

# 落球法测量液体的黏滞系数实验报告

## 一、实验题目

落球法测量液体的黏滞系数

## 二、实验目的

学会使用 PID 温控试验仪  
掌握用落球法测量液体的黏滞系数的基本原理  
掌握实验的操作步骤及实验数据

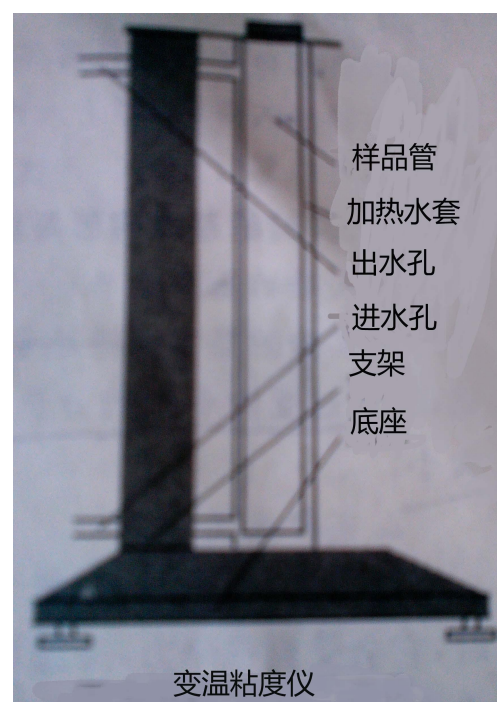
的处理

## 三、实验器材

变温黏度测量仪、， ZKY-PID 温控实验仪、秒表、螺旋测微器，钢球若干

实验仪器简介：

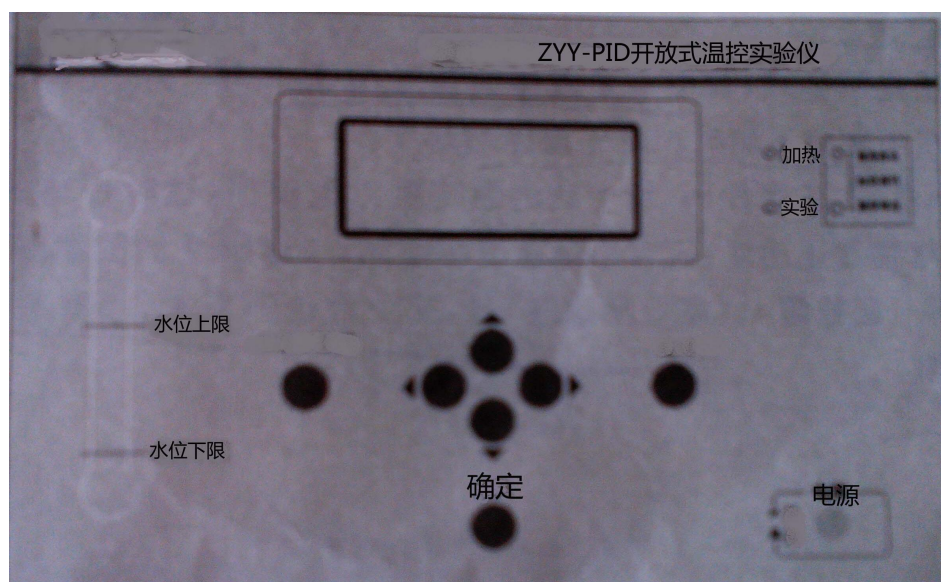
1、变温黏度仪如右图所示，待测液体在细长的样品管中能使液体温度较快地与加热水温达到平衡，样品管壁上有刻度线，便于测量小球下落的距离。样品管外的加热水套连接到温控仪，通过热循环水加热样品。底座下有调节螺丝钉，用于调节样品管的铅直。



## 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。本实验所用温控实验仪能根据实验对象选择 PID 参数以达到最佳控制，能显示温控过程的温度变化曲线和功率的实时值，能存储温度及功率变化曲线，控制精度高等特点。仪器面板如右图所示：

开机后水泵开始运转，

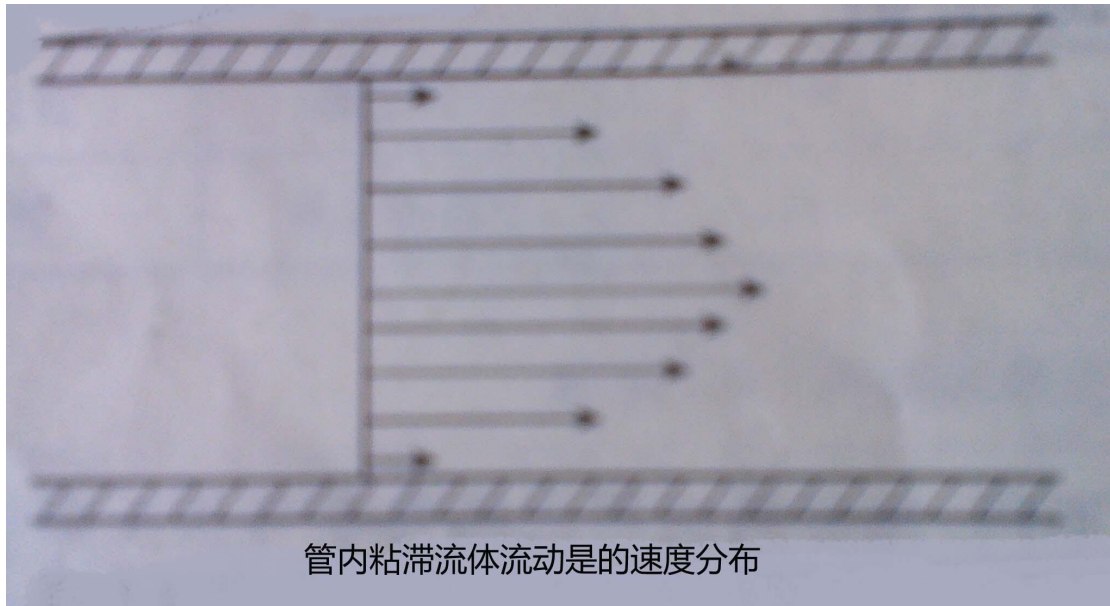


显示屏显示操作菜单，可选择工作方式，输入序号及室温，设定温度及 PID 参数。使用左右键选择项目，上下键设置参数，按确认进入下一屏，按返回键返回上一屏。

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。图形以横坐标代表时间，纵坐标代表温度（以及功率），并可用上下键改变温度坐标值。仪器每隔 15 秒采集一次温度及加热功率值，并将采得的数据示在图上。温度达到设定值并保持 2min 温度波动小于  $0.1^{\circ}\text{C}$ ，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  $e$ 。

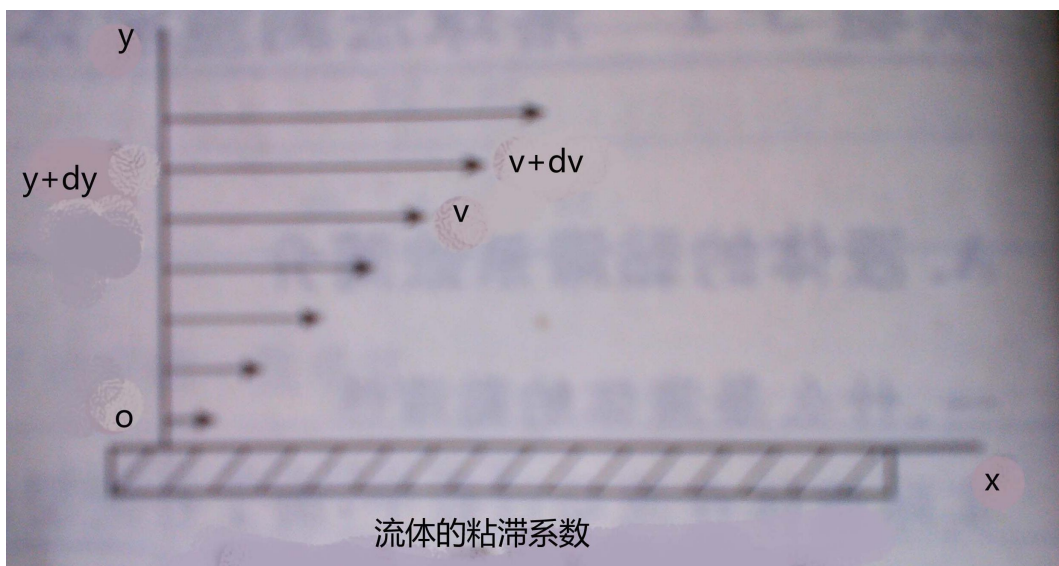
#### 四、实验原理

1、液体的黏滞系数：如果将黏滞流体分成许多很薄的流层，个流层的速度是不相同的。当流速不大时，流速是分层有规律变化的，流层之间仅有相对滑动而不混合。这中流体在管内流动时，其质点沿着与管轴平行的方向做平滑直线运动的流动成为层流。如下图所示



实际流体在水平圆形管道中作层流时的速度分布情况，附着在管壁的一层流体流速为 0，从管壁到管轴流体的速度逐渐增大，管轴出速度最大，形成不同流层。

如下图所示：



假设流体沿 X 方向分层流动，沿 Y 方向速度梯度为  $\frac{dv}{dy}$ ，相邻流层接触面积为  $\Delta S$ ，实验证明黏滞力 f 与它们的关系式如下：

$$f = \eta \frac{dv}{dy} \Delta S \quad \text{①}$$

式中比例系数  $\eta$  称为流体的黏滞系数，简称黏度，在国际单位制中，黏度的单位是  $\text{Pa} \cdot \text{S}$ （帕·秒），它是指当两层流层间具有单位速度梯度时，沿流层单位面积上所受的內摩擦力，该式称为牛顿黏滞定律。

一般情况下，黏滞系数的大小与液体本身性质、液体的温度和流速有关。不同流体黏度不同，同种流体在不同温度下黏度也不同。另外，流体的黏度还与压强有关，在高压下的流体黏度会有比较明显的增加。

2、实验基本构思：小球落在蓖麻油中下落，在竖直方向达到受力平衡时，开始匀速运动，通过手里平衡的分析，找到影响蓖麻油黏度的因素，并通过实验的方法测量出黏度的大小。

### 3、实验原理：

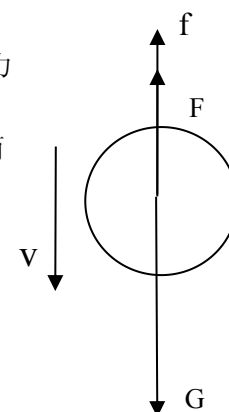
如右图所示，质量为  $m$  的金属小球在黏滞液体中下落时，收到 3 个力分别为重力  $G$ 、浮力  $F$ 、以及黏滞阻力  $f$ 。若液体的黏滞性较大，小球的质量均匀、体积较小、表面光滑，小球在液体中下落不产生漩涡，而且下落速度较小，则小球收到的黏滞阻力为

$$f = 3 \pi \eta v d \quad \text{②}$$

其中  $\eta$  为液体的黏度， $d$  为小球的直径， $v$  是小球在流体中运动时相对流体的速度。

当小球开始下落时，速度较小，所受到的黏滞阻力也较小，这时，小重力大于浮力和黏滞阻力之和，做加速运动；随着小球速度的增加，小球所受黏滞阻力也随之增加，当小球的速度达到一定数值  $v_0$  时，三力平衡，小球受

外界合力为 0，小球开始匀速下落，此时



$$G=F+f \quad \textcircled{3}$$

即

$$mg = \rho_0 gV + 3\pi\eta v_0 d$$

式中  $m$ ,  $V$  分别表示小球的质量和体积,  $\rho_0$  表示液体密度。如果  $\rho$  表示小球的密度, 则小球的体积为

$$V = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 \quad \textcircled{4}$$

小球质量  $m$  为

$$m = \rho V = \frac{\pi}{6} d^3 \rho \quad \textcircled{5}$$

代入整理得

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18v_0} \quad \textcircled{6}$$

当小球密度较大，直径不是太小，而液体的黏度值又小时，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托克斯的影响：

$$f=3 \pi \eta v_0 d(1+\frac{3}{16} Re-\frac{19}{1080} Re^2+\dots) \quad (7)$$

其中  $Re$  为雷诺数，是表征液体运动状态的无量纲参数。

$$Re=\rho_0 v_0 d / \eta \quad (8)$$

当  $Re$  小于 0.1 时，可认为②⑥成立。当  $0.1 < Re < 1$  时，应考虑⑦中 1 级修正项的影响，当  $Re$  大于 1 时，还须考虑高级修正项。

考虑⑦中 1 级修正项的影响以及玻璃管的影响后，黏度  $\eta_1$  可表示为

$$\eta_1=\frac{(\rho-\rho_0)gd^2}{18v_0(1+2.4d/D)(1+3Re/16)}=\eta\frac{1}{1+3Re/16} \quad (9)$$

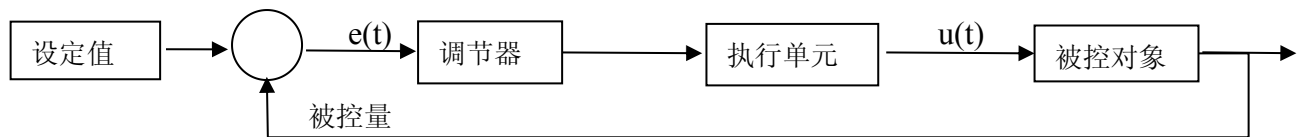
由于  $3Re/16$  是远小于 1 的数，将  $1/(1+3Re/16)$  按幂级数展开后近似为  $1-3Re/16$ ，式⑨又可表示为：

$$\eta_1=\eta-\frac{3}{16}v_0d\rho_0 \quad (10)$$

已知或测量得到  $v$ 、 $d$ 、 $D$ 、 $\rho_0$ 、 $\rho$  等参数后，由⑥计算黏度  $\eta$ ，再由⑧计算  $Re$ ，若需计算  $Re$  的 1 次修正，则由⑩计算经修正的黏度  $\eta_1$ 。

### 3、PID 调节原理

PID 调节是自动控制系统中应用最为广泛的一种调节规律，自动控制系统的原理如下：



自动控制系统框图

假如被控量与设定值之间有偏差  $e(t)=$ 设定值-被控量，调节器依据  $e(t)$  及一定的调节规律输出调节信号  $u(t)$ ，执行单元按  $u(t)$  输出操作量至被控对象，使被控量逼近直至最后等于设定值。调节器是自动控制系统指挥机构。

PID 调节器是按偏差比例、积分、微分进行调节，其调节规律可表示为：

$$u(t)=K_p[e(t)+\frac{1}{T}\int_0^t e(t)dt+T_D\frac{de(t)}{dt}] \quad (11)$$

式中  $K_p$  为比例系数。第二项为积分调节， $T_I$  为积分时间常数。第三项为微分调节， $T_D$  为微分时间常数。

下图为 PID 调节系统过度过程：



将实验测得数据代入公式  $\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18v_0}$  即可求得  $\eta$  的值，测出  $\eta$  便可求得实验相对误差，处理后的数据如下表

黏度的测定

温度 /°C	时间/s						速度 /(m/s)	$\eta$ (测量值) /(Pa·s)	* $\eta$ (标准值) /(Pa·s)	相对误差
	1	2	3	4	5	平均				
30	26.91	26.59	26.44	26.34	26.03	26.462	0.0076	0.441	0.451	2.21%
35	18.78	18.88	18.93	18.72	18.87	18.836	0.0106	0.314	0.312	0.64%
40	13.37	13.65	13.44	13.53	13.71	13.54	0.0148	0.225	0.231	2.60%
45	10.35	10.34	10.41	10.09	10.25	10.288	0.0194	0.171	0.179	4.45%

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

由以上数据画出  $\eta$ -t 图如下所示:

