

实验八 用落球法测量液体的粘滞系数

【实验目的】

1. 学习和掌握一些基本物理量的测量。
2. 学习激光光电门的使用方法。
3. 用落球法测量蓖麻油的粘滞系数。

【实验仪器】

DH4606落球法液体粘滞系数测定仪、卷尺、螺旋测微器、电子天平、游标卡尺、温度计、比重计、镊子、钢球若干。

【实验原理】

处在液体中的小球受到铅直方向的三个力的作用：小球的重力 mg （ m 为小球质量）、液体作用于小球的浮力 ρgV （ V 是小球体积， ρ 是液体密度）和粘滞阻力 F （其方向与小球运动方向相反）。如果液体无限深广，在小球下落速度 v 较小情况下，

有

$$F = 6\pi\eta rv \quad (3-4-1)$$

上式称为斯托克斯公式，其中 r 是小球的半径； η 称为液体的粘度，其单位是 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

小球在起初下落时，由于速度较小，受到的阻力也就比较小，随着下落速度的增大，阻力也随之增大。最后，三个力达到平衡，

即

$$mg = \rho gV + 6\pi\eta v_0 r \quad (3-4-2)$$

此时，小球将以 v_0 作匀速直线运动，由（2）式

可得：

$$\eta = \frac{(m - V\rho)g}{6\pi v_0 r} \quad (3-4-3)$$

令小球的直径为 d ，并用 $m = \frac{\pi}{6}d^3\rho'$ ， $v_0 = \frac{l}{t}$ ， $r = \frac{d}{2}$ 代入（3-4-3）式

得

$$\eta = \frac{(\rho' - \rho)gd^2t}{18l} \quad (3-4-4)$$

其中 ρ' 为小球材料的密度, l 为小球匀速下落的距离, t 为小球下落 l 距离所用的时间。

实验过程中, 待测液体放置在容器中, 故无法满足无限深广的条件, 实验证明上式应进行如下修正方能符合实际情况:

$$\eta = \frac{(\rho' - \rho)gd^2t}{18l} \cdot \frac{1}{(1 + 2.4\frac{d}{D})(1 + 1.6\frac{d}{H})} \quad (3-4-5)$$

其中 D 为容器内径, H 为液柱高度。

当小球的密度较大, 直径不是太小, 而液体的粘度值又较小时, 小球在液体中的平衡速度 v_0 会达到较大的值, 奥西思-果尔斯公式反映出了液体运动状态对斯托克斯公式的影响:

$$F = 6\pi\eta v_0 r \left(1 + \frac{3}{16}\text{Re} - \frac{19}{1080}\text{Re}^2 + \dots\right) \quad (3-4-6)$$

其中, Re 称为雷诺数, 是表征液体运动状态的无量纲参数。

$$\text{Re} = \frac{\rho dv_0}{\eta} \quad (3-4-7)$$

当 $\text{Re} < 0.1$ 时, 可认为 (3-4-1)、(3-4-5) 式成立; 当 $0.1 < \text{Re} < 1$ 时, 应考虑 (3-4-6) 式中 1 级修正项的影响, 当 Re 大于 1 时, 还须考虑高次修正项。

考虑 (6) 式中 1 级修正项的影响及玻璃管的影响后, 粘度 η_1 可表示为:

$$\eta_1 = \frac{(\rho' - \rho)gd^2}{1.8v_0(1 + 2.4d/D)(1 + 3\text{Re}/16)} = \eta \frac{1}{1 + 3\text{Re}/16} \quad (3-4-8)$$

由于 $3\text{Re}/16$ 是远小于 1 的数, 将 $1/(1 + 3\text{Re}/16)$ 按幂级数展开后近似为 $1 - 3\text{Re}/16$,

(3-4-8) 式又可表示为:

$$\eta_1 = \eta - \frac{3}{16}v_0 d \rho \quad (3-4-9)$$

已知或测量得到 ρ' 、 ρ 、 D 、 d 、 v_0 等参数后, 由 (3-4-5) 式计算粘度 η , 再由 (3-4-7) 式计算 Re , 若需计算的 Re 的 1 级修正, 则由 (3-4-9) 式计算经修正的粘度 η_1 。在国际单位制中, η 的单位是 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ (帕斯卡·秒), 在厘米, 克, 秒制中, η 的单位是 P (泊) 或 cP (厘泊), 它们之间的换算关系是:

$$1\text{Pa}\cdot\text{s} = 10\text{P} = 1000\text{cP} \quad (3-4-10)$$

【实验内容及步骤】

仪器介绍

DH4606落球法液体粘滞系数测定仪主要包括两部分：测试架和测试仪。右图1为测试架结构图：

- 1、落球导管
- 2、发射端 I
- 3、发射端 II
- 4、量筒
- 5、水平调节螺钉
- 6、底盘
- 7、支撑柱
- 8、接收端 II
- 9、接收端 I
- 10、横梁

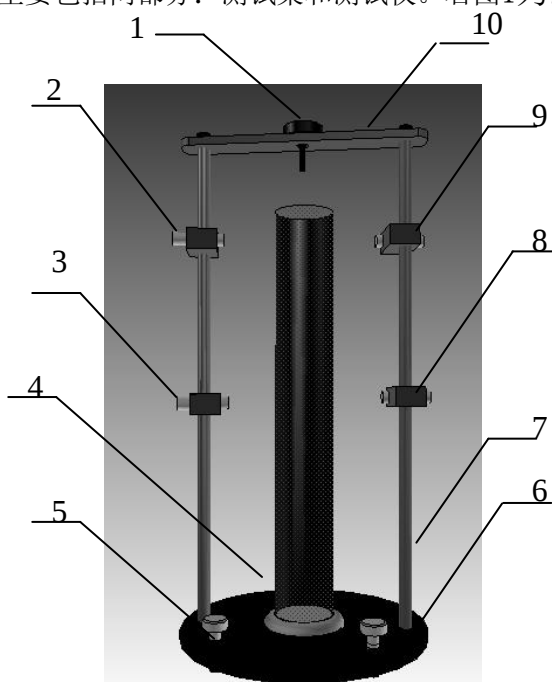


图 1 测试架结构图

测试仪使用说明

DH4606落球法液体粘滞系数测定仪测试仪面板如图2所示，使用时测试架上端装光电门 I，下端装光电门 II，且两发射端装在一侧，两接收端装在一侧。将测试架上的两光电门“发射端 I”，“发射端 II”和“接收端 I”，“接收端 II”分别对应接到测试仪前面板的“发射端 I”，“接收端 I”和“发射端 II”，“接收端 II”上。检查无误后，按下测试仪后面板上的电源开关，此时数码管将循环显示两光电门的状态：

“L-1-0”表示光电门 I 处于没对准状态；“L-1-1”表示光电门 I 处于对准状态；

“L-2-0”表示光电门 II 处于没对准状态；“L-2-1”表示光电门 II 处于对准状态。



图 2 测试仪面板图

当两光电门都处于对准状态时，按下测试仪前面板上的“启动”键，此时数码管将显示“HHHHH”，表示启动状态；当下落小球经过上面的光电门（光电门 I）而未经过下面光

电门（光电门Ⅱ）将显示“-----”，表示正在测量状态；若测量时间超过99.999s则显示超量程状态“LLLL”；当小球经过光电门Ⅱ后将显示小球在两光电门之间的运行时间。重新按下“启动”键后放入第二个小球，经过两光电门后，将显示第二个小球的下落时间，依次类推。若在实验过程中，不慎碰到光电门，使光电门偏离，将重新循环显示两光电门状态，此时需重新校准光电门。

1. 测试架调整

（1）将线锤装在支撑横梁中间部位，调整粘滞系数测定仪测试架上的三个水平调节螺钉，使线锤对准底盘中心圆点；

（2）将光电门按仪器使用说明上的方法连接。接通测试仪电源，此时可以看到两光电门的发射端发出红光线束。调节上下两个光电门发射端，使两激光束刚好照在线锤的线上；

（3）收回线锤，将装有测试液体的量筒放置于底盘上，并移动量筒使其处于底盘中央位置；将落球导管安放于横梁中心，两光电门接收端调整至正对发射光（可参照上述测试仪使用说明校准两光电门）。待液体静止后，将小球用镊子从导管中放入，观察能否挡住两光电门光束（挡住两光束时会有时间值显示），若不能，适当调整光电门的位置。

2. 用温度计测量待测液体温度 T_0 ，当全部小球投下后再测一次液体温度 T_1 ，求其平均温度 $\bar{T}$ 。

3. 用卷尺测量光电门的距离 L ；测量6次小球下落的时间，并求其平均值时间 $\bar{s}$ 。

4. 用电子天平测量多个小球的质量，求其平均质量 $\bar{m}$ 。

5. 用螺旋测微器测量多个小球的直径，求其平均值 $\bar{d}$ ，计算小球的密度 ρ' 。

6. 用游标卡尺测量量筒内径 D 。

7. 用卷尺测量液体高度 H 。

8. 用密度计测量待测液体密度 ρ （精确测量时进行该步骤，密度计自备）。

9. 相关量代入公式（3-4-5），计算液体的粘滞系数 η ，并与该温度 $\bar{T}$ 下的粘滞系数相比较。不同温度下的蓖麻油的粘滞系数可参照附表（3-4-1）。

【数据记录与处理】

1. 自行设计表格，记录数据。

2. 液体的粘滞系数 η 不确定度的传递公式

$$E_{\eta} = \sqrt{\left(\frac{\mu_{C(\rho)}}{(\rho - \rho_0)}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{C(\rho)}}{(\rho - \rho_0)}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{C(t)}}{t}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{C(l)}}{l}\right)^2 + \left[\frac{\frac{2}{d} + \left(\frac{2.4}{D}\right)}{(1 + 2.4d/D)} + \left(\frac{1.6}{H}\right) / (1 + 1.6d/H)\right]^2 \mu_{C(d)}^2 + \left[\frac{2.4dD^{-2}}{(1 + 2.4d/D)}\right]^2 \mu_{C(D)}^2 + \left(\frac{1.6dH^{-2}}{1 + 1.6d/H}\right)^2 \mu_{C(H)}^2}$$

根据微小误差原理对其取舍，正确表达测量结果。

3. 计算百分误差，分析实验结果。

【注意事项】

- 1、测量时，将小球用酒精擦拭干净；
- 2、等被测液体稳定后再投放小球；
- 3、全部实验完毕后，将量筒轻移出底盘中心位置后用磁钢将钢球吸出，将钢球擦拭干净放置于酒精溶液中，以备下次实验用。

【思考题】

- 1、为何要对公式（3-4-4）进行修正？
- 2、如何判断小球在液体中已处于匀速运动状态？
- 3、影响测量精度的因素有哪些？
- 4、设计实验

设计用多管落球测定液体的粘滞系数的方法；

V_0 称为收尾速度，它是小球在无限广延的液体中匀速下落时的速度，由（3）式可知，要测得 η 的关键是测得 V_0 ，但是无限广延的条件在实验室无法实现，采用多管法，即用一组不同直径的管子安装在同一水平底板上。如图 1 所示，本液体粘滞系数仪是由五只不同内径 D 的圆柱形玻璃管子组成，分别固定在铝合金底板上。各管子的轴线与底板垂直，底板上的水准泡指示仪器水平状态，由底板下部的四只有机玻璃螺丝调节。每只管子刻有相距一定距离的 A、B 两刻度线。上端的 A 刻度为小球通过时开始计时刻度，下端的 B 刻线为小球终止时刻度。平时用有机玻璃板盖在管口上面。

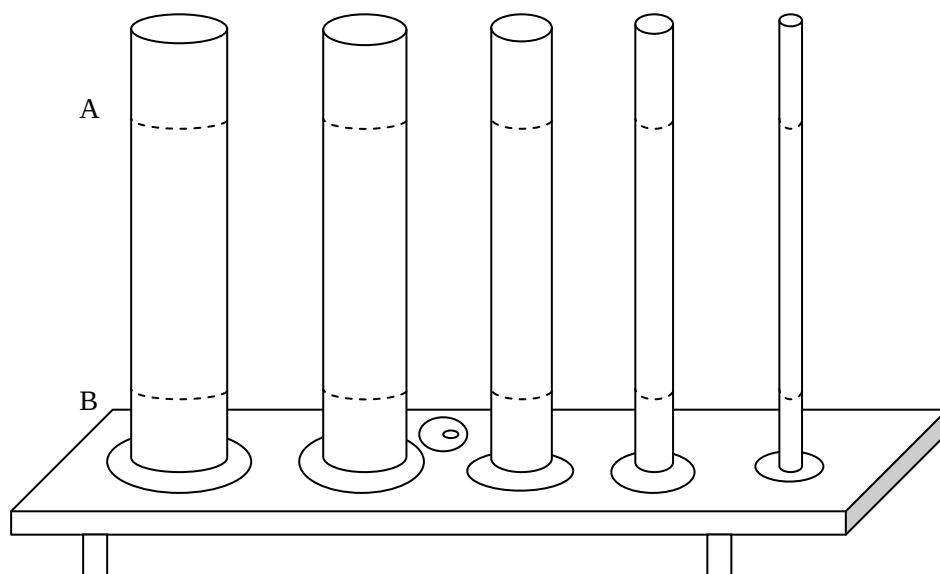


图1 落球法测液体粘滞系数装置示

每根管上的 A、B 两刻度线间距均相等，用 h 表示，上刻度线 A 距液面有适当的距离，以至当小球下落经过 A 刻度线时可认为已作匀速运动。依次测出同一小球通过各管中两刻度线 A、B 间所需的时间 t ，若各管的直径用一组 D 表示，则大量的实验数据和用线性拟合进行数据处理表明， t 与 d/D 成线性关系，以 t 为纵轴，以 d/D 为横轴，根据实验数据作出直线，延长该直线与纵轴相交，其截距为 t_0 ， t_0 就是当 $D \rightarrow \infty$ 时，即在无限广延的液体中小球匀速下落通过距离 S 所需的时间。即无限广延条件下的收尾速度为

$$V_0 = \frac{S}{t_0} \quad (4)$$

测出 m 、 d 、 ρ 、 V_0 代入 (7-3) 式可以算出 η 值，

1. 还需那些测量仪器设计合理的测量次数，实验步骤，拟出数据表格。
2. 设计数据的处理方法，正确表达测量结果；
3. 分析比较两种实验的优劣。

参考： 钢球平均密度： $\rho' = 7.925 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

蓖麻油出厂密度： $\rho = 0.97 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

附表3-4-1：

温度-蓖麻油粘滞系数对照表

