



§ e.7 液体粘滞系数测量

【实验背景】

本实验属于流体力学范畴。流体包含气体和液体，可以发生形状和大小的改变。关于流体力学，公元前即有阿基米德对流体静力学的研究。对近代流体力学作出贡献的如约翰·伯努利建立了理想流体稳定流动的动力学方程。欧拉为理论流体力学的奠基人，还对船舶的平衡和晃动做了很好研究。雷诺（O.Reynolds,1842-1912）则通过实验显示水流过平板等物体产生涡流并得出可作为从层流转变为湍流判据的无量纲数—雷诺数。茹可夫斯基的翼型理论对航空技术影响深远，随航空和火箭技术的进步，亚声速流、跨音速流以至超音速流气体动力学均有大发展。

液体粘滞系数是描述液体内部摩擦性质的重要物理量，能够表征液体反抗形变的能力，只有在液体内部存在相对运动的时候才会表现。对液体粘滞性的研究在医疗，航空，化学化工，水利，机械润滑和液压传动等领域都有广泛的应用。例如，现代医学发现，许多心血管疾病都与血液粘度系数有关。血液粘度增大使血液流动变慢，流入人体器官的血流量减少，于是人体处于供血供氧不足的状态，这可能引发心脑血管疾病；在用管道输送液体时要根据输送液体的流量，压力差，输送距离及液体粘滞系数，设计输送管道的口径。

测定液体的粘滞系数方法较多，如基于斯托克斯公式的落球法，基于泊肃叶公式的毛细管流量法，以及转筒法，干涉法等。其中落球法，一般适用于粘滞系数较大的透明或半透明液体（例如蓖麻油），但是无法测量粘滞系数较小的液体（例如水或者酒精）。本实验采用基于泊肃叶公式的毛细管流量法测量粘度较小液体的粘滞系数，弥补这一空缺。

【实验目的】

- 1.了解粘滞系数与雷诺数的科学原理。



2.了解泊肃叶公式及其应用。

3.掌握毛细管流量法液体粘滞系数的测量及数据处理方法。

【实验原理】

一、粘滞系数及粘性定律

在流体中取一理想截面，截面两侧流体沿截面以不同速度运动，则两侧流体间将互相作用以沿截面的切向力，较快层流体对较慢层流体施加向前的“拉力”，较慢层对较快层施加“阻力”。这一对力相当于固体间的“动摩擦力”，因它是流体内部不同部分间的摩擦力，故称为内摩擦力，又称为粘性力。实验证明，流体的内摩擦力大小与流体性质有关，与流体速度变化梯度 $\frac{\partial u}{\partial y}$ 和接触面积 S 成正比，即

$$f = \eta \frac{\partial u}{\partial y} S \quad (\text{e.7.1})$$

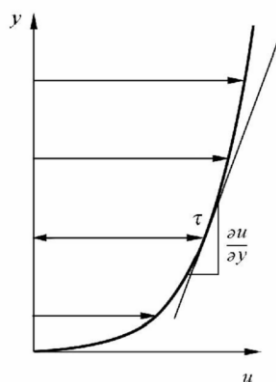


图 e.7.1 速度梯度示意图

公式(e.7.1)称为粘性定律，工程学中，常令 τ 为单位面积上的内摩擦力，即摩擦应力（又称剪切应力），于是得到下式

$$\tau = \frac{f}{S} = \eta \frac{\partial u}{\partial y} \quad (\text{e.7.2})$$



(e.7.2)式假设流动是沿着平行线的层流状态，并且垂直于流动方向的 y 轴指向最大剪切速度。满足剪切应力—速度梯度线性关系方程的流体被称作“牛顿流体”。

式中的比例系数 η 称为粘滞系数。在国际单位制中 η 的单位为牛顿·秒/米²，即“帕斯卡·秒”，国际符号为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。在厘米克秒制中 η 的单位为克/厘米·秒，称为“泊”（P）。1 泊（P）=0.1 帕·秒（ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ）。

η 除与物质材料有关外，还和温度压强有关。液体的粘滞系数 η 随温度升高而减小，气体的粘滞系数随温度的升高而增加。压强不大时，液体粘性变化不大，压强很高时，粘性才急剧增加。

二、雷诺数

在描述流动的特征方面，英国的雷诺于 1883 年提出用来比较粘性流体流动状态的无量纲数，雷诺数 R_e 定义为液体流动时的惯性力 $\frac{\rho v^2}{L}$ 和黏性力 $\frac{\eta v}{L^2}$ 之比，其中 ρ 为液体密度， v 为液体流动速度， L 为液体特征长度， η 为液体粘滞系数。对于直圆管内雷诺数可以表达为

$$R_e = \frac{\rho v d}{\eta} \quad (\text{e.7.3})$$

其中 d 为圆管直径。 R_e 通常认为在 2300 以下是层流状态，在其以上处于紊流以及湍流状态。

三、泊肃叶公式及其应用

水平放置的圆管中粘性流体作层流运动时，各流层为自管道中心开始而半径逐渐增大的圆筒形。中心处流速最大，随半径增大而流速变小，靠近管壁的流体粘附于壁面，其流速为零。 L 为管长， p 为圆管两端压强差， a 为圆管半径（如图 e.7.2 所示）。

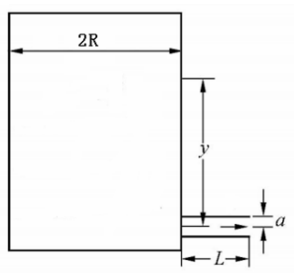


图 e.7.2 实验装置示意图

根据 1840 年，泊肃叶（J.Poiseuille）发现的公式可知管内的流量：

$$Q = \int_0^a 2\pi r v dr = \frac{\pi p a^4}{8\eta L} \quad (\text{e.7.4})$$

容器是圆柱体处于大气压下（如图 e.7.2 所示），且水位下降足够慢（准静态过程），使圆管中水流保持层流状态，可以认为 $p = \rho g y$ ，此时射出的水流应呈抛物线状且平稳，则有：

$$Q = \frac{\pi \rho g y a^4}{8\eta L} = -A \frac{dy}{dt} \quad (\text{e.7.5})$$

其中 $A = \pi R^2$ 是容器的截面积。求解(e.7.5)式可以得到：

$$y = y_0 e^{\left(-\frac{\rho g a^4}{8\eta L R^2} t \right)} \quad (\text{e.7.6})$$

对(e.7.6)式两边同时乘以容器的截面积 A ，得：

$$V = V_0 e^{\left(-\frac{\rho g a^4}{8\eta L R^2} t \right)} \quad (\text{e.7.7})$$

式中 V 为容器中的液体有效体积，即（图 e.7.2）中 y 所对应的体积， V_0 为初始有效体积。

液体有效体积随时间的变化可在实验中测量计算得到，并可绘制关系曲线，通过相关软件拟合参数，进一步计算即可求出液体粘滞系数 η 。



【实验仪器】

一、LB-VC 液体粘滞系数测量仪

1. 仪器结构

LB-VC 液体粘滞系数测量仪由实验主机、电气箱、计时遥控器三部分组成，实验主机由平台、带有刻度的蓄水管、蓄水槽、毛细排水管构成。实验时只需将毛细管前端的堵头拿掉，同时按下电气箱上计时或者停止按钮进行实验。为了实验操作更方便，LB-VC 液体粘滞系数测量仪还配有一个由插头与电气箱连接的计时遥控器。学生也可通过计时遥控器来控制计时和数据记录。如（图 e.7.3）所示，为 LB-VC 液体粘滞系数测量仪外观实物图。



图 e.7.3 LB-VC 液体粘滞系数测量仪实物图

2. 仪器特点

仪器自带数显计时秒表，计时显示精度有 0.1S、0.01S 和 0.001S 三种并可切换；数显计时秒表可作为单独的高精度计时器使用；带有 15 组计时数据的记录存储功能；配有计时记录遥控器，方便学生进行实验数据记录；蓄水管采用透明亚克力材料，便于学生读数的同时避免了传统的玻璃材料易碎的缺点；采用主机机构与电气



盒分离结构，结构简洁间接易操作；毛细管出水开关采用独创的磁力式堵头结构，打开关闭方便操作且可靠。

3. 仪器参数

盛水器皿：有机玻璃筒，直径 80mm（内径需在实验中自己测量），高度 500mm，配有筒盖；底座：180mm×180mm，配有 4 个调平脚；配件：不锈钢接水盘 1 只，调平水泡 1 只；毛细管长度：150mm；毛细管内径：1.0mm；计时器：模式 1：计时范围 0.1S-999.9S，精度 0.1S；模式 2：计时范围 0.01S-999.99S，精度 0.01S；模式 3：计时范围 0.001S-99.999S，精度 0.001S；计时数据存储：15 组；计时操作方式：遥控器计时或面板按键操作计时。

二、游标卡尺

三、水银温度计

【实验内容】

一、实验内容及数据记录

1. 首先，用游标卡尺测量蓄水筒的内径，多测量几组数据取平均值，并填入表一中相应位置。

2. 将蓄水筒内加满纯净水，使液面高度达到 49cm 以上。

3. 将计时遥控器接入电气控制箱后面的计时遥控接口，打开电气箱上的电源开关，给实验装置供电。

4. 将实验主机下端排水口的挡盖取下，使蓄水筒内水通过下端毛细管排出，待水流呈平抛线形状并稳定后，按动计时遥控器上开始按钮，可见电气箱上电子秒表开始计时并显示。

5. 蓄水筒内的水位缓缓下降，当水位线与某一刻度线齐平时，迅速按下计时遥控器上记录按钮，电气控制箱上的计时器会自动将数据记录并保存起来。

6. 当记录完十组以上数据时，按下计时遥控器上停止按钮，停止计时，并将排水口挡块堵住排水口，停止实验。



7.此时，可以通过按动电气控制箱上“上翻”或者“下翻”按键，查看实验所记录的数据，本实验装置最多可记录十五组数据（序号为 1 至 F），五位数码管的显示内容，首位为数据的存储序号（代表记录的先后次序），后面四位显示的是每次按下记录按钮的时刻（有效数据）。将数据填入（表 e.7.1）中相应位置。

表 e.7.1 实验数据表

毛细管内径 $2a$: _____ mm 毛细管长度 L : _____ mm 蓄水筒内径 $2R$: _____ mm			
待测液体种类: _____ 液体温度 T : _____ °C			
序号 i	液面高度 h /cm	液体有效体积 V /ml	时间 t /s
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10 (A)			
液体在毛细管中的流速 $\bar{v}$ = _____ 液体粘滞系数（黏度） η = _____ 液体雷诺数 R_e = _____			

二、数据处理

1.根据公式 $V_i = h_i \pi R^2$ 计算出每个液面高度对应的液体有效体积。

2.在坐标轴上拟合出液体有效体积与时间的关系曲线 $V = V_0 e^{(-bt)}$ 得到 b 值大小。拟合时可以用 Excel、origin 等软件。

3.由公式（e.7.7）可知 $b = \frac{\rho g a^4}{8 \eta L R^2}$ ，变换得 $\eta = \frac{\rho g a^4}{8 L R^2 b}$ 式中 ρ 为液体的密度， g

为当地重力加速度， a 为毛细管半径， L 为毛细管长度， R 为蓄水筒内半径， b 已经由之前线性拟合得知；带入数值计算出液体的粘滞系数 η 。



4.利用逐差法公式计算出液体的平均流量 $\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^5 (V_{i+5} - V_i)}{\sum_{i=1}^5 (t_{i+5} - t_i)}$ ，然后根据公式

$\bar{v} = \frac{\bar{Q}}{S}$ ，计算出液体在毛细管内的平均流速 $\bar{v}$ ， S 为毛细管截面积。

5.计算出雷诺数 $R_e = \frac{\bar{\rho} \bar{v} d}{\eta}$ ，判断实验中毛细管内液体流动特征。

【注意事项】

- 1.实验时注意检查毛细管是否通畅，蓄水桶加水后要注意排除气泡，否则会影响实验测量结果。
- 2.蓄水桶加水时，液面高度最好要在 49cm 以上，实验计时起点时液面高度也尽量高一些。
- 3.观察蓄水桶中液体下降到达的高度时，视线要跟液面凹面相平。
- 4.计算时水的密度可根据附录二表 3 中根据线性插值公式得出。

【思考题】

- 1.为什么实验计时起点时蓄水桶中液面高度尽量高？
- 2.本实验中，毛细管制作参数是否影响实验结果，为什么？
- 3.本实验计算雷诺数的目的是什么？