

大学物理综合性实验的创新设计思考与实践*

——以落球法测量液体粘滞系数实验为例

钱妍君 谭小虎 马颖

(广州大学物理与材料科学学院 广东 广州 510006)

(收稿日期:2024-04-29)

摘要:落球法测量液体粘滞系数是大学物理实验课程中的一个基础项目,传统教学方案存在操作低效、实验原理及注意事项阐明不够详细等问题.针对常见的落球法测量液体不同温度下粘滞系数实验存在的问题进行分析,提出了改进方法,以简化操作过程、降低操作难度,并在提高读数效率及安全性的基础上减小测量误差,希望能够为进一步的实验优化提供借鉴参考.

关键词:变温粘滞系数的测量;落球法;实验创新改进

1 引言

在粘性大且无限广延的液体中,质量均匀、半径小、下落速度不快且涡流可忽略的小球,其运动时所受的反向摩擦力即为粘滞阻力^[1],表示为

$$f = 3\pi\eta dv \quad (1)$$

式中, η 是液体的粘滞系数; d 是落球的直径; v 是落球的运动速度.

常见大学物理实验教材中一般使用“落球法”测量蓖麻油在不同温度下的粘滞系数.实验中的关键操作是要求在30~50℃之间每隔5℃分别释放5个小球并测量下落时间.该操作方法在测量小球直径等步骤需要花费大量时间,过程难以维持液体的温度不变,释放小球前先进行润湿以消除表面气泡等操作技巧,亦会影响测量结果误差,此外,所用蓖麻油具有微毒性,还可能损害师生健康.

针对上述情形,本文提出了操作过程更为简单、测量结果更为精准、实验过程更为环保安全的改进方法,即在30~50℃的甘油中,每隔5℃分别释放2个小球.同时,对实验中相关问题作简要分析,以此深入探讨实验设计的原理、操作技巧、实验数据的处理和误差分析等,理解设计思想的巧妙和必要,探

索更具创新特色的大学物理实验课堂.

2 实验原理及方案

2.1 实验装置

本实验使用了粘滞系数测定装置,PID温控仪,计时秒表,小钢球若干,待测液体选用甘油.透明的双层套筒样品管便于液体温度快速平衡及小球下落距离测量.通过热循环水改变液体温度^[1],温控仪可以实时显示温控过程数据.实验仪器如图1所示.



图1 变温粘度仪与温控实验仪

2.2 实验原理

2.2.1 关于液体的粘滞系数

改进的实验方案仍为落球法,依据近似条件下的斯托克斯定律^[2],测量不同温度下的粘滞系数.小

* 中国科协研究生能力提升项目,项目编号:KXYJS2022030.

作者简介:钱妍君(2002—),女,在读本科生.

通讯作者:马颖(1964—),女,硕士,副教授,主要研究方向为光学薄膜特性、物理教育.

球在液体中自由下落时,受到重力 G 、浮力 F 和粘滞阻力 f 的作用,如图2所示.

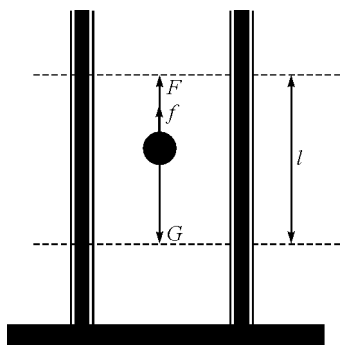


图2 小球在甘油中的受力分析

小球从静止开始下落,先做加速运动,达到收尾速度时,小球所受三力平衡,开始匀速下落,此时

$$G - F - f = 0$$

其中

$$G = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho_0 g$$

$$F = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho g$$

ρ_0 为小钢球密度, ρ 为甘油密度, d 为小球直径, g 为本地的重力加速度;粘滞力 $f = 3\pi\eta d v_0$, 小球收尾时的速度为 v_0 , 可得液体粘滞系数为

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

式(2)在未考虑甘油容器边界的影响时近似有效. 由于量筒深度和内径有限,不符合“无限广延”的假设,且需考虑湍流影响,故需对上式进行修正. 经验修正为

$$\eta = \frac{(\rho_0 - \rho)gd^2}{18v_0 \left(1 + 2.4 \frac{d}{D}\right)} \quad (3)$$

式(3)中, D 是量筒内径.

2.2.2 小球达到收尾速度之前所经路程 L 的推导

由牛顿运动定律及粘滞阻力的表达式,可列出小球在达到收尾速度之前的运动方程为

$$\frac{1}{6} \pi d^3 \rho_0 \frac{dv}{dt} = \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_0 - \rho) g - 3\pi\eta d v \quad (4)$$

小球进入液体时即初始条件 $t = 0, v = 0$, 可以得到

$$v = \frac{d^2 g}{18\eta} (\rho_0 - \rho) \left(1 - e^{-\frac{18\eta}{d^2 \rho_0} t}\right) \quad (5)$$

随着时间增大,可得收尾速度为式(2)中的 v_0 .

由此可见收尾速度与粘度成反比关系. 从速度

为 $0 \sim 99.9\%$ 收尾速度的这段时间,在使用 $1 \sim 2$ mm 直径小钢球 $\rho_0 = 7.80 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 和纯甘油 $\rho = 1.2613 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的实验条件下,下落距离 L 超过 1 mm,即可认为小球达到收尾速度. 实际实验教学中,常采用修正后的式(3)计算粘滞系数 η .

2.3 实验内容及步骤

以下本着将实验操作步骤简化、提高读数的精确性、过程安全、减小测量误差和适合课堂教学等原则,对实验进行优化.

2.3.1 实验前期准备

(1) 开启 PID 温控仪预热,设定测量温度.

(2) 选取两个目测大小相同的小钢球,使用读数显微镜分别从 3 个不同方位测量直径取平均值.

(3) 在量筒上标记小球下落起点和终点之间的距离,亦即小球匀速下落的距离.

2.3.2 对落球过程进行测量

(1) 用镊子夹住小球,连续使 2 个小球在量筒中央液面处自由下落,记录其匀速下落时间.

(2) 改变温度,每隔 5°C 重复上述操作.

2.3.3 计算实验结果并绘制数据曲线

(1) 计算各温度下甘油的粘滞系数 η .

(2) 绘制甘油的粘滞系数随温度变化的曲线,即 $\eta - T$ 曲线.

3 实验设计的改进方案分析

3.1 小球下落距离的确定

3.1.1 原实验设计现存问题

理论上认可,当小球从液面自由下落的距离超过 1 mm,即可认为达到了收尾速度. 然而可能因操作不当,在下落时具有初速度;还因操作计时器时无法避免反应时间等因素,容易导致最终的实验结果误差较大.

3.1.2 问题分析

需要确认小球达到收尾速度后开始测量,还要注意在小球还没来得及触及底部时即停止计时,以减小边界效应.

3.1.3 改进方案

选定从液面下 5 cm 后和距离油筒底部至少 5 cm 的区间,作为测量小球匀速下落过程时间的起始点、终止点.

3.2 操作过程的优化

3.2.1 原实验设计现存问题

实验操作时会要求尽量在油筒的截面中心位置释放小球,在得知是为了减小边界效应的影响后,有“油筒越大或小球越小效果越好吗?”等问题。

3.2.2 问题分析

在文献[3]报道的落球法实验中^[3],记录了在20℃选取直径 $d=2\text{ mm}$ 的小球进行实验,分别在圆筒中心处、距中心处 $\frac{1}{2}$ 和靠近边缘处释放小球,测量了每组下落相同距离所需的时间,得到下落速度 v ,测量得到了蓖麻油的粘滞系数,并计算出不同情况下的百分误差,如表1所示。

表1 不同距中心距离对释放小球所测蓖麻油粘滞系数的影响

距中心距离/cm	下落平均时间/s	速度大小/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	η 测量值/ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	百分误差/ %
0.00	11.69	0.012 84	0.951 7	0.18
0.50	11.70	0.012 83	0.953 0	0.32
0.90	11.81	0.012 71	0.961 6	1.22

结果显示,小球在圆筒中心处下落的情况,测量误差较小可忽略,而在靠近边缘释放时,小球甚至可能触碰到管壁,导致显著误差。

以上实验结论与笔者的实验结果基本一致。测量不同温度粘滞系数时,还有对液体加热效果不均匀等导致出现的误差问题。

3.2.3 改进方案

扩大油筒内径或减小小球直径问题时,提示理论上虽然可行,但现实中还需考虑小球的制造成本、工艺难度等潜在影响因素,油筒直径大小则对加热效果影响较大。

3.3 下落小球个数的确定

3.3.1 原实验设计现存问题

教材中会要求在30~50℃之间每隔5℃释放5个小球,这样做在测量小球直径过程中会消耗大量的时间,不适宜课堂教学,同时会引发为何不减小温度间隔测量或重复使用同一个小球等疑问。

3.3.2 问题分析

实验过程需要兼顾实验精度与操作时间。同一温度下重复释放越多个小球,期间就越难以维持温

度稳定。而如果每间隔2℃分别释放不同的2个小球,也将会有11个待测温度点,仅是所需小球直径的测量就要读数66个,测量精度并没有太大提升,但操作时间显著增长,因此不建议采用这种实验方案。

3.3.3 改进方案

本实验改进为30~50℃之间每隔5℃分别释放相同的2个小球,体现了测量的可重复性,一定程度上可以减少测量误差,确保实验准确高效。

3.4 关于实验过程的一些补充

(1) 实验中待测液体的选取

一些教材中选用蓖麻油作为待测液体,因其存在微毒性,不利于师生的健康。经调研决定选用护肤品中常用的原料甘油作为测量样品,环保安全,且二者都是透明液体,粘度特性相似。但甘油吸湿性较强,需要注意在非实验时间尽量封盖容器,减少从空气中吸收水分。

(2) 实验前置条件

实验过程需确保油筒稳定,需要提前至少一天时间静置容器以稳定甘油并消除气泡,避免干扰小球的下降过程。小球则选大小一致、干净圆润者,以确保在甘油中下落过程稳定。

(3) 实验操作的一些技巧

可用备用甘油浸润小球,确保表面均匀附着液体再释放,此操作看似简单,却可以避免小球带有初速度下落影响收尾距离。

4 总结

本文分析落球法测量变温粘滞系数实验在教学过程有待优化的一些问题,提出了创新改进方法,旨在拓展学生实验思路,理解实验设计的巧妙和必要,引导学生开动脑筋,发挥他们的聪明才智,启发他们在实验中敢于创新,推动物理深度学习,培养复合型高素质科学实验人才。

参考文献

- [1] 马颖. 大学物理实验教程[M]. 3版. 北京:清华大学出版社,2022:412.
- [2] 陈健,马奔,刘丽华,等. 关于“落球法测量液体粘滞系数”实验的教学研究[J]. 实验室科学,2013,16(3):29-32.
- [3] 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(2):103-105.