} - X_{Rb}^* = X_{Rb} - Y_{Eb} / m$$

7、出口油相浓度差 $\Delta X_{Rt}$  (kg<sub>酸</sub>/kg<sub>油</sub>)

$$\Delta X_{Rt} = X_{Rt} - X_{Rt}^* = X_{Rt} - Y_{Et} / m = X_{Rt}$$

8、油相浓度对数平均值 $\Delta X_{Rm}$  (kg<sub>酸</sub>/kg<sub>油</sub>)

$$\Delta X_{Rm} = \frac{(\Delta X_{Rb} - \Delta X_{Rt})}{\ln \frac{\Delta X_{Rb}}{\Delta X_{Rt}}}$$

9、按萃余相计算传质单元数

$$N_{OR} = \frac{X_{Rb} - X_{Rt}}{\Delta X_{Rm}}$$

10、萃余相传质单元高度 (m)

$$H_{OR} = \frac{H}{N_{OR}}$$

$H$ —萃取塔有效高度920mm

11、萃取率 $\eta$

$$\eta = \frac{Y_{Eb}}{X_{Rb}}$$

12、按萃余相计算总体及传质系数

$$K_{XR}a = \frac{B'}{H_{OR} \cdot A}$$

$A$ —萃取塔截面积 (塔径 $D=30$ mm)

$B'$ —煤油流量 (需修正得到)

13、煤油实际流量

$$B' = B \sqrt{\frac{\rho_1(\rho_f - \rho_2)}{\rho_2(\rho_f - \rho_1)}}$$

$\rho_1$ —流量计出场标定液体的密度 1000 kg/m<sup>3</sup>

$\rho_2$ —实际工作流体的密度 780 kg/m<sup>3</sup>

$\rho_f$ —转子密度 7900 kg/m<sup>3</sup>

### 三、实验前的准备:

- 1.水相 自来水注入高位槽
- 2.油相配置

配置50升油相，溶剂为工业级煤油，溶质为苯甲酸（可选用化学纯或分析纯），浓度为0.01N（苯甲酸分子量122，苯甲酸的浓度为1.22g/L）。溶结合搅拌均匀后，放入油相储槽，用泵打入高位槽。

### 四、实验物系及实验条件

实验物系：水萃取煤油中的苯甲酸 平衡关系 $Y_E=2.3X_R^*$   
实验条件：操作相比 油相：水相=1：1（质量流量）  
直流调速器电压：60、75、85、90、105（V）

### 五、实验步骤:

- 1、检查设备与流程

用手转动电机与减速器的连接轴，后慢慢开启转速调节仪，电压值不超过40V，如有异常，应停止。

熟悉清水、煤油的流程、取样口。

- 2、装塔：将连续相先装入塔内至上分离器中部，然后控制水流量为4L/h。用水相出口阀控制界面在分离器中部；再开启转速调节仪，电压逐渐调至60V，开始振动搅拌；最后开启油相流量计阀门，使流量为5.1L/h。

- 3、保持各相流量稳定，控制界面位置基本不变（上下落差应在20mm内），并稳定15分钟至20分钟。取样：取原料液、出口油相各约50ml以上，然后用中和分析法测出苯甲酸的浓度。

- 4、改变振动频率，重复上述3。

- 5、实验结束，关闭油流量计，再慢慢关闭转速调节仪，最后关闭水相流量计及水相出口阀，关闭电源。分析用的油样集中回收。

### 六、数据分析方法

用10ml移液管取10ml出口、进口油相式样，加入三滴酚酞作指示剂，加入两滴非离子表面活性剂，用0.01N的NaOH溶液滴定，直至油相呈微粉红色为止。

# 实验八 洞道干燥实验

## 一、实验目的

- 1、学习干燥曲线和干燥速率曲线及临界湿含量的实验测定方法，加深对干燥操作过程及其机理的理解。
- 2、学习干、湿球温度计的使用方法，学习被干燥物料与热空气之间对流传热系数的测定方法。
- 3、通过实物了解干燥操作中废气循环的流程和概念。
- 4、掌握由气体流量计读数求指定界面处气体流速的计算方法。

## 二、实验原理

当湿物料与干燥介质相接触时，物料表面的水分开始气化，并向周围介质传递。根据干燥过程中不同期间的特点，干燥过程分为两个阶段。

第一阶段为恒速干燥阶段。在过程开始时，由于整个物料的湿含量较大，其内部的水分能迅速地达到物料表面。因此，干燥速率为物料表面上水分的气化速率所控制，故此阶段也称为表面气化控制阶段。在此阶段，干燥介质传给物料的热量全部用于水分的气化，物料表面的温度维持恒定（等于热空气湿球温度），物料表面处的水蒸气分压也维持恒定，故干燥速率恒定不变。

第二阶段为降速干燥阶段，当物料被干燥达到临界湿含量后，便进入降速阶段。此时，物料中所含水分较少，水分自物料内部向表面传递的速率低于物料表面水分的气化速率，干燥速率为水分在物料内部的传递速率所控制，故此阶段亦称为内部迁移控制阶段。水着湿含量逐渐减少，物料内部水分的迁移速率也逐渐减小，故干燥速率不断下降。恒速段的干燥速率和临界含水量的影响因素主要有：固体物料的种类和性质；固体物料层的厚度或颗粒大小；空气的温度、湿度和流速；空气与固体物料间的相对运动方式。

恒速阶段的干燥速率和临界含水量是干燥过程研究和干燥器设计的重要数据，本实验在恒定干燥条件下对浸透水的帆布进行干燥，测定干燥曲线和干燥速率曲线，目的是掌握恒速段干燥速率和临界含水量的测定方法及其影响因素。

### 1、干燥速率的测定

$$U = - \frac{G_c}{S} \frac{dX}{d\tau} = - \frac{G_c}{S} \frac{\Delta X}{\Delta \tau}$$

式中：U — 干燥速率 (kg/m<sup>2</sup>.s)

S — 干燥面积 (m<sup>2</sup>)

Δ τ — 时间间隔 (s)

G<sub>C</sub> — 绝干物料量 (kg)

Δ X — 时间间隔内干燥气化的干基含水量

### 2、被干燥物料的重量 G

$$G = G_T - G_D$$

式中：G<sub>T</sub> — 被干燥物料和支撑架的总质量 (kg)

G<sub>D</sub> — 式样支撑架的质量 (kg)

### 3、物料的干基含水量 X

$$X = \frac{G - G_c}{G_c}$$

#### 4、恒速阶段的对流传热系数 $\alpha$

$$\alpha = \frac{Q}{S \Delta t} = \frac{U_s r_{tw}}{t - t_w}$$

式中： $t$ — 试样放置处的干球温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）  
 $t_w$ — 试样放置处的湿球温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）  
 $U_s$ — 临界干燥速率（ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ）  
 $r_{tw}$ — 湿球温度下水的汽化潜热（ $\text{J}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ）

#### 5、试样放置处空气流速的计算

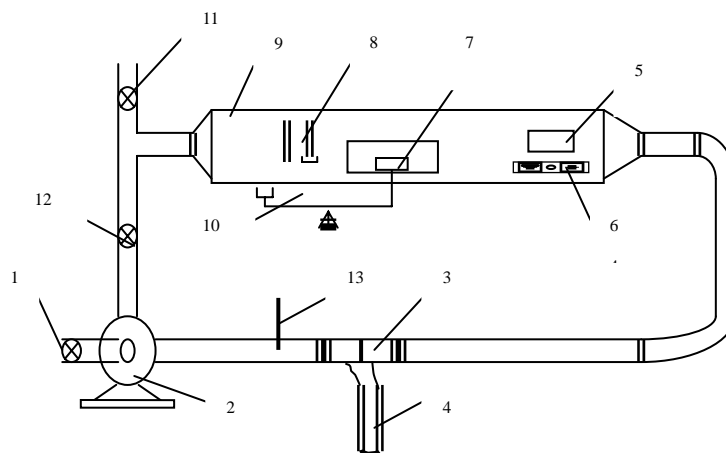
由节流式流量计的流量公式和理想气体的状态方程式可推导出：

$$V_{\text{流}} = V_{20} \times \sqrt{\frac{273 + t_0}{273 + 20}} \times \frac{273 + t}{273 + t_0}$$

式中： $V_{\text{流}}$ — 试样放置处空气流量（ $\text{m}^2/\text{s}$ ）  
 $V_{20}$ — 常压下  $20^{\circ}\text{C}$  时空气的流量（ $\text{m}^2/\text{s}$ ）；由U形管压差计读数和校正曲线查得。  
 $t_0$ — 流量计处空气温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）  
 $t$ — 干燥器内空气的温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）

### 三、实验装置

#### 1、流程示意图



洞道式干燥实验设备流程图

- 1、新鲜空气流量调节阀；2、鼓风机；3、控板流量计；4、U形管压差计；
- 5、电加热器；6、空气温度控制装置；7、物料框架；8、干、湿球温度计；
- 9、洞道干燥器（主体装置）；10、天平；11、废气流量调节阀；
- 12、循环废气流量调节阀；13、空气入口温度计

#### 2、装置说明：

实验装置为洞道干燥器，其空气流通的横截面积  $0.100 \times 0.080 = 0.008\text{m}^2$ 。鼓风机为 XGB—2 型漩涡气泵，最大出口风压 11.76 (KPa)，最大流量为 75 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )，电机功率为 0.75 (KW)。空气预热器是两个电热器并联，每个电热器的额定功率为 450 (W)，额定电压为

220 (V)。天平是HC—TP11B·10型架盘药物天平，最大量程为1000克，分度值为1克，被干燥物料的试样为帆布，第一套装置干燥面积 $S = 0.153 \times 0.074 \times 2 = 2.2644 \times 10^{-2} \text{ (m}^2\text{)}$ ，绝干物料量 $G_C = 16.7$ 克；第二套装置干燥面积 $S = 2.188 \times 10^{-2} \text{ (m}^2\text{)}$ ，绝干物料量 $G_C = 17.0$ 克；第三套装置干燥面积 $S = \times 10^{-2} \text{ (m}^2\text{)}$ ，绝干物料量 $G_C =$ 克；第四套装置干燥面积 $S = \times 10^{-2} \text{ (m}^2\text{)}$ ，绝干物料量 $G_C =$ 克；第五套装置干燥面积 $S = \times 10^{-2} \text{ (m}^2\text{)}$ ，绝干物料量 $G_C =$ 克；

### 3、仪器设备

洞道干燥器	横截面 $0.1 \times 0.08 = 0.008 \text{m}^2$
鼓风机	三环牌 XGB-2 型漩涡气泵 最大出口风压 11.76Kpa 最大流量 75m <sup>3</sup> /h 电机功率 0.75KW
电热器	额定功率 450W 额定电压 220V
天平	HC-TP11B.10 型架盘药物天平， 最大量程为 1000 克 分度值为 1 克
被干燥的试样	第一套 $S = 1.6872 \times 10^{-2} \text{m}^2$ $G_C = 9.38 \text{g}$ 第二套 $S = 1.7025 \times 10^{-2} \text{m}^2$ $G_C = 9.52 \text{g}$ 第三套 $S = \times 10^{-2} \text{m}^2$ $G_C = \text{g}$ 第四套 $S = \times 10^{-2} \text{m}^2$ $G_C = \text{g}$ 第五套 $S = \times 10^{-2} \text{m}^2$ $G_C = \text{g}$

## 四、实验步骤

### 1、实验前的准备工作

- (1)将被干燥的物料试样在水中充分浸泡。
- (2)向湿球温度计的蓄水池中加水。
- (3)将被干燥物料的空支架安装在洞道内，令天平处在自由摆动的平衡状态，记录整个支架和托盘的重量。
- (4)熟悉秒表使用方法。
- (5)全开新鲜空气进口阀和废气排出阀，全关废气循环阀。
- (6)将空气流量调节阀全开，以启动时保护电机。
- (7)将空气预热器加热电压调节旋钮拧至全关状态。防止启动时功率过大，烧坏加热器。

### 2、实验方法

- (1)启动风机，用空气流量调节阀和废气循环阀将空气流量调至预定读数。
- (2)按下空气预热器的电源开关，并调节加热电压旋钮，使干燥器的干球温度达到指定值。
- (3)干燥器的空气流量和干球温度恒定5分钟后，开始实验。
- (4)将物料试样从水中取出，控出浮挂在表面上的水分后，将支架从干燥器内取出，套入试样内，并放回洞道。
- (5)用游离砝码和移动式砝码，尽快使天平处于平衡状态。然后将移动式砝码移至最近的某一刻度处，当试样的水分蒸发使天平达到平衡状态时，立即按下秒表开始计时，并记录全部砝码数。以后总重量每减少1克或0.5克记录数据一次（总重和时间）直至减少同样克数所用时间是恒速阶段时间的4倍时，即可结束实验。

注意：最后若发现时间已过去很长，而减少的重量还达不到所要求的克数，则可立即人为使天平处于平衡状态，并同时记录数据。

### 3、实验注意事项

- (1)实验过程中，始终都要使天平能够自由摆动，这是实验成功的关键。
- (2)为了设备的安全，开车时，一定要先开风机后开空气预热器。停车时则相反。



## 五、数据处理

- 1、计算出物料各时间的干基含水量  $X$ ，干燥速率  $U$ 。
- 2、在普通直角坐标纸上标绘出  $X-T$  干燥曲线，干燥速率  $U-X$  曲线。
- 3、计算恒速阶段的对流传热系数  $\alpha$ 。

4、计算试样放置处空气流速， $V_{\text{流}} = V_{20} \times \sqrt{\frac{273 + t_0}{273 + 20}} \times \frac{273 + t}{273 + t_0}$  由空气孔板流量计

的读数  $R$ ，查流量标定曲线（见实验室附图）的  $V_{20}$ ， $t_0$  为流量计处的空气温度

## 六、思考题

- 1、从恒速阶段到降速阶段的转变并非“突变”，对吗？为什么？
- 2、将实验测得的两条关系曲线与教材上的曲线相比较，分析实验误差。

### 洞道干燥实验数据表

装置编号:      干燥面积 $S =$ ( $\text{m}^2$ )      加热电压 $V$							
支架和托盘重 $G_0 =$ g      绝干物料重量 $G_c =$ g      物料支架托盘总重 $G_T =$ g							
空气流量计读数 $R =$ mmH <sub>2</sub> O =      Pa							
空气入口温度 $t_i =$ °C      湿球温度 $t_w =$ °C      流量计处的温度 $t_0 =$ °C							
由标定曲线查得的流量 $V_{20} =$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )							
干燥器内空气实际流量 $V_{\text{流}} =$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )							
序号	总重量 $G_T$ g	物料重 $G$ g	$\tau$ s	$\Delta \tau$ s	干基含水量 $X$ kg <sub>水</sub> /kg <sub>干料</sub>	平均含水量 $X_{\text{av}}$ kg <sub>水</sub> /kg <sub>干料</sub>	$U$ kg <sub>水</sub> /m <sup>2</sup> ·s
1							
2							$U_0 =$ kg/m <sup>2</sup> ·s
3							
4							$\alpha =$ w/m <sup>2</sup> ·°C
5							
6							$V =$ m <sup>3</sup> /h
7							
8							$X_0 =$ kg <sub>水</sub> /kg <sub>干料</sub>
9							
10							$X^* =$ kg <sub>水</sub> /kg <sub>干料</sub>
11							
12							
13							
14							