

普通物理学实验 II

电子实验报告

实验名称: 液体粘滞系数的测定

指导教师: 张建华

班级: _____

姓名: _____

学号: _____

实验日期: _____年____月____日 星期____上/下午

浙江大学物理实验教学中心

一、实验综述

【实验背景】

在流动的液体中，流速不等的流体形成不同的流层，各流层之间因速度不等而存在内摩擦力，称为粘滞阻力，它会阻碍流层的相对运动。

根据流体力学知识可知，粘滞阻力的大小与流层间的接触面积 A 及垂直于速度方向的速度梯度成正比，即

$$f = \eta A \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

粘滞系数的大小与液体的性质及温度有关。温度升高，液体的粘滞系数减小，气体则相反。粘滞系数的测定在航空、造船、桥梁、化学、医学、水利工程中都有重大的实际意义。

【实验原理】

本次实验中采用落球法粘滞系数测量。

当小球在液体中下落时，水平方向上所受合力为 0，竖直方向上受到 3 个力：①重力 F_G ；②浮力 F_P ；③粘滞阻力 F_f 。其中：

$$F_G = mg = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3 \cdot \rho \cdot g = \frac{1}{6}\pi\rho g d^3 \quad (2)$$

$$F_P = \rho_0 g V = \rho_0 g \cdot \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3 = \frac{1}{6}\pi\rho_0 g d^3 \quad (3)$$

$$F_f = 3\pi\eta dv \quad (\text{斯托克斯公式}) \quad (4)$$

式中 m 为小球质量， g 为重力加速度， d 为小球直径， ρ 为小球密度， ρ_0 为液体密度， η 为液体粘滞系数。

一开始小球在重力作用下做加速运动，下落速度不断增大，粘滞阻力也随速度不断增大。若从某一时刻起，小球能进入匀速运动，则这时小球的速度最大，称为[极限速度]或[收尾速度]，记作 v_0 。此时小球在竖直方向上受力平衡，则有：

$$F_G = F_P + F_f \Leftrightarrow \frac{1}{6}\pi\rho g d^3 = \frac{1}{6}\pi\rho_0 g d^3 + 3\pi\eta dv_0 \quad (5)$$

整理(5)式可得液体粘滞系数的计算公式：

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

(4) 式为斯托克斯公式，是 Navier-Stokes 方程在 $\frac{dv\rho}{\eta} \ll 1$ ，且液体的流动状态为球绕流状态时解出的粘滞阻力和速度的关系式。解方程时的边界条件要求装液体的容器无限大，即容器壁在无限远处，对小球速度无影响。但在实际测量中，用量筒盛装液体，量筒壁会影响小球的速度，所以必须对测得的收尾速度 v_0 进行修正。密立根通过实验得到的[修正因子]为：

$$\beta = \left(1 + 2.4 \frac{d}{D}\right) \left(1 + 3.3 \frac{d}{2h}\right) \quad (7)$$

式中 D 为量筒内径， h 为液体深度。

实验中会选取尺寸较小的小球以满足 $\frac{dv\rho}{\eta} \ll 1$ ，即 $d \ll h$ ，故一般只取

$$\beta = 1 + 2.4 \frac{d}{D} \quad (8)$$

而在小球匀速运动时，测出其经过的一段距离 L 和经过这段距离所用的时间 t ，则有：

$$v_0 = \frac{L}{t} \quad (9)$$

结合(8)(9)式可得，对收尾速度修正后，(6)式变为：

$$\eta = \frac{gd^2(\rho - \rho_0)}{18v_0\beta} = \frac{gd^2(\rho - \rho_0)}{18\frac{L}{t}\left(1 + 2.4\frac{d}{D}\right)} \quad (10)$$

其中液体的粘滞系数 η 是温度 T 的函数，单位为 $(\text{Pa} \cdot \text{s})$ ，测出(10)式中各量值，即可计算出某一温度下液体的粘滞系数。

综上，我们可以利用本次实验装置，完成实验任务：①了解物体在液体中运动所受的粘滞阻力、并测定流体的粘滞系数 η ；②研究液体粘滞系数随温度变化的关系。

二、实验内容

实验参数：

- 内筒内半径： $R = 18.5\text{mm}$ ，则直径 $D = 37.0\text{mm}$
- 蓖麻油密度： $\rho_0 = 950\text{kg/m}^3$
- 小球密度： $\rho = 7850\text{kg/m}^3$
- 重力加速度： $g = 9.79\text{m/s}^2$
- 小球下落的距离选取为： $L = 21.91\text{cm}$

实验一：落球法测定粘滞系数

(一) 实验数据与计算

钢珠直径的测量与计算数据如下表 1。

零点误差/mm	0.435					
编号(i)	1	2	3	4	5	6
测量结果/mm	3.435	3.429	3.431	3.431	3.428	3.433
平均值/mm	$\bar{d} = \frac{3.435 + 3.429 + 3.431 + 3.431 + 3.428 + 3.433}{6} - 0.435 = 2.996(\text{mm})$					

表 1 钢珠直径的测量与计算

钢珠下落时间的测量结果如下表 2。

编号(i)	1	2	3	4	5	6
下落时间 t/s	10.12	10.35	9.78	10.02	10.22	10.06

表 2 钢珠下落时间的测量

代入(10)式计算可得蓖麻油的粘滞系数如下表 3：

编号(i)	1	2	3	4	5	6
$\eta / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.30	1.33	1.26	1.29	1.32	1.30

表 3 蓖麻油粘滞系数的计算结果

计算例（第一组数据）：

$$\eta_1 = \frac{gd^2(\rho - \rho_0)}{18 \frac{L}{t} \left(1 + 2.4 \frac{\bar{d}}{D} \right)} = \frac{9.79 \times (2.996 \times 10^{-3})^2 \times (7850 - 950)}{18 \times \frac{0.2191}{10.12} \times \left(1 + 2.4 \times \frac{2.996 \times 10^{-3}}{37 \times 10^{-3}} \right)} = 1.30 Pa \cdot s$$

（二）数据处理

测得的粘滞系数平均值为：

$$\bar{\eta} = \frac{1.30 + 1.33 + 1.26 + 1.29 + 1.32 + 1.30}{6} = 1.30 Pa \cdot s$$

查表知蓖麻油在 17.5℃ 下的粘滞系数为 $\eta_0 = 1.23 Pa \cdot s$ ，故相对误差为：

$$E = \frac{|\bar{\eta} - \eta_0|}{\eta_0} \times 100\% = \frac{|1.30 - 1.23|}{1.23} \times 100\% = 5.69\%$$

A 类不确定度为：

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (\eta_i - \bar{\eta})^2}{6 \times 5}} = 0.010 Pa \cdot s$$

B 类不确定度为：

$$u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = 0.006 Pa \cdot s$$

合成不确定度为：

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0.012 Pa \cdot s = 0.01 Pa \cdot s$$

故最终测量结果为：

$$\eta = 1.30 \pm 0.01 Pa \cdot s$$

实验二：液体粘滞系数随温度变化的关系

- 所用五颗钢珠的平均直径 $\bar{d} = 2.998 mm$ 。

（一）实验数据与计算

实验数据记录如下表 4。

编号 (i)	1	2	3	4	5
温度 $T_i / ^\circ C$	20.3	28.3	34.0	39.2	44.5
下落时间 t_i / s	3.81	2.74	2.30	2.07	1.96
粘滞系数 $\eta_i / Pa \cdot s$	0.490	0.353	0.296	0.266	0.252

表 4 粘滞系数随温度变化的数据记录与计算

计算例（第一组数据）：

$$\eta_1 = \frac{gd^2(\rho - \rho_0)}{18 \frac{L}{t} \left(1 + 2.4 \frac{\bar{d}}{D} \right)} = \frac{9.79 \times (2.996 \times 10^{-3})^2 \times (7850 - 950)}{18 \times \frac{0.2191}{3.81} \times \left(1 + 2.4 \times \frac{2.998 \times 10^{-3}}{37 \times 10^{-3}} \right)} = 0.490 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

注：本次实验过程中由于一开始温度计出了问题，导致开始测数据之前液体温度已经升到40℃以上，与老师沟通后认识到，如果从40℃以上的温度开始测量，后续小球下落所用的时间会非常短，导致难以测量且误差很大。于是在老师的指点下，选择暂停水循环，将在加热锅中过热的液体倒掉，从教室水槽里接取冷水，再重新开始循环，用添加的冷水将液体降低到较适宜测量的温度。通过这样的方式，成功完成了实验任务。在此过程中，液体经过了先升到高温又冷却的过程，这可能会对粘滞系数产生影响；而温度计也并未更换，鉴于其一开始出现了故障，可能后续测量过程中的示数也会与实际值偏差较大，从而造成较大的误差。不过从本次的结果中，仍可以看出液体粘滞系数与温度的关系。

（二）结果分析

所得液体粘滞系数与温度的关系图像如下图1：

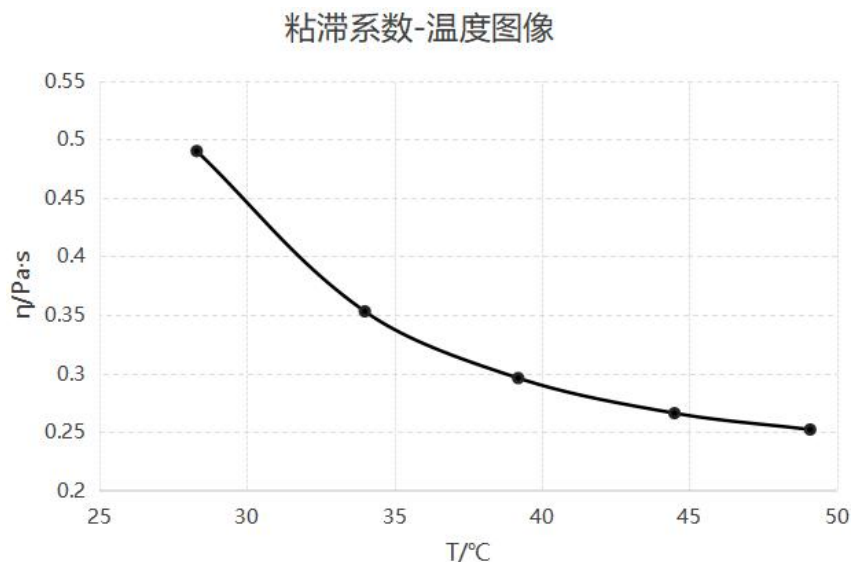


图1 粘滞系数-温度图像

可以看出，随温度升高，液体的粘滞系数下降。

三、实验拓展

1. 影响液体粘滞系数的因素有哪些？

- (1) 温度：一般而言，随温度升高，液体的粘滞系数会下降，与本次实验所得结果相符。
- (2) 液体的分子结构：较大的分子或分子间有较强相互作用的液体往往具有较高的粘度，如果液体分子之间有较强的氢键或范德华力，液体的粘度通常也会较高。
- (3) 溶质的种类和浓度：溶解在液体中的物质（如盐、糖、溶剂等）会影响液体的粘度。高浓度溶液通常具有较高的粘度，因为溶质分子或离子在液体中会增加分子间的摩擦力。
- (4) 压力：压力对液体粘度的影响较小，但在高压下，液体的粘度通常会增加。压力的增大会使分子更加紧密地排列，从而增加液体的内摩擦力。
- (5) 外部场：对于某些具有极性 or 含磁性纳米粒子的流体，其粘性会受到电场或磁场的影响。

2. 设计一个不用传感器的测量液体黏性系数的实验方法，要求：简述实验方法和基本原理，画出系统原理框图。

可采用毛细管粘度计方法。

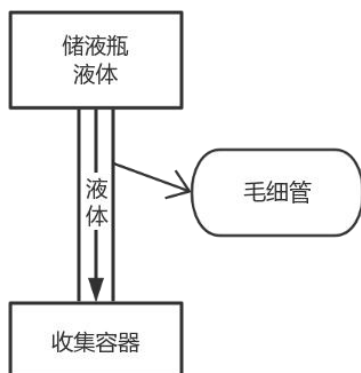
[基本原理]基于泊肃叶定律（Poiseuille's Law），该定律描述了在一定条件下，流体在管道中流动的速度与其粘度之间的关系。粘度可通过以下公式计算：

$$\eta = \frac{\pi^4 \Delta P}{8 L Q}$$

其中 r 是毛细管半径， ΔP 是液体两端压力差， L 是毛细管长度， Q 是单位时间内流过的液体体积。其中， ΔP 可以通过液体的密度和毛细管高度差来计算； Q 可通过测量液体流动所需时间和通过的体积来确定。

[实验方法]事先测好毛细管半径、毛细管长度和液体密度。将一个储液瓶置于较高的位置，把毛细管的一端与储液瓶连接起来，使液体在重力作用下流入毛细管，使用计时器记录液体流过毛细管特定长度的时间。最终通过以上公式，即可计算出液体的粘滞系数。

[系统框图]



四、误差分析与心得体会

【误差分析】

1. 实验所用小钢珠基本都存在生锈情况，会导致密度存在偏差，且钢珠不对称，可能会影响其在液体中下降的过程，引发误差。
2. 在测量小钢珠的下落时间时，由于是肉眼读数，对小钢珠是否到达标记的线处的判断，和按下秒表时机的把握都存在偏差。
3. 温度计接口被油浸染，会造成示数的偏差，且在实验过程中温度计的示数始终在动态变化，会引起读数不准。除此之外，本次实验中温度计在一开始出现了较严重的故障，后续虽然能够正常读数，但准确性也无法保证，这可能会带来很大的误差。
4. 在进行实验二的过程中，液体经历了先升到高温再降到低温的过程，可能会对粘滞系数造成影响，从而导致误差。
5. 实验二中，每个温度只进行了一次测量，因而偶然误差可能会对结果产生较大影响。

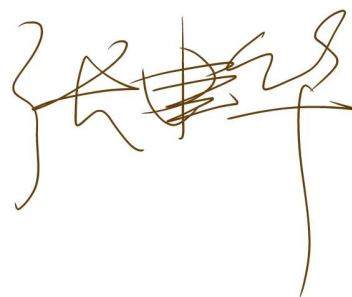
【心得体会】

从本次实验中，我对液体粘滞系数相关知识更加了解，数据处理也更加熟练。

进行实验二时，一开始没有检查温度计的情况，反复调高加热温度后，温度计仍一直显示18℃左右，但实验时把这误认为是加热装置的问题。直到用手触碰量筒壁，发现液体很热，才意识到是温度计出了故障，调整了温度计的接线后，发现此时的温度已经高达40℃以上。这一情况给实验带来了非常大的麻烦。因为如果继续升温，小球的下落会变得非常快，难以准确

测量时间，而液体自然冷却又需要很长时间。最终在老师的指导下，通过将锅内的水更换为冷水的方式将液体冷却，得以成功完成实验。从这个过程中，我认识到了实验前先检查设备的重要性，并学习了在遇到意外情况时，应该如何想办法让实验回到正轨。

教师签字：

A handwritten signature in brown ink, consisting of stylized, overlapping strokes that form a unique, cursive-like mark.