

## 实验 2 毛细管法测液体黏度

液体在水平细圆管中的流动规律，最先是德国人哈根（Hagen）于 1839 年得出，即管中流量与管两端压强差成正比、并与圆管半径的四次方成正比，次年，法国医生泊肃叶（Poiseuille）在研究血管中血液流动规律时，发现细管中液体的流量与所用圆管长度成反比，并导出了液体流速沿圆管半径的分布规律；1852 年，魏德曼（Wiedmann）又成功导出了相关的比例系数，得出流量公式，即泊肃叶定律。他们三人的研究成果在流体力学理论发展史上有着不可磨灭的功绩。泊肃叶定律不仅给出液体在水平细圆管中的流动规律，而且为测量液体黏度提供了方法。

在医学实验研究和临床实践中，医用溶液、药液以及人体体液（如血液）黏度的测量具有非常重要的意义。液体黏度的测量方法有许多种，对牛顿流体多采用毛细管法（即本实验所用方法）、落球法，而非牛顿流体则既采用毛细管法，也采用旋转法（如旋转黏度计、锥板黏度计等）。

本实验要求学生深入理解液体在细圆管中的流动规律，熟练掌握用毛细管黏度计测定液体黏度的实验原理与方法，并了解液体黏度的其他几种测量方法。

### 一、实验原理

实际液体都具有不同程度的黏性。当液体流动时，平行于流动方向的各层液体的速度都不相同，即存在着相对滑动。于是，在各流层之间存在内摩擦力，这一内摩擦力亦称为黏性力。黏性力的方向沿相邻两流层接触面的切向，其大小与该流层处的速度梯度及接触面积成正比。比例系数  $\eta$  称为黏度，它表征了液体黏性的大小，与液体的性质和温度有关。

实际液体在水平细圆管中流动时，因黏性而呈分层流动状态，各流层均为同轴圆管。若细圆管半径为  $r$ ，长度为  $L$ ，细管两端的压强差为  $\Delta P$ ，液体黏度为  $\eta$ ，则细圆管的流量

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8\eta L}$$

上式即泊肃叶定律。

本实验采用的方法是，通过测量一定体积的液体流过毛细管的时间来计算  $\eta$ 。即

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8\eta L} \quad (2-1)$$

式中  $V$  即为  $t$  时间内流过毛细管的液体体积。

当毛细管沿竖直位置放置时，应考虑液体本身的重力作用。因此，式 (2-1) 可表示为：

$$V = \frac{\pi r^4 (\Delta P + \rho g L)}{8\eta L} \cdot t \quad (2-2)$$

本实验所用的毛细管黏度计如图 2-1 所示，它是一个 U 型玻璃管，A 与 B 之间为一毛细管，左边上部的管泡两端各有一刻痕 C 和 A，右边为一粗玻璃管且也有一管泡。实验时将一定量的液体注入右管，用吸球将液体吸至左管。保持黏度计竖直，然后让液体经毛细管流回右管。设左管液面在 C 处时，右管中液面在 D 处，两液面高度差为  $H$ ，CA 间高度差为  $h_1$ ，BD 间高度差为  $h_2$ 。因为液面在 CA 及 BD 两部分中下降及上升的极其缓慢（管泡半径远大于毛细管半径），液体内摩

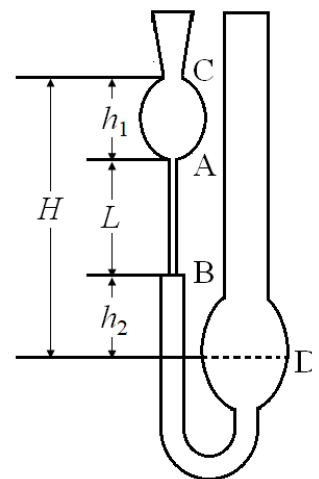


图 2-1 毛细管黏度计

擦损耗极小，故可近似作为理想液体，且流速近似为零。设毛细管内液体的流速为  $v$ ，由伯努利方程可知流管中各处的压强、流速与位置之间的关系为：

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh + P = \text{常量}$$

对于图 2-1 中所示的 C 处和 A 处，若取  $h_A = 0$ ，则有

$$\rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_c^2 + P_0 = \frac{1}{2}\rho v^2 + P_A$$

其中 C 处流速  $v_c \approx 0$ ， $P_0$  为大气压强， $P_A$  为 A 处压强。

$$\text{所以有 } P_A = P_0 + \rho gh_1 - \frac{1}{2}\rho v^2$$

$$\text{同理，对 B 处与 D 处应用伯努利方程可得 B 处压强 } P_B = P_0 - \rho gh_2 - \frac{1}{2}\rho v^2$$

$v$  为毛细管内的流体流速。由此，毛细管两端压强差为：

$$\Delta P = P_A - P_B = \rho g(h_1 + h_2) = \rho g(H - L) \quad (2-3)$$

将式 (2-3) 代入式 (2-2) 得：

$$V = \frac{\pi r^4 \rho g H}{8\eta L} \cdot t \quad (2-4)$$

在实际测量时，毛细管半径  $r$ 、毛细管长度  $L$  和 A、C 二刻线所划定的体积  $V$  都很难准确地测出，液面高度差  $H$  又随液体流动时间而改变，并非固定值，因此，直接使用 (2-4) 式计算黏度  $\eta$  相当困难。下面介绍比较测量法，即使用同一支毛细管黏度计，测两种不同液体流过毛细管的时间。测量时，如果对密度分别为  $\rho_1$  和  $\rho_2$  的两种液体取相同的体积，则在测量开始和测量结束时的液面高度差  $H$  也是相同的，分别测出两种液体的液面从 C 降到 A（体积为  $V$ ）所需的时间  $t_1$  和  $t_2$ ，由于  $r$ 、 $V$ 、 $L$  都是定值，因此可得下式

$$\frac{V}{t_1} \propto \frac{\rho_1}{\eta_1} \text{ 和 } \frac{V}{t_2} \propto \frac{\rho_2}{\eta_2} \quad (2-5)$$

式 (2-5) 中  $\frac{V}{t_1}$  和  $\frac{V}{t_2}$  分别是体积为  $V$  的两种液体流过毛细管的平均流量。(2-5) 中的两式相比可得

$$\eta_2 = \eta_1 \frac{\rho_2 t_2}{\rho_1 t_1} \quad (2-6)$$

式中  $\eta_1$  和  $\eta_2$  分别为两种不同液体的黏度，若已知  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  和  $\eta_1$ ，只要测出  $t_1$  和  $t_2$  就可求出第二种液体的黏度。这种方法就叫做比较测量法。

## 二、实验装置及材料

毛细管黏度计（如图 2-1 所示），温度计，秒表，密度计，移液管，量筒，吸球，蒸馏水（实验中使用的饮用纯净水）、无水乙醇、废酒精容器等。

## 三、实验前应回答的问题

1. 请写出用毛细管法测量液体黏度的测量模型以及该模型成立的前提条件。
2. 实验时为什么黏度计要保持竖直位置，是否一定要保持竖直位置？

3. 实验前为什么要用待测液将黏度计洗一次？
4. 实验中为什么要记录水的温度？如何保证实验前后的水温基本不变？如果实验前后，水温相差较大，实验数据应如何处理？
5. 实验室使用的毛细管黏度计的  $H$  约为 20cm， $L$  约为 10cm，毛细管直径约为 0.5mm。请根据 2-4 式估算 3ml 水流过毛细管需要多长时间？

#### 四、实验内容：用比较法测无水乙醇的黏度

1. 先用蒸馏水清洗移液管，再用移液管将 6ml 的蒸馏水注入黏度计右管中，然后将蒸馏水吸至左管且使液面高于 C 刻痕以上。吸的过程中要缓慢仔细，以防气泡混入毛细管，最后将左管上端橡皮管用手捏住。
2. 使黏度计保持竖直位置，然后放开手，当液面降至刻痕 C 时撤下秒表，记下液面自 C 降到 A 所用时间  $t_1$ ，并重复五次取  $t_1$  的平均值。
3. 将水倒出并用无水乙醇洗涤黏度计（特别是毛细管部分），洗涤后的无水乙醇倒入指定废酒精容器中，然后用移液管将 6ml 的无水乙醇注入黏度计右管，重复上述步骤，测出无水乙醇液面自 C 降到 A 所用的时间  $t_2$ ，重复测 5 次。（数据记录可参考表 1）
4. 实验过程中要观察温度的变化和记录温度  $\theta$ 。用密度计测量水的密度，并分别从附表中查得无水乙醇的密度和水的黏度。
5. 求无水乙醇的黏度  $\eta_2$  及其不确定度。

#### 注意事项：

1. 实验中吸取的水和无水乙醇体积必须相同。
2. 在计时过程中，当液面下降至 A 处时，因管半径变小而流速增大，应及时准确地撤下秒表。
3. 水与无水乙醇两根移液管不能搞错。在取放移液管时，应小心轻放，用毕要放入指定的容器内，特别注意不能弄脏，以免污染整瓶液体而影响实验。

#### 附实验数据记录（参考表格）

实验室室温：      °C；湿度：      %

表 1 测量水和无水乙醇从 C 线到 A 线下降的时间

测量次数 $i$	$t_1$ 直接读数	$t_1/s$	$t_2$ 直接读数	$t_2/s$
1				
2				
3				
4				
5				
平均				

实验前水温  $\theta_1 =$  \_\_\_\_\_ °C，实验后水温  $\theta_2 =$  \_\_\_\_\_ °C，平均水温  $\bar{\theta} =$  \_\_\_\_\_ °C。

水的密度  $\rho_1 =$  \_\_\_\_\_  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

查表得，无水乙醇密度  $\rho_2 =$  \_\_\_\_\_  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，水的黏度  $\eta_1 =$  \_\_\_\_\_  $\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

**参考文献:**

1. 钟锡华、周岳明, 力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2004: 258~260
2. 王鸿儒, 物理学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1999: 54~57
3. 葛炜, 医用物理实验[M]. 上海: 上海医科大学出版社, 1997: 38~41
4. 梁励芬、蒋平, 大学物理简明教程[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2004: 142~152
5. 复旦天欣科教仪器有限公司, FD-LSM-A 变温毛细管法液体黏度测量实验仪产品说明书, 2007

**附表 1 水的黏度**

温度/°C	黏度 $\eta$ / $\times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$	温度/°C	黏度 $\eta$ / $\times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$	温度/°C	黏度 $\eta$ / $\times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$
0	1.787	11	1.271	21	0.987
1	1.728	12	1.235	22	0.955
2	1.671	13	1.202	23	0.932
3	1.618	14	1.169	24	0.911
4	1.567	15	1.139	25	0.890
5	1.519	16	1.109	26	0.870
6	1.472	17	1.081	27	0.851
7	1.428	18	1.053	28	0.833
8	1.386	19	1.027	29	0.815
9	1.346	20	1.002	30	0.798
10	1.307				

注: 如测出的温度有小数部分, 常用内插法进行处理, 例如求 12.4°C 时水的黏度值, 其方法为  $\eta = \eta_{12} + 0.4 \times (\eta_{13} - \eta_{12}) = 1.235 + 0.4 \times (1.202 - 1.235) = 1.222 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$

**附表 2 无水乙醇在不同温度时的黏度**

温度/°C	黏度 $\eta$ / $\times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$	温度/°C	黏度 $\eta$ / $\times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$
0	1.730	25	1.096
5	1.623	30	1.003
10	1.466	35	0.914
15	1.332	40	0.834
20	1.200		

附表 3 无水乙醇的密度

温度/°C	密度 $\rho$ / $\times 10^3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	温度/°C	密度 $\rho$ / $\times 10^3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	温度/°C	密度 $\rho$ / $\times 10^3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	温度/°C	密度 $\rho$ / $\times 10^3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
0	0.80625	10	0.79788	20	0.78945	30	0.78097
1	0.80541	11	0.79704	21	0.78860	31	0.78012
2	0.80457	12	0.79620	22	0.78775	32	0.77927
3	0.80374	13	0.79535	23	0.78691	33	0.77841
4	0.80290	14	0.79451	24	0.78606	34	0.77756
5	0.80207	15	0.79367	25	0.78522	35	0.77671
6	0.80123	16	0.79283	26	0.78437	36	0.77585
7	0.80039	17	0.79198	27	0.78352	37	0.77500
8	0.79956	18	0.79114	28	0.78267	38	0.77414
9	0.79872	19	0.79029	29	0.78182	39	0.77329