

落球法测定液体的粘度

一、实验简介

一种液体相对于其他固体、气体运动，或同种液体内部各部分之间有相对运动时，接触面之间存在摩擦力。这种性质称为液体的粘滞性。这种摩擦力也称为粘滞力。

粘滞系数（粘度）是液体的重要性质之一，它反映液体流动行为的特征。粘度与液体的性质，温度和流速有关，因此粘度的测量在工程技术方面有着广泛的使用价值。

测量液体粘度方法有多种，如落球法、转筒法、毛细管法等，其中落球法是最基本的一种，它可用于测量粘度较大的透明或半透明液体。

二、实验原理

1. 斯托克斯公式

当半径为 r 的光滑圆球，以速度 V 在均匀的无限宽广的液体中运动时，若速度不大，球也很小，在液体中不产生涡流的情况下，斯托克斯指出，球在液体中所受到的阻力为

$$F = 6\pi\eta vr$$

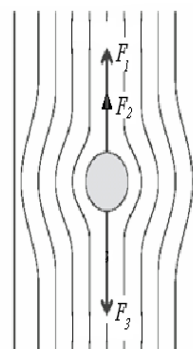
阻力的大小和物体运动速度成比例，式中 η 为液体的粘度。

当质量为 m ，体积为 V 的小球在密度为 ρ_0 的液体中下落时，作用在小球上的力有三个，球开始下落时，速度很小，阻力不大。小球作加速下降。随着速度的增加，阻力逐渐加大，速度达一定值时，阻力和浮力之和将等于重力，那时物体运动的加速度等于零，小球开始匀速下落，即

$$mg = \rho_0 Vg + 6\pi\eta vr$$

此时的速度称为终极速度。

$$\eta = \frac{(m - \rho_0 V)g}{6\pi vr}$$



2. 雷诺数的影响

斯托克斯公式是假设在无涡流的理想状态下导出的。实际小球下落时不能是这样理想状态，因此还要进行修正，已知这时的雷诺数为

$$R_e = \frac{2rv\rho_0}{\eta}$$

斯托克斯公式修正为

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

3. 容器壁的影响

在一般情况下，小球在容器半径为 R 、液体高度为 h 的液体内下落，液体在各个方向上都是无限广阔的这一假设条件是不能成立的。因此，考虑到容器壁的影响，斯托克斯公式变为

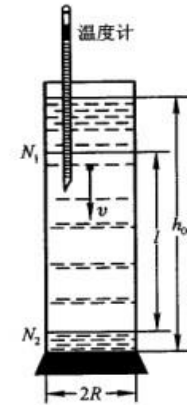


图 5.2.2-1 落球法测量液体粘度装置图

$$F = 6\pi\eta rv \left(1 + 2.4 \frac{r}{R} \right) \left(1 + 3.3 \frac{r}{h} \right) \left(1 + \frac{3}{16} \text{Re} - \frac{19}{1080} \text{Re}^2 + \dots \right)$$

4. η 的表示

$$\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho_0) g = 6\pi\eta vr \left(1 + 2.4 \frac{r}{R} \right) \left(1 + 3.3 \frac{r}{h} \right) \left(1 + \frac{3}{16} \text{Re} - \frac{19}{1080} \text{Re}^2 + \dots \right)$$

上式中 ρ 是小球的密度， g 为重力加速度，由上式得

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{(\rho - \rho_0) g d^2}{v \left(1 + 2.4 \frac{d}{2R} \right) \left(1 + 3.3 \frac{d}{2h} \right) \left(1 + \frac{3}{16} \text{Re} - \frac{19}{1080} \text{Re}^2 + \dots \right)}$$

$$\text{当 } R_e < 0.1 \text{ 时, } \eta_0 = \frac{1}{18} \frac{(\rho - \rho_0) g d^2}{v \left(1 + 2.4 \frac{d}{2R} \right) \left(1 + 3.3 \frac{d}{2h} \right)}$$

$$\text{当 } 0.1 < R_e < 0.5 \text{ 时, } \eta_1 = \eta_0 - \frac{3}{16} dv \rho_0$$

$$\text{当 } R_e > 0.5 \text{ 时, } \eta_2 = \frac{1}{2} \eta_1 \left[1 + \sqrt{1 + \frac{19}{270} \left(\frac{dv \rho_0}{\eta_1} \right)^2} \right]$$

做数据处理时，必须对 Re 进行验算，确定它的范围并进行修正，得到符合实验要求的粘度值。

三、实验内容

- 1、设计寻找小球匀速下降区的方法，测出其长度 l 。
- 2、选用三种不同直径大小的小球进行试验。（基础）
 - 1) 每种直径测 6 个小球，用螺旋测微器测定 6 个同类小球的直径，并且利用电子天平称其质量，分别取其直径和质量的平均值。
 - 2) 将一个小球在量筒中央尽量接近液面处轻轻投下，使其进入液面时初速度为零，测出小球通过匀速下降区 l 的时间 t ，重复 6 次，取平均值，然后求出小球匀速下降的速度。
 - 3) 用相应的仪器测出 R 、 h 和 ρ_0 （至少应各测量三次）及液体的温度。温度 T 应取实验开始时的温度和实验中间时、实验结束时的温度的平均值。运用对应公式计算 η_0 。
- 3、计算雷诺数 Re ，并根据雷诺数的大小，进行一级或二级修正。（提升）

四、其它实验

- 1、 选用不同形状的物体，如圆柱体、圆片代替小球（进阶）
 - 1) 研究物体在液体里下落规律；
 - 2) 找出适用的运动方程；
 - 3) 测量液体的粘度并和落球法进行比较；
- 2、用手机拍摄视频，用 Tracker 软件处理数据，测定匀速区间 （高阶）

五、注意事项

- 1、量筒内的待测油需经长时间的静止放置，以排除气泡；
- 2、要使液体始终保持静止状态，在实验过程中不可捞取小球扰动液体；
- 3、小球应该从容器正中央投下，初速度为零，测量时视线应该水平，一个投完以后应该等一会投另一个；
- 4、寻找匀速下降区(要有详细的寻找方法)；
- 5、注意做完实验要整理仪器。

六、思考题

- 1、本实验中可能引起误差的因素有哪些？
- 2、设容器内 N_1 和 N_2 之间为匀速下降区，那么对于同样材质但直径较大的球，该区间也是匀速下降区吗？反过来呢？
- 3、什么是雷诺系数？说明其物理意义，结合以上实验，分析其影响。
- 4、本实验所采用的测液体粘滞系数的方法是否对一切液体都适用？