

基于小球受控匀速下落的粘滞系数测量实验研究*

赵高 杜妮茜 高静敏 常清 唐亚楠 陈卫光

(郑州师范学院物理与电子工程学院 河南 郑州 450044)

(收稿日期:2022-01-22)

摘要:液体粘滞系数的测量在工程技术和教育教学方面都有着重大的意义.通过设置拉力的方式控制小球在液体中匀速下落,并由速度传感器和力传感器检测小球下落的速度和受力状况,从而测得液体的粘滞系数值.通过此测量方法完成了透明液体、半透明液体以及不透明液体粘滞系数的测量,并研究了粘滞系数和温度的关系.

关键词:粘滞系数 落球法 受控匀速下落法

液体的粘滞系数又称为内摩擦系数或粘度,是描述液体内摩擦力性质的一个重要物理量,在工程技术和生产技术以及医学等方面,测定液体的粘滞系数具有重大的意义^[1].由于液体粘滞系数除了因材料种类不同而变化外,还会受到温度和密度等环境因素的影响^[2~5],因而改善或设计一种简便有效的粘滞系数测量方法十分必要.目前常见的粘滞系数的测量方法有落球法、毛细管法及转筒法等^[5~8],其中,落球法测量粘滞系数具有现象明显,操作简便,成本低,消耗小等优点.由于该实验具有概念清晰,实验操作和内容充实等特点,被多数理工类大学选做基础物理实验之一,是大学物理实验教学中了解液体反抗形变能力的一项基本实验^[6].然而目前实验教学所采用的传统落球法测量通常会出现以下问题:利用秒表进行人工计时会存在反应时间偏差影响测量精度,小球自由下落到匀速下落需要一段路程,匀速下落的起始时间难以确定,难以判断小球下落是否沿量筒中心轴线等^[7~9].因而,关于落球法测量粘滞系数的实验研究受到了广泛关注^[10~12].本文针对当前落球法的不足和实际需求,从落球法基本原理和物理机制出发,采用设置拉力控制小球匀速下落的方法,并结合高精度、低成本传感器等测量元件研究设计了简单高效的液体粘滞系数测量装

置,同时本测量方法不受液体透明度的限制、大大缩短了小球的测量路程等特点,拓展了测量装置的测量范围和适用条件.

1 实验原理

在液体中运动的物体都会受到一个阻力的作用,这个阻力是由于附着在物体表面并随物体一起运动的一层液体与相邻的液体层之间的摩擦引起的,即粘滞阻力,在相距1 cm的两液层中,维持单位速度差所需的力即为粘滞系数,其与材料种类和温度等因素有关.传统的落球法测量粘滞系数时依靠小球自身重力在液体中下落,当小球所受浮力与粘滞力之和等于重力时达到匀速直线运动状态.通过获得此状态下小球的速度大小和液体对小球的粘滞力大小,并进一步算得液体的粘滞系数,该状态下小球的受力分析如图1(a)所示.本测量系统通过对小球施加一个合适的拉力,使得小球处于可控的匀速下落状态,从而消除时间记录误差,小球自由下落达到匀速运动前的位移及小球自由下落时水的冲击力对测量结果的影响.此时小球在待测液体中匀速下落时受力分析如图1(b)所示,小球在水中受到向上的粘滞阻力 $F_{粘}$,向上的浮力 $F_{浮}$ 与拉力 T 及竖直向下的重力 G .

* 教育部高等学校物理学类专业教学指导委员会固体物理课程教学研究项目资助,项目编号:JZW-19-GT-03;郑州师范学院本科教学改革研究重点项目资助,项目编号:JXGGZD-65211448;河南省高等教育教学改革研究与实践项目资助,项目编号:2021SJGLX580

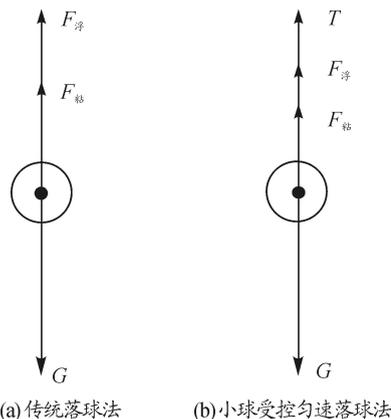


图1 落球法小球匀速运动时受力分析图

小球在水中匀速运动时有

$$G = F_{\text{浮}} + F_{\text{粘}} + T \quad (1)$$

小球浸没在水中处于静止状态则对于小球有

$$G = F_{\text{浮}} + T_1 \quad (2)$$

联立式(1)和式(2)可得

$$F_{\text{粘}} = T_1 - T \quad (3)$$

当半径为 r 的小球在无限宽广的均匀液体中以速度 v 匀速运动,且液体未产生涡流,我们可以由斯托克斯公式得出小球在液体中匀速运动时有^[1]

$$F_{\text{粘}} = 6\pi\eta vr \quad (4)$$

式中 η 即为液体粘滞系数,单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$, v 是小球在液体中匀速运动的速度,单位为 m/s , r 为小球半径,单位为 m .

由式(3)、(4)得

$$\eta = \frac{T_1 - T}{6\pi vr} \quad (5)$$

由于液体盛在深广程度有限的容器中,不能满足无限宽广液体这一条件,所以对式(5)进行修正得^[11]

$$\eta = \frac{T_1 - T}{6\pi rv \left(1 + 2.4 \frac{r}{R}\right) \left(1 + 3.3 \frac{r}{h}\right)} \quad (6)$$

其中 R 为容器半径,单位为 m , h 为小球下落位移,单位为 m .

2 实验设计与改进方案

本实验的测量系统及装置如图2所示,小球由细丝线经过角速度传感器以及力传感器接到水平滑块上,小球起始位置位于待测液体液面正上方中心轴线处.通过控制滑块水平匀速移动使得小球在液

体中匀速下落,经测算得此状态下小球所受液体的粘滞力及小球速度,并最终测得液体的粘滞系数.小球在液体中静止状态时和匀速下落过程中,其所受拉力及速度大小分别由高精度力传感器(分辨率达 0.002 N)和角速度传感器测算得出.小球半径及容器半径由游标卡尺测量得出,小球在液体中匀速下落的位移由相应的刻度尺记录得到.通过速度传感器直接获得小球速度,可避免获得小球速度时人工计时不精确以及肉眼判断位置带来的误差,且通过力传感器直接获得小球粘滞力的方法简单易懂、操作便捷、更易理解和掌握,具体方案如下.

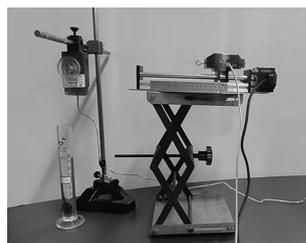
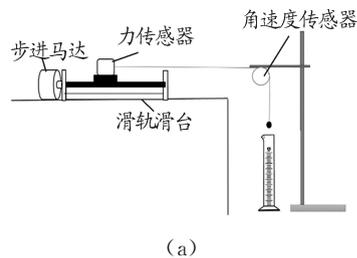


图2 粘滞系数测量装置示意图及实物图

2.1 装置的实现

为保证测量系统精确可控,且能够实时监控测量,本实验系统部分测量手段及数据处理采用以下方式:本实验测量装置的数据通过角速度传感器,高分辨率力传感器相应的上位机软件采集并记录和显示实验的实时数据,从而确保记录数据的精准性^[13].

对小球匀速下落的设计与测量主要通过可匀速移动的位移装置实现.本实验选定带有匀速步进电机的位移滑台做位移装置,该步进电机滑台精度为 0.1 mm ,最大行程为 200 mm .在小球所受重力作用下,位移装置滑台与小球之间由细线连接,通过调节步进电机完成位移装置滑台部分与小球下落时同步运动,实现对小球运动的精准控制,进而使得小球在液体中以人为设定的速度匀速直线下落,且滑台

的移动距离即为小球的下落距离。

为避免步进电机设定速度与小球实际下落速度测量上的误差,本实验利用半径已知的高精度角速度传感器对实际运作中的小球进行实时的速度监控,以保证实验数据的有效性和准确性.同时采用0.002 N高分辨率力传感器对小球进行拉力的测量,并利用公式(3)得出小球所受粘滞阻力.由于液体粘滞系数受到温度的影响,本系统通过伴热带包裹量筒结合恒温控制改变液体的温度,以研究液体粘滞系数随温度的变化规律.

2.2 实验过程

各部件及材料按图2所示的粘滞系数测量装置示意图进行连接,需注意连接小球和位移装置的细线两段保持 90° 角.小球位于待测液体液面正上方中心轴线处,细线水平和竖直两段可用激光笔进行水平和竖直校准.

小球下落前需测定小球半径 r ,角速度传感器的直径 d ,承装待测液体容器的直径 $2R$ (这里指量筒的内径),以及小球匀速运动初始对应滑台的位置 x_1 .

粘滞系数测量装置和所需材料安装无误后,对液体粘滞系数进行测量.启动步进电机使得小球在液体中匀速下落,通过计算机得到小球匀速运动时所引起的拉力实时变化图像和角速度实时变化图像,对图像做进一步分析,确定小球所受拉力 T_1 , T 和匀速运动时对应的角速度 ω .由小球匀速运动时

的角速度 ω 得到小球匀速下落的速度值

$$v = \frac{\omega d}{2} \quad (7)$$

待小球在液体中完成匀速下落时,记录滑台此时在滑轨上的末位置 x_2 ,有

$$h = |x_2 - x_1| \quad (8)$$

由公式(6)~(8)得

$$\eta = \frac{T_1 - T}{6\pi\omega \frac{rd}{2} \left(1 + 2.4 \frac{r}{R}\right) \left(1 + 3.3 \frac{r}{|x_2 - x_1|}\right)} \quad (9)$$

将测量数据带入式(9)便可得出 η 的测量值.

2.3 探究不同变量因素对粘滞系数的影响

液体粘滞系数不仅会受到温度的影响还会受到液体种类的影响,本实验采用小球受控匀速下落法更好地实现液体的粘滞系数在不同温度下和不同种类液体中的测量研究.利用温控加热恒温系统改变并实时显示液体温度,进而测得不同温度下液体粘滞系数.同时对半透明液体蓖麻油、透明液体甘油和非透明液体废弃机油的粘滞系数进行测量,以了解不同种类液体的粘滞系数.

3 实验数据与分析

3.1 数据测量

用游标卡尺分别测量角速度传感器直径、容器的内直径,多次测算得出它们的半径,实验数据记录见表1.

表1 实验数据记录表

次数	1	2	3	4	5	6	平均值	半径
角速度传感器 d/mm	48.68	48.54	48.56	47.80	47.60	47.60	48.13	24.06
2 L量筒内径 D/mm	84.90	85.44	84.78	84.82	84.84	84.98	84.96	42.48

3.2 不同液体的粘滞系数随温度的变化

同一种物质在不同温度下的粘滞系数是不同的,为了测量不同温度下的液体粘滞系数,采用温控加热恒温系统控制测量温度,弥补传统方法不能测量变温液体粘滞系数的局限性.待测液体的温度控制在 $22 \sim 43^\circ\text{C}$ 之间,控制半径 $r=4\text{ mm}$ 小球分别在2 L容器的蓖麻油和甘油中下落,其粘滞系数随温度的变化曲线如图3和图4所示.

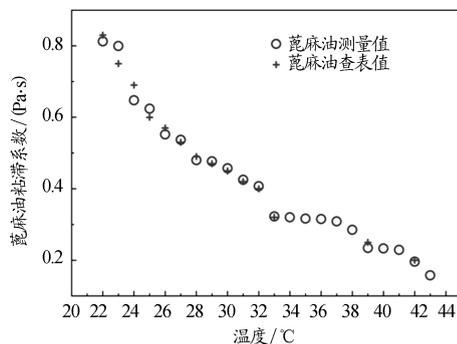


图3 蓖麻油粘滞系数随温度的变化

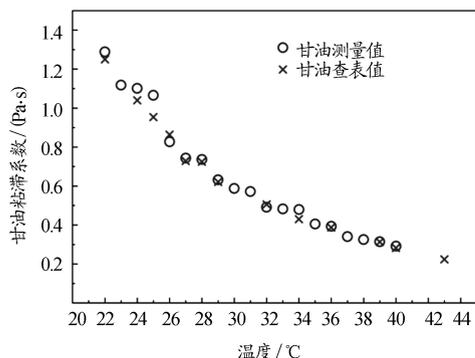


图4 甘油粘滞系数随温度的变化

由图3、图4可知,空心圆为本实验系统测量值,与相应文献查表值一致^[14,15],且所测粘滞系数随温度的变化曲线与查表所得不同温度下粘滞系数值的拟合曲线表现一致.23 °C时甘油和蓖麻油的粘滞系数分别为1.289 Pa·s和0.812 Pa·s,在25 °C之前随着温度的增加甘油和蓖麻油的粘滞系数急速降低至1.066 Pa·s和0.624 Pa·s.在25~43 °C之间,随着温度的增加液体的粘滞系数继续降低但降低幅度明显减小,在43 °C时蓖麻油的粘滞系数降低为0.158 Pa·s.在其他条件相同的情况下,液体温度越低,测得的粘滞系数越大,粘滞阻力越大,实验现象越发显著.通过对实验数据的分析与对比,改进后的实验数据精度远高于传统落球法.

3.3 不透明液体的粘滞系数测量

利用本实验装置可测量不透明液体的粘滞系数,以废弃机油为例,将4 mm小球在2 L容器的废弃机油中下落,对不同温度下的粘滞系数测量如图5所示.

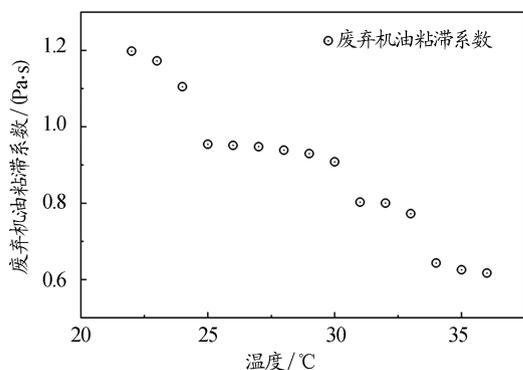


图5 废弃机油粘滞系数随温度的变化

通过数据分析可知废弃机油的粘滞系数随着温度的升高呈现下降趋势,从22 °C时的1.198 Pa·s降至36 °C时的0.617 Pa·s.由于废弃机油中杂质

较多、成分复杂、放置时间较长,因此数据波动较大.在较低温区间22~25 °C之间废弃机油的粘滞系数从1.255 Pa·s急速降低至1.198 Pa·s,在25~30 °C之间,随着温度的增加机油的粘滞系数继续降低但降低幅度趋于平缓,其数值保持在0.9 Pa·s左右受温度影响较小.在30~35 °C之间随着温度的增加废弃机油的粘滞系数继续降低,但降低幅度从急剧到平缓再到急剧,最后趋于稳定,粘滞系数降至0.617 Pa·s.由此可见废弃机油的粘滞系数随温度变化的趋势与大多数液体粘滞系数随温度的变化趋势类似.

4 结论

本文采用设置拉力控制小球匀速下落的方法,实现了对液体粘滞系数的测量.可发现采用小球受控匀速落球法测量粘滞系数具有以下几个主要优点:通过速度传感器直接获得小球速度,可避免获得小球速度时人工计时不精确以及肉眼判断位置带来的误差,大大提高了测量精度和准确度;采用力传感器(分辨率达0.002 N)测得小球所受粘滞力操作方便,具有高精度和高准确度,且简单易懂便于操作,从而更利于该实验的教学;该粘滞系数测量系统不受液体透明度限制,适用范围广;可通过温控加热恒温系统实现不同温度下液体粘滞系数的测量.通过在不同种类液体不同温度下的粘滞系数测量结果表明了,所测液体的粘滞系数与相关文献所得数值保持一致,且所测液体的粘滞系数均随温度的升高呈下降趋势.由此可确定本测量方法不仅有利于粘滞系数测量实验教学内容的理解,同时为现实工业生产中测定如蜡油、黑色润滑油等不透明液体的粘滞系数提供了理论和实验支持.

参考文献

- 李伟,刘竹琴.利用转动惯量实验仪测量液体粘滞系数[J].科技风,2020(33):60~61
- 王恒通,徐春媛,党磊.不同温度下液体粘滞系数实验的理论计算[J].实验科学与技术,2017,15(5):20~23
- 张凯悦,潘国华,贾晓倩,等.可控温式液体黏度测定仪的设计与测试[J].物理实验,2020,40(5):50~53

- 4 郑林,冯利,许济金,等.落球法测量液体粘滞系数实验的教学探究[J].中国多媒体与网络教学学报(上旬刊),2021(7):202~204
- 5 李晨浩,韦帅兵,罗钧洋,等.环境对蓖麻油粘滞系数的影响研究[J].科学技术创新,2021(5):18~20
- 6 董大兴,洪涵真,尤建军,等.落球法测定液体粘滞系数实验仪的一点改进[J].大学物理实验,2020,33(4):49~51
- 7 刘迁,汪华莲,张毅,等.探究落球法粘滞系数实验的最佳实验条件及误差修正[J].大学物理实验,2018,31(2):103~105
- 8 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
- 9 程玉梅.落球法测液体粘滞系数的研究[J].科技创新导报,2018,15(25):107~109
- 10 马玉婷,燕振刚,马小军,等.对落球法液体粘滞系数测定仪定位架的改进[J].大学物理实验,2019,32(6):92~95
- 11 吴庆丰,郑朝丹,代国红,等.利用Scratch软件实现落球法测量液体粘滞系数实验的仿真[J].大学物理实验,2020,33(2):45~48
- 12 郝杰.落球法测定液体粘滞系数实验的测时装置改进[J].长春师范大学学报,2020,39(4):18~20
- 13 孙权海,骆海峰,史浩,等.基于PASCO实验软件的大学物理探究性实验设计[J].电脑知识与技术,2018,14(27):223~224
- 14 王恒通,徐春媛,党磊.不同温度下液体粘滞系数实验的理论计算[J].实验科学与技术,2017,15(5):20~23
- 15 盛忠志,简家文.甘油的粘滞系数随温度变化的经验公式[J].新疆石油学院学报,1998(1):68~70

Experimental Research on Measuring of Viscosity Coefficient Based on Controlled Uniform Drop of the Falling Ball

Zhao Gao Du Niqian Gao Jingmin Chang Qing Tang Yanan Chen Weiguang

(School of Physics and Electronic Engineering, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou, Henan 450044)

Abstract: The measurement of viscosity coefficient of liquid is of great significance in engineering technology and education. In this paper, the small ball falling controlled at a constant speed by setting the tension is used to measure the liquid viscosity coefficient. The viscous force of the liquid on the ball and velocity of the ball in this state are detected by the speed sensor and force sensor, so as to measure the viscosity coefficient of the liquid. The viscosity coefficients of transparent liquid, translucent liquid and opaque liquid can be measured by this measurement method, and the values at different temperatures can be also measured when the measurement system combined with the heating device.

Key words: viscosity coefficient; falling ball method; controlled uniform motion

(上接第98页)

Taking the experiment of "measurement of characteristic parameters of light emitting diode (LED)" as an example, based on constructivism theory, this paper uses PBL teaching method to expand the traditional confirmatory experiment into a comprehensive innovative experiment. It reflects the advantages of PBL teaching method in giving full play to students' initiative and improving students' innovative ability and comprehensive quality.

Key words: PBL; experimental teaching; LED