

物理实验报告



南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

学号: 11910104 姓名: 王奕童 日期: 2020年5月8日 星期: 星期五下午

液体黏度的测定

1. 实验目的

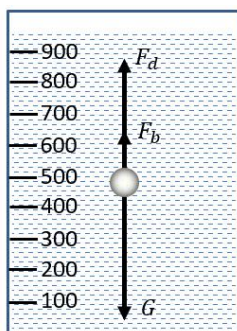
学习用落球法测量液体黏度的原理和方法

2. 实验原理

小球在液体中下落时, 除受到重力和浮力的作用外, 还受到液体的粘滞阻力, 合力可表为

$$F = G - F_b - F_d \quad (1)$$

其中, $G = \frac{1}{6}\pi\phi^3\rho g$ 表示重力, $F_b = \frac{1}{6}\pi\phi^3\rho_0 g$ 表示浮力。 ϕ , ρ 和 ρ_0 分别表示小球的直径, 小球的密度和液体的密度。 $g = 9.7883 \text{ N/kg}$ 表示 Sustech 区域重力加速度。



小球在液体中下落过程中受力示意图

粘滞阻力的表达式与液体的流动形态密切相关。液体的流动形态分为层流和湍流。层流是一种稳定的流动, 整个流动可划分成互不干扰的流动层, 粘滞阻力的表达式较为简单; 湍流是一种非稳定的流动, 伴随着涡旋和混沌边界等现象, 粘滞阻力的表达式非常复杂。在流体力学中, 液体的流动形态由雷诺数来预测。雷诺数越小, 流动形态越接近层流; 反之, 容

易产生湍流。对于小球在液体中下落的情形，雷诺数的定义为

$$Re = \frac{v\rho_0\phi}{\eta} \quad (2)$$

其中， η 表示液体黏度， v 表示小球下落速度。不难验证，本实验的相关参数可保证 $Re \ll 1$ ，流动形态为层流，且粘滞阻力的表达式可简化为

$$F_d = 3\pi \phi v \quad (3)$$

此即著名的 Stokes 公式。

由 Stokes 公式可知，在小球加速下落的过程中，粘滞阻力不断增加。最终，小球会达到一个终止速度 v_f ，此时粘滞阻力与重力、浮力达到平衡，即

$$3\pi \phi v_f = \frac{1}{6}\pi\phi^3(\rho - \rho_0)g \quad (4)$$

达到平衡后，小球以速度 v_f 匀速下落。由方程 (4) 可得黏度计算公式

$$\eta = \frac{1}{18} \cdot \frac{\phi^2(\rho - \rho_0)g}{v_f} \quad (5)$$

注意，上述黏度计算公式仅适用于液体无限宽广的理想情况。由于本实验中的液体处在量筒中，因而计算黏度时需要使用 Ladenburg 修正公式

$$\eta = \frac{1}{18} \cdot \frac{\phi^2 g (\rho - \rho_0)}{v_f (1 + 2.4\phi/D)(1 + 1.7\phi/H)} \quad (6)$$

其中， D 和 H 分别代表液柱的直径和高度。

3.实验器材

量筒，蓖麻油（密度 0.96 g/cm^3 ），钢球（密度 7.90 g/cm^3 ），温度计，钢尺，游标卡尺，千分尺和秒表

4.实验内容

- (1) 在量筒中注入约 900ml 蓖麻油备用；
- (2) 用温度计测量实验室温度，实验开始和结束时各测一次，取平均值。
- (3) 用钢尺测量油柱高度 H ；

- (4) 用游标卡尺测量油柱直径 D ;
- (5) 量筒上均匀地分布着 9 道容积刻度线, 分别对应于 100 ml , 200 ml , 300 ml , 400 ml , 500 ml , 600 ml , 700 ml , 800 ml 和 900 ml 。测量量筒相邻刻度线间距 L ;
- (6) 选取三个钢球, 用千分尺测量直径。按直径从小到大, 分别标记为 A, B 和 C。
- (7) 用镊子将钢球 A 移至油面中心附近无初速释放, 用秒表依次记录其经过 800 ml , 600 ml , 400 ml 和 200 ml 4 个刻线处的时刻。对于钢球 B 和 C, 进行类似操作, 记录相应时刻;
- (8) 绘制钢球下落的 s - t 图像, 并通过拟合确定各自终止速度;
- (9) 对每个钢球, 根据公式 (6) 分别计算蓖麻油黏度 η_A 、 η_B 和 η_C 。

5.实验数据

- (1) 实验室温度 (保留 3 位有效数字)

实验开始时	实验结束时	平均值
26.2°C	27.6°C	26.9°C

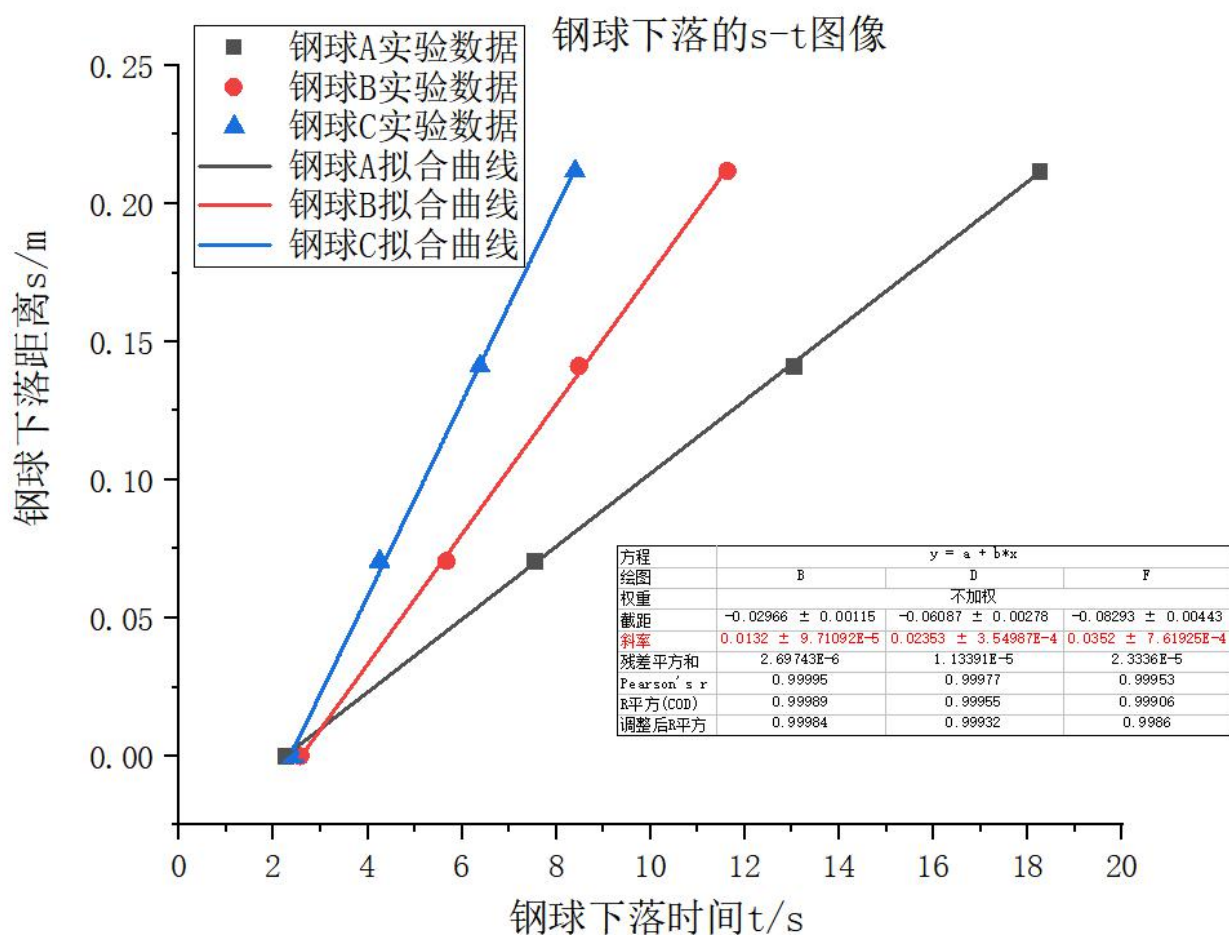
- (2) 油柱高度、油柱直径和量筒相邻刻度线间距

测量量	H	D	L
测量值	33.50cm	60.10mm	35.30mm

- (3) 钢球直径

测量量	ϕ_A	ϕ_B	ϕ_C
测量值	1.505mm	2.001mm	2.506mm

- (4) 钢球下落 s - t 图像, 附带拟合结果框。



得到图中三条线性拟合的结果：

钢球 A: $s = 0.0132t - 0.0297$ ，斜率为 $0.0132m/s$

钢球 B: $s = 0.0235t - 0.0609$ ，斜率为 $0.0235m/s$

钢球 C: $s = 0.0352t - 0.0829$ ，斜率为 $0.0352m/s$

(5) 钢球终止速度（保留 3 位有效数字）

根据图像的物理意义，钢球下落的 s-t 图像的斜率即代表钢球的下落速度。而根据拟合结果，图像线性拟合的斜率可以代表钢球下落的最终速度。

测量量	v_A	v_B	v_C
测量值	$0.0132m/s$	$0.0235m/s$	$0.0352m/s$

(6) 基于三个钢球的直径和终止速度，分别计算蓖麻油黏度。（保留 3 位有效数字）

依据公式(6)分别计算蓖麻油黏度

$$\eta = \frac{1}{18} \cdot \frac{\phi^2 g (\rho - \rho_0)}{v_f (1 + 2.4 \frac{\phi}{D}) (1 + 1.7 \frac{\phi}{H})}$$

测量量	η_A	η_B	η_C
测量值	$0.606 Pa \cdot s$	$0.589 Pa \cdot s$	$0.604 Pa \cdot s$

6. 实验结论

本次实验通过落球法，使用了量筒，蓖麻油（密度 0.96 g/cm^3 ），钢球（密度 7.90 g/cm^3 ），温度计，钢尺，游标卡尺，千分尺和秒表等实验仪器对蓖麻油黏度进行了测量，分别测得钢球 A、B、C 情况下的黏度系数为 $\eta_A = 0.606 Pa \cdot s$ 、 $\eta_B = 0.589 Pa \cdot s$ 、 $\eta_C = 0.604 Pa \cdot s$ ，平均值为 $\bar{\eta} = 0.600 Pa \cdot s$ 。

通过本次实验，学习掌握了用落球法测量液体黏度的原理和方法，了解了液体黏度的物理意义，学习了对多组数据使用线性拟合的数据处理方法。

7. 误差来源分析

- ①温度误差：实验前后温度有变化，从 26.2°C 变化至 27.6°C 。而温度改变会使得液体的粘度系数发生改变，从而引起误差；
- ②测量误差：实验中会因为人工计时和人为判断是否钢球到达刻度线而存在误差，会导致测量钢球到达刻度线的时间存在误差，从而影响实验结果；
- ③操作误差：本次实验中用镊子将钢球移至油面中心附近无初速释放很难保证钢球沿中心轴下落，并且有可能引起湍流，引起非稳定的流动，从而影响实验结果的准确性；

8. 思考题

(1) 本实验为何要测量实验室温度？

答：因为本实验中使用了落球法来测定液体黏度，而落球法对外界条件要求较高，温度偏高或者偏低都会影响蓖麻油的密度和黏度，会对蓖麻油的黏度实验测量带来不利影响，因此在实验前后都需要测量实验室的温度。

(2) 分别计算三个钢球下落的雷诺数，看其是否满足 $Re \ll 1$?

答：雷诺数计算公式： $Re = \frac{v\rho_0\phi}{\eta}$ ，其中 v 是钢球的下落速度， ρ_0 是蓖麻油的密度， ϕ 是钢球

直径， η 是蓖麻油的黏性系数。

①钢球 A:

$$\begin{aligned} Re_A &= \frac{v_A \rho_0 \phi_A}{\eta_A} \\ &= \frac{(0.0132 m/s) \times (0.96 g/cm^3) \times (1.505 mm)}{0.606 Pa \cdot s} \\ &= 0.031 \end{aligned}$$

②钢球 B:

$$\begin{aligned} Re_B &= \frac{v_B \rho_0 \phi_B}{\eta_B} \\ &= \frac{(0.0235 m/s) \times (0.96 g/cm^3) \times (2.001 mm)}{0.589 Pa \cdot s} \\ &= 0.077 \end{aligned}$$

③钢球 C:

$$\begin{aligned} Re_C &= \frac{v_C \rho_0 \phi_C}{\eta_C} \\ &= \frac{(0.0352 m/s) \times (0.96 g/cm^3) \times (2.506 mm)}{0.604 Pa \cdot s} \\ &= 0.140 \end{aligned}$$

经过①②③的计算，得到三个钢球的雷诺数分别是 $Re_A = 0.031$ 、 $Re_B = 0.077$ 、 $Re_C = 0.140$ 。

钢球 A 和钢球 B 和 1 相差的数量级有到达 2 个数量级，故钢球 AB 满足 $Re \ll 1$;

钢球 C 和 1 相差的数量级没有达到 2 个数量级，故钢球 C 不满足 $Re \ll 1$ 。

(3) 哪个钢球最先达到终止速度?

答：钢球 A。

原因：在下落过程中，钢球的运动状态满足：

(因为钢球并非在无限宽广的液体里下落，故对等式中的速度 v 进行了修正)

$$m \frac{dv}{dt} = ma = \frac{1}{6} \pi \phi^3 (\rho - \rho_0) g - 3\pi \eta \phi v \left(1 + \frac{2.4\phi}{D}\right) \left(1 + \frac{1.7\phi}{H}\right)$$

这是一个关于 v 和 t 的微分方程，得到的解为：

$$v = \left(1 - e^{\frac{-g(1-\frac{\rho_0}{\rho})t}{v_f}}\right) v_f$$

假定我们近似 $v = 0.999v_f$ 为钢球到达终止速度的状态，则可以得到达到该状态所需的时间是：

$$t = \frac{3 \ln 10}{g(1-\frac{\rho_0}{\rho})} v_f$$

$$v_A = 0.0132 m/s$$

而根据实验数据 (5) 中得到的最终速度： $v_B = 0.0235 m/s$ ， $v_A < v_B < v_C$ ，故由上式计算得到

$$v_C = 0.0352 m/s$$

的时间应当满足： $t_A < t_B < t_C$ ，因此钢球 A 会先到达最终速度。

(4) 钢球 C 加速过程持续多长时间？

答：根据思考题 (3) 中将 $v = 0.999v_f$ 近似为终止速度状态的情形，得到加速时间：

$$t = \frac{3 \ln 10}{g(1-\frac{\rho_0}{\rho})} v_f$$

在本实验中， $g = 9.7883 m/s^2$ ， $\rho_0 = 0.96 g/cm^3$ ， $\rho = 7.90 g/cm^3$ ；在实验数据 (5) 中测得最终速度 $v_{cf} = 0.0352 m/s$ 。

$$\begin{aligned} \therefore t_C &= \frac{3 \ln 10}{g(1-\frac{\rho_0}{\rho})} v_f \\ &= \frac{3 \ln 10}{(9.7883 m/s^2)(1-\frac{0.96 g/cm^3}{7.90 g/cm^3})} 0.0352 m/s \\ &= 0.0283 s \end{aligned}$$

得到钢球 C 的加速时间 $t_C = 0.0283 s$

(5) 若三个钢球依次在另外一种植物油中下落，雷诺数均可忽略，那么理论上通过三个球分别计算出的黏度大小关系如何？

答：理论上由于测得都是同一种植物油，测量结果应当无显著差异，因为液体黏度是液体本

身的性质，与测量所用的钢球的半径应当无关。但是实验情形下中由于不能满足在无限宽广的液体中下落的条件，会产生 $\eta_C > \eta_B > \eta_A$ 的实验结果。

实验情形下 $\eta_C > \eta_B > \eta_A$ 结果的原因分析：在液体中，雷诺数越小说明黏性力影响越显著，并且该液体的流动更加趋近于层流。钢球在更换后的植物油中可以下落，说明钢球密度 ρ 和植物油密度 ρ_0 满足： $\rho > \rho_0$ 。

在实验原理中最后得到的关于黏度的表达式为：

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{\phi^2 g(\rho - \rho_0)}{v_f(1 + \frac{2.4\phi}{D})(1 + \frac{1.7\phi}{H})}, \text{ 可以变形为 } \eta = \frac{1}{18} \frac{g(\rho - \rho_0)}{v_f(\frac{1}{\phi} + \frac{2.4}{D})(\frac{1}{\phi} + \frac{1.7}{H})}。$$

从变形后的式中，可以发现：随着 ϕ 增大， $v_f(\frac{1}{\phi} + \frac{2.4}{D})(\frac{1}{\phi} + \frac{1.7}{H})$ 会减小，因此

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{g(\rho - \rho_0)}{v_f(\frac{1}{\phi} + \frac{2.4}{D})(\frac{1}{\phi} + \frac{1.7}{H})} \text{ 会增大。}$$

$$\phi_A = 1.505mm$$

而在实验数据中，我们得到 $\phi_B = 2.001mm$ ， $\phi_C > \phi_B > \phi_A$ ，因此我们从理论上分析，分别得到

$$\phi_C = 2.506mm$$

的黏度大小关系应该是 $\eta_C > \eta_B > \eta_A$ ，即钢球 C>钢球 B>钢球 A。