

## 实验15 用落球法测定液体的粘滞系数

在流体中，当相邻的两层流体之间的流速不同而产生相对运动时，流层之间会产生内摩擦力。流体所具有抵抗两层流体相对滑动速度或变形的性质称为粘性，它的大小用粘滞系数来表示。粘滞系数的大小依赖于流体物质的性质，并明显的随温度变化。

液体的粘滞系数大小对其流动的阻力，流动过程功率的损耗以及传热和传质等都有很大的影响。因此，

在石油化工，高分子研究，机械润滑，水利工程，航空工程，生物工程以及医学，物理学等领域，液体粘滞系数的测定都有重要意义。

测定液体粘滞系数的方法有转筒法、毛细管法和落球法等，本实验采用落球法，它适用于如蓖麻油、甘油、变压器油等粘度较大的液体。

实验目的

1. 观察小球在液体中的运动情况，理解液体的粘滞阻力；
2. 学习用外延法实现理想条件的物理思想及方法；
3. 学习用落球法测定液体的粘滞系数。

实验原理

当小球在液体中下落时，受到三个力的作用：重力、浮力和运动的阻力。设小球的密度为  $\rho$ ，体积为  $V$ ，待测液体的密度为  $\rho_0$ ，重力加速度为  $g$ ，则重力  $\rho Vg$  方向铅直向下，

浮力  $\rho_0 Vg$  和粘滞阻力  $f$  铅直向上，如图1所示。

由于小球运动，粘附在小球表面的液体层以小球的速度运动，其余各层的速度逐渐减小，管壁处流层速度接近零。各流层因速度不同而产生相对运动。粘滞阻力不是小球与液体间的摩擦，而是液体各层间的内摩擦引起的。根据斯托克斯定律，光滑均匀的小球在无限广延的液体中下落时，若速度  $v$  不大，在运动中不产生漩涡，那么小球受到的粘滞阻力为

$$f = 6\pi\eta rv \quad (1)$$

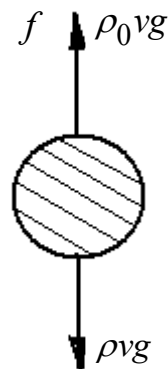


图1 小球受力

式中  $\eta$  是液体的粘滞系数， $r$  是小球半径， $v$  是小球下落时的速度。

根据小球受力，可以大致描绘出小球的运动情况：小球以零初速度进入液体开始下落，由于  $v$  比较小， $f$  也比较小， $\rho Vg > \rho_0 Vg + f$ ，小球做加速运动。随着小球下落速度  $v$  的增大，阻力  $f$  也逐渐增大，小球加速度减小。当小球速度增大到某一  $v_0$  值时，小球所受合外力为零，于是小球就以  $v_0$  匀速下落。这时

$$V(\rho - \rho_0)g = 6\pi\eta r v_0$$

用小球直径  $d$  来表示体积  $V$ 。则有

$$\frac{1}{6}\pi d^3(\rho - \rho_0)g = 3\pi\eta d v_0$$

从而可得液体的粘滞系数为

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18v_0} \quad (2)$$

式中  $v_0$  是小球在无限广延的均质液体中匀速下落的速度，称为收尾速度（也称终极速度）。

。已知上式右边各值后，就可以求出液体的粘滞系数  $\eta$ 。

式（2）是根据斯托克斯公式（1）导出的。该式成立的条件是液体均匀、静止且无限广延。在实验室条件下，小球不是在无限广延的液体中，而是在尺寸有限的圆筒中沿其轴线下落，由于器壁对小球运动的影响，小球在不同内径的圆筒中下落的收尾速度不同。实验表明，小球在圆筒中下落的收尾速度  $v$  与在无限广延的流体中的收尾速度  $v_0$  有如下关系

$$v_0 = v(1 + k \frac{d}{D}) \quad (3)$$

式中  $D$  为圆筒的内径， $k$  为修正系数。由上式可知，当  $D \rightarrow \infty$  时， $k \frac{d}{D} \rightarrow 0$ ，则  $v \rightarrow v_0$ 。

。实验中测得的收尾速度  $v$  比在无限广延的液体中的  $v_0$  小。在实验室条件下，测得收尾速度  $v$ ，用式（3）进行修正，就可以按式（2）求得液体粘滞系数了。

修正系数  $k$  可以这样求出：选取几个不同内径的圆筒，注入待测液体，使各圆筒内液体高度  $H$  相同（ $H \gg d$ ）。用同一个小球，分别沿各圆筒中轴线由液面以零初速度下落。待其达到匀速后，测量小球通过相同距离  $S$  所用时间  $t_1, t_2, \dots$ ，作  $t \sim \frac{d}{D}$  图（如图2）。实验

表明， $t \sim \frac{d}{D}$  图线是一条直线，将直线外延，在  $t$  轴上的截距  $t_0$  即  $\frac{d}{D} \rightarrow 0$ （ $D \rightarrow \infty$ ）时，

小球通过距离  $S$  的时间。  $\frac{S}{t_0}$  即在  $D \rightarrow \infty$  时的收尾速度  $v_0$ 。

由  $t \sim \frac{d}{D}$  关系有

$$t = t_0(1 + k \frac{d}{D})$$

此直线的斜率即修正系数  $k$

由

$$\frac{S}{t} = \frac{S}{t_0} \frac{1}{(1 + k \frac{d}{D})}$$

可得式（3）  $v_0 = v(1 + k \frac{d}{D})$

在本实验室的条件下， $k = 2.4$

液面高度  $H$  是有限值，也会对收尾速度有影响，可以进行类似的修正。不过通常

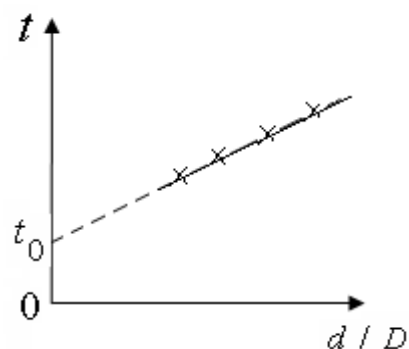


图2  $t$  与  $d/D$  的关系

$H \gg d$ ，本实验中略去对纵向限制的修正。考虑了液体受横向尺寸限制的修正后，液体的粘滞系数为

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18\nu(1 + 2.4\frac{d}{D})} \quad (4)$$

式中  $\nu$  是实验中测得的收尾速度。

#### 实验仪器

玻璃圆筒（内盛待测液体），游标卡尺、电子秒表、磁铁、小钢球。

#### 实验内容

1. 测圆筒内径  $\bar{D}$ 。用游标卡尺在6个不同部位测圆筒内径，将数据记入表1。

2. 测小球直径  $d$ 。用游标卡尺测小钢球直径，在每个小球不同部位测4次，得该小球平均直径  $d$ ，3个小球的编号与其平均直径切勿混淆。将数据记入表2。

3. 确定测量计时起点。如图3，测出圆筒位置A、B的高度差  $S_{AB}$ ，以及小球匀速通过  $S_{AB}$  的时间，便可求得收尾速度  $\nu$ 。但小球到达A处时是否已进入匀速状态是必须首先确认的。

可以在液体下  $h \sim 10\text{cm}$  处选一个刻度作为A，在A下方

另选一刻度作为B。用卡尺量出  $S_{AB}$ 。另用一个直径较大的小

球（不必测其直径）自液面释放，记录其经过  $S_{AB}$  的时间  $t_1$ 。

将A下移到  $A'$ ，B下移到  $B'$ ，且  $S_{A'B'} = S_{AB}$ 。用磁铁将小球吸

出液体。再让该小球下落，测其经过  $S_{A'B'}$  所用时间  $t_2$ ，若  $t_2 = t_1$ ，

则认为A可作为记录小球匀速运动的起点。否则应在A以下另

选刻度重复上述步骤，直到  $t_{A'B'} = t_{AB}$

4 测收尾速度  $\nu$ 。在计时起点以下选A、B两刻度，

用卡尺量出  $S_{AB}$ ，用牙签尖部沾住1号小球，在液面处以零初速

度释放小球，使其沿圆筒轴线下落。记录小球经过  $S_{AB}$  的时间。对2号和3号小球重复此步

骤。测出相应的收尾速度，按式（4）计算  $\eta$ 。求出该液体粘滞系数  $\bar{\eta}$ 。

3. 记录液体温度。用磁铁吸出小球，擦拭干净放入盒中。

#### 数据表格

小球密度  $\rho =$  \_\_\_\_\_ 重力加速度  $g =$  \_\_\_\_\_  $\text{m/s}^2$

液体密度  $\rho_0 =$  \_\_\_\_\_ 液体温度  $t =$  \_\_\_\_\_  $^\circ\text{C}$

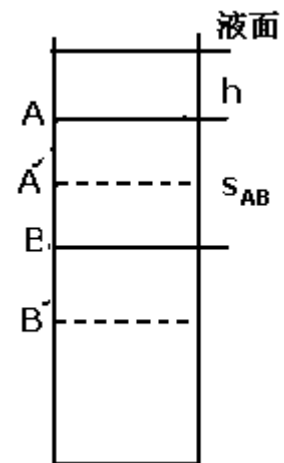


图3 确定计时起点A

表1 圆筒直径D

次数	1	2	3	4	5	6	$\bar{D}(mm)$
D (mm)							

表2 小球直径d

次数 编号	1	2	3	4	$\bar{d}(mm)$
$d_1$					
$d_2$					
$d_3$					

表3 计时起点A

$h_A(mm)$	$S_{AB}(mm)$	$t_{AB}(s)$	$h_{A'}(mm)$	$S_{A'B'}(mm)$	$t_{A'B'}(s)$

表4 收尾速度v

小球编号	起点位置 $h_A(cm)$	$S_{AB}(mm)$	下落时间 $t(s)$	收尾速度 $v(m/s)$	$\eta$	$\bar{\eta}$
1						
2						
3						

观察与思考

用直径d差别比较大的几个小球下落，观察下落速度的差别。为什么在确定计时起点位置时要用d较大的小球进行判断？