

化工原理实验

指导书

重庆科技学院化学化工学院

二〇一五年十月

实验一 流体流动阻力的测定

一、实验目的

- 1.学习直管摩擦阻力 ΔP_f 、直管摩擦系数 λ 的测定方法。
- 2.掌握直管摩擦系数 λ 与雷诺数 Re 的关系及其变化规律。
- 3.掌握局部阻力和阻力系数的测量方法。

- 4.学习压强差的几种测量方法和技巧。
- 5.掌握坐标系的选用方法和对数坐标系的使用方法。

二、实验内容

- 1.测定实验管路内流体流动的阻力和直管摩擦系数 λ 。
- 2.测定实验管路内流体流动的直管摩擦系数 λ 与雷诺数 Re 和相对粗糙度之间的关系曲线。
- 3.在本实验压差测量范围内，测量阀门的局部阻力系数。

三、实验原理

1.直管摩擦系数 λ 与雷诺数 Re 的测定

流体在管道内流动时，由于流体的粘性作用和涡流的影响会产生阻力。流体在直管内流动阻力的大小与管长、管径、流体流速和管道摩擦系数有关，它们之间存在如下关系：

$$h_f = \frac{\Delta P_f}{\rho} = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} \quad (1-1) \quad \lambda = \frac{2d}{\rho \cdot l} \cdot \frac{\Delta P_f}{u^2} \quad (1-2) \quad Re = \frac{d \cdot u \cdot \rho}{\mu} \quad (1-3)$$

式中： d —管径，m； ΔP_f —直管阻力引起的压强降，Pa；

l —管长，m； u —流速，m/s； ρ —流体的密度，kg/m³； μ —流体的粘度，N·s/m²。

直管摩擦系数 λ 与雷诺数 Re 之间有一定的关系，这个关系一般用曲线来表示。在实验装置中，直管段管长 l 和管径 d 都已固定。若水温一定，则水的密度 ρ 和粘度 μ 也是定值。所以本实验实质上是测定直管段流体阻力引起的压强降 ΔP_f 与流速 u （流量 V ）之间的关系。

根据实验数据和式（1-2）可计算出不同流速下的直管摩擦系数 λ ，用式（1-3）计算对应的 Re ，从而整理出直管摩擦系数和雷诺数的关系，绘出 λ 与 Re 的关系曲线。

2.局部阻力系数 ζ 的测定

$$h'_f = \frac{\Delta P'_f}{\rho} = \zeta \frac{u^2}{2} \quad (1-4)$$

$$\zeta = \left(\frac{2}{\rho} \right) \cdot \frac{\Delta P'_f}{u^2} \quad (1-5)$$

式中： ζ —局部阻力系数，无因次；

$\Delta P'_f$ —局部阻力引起的压强降，Pa；

h'_f —局部阻力引起的能量损失，J/kg。

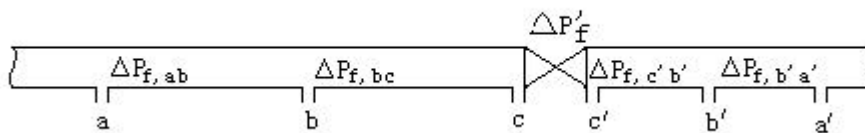


图 1-1 局部阻力测量取压口布置图

局部阻力引起的压强降 $\Delta P'_f$ 可用下面的方法测量：在一条各处直径相等的直管段上，安装待测局部阻力的阀门，在其上、下游开两对测压口 **a-a'**和 **b-b'**，见图 1-1，使

$$ab=bc ; \quad a' b' =b' c'$$

则 $\Delta P_{f, ab} = \Delta P_{f, bc} ; \quad \Delta P_{f, a' b'} = \Delta P_{f, b' c'}$

$$\text{在 } a \sim a' \text{ 之间列柏努利方程式： } P_a - P_{a'} = 2\Delta P_{f, ab} + 2\Delta P_{f, a' b'} + \Delta P'_f \quad (1-6)$$

$$\begin{aligned} \text{在 } b \sim b' \text{ 之间列柏努利方程式： } P_b - P_{b'} &= \Delta P_{f, bc} + \Delta P_{f, b' c'} + \Delta P'_f \\ &= \Delta P_{f, ab} + \Delta P_{f, a' b'} + \Delta P'_f \end{aligned} \quad (1-7)$$

联立式(1-6)和(1-7)，则：

$$\Delta P'_f = 2(P_b - P_{b'}) - (P_a - P_{a'})$$

为了实验方便，称 $(P_b - P_{b'})$ 为近点压差，称 $(P_a - P_{a'})$ 为远点压差。用差压传感器来测量。

四、实验方法

1. 按下电源的绿色按钮，通电预热数字显示仪表，关闭所有流量调节阀和回流阀，按一下离心泵上的绿色按钮，启动离心泵。

2. 光滑管阻力测定：

(1) 旋开光滑管阀，打开阀门 3、4。

(2) 在流量为零条件下，旋开倒置 U 形管左右旋钮 5、6，检查导压管内是否有气泡存在。若倒置 U 形管内液柱高度差不为零，则表明导压管内存在气泡，需要进行赶气泡操作。操作方法如下：

打开大流量调节阀，使倒置 U 形管内液体充分流动，以赶出管路内的气泡；若认为气泡已赶净，将流量阀关闭；慢慢旋开倒置 U 形管上部的放空阀，使液柱降至零点上下时马上关闭，管内形成气—水柱；此时管内液柱高度差应为零。

(3) 通过阀调节流量。流量小于 100L/h 时，选择小量程的转子流量计测量，并用倒置 U 形管测压差；流量大于 100L/h 时，选择大量程的转子流量计测量，用数字表测压差。从小流量到最大流量，一般测取 10~15 组数据。建议流量读数在 40L/h 之内，不少于 8 个点。以便得到滞流状态下的 $\lambda - Re$ 关系。

3. 粗糙管阻力测定：

(1) 关闭流量调节阀，并关闭光滑管的阀；并旋开粗糙管阀，再打开大流量调节阀，逐渐调大流量调节阀，赶出导压管内气泡。

(2) 通过流量调节阀调节流量。流量小于 100L/h 时，选择小量程的转子流量计测量，并用倒置 U 形管测压差；流量大于 100L/h 时，选择大量程的转子流量计测量，用数字表测

压差。从小流量到最大流量，一般测取 10~15 组数据。

4. 局部阻力测定：

关闭光滑管和粗糙管的阀门，打开截止阀。通过流量调节阀调节流量，先测量近端的阻力损失时，打开阀门 7、8，稳定后读取数字表上的数据；然后关闭阀门 7、8，打开阀门 9、10，读取数字表上的数据；然后用流量调节阀改变流量（600~900L/h），再测定下一组数据，一般测量 3 组数据。

5. 待数据测量完毕，关闭流量调节阀，核实差压数字表初始值，继续其它实验或切断电源。

注：新设备：光滑直管内径 7.8mm、管长 1.60 米；粗糙直管内径 10.0mm、管长 1.600 米；
旧设备：光滑直管内径 8.0mm、管长 1.85 米；粗糙直管内径 10.0mm、管长 1.70 米；
局部阻力测定管径 15mm， $t=15^{\circ}\text{C}$ 、 $\mu=1.15\times 10^{-3}(\text{pa}\cdot\text{s})$ 、 $\rho=999.0(\text{Kg}/\text{m}^3)$

五、注意事项

1. 启动离心泵之前，以及从光滑管阻力测量过渡到其它测量之前，都必须检查所有流量调节阀是否关闭。
2. 用差压数字表测量时，必须关闭通倒置 U 形管的阀门，防止形成并联管路。
3. 打开流量调节阀时，切忌一下将流量调到最大，应使流量缓慢上升，以免转子将玻璃管碰坏。另外最好在流量计上读数稳定后，再读取压差计或数字表上的数据。

六、报告内容

1. 将实验数据和数据整理结果列在如下表格中，并以其中一组数据为例写出计算过程。

序号	Q (l/h)	R		ΔP (KPa)	u (m/s)	Re	λ
		(KPa)	(mmH ₂ O)				
1							
2							

2. 在合适的坐标系上标绘光滑直管和粗糙直管 $\lambda - \text{Re}$ 关系曲线。
3. 根据所标绘的 $\lambda - \text{Re}$ 曲线，求本实验条件下滞流区的 $\lambda - \text{Re}$ 关系式，并与理论公式比较。

实验二 离心泵特性曲线测定

一、实验目的

1. 熟悉离心泵的操作方法。
2. 掌握离心泵特性曲线的测定方法、表示方法，加深对离心泵性能的了解。

二、实验内容

1. 练习离心泵的操作。
2. 测定某型号离心泵在一定转速下, H (扬程)、 N (轴功率)、 η (效率) 与 Q (流量) 之间的特性曲线。

三、实验原理

(一) 离心泵特性曲线

离心泵是最常见的液体输送设备。在一定型号和转速下, 离心泵的扬程 H 、轴功率及效率 η 均随流量 Q 而改变。通常通过实验测出 $H-Q$ 、 $N-Q$ 及 $\eta-Q$ 关系, 并用曲线表示之, 称为特性曲线。特性曲线是确定泵的适宜操作条件和选用泵的重要依据。泵特性曲线的具体测定方法如下:

1. H 的测定

在泵的吸入口和压出口之间列柏努利方程

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

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

上式中 $H_{f\lambda-\text{出}}$ 是泵的吸入口和压出口之间管路内的流体流动阻力(不包括泵体内部的流动阻力所引起的压头损失), 当所选的两截面很接近泵体时, 与柏努利方程中其它项比较, $H_{f\lambda-\text{出}}$ 值很小, 故可忽略。于是上式变为:

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

将测得的 $(Z_{\text{出}} - Z_{\lambda})$ 和 $P_{\text{出}} - P_{\lambda}$ 的值以及计算所得的 u_{λ} 、 $u_{\text{出}}$ 代入上式即可求得 H 的值。

2. N 的测定:

功率表测得的功率为电动机的输入功率。由于泵由电动机直接带动, 传动效率可视为 1.0, 所以电动机的输出功率等于泵的轴功率。即:

泵的轴功率 N = 电动机的输出功率, kW

电动机的输出功率 = 电动机的输入功率 $\times$ 电动机的效率。

泵的轴功率 = 功率表的读数 $\times$ 电动机效率, kW。

3. η 的测定

$$\eta = \frac{Ne}{N} \quad \text{其中} \quad Ne = \frac{HQ\rho g}{1000} = \frac{HQ\rho}{102} \quad \text{kW}$$

式中: η — 泵的效率; N — 泵的轴功率, kW Ne — 泵的有效功率, kW

H — 泵的压头, m Q — 泵的流量, m³/s ρ — 水的密度, kg/m³

注：真空表与压强表测压口之间的垂直距离 $h_0=0.18\text{m}$ ，真空泵吸入管与排出管的管径均为 0.025m ，电动机的效率为 60%

四、实验方法及步骤

1. 向储水槽 10 内注入蒸馏水。
2. 检查流量调节阀，压力表及真空表的开关是否关闭(应关闭)。
1. 启动实验装置总电源，用变频调速器上 $\square$ 、 $\square$ 及 $\square$ 键设定频率后（即设定离心泵转速），按 run 键启动离心泵，缓慢打开调节阀 6 至全开。待系统内流体稳定，打开压力表和真空表的开关，方可测取数据。
- 4.测取数据的顺序可从最大流量至 0，或反之。一般测 10~15 组数据。（注意 0 流量时也需要读取相关数据）
- 5.每次在稳定的条件下同时记录：流量、压力表、真空表、功率表的读数及流体温度。
- 6.实验结束，关闭流量调节阀，停泵，切断电源。

五、使用实验设备注意事项

1. 该装置电路采用五线三相制配电，实验设备应良好地接地。
2. 使用变频调速器时一定要注意 FWD 指示灯亮，切忌按 $\square$ 键 REV 指示灯亮，电机反转。
3. 启动离心泵前，关闭压力表和真空表的开关 以免损坏压强表。

六、报告内容

1. 将实验数据和数据整理结果列在如下表格中，并以其中一组数据为例写出计算过程。

序号	入口压力 P1	出口压力 P2	电机功率	流量 Q	压头 h	泵轴功率 N	η
	(MPa)	(MPa)	(kw)	(m^3/h)	(m)	(w)	(%)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							

2. 在合适的坐标系上标绘离心泵特性曲线。

实验三 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.学习干湿球温度湿度计的使用方法。

3.通过实物了解干燥操作中废气循环的流程和概念。

二、实验内容

测定干燥曲线和干燥速率曲线。

三、实验原理

在风洞干燥过程中，热空气将热量传给湿物料，物料表面即汽化，并通过表面外的气膜向气相主流扩散。与此同时，由于物料表面的水分的气化，物料内部与表面间存在水分浓度的差别，内部水分向表面扩散，汽化的水汽由空气带走，所以干燥介质既是载热体也是载湿体，它将热量传给物料的同时把由物料中汽化出来的水分带走。因此干燥是传热和传质相结合的操作，干燥速率由传热速率和传质速率共同控制。

干燥操作的必要条件是物料表面的水汽压强必须大于干燥介质中水汽的分压，两者差别越大，干燥进行得越快，所以干燥介质应及时将汽化的水汽带走，以维持一定的扩散推动力。若干燥介质为水汽所饱和，则推动力为零，这时干燥操作即停止进行。

被干燥物料的重量 G :

$$G_i = G_{T, i} - G_D, [g] \quad (1)$$

$$G_{i+1} = G_{T, i+1} - G_D, [g] \quad (2)$$

被干燥物料的干基含水量 X :

$$X_i = \frac{G_i - G_c}{G_c}, [kg \text{ 水} / kg \text{ 绝干物料}] \quad (3)$$

$$X_{i+1} = \frac{G_{i+1} - G_c}{G_c}, [kg \text{ 水} / kg \text{ 绝干物料}] \quad (4)$$

两次记录之间的平均含水量 X_{AV}

$$X_{AV} = \frac{X_i + X_{i+1}}{2}, [kg \text{ 水} / kg \text{ 绝干物料}] \quad (5)$$

两次记录之间的平均干燥速率

$$U = -\frac{G_c \times 10^{-3}}{S} \times \frac{dX}{dT} = -\frac{G_c \times 10^{-3}}{S} \times \frac{X_{i+1} - X_i}{T_{i+1} - T_i}, [kg \text{ 水} / (s \cdot m^2)] \quad (6)$$

干燥曲线 $X-T$ 曲线，用 X 、 T 数据进行标绘。

干燥速率曲线 $U-X$ 曲线，用 U 、 X_{AV} 数据进行标绘。

注：旧设备： $S=0.024992 \text{ m}^2$ $G_D=81g$ $G_c=20.5g$

新设备： $S=0.0247 \text{ m}^2$ $G_D=93.3g$ $G_c=23.5g$

S —干燥面积， $[m^2]$ G_c —绝干物料量， $[g]$ R —空气流量计的读数， $[kPa]$

T_o —干燥器进口空气温度， $[^\circ C]$ t —试样放置处的干球温度， $[^\circ C]$

tw —试样放置处的湿球温度， $[^\circ C]$ G_D —试样支撑架的重量， $[g]$

G_T —被干燥物料和支撑架的"总重量", [g] G —被干燥物料的重量, [g]
 T —累计的干燥时间, [S] X —物料的干基含水量, [kg 水 / kg 绝干物料]
 X_{AV} —两次记录之间的被干燥物料的平均含水量, [kg 水 / kg 绝干物料]
 U —干燥速率, [kg 水 / (s · m²)]

四、 装置的使用方法

(一) 实验前的准备工作

1. 将被干燥物料试样进行充分的浸泡。
2. 向湿球温度湿度计的附加蓄水池内, 补充适量的水, 使池内水面上升至适当位置。
3. 将被干燥物料的空支架安装在洞道内。
4. 调节新空气入口阀到全开的位置。

(二) 装置的实验操作方法

1. 按下电源开关的绿色按键, 在按风机开关按钮, 开动风机。
2. 调节三个蝶阀到适当的位置, 将空气流量调至指定读数。
3. 在温度显示控制仪表上, 按住[set]键 2、3 秒钟, 直至 sv 窗口显示[SU], 此时 pv 窗口所显示的即为干燥器的干球温度所要达到的指定值, 可通过仪表上的上移、左移键改变指定值, 指定值设定好后按一下[set]键, 改变到下一参数的设定 (此后的参数不需改变), 然后按一下[A/M]键回到仪表控制状态。按下加热开关, 让电热器通电。
4. 干燥器的流量和干球温度恒定达 5 分钟之后并且数字显示仪显示的数字不再增长 (60 摄氏度左右), 即可开始实验。此时, 读取数字显示仪的读数作为试样支撑架的重量(G_D)。
5. 将被干燥物料试样从水盆内取出, 控去浮挂在其表面上的水份(使用呢子物料时, 最好用力挤去所含的水分, 以免干燥时间过长。(新设备达到 140 克左右, 旧设备达 130 克左右))。将支架插入试样内直至尽头。
6. 将支架连同试样放入洞道内, 并安插在其支撑杆上。注意:不能用力过大, 使传感器受损。
7. 立即按下秒表开始计时, 并记录显示仪表的显示值 (每 3 分钟读数一次)。然后每隔一段时间记录数据一次(记录总重量和时间), 直至同样时间内重量的减少是 0.1g 时, 即可结束实验。

五、 装置使用的注意事项

1. 在安装试样时, 一定要小心保护传感器, 以免用力过大使传感器造成机械性损伤。
2. 在设定温度给定值时, 不要改动其它仪表参数, 以免影响控温效果。
3. 为了设备的安全, 开车时, 一定要先开风机后开空气预热器的电热器。停车时则反之。
4. 突然断电后, 在次开启实验时, 检查风机开关、加热器开关是否已被按下, 如果被按下, 请再按一下使其弹起, 不再处于导通状态。

六、 报告内容

1. 将实验数据和数据整理结果列在表格中，并以其中一组数据为例写出计算过程。

	T (s)	G(g)	X(kg/kg)	X _{AV} (kg/kg)	U(kg/s·m ²)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					

2. 绘制出相应的干燥曲线和干燥速率曲线。

实验四 吸收实验

一、实验目的

1、了解填料塔的结构；

- 2、熟悉填料吸收的工艺流程；
- 3、观察填料空隙中汽、液接触状况；

二、实验内容

- 1、测定填料塔的干填料层 $(\Delta P/Z) - u$ 关系曲线；
- 2、测定填料塔的湿填料层 $(\Delta P/Z) - u$ 关系曲线；

三、实验原理

在逆流操作的填料塔内，液体从塔顶喷淋下来，依靠重力在填料表面作膜状流动，液膜与填料表面的摩擦及液膜与上升气体的摩擦构成了液膜流动的阻力，引起填料层的压强降。

压强降是塔设计中的重要参数，气体通过填料层压强降的大小决定了塔的动力消耗。由于压强降与气液流量有关，将不同喷淋量下的单位高度填料层的压强降 $(\Delta P/Z)$ 与空塔气速的实测数据标绘在多数坐标纸上，可得 $(\Delta P/Z) - u$ 关系曲线。

当无液体即喷淋量 $L_0=0$ 时，干填料的 $(\Delta P/Z) - u$ 关系是直线；当有一定喷淋量时， $(\Delta P/Z) - u$ 关系变成折线，并存在两个转折点，下转折点称为载点，上转折点称为泛点。这两个转折点将 $(\Delta P/Z) - u$ 关系分为三个区段，即恒持液量区、载液区与液泛区。

当气速较低时，液体在填料层内向下流动几乎与气速无关。在恒定的喷淋量下，填料表面上覆盖的液体膜层厚度不变，因而填料层的持液量不变，故为恒持液量区。在同一空塔气速之下，由于湿填料层所持液体占据一定空间，故气体的真实速度较通过干填料层时的真实速度高，因而压强降也较大。此区域的 $(\Delta P/Z) - u$ 线在干填料线的左侧，且二线相互平行。

随气速的增大，上升气流与下降液体间的摩擦力开始阻碍液体下流，使填料层的持液量随气速的增加而增加，此种现象称为拦液现象，开始发生拦液现象时的空塔气速称为载点气速。超过载点气速后， $(\Delta P/Z) - u$ 关系曲线的斜率增大。

如果气速继续增大，由于液体不能顺利下流，而使填料层内持液量不断增多，以致几乎充满了填料层中的空隙，此时压强降急剧升高， $(\Delta P/Z) - u$ 关系曲线的斜率急剧升高，压强将曲线近于垂直上升的转折点称为泛点，达到泛点时的空塔气速称为液泛气速或泛点气速。

不同填料、不同喷淋量下的 $(\Delta P/Z) - u$ 关系曲线的基本形状相近。

四、实验方法与步骤

实验流程示意图见图一，空气由鼓风机送入空气转子流量计计量，空气通过流量计处的温度由温度计测量，空气流量由放空阀调节。水由自来水管经水转子流量计，水的流量由流量计阀门调节，然后进入塔顶。

1. 测量干填料层 $(\Delta P/Z) - u$ 关系曲线：

先全开空气放空阀，后启动鼓风机，用放空阀调节进塔的空气流量，按空气流量从小到大的顺序读取填料层压降 ΔP ，转子流量计读数和流量计处空气温度，然后在对数坐标纸上以空塔气速 u 为横坐标，以单位高度的压降 $\Delta P/Z$ 为纵坐标，标绘干填料层 $(\Delta P/Z) - u$ 关系曲线。

2. 测量某喷淋量下填料层($\Delta P / Z$)— u 关系曲线:

用水喷淋量为 $40\text{L} / \text{h}$ 时, 用上面相同方法读取填料层压降 ΔP , 转子流量计读数和流量计处空气温度并注意观察塔内的操作现象, 一旦看到液泛现象时记下对应的空气转子流量计读数。在对数坐标纸上标出液体喷淋量为 $40\text{L} / \text{h}$ 下($\Delta P / z$)— u 关系曲线, 确定液泛气速并与观察的液泛气速相比较。

五、报告内容

1. 将实验数据和数据整理结果列在如下表格中, 并以其中一组数据为例写出计算过程

干填料时 $\Delta P/z \sim u$ 关系测定

L=0		填料层高度 Z=0.4m		塔径 D=0.075m	
序号	填 料 层 压 强 降 mmH ₂ O	单位高度填 料层压强降 mmH ₂ O/m	空气转子流 量 计 读 数 m ³ /h	空气流量计处空 气温度℃	空塔气速m/s
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

湿填料时 $\Delta P/z \sim u$ 关系测定

L=40L/h		填料层高度 Z=0.4m		塔径 D=0.075m		
序 号	填 料 层 压 强 降 mmH ₂ O	单位高度填 料层压强降 mmH ₂ O/m	空气转子流 量 计 读 数 m ³ /h	空气流量计 处空气温度 ℃	空塔气速 m/s	塔 内 操 作 现 象
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						

- 2、在图纸上以 u 为横标, $\Delta P / Z$ 为纵标作图, 标绘 $\Delta P / Z \sim u$ 关系曲线

六、 使用实验设备应注意的事项:

1. 启动鼓风机前, 务必先全开空气放空阀。
2. 打开流量调节阀时, 切忌一下将流量调到最大, 应使流量缓慢上升, 以免转子将玻璃管碰坏。

实验五 传热综合实验

一、实验目的与内容

- 1、了解间壁式换热器的结构
- 2、理解间壁式换热器的工作流程与原理
- 3、掌握管程流体对流传热系数的测定方法
- 4、比较普通换热器与强化换热器的对流传热系数。

二、实验原理

强化传热又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，更有效地利用能源和资金。强化传热的方法有多种，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。

螺旋线圈的结构图如图 1 所示，螺旋线圈由直径 3mm 以下的铜丝和钢丝按一定节距绕成。将金属螺旋线圈插入并固定在管内，即可构成一种强化传热管。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。

由于绕制线圈的金属丝直径很细，流体旋流强度也较弱，所以阻力较小，有利于节省能源。螺旋线圈是以线圈节距 H 与管内径 d 的比值技术参数，且长径比是影响传热效果和阻力系数的重要因素。

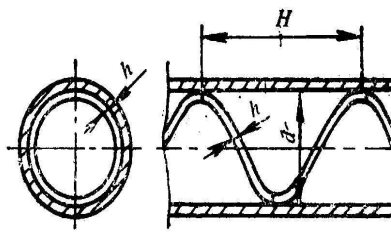


图 1 螺旋线圈内部结构

$$\alpha_i = Q / (\Delta t_m \times s_i)$$

$$\Delta t_m = T_w - \frac{(t_1) + (t_2)}{2} \quad (t_1, t_2 \text{ 分别是空气进出口的温度})$$

$$S_i = \pi L d_i$$

$$Q = \frac{(V \times \rho_i \times C p_i \times \Delta t)}{3600}$$

三、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, 应该全开。**
- (4) 检查蒸气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 (一般在 180V 左右), 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, 水蒸汽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, **分别取 1.0, 2.0, 和 3.0 三种流量** (当旁路阀全开时, 通过传热管的空气流量为所需的最小值, 全开时为最大值)。

(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 1 个数据点必须稳定足够的时间, 稳定时间是指在外管内充满饱和蒸汽, 并在不凝气排出口有适量的汽(气)排出, 空气流量调节好后, 过 15 分钟, 空气出口的温度 t_2 (°C) 可基本稳定。

)

(5) 整个实验过程中, 加热电压可以保持(调节)不变, 空气流量不变化。

3. 转换支路, 在同一加热电压下, 在同一空气流露下, 重复步骤 2 的内容, 进行强化套管换热器的实验。

4. 实验结束.

(1) 关闭加热器开关。

(2) 过 5 分钟后关闭鼓风机, 并将旁路阀全开。

(3) 切段总电源

四、 使用本实验设备应注意的事项

1. 由于采用热电偶测温, 所以实验前要检查冰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。

2. 检查蒸汽加热釜中的水位是否在正常范围内。特别是每个实验结束后, 进行下一实验之前, 如果发现水位过低, 应及时补给水量。

3. 必须保证蒸汽上升管线的畅通。即在给蒸汽加热釜电压之前, 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, 再关闭另一侧, 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。

4. 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。

5. 电源线的相线, 中线不能接错, 实验架一定要接地。

6. 数字电压表及温度、压差的数字显示仪表的信号输入端不能“开路”。

五、 实验数据与处理方法

(一) 实验参数与数据

1. 传热管参数: 表 1 实验装置结构参数

实验内管内径 d_i (mm)		20.00
实验内管外径 d_o (mm)		22.0
实验外管内径 D_i (mm)		50
实验外管外径 D_o (mm)		57.0
测量段 (紫铜内管) 长度 l (m)		1.00
强化内管内插物 (螺旋线圈) 尺寸	丝径 h (mm)	1
	节距 H (mm)	40
加热釜	操作电压	≤ 200 伏
	操作电流	≤ 10 安

2. 实验数据记录

粗糙管	空气入口温度 ($^{\circ}\text{C}$)	空气出口温度 ($^{\circ}\text{C}$)	空气流量 (kPa)	壁面平均温度 (mv)
光滑管				

2. 空气流量计

(1) 由孔板与压力传感器及数字显示仪表组成空气流量计。空气流量由公式[1]计算。

$$(\text{第1套}) V_{t_0} = 18.113 \times (\Delta P)^{0.6203} \dots\dots\dots [1]$$

$$(\text{第2套}) V_{t_0} = 18.113 \times (\Delta P)^{0.6203} \dots\dots\dots [1]$$

其中,

V_{t_0} —20℃ 下的体积流量, m^3/h ;

ΔP —孔板两端压差, Kpa

ρ_{t_1} —空气入口温度 (及流量计处温度) 下密度, kg/m^3 。

(m^3/h) 与压差之间的关系。

(2) 要想得到实验条件下的空气流量 V (m^3/h) 则需按下式计算:

$$V = V_{t_0} \times \frac{273 + \bar{t}}{273 + t_0} \dots\dots\dots [2]$$

其中, V —实验条件 (管内平均温度) 下的空气流量, m^3/h ;

$\bar{t}$ —换热器管内平均温度, $^{\circ}\text{C}$;

t_0 —传热内管空气进口 (即流量计处) 温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

3. 温度测量

管外壁面平均温度 t_w ($^{\circ}\text{C}$) 由数字式毫伏计测出与其对应的热电势 E (mv), 热电偶是由铜—康铜组成), 再由 E 根据公式: $t_w(^{\circ}\text{C}) = 1.2705 + 23.518 \times E$ (mv) 计算得到

(二) 实验数据的计算过程简介 (以普通管第一列数据为例)。

孔板流量计压差 $\Delta P = 0.59\text{Kpa}$ 、进口温度 $t_1 = 21.8^{\circ}\text{C}$ 、出口温度 $t_2 = 68.6^{\circ}\text{C}$ 壁面温度热电势 4.239mv 。

已知数据及有关常数:

(1) 传热管内径 d_i (mm) 及流通断面积 F (m^2)。

$$d_i = 20.0 (\text{mm}), = 0.0200 (\text{m});$$

$$F = \pi (d_i^2) / 4 = 3.142 \times (0.0200)^2 / 4 = 0.0003142 (\text{m}^2).$$

(2) 传热管有效长度 L (m) 及传热面积 s_i (m^2)。 $L = 1.00 (\text{m})$

$$s_i = \pi L d_i = 3.142 \times 1.00 \times 0.0200 = 0.06284 (\text{m}^2).$$

(3) t_i ($^{\circ}\text{C}$) 为孔板处空气的温度, 为由此值查得空气的平均密度 ρ_{t_1} , 例如:

$t_i = 29.8^{\circ}\text{C}$, 查得 $\rho_{t_1} = 1.19 \text{ Kg}/\text{m}^3$ 。

(4) 传热管测量段上空气平均物性常数的确定。

先算出测量段上空气的定性温度 $\bar{t}$ ($^{\circ}\text{C}$) 为简化计算, 取 t 值为空气进口温度 t_1 ($^{\circ}\text{C}$) 及出口温度 t_2 ($^{\circ}\text{C}$) 的平均值, 即 $\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{21.8 + 68.6}{2} = 45.2 (^{\circ}\text{C})$

此查得：测量段上空气的平均密度 $\rho = 1.11 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$ ；
 测量段上空气的平均比热 $C_p = 1005 \text{ (J / Kg} \cdot \text{K)}$ ；
 测量段上空气的平均导热系数 $\lambda = 0.0279 \text{ / m} \cdot \text{K}$ ；

(5) 空气流过测量段上平均体积 V (m^3/h) 的计算：

$$V_{t_0} = 18.113 \times (\Delta P)^{0.6203} = 18.113 \times (0.59)^{0.6203} = 13.06 (\text{m}^3 / \text{h})$$

$$V = V_{t_0} \times \frac{273 + \bar{t}}{273 + t_0} = 13.06 \times \frac{273 + 45.20}{273 + 20} = 14.18 \text{ (m}^3/\text{h)}$$

(6) 冷热流体间的平均温度差 Δt_m ($^{\circ}\text{C}$) 的计算：

$$T_w = 1.2705 + 23.518 \times 4.23 = 100.8 (^{\circ}\text{C})$$

$$\Delta t_m = T_w - \frac{(t_1) + (t_2)}{2} = 100.8 - 45.2 = 55.56 (^{\circ}\text{C})$$

(7) 其余计算：

传热速率 (W)

$$Q = \frac{(V \times \rho_i \times C_{p_i} \times \Delta t)}{3600} = \frac{14.18 \times 1.11 \times 1005 \times (68.6 - 21.8)}{3600} = 206 \text{ (W)}$$

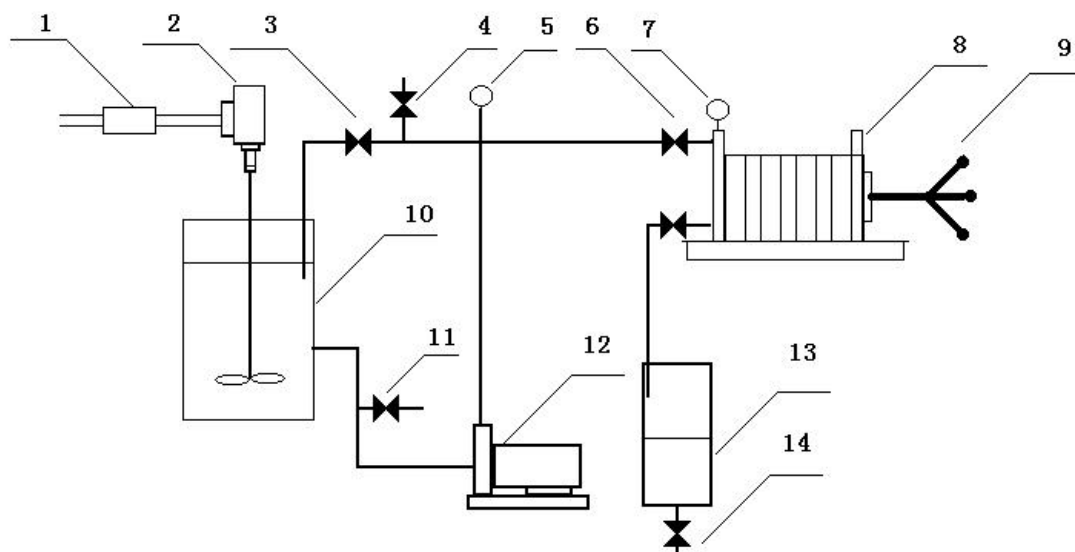
$$\alpha_i = Q / (\Delta t_m \times s_i) = 206 / (55.55 \times 0.06284) = 60 \text{ (W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)}$$

实验六 过滤综合实验

一、实验目的与内容

- 1、掌握板框过滤机工作原理；
- 2、熟悉板框过滤机结构及工作流程；。
- 3、掌握过滤常数：K， q_e ， θ_e 及 s，k 的测定方法。

二、设备的示意图

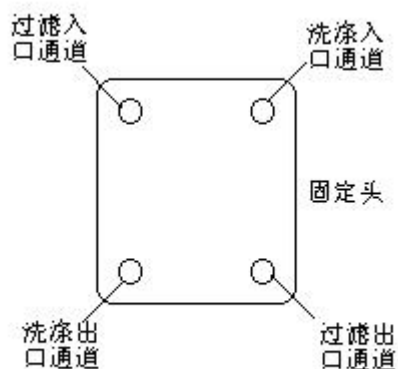


图一 恒压过滤实验流程示意图

1—调速器;2—电动搅拌器;3、4、6、11、14—阀门;
5、7—压力表 8—板框过滤机; 9—压紧装置;10—滤浆槽;
12—旋涡泵; 13—计量桶。

如图一所示，滤浆槽内配有一定浓度的轻质碳酸钙悬浮液（浓度在 2~4%左右），用电动搅拌器进行均匀搅拌（浆液不出现旋涡为好）。启动旋涡泵，调节阀门 3 使压力表 5 指示在规定值。滤液在计量桶内计量。

过滤、洗涤管路如图二示



图二 板框过滤机固定头管路分布图

三、实验原理

根据恒压过滤方程: $(q+q_e)^2 = K(\theta + \theta_e)$ (1)

式中: q —单位过滤面积获得的滤液体积 m^3/m^2 ;

q_e —单位过滤面积的虚拟滤液体积 m^3/m^2 ;

θ —实际过滤时间 S;

θ_e —虚拟过滤时间 S;

K —过滤常数 m^2/S 。

将(1)式微分得:

$$\frac{d\theta}{dq} = \frac{2}{k}q + \frac{2}{k}q_e \quad (2)$$

此为直线方程，于普通坐标系上标绘 $\frac{d\theta}{dq}$ 对 $\bar{q}$ 的关系，所得直线斜率为：

$$\frac{2}{k}, \text{ 截距为 } \frac{2}{k}q_e, \text{ 从而求出, } K, q_e$$

θ_e 由下式得：

$$q_e^2 = K \theta_e \quad (3)$$

当各数据点的时间间隔不大时， $\frac{d\theta}{dq}$ 可以用增量之比来代替即： $\frac{\Delta\theta}{\Delta q}$ 与 $\bar{q}$ 作图。

过滤常数的定义式：

$$K = 2k\Delta p^{1-s} \quad (5)$$

两边取对数：

$$\lg K = (1-s) \lg(\Delta p) + \lg(2k) \quad (6)$$

因 $s = \text{常数}$, $k = \frac{1}{\mu\nu} = \text{常数}$, 故 K 与 ΔP 的关系，在双对数坐标上标绘是一条直线。

直线的斜率 $1-s$ ，由此可计算出压缩性指数 s ，读取 $\Delta P-K$ 直线上任一点处的 K ， Δp 数据一起代入 (5) 式计算物料特性常数 k 。

四、实验方法及操作步骤

1. 系统接上电源，打开搅拌器电源开关，启动电动搅拌器 2. 将滤液槽 10 内浆液搅拌均匀。

2. 板框过滤机板、框排列顺序为：固定头-非洗涤板-框-洗涤板-框-非洗涤板-可动头。用压紧装置压紧后待用。

3. 使阀门 3 处于全开、阀 4、6、11 处于全关状态。启动旋涡泵 12，调节阀门 3 使压力表 5 达到规定值。（分别取 0.05MPa, 0.06 MPa, 0.07 MP 三个压力）

4. 待压力表 5 稳定后，打开过滤入口阀 6 过滤开始。当计量桶内见到第一滴液体时按表计时。旧设备记录滤液每增 500ml 时所用的时间，新设备记录每增加 0.5 厘米所用的时间，（每个压力记录 10 个以上数据）。当计量桶读数为 5000ml 时停止计时，并立即关闭入口阀 6。

5. 打开阀门 3 使压力表 5 指示值下降。开启压紧装置卸下过滤框内的滤饼并放回滤浆槽内，将滤布清洗干净。放出计量桶内的滤液并倒回槽内，以保证滤浆浓度恒定。

6. 改变压力，从 (2) 开始重复上述实验。

7. 实验结束时阀门 11 接上自来水、阀门 4 接通下水，关闭阀门 3 对泵及滤浆进出口管进行冲洗。

五、操作时应注意的事项

1) 过滤板与框之间的密封垫应注意放正，过滤板与框的滤液进出口对齐。用摇柄把过滤设备压紧，以免漏液。

2) 计量桶的流液管口应贴桶壁，否则液面波动影响读数。

3) 实验结束时关闭阀门 3。用阀门 11、4 接通自来水对泵及滤浆进出口管进行冲洗。切忌将自来水灌入储料槽中。

4) 电动搅拌器为无级调速。使用时首先接上系统电源，打开调速器开关，调速钮一定由小到大缓慢调节，切勿反方向调节或调节过快损坏电机。

5) 启动搅拌前，用手旋转一下搅拌轴以保证顺利启动搅拌器

六、实验数据记录与处理

实验序号	1	2	3
过滤压强差 Δp Mp			
单位面积滤液量 q m ³ /m ²	过滤时间 θ /s		

过滤面积： $A=0.0475\text{m}^2$

验数据的计算方法

过滤常数： K ， q_e ， θ_e 的计算举例（以 0.05Mpa 第一组为例）

$$\Delta V = S \times H = 0.274 \times 0.304 \times 0.01 = 8.32 \times 10^{-4} \text{ (m}^3\text{)}$$

$$\Delta q = \Delta V / A = 8.32 \times 10^{-4} / 0.0475 = 0.0175 \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)}$$

$$\Delta \theta = 41.36 - 0 \quad (\text{S})$$

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta q} = 41.36 / 0.0175 = 2.36 \times 10^3$$

$$\bar{q} = \frac{q_2 + q_1}{2} = \frac{0.0175 + 0}{2} = 0.00875 \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)}$$

从 $\frac{\Delta \theta}{\Delta q} \sim \bar{q}$ 关系图上直线得

$$\text{斜率: } \frac{2}{K} = 28128 \quad K = 7.11 \times 10^{-5} \text{ m}^3\text{/m}^2$$

$$\text{截距: } \frac{2}{K} q_e = 1836 \quad q_e = 0.0653 \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)}$$

$$\theta_e = \frac{q_e^2}{K} = \frac{0.0653^2}{7.11 \times 10^{-5}} = 59.9 \text{ (秒)}$$

按以上方法依次计算 $\frac{\Delta \theta}{\Delta q} \sim \bar{q}$ 关系图上直线的过滤常数

以 $\Delta P-K$ 的关系在双对数坐标纸上做图 压缩性指数 s 及物性常数 k 的计算。

从 $\Delta P-K$ 关系图上得 $1-s=0.86 \quad s=0.14$

$$2k=6.0 \times 10^{-9} \quad k=3.0 \times 10^{-9}$$

