

液体粘滞系数测量精度提升的研究

巢 涵 陈志强 袁 媛 杨丽娟 崔 磊

宿迁学院信息工程学院 江苏 宿迁 223800

摘 要: 液体的粘滞系数作为流体力学中一个重要的物理参量, 其研究在流体力学、水利建设、医学和国防军工等领域都有着非常普遍的应用价值。使用落球法来测量该值是实验室里常用的方案, 具备直观的物理现象, 原理展现清晰。本文通过对当前的测量方法及实验数据处理进行了一定的优化, 对液体粘滞系数测量提供了非常好的参考意义, 大幅提升了实验测量精度。

关键词: 粘滞系数; 落球法; 测量精度

A study on the improvement of the accuracy of the measurement of the viscosity coefficient of liquids

Han Chao Zhiqiang Chen Yuan Yuan Lijuan Yang Lei Cui

School of Information Engineering Suqian University Jiangsu Suqian 223800

Abstract: As an important physical parameter in fluid mechanics, the viscosity coefficient of liquids has very common application value in the fields of fluid mechanics, water conservancy construction, medicine and national defense science and industry. Measuring this value using the falling ball method is a commonly used method in the laboratory, with intuitive physical phenomena and clear demonstration of the principle. This paper optimizes the current measurement methods and experimental data processing, which provides a very good reference significance for the measurement of liquid viscosity coefficient, and greatly improves the experimental measurement accuracy.

Keywords: Viscosity coefficient; Drop ball method; Measurement accuracy

1 引言

粘滞系数是用来表征液体内部粘滞力的一个物理学参数, 不同液体的粘滞系数各不相同。在液体流动过程中, 平行流动方向的流层之间存在相对速度, 从而会产生滑动, 各流层之间会有摩擦力产生, 通常称之为粘滞力。粘滞力的方向取决于两个接触面的方向, 粘滞力大小主要取决于接触面的相对速度及接触面积, 比例系数 η 就称为粘滞系数, 该物理量的测量是研究流体力学的基础, 非常重要。常用的测量方法主要包括: 落球法、共振法、光散射法等。本文主要通过通过对经典的落球法测液体粘滞系数的方案进行了优化, 从而进一步提升实验结果的测量精度。

2 测量原理

粘滞性是所有液体的固有特性, 液体在流动的时候, 各流层之前互相产生阻力作用, 同样, 固体在液体里运动时也会受到液体的阻力作用。如一个小铁球半径为 r , 以速度 v 在液体中下落的时候, 包裹在铁球表面的液体与铁球之间保持相对静止, 和铁球一样相对于液体以速度 v 运

动。铁球表层的液体与相邻液体流层之间存在内摩擦力的作用, 与液体的粘滞系数值正相关。

有一个小铁球, 半径为 r , 在粘滞系数为 η 且无限广延液体中下落时, 在运动速度 v 不太大的情况下, 小球所受的阻力为

$$F=6\eta r v$$

上式称为斯托克斯公式, 它说明物体在液体中运动时, 所受的阻力与其速度成正比。不同种类液体的粘滞系数各不相同, 同时受到温度的影响也非常明显, 与温度的大小呈正相关。其单位为帕斯卡·秒 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)。

当小球在液体中下落运动时, 受到三个方向力的作用: 重力方向竖直向下 ($\rho_0 V g$)、浮力方向竖直向上 ($\rho V g$)、液体阻力的方向也竖直向上。其中 ρ_0 表示小球的密度, ρ 表示液体的密度, V 表示小球的体积。开始时, 由于小铁球的运动速度较小, 受到的液体阻力也较小; 随着小铁球速度的不断增加, 所受阻力也随之增加, 最终作用在小铁球上的三个力平衡, 此后小铁球在液体中匀速下落, 设此时小球下落速度为 v , 则有

$$\rho_0 V g = \rho V g + 6\eta r v \quad (1)$$

令小球的直径为 d , 并用 $V = \frac{1}{6} \pi d^3$, $r = \frac{d}{2}$ 代入上式

得

通讯作者: 陈志强 (1983-), 男, 江苏宿迁, 实验师, 硕士研究生, 宿迁学院, 主要从事物理实验教改和功能材料磁性等性质的理论计算方向。

宿迁学院大学生创新创业项目 (2021XSJ044Y)

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

由上式可知,要测得 η 的关键是要测得 v , 由此衍生出两种测量思路:

方法 1: 多管法

因为实验室无法提供出无限广延的液体条件,实验室可利用多管法进行实验,即设定一系列高度相同,但直径不同的圆柱形装置。通过线性拟合的数学方法推导出小球在近似于无限广延的液体中下落所需的时间,进而求出匀速下落的速度。

该列玻璃管中各中心轴线与水平垂直,底板上有水平仪以便于调整整个实验装置的水平状态。在每个玻璃管上下方各有一条刻度线,且各管的两条刻度线间距相等,用 s 表示。上方的刻度线位于液面以下,并保持一定的距离,以确保小球下落经过上方刻度线时达到匀速运动状态。依次测出同一小球通过各管中上下两刻度线所需的时间 t 。若各管的直径用一组 D 表示,则大量的实验数据和用线性拟和进行数据处理表明 t 与 d/D 成线性关系。以 t 为纵轴,以 d/D 为横轴,根据实验数据作出直线,延长该直线与纵轴相交,其截距为 t_0 , 则 t_0 就是当 $D \rightarrow \infty$ 时,即在无限广延的液体中小球匀速下落通过 s 距离时所需的时间。即

$$v = \frac{s}{t_0} \quad (3)$$

s 、 ρ_0 、 g 的数值由实验室给出,求出 v 代入 (2)

式便可以算出 η 的值。

方法 2: 单管法

若实验时使用单个玻璃管,待测液体盛于管内,小球在液体中匀速下落,此时计算液体的粘滞系数 η 不能使用公式 (2)。实验证明,若小球沿筒的中心轴线下落,式 (2) 需做如下修正方能符合实际情况:

$$\eta = \frac{(\rho_0 - \rho)gd^2t}{18s} \frac{1}{(1 + 2.4 \frac{d}{D})(1 + 1.6 \frac{d}{H})}$$

式中 D 为管子的内径, H 为液柱的深。

3 影响测量的几个主要问题及对策

3.1 玻璃筒应保证竖直状态

在玻璃筒的筒口上方放置一块平面玻璃,将水平仪放置在平面玻璃上,接着调节多筒装置的四个脚,使水平仪

达到水平状态,从而确保玻璃筒处于竖直状态。实际测量中若玻璃筒产生倾斜,则小球在液体中的下降轨迹将偏离玻璃筒的中心轴线,从而造成小球的实际运动路程增加,同时所受到的粘滞阻力也会变大。以上两种变化都会增大测量误差,应当避免。

3.2 环境温度及待测液体温度的控制

相同的液体在不同的温度情况下,粘滞系数具有较大的差别。为了保证测量精度,应尽量保持整个测量的环境温度的稳定,从而保证待测液体的温度稳定。在测量的过程中,有条件的实验室应使用较为精密的温控装置来控制待测液体的温度处于某个固定的值。不具备条件的话,也应该尽量在封闭、稳定的环境中进行实验测量,尽可能减少温度变化对测量结果的影响。

3.3 雷诺数 Re 的范围控制

雷诺数是用来表征流体流动情况的无量纲数。 $Re = \rho v d / \eta$, 其中 v 、 ρ 、 η 分别为流体的流速、密度与粘滞系数, d 为一特征长度(如:玻璃管直径)。本测量中应当将雷诺数控制在 2300 以内,否则小球下落过快所产生的湍流会对测量结果产生微扰。结合玻璃筒管径 d 值,所选小球直径应小于 2mm 以确保雷诺数保持在较低的范围。

3.4 小球进入液面速度及下落轨迹的控制

应该设置足够距离液面足够长度的起始计时标线,以确保小球在经过上刻度线的时候达到匀速直线运动,该速度即为小球在液体中达到匀速下落时的速度。该速度与小球的直径存在一定关系,直径越大,需要的达到收尾速度的路程越长,因此建议使用直径较小(如: $d=1\text{mm}$)的铁球进行测量。

为了保证小球下落距离的精确及小球在液体中的受力平衡,小球在液体中应沿玻璃筒的中心轴线下落,否则会增大测量误差。在测量的时候,使用经过特殊设计的筒盖来避免此问题的产生:每个玻璃筒都安装一个薄筒盖,小孔位于筒盖中心,贴近液面。使用镊子操作小球从筒盖中心贴近液面的时候放下,既保证了小球进入液面的速度最小,同时也方便控制小球沿玻璃筒的中心轴线下落。

3.5 小球下落时间的测量方法选择

小球在液体中的下落实践,较为常见的方法是利用秒表来计时。但在具体测量中发现,由于人的反应时间及观察视角的差异,常常导致测量误差变大。随着光电门计时的发展应用,研究人员将光电门计时引入到本实验测量的时候发现,由于小球直径较小造成有时无法触发电光门计时。

随着智能手机的发展和普及,其拍摄出来的视频成像

清晰, 并可以反复观看读数。因此在测量中通过架设智能手机对小球的下落过程进行测量, 可简洁有效地减少实验误差。

3.6 专业数据处理软件的应用

常用的人工计算的数据处理方式, 不仅工作量大, 而且人工拟合出的曲线精确度受人因素为因素的影响较大。因此借助于专业的数据处理软件, 如Origin或者MATLAB等, 可以大大提升测量数据的处理效率及精确性。

4 实例分析

4.1 基本参量

实验环境温度: $T=21^{\circ}\text{C}$

实验室当地重力加速度 $g = 9.796\text{m/s}^2$

小铁球密度: $\rho_0 = 7.8 \times 10^3 \text{Kg/m}^3$

蓖麻油密度: $\rho = 0.962 \times 10^3 \text{Kg/m}^3$

A、B刻度线之间距离 $S = 0.12\text{m}$

4.2 数据记录

表 1 测量小球的直径

测量次数	1	2	3	4	5	平均值
直径 d/mm	1.035	1.035	1.034	1.035	1.036	1.035

表 2 测量小球在各管中下落的时间

序号 测量		1			2			3			
		时间	3	28.37	28.28	28.25	28.75	28.83	28.75	28.91	28.89
		平均	28.30			28.78			28.89		
管内径 D		51.1			38.2			33.3			
d/D		0.020			0.027			0.031			
序号 测量		4			5			6			
		时间	3	29.35	29.41	29.37	29.72	29.60	29.50	30.72	30.59

	平均	29.38	29.61	30.61
管内径 D		24.5	20.8	13.5
d/D		0.042	0.050	0.077

4.3 使用origin处理数据

(1) 首先, 打开Origin8.5, Origin自动建立一个工作簿Book1, 并建立一个工作表Sheet1;

(2) 在Sheet1 的第一列A (X) 输入d/D的 6 组数值, 在第二列B (Y) 输入时间t的 6 组数值;

(3) 使用线性拟合的方式得到t-d/D的曲线 (见图 1), 从拟合结果可得曲线与y轴的截距t₀ 值为 27.66 秒, 即为管径D趋向于无穷大时小球在无限广延的液体中匀速下落通过距离S时所需时间。

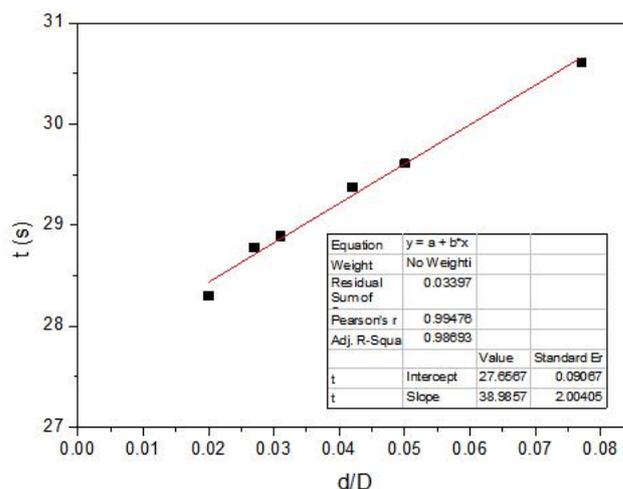


图 1 Origin 软件用于曲线拟合

$$v = S / t_0 = 4.34 \times 10^{-3} \text{m/s}$$

$$\eta = \frac{(\rho_0 - \rho)gd^2}{18v} = 0.92 \text{Pa}\cdot\text{s}$$

查表得到 $T=21^{\circ}\text{C}$ 时蓖麻油粘滞系数的理论值

$$\eta_{\text{理}} = 0.90 \text{Pa}\cdot\text{s}$$

$$Er = \frac{\eta - \eta_{\text{理}}}{\eta} = 3\%$$

可以看出, 利用Origin软件进行实验数据处理, 无论对于实验数据的便捷处理还是精度又有很大的帮助。

5 总结

本文从落球法测量液体粘滞系数中的常规手段入手,提出实验测量规范、测量手段的选择、实验数据处理等几个方面的常见问题,并分别给出解决思路。并通过实际测量加以验证,得到较高精度的蓖麻油粘滞系数测量值。该测量方案的改进提出无论对于粘滞系数的相关实验教学或者科研均有一定的参考意义。

参考文献:

[1] 杨亮,马明,邓勇,等.用落球法测液体的粘滞系数

实验中计时起点的确定[J].海南师范学院学报(自然科学版),2005(3):240-242.

[2] 丛晓燕,马超,吕刚,等.无限广延法测量液体粘滞系数的实践研究[J].大学物理实验,2020,33(2):69-71.

[3] 黄秋萍.落球法液体粘滞系数实验的改进[J].大学物理实验,2015(6):38-41.

[4] 贺梅英,黄小棣.用数码照相法研究落球法测量液体的粘滞系数实验[J].物理与工程,2011(3):18-19.