

实验一 流体力学综合实验

流体力学综合实验台为多功能实验装置，其结构示意图如图 1 所示。

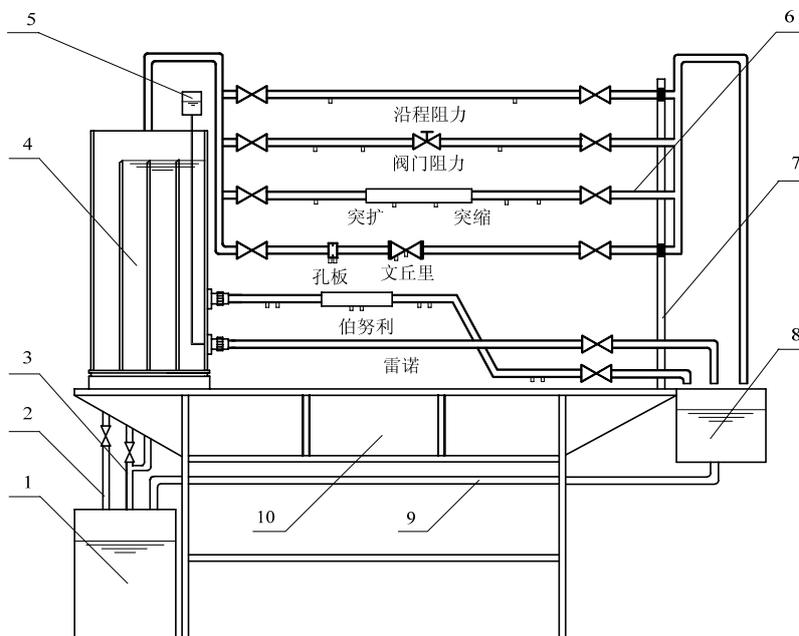


图1 流体力学综合实验台结构示意图

- 1.储水箱 2.恒压水箱溢流管 3.上水管 4.恒压水箱 5.墨盒
6.实验管段组 7.支架 8.计量水箱 9.回水管 10.实验桌

利用上述流体力学综合实验台可进行下列实验：

- I. 雷诺实验；
- II. 能量方程实验；
- III. 阻力损失实验：1. 沿程阻力 2. 局部阻力（含阀门、突扩和突缩）；
- IV. 孔板流量计流量系数和文丘里流量计流量系数的测定。

I 雷诺实验

实验目的

1. 观察流体在管道中的流动状态及层流状态下的速度分布。
2. 测定不同流态下的雷诺数，了解流态与雷诺数的关系。
3. 测定下临界雷诺数。

实验原理

众所周知，流体在管道中具有不同的流态。在图 2 所示的实验装置中，可以看到两种流态的征状。容器 A 内装有清水，水从管 G 送入容器，从侧壁上的玻璃管 B 及靠近容器顶部的溢流管 H 流出。送入的水量应使总有一部分水经过溢流管流出，这样可使容器的液面维持一定。玻璃管的排水量可用阀 C 调节。容器上方有小瓶 D，瓶内装入有色液体，有色液体可经过细管 E 注入玻璃管 B 内。

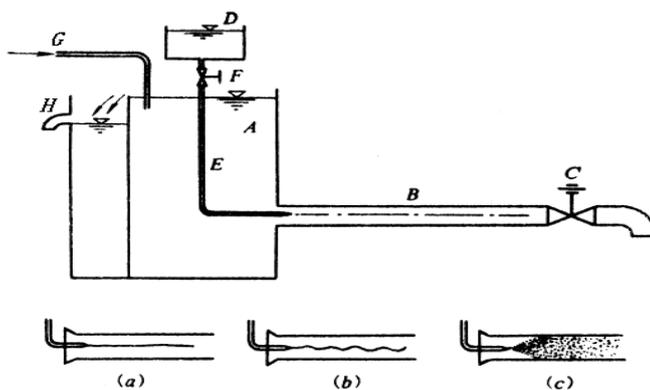


图 2 雷诺实验装置示意图

当玻璃管内的流速较低时，从细管注入的有色液体能成为单独的一股细流前进，同玻璃管内的水不相混杂（见图 1a）。当玻璃管内的流速较高时，从细管注入的那股有色的细流马上消失在水中，同水混杂起来（见图 1c）。前一种情况说明流体流动时，流体的质点成为互不干扰的细流前进，各股细流互相平行，层次分明，流体的这种状态叫层流，或叫滞流。后一种情况说明流体流动时，出现一种紊乱状态。流体各质点作不规则的运动，流体内各股细流互相更换位置，流体质点有轴向和横向运动，互相撞击，产生湍动和旋涡，这种流态叫湍流，或称紊流。这个实验称为雷诺实验。

实验证明，除了流速 u 对流态有影响外，管道直径 d 、流体密度 ρ 和粘度 μ 对流态也产生影响。若流体处于层流状态时， d 、 ρ 愈大， μ 愈小，流态就愈容易从层流转为紊流；相反， d 、 ρ 愈小， μ 愈大，流态就愈不易从层流转为紊流。总之，无因次数群 $du\rho/\mu$ 的数值大小决定着流体的流态，是判断流态的准数，叫雷诺准数，用符号 Re 表示，即 $Re=du\rho/\mu$ ，它表示惯性力与粘性摩擦力之比，说明粘性摩擦力对流动的影响。

流态转变时的雷诺准数称为临界雷诺数，由紊流转变为层流的临界雷诺数比由层流转变为紊流的临界雷诺数小，故前者称为下临界雷诺数，后者称为上临界雷诺数。

大量的实验测定表明：对于在平直的圆管中流动的流体，当 $Re \leq 2300$ 时，流态属层流。当 $Re \geq 4000$ 时，流态属紊流。而在 $2300 < Re < 4000$ 这一范围内，流态是不稳定的，可能是层流，也可能是紊流，而且极易从一种流态转变为另一种流态，属过渡流。

实验设备与仪器

1. 流体力学综合实验装置一套，如图 1 所示。本实验涉及的部分有储水箱 1、恒压水箱溢流管 2、上水管 3、恒压水箱 4、雷诺实验管及其阀门、计量水箱 8 及回水管 9。
2. 秒表一块。
3. 温度计一支。

实验步骤

1. 关闭所有管道的进水阀和出水阀，开启水泵电源和上水阀，给恒压水箱 4 中注满水（即恒压水箱中有水溢出），在墨盒 5 中注入红墨水。
2. 依次打开雷诺实验管的出水阀、进水阀及墨盒开关。调节进水阀的大小，观察雷诺实验管内颜料水的流动型态。
3. 调节雷诺实验管进水阀开度使雷诺实验管内的流体呈层流状态时，快速挤下几滴红墨水，观察管道内水流速度的分布情况。
4. 改变雷诺实验管进水阀开度，用计量水箱 8（或量杯）和秒表测量不同流态时水的流量。
5. 调节雷诺实验管进水阀，通过观察颜料水的流动情况，使流态从紊流转变为层流，测量此时下临界流动状态时的水流量。
6. 用温度计测量实验时水温。
7. 关闭水泵电源及实验用所有阀门，结束实验。

实验数据记录与处理

1. 实验数据记录与处理参考格式

雷诺管径 d		水温 t		实验日期		实验者	
mm		°C					
序号	总水量(L)	时间(s)	流量 Q (m^3/s)	平均流速 u (m/s)	Re	流态	备注
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							

2. 数据处理

- (1) 简述实验所观察的层流与紊流现象。
- (2) 查取实验水温下的 ρ 、 μ 值, 计算不同流量时雷诺实验管的平均流速 u 及雷诺数 Re , 并判断其流态。
- (3) 根据实验数据的计算结果, 绘制实验流体温度下的 $Re-u$ 曲线。
- (4) 计算实验条件下的下临界雷诺数。

实验注意事项

1. 开关阀门时要缓慢, 以免综合实验装置中测压管中的水因压差值过高而溢出。
2. 观察流态时, 可停止水泵上水, 以消除水泵上水的振动对流型观察的影响。
3. 开启雷诺实验管阀门的顺序只能先开出水后开进水, 关时则相反, 否则水将从测压管中溢出。

思考题

1. 判断所有流体在不同流动装置内流动状态是否为层流的依据为其雷诺数 $Re \leq 2300$, 对吗? 为什么?
2. 采用毕托管对准管道轴心所测的速度, 算出的雷诺数可否用于判断流态, 为什么?

II 能量方程实验

实验目的

了解流体流经能量方程实验管时的能量转化情况，并对实验中出现的现象进行分析，从而加深对能量方程的理解。

实验原理

根据运动微分方程和功能原理均可推导出理想流体微细流作恒定流动时的单位能量方程或伯努利方程式为：

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} \quad (1)$$

或

$$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{u^2}{2g} = \text{常数} \quad (2)$$

式中第一项 Z 是断面对于选定基准面的高度，表示单位重量流体的位置势能，简称位能，水力学中称位置水头；式中第二项 $\frac{P}{\gamma}$ 是断面压强作用使流体沿测压管所能上升的高度，表示压力做功所能提供给单位重量流体的能量，简称压能，水力学中称压强水头；式中第三项 $\frac{u^2}{2g}$ 是以断面流速 u 为初速的铅直上升射流所能达到的理论高度，表示单位重量流体的动能，简称动能，水力学中称流速水头。前两项之和 $Z + \frac{P}{\gamma}$ 表示单位重量流体具有的势能，水力学中称测压管水头。三项之和 $Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{u^2}{2g}$ 表示单位重量流体的总能量之和，水力学中称总水头。

实际上所遇到的流体都具有粘性，使流体流动时需消耗一部分机械能或压头，以克服由于粘性而产生的切向阻力。因此实际上不可压缩的粘性流体的微细流，作恒定流动时的伯努利方程式为：

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} + h_w \quad (3)$$

式(3)中的 h_w 是因克服截面 1-1 与 2-2 间的单位重量流体的阻力所消耗的能量（或压头），称为压头损失。这项损失的能量变为势能，部分为流体所吸收，提高流体的温度，部分则散失到周围的介质中。

使用毕托管测出实验管道各个断面的压强水头和速度水头，再测出各个相应断面的位置水头，即得到各断面的总水头，它们的连线即为总水头线，总水头线减去流速水头即得

到测压管水头线。本实验装置能量方程实验管的测点分布、总水头线及测压管水头线如图 3 所示。

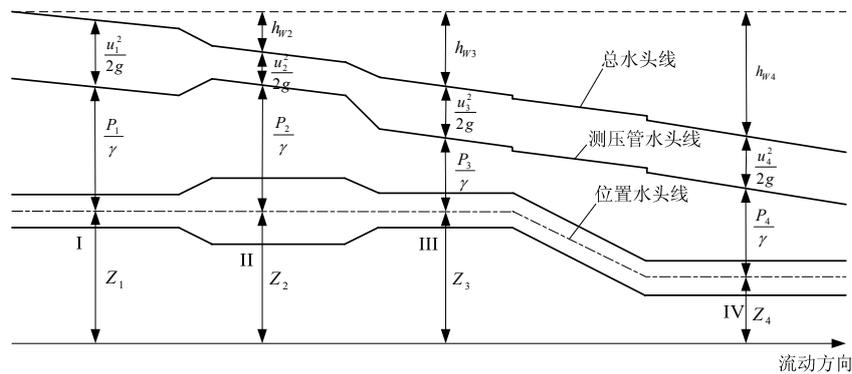


图 3 能量方程实验管的测点、总水头线及测压管水头线示意图

由图 3 可见各种能量之间的相互转换，例如：测点 I 到测点 II，管径变粗，速度减小，一部分流速水头转换为压强水头；测点 II 到测点 III，管径变细，速度增加，一部分压强水头转换为流速水头；测点 III 到测点 IV，位置降低，一部分位置水头转换为压强水头。

实验装置与仪器

1. 流体力学综合实验装置一套，如图 1 所示。本实验涉及的部分有储水箱 1、恒压水箱溢流管 2、上水管 3、恒压水箱 4、雷诺实验管及其阀门、计量水箱 8、回水管 9 及能量方程实验测压板（图中未画出）。

2. 秒表 一块。

实验步骤

1. 先测量能量方程实验管 4 个测点的位置压头，并记录各测点相应的管径。
2. 关闭所有管道的进水阀和出水阀，开启水泵和上水阀，给实验装置注入足够循环用的水。
3. 依序开启能量方程实验管出水阀和进水阀，调节进水阀至一定开度，记录能量方程实验测压板 8 个测压管的液柱高度，并利用计量水箱 8 和秒表测定流量。
4. 改变能量方程实验管进水阀的开度，再重复上述测量。
5. 关闭水泵及所有阀门，结束实验。

实验数据记录与处理

1. 实验数据记录与处理参考格式

序号	测点编号 液柱高(mm)	I	II	III	IV	流量(m ³ /s)
		1				
1	位置水头					
	位置水头+压强水头+流速水头					
	位置水头+压强水头					
	流速水头					
	压强水头					
	水头损失	/				
2						
2	位置水头					
	位置水头+压强水头+流速水头					
	位置水头+压强水头					
	流速水头					
	压强水头					
	水头损失	/				
能量方程实验管内径 mm						/

2. 数据处理

- (1) 计算各个测点的流速水头、与 I 点的水头损失及总水头，判断能量是否守恒。
- (2) 根据实验结果绘制各种水头线，了解各种能量的转换关系。

实验注意事项

1. 开关阀门时要缓慢，以免测压管中的水因压头过高而溢出。
2. 开启阀门的顺序只能先开出水后开进水，关时则相反，否则水将从测压管中流出。
3. 读取测压管的液柱读数时要等稳定后再读数，如果有波动时取其平均值。
4. 实验过程中，恒压水箱中要始终保持有水溢流，以保证总能量不变。

思考题

1. “毕托管垂直流体流动方向引出的测压管测的是压强水头，而迎向流体流动方向引出的测压管测的是总水头。”此说法是否正确，为什么？
2. 某学生做能量方程实验过程中发现：所有测压管中的液面连续下降。试帮助他解决这个问题。

III 管道阻力系数的测定

实验目的

1. 观察和测试流体稳定地在等直圆管中流动时, 其沿程、通过阀门及断面突扩、突缩的阻力损失情况。
2. 掌握管道沿程阻力系数和局部阻力系数的测定方法。
3. 了解沿程阻力系数在不同雷诺数下的变化情况。

实验原理

阻力损失一般有两种表示方法: 对于液体, 通常用单位重量的流体阻力损失(或称水头损失) h_i 来表示, 它是用液柱高度来量度的; 对于气体, 则常用单位体积的流体能量损失(或称压强损失) P_i 来表示, 它们之间的关系是:

$$P_i = \gamma h_i \quad (4)$$

根据流体运动的边壁是否沿程变化, 把阻力损失分为两类: 沿程阻力损失 h_f 和局部阻力损失 h_m 。

在边壁沿程不变的管段上, 流体的流速基本上是沿程不变的。流动阻力只有沿程不变的切应力, 称为沿程阻力。克服沿程阻力引起的能量损失, 称为沿程阻力损失。

在边壁急剧变化的区域(如: 突扩、突缩、弯头、三通、阀件、出入口等处), 由于出现了旋涡区和速度分布的改组, 流动阻力大大增加, 形成了比较集中的能量损失, 这种阻力称为局部阻力, 其相应的能量损失称为局部阻力损失。

整个管路的阻力损失等于各管段的沿程阻力损失和所有局部阻力损失的总和。即:

$$h_i = \sum h_f + \sum h_m \quad (5)$$

工程上常用的阻力损失的计算公式为:

沿程阻力损失

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2g} \quad (6)$$

局部阻力损失

$$h_m = \xi \frac{u^2}{2g} \quad (7)$$

式中: l —管长, m;

d —管径, m;

u —断面平均流速, m/s;

g —重力加速度, m/s²;

λ —沿程阻力系数;

ξ —局部阻力系数。

由于影响的因素复杂，目前还不能用纯理论的方法来解决阻力损失计算的全部问题。上述公式不是严格的理论公式，而是根据工程上长期实践的经验，把阻力损失的计算问题转化为求阻力系数的问题。对于公式中的两个无因次系数 λ 和 ξ ，必须借助于分析一些典型的实验成果，用经验的或半经验的方法求得。这样，公式中没有直接给出的其它影响阻力损失的因素，就可以包含在这两个阻力系数中，使计算结果和实际一致。

对于断面突然扩大所造成的阻力损失，通过在将扩未扩的 I-I 断面和扩大后流速分布与紊流脉动已接近均匀流正常状态的 II-II 断面（见图 4）上列能量方程和流体连续性方程，可得：

$$h_{mk} = \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right)^2 \frac{u_1^2}{2g} = \left(1 - \frac{F_2}{F_1}\right)^2 \frac{u_2^2}{2g} \quad (8)$$

其阻力系数为

$$\xi_{k1} = \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right)^2 \quad \text{或} \quad \xi_{k2} = \left(1 - \frac{F_2}{F_1}\right)^2 \quad (9)$$

式中： h_{mk} —突扩局部阻力损失,m；

F_1 —细管断面面积,m²；

F_2 —粗管断面面积,m²；

u_1 —细管断面平均流速,m/s；

u_2 —粗管断面平均流速,m/s；

g —重力加速度,m/s²；

ξ_{k1} 、 ξ_{k2} —与流速水头相对应的局部阻力

系数。

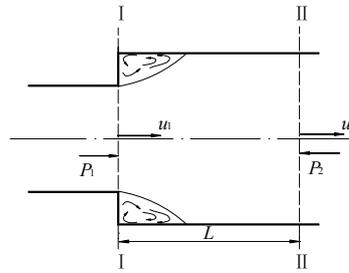


图 4 突扩图

因为突然扩大前后有两个不同的平均流速，因而有两个相应的阻力系数，计算时必须注意所选用的阻力系数与流速水头相适应。

对于断面突然缩小所造成的阻力损失，由下述经验公式计算

$$h_{ms} = 0.5 \left(1 - \frac{F_2}{F_1}\right) \frac{u_2^2}{2g} \quad (10)$$

其阻力系数为

$$\xi_s = 0.5 \left(1 - \frac{F_2}{F_1}\right) \quad (11)$$

式中： h_{ms} —突缩局部阻力损失，m；

F_1 —粗管断面面积,m²；

F_2 —细管断面面积,m²；

u_2 —细管断面平均流速,m/s；

g —重力加速度, m/s^2 ;

ξ_s —阻力系数。

本实验所涉及的实验管如图 5、图 6、图 7 所示,

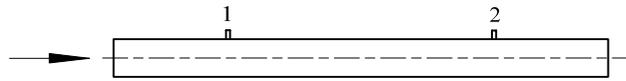


图5 沿程阻力损失实验管示意图

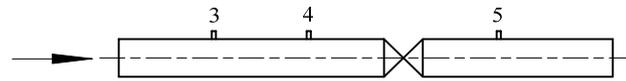


图6 阀门局部阻力损失实验管示意图

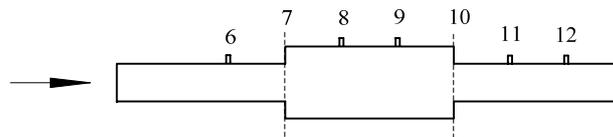


图7 突扩、突缩阻力损失实验管示意图

对于局部阻力损失实验管，采用三点测量法，其局部阻力损失用下式计算：

$$h_m = (h_4 - h_5) - h_{f4-5} \quad (12)$$

式中 h_{f4-5} 由 h_{f3-4} 按流长比计算。

对于突扩、突缩阻力损失实验管，采用四点测量法，其突扩、突缩局部阻力损失分别用下式计算：

$$h_{mk} = \frac{P_6}{\gamma} + \frac{u_6^2}{2g} - \frac{P_8}{\gamma} - \frac{u_8^2}{2g} - h_{f6-7} - h_{f7-8} \quad (13)$$

$$h_{ms} = \frac{P_9}{\gamma} + \frac{u_9^2}{2g} - \frac{P_{11}}{\gamma} - \frac{u_{11}^2}{2g} - h_{f9-10} - h_{f10-11} \quad (14)$$

(13)、(14)式中 h_{f6-7} 、 h_{f7-8} 、 h_{f9-10} 、 h_{f10-11} 分别由 h_{f11-12} 、 h_{f8-9} 、 h_{f8-9} 、 h_{f11-12} 按流长比计算。

实验设备与仪器

1. 流体力学综合实验装置一套，如图 1 所示。本实验涉及的部分有储水箱 1、上水管 3、沿程阻力损失实验管、突扩突缩阻力损失实验管、阀门阻力损失实验管、计量水箱 8 及测压板（图中未画出）等。

2. 秒表一块。

3. 温度计一支。

实验步骤

1. 关闭所有管道的进水阀和出水阀，开启水泵。
2. 等直径管道沿程阻力损失测定
 - (1) 开启沿程阻力损失实验管道的出水阀和进水阀。
 - (2) 待测压板读数稳定后，读取测压管的数据，并利用计量水箱 8 和秒表测量水的流量。
 - (3) 用进水阀门调节不同的流量，重复测 8~10 次。
 - (4) 关闭沿程阻力损失实验管道的进水阀和出水阀。
3. 阀门阻力损失测定
 - (1) 开启阀门阻力损失实验管道的出水阀和进水阀。
 - (2) 待测压板读数稳定后，读取测压管的数据，并利用计量水箱 8 和秒表测量水的流量。
 - (3) 用进水阀门调节不同的流量，重复测 8~10 次。
 - (4) 关闭阀门阻力损失实验管道的进水阀和出水阀。
4. 突扩突缩阻力损失测定
 - (1) 开启突扩突缩阻力损失实验管的出水阀和进水阀。
 - (2) 待测压板读数稳定后，读取测压管的数据，并利用计量水箱 8 和秒表测量水的流量。
 - (3) 用进水阀门调节不同的流量，重复测 8~10 次。
 - (4) 关闭突扩突缩阻力损失实验管道的进水阀和出水阀。
5. 测量实验水温，关闭水泵，结束实验。

实验数据记录与处理

1. 实验数据记录与处理的参考格式

(1) 沿程阻力损失实验数据记录与处理参考格式

实验者	实验日期			水温 t		流体动力粘性系数 μ				流体密度 ρ	
				°C		Pa·s				kg/m ³	
序号	时间 (s)	总水量 (L)	流 量 (m ³ /s)	管道直径 (m)	平均流速 (m / s)	管段长度 $l_{1,2}$ (m)	h_1 (m)	h_2 (m)	h_f (m)	阻力系数 λ	Re
1											
2											
3											
4											
⋮											

(2) 阀门阻力损失实验数据记录与处理参考格式

实验者		实验日期		水温 t		流体动力粘性系数 μ			流体密度 ρ			
				°C		Pa·s			kg/m ³			
序号	总水量 (L)	时间 (s)	体积流量 (m ³ /s)	管道直径 (m)	平均流速 (m/s)	管段长度 (m)		测压管读数 (m)			局部阻力损失 h_m (m)	局部阻力系数 ξ
						l_{3-4}	l_{4-5}	h_3	h_4	h_5		
1												
2												
3												
4												
⋮												

(3) 突扩、突缩阻力损失实验数据记录与处理参考格式

实验者		实验日期			水温 t		流体动力粘性系数 μ					流体密度 ρ								
					°C		Pa·s					kg/m ³								
序号	总水量 (L)	时间 (s)	体积流量 Q (m ³ /s)	管道直径 d/D (m)	平均流速 u (m/s)	管段长度 (m)						测压管读数 (m)					阻力损失(m)		阻力系数 ξ	
						l_{6-7}	l_{7-8}	l_{8-9}	l_{9-10}	l_{10-11}	l_{11-12}	h_6	h_8	h_9	h_{11}	h_{12}	h_{mk}	h_{ms}	ξ_k	ξ_s
1																				
2																				
3																				
4																				
⋮																				

2. 数据处理

(1) 根据实验数据，计算不同流量下的体积流量、平均流速、沿程阻力损失或局部阻力损失，及雷诺数。

(2) 根据公式(6)或(7)计算所测实验管道的沿程阻力系数 λ 或局部阻力系数 ξ 、 ξ_k 及 ξ_s ，并将实验测量结果 ξ_k 、 ξ_s 与相应计算值比较。

(3) 绘制沿程阻力系数 λ 随 Re 变化的关系曲线（双对数坐标），并结合 Re 值的大小进行讨论。

实验注意事项

1. 开关阀门时要缓慢，以免测压管中的水因压头值过高而溢出。

2. 开启实验管阀门顺序均只能先开出水阀门后开进水阀门，关闭时则刚好相反，否则水将从测压管中溢出。

思考题

1. 利用伯努利方程推导沿程阻力损失实验管两测点间阻力损失的计算公式。

2. 利用伯努利方程推导阀门局部阻力损失实验管阀门局部阻力损失的计算公式。

IV 流量计流量系数的测定

实验目的

1. 了解孔板流量计和文丘里流量计的测量原理及流量系数的测定方法。
2. 测定流量计的流量系数与雷诺数的关系,绘制流量计的流量系数随雷诺数变化的关系曲线。

实验原理

流量计是测量流体流量的仪器,常用的流量计有孔板流量计、喷嘴流量计、文丘里流量计、靶式流量计和转子流量计等。本实验仅介绍孔板流量计和文氏流量计。

1. 孔板流量计

在管道里插入一片带有圆孔的薄板(孔板),用法兰固定于管道上,使圆孔位于管道的中心线上,如图 8 所示,这样构成的装置,称为孔板流量计。在孔板前后的测压孔接上 U 管压强计,由压强计所显示的读数,可算出管内流体的流速和流量。

利用伯努利方程和连续性方程可导出:

$$u_0 = C_0 \sqrt{2g\Delta h} \quad (15)$$

$$\text{则} \quad Q_0 = u_0 F_0 = C_0 F_0 \sqrt{2g\Delta h} \quad (16)$$

其中, u_0 —流体通过孔口时的流速, m/s

F_0 —孔口面积, m^2

Δh —孔板前后流体的压强水头差,

C_0 —校正系数,称为孔板流量系数,

其值由实验测定。

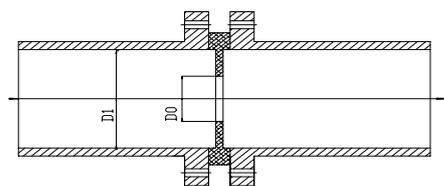


图 8 孔板流量计示意图

流量系数 C_0 与 $\text{Re}=D_1 u \rho / \mu$ (D_1 为管道直径)、 $m=F_0/F_1$ 的大小有关,根据标准孔板流量系数与 Re 、 m 的关系曲线知道:对于每一个 m 值,当 Re 超过极限允许值时, C_0 即为一常数。故选用孔板流量计时,最好使 C_0 落在定值的区域里,只有这时流速 u_0 与压强差的平方根成正比,便于测量。同时,希望 C_0 值处于 0.6~0.7 之间,这样,既便于取得较准确的读数,又不致使压头损失(永久压强降)过大。

2. 文丘里流量计

图 9 为文丘里流量计,是由两节精工制造的管段所组成,中间截面的最小处称为喉管。流体通过文丘里管时,流速慢慢地增大,在喉

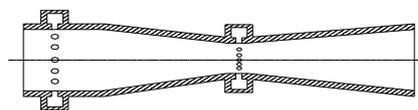


图 9 文丘里流量计示意图

管处流速最大，压强最低，然后流速慢慢地减小，压强逐渐恢复。由于流速的逐渐变化，使流体的压头损失大为下降，通常约为测得压头差 Δh 的10%以内。文丘里流量计的流量计算公式为：

$$Q_v = C_v F_v \sqrt{2g\Delta h} \quad (17)$$

式中， C_v —文丘里流量计的流量系数，可由标准文丘里流量计的流量系数曲线查得，也可由实验测定

F_v —喉管的面积， m^2

实验设备与仪器

1. 流体力学综合实验装置一套，如图1所示。本实验涉及的部分有储水箱1、上水管3、流量计系数测定实验管及其阀门、计量水箱8、回水管9及测压板（图中未画出）等。
2. 秒表一块。
3. 温度计一支。

实验步骤

1. 关闭所有管道的进水阀和出水阀，开启水泵。
2. 依次开启流量计系数测定实验管的出水阀和进水阀，调节进水阀门的大小，待水流稳定后，记录流量计相应测压管的压强读数，并用计量水箱8和秒表测量流量。
3. 调节进水阀门的开度，改变流量大小，同样的方法测6~10组数据。
4. 测量水温，记录文丘里流量计和孔板流量计的有关数据。
5. 关闭水泵及实验管的进、出水阀门，结束实验。

实验数据记录与处理

1. 实验数据记录与处理的参考格式（见下页）
2. 数据处理
 - (1) 根据实验数据，计算不同流量下的体积流量、平均流速及雷诺数。
 - (2) 根据公式(16)或(17)计算孔板流量计或文丘里流量计的流量计系数 C_0 或 C_v 。
 - (3) 绘制流量计系数 C_0 或 C_v 随 Re 变化的关系曲线（双对数坐标），并结合 Re 值的大小进行讨论。

思考题

1. 比较孔板流量计和文丘里流量计的优缺点。
2. 根据流量系数与雷诺数关系曲线分析，为何流量系数测定时流量要足够大。

实验数据记录与处理参考格式

实验者		实验日期	水温	流体密度	动力粘性系数 μ	孔板流量计参数			文丘里流量计参数		
序号	总水量 (L)	时间 (min)	平均流量 (m ³ /s)	平均流速 (m/s)	雷诺数 Re	孔板流量计			文丘里流量计		
						压差 (mm)	计算流量 (m ³ /s)	C_0	压差 (mm)	计算流量 (m ³ /s)	C_v
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
平均											

实验二 材料表面法向热辐射率测定

实验目的

1. 掌握比较法测定材料表面法向热辐射率的实验方法。
2. 通过实验加深对辐射换热基本理论的理解。

实验原理

任何物体的辐射能量和同一温度下绝对黑体辐射能量的比值称为该物体的辐射率(或发射率)。因此,黑体的辐射率为 1。利用在相同实验条件下测定待测材料表面和人工黑体表面对一个热辐射探测器吸热面的辐射热能值并加以比较,从而求得待测材料表面的热辐射率值,此实验方法称之为法向热辐射率比较法。

在如图 1 所示的物理模型中,我们可以认为:

1. 热源 1、传导圆筒 2 为黑体。
2. 热源 1、传导圆筒 2、待测物质(受体)
- 3, 它们表面上温度均匀。

因此,在此辐射换热系统中,被测物体(受体) 3 的净辐射换热热量可表示为

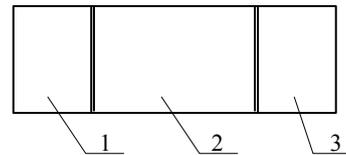


图 1 辐射换热物理模型
1.热源 2.传导圆筒 3.特测物体(受体)

$$Q_{net,3} = \alpha_3 (E_{b1} F_1 \varphi_{13} + E_{b2} F_2 \varphi_{23}) - \varepsilon_3 E_{b3} F_3 \quad (3)$$

式中 E_{b1} 、 E_{b2} 、 E_{b3} 分别为热源 1、传导圆筒 2、受体 3 的辐射力; F_1 、 F_2 、 F_3 分别为其辐射换热面积; α_3 、 ε_3 分别为受体的吸收率和辐射率(黑度); φ_{13} 、 φ_{23} 分别为热源 1、传导圆筒 2 的辐射面对受体 3 的辐射面的辐射角系数(角系数)。

因为, $F_1 = F_3$, $\alpha_3 = \varepsilon_3$, $\varphi_{32} = \varphi_{12}$, 又根据角系数的互换性有 $F_2 \varphi_{23} = F_3 \varphi_{32}$, 则

$$Q_3 = \frac{Q_{net,3}}{F_3} = \varepsilon_3 (E_{b1} \varphi_{13} + E_{b2} \varphi_{12}) - \varepsilon_3 E_{b3}$$

$$Q_3 = \varepsilon_3 (E_{b1} \varphi_{13} + E_{b2} \varphi_{12} - E_{b3}) \quad (2)$$

由于受体 3 与环境主要是以自然对流方式换热, 因此

$$Q_3 = a(T_3 - T_f) \quad (3)$$

式中 a — 对流换热系数;

T_3 — 待测物质(受体)的温度;

T_f — 环境温度。

由(2)、(3)两式可得

$$\varepsilon_3 = \frac{a(T_3 - T_f)}{E_{b1} \varphi_{13} + E_{b2} \varphi_{12} - E_{b3}} \quad (4)$$

当热源 1 和传导圆筒 2 的表面温度一致时， $E_{b1}=E_{b2}$ ，考虑到体系 1、2、3 为封闭系统，则

$\varphi_{13} + \varphi_{12} = 1$ ，故 (4) 式可写为

$$\varepsilon_3 = \frac{a(T_3 - T_f)}{E_{b1} - E_{b3}} = \frac{a(T_3 - T_f)}{\sigma_b(T_1^4 - T_3^4)} \quad (5)$$

式中 σ_b 为斯蒂芬—玻尔兹曼常数，其值为 $5.67 \times 10^8 \text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。

对于不同待测物体（受体）A、B，其辐射率 ε 为

$$\varepsilon_A = \frac{a_A(T_{3A} - T_f)}{\sigma_b(T_{1A}^4 - T_{3A}^4)}$$

$$\varepsilon_B = \frac{a_B(T_{3B} - T_f)}{\sigma_b(T_{1B}^4 - T_{3B}^4)}$$

$$\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_B} = \frac{T_{3A} - T_f}{T_{3B} - T_f} \cdot \frac{T_{1B}^4 - T_{3B}^4}{T_{1A}^4 - T_{3A}^4} \quad (6)$$

当 B 为黑体时， $\varepsilon_B=1$ ，则被测物体（受体）的辐射率（黑度） $\varepsilon_{\text{受}}$ 可表示为

$$\varepsilon_{\text{受}} = \frac{\Delta T_{\text{受}}}{\Delta T_{\text{黑}}} \cdot \frac{T_{\text{源}}'^4 - T_{\text{黑}}^4}{T_{\text{源}}^4 - T_{\text{受}}^4} \quad (7)$$

- 式中 $\Delta T_{\text{受}}$ — 受体与环境的温差；
 $\Delta T_{\text{黑}}$ — 黑体与环境的温差；
 $T_{\text{源}}$ — 受体为被测物体时热源的绝对温度；
 $T_{\text{源}}'$ — 受体为黑体时热源的绝对温度；
 $T_{\text{黑}}$ — 黑体的绝对温度；
 $T_{\text{受}}$ — 受体的绝对温度。

实验设备与仪器

如图 2 为中温法向辐射率测定示意图

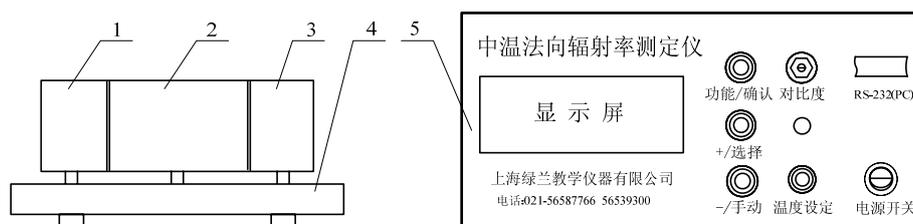


图 2 中温法向辐射率测定仪示意图

1. 热源体 2. 传导圆筒 3. 受体 4. 支座 5. 温度测控单元

实验步骤

1. 将热源 1 和受体 3 与传导圆筒 2 对正靠紧；
2. 打开温度测控单元 5 的电源开关，拉出“温度设定”按钮，约 5 秒后屏幕显示“修改设定温度”，此时旋转“温度设定”按钮设定实验温度，设定后推进“温度设定”旋钮，完成实验温度设定。
3. 通过“功能/确认”、“+/选择”、“-/手动”键确定自动换屏显示（包括换屏时间）或手动屏幕显示。
4. 当热源、传导 1、传导 2 的温度达到设定实验温度后，观察受体温度的变化，当受体温度在 3 分钟内变化不超过 1℃时，分别记录各温度值 3 次。
5. 在继续加热的情况下，将受体退出，用点燃的蜡烛将受体面熏黑，重复上述实验。
6. 测量结束后，关闭温度测控单元的电源开关，整理仪器，结束实验。

实验数据记录与处理

1. 实验数据记录与处理参考格式

序号	热源温度 (°C/K)	传导圆筒温度(°C)		受体(紫铜)温度 (°C/K)	环境温度 (°C/K)
		传导 1	传导 2		
1					
2					
3					
平均值					

序号	热源温度 (°C/K)	传导圆筒温度(°C)		受体(紫铜)温度 (°C/K)	环境温度 (°C/K)
		传导 1	传导 2		
1					
2					
3					
平均值					

2. 数据处理

- (1) 分别计算两次实验的热源、受体的温度平均值。
- (2) 将紫铜熏黑时，可认为其 $\varepsilon=1$ ，利用公式 (7) 计算紫铜在实验温度下的辐射率。

实验注意事项

1. 整个实验过程中，热源体和受体必须紧靠传导圆筒。
2. 只要温度测控单元的电源打开，热源体和传导圆筒便按原有的设定温度加热，因此，温度测控单元的电源打开后，须立即进行实验温度的设定，否则有可能使热源体和传导圆筒的温度高于实验设定温度。
3. 熏黑受体时，不得漏熏。

思考题

什么条件下物体表面的辐射率等于它的吸收率？

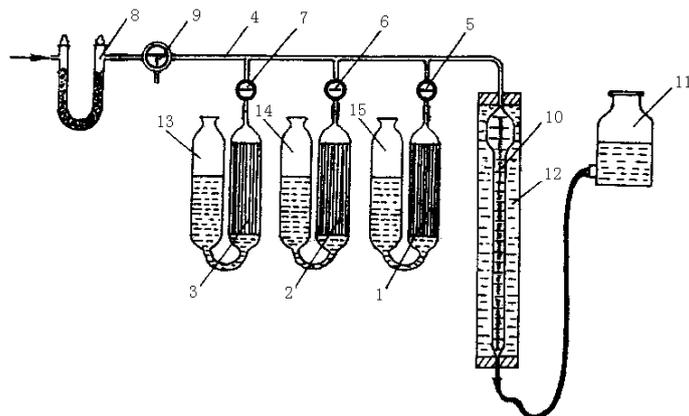


图 1 奥氏气体分析器装置示意图

1、2、3.吸收瓶 4.梳形管 5、6、7.二通活塞 8.过滤干燥器
9.三通活塞 10.量气管 11.平衡瓶 12.水套管 13、14、15.缓冲瓶

第一个吸收瓶内装氢氧化钾水溶液；第二个吸收瓶内装焦性没食子酸的碱溶液；第三个吸收瓶内装氯化亚铜的氨溶液。各吸收瓶内吸收剂的装入量为其总容量的 60%，过多或过少均会影响测量过程的正常操作。

为防止各吸收剂（尤其是焦性没食子酸的碱溶液）与空气接触，在缓冲瓶中注入少量液体石蜡。

2. CO₂、O₂、CO 吸收剂及封闭液

各吸收剂及封闭液的配制方法如下：

(1) CO₂ 吸收剂—KOH 水溶液

取 90 克 KOH 溶于 180ml 的蒸馏水中，因溶解时会产生大量热量，故需不断搅拌。冷后取上层澄清液使用。该溶液 1ml 可吸收 40ml CO₂。

(2) O₂ 吸收剂—焦性没食子酸的碱溶液

O₂ 吸收剂由 A 液和 B 液混合而成。

A 液：取 30 克焦性没食子酸溶于 80ml 蒸馏水中，加热使其溶解。

B 液：取 48 克 KOH 溶于 100ml 蒸馏水中。

这两种溶液单独存放时不吸收氧气，使用前再将两液倒入吸收瓶中，上下移动平衡瓶使其混合均匀，1ml 混合液可吸收 10ml 氧气。吸收能力与温度有关，25℃ 以上吸收速度较快，在 7℃ 以下则无吸收能力。

(3) CO 吸收剂—氯化亚铜的氨溶液

取 42 克 NH₄Cl 溶于 125ml 蒸馏水中，再加入 33.4 克 Cu₂Cl₂。使用时，使之与比重为 0.9 的 NH₃·H₂O 以 3:1 的体积混合即可。为避免氯化亚铜被空气氧化，在吸收瓶中需加入一束铜丝，每 1ml 吸收剂可吸收 10~16ml CO。

(4) 封闭液的配制

为使封闭液和烟气样接触时不吸收 CO₂，应使其呈酸性。常用的封闭液配制方法如下：

a. 将 150 克食盐溶于 0.5 升蒸馏水中，经一昼夜静置后，滤去沉淀物。向该溶液中加入浓硫酸酸化，每升加 10 毫升浓硫酸，再滴入甲基红使其成为红色，用烟气饱和后即可使用。

b. 将 80 克固体硫酸钠溶于 200 毫升蒸馏水中，滤去杂质，再加入 3~4 滴甲基橙指示剂，再加稀硫酸至溶液变成红色，用烟气饱和后即可使用。

实验步骤

1. 检查漏气

将三通活塞 5、6、7 关闭，将三通活塞 9 旋至三通，提高平衡瓶 11，使量气管 10 内液面上升到最上端刻度附近，然后关闭三通活塞 9，再放下平衡瓶，此时量气管内液面如微微下落后保持不变，表明仪器不漏气，否则应仔细检查所有活塞及接头，直到仪器不漏气为止。

2. 取气

(1) 提高平衡瓶 11 并结合三通活塞 9 的开、关使量气管内液面上升至顶端刻线附近。

(2) 打开三通活塞 5 并缓慢下移平衡瓶使吸收管 1 内的吸收剂液面升至顶端标线后关闭三通活塞 5。按同样方法使吸收瓶 2、3 内的液面上升至顶端标线。

(3) 将贮气球橡皮管接到过滤器 8 上，打开三通活塞 9 使分析器与贮气球相通而与大气隔绝，下移平衡瓶使烟气样自动充入量气管中约 50ml，随即旋转三通活塞 9，使其将分析器与大气相通而与贮气球隔绝，同时提高平衡瓶将气排入大气中。如此重复取气、排气 2~3 次，以烟气样洗涤梳形管并使封闭液为气样所饱和。

(4) 降低平衡瓶 11 并通过三通活塞 9 再次取气进入量气管使量气管内液面降至略低所要量取气样体积 V 的刻线时，使三通活塞 9 为三不通，提高平衡瓶使其液面对准取气体积为 V 时量气管所对应的刻度线，再缓慢打开三通活塞 9 使分析器与大气相通，将多余气样排于大气中，直至量管内液面和平衡瓶的液面一样高，再将三通活塞 9 关闭为三不通。此时量管内所取气样体积正好为 V （为了方便计算和减少分析误差， V 一般取 100 毫升即 $V=100\text{ml}$ ）。

3. 分析

(1) 提高平衡瓶并打开活塞 5 将气样压入吸收瓶 1 中，直至量气管内液面升到上端标线，然后再降低平衡瓶，气体又被吸回到量气管内。如此反复 3~4 次后，再通过活塞 5 使吸收液的液面回到吸收瓶上部标线处，提高平衡瓶使其液面与量气管中的液面在同一水平，记下量气管内液面的读数。再打开活塞 5，重复上述操作，直至量气管中液面读数不变，说明气体中的 CO_2 已被吸收瓶中的 KOH 溶液完全吸收，此时的读数记作 V_1 。

(2) 同上操作，将吸收了 CO_2 的气体通过活塞 6 压入吸收瓶 2 中以吸收 O_2 ，直至量气管中液面读数不变为止，此时量管内的液面读数记作 V_2 ，最后，将气样通过活塞 7 压入吸收瓶 3 中以吸收气样中的 CO ，最后读数记作 V_3 。

(3) 最后将吸收了 CO_2 、 O_2 、 CO 的气样通过三通活塞 9 排入大气中并使量气管内的液面上升到上端刻度处。

4. 整理仪器，结束实验。

实验数据记录与处理

1. 实验数据记录与处理参考格式

烟气名称	取样时间	取样地点	分析取气量	分析时间
			$V=$ ml	
组 分	CO_2	O_2	CO	N_2
吸收后气样体积(ml)	$V_1=$	$V_2=$	$V_3=$	
被吸收组分体积(ml)				
体积含量(%)				
过剩空气系数 α				

2. 数据处理

(1) 若取分析烟气样的体积为 V ，通过 KOH 溶液、焦性没食子酸的碱溶液、氯化亚铜的氨溶液吸收后的气样体积分别为 V_1 、 V_2 、 V_3 ，则 CO_2 、 O_2 、 CO 、 N_2 各组分的体积百分含量分别为：

$$\text{CO}_2 = \frac{V - V_1}{V} \times 100$$

$$\text{O}_2 = \frac{V_1 - V_2}{V} \times 100$$

$$\text{CO} = \frac{V_2 - V_3}{V} \times 100$$

$$\text{N}_2 = 100 - (\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{CO})$$

(2) 过剩空气系数的计算

烟气的过剩空气系数可按下式计算

$$\alpha = \frac{\text{N}_2}{\text{N}_2 - (\text{O}_2 - 0.5\text{CO}) \frac{79}{21}}$$

实验注意事项

1. 奥氏气体分析器上的所有活塞不得互换使用。
2. 整个实验过程中，封闭液和吸收剂不得进入梳形管。
3. 在吸收过程中，应缓慢提高和降低平衡瓶，以防被测烟气和空气在吸收瓶与缓冲瓶的连接管处相互交换。
4. 每一吸收过程必须充分完全，否则影响测量结果。

思考题

1. 为什么封闭液要呈酸性？
2. 烟气中各组分的测定顺序能否颠倒？为什么？
3. 在进行测定 CO 的操作时，量气管中被测气体有时不但不减少，反而增加，为什么？

实验四 燃料热值的测定

实验目的

1. 掌握固体燃料燃烧热值的测定原理和方法。
2. 了解氧弹热量计的构造和使用方法。

实验原理

燃料的热值是指单位质量燃料完全燃烧所放出的热量，它是评价燃料质量优劣的重要标准之一。所谓完全燃烧是指燃料中的 C 转变为 $\text{CO}_2(\text{g})$ ，H 转变为 $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ ，S 转变为 $\text{SO}_2(\text{g})$ ，其它元素转变为游离状态或氧化物。

燃料热值一般使用氧弹热量计（图 1）来测定。为了使被测燃料能够迅速而完全的燃烧，就需要有强有力的氧化剂。在实验测定中，氧弹放置在装有一定量水的铜水桶中，水桶外是空气隔热层，再外面是温度恒定的水夹层。被测燃料在体积固定的氧弹（图 2）中以压力为 2.5~3MPa 的氧气作氧化剂而燃烧所放出的热、点火丝燃烧放出的热和由氧气中的微量氮气氧化成硝酸的生成热，大部分被水桶中的水吸收；另一部分则被氧弹、水桶、搅拌器及温度计等所吸收在热量计与环境没有热交换的情况下，可写出如下的热量平衡式

$$Q \cdot a + q \cdot b + 59.8C \cdot V = W \cdot h \cdot \Delta T + C_{\text{总}} \cdot \Delta T$$

(1)

式中 Q ——被测燃料的热值，J/g 或 kJ/kg；

a ——被测燃料的质量，g；

q ——点火丝的热值，J/g；

b ——燃掉了的点火丝质量，g；

59.8——硝酸生成热为 59831J/mol，当用 C mol/L 的 NaOH 滴定生成的硝酸时，每毫升碱相当于 59.8J；

V ——滴定生成的硝酸时耗用 C mol/L NaOH 的毫升数；

W ——水桶中水的质量，g；

h ——水的比热容，J/(g·°C)；

$C_{\text{总}}$ ——氧弹、水桶、温度计等的总热容，J/°C；

ΔT ——与环境无热交换时的真实温差。

如果实验测定时保持水桶中水量一定，则 (1) 式右端常数合并得到下式

$$Q \cdot a + q \cdot b + 59.8C \cdot V = K\Delta T$$

(2)

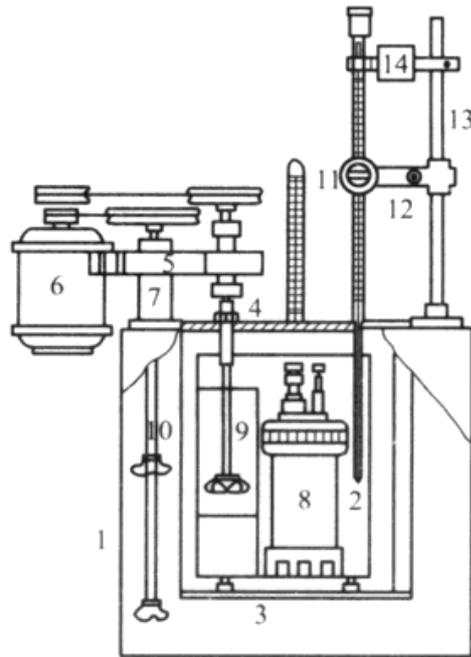


图 1 氧弹热量计示意图

- 1.外套 2.量热桶 3.底座 4.盖子 5.搅拌器横梁
- 6.电动机 7.搅拌器支座 8.氧弹 9.搅拌器
- 10.贝氏温度计 11.测温放大镜 12.放大镜架
- 13.支杆 14.振动器

式中 K 称为热量计常数或热量计水当量，数值上等于量热体系温度升高一度所需要的热量。

事实上，氧弹式热量计并不是严格的绝热系统，加之由于传热速度的限制，燃烧后量热体系的温度升高需要一定的时间，在这段时间里体系与环境难免发生热交换，因而从温度计上读得的温差就不是真实的温差 ΔT 。为此，必须对读得的温差进行校正，一般采用下述两种方法对温差进行校正。

1. 图解校正法

按实验测定要求将燃料燃烧前后历次观察记录的水温对时间作图，得 $abcd$ 线（图 3），图中 b 点相当于开始燃烧之点， c 点为观测得的最高温度读数点，因此可将测定过程分为初期、主期、末期三个阶段。初期是指燃料试样燃烧以前的阶段（ ab 段），主期是指燃料试样从点火并燃烧开始到观察到温度最高点之后的第一个读数（ c' 点）之间的阶段（ bc' 段），以后的阶段则为末期（ $c'd$ 段）。由于量热体系与环境的热量交换，初期和末期的温度—时间线经常发生倾斜。取 b

点所对应的温度 T_1 ， c 点对应的温度 T_2 ，其平均值 $(T_1+T_2)/2=T$ ，经过 T 点作横坐标的平行线 TO 为主期温度—时间曲线相交于 O 点，然后过 O 点作垂直线 AB ，此线与 ab 线和 dc 线的延长线交于 E 、 F 两点，则 E 点和 F 点所表示的温度差即为欲求的量热体系的真实温度升高值 ΔT 。如图 3 所示， EE' 表示环境辐射进的热量而造成量热体系温度的升高，这部分是必须扣除的，而 FF' 表示量热体系向环境辐射出去的热量而造成量热体系温度的降低，因此这部分是必须加入的。经过这样校正后的温度差表示了由于燃料试样燃烧使量热体系温度升高的数值 ΔT 。

有时量热体系的绝热情况良好，热量散失少，而搅拌器的功率又比较大，这样往往不断引进少量热量，使得燃料试样燃烧后的温度最高点不明显出现，这种情况下 ΔT 仍然可以按照同法进行校正（图 4）。

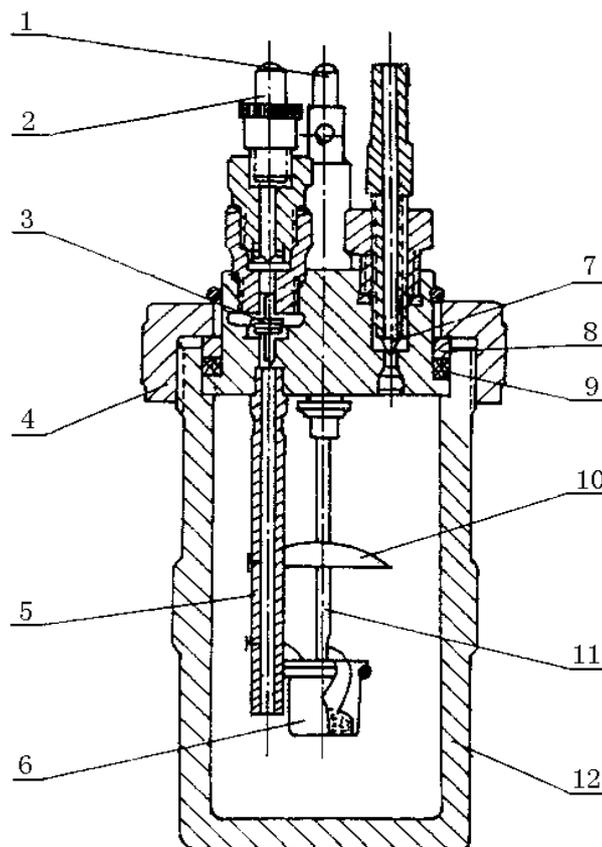


图 2 氧弹结构示意图

- 1. 电极 2. 充气口盖（电极） 3. 充气阀 4. 弹头
- 5. 充气管 6. 燃烧器 7. 放气阀 8. 金属垫圈
- 9. 橡胶垫圈 10. 燃烧挡板 11. 燃烧器架 12. 弹体

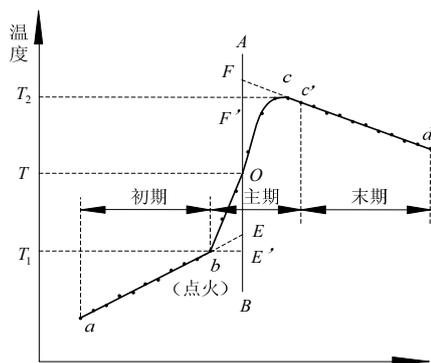


图3 绝热较差时的温度校正图

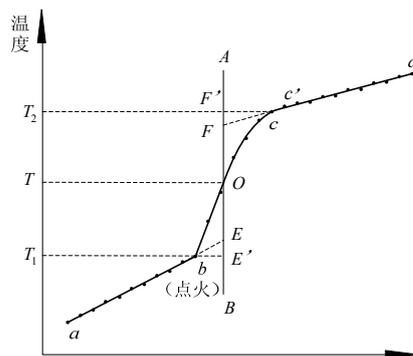


图4 绝热良好时的温度校正图

必须说明：应用这种作图法进行 ΔT 校正时，量热体系的温度和环境温度不宜相差太大（最好不超过 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ ），否则会引进误差。

2. 经验公式校正法

热量计量热体系的真实温度变化的校正值也可用下列经验公式进行计算：

$$\Delta T_{\text{校正}} = \frac{V + V_1}{2} \times m + V_1 \times r \quad (3)$$

式中 V ——点火前即初期，每半分钟量热体系的平均温度变化；

V_1 ——燃料试样燃烧后使量热体系温度达最高而开始下降以后即末期，每半分钟量热体系的平均温度变化*；

m ——主期温度上升很快（每半分钟温度升高大于 0.3°C ）的半分钟间隔数，第一个间隔不管温度升高多少都计入 m 中；

r ——主期温度上升较慢（每半分钟温度升高小于 0.3°C ）的半分钟间隔数。

(3) 式的意义，可由图 3 的温度—时间曲线来说明。曲线的 ab 段代表初期量热体系温度随时间变化的规律， bc' 段代表量热体系温度随时间变化上升很快的主期， $c'd$ 段代表末期量热体系温度随时间变化的规律，而在主期阶段共经历 $m+r$ 次读数间隔的时间里，量热体系与环境热交换所引起的温度变化可作如下估计：量热体系每半分钟内温度升高小于 0.3°C 的后半段，其温度已接近最高温度，所以量热体系与环境热交换所引起的温度变化规律应与末期基本相同，从而可以认为主期后半段温度校正值为 $V_1 \times r$ 。而主期量热体系每半分钟温度变化规律应取前期和末期温度变化的平均值来估计，从而主期前半段的温度校正值为 $\frac{V + V_1}{2} \times m$ 。因此，总的温度校正值如 (3) 式所示。

在考虑了温差校正后，量热体系的真实温度变化 ΔT 应为

$$\Delta T = T_{\text{高}} - T_{\text{低}} + \Delta T_{\text{校正}} \quad (4)$$

式中 $T_{\text{低}}$ ——主期的最初温度；

$T_{\text{高}}$ ——主期的最终温度。

从 (2) 式可知，要测得燃料试样的热值 Q ，必须知道热量计常数 K 。测定的方法是以一定量的已知燃烧热值的标准物质在相同的条件下进行实验，求得量热体系的真实温度差 ΔT 后按 (2) 算出 K 。

本实验以苯甲酸为标准物质测量热量计常数 K 后，再以相同的实验条件和方法测定煤粉的热值。

*点火后温度升到最高时，体系还未完全达到热平衡，而温度开始下降的第一个读数则更接近热平衡温度。

必须说明，氧弹热量计测出的燃料燃烧热值称为分析基弹筒热值 Q_{DT}^f ，由此可以计算出燃料分析基高位热值 Q_{GW}^f ，它是一个在实验室鉴定燃料的指标。实际工业燃烧中，都采用应用基低位热值 Q_{DW}^y 表示燃料的燃烧热值。它们之间的换算关系为：

1. 从分析基弹筒热值换算分析基高位热值。

$$Q_{GW}^f = Q_{DT}^f - 94.1S_{DT}^f - aQ_{DT}^f \quad (5)$$

式中 S_{DT}^f ——分析基氧弹燃烧法测定的硫含量，%；

94.1——燃料中每 1% 的硫由二氧化硫生成硫酸的生成热与硫酸的溶解热之和，J；

a ——硝酸的生成热和溶解热的修正系数，无烟煤或贫煤为 0.00418，其它煤种为 0.00627。

2. 从分析基高位热值换算为分析基低位热值。

$$Q_{DW}^f = Q_{GW}^f - 25(W^f + 9H^f) \quad (6)$$

3. 从分析基低位热值换算为应用基低位热值。

$$Q_{DW}^y = Q_{DW}^f \frac{100 - W^y}{100 - W^f} - 25 \left(W^y - W^f \times \frac{100 - W^y}{100 - W^f} \right) \quad (7)$$

实验仪器与试剂

1. 仪器

GR-3500 型氧弹热量计（包括各种附件）一台；高压氧气源一套；分析天平一台；万用电表一个（公用）；50 毫升碱式滴定管一支；1000、2000 毫升容量瓶各一个；10 毫升量筒一个；250 毫升锥形瓶一个；板手、镊子、小螺丝刀各一把等。

2. 试剂

分析纯苯甲酸；分析基煤样；点火丝（ $\phi < 0.2\text{mm}$ ）；0.1000mol/L NaOH 标准溶液；酚酞指示剂；酸洗石棉等。

实验步骤

1. 热量计常数的测定

- (1) 准备工作

a. 将本次实验所需用的苯甲酸标准样品用玛瑙研钵研细，然后放在 100~105℃ 的烘箱内供 3~4 小时，取出后在干燥器中冷却并达到恒重，即烘干前后每克苯甲酸的重量变化不大于 0.0005 克。

b. 用镊子夹住纱布将压片机（特别是其横槽内壁及压棒）和氧弹内壁擦干净，（其它部件如量热桶内外壁，外套内壁，搅拌器等也要用纱布擦净）。

c. 截取长约 10 厘米的一段点火丝并在分析天平上准确称量。

- (2) 压片

为防止欲测燃料燃烧时向四处散裂，可将其在压片机上压为片状，可先在天平上称取 0.8~1.0 克样品，倒入压片机横槽内，旋转把手使粉状样品成为片状并取出。通常压出的片状样品表面粘有污物，此时可用刀片将污物轻轻刮去，然后在干净的玻璃板上敲击 2~3 次，再用小毛刷扫去附着于样品片上的小颗粒，最后在分析天平上准确称量。

- (3) 装氧弹

a. 将擦干净的氧弹盖用手拧下放在专用架上，装好专用燃烧器，为防止燃烧器损坏，

可预先在其中垫充少许酸洗石棉。

b. 将点火丝的两端接于电极上（注意：若使用金属燃烧器，那么电极 8 就不能与燃烧器相接触，否则引起短路）。

c. 将片状样品放入燃烧器，并且使样器与点火丝很好接触（45 度斜靠于点火丝上），再用万用表检查接上点火丝后的点火线路接触是否良好。

d. 向氧弹中加入 10 毫升蒸馏水后将弹头轻轻拧紧，以检查是否漏气。检查漏气的的方法是：将氧弹放入水中，水的高度应在弹头之上、充气阀螺丝中间为宜，然后将进气阀上的螺帽拧下，换上氧气钢瓶导管，打开钢瓶上的阀门及减压阀至 0.1~0.2MPa（表压），如无气泡冒出即表示不漏气。如果漏气，此时应检查出漏气点并进行处理。

（4）充氧气

氧弹不漏气后，可将氧弹外壁擦干，旋开放气阀，放出弹内气体（此时氧弹与氧气瓶是连通的，且表压不得超过 0.3MPa，否则由于压力过大将样品吹落），再旋紧放气阀后慢慢提高氧气瓶的输出压力至 2.5~3.0MPa 充气 5 分钟（如果高压下氧气表漏气时，可先在 1.0~1.5MPa 压力下充氧 2~3 分钟，再调至 2.5~3.0MPa 压力下充气 2 分钟），随后关闭气源，拧下氧弹导气管，装上原来的螺帽。

（5）实验操作

a. 按图 1 所示把仪器装好，先把各电源插头插上，打开搅拌器开关检查搅拌器是否与量热筒相碰，然后向量热筒中注入 2000 毫升蒸馏水，把氧弹小心放入量热筒中，再倒入 1000 毫升蒸馏水。将调节好的贝克曼温度计装上，并调整其高度使汞球处于弹体高度的 1/2 处，切勿使其与氧弹及器壁接触。用 1/10 温度计测量量热筒中的水温，后再向外套夹套中注入比量热筒中水温高约 1℃的水。

b. 将氧弹的电极与控制器接通，盖好量热计外盖。

c. 打开控制器总电源，开动搅拌器，等量热筒中水温变化基本稳定后，开始记录点火前最初阶段（初期）的温度，每隔半分钟一次（由定时指示灯指示），共 10 个间隔，即 11 个读数，在读取第 11 个数据的同时，立即将“振动一点火”开关搬向“点火”端。如果“点火”指示灯亮后马上又熄灭，表示点火成功，否则应适当加大点火电流，点火成功后，随即 将“振动一点火”开关搬向“振动”端，并在点火的同时，仍以每半分钟为时间间隔继续读数至温度开始下降后，再读取最后阶段（末期）的 10 个数据便可停止读数。

d. 关闭“总电源”及“搅拌”开关，将氧弹取出擦干，打开放气阀放出弹内废气，再打开弹头看燃烧器内样品是否燃烧完全。若还有样品及黑色炭粒，即为未完全燃烧，此次实验失败重做；若完全燃烧，则取下未燃完的点火丝后，可用约 150 毫升的热蒸馏水将氧弹头、弹壳内壁和燃烧器等部件冲洗干净，洗液全部倒入 250 毫升的锥形瓶中，加热煮沸 5 分钟，以赶出溶解的 CO_2 ，冷却后加 2~3 滴酚酞，用 $0.1\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 标准溶液进行滴定。

e. 在分析天平上称量未燃烧完全的点火丝的重量。

2. 分析基煤样弹筒热值的测定

a. 称取粒度小于 0.2mm 的分析煤样 1.0~1.2 克在压片机上压成片（压力不宜过大），并在分析天平上准确称量。

b. 其它实验步骤同于热量计常数测定。

c. 必须用氧弹法测定全硫含量以计算高位发热值 Q_{GW}^f 时，应收集洗弹液（从实验末期終了时刻算起，半小时后再放余气），按重量法测定硫。否则，可不收集。

d. 实验完毕后，倒去量热桶中的水，用纱布擦干所有部件，以备下次实验使用。

实验数据记录与处理

1. 实验数据记录与处理参数格式

实验数据记录	量热筒水温	量热筒加水量	氧弹压力	外套水温	实验日期	实验者
	℃	ml	Pa	℃		
	样品重量	点火丝重量	剩余点火丝重量	燃去点火丝重量	NaOH 浓度	滴定用 NaOH 量
	g	g	g	g	mol/L	ml
	No	贝克曼温度计读数	No	贝克曼温度计读数	No	贝克曼温度计读数
	1		9			
	2		10			
	3		11 _(点火)			
	4		12			
	5					
	6					
	7					
8						
数据处理						

2. 数据处理

(1) 根据热量计常数测定实验数据用图解法或经验公式法求出标准物质苯甲酸在燃烧前后的温度变化 ΔT_1 后依公式

$$K = \frac{Q \cdot a + q \cdot b + 59.8C \cdot V}{\Delta T_1}$$

求得热量计常数。

(2) 根据分析基煤样弹筒热值测定实验数据用作图法或经验公式法求出煤样燃烧前后的温度变化值 ΔT_2 ，再依公式

$$Q_{DT}^f = \frac{K \cdot \Delta T_2 - q \cdot b - 59.8C \cdot V}{a}$$

求得煤样的分析基弹筒热值。

实验注意事项

1. 氧弹内壁以及氧气通过的各个部件、各联接处不允许有油污，更不允许使用润滑油，以免由油污引起爆炸危险。

2. 装卸氧弹时，要注意不得损伤螺纹。

3. 在进行检查氧弹漏气和给氧弹充气这两步骤时，不要使氧弹振动和倾斜，以防样品撒出燃烧器。

4. 接点火丝时，必须使点火丝和电极接触良好，特别注意两电极（包括金属燃烧器与另一电极）不得接触，否则样品将不能燃烧。

5. 每次实验完毕，氧弹、量热容器、燃烧器、搅拌器等应用干布擦去水迹，保持表面清洁。

思考题

1. 贝克曼温度计的示值是否是被测对象的实际温度？如何正确调节贝克曼温度计的起始值？

2. 分析量热筒水温与外套水温之间的关系对实验结果的有何影响？

3. 测定时每半分钟一个的温度读数能不能漏读？各个不同的期中漏读了读数对实验结果有什么影响？

4. 本实验能否使用电解水制得的氧气作为氧化剂？为什么？