

实验三

液体黏滞系数的测定

黏滞系数，又叫黏度，黏度的大小取决于流体的性质，同时与温度有关。一般来说，液体的黏度随温度升高而减小，气体的黏度随温度升高而增大。当黏度在一定温度下为常量时，称为牛顿流体，一般来说为小分子所组成的均匀流体如水、酒精和血浆等。当黏度在一定温度下不是一个常量，称为非牛顿流体，如高分子溶液、胶体粒子分散系统和含有血细胞的血液等。

练习一：用奥氏黏度计测定酒精的黏滞系数

用奥氏黏度计测定液体的黏滞系数这一实验方法，在医学上有特殊的意义。因为当进行人的全血、血浆和血清的黏滞系数测定以诊断疾病时，不可能抽取病人大量血液，用奥氏黏度计测定液体的黏滞系数时使用少量液体即可进行，因此医学生要学习并掌握这一方法。

一、实验目的

1. 掌握用奥氏黏度计法测黏滞系数的方法。
2. 掌握应用泊肃叶定律测黏滞系数的原理。
3. 进一步了解液体的黏滞性对流体的影响。

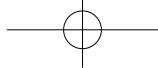
二、实验器材

奥氏黏度计、温度计、秒表、10 mL 量筒、胶管、吸耳球、支架、比重计、水、酒精。

三、实验原理

当液体通过等截面水平毛细管时，如果管内的半径为 R ，管长为 L ，管的两端压强差为 Δp ，在时间 t 内流过液体的体积为 V ，则根据泊肃叶公式：

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta L} \Delta P \quad (3-1)$$



$$V=QT \quad (3-2)$$

$$\eta = \frac{\pi \Delta P t R^4}{8VL} \quad (3-3)$$

奥氏黏度计是本实验的主要仪器，它的形状如图 3-1 所示，它是一个 U 形管，其中一边管子较粗，另一边较细，B 是一个小球泡，上下各有刻度 m、n。球泡下面是一毛细管 e。

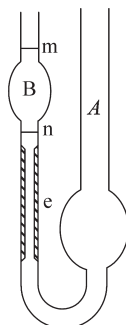


图 3-1 奥氏黏度计

如果使一定体积 V 的两种不同液体（以 B 球刻痕 m、n 间的体积为标准）在同样条件下，垂直通过毛细管 e，可以证明，泊肃叶公式也成立，此时有：

$$\eta_1 = \frac{\pi \Delta P_1 t_1 R^4}{8VL} \quad (3-4)$$

$$\eta_2 = \frac{\pi \Delta P_2 t_2 R^4}{8VL} \quad (3-5)$$

式中， t_1 、 t_2 分别为两种液体流过 e 所需时间， η_1 、 η_2 分别为它们的黏滞系数。比较式 (3-4)、式 (3-5)，得：

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\Delta p_1 t_1}{\Delta p_2 t_2} \quad (3-6)$$

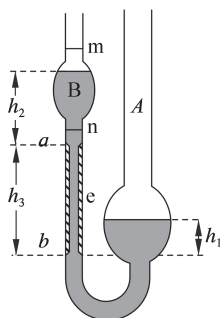


图 3-2 Δp 的推导



Δp_1 、 Δp_2 等于多少呢? 在实验过程中, 我们以相同体积的不同液体放入奥氏黏度计中, 把它吸向 B 球, 然后使之通过毛细管 e, 假定在某一瞬间, 液体处于如图 3-2 所示状态, 根据实际液体伯努利方程, 对毛细管两端 a、b 两点, 有

$$(P_0 + \rho gh_2) + \rho gh_3 + \frac{\rho V^2}{2} = (P_0 + \rho gh_1) + \frac{\rho V^2}{2} + \Delta P$$

式中, P_0 为大气压强, V 为溶液流经 e 的平均速度, Δp 为单位体积液体流过毛细管 e 所消耗的能量, 亦即 a、b 两点间的压强差。整理该式:

$$\rho g (h_2 + h_3 - h_1) = \Delta p$$

$h_2 + h_3 - h_1 = \Delta h$ 为每一瞬间奥氏黏度计两管液面间的高度差, 即:

$$\rho g \Delta h = \Delta p \quad (3-7)$$

若在实验中放进奥氏黏度计的两液体体积相等, 就可在两次实验中的每一瞬间 Δh 相等, 而使 Δp_1 、 Δp_2 值时时成比例。根据式 (3-6)、式 (3-7), 得

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\rho_1 g \Delta h t_1}{\rho_2 g \Delta h t_2} = \frac{\rho_1 t_1}{\rho_2 t_2}$$

$$\eta_2 = \eta_1 \frac{\rho_2 t_2}{\rho_1 t_1} \quad (3-8)$$

我们用上述的比较测量法, 可以无需知道毛细管的 R 、 L 、 V 的值, 也无需测算 Δh , 便可求出 η_2 (η_1 、 ρ_1 、 ρ_2 为已知量), 这一方法还可以避免因测 R 、 L 、 Δh 、 V 而产生的误差, 可提高精确度。

四、实验步骤

1. 测定酒精流经奥氏黏度计毛细管的时间 t_2

(1) 将一定体积的酒精注入已经烘干的奥氏黏度计中, 然后如图 3-3 所示将仪器安装好 (水面高于奥氏黏度计的刻痕 m)。注意调整黏度计, 使之垂直。

(2) 将吸耳球套于胶管, 慢慢将酒精往上吸, 直至上液面超过刻痕 m 以上, 用手将胶管捏住, 取下吸球。

(3) 松开胶管, 让液体慢慢下降, 当液面经过刻痕 m 时, 启动秒表。液面下降到刻痕 n 时, 停止秒表, 记下时间 t_2 。

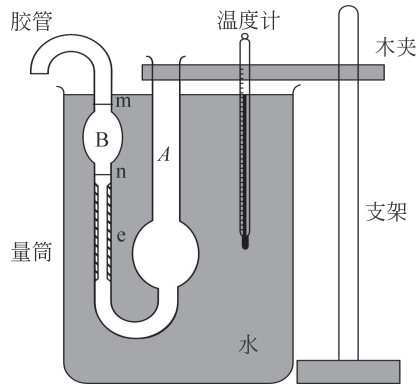
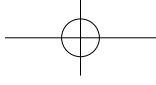


图 3-3 实验装置

(4) 重复步骤 (2) 和 (3) 3~5 次。

2. 测定蒸馏水流经奥氏黏度计毛细管的时间 t_1

(1) 将酒精倒入回收瓶里，用蒸馏水将奥氏黏度计清洗干净。

(2) 将相同体积的蒸馏水加入奥氏黏度计中，按测定酒精的 t_2 的方法，测定球 B 的蒸馏水流过毛细管 e 所用的时间 t_1 ，重复测量 3~5 次。

3. 使用比重计，测出水和酒精的密度 ρ_1 和 ρ_2 ，并记下水的温度 T 。

五、数据记录及结果

1. 查表的数据

$\eta_1 =$ _____ $\rho_1 =$ _____ $\rho_2 =$ _____ $T =$ _____

2. 测量数据

表 3-1 测量数据

时间	X_i	平均值 $\bar{X} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Delta X_i$	绝对误差 $\Delta X_i = X_i - \bar{X} $	平均绝对误差 $\Delta X = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Delta X_i$	相对误差 $E = \frac{\Delta X}{\bar{X}}$
t_1					
t_2					



3. 结果计算

$$\text{乙醇的黏度: } \overline{\eta_2} = \frac{\rho_2 t_2}{\rho_1 t_1} \eta_1$$

$$\text{相对误差: } E = \frac{\Delta \eta_2}{\eta_2} = \frac{\Delta t_1}{t_1} + \frac{\Delta t_2}{t_2}$$

$$\text{绝对误差: } \Delta \eta_2 = \overline{\eta_2} \times E$$

$$\text{实验结果: } \eta_2 = \overline{\eta_2} \pm \Delta \eta_2$$

六、误差分析

1. 操作与测量误差

如液体体积控制不当, 实验要求注入黏度计的水和酒精体积必须相同, 若水的实际体积偏小或酒精体积偏大, 会导致计算出的酒精黏滞系数偏大; 反之则偏小。

2. 计时与读数误差

手动操作秒表计时存在人为反应延迟, 可能造成计时起点和终点不准确; 观察液面时, 视线未与刻痕水平也会导致读数偏差。

3. 仪器垂直度

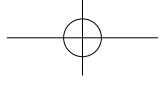
黏度计必须严格垂直固定, 若仪器倾斜, 液体流动的驱动力(重力势能差)和流动路径发生变化, 导致时间测量不准确。

4. 温度控制

液体黏滞系数对温度极为敏感。实验应记录液温而不是室温, 并确保整个测量过程中温度恒定。

七、注意事项

- (1) 手拿黏度计时, 不能同时捏住两边侧管, 只捏一边侧管即可, 以免折断。
- (2) 水和酒精的体积, 在实验时一定要相等; 实验中不要把液体吸入胶皮管中, 避免液体体积发生微小变化。
- (3) 注意奥氏黏度计下端弯曲处不要碰到烧杯底部, 防止折断。
- (4) 奥氏黏度计尽量要竖直。



(5) 实验所用酒精要回收，不要倒扔。

【思考题】

(1) 为什么要将奥氏黏度计浸入水中？

(2) 为什么要使奥氏黏度计垂直？

(3) 如果上吸的速度太快，会有什么情况发生？对实验有什么影响？

练习二：用落球法测定酒精的黏滞系数

一、实验目的

(1) 掌握利用激光光电传感器进行时间与物体运动速度测量的方法。

(2) 理解落球法测量液体黏滞系数的基本原理，熟练掌握该方法的实验操作流程。

(3) 探究液体黏滞系数随温度等关键因素的变化规律。

(4) 观测落球法测量液体黏滞系数所需实验条件的满足情况，针对不满足条件的场景进行合理修正。

二、实验器材

落球法液体黏滞系数实验仪，1000mL 量筒，磁性小钢珠，镊子，螺旋测微器，温度计，蓖麻油、比重计，游标卡尺、钢卷尺。

三、实验原理

落球法测量液体黏滞系数的核心原理是基于黏性流体对运动物体的阻碍作用（黏滞阻力）与物体运动状态的平衡关系。当小球在黏性液体中竖直下落时，会受到重力（ G ）、浮力（ F ）和黏滞阻力（ f ）三个力的作用（图 3-4），其运动状态从加速逐渐过渡到匀速，此时三个力达到平衡，该匀速运动的速度称为收尾速度（或沉降速度），是实验测量的关键物理量。



图 3-4 小球沉浮中的受力

如果小球的半径为 r ，液体的黏滞系数为 η ，收尾速度为 v ，液体的密度为 ρ ，小球的密度为 ρ_0 ，重力加速度为 g 。

根据斯托克斯定律，对于球形物体在无限广延的黏性液体中缓慢下落时，小球受到的黏性阻力为：



$$f = 6\pi\eta rv \quad (3-9)$$

当小球在液体中匀速下落时，重力、浮力和黏性阻力达到平衡，即

$$G - F - f = 0 \quad (3-10)$$

其中， $G = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0 g$ ， $F = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g$ ，代入上式可得

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0 g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g = 6\pi\eta rv$$

整理可得：

$$\eta = \frac{2r^2 g (\rho_0 - \rho)}{9v} \quad (3-11)$$

实验中，通过激光光电传感器测量小球经过两段固定距离的时间，计算出小球的收尾速度 v ；同时测量小球直径、液体温度，查阅小球与液体的密度参数，代入公式即可计算出液体的黏滞系数。

需注意，斯托克斯定律的适用条件为“无限广延液体”（即容器尺寸远大于小球尺寸），若实验中容器直径(D)与小球直径(d)之比不满足远大于1的条件，需对测量结果进行修正，收尾速度 v 修正为

$$v = v_0 (1 + 2.4d/D) (1 + 3.3d/2H)$$

此时：

$$\eta = (1/18) d^2 g t (\rho_0 - \rho) / L (1 + 2.4d/D) (1 + 1.6d/H) \quad (3-12)$$

四、实验步骤

1. 调整黏滞系数测定仪及实验装备。

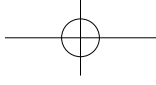
(1) 调整底盘水平，在仪器横梁中间部位放铅锤定位器，调节底盘三个旋钮，使铅锤尖顶对准底盘的十字中心点。

(2) 将实验架上的上、下两个激光器接通电源，可看见其发出红光。调节上、下两个激光器，使其红色激光束平行地对准锤线。

(3) 取回铅锤，将盛有被测液体的量筒放置到实验架底盘中央，并将铅锤定位器用滤纸吸干残液，备用。

(4) 在实验架上放上落球定位漏斗，落下一小球，看其是否能阻挡光线，若不能，则适当调整激光器位置。

2. 用温度计测量油温，在全部小球下落完成后再测量一次油温，平均值作为实际油温。



3. 用电子分析天平测量 10~20 颗小钢珠的质量,用比重瓶法测其体积,计算小钢球的密度。用液体密度计测量蓖麻油的密度。用游标卡尺测量筒的内径,用钢卷尺测量油柱深度。

4. 用秒表测量下落小球的收尾速度

(1) 从标尺读出上、下二个激光束之间的距离。

(2) 用螺旋测微器测量小球直径,重复测量 3 次以上。

(3) 将小球放入落球定位漏斗,当小球落下,阻挡上面的红色激光时,用秒表开始计时。当小球下落到阻挡下面的红色激光时,计时停止,读出下落时间,重复测量 5 次以上。最后计算蓖麻油的黏度。

5. 用激光光电门与电子计时仪器代替电子秒表,测量液体的黏度(注意:激光束必须通过玻璃圆筒中心轴),将测量结果与公认值进行比较。

五、数据记录及结果

1. 测量数据

$\rho_{\text{球}}$ _____ $\rho_{\text{液}}$ _____ 筒的内径 = _____ 油柱深度 = _____

表 3-2 钢珠直径和小球下落距离测量数据

测量项目	X_i	平均值 $\bar{X} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Delta X_i$	绝对误差 $\Delta X_i = X_i - \bar{X} $	平均绝对误差 $\Delta X = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Delta X_i$	相对误差 $E = \frac{\Delta X}{\bar{X}}$
钢珠直径 (mm)					
小球下落 距离 (cm)					

2. 黏滞系数的测定

表 3-3 黏滞系数测量数据

温度 (°C)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t_4 (s)	t_5 (s)	$\bar{t}$ (s)	$\bar{\eta}$ (Pa·s)



液体的黏度： $\bar{\eta} = (1/18) \bar{d}^2 g \bar{t} (\rho_0 - \rho) / \bar{L} (1 + 2.4 \bar{d} / D) (1 + 3.3 \bar{d} / 2H)$

相对误差： $E = \frac{\Delta \eta}{\bar{\eta}} = \frac{\Delta d}{\bar{d}} + \frac{\Delta t}{\bar{t}} + \frac{\Delta L}{\bar{L}}$

绝对误差： $\Delta \eta = \bar{\eta} \times E$

实验结果： $\eta = \bar{\eta} \pm \Delta \eta$

六、误差分析

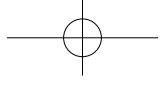
1. 激光光电门对正偏差、计时器自身精度限制及游标卡尺、螺旋测微器等测量工具的分度值与估读误差，影响计时、尺寸等参数的准确性。
2. 量筒非无限广延，容器边界产生影响，虽有修正公式仍难完全消除；油温过高或小球速度过快可能引发湍流，偏离斯托克斯公式适用条件。
3. 小球表面残留杂质、下落旋转，或仪器水平、定位调节不当，导致运动状态异常；重复测量中初始条件差异引入偶然误差，数据处理的公式近似也会带来偏差。

七、注意事项

1. 液体必须静置足够时间，避免因气泡和温度不均匀导致测量偏差。
2. 量筒直径应远大于小球直径（至少 20 倍）。
3. 小球采用轻放方式从液面中心处下落，避免初速度、碰壁或产生漩涡，确保下落轨迹为管中心竖直线。
4. 保证玻璃管内液体深度足够，使小球下落能形成稳定的匀速直线运动阶段（匀速段需避开管口和液面区域）。
5. 保持实验过程中温度恒定。
6. 小钢珠贮存必须清洗干净，并用滤纸吸干残留液体。

【思考题】

1. 如何判断小球在作匀速运动？
2. 斯托克斯定律的适用条件是什么？本实验中如何保证这些条件？
3. 用激光光电开关测量小球下落时间的方法测量液体黏滞系数有何优点？



附表一 水的黏滞系数和密度

温度 (°C)	水的黏滞系数 (Pa·s)	水的密度 (g/cm ³)
12	1.2363×10^{-3}	0.999542
13	1.2028×10^{-3}	0.999404
14	1.1709×10^{-3}	0.999271
15	1.1404×10^{-3}	0.999126
16	1.1111×10^{-3}	0.998969
17	1.0828×10^{-3}	0.998800
18	1.0559×10^{-3}	0.998621
19	1.0299×10^{-3}	0.998430
20	1.0050×10^{-3}	0.998424
21	0.9810×10^{-3}	0.998017
22	0.9579×10^{-3}	0.997795
23	0.9358×10^{-3}	0.997563
24	0.9142×10^{-3}	0.997321
25	0.8937×10^{-3}	0.997069
26	0.8737×10^{-3}	0.996809
27	0.8545×10^{-3}	0.996538
28	0.8360×10^{-3}	0.996258
29	0.8180×10^{-3}	0.995969
30	0.8007×10^{-3}	0.995672
31	0.7840×10^{-3}	0.995366
32	0.7679×10^{-3}	0.995051
33	0.7523×10^{-3}	0.994728
34	0.7371×10^{-3}	0.994397
35	0.7225×10^{-3}	0.994055

附表二 酒精 - 水混合液的黏滞系数 ($\times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$)

酒精重量所占 (%)		50	60	70	80	90	100
温度 (°C)	10	4.18	3.77	3.268	2.710	2.101	1.466
	15	3.44	3.14	2.770	2.319	1.982	1.332
	20	2.87	2.67	2.370	2.008	1.610	1.206
	25	2.40	2.24	1.937	1.748	1.424	1.096
	30	2.02	1.93	1.767	1.531	1.279	1.003
	35	1.72	1.66	1.529	1.355	1.147	0.914
	40	1.499	1.447	1.344	1.203	1.035	0.834

附表三 酒精 - 水 (90%) 混合液的黏滞系数 ($\times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$)

温度 (°C)	η
22	1.536
23	1.498
24	1.461
25	1.424