

# 落球法测液体的粘滞系数

## 【实验目的】

- (1) 练习用停表计时，用螺旋测微器测直径。
- (2) 掌握落球法测不同温度下蓖麻油的黏度。

## 【实验仪器】

### (1) 落球法变温黏度测量仪

变温粘度仪的外型如图 1 所示。待测液体装在细长的样品管中，能使液体温度较快的与加热水温达到平衡，样品管壁上有刻度线，便于测量小球下落的距离。样品管外的加热水套连接到温控仪，通过热循环水加热样品。底座下有调节螺钉，用于调节样品管的铅直。

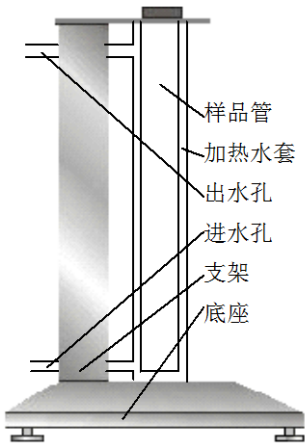


图 1 变温粘度仪

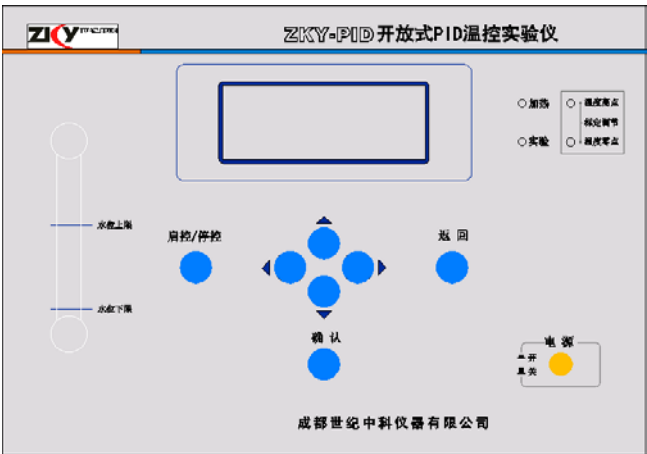


图 2 温控实验仪面板

### (2) 开放式 PID 温控实验仪

温控实验仪包含水箱，水泵，加热器，控制及显示电路等部分。

本温控试验仪内置微处理器，带有液晶显示屏，具有操作菜单化，能显示温控过程的温度变化曲线和功率变化曲线及温度和功率的实时值，能存储温度及功率变化曲线，控制精度高等特点，仪器面板如图 2 所示。

开机后，水泵开始运转，显示屏显示操作菜单，可选择工作方式，输入序号及室温，设定温度及 PID 参数。使用 ◀ ▶ 键选择项目，▲ ▼ 键设置参数，按

确认键进入下一屏，按返回键返回上一屏。

进入测量界面后，屏幕上方的数据栏从左至右依次显示序号，设定温度，初始温度，当前温度，当前功率，调节时间等参数。图形区以横坐标代表时间，纵坐标代表温度（以及功率），并可用 ▲ ▼ 键改变温度坐标值。仪器每隔 15 秒采集 1 次温度及加热功率值，并将采得的数据标示在图上。温度达到设定值并保持两分钟温度波动小于 0.1 度，仪器自动判定达到平衡，并在图形区右边显示过渡时间  $t_s$ ，动态偏差  $\sigma$ ，静态偏差  $e$ 。一次实验完成退出时，仪器自动将屏幕按设定的序号存储（共可存储 10 幅），以供必要时查看，分析，比较。

### (3) 停表

电子停表具有多种功能。按功能转换键，待显示屏上方出现----- 符号，且第 1 和第 6、7 短横线闪烁时，即进入停表功能。此时按开始/停止键可开始或停止记时，多次按开始/停止键可以累计记时。一次测量完成后，按暂停/回零键使数字回零，准备进行下一次测量。

#### 秒表计时使用说明：

按 A 键直至秒表显示，若秒表不为零。按 B 键停止计时，按 C 键复位到零。

简易计时：按 B 键开始计时；再按 B 键，停止计时；（重复按 B 键，重复开始/停止）停止计时后，按 C 键复位到零。

分段计时：按 B 键开始计时；按 C 键显示分段时间；（注意：内部计时持续）再按 C 键复位到计时；（重复按 C 键，显示分段时间或复位）复位到计时后，按 B 键停止计时；按 C 键复位到零。

两段时间显示：按 B 键开始计时；按 C 键显示第一分段时间；按 B 键记忆第二分段时间；按 C 键显示第二分段时间；再按 C 键复位到零。

### (4) 螺旋测微器

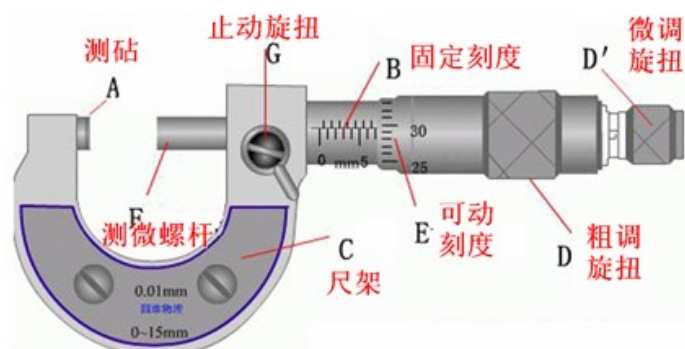


图 3 螺旋测微器示意图

螺旋测微器又称千分尺（micrometer）、螺旋测微仪、分厘卡，是比游标卡尺更精密的测量长度的工具，用它测长度可以准确到 0.01mm，测量范围为几个厘米。

螺旋测微器的精密螺纹的螺距是 0.5mm，可动刻度有 50 个等分刻度，可动刻度旋转一周，测微螺杆可前进或后退 0.5mm，因此旋转每个小分度，相当于测微螺杆前进或后退这  $0.5/50=0.01\text{mm}$ 。可见，可动刻度每一小分度表示 0.01mm，所以以螺旋测微器可准确到 0.01mm。由于还能再估读一位，可读到毫米的千分位，故又名千分尺。

**螺旋测微器使用方法如下：**

**检查零点：**缓缓转动微调旋钮  $D'$ ，使测杆（F）和测砧（A）接触，到棘轮发出声音为止，此时可动尺（活动套筒）上的零刻线应当和固定套筒上的基准线（长横线）对正，否则有零误差。

**测量：**左手持尺架（C），右手转动粗调旋钮 D 使测杆 F 与测砧 A 间距稍大于被测物，放入被测物，转动保护旋钮  $D'$  到夹住被测物，直到棘轮发出声音为止，拨动固定旋钮 G 使测杆固定后读数。

**读数：**

- 1、先读固定刻度；
- 2、再读半刻度，若半刻度线已露出，记作 0.5mm；若半刻度线未露出，记作 0.0mm；
- 3、再读可动刻度（注意估读一位）。记作  $n \times 0.01\text{mm}$ ；
- 4、最终读数结果为固定刻度+半刻度+可动刻度。（图 3 中读 7.294mm）

**注意事项：**

- 测量时，注意要在测微螺杆快靠近被测物体时应停止使用旋钮，而改用微调旋钮，避免产生过大的压力，既可使测量结果精确，又能保护螺旋测微器。
- 在读数时，要注意固定刻度尺上表示半毫米的刻线是否已经露出。
- 读数时，千分位有一位估读数字，不能随便扔掉，即使固定刻度的零点正好与可动刻度的某一刻度线对齐，千分位上也应读取为“0”。

**【实验原理】**

当液体内部各部分之间有相对运动时，接触面之间存在内摩擦力，阻碍液体的相对运动，这种性质成为液体的粘滞性，液体的内摩擦力成为粘滞力。粘滞力的大小与接触面面积以及接触面处的速度梯度成正比，比例系数  $\eta$  成为黏度（粘滞系数）。黏度的大小取决于液体的性质与温度，温度升高，黏度减小，对于蓖麻油，在室温附近温度改变  $1^{\circ}\text{C}$ ，黏度约减小 10%。

1 个在静止液体中下落的小球受到重力、浮力和粘滞阻力 3 个力的作用，如果小球的速度  $v$  很小，且液体可以看成在各方向上都是无限广阔的，则从流体力学的基本方程可以导出表示粘滞阻力的斯托克斯公式：

$$F = 3\pi\eta v d \quad (1)$$

(1) 式中  $d$  为小球直径。由于粘滞阻力与小球速度  $v$  成正比，小球在下落很短一段距离后，所受 3 力达到平衡，小球将以  $v_0$  匀速下落，此时有：

$$\frac{1}{6}\pi d^3(\rho - \rho_0)g = 3\pi\eta v_0 d \quad (2)$$

(2) 式中  $\rho$  为小球密度， $\rho_0$  为液体密度。由 (2) 式可解出粘度  $\eta$  的表达式：

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

本实验中，小球在直径为  $D$  的玻璃管中下落，液体在各方向无限广阔的条件不满足，此时粘滞阻力的表达式可加修正系数  $(1+2.4d/D)$ ，而 (3) 式可修正为：

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18v_0(1 + 2.4d/D)} \quad (4)$$

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，奥西恩-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：

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

其中  $\text{Re}$  称为雷诺数，是表征液体运动状态的无量纲参数。

$$\text{Re} = v_0 d \rho_0 / \eta \quad (6)$$

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

考虑 (5) 式中 1 级修正项的影响及玻璃管的影响后，粘度  $\eta_1$  可表示为：

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

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  $1 - 3\text{Re}/16$ ，(7) 式又可表示为：

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

已知或测量得到  $\rho$ 、 $\rho_0$ 、 $D$ 、 $d$ 、 $v$  等参数后，由 (4) 式计算粘度  $\eta$ ，再由 (6) 式计算  $\text{Re}$ ，若需计算  $\text{Re}$  的 1 级修正，则由 (8) 式计算经修正的粘度  $\eta_1$ 。

在国际单位制中， $\eta$  的单位是  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ （帕斯卡·秒），在厘米，克，秒制中， $\eta$  的单位是  $\text{P}$ （泊）或  $\text{cP}$ （厘泊），它们之间的换算关系是：

$$1\text{Pa}\cdot\text{s} = 10\text{P} = 1000\text{cP} \quad (9)$$

### 【实验内容】

- (1) 实验室人员加水，加蓖麻油，设定 PID 参数。同学只需进行以下操作。
- (2) 设定温度，确认后按启动键开始加热。温度达到设定值并保持两分钟温度波动小于 0.1 度，仪器自动判定达到平衡。
- (3) 测定一粒小球的直径  $d$ ，测试 3-5 次，求出平均值以及平均值的标准偏差。
- (4) 用挖油勺盛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，尽量避免对液体的扰动。  
用停表测量小球落经一段距离的时间  $t$ ，并计算小球速度  $v_0$ 。
- (5) 用 (4) 或 (8) 式计算粘度  $\eta$ ，作  $\eta-T$  关系图，讨论粘度随温度的变化关系。
- (6) 实验完成后，用磁铁将小球吸引至样品管口，用挖油勺挖入蓖麻油中保存，以备下次实验使用。

### 【思考题】

如何判断小球达到匀速直线运动状态？