

说明：(1)进入实验室后，未经老师允许，不能动仪器。

(2) 该文档在实验室没有纸质版；“实验内容和要求”以该文档为准，具体的仪器操作方法可以参考有关教材等；

(3)注意：每个实验台上的仪器、元件、连接线等等不能混用，各用各的，用完后，需要收拾规整整齐，放到自己的实验台上。凳子要放到实验台底下。不能把垃圾丢在实验室的任何位置。不动与实验无关的任何其他仪器等。

落球法测量液体的粘滞系数

【预习要求】

仔细阅读有关教材和其它相关资料，然后按照下面要求完成预习报告，上课时务必将预习报告带到实验室交给上课老师检查。

预习报告内容除了常规的预习报告内容外，还要在预习报告中完成下列预习思考题。

预习思考题：

1. 为何要对公式(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. 游标卡尺、螺旋测微计的使用方法及注意事项。
5. 什么是 3σ 准则？ σ 的计算公式是什么？

【实验目的】

1. 学习和掌握一些基本物理量的测量。
2. 学习激光光电门的校准方法。
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、钢球若干。

【实验原理】

(也可参考“普通物理实验(上)作者陈晓莉,王培吉著,出版日期2011.10
出版社重庆:西南师范大学出版社。在北师大“超星电子图书”里面有该书。)

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 $\rho g V$ (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

$$F = 6\pi\eta r v \quad (1)$$

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(或粘滞系数), 其单位是 $Pa \cdot s$ 。

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

$$mg = \rho g V + 6\pi\eta v_0 r \quad (2)$$

此时, 小球将以 v_0 作匀速直线运动, 由(2)式可得:

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

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)式得

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

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:

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

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：

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

其中，Re称为雷诺数，是表征液体运动状态的无量纲参数。

$$R_e = \frac{\rho d v_0}{\eta} \quad (7)$$

当 $\text{Re} < 0.1$ 时，可认为（1）、（5）式成立；当 $0.1 < \text{Re} < 1$ 时，应考虑（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：

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

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 $1 - 3\text{Re}/16$ ，

（8）式又可表示为：

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

已知或测量得到 ρ' 、 ρ 、 D 、 d 、 v_0 等参数后，由（5）式计算粘度 η ，再由（7）式计算Re，若需计算的Re的1级修正，则由（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：

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

【实验注意事项】

1. 测量时，将小球用毛巾擦拭干净；
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，以备下次实验用。
4. 具体的仪器说明将该文档的附录1。
5. 蓖麻油的粘滞系数和温度的对应表见附录2。
6. **特别注意：**温度计用完后，关掉温度记上电源开关，因为该温度记开关不会自动关闭，又因为是干电池供电，所以需要大家注意！

【实验内容和要求】

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. 用螺旋测微器测量20个小球的直径，求其平均值 \bar{d} 。

4. 计算 d 的标准偏差，用 3σ 准则去除不合格的小球，重新选择其他小球，重复3、4，直到所有小球合格。

5. 用电子天平测量20个小球的质量，求其平均质量 \bar{m} 。

6. 计算小球的密度 ρ' 。

7. 用卷尺测量光电门的距离 L ；测量10次小球下落的时间，并求其平均值时间 \bar{s} 。

8. 用游标卡尺测量量筒内径 D 。

9. 测量液柱高度 H 。

10. 相关量代入公式（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录2。

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

【实验报告要求】

实验报告应规范，应有必要的误差分析。另外，在实验报告中完成下列课后思考题。

课后思考题：

1. 实验中如果温度不稳定，会有什么现象产生，如何改进？
2. 若小球偏离中轴线而贴近筒壁下落，下落速度将如何改变？

附录1：仪器说明

1. 整体部件

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。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 I |
| 9、接收端 II | 10、横梁 |

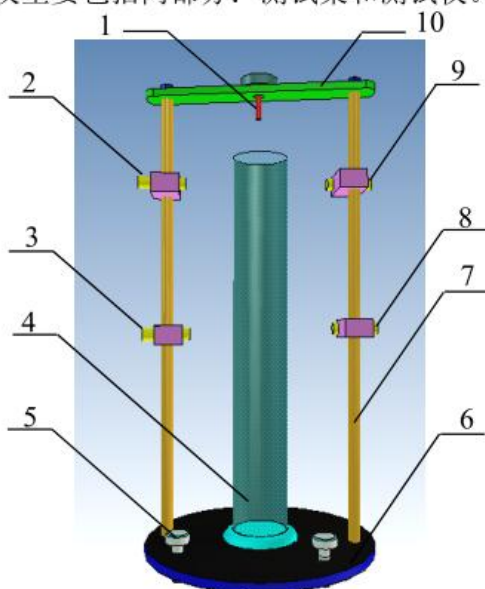


图 1 测试架结构图

2. 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“**接收端 I**”，“**发射端 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“LLLLL”；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。

附录2:

