

物理实验报告

实验名称 落球法测定液体在不同温度中的粘度

专 业 _____

姓 名 _____

学 号 _____

指导教师 _____

实验时间 11 月 30 日 第二 大节

理学院 物理实验中心

Zero

实验目的

- (1) 了解PID温控实验仪的原理。
- (2) 用落球法测量蓖麻油在不同温度下的黏滞系数。
- (3) 练习用停表计时，用螺旋测微器测直径。

实验原理 一 在静止液体中下落的小球受到重力、浮力和黏滞阻力 F 的作用。如果小球的速度 v 很小，且液体可以看成在各方面上都是无限广阔的，则从流体力学的基本方程可以导出黏滞阻力的斯托克斯公式，即 $F = 3\pi\eta vd$ 。①

由于黏滞阻力与小球速度 v 成正比，小球在下落很短一段距离后，所受合力平衡，小球将以 v_0 匀速下落。此时有 $\frac{\pi d^3}{6}(\rho - \rho_0)g = 3\pi\eta v_0 d$ ② 可导出黏滞系数 $\eta =$ 表达式

$$\eta = (\rho - \rho_0)gd^2 / (18v_0) \quad ③$$

考虑到该实验条件是一玻璃圆管，因此，液体在管 r 方向要求无限广阔的条件没有满足，需要对公式修正，得到如下表达式， $\eta = (\rho - \rho_0)gd^2 / [18v_0(1 + 2.4d/D)]$ ④

当小球的密度较大，直径不是太小，而液体的黏度值又较小时，小球在液体中的平衡速度 v_0 会达到较大的值，因此还需要考虑液体运动状态对斯托克斯公式的影响。

$$F = 3\pi\eta v_0 d (1 + \frac{3}{16}Re - \frac{19}{1080}Re^2 + \dots) \quad ⑤ \quad (Re \text{ 为雷诺数})$$

$$Re = v_0 d \rho_0 / \eta \quad ⑥$$

当 Re 小于0.1时，可认为式①、式④成立。当 $0.1 < Re < 10.1$ 时，应考虑式⑤中1级修正项的影响，当 Re 大于10.1时，还应考虑高次修正项。

在取1级修正项的影响及玻璃圆管的影响后，黏度 η_1 可表示为

$$\eta_1 = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18v_0(1 + 2.4d/D)(1 + 3Re/16)} = \eta \frac{1}{1 + 3Re/16} \quad ⑦$$

由于 $3Re/16 \ll 1$ ，将 $1/(1 + 3Re/16)$ 按幂级数展开后近似为 $1 - 3Re/16$ ，式⑦又可表示为

$$\eta_1 = \eta - \frac{3}{16}v_0 d \rho_0 \quad ⑧$$

测量得到 ρ 、 ρ_0 、 D 、 d 、 v_0 等参数后，由式④计算黏度 η ，再由式⑧计算 Re ，若需计算 Re 的1级修正，则由式⑧计算修正后的黏度 η_1 。

实验仪器

变温黏滞系数测定仪, ZKY-PID温控实验仪, 停表, 螺旋测微器

小球若干, 镊子

实验步骤与数据记录

(1) 检查使用的实验仪器是否达到实验标准, 例如水箱水量是否在加水水位上下限之间

(2) 利用螺旋测微器测定小球的直径 d , 反复测量8次并求平均值, 记入表中。

表1 测定小球的直径

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	平均值
d/mm	1.448	1.446	1.445	1.446	1.443	1.442	1.445	1.447	1.445

(3) 设定温度, 从 25°C 初次升高至 55°C , 5°C 为一间隔差, 每次调节温度后再等待 2min , 使样品管中的待测液体温度与加热水温完全一致, 温度稳定后, 用镊子夹住小球沿样品管中心轻轻放入液体, 观察小球是否一直沿中心下落, 若样品管倾斜, 应调节其铅直, 测量过程中, 尽量避免对液体产生扰动。

(4) 用停表测定小球下落 20cm (从样品管上刻度 5cm 到 25cm) 所用时间 t , 记入表中, 以相同的操作测量多次, 求出平均值, 再将计算出的黏滞系数与部分温度下的标准值比较, 计算相对误差。 ($\rho = 7.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, $\rho_0 = 0.95 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, $D = 2.0 \times 10^{-2} \text{m}$)

表2 测定黏滞系数

$T/^{\circ}\text{C}$	Time (s)						$v/(\text{m/s})$	测量值 $\eta/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\eta/(\text{Pa}\cdot\text{s})$
	1	2	3	4	5	平均			
25	19.47	19.48	19.50	19.51	19.47	19.486	0.010	0.6468	
30	13.36	13.31	13.33	13.35	13.33	13.336	0.015	0.4427	0.451
35	9.25	9.24	9.25	9.23	9.24	9.242	0.022	0.3068	
40	6.57	6.59	6.55	6.56	6.57	6.568	0.030	0.2180	0.231
45	4.51	4.53	4.54	4.53	4.52	4.53	0.044	0.1504	
50	3.60	3.57	3.59	3.57	3.58	3.582	0.056	0.1189	
55	2.79	2.79	2.82	2.85	2.84	2.818	0.071	0.0935	

(5) 绘制液体黏滞系数随温度变化规律曲线。

(6) 实验结束后, 用镊子将小球夹入蓖麻油中保存, 以备下次实验使用。

实验数据处理

1. 测量小球的直径并求出平均值 $\bar{d} = (d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + d_6 + d_7 + d_8) / 8$
 $= 1.445 \text{ mm}$

2. 测定黏滞系数 (同时测出每组的平均时间 t , 速度 v , 黏滞系数 η)

已知 $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\rho_0 = 0.95 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $D = 2.0 \times 10^{-2} \text{ m}$

当 $T = 25^\circ\text{C}$ 时, $v = \frac{D^2}{t} = 0.010 \text{ m/s}$, $\eta = ((\rho - \rho_0)gd^2) / (18v_0(1 + 2.4d/D)) = 0.6468$

$Re = v_0 d \rho_0 / \eta = 0.0218$, $Re < 0.1$, η 无需修正

当 $T = 30^\circ\text{C}$ 时, $v = \frac{D^2}{t} = 0.015 \text{ m/s}$, $\eta = ((\rho - \rho_0)gd^2) / (18v_0(1 + 2.4d/D)) = 0.4427$

$Re = v_0 d \rho_0 / \eta = 0.0465$, $Re < 0.1$, η 无需修正

当 $T = 35^\circ\text{C}$ 时, $v = \frac{D^2}{t} = 0.022 \text{ m/s}$, $\eta = ((\rho - \rho_0)gd^2) / (18v_0(1 + 2.4d/D)) = 0.3068$

$Re = v_0 d \rho_0 / \eta = 0.0969$, $Re < 0.1$, η 无需修正

当 $T = 40^\circ\text{C}$ 时, $v = \frac{D^2}{t} = 0.030 \text{ m/s}$, $\eta = ((\rho - \rho_0)gd^2) / (18v_0(1 + 2.4d/D)) = 0.2180$

$Re = v_0 d \rho_0 / \eta = 0.1918$, $1 > Re > 0.1$

修正: $\eta_1 = ((\rho - \rho_0)gd^2) / [18v_0(1 + 2.4d/D)(1 + 3Re/16)] \approx \eta - \frac{3}{16}v_0 d \rho_0 = 0.2104$

当 $T = 45^\circ\text{C}$ 时, $v = \frac{D^2}{t} = 0.044 \text{ m/s}$, $\eta = ((\rho - \rho_0)gd^2) / (18v_0(1 + 2.4d/D)) = 0.1504$

$Re = v_0 d \rho_0 / \eta = 0.4031$, $1 > Re > 0.1$

修正: $\eta_1 = ((\rho - \rho_0)gd^2) / [18v_0(1 + 2.4d/D)(1 + 3Re/16)] \approx \eta - \frac{3}{16}v_0 d \rho_0 = 0.1398$

当 $T = 50^\circ\text{C}$ 时, $v = \frac{D^2}{t} = 0.056 \text{ m/s}$, $\eta = ((\rho - \rho_0)gd^2) / (18v_0(1 + 2.4d/D)) = 0.1189$

$Re = v_0 d \rho_0 / \eta = 0.6448$, $1 > Re > 0.1$

修正: $\eta_1 = ((\rho - \rho_0)gd^2) / [18v_0(1 + 2.4d/D)(1 + 3Re/16)] \approx \eta - \frac{3}{16}v_0 d \rho_0 = 0.1061$

当 $T = 55^\circ\text{C}$ 时, $v = \frac{D^2}{t} = 0.071 \text{ m/s}$, $\eta = ((\rho - \rho_0)gd^2) / (18v_0(1 + 2.4d/D)) = 0.0935$

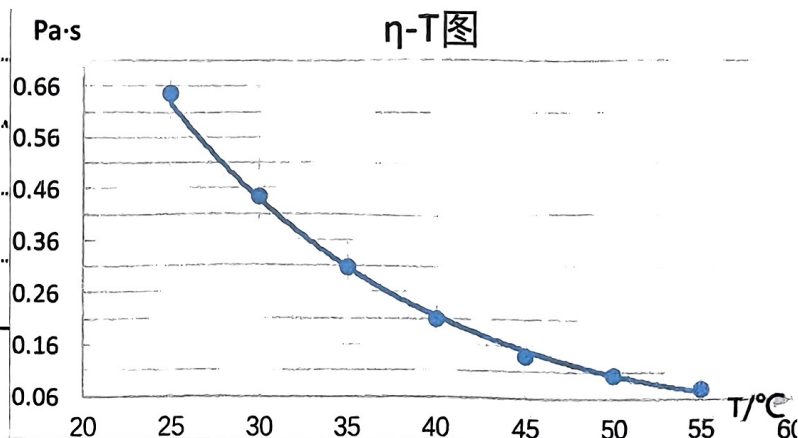
修正: $\eta_1 = ((\rho - \rho_0)gd^2) / [18v_0(1 + 2.4d/D)(1 + 3Re/16)] \approx \eta - \frac{3}{16}v_0 d \rho_0 = 0.0783$

$Re = v_0 d \rho_0 / \eta = 0.9814$, $1 > Re > 0.1$

3. 绘出 η 随 T 变化规律曲线并计算相对误差

$T = 30^\circ\text{C}$, $\delta = \left| \frac{0.4457 - 0.451}{0.451} \right| \times 100\% = 1.18\%$

$T = 40^\circ\text{C}$, $\delta = \left| \frac{0.2104 - 0.231}{0.231} \right| \times 100\% = 8.92\%$



实验结论

1. 当 $T=30^{\circ}\text{C}$ 时, 利用落球法测出的黏滞系数的相对误差较小。
2. 通过绘制的液体黏滞系数随温度变化规律曲线可知, 随着温度的升高, 液体黏滞系数减小。(在一定温度范围内, 且其它环境条件相同)
3. 斯托克斯公式的修正系数值与具体实验条件有关, 不是普适常数。

实验讨论

1. 误差分析:

① 实验仪器

- a. 螺旋测微器读数不准引起误差。
- b. PID温控实验仪示数与实际温度可能有一定误差。
- c. 使用PID温控实验仪时, 电压不稳定引起一定误差。

② 小钢球

- a. 不同的小钢球直径不同, 下落的速度不同。
- b. 小钢球下落时的初速度不同。
- c. 小钢球下落时的路径不垂直。

③ 温度

- a. 测量下落时间的时候, 油中热量有一定散失, 温度有所下降。
- b. 对液体加热时, 局部温度可能达不到要求。
- c. 环境温度对实验的影响。

2. 实验改进: “双球升降法”。设两个完全相同的小球悬挂于细丝的两端, 然后将悬丝绕过微滑轮, 使二小球置于液中。悬丝的上方打一不结, 以便悬挂钩码。由于悬丝下的左右二球完全相同, 重力和浮力相消, 运动系统处于静态平衡。

3. 误差处理

- ① 提高计时技术, 让记录的时间更加精确。(或者增加时间测量的次数)
- ② 加长液体容器的长度。(或者减小小钢球的直径)
- ③ 用密度较小的小钢球。

思考题

(1) 如何判断小球已进入匀速运动阶段？

让小球贴近液面下落，测量其经过测量区域一定距离的时间，然后再将小球在液面上面一定高度处下落，测量通过同样距离的时间，若两次时间相同，则可判断小球在做匀速运动。

(2) 从实验结果出发，讨论蓖麻油的油温和黏度的关系，能否推广到所有液体？

对于蓖麻油，在室温附近温度改变 10°C ，黏度值改变约10%。一般来说，黏度的大小取决于液体的性质与温度，温度升高，黏度将迅速减小。

(3) 落球法能否用于低黏度液体的黏度测量，为什么？

不能，黏度太小的液体对球的阻力过小，此时阻力和重力之间的比例相差过大，同时球二稳定速度也过大，计算距离不便于测量，导致实验精度不准确。

(4) 本实验中如果钢球表面粗糙对实验会有什么影响？

会，斯托克斯定律成立的条件要求球体是光滑且刚性的，如果钢球表面粗糙会使液体形成涡流，扰乱钢球的平衡。

原始记录

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	平均值
d/mm	1.448	1.446	1.445	1.446	1.443	1.442	1.445	1.447	1.445

测定系数

温度 $T/^\circ C$	时间/s					速度
	1	2	3	4	5	平均 $V/(m/s)$
25	19.47	19.48	19.50	19.51	19.47	19.486
30	13.36	13.31	13.33	13.35	13.33	13.336
35	9.25	9.24	9.25	9.23	9.24	9.242
40	6.57	6.59	6.55	6.56	6.57	6.568
45	4.51	4.53	4.56	4.53	4.52	4.53
50	3.60	3.57	3.59	3.57	3.58	3.582
55	2.79	2.79	2.82	2.85	2.84	2.818