

建材院校试用教材

# 硅酸盐工业热工基础实验

朱明 主编 牟思容 副主编



武汉工业大学出版社

# 硅酸盐工业热工基础实验

朱 明 主 编  
牟思容 副主编

武汉工业大学出版社

## 前 言

本书是为配合建材类高等院校、中专学校“热工基础”课教学而编写的。本书兼顾本科、大专、中专“热工基础”课教学内容侧重点不同的特点,并考虑到建材行业中经常性的热工监控和热工标定,及各个学校的实验条件,有选择地编录了 28 个实验,并配有较为翔实的附录资料。希望通过这些实验使学生加深对课堂所学相关内容的进一步理解和掌握,同时,达到认识理论对实践的指导作用及培养学生动手能力的目的。

完成全部实验共需约 50 个学时。各学校可根据本校的实际情况进行安排,但以本科、大专学生完成 30~40 学时的实验、中专学生完成 25~30 学时的实验为宜。

全书由武汉工业大学材料学院朱明主编,四川建材工业学校牟思容任副主编。

北京建材工业学校刘述祖审读了全部实验项目,并提出了修改意见。

此外,在本书的编写过程中得到了武汉工业大学材料学院何仁德等老师的热情帮助,在此表示感谢。

鉴于编者学识有限,书中缺点在所难免,恳请读者在使用后对本书提出宝贵意见,以便使之不断完善。

编 者

1996.5 于武汉

# 目 录

实验一	流体粘度的测定	1
实验二	流动显示水槽演示实验	5
实验三	圆管层流运动沿程阻力系数的测定	8
实验四	圆管紊流运动沿程阻力系数的测定	12
实验五	圆管紊流运动局部阻力系数的测定	15
实验六	气流压力的测量	18
实验七	流速与流量测量	21
实验八	气流三维流场的测定	25
实验九	气体定压比热的测定	35
实验十	水量热法测定物料温度	40
实验十一	气流温度的测定	43
实验十二	表面温度的测定	46
实验十三	火焰温度的测定	50
实验十四	煤的工业分析	54
实验十五	煤的发热量测定	57
实验十六	工业烟气的成分分析及漏风量的测定	62
实验十七	圆球法测定隔热材料的导热系数	66
实验十八	非稳态平壁导热法测定隔热材料的导热系数、比热容及导温系数	69
实验十九	二维稳定温度场的电热模拟	73
实验二十	空气沿横管表面自然对流换热系数的测定	81
实验二十一	空气横掠单管时强制对流换热系数的测定	84
实验二十二	空气横掠圆柱体时局部换热系数的测定	88
实验二十三	空气纵掠平板时速度、温度边界层的测定	91
实验二十四	大容器内的水沸腾换热实验	96
实验二十五	平板型传导热流计测定墙体表面热流量	101
实验二十六	固体中温法向辐射黑度的测定	105
实验二十七	干湿球温度法测定气流的湿含量	110
实验二十八	气流含尘浓度的测定	113
附录一	常用局部阻力系数	118
附录二	常见气体的物理参数	124
	(一) 干空气的物理参数	124
	(二) 烟气的物理参数	124
	(三) 饱和水蒸气的物理参数	125
	(四) 水在 100°C 下的汽化热	125
附录三	液体燃料的物理参数	126

附录四 固体材料的物理参数 .....	127
(一) 金属的物理参数 .....	127
(二) 耐火材料的物理参数 .....	128
(三) 隔热材料的物理参数 .....	129
(四) 建筑材料的物理参数 .....	130
附录五 几种气体的平均比热 .....	132
附录六 标准化热电偶技术数据及常用补偿导线 .....	133
附录七 常用热电偶分度表 .....	134
(一) 铂铑(10)-铂热电偶分度表 .....	134
(二) 铂铑(30)-铂铑(6)热电偶分度表 .....	139
(三) 镍铬-镍硅(镍铬、镍铝)热电偶分度表 .....	144
(四) 镍铬-康铜热电偶分度表 .....	148
(五) 铜-康铜热电偶分度表 .....	152
附录八 不同温度与不同风速的散热系数 .....	154
(一) 转动设备 .....	154
(二) 不动设备 .....	155
附录九 煤的工业分析允许误差及 $K_0$ 、 $K_1$ 值 .....	157
(一) 水分测定允许误差 .....	157
(二) 灰分测定允许误差 .....	157
(三) 挥发分测定允许误差 .....	157
(四) $K_0$ 与 $V_{daf}'$ 的关系 .....	157
(五) $K_1$ 与 $V_{daf}$ 及焦渣特征的关系 .....	158
附录十 某些材料的辐射率(黑度) .....	159
(一) 某些材料在法线方向上的黑度 $\varepsilon$ .....	159
(二) 某些材料在 $\lambda=0.65\mu\text{m}$ 下的单色辐射率 $\varepsilon_\lambda$ .....	161
附录十一 空气的相对湿度 .....	162
附录十二 水泥熟料的平均比热 .....	166
参考文献 .....	167

# 实验一 流体粘度的测定

## 一、实验目的

1. 了解流体产生粘滞性的本质及其对流体的流动和传热性能的影响,加深对流体粘滞性的理解。
2. 了解牛顿型流体与非牛顿型流体的区别,进一步认识牛顿内摩擦定律在实践中的运用。
3. 掌握根据牛顿内摩擦定律而设计的旋转式粘度计的测量理论及使用方法。
4. 根据测定数据绘制  $\tau$ - $du/dy$  曲线。

## 二、实验原理

众所周知,流体的粘性是指在流体运动时,流体内部各微团或流层之间由于具有相对运动而产生内摩擦力以阻止流体做相对运动的性质。显然,任何实际流体都是具有粘性的。其粘性的大小可以不同流体抵抗相对运动的能力的不同而体现出来。由此可见,粘性是实际流体的固有属性,它将直接影响到流体的流动和传热性能。

对于牛顿型流体,若从流体中取一面积为  $A$ ,厚度为  $dy$  的流体层,假定其下层速度为  $u$ 、上层速度为  $u+du$ ,则由于上、下层流速不同将使该流体发生剪切变形,从而产生切应力  $\tau$ 。 $\tau$  的大小可按牛顿内摩擦定律求得:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-1)$$

式中  $\mu$ ——实验系数,即流体的粘度,  $N \cdot s/m^2$ 。

根据(1-1)式,若把切应力  $\tau$  作纵轴,速度梯度  $du/dy$  作横轴,则可得到一条通过原点的直线,如图 1-1 所示。该直线与横轴夹角的正切就是牛顿型流体的粘度:

$$\mu = \operatorname{tg} \theta = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (1-2)$$

旋转式粘度计就是根据这一原理设计的。如图 1-2 所示,在两个不同直径的同心圆间的环形间隙  $\delta$  中充满待测流体。其内筒固定不动,外筒以角速度  $\omega$  旋转,由于流体的粘性,从而外筒的运动将带动环形间隙中的流体运动。当  $\omega$  和  $\delta$  都很小时( $\delta \ll R$ ),流体在两同轴环形间隙中的运动可以近似看做在两无限大平行平板间的层流运动。此时,与旋转圆筒相接触的流体层的运动速度为:

$$u = R\omega = R \cdot \frac{2\pi n}{60} \quad (1-3)$$

式中  $R$ ——旋转圆筒的半径;  
 $n$ ——旋转圆筒的转速。

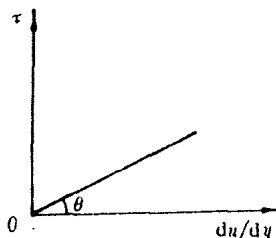


图 1-1 牛顿型流体的  $\tau$ - $du/dy$  关系

当两圆筒底面间的间距较大时,可以忽略内筒底面以下流体的扭矩,此时可得到流体因粘性而对圆筒壁产生的切应力为:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \approx \mu \cdot \frac{u}{\delta} = \mu R \cdot \frac{2\pi n}{60\delta} \quad (1-4)$$

由此切应力对圆筒轴心产生的摩擦阻力矩为:

$$M = 2\pi R\tau RH = 4\pi^2 R^3 n \mu H \cdot \frac{1}{60\delta} \quad (1-5)$$

式中  $H$ ——内筒的高度。

由(1-4)式及(1-5)式可得:

$$\mu = \frac{15M\delta}{\pi^2 R^3 n H} \quad (1-6)$$

实验时,当外圆筒旋转时,由于流体粘性产生的内摩擦作用,使内圆筒也发生旋转,此时的粘度可由下式计算:

$$\mu = \frac{M(D^2 - D_0^2)}{\pi n H D^2 D_0^2} \quad (1-7)$$

式中  $D$ ——外圆筒内直径;

$D_0$ ——内圆筒外直径。

### 三、实验装置

图 1-3 为外筒旋转式的旋转粘度计测量装置系统。其外圆筒与低速可调速电机相联。实验中根据需要以某个固定的转速旋转,内圆筒则用扭丝悬挂并与扭矩测试机构相联接,通过表盘指针测定作用于内筒的扭矩。

### 四、实验步骤

1. 用卡尺精确测定旋转粘度计外圆筒内径  $D$ 、内圆筒外径  $D_0$  和内筒高度  $H$ 。
2. 按图 1-3 所示正确安装实验装置,并向两圆筒间充满被测的牛顿型流体。
3. 接通电流,启动电机并调整至要求的转速  $n$ ,保持恒定不变,记录该转速。
4. 观测扭矩表指针不再波动时,记录该扭矩值  $M$ 。
5. 改变转速  $n$ ,重复步骤 3~5,测若干套数据。
6. 切断电源,更换被测流体种类,重复步骤 2~5,做 1~2 个样品。
7. 切断电源,仪器归位,结束实验。

### 五、实验报告

#### 1. 原始数据记录

外圆筒内径  $D =$       mm      内圆筒外径  $D_0 =$       mm      内圆筒高度  $H =$       mm

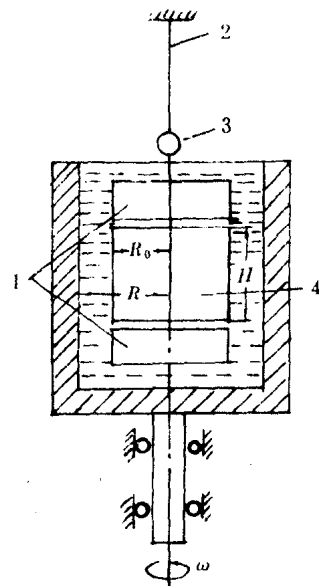


图 1-2 旋转式粘度计  
1—静止护圈;2—悬索;3—反射镜;  
4—悬挂着的圆筒

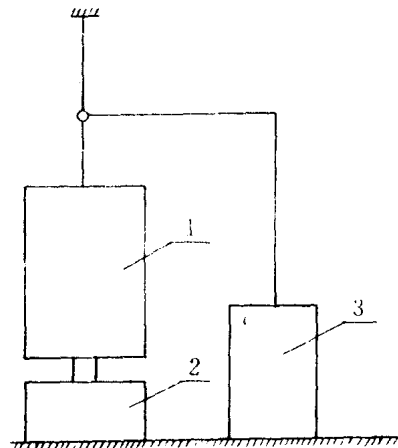


图 1-3 粘度测量装置  
1—旋转式粘度计;2—低速可调速电机;  
3—扭矩测量机构(表盘指针)

流体 I	转速 $n$								
	扭矩 $M$								
流体 II	转速 $n$								
	扭矩 $M$								

2. 数据处理

(1) 计算速度梯度  $du/dy$

因为

$$u = R \cdot \frac{2\pi n}{60}$$

$$\delta = \frac{D - D_0}{2} \tag{1-8}$$

所以

$$\frac{du}{dy} \approx \frac{u}{\delta} \tag{1-9}$$

(2) 计算切应力  $\tau$

$$\tau = \frac{M}{2\pi R^2 H} \tag{1-10}$$

(3) 按(1-7)式计算粘度  $\mu$

测定数据处理表

表 1-2

流体 I	$\tau$								
	$du/dy$								
	$\mu$								
流体 II	$\tau$								
	$du/dy$								
	$\mu$								

(4) 根据表 1-2 数据绘制  $\tau$ - $du/dy$  曲线, 并求  $\mu$ 。

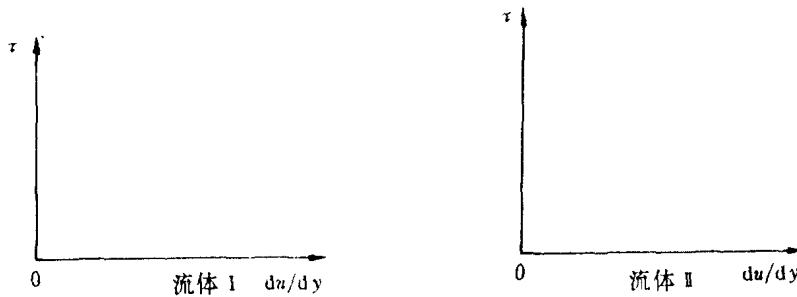


图 1-4 实验流体的  $\tau$ - $du/dy$  关系曲线



## 六、思考题

1. 旋转粘度计的工作原理是什么？
2. 旋转粘度计是否可用于非牛顿型流体粘度的测量？
3. 若内筒底面以下流体的扭矩不能忽略,应怎样计算圆筒底壁的扭矩？
4. 根据你所学的流体力学理论,还有哪些方法可用于流体粘度的测量？
5. 动力粘度  $\mu$  和运动粘度  $\nu$  的物理意义是什么？影响粘度的因素有哪些？

## 实验二 流动显示水槽演示实验

### 一、实验目的

1. 深入了解流线和流谱的概念,建立感性认识。
2. 通过观察流体的流动图谱,了解真实流体和理想流体的区别,建立速度剖面和边界层的概念。
3. 了解氢气泡技术原理。
4. 了解流场显示方法及流动显示在科学研究及实验中的作用。

### 二、实验原理

观察流体的流动图象是流体力学的主要实验内容之一,通常称之为流动的可视化实验。在可视化实验中,将本看不清的气体或液体的流动变成较清晰的流动图象的技术则称为流动显示技术。流动显示的任务是把透明流体(如水和空气)中的流动现象和结构用图象显示,以供人们理解和进行定性分析。通过对流体流动的观察,不仅可以获得有关流体流动的感性知识,而且可得到一些对于目前尚无法应用理论分析方法和数值计算方法进行研究的复杂流动的有益的启发和结果。因而流动显示实验是观察流线、流谱及对流场做定性(甚至定量)分析的一种可靠、有效的方法。

本实验是在流动显示水槽中进行的,并采用氢气泡来显示流场的图谱。氢气泡技术是60年代后期发展起来的流动显示方法,可进行流动观察,当配上频率计后还可进行定量测量。具体方法是将水流通电使其电解,阴极产生氢气泡,阳极产生氧气泡。由于氢气泡比氧气泡小得多,上浮作用缓慢,所以只利用氢气泡,其作用如同示踪粒子。用细导线作为阴极,放在需要观察水流的地方,从观察到的氢气泡运动即可了解水的流动情况。阳极可为任何形状,放在不影响流动的下游处。

作为阴极的细导线可用白金丝、钨丝或不锈钢丝,直径为 $0.01\sim 0.05\text{mm}$ 。铜片作为阳极。工作电压 $10\sim 100\text{V}$ 。通电后阴极丝上产生的氢气泡直径约为金属丝直径的一半,气泡随水流动,借助平面光束的照射,可清晰地显示出水流图谱。

如果使阴极丝垂直于流动方向,在电极间加上周期性脉冲电压,则在阴极处会产生一排排氢气泡,如同整齐行进的队列一样。每排氢气泡的间隔宽度由脉冲间隔决定,而氢气泡列的宽度由脉冲宽度决定。配以合适的直槽道可清晰地显示速度剖面及边界层。

### 三、实验装置

实验装置由回路水槽、槽体台架、方波发生器、光源等组成,如图2-1所示。其回路式水槽用有机玻璃制成,全长 $2\text{m}$ ,高 $0.5\text{m}$ ,实验段长 $l=1.30\text{m}$ ,高 $h=0.10\text{m}$ ,宽 $b=0.14\text{m}$ ,并配有阴极丝架和各种模型(圆柱、直槽道、二元翼、顺排及叉排管簇等)。

### 四、实验步骤

1. 将自来水缓缓注入槽体实验段,待实验段内水面高出收缩段出口 $1\text{cm}$ 时拔出阻尼网,插入闸板,启动电机。轴流泵叶轮转动,使拐角段内水面上升(此时排气管通大气)。待水面升

到拐角段上表面,段内空气已基本排尽时,封闭排气管,关闭电机,取出闸板,继续加水直到实验段水平面高于收缩段出口高度。

2. 将实验模型置入槽中,根据需要安放阴极丝和阳极片,并分别与方波发生器的阴、阳极联接,注意阴极丝与阳极片不能短路。

3. 打开电机开关,并调节流速旋钮,使流动达到需要的速度。

4. 打开光源开关,调整光源位置、光柱幅度及高低,以期得到最清晰的流动显示图象。

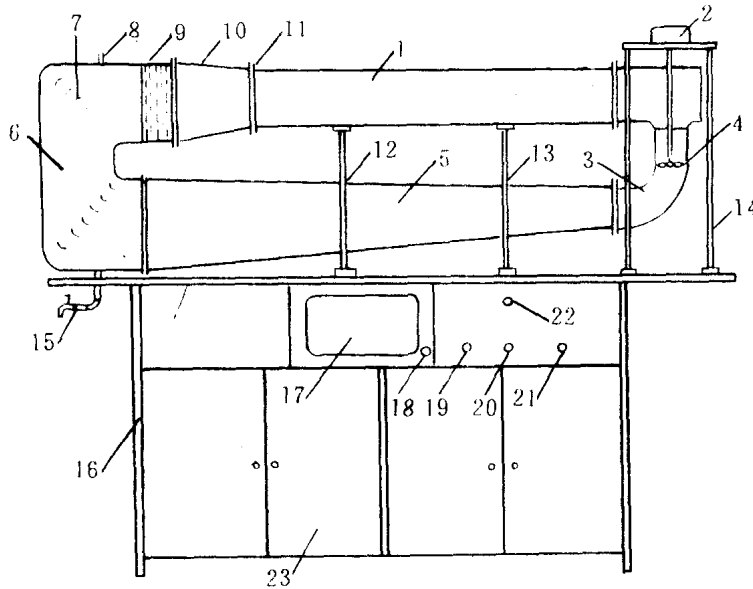


图 2-1 流动显示水槽示意图

1—实验段;2—驱动电机;3—第一拐角段;4—轴流泵叶轮;5—扩散段;6—第二、三拐角段;  
7—导流片;8—排气管;9—蜂窝器;10—收缩段;11—阻尼网、闸板;12、13—槽体支架;14—  
电机支架;15—排水阀门;16—槽体台架;17—方波发生器;18—极性转换开关;19—电机启  
动开关;20—流速调节旋钮;21—保险丝;22—指示灯;23—实验模型柜

5. 打开方波发生器电源开关,调节电压旋钮,使阴极丝上出现氢气泡,并依次观察、记录下列实验内容的流动图谱:

(1)直槽道模型:观察入口段及速度剖面,了解边界层的形成过程。

(2)二元翼模型:观察流线及流谱、驻点位置及尾流情况。

(3)圆柱模型:观察卡门涡街的形成(脱体及尾流情况)。

(4)管簇模型:观察流谱特点,了解换热器中对流换热形态。

注意在更换模型时应首先关闭电机和方波发生器电源,待更换完毕后再重新启动。

6. 实验完毕逐一关掉电源开关,取出模型和阴极丝、阳极片。放空槽中的水,盖上盖子。

## 五、实验报告

1. 定性画出二元翼及圆柱绕流的流动图谱。

2. 画出直槽道内速度剖面的变化,说明边界层成因及过程。

3. 试举出自然界和生产生活中观察到的流动实例。

## 六、思考题

1. 本实验采用的是什么技术？依据的是什么原理？它在工程中有些什么作用？
2. 什么是迹线、流线、流谱及驻点？
3. 什么是卡门涡街现象？它是怎样形成的？
4. 实验装置中拐角段 7 的水位高度比开口实验段高，为什么在流动过程中不会下落？

## 实验三 圆管层流运动沿程阻力系数的测定

### 一、实验目的

1. 了解圆管中产生层流运动的条件,进一步理解雷诺数在判断流态中的重要作用。
2. 验证圆管层流运动的沿程阻力系数服从  $\lambda = A/Re$  规律,其图象在对数坐标中为一直线。
3. 通过对测压管的排气、调平操作,进一步理解连通器原理以及管出口设置止水阀的重要作用。
4. 掌握离心式水泵的启动程序,进而了解离心式泵  $Q-N$  特性曲线在生产实际中的作用。

### 二、实验原理

我们知道,任何真实流体都是具有粘性的,因而在流动过程中为克服粘性阻力就必然要消耗机械能而产生能量损失,并且这种能量损失与流体的流动状态有着密切的联系。根据雷诺准数  $Re = wd/\nu$  可知,要使管道内的流体作层流运动,可以考虑从管径  $d$ 、流动速度  $w$  和流体的粘度  $\nu$  等三个方面去进行控制。由于本实验采用水作为流动介质,其粘度  $\nu$  基本上是确定的(仅随温度有少许变化),因此只能从减小管径、降低流速这两个方面来实现圆管中的层流运动。故而实验在内径为 6mm 的铜管内进行。如图 3-1 所示,实验时,在 1-1、2-2 断面的二个测压孔处分别联接单管测压计,其测孔间距为 1.8m。则相对于 0-0 基准面,可列出两断面间流体的伯努利方程为:

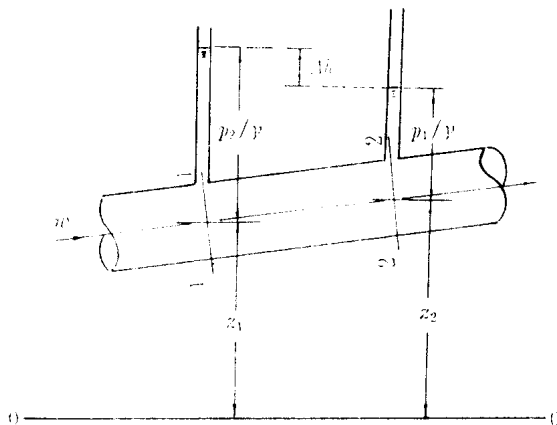


图 3-1 测压示意图

如图 3-1 所示,实验时,在 1-1、2-2 断面的二个测压孔处分别联接单管测压计,其测孔间距为 1.8m。则相对于 0-0 基准面,可列出两断面间流体的伯努利方程为:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g} + h_l \quad (3-1)$$

由于管径不变,  $w_1 = w_2$ , 则沿程损失可表示为:

$$h_l = \left( z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) - \left( z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right) = \Delta h \quad (3-2)$$

这表明即使管子倾斜放置,只要保证静止时二测压管内液面处于同一水平面上,则二测压管示值之差就是流经 1-1~2-2 断面间管段的沿程损失。

根据计算沿程阻力的这两公式(参见实验四)可得:

$$h_l = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2}{2g} = \Delta h$$

从而可以给出沿程阻力系数  $\lambda$  和其它参量之间的关系为：

$$\lambda = \frac{2gd\Delta h}{lw^2} \quad (3-3)$$

由于在实验中可直接测量管道的流量  $Q$ 。对于圆管  $w = \frac{4Q}{\pi d^2}$  代入式(3-3)得到：

$$\lambda = \frac{g\pi^2 d^5 \Delta h}{8lQ^2} \quad (3-4)$$

同样可得

$$Re = \frac{wd}{\nu} = \frac{4Q}{\pi d^2} \cdot \frac{d}{\nu} = \frac{4Q}{\pi d\nu} \quad (3-5)$$

### 三、实验装置

实验在多功能管道阻力实验仪上进行，实验装置如图 3-2 所示。

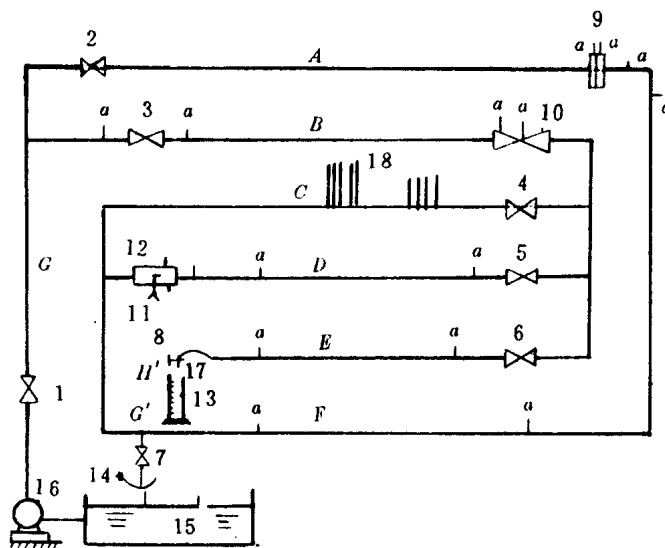


图 3-2 多功能管道阻力实验仪示意图

1~7—阀门；8—止水阀；9—孔板流量计；10—文氏流量计；11—皮托管；12—突扩有机玻璃管；13—量筒；  
14—出水接头；15—循环水槽；16—水泵；17—90°弯头；18—测压排管；A、F—Dg40 钢管；B、D—Dg25 钢管；  
C—Dg40 和 Dg25 串联钢管；E— $\Phi 8 \times 1$  铜管；G—三通，接与图示相同的另一组管系；H、H'—管系出口；  
a—管路测压孔，带有旋塞

(水槽中的水经过水泵送到每一管系，最后由出口 H 流入水槽，实现循环用水。)

实验时，选取多功能管道阻力实验仪上 E 管二测压孔之间的管段作为实验对象。同时，考虑到 E 管的内径很小，流量也很小，若仅使水在 E 管中流动，则流量调节是困难的，必须有一较大流量的分流。因此，实验流程确定为：

B 管  $\left\{ \begin{array}{l} D \text{ 管经阀 7 流入循环水槽；} \\ E \text{ 管经阀 8 流入量筒。} \end{array} \right.$   
D、E 管构成分支管道。

### 四、实验步骤

1. 将自来水注入循环水箱至半高左右。关闭阀 1、阀 2 和阀 4，半开阀 5、阀 6 和阀 8，全开

阀 3 和阀 7。

2. 二单管测压计用胶管与 E 管二测压孔相连接,使其与管流联通,检查并旋紧管系中其余测压孔的旋塞(或用胶管将邻近二测压孔连通)。

3. 排气及测压管调平

在通水前管系及测压管中充满了空气,因此,排气是此实验关键的一步。接通水泵电源,然后开启并逐渐加大阀 1 的开度,实验管段中有水流动,直至阀 1 到半开后不再加大。适当调整阀 8 的开度,再反复开,闭针阀 6,使 E 管中的气泡完全排出,同时使二测压管中出现液柱。

同步关闭阀 6 和阀 8,此时二测压管与铜管中水处于静止状态,构成连通器。待完全稳定后,二测压管内液面处于同一水平面,分别记下二测压管的初值。为使测压管内水柱有合适的高度,可通过充水或放水来实现。

4. 调节阀 3 和阀 6 的开度,用量筒和秒表测定流量,并读出对应流量下二测压管读数,共测定 6~8 组数据。

5. 用温度计测量水槽内水的温度。

6. 关闭电源,全开阀 7、阀 8 使管系水排空。放空水槽中的水,仪器仪表归位。

五、实验报告

1. 实验参数记录

实验段长度  $l =$  m 内径  $d =$  m 实验水温  $t =$  °C 水的运动粘度  $\nu =$  m<sup>2</sup>/s。

2. 数据记录及整理

实验数据记录及处理

表 3-1

序号	测压管示值 (mmH <sub>2</sub> O)			体 积 (ml)	时 间 (s)	流 量 (ml/s)	Re	λ	A = λRe
	1	2	Δh						
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									

$$\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i$$

由于在层流运动时,沿程阻力系数  $\lambda = \frac{64}{Re}$ , 实验中,若符合  $\lambda = \frac{A}{Re}$  的规律,则可求出相应的 A 值,有  $A = \lambda Re$ 。

3. 在对数坐标纸上绘制  $\lambda-Re$  曲线。

#### 六、思考题

1. 由实验结果能否判定  $E$  管中流体的流态? 它与理论结果是否一致? 原因是什么?
2. 如果  $E$  管出口处无止水阀, 将会出现什么情况? 此实验能否进行? 为什么?
3. 当管中流体静止时, 二测压管中液柱水面在同一水平位置, 但初始读数为什么可能不同?
4. 当管中流体运动为层流时, 是否可用此法对流体的粘度进行测定?



## 实验四 圆管紊流运动沿程阻力系数的测定

### 一、实验目的

1. 通过实验了解和掌握测定管道沿程阻力的方法。
2. 确定沿程阻力系数与雷诺数的关系  $\lambda=f(Re)$ , 学习将实验结果整理成经验公式及点绘实验曲线的方法。
3. 验证当流动进入阻力平方区后,  $\lambda$  值不随  $Re$  值变化, 而仅与管道的相对粗糙度  $\frac{\epsilon}{d}$  有关, 即在  $\lambda-Re$  图中实验曲线为一水平直线。

4. 加深对倒 U 形管测压计工作原理的理解并掌握其使用方法。

### 二、实验原理

一般说来, 由于工业管道内的流体运动多为紊流状态, 因而紊流状态下管道的沿程阻力损失是工程实际中广泛存在、科研设计中必需给以足够重视的问题。但由于紊流运动的复杂性, 采用严格的数学分析方法通常不能使问题得到解决, 而往往要借助实验研究的方法。分析表明, 流体沿等直径管道流动所产生的沿程阻力损失, 通常与管长  $l$ 、管径  $d$ 、管壁粗糙度  $\epsilon$ 、平均流速  $w$  以及流体的运动粘度  $\nu$  等因素有关, 并可用达西公式表示为:

$$h_l = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2}{2g} \quad (4-1)$$

式中,  $\lambda$  称为沿程阻力系数, 根据因次分析原理可导出  $\lambda=f(Re, \frac{\epsilon}{d})$ , 即沿程阻力系数  $\lambda$  是雷诺数  $Re$  和相对粗糙度  $\frac{\epsilon}{d}$  的函数。它只能由实验数据整理成实验曲线或实验公式。

将(4-1)式进行改写, 即可得到紊流式管道沿程阻力系数的表达式为:

$$\lambda = \frac{2gdh_l}{w^2 l} \quad (4-2)$$

显然, 对于确定的管段, 只要测出在不同平均流速  $w$  下的沿程阻力损失, 即可算出对应的  $\lambda$  值及雷诺数  $Re$ 。由于实验中对平均速度  $w$  的测定是通过测量流量  $Q$  获得的, 为了方便, 可直接用  $Q$  取代  $w$ , 此时得到的  $\lambda$  和  $Re$  的计算式分别为:

$$\lambda = \frac{\pi^2 d^5 g}{8Q^2 l} \cdot h_l \quad (4-3)$$

和

$$Re = \frac{4Q}{\pi d \nu} \quad (4-4)$$

式中, 流体粘度  $\nu$  可通过测定流体温度进行查表, 并采用插值计算法得到。

实验安排在多功能管道阻力实验仪提供的两种管道中进行, 各测取 6~8 组实验数据, 把这些实验数据分别整理点绘成一条  $\lambda-Re$  曲线(曲线可分段绘出)。

实验中对沿程阻力损失的测量采用倒置 U 形管测压计进行, 并直接用管道中流动的水作为指示液, 其装置如图 4-1 所示。两玻璃管中液面的高程差  $\Delta h$  即为沿程阻力损失  $h_l$ 。计算时应注意将读数单位换算成米。