

物理实验



压差阻力在落球法测液体粘度的应用与研究*

麦炽聪 卜寿亮 温建平

(嘉应学院物理与光信息科技学院 广东 梅州 514015)

张灵辉

(嘉应学院土木工程学院 广东 梅州 514015)

(收稿日期:2017-06-23)

摘要:研究了落球法测量低粘度液体的粘滞系数时小球在液体中匀速下落过程中,小球除受到重力、浮力、粘滞阻力还受到了压差阻力的作用,且四力作用并达到平衡.分析与测量了压差阻力值和引入的原因,提出通过研究小球四力平衡运动状态测量低粘度透明液体粘滞系数的新方法.

关键词:落球法 粘滞系数 压差阻力

1 引言

粘滞性是液体重要的物理性质之一,粘滞系数是表征液体粘滞性强弱的重要参数.测定液体的粘滞系数的方法有转筒法、落球法、阻尼振动法、杯式粘度计法、毛细管法等等^[1].落球法是一种绝对法测量液体的粘度,常用于教学演示或者生产测量,是大学物理教学中重要的实验.在一个盛有粘性液体的量筒中,从液面上方释放一金属小球,使小球在量筒的液体中自由铅直下落.当小球在液体中运动时,由于附着在小球表面的液体层与周围液体层之间产生相对运动,小球即受到粘滞力作用.当受力平衡时,小球达到极限速度,做匀速运动,通过测量小球的极限速度可求解得到液体的粘度.

落球法测量较低粘度液体如食用玉米油的粘滞系数时,当小球在液体中匀速下落过程中,小球除受到重力、浮力、粘滞阻力还受到了压差阻力的作用,且四力作用并达到平衡.文中建立了通过研究分析小球四力平衡运动状态测量低粘度透明液体的新实验方法.

2 实验理论

当金属小球在粘性液体中缓慢自由沉降时,它受到3个竖直方向的力,小球的重力 G ,浮力 F ,粘滞阻力 f_1 ^[2].若液体深度无限,小球的表面光滑,半径为 r ,且下落速度 v 比较小,斯托克斯指出,小球此时在液体中受到的粘滞阻力为

$$f_1 = 6\pi\eta rv \quad (1)$$

上式即为斯托克斯公式,式中 η 是液体的粘滞系数,单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$.

当小球在液体中匀速下落速度比较大时,由于液体自身的粘滞性,小球下落方向的前后会产生压强差,于是产生了压差阻力.此时小球在竖直方向上受到4个力的作用,小球的重力 G ,液体提供的浮力 F ,粘滞阻力 f_1 和压差阻力 f_2 (方向与粘滞阻力一致,跟小球的速度方向相反),如图1所示.此时小球受到的压差阻力有

$$f_2 = \frac{\varphi A \rho v^2}{2} \quad (2)$$

式中 A 为小球在垂直于运动方向的面积(又称小球

* 嘉应学院自然科学研究项目,项目编号:2015KJY04

作者简介:麦炽聪(1994-),男,在读本科生,研究方向为光信息科学.

通讯作者:温建平(1977-),女,硕士,高级实验师,研究方向为大学物理实验.

的投影面积), $A = \pi r^2$, r 为小球半径, φ 为阻力系数, v 为运动速度, ρ 为液体密度.

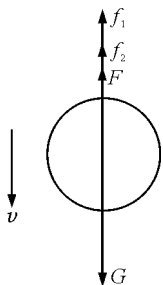


图1 小球四力平衡示意图

压差阻力与粘滞阻力随小球的速度增大而增大, 当小球下落达到一定速度时, 重力等于浮力、粘滞阻力和压差阻力之和, 此时作用在小球竖直方向上的4个力平衡, 有

$$G = F + f_1 + f_2$$

即

$$mg = \rho g V + 6\pi\eta r v + \frac{\varphi A \rho v^2}{2} \quad (3)$$

此时小球做匀速运动, 所得的速度 v 为小球在液体中自由下落的极限速度.

3 实验方法与结果

3.1 实验装置

实验采用视频法进行测定, 视频法即在盛有待测液体的量筒(量筒规格 1 000 ml) 侧边沿竖立放一把钢尺(在普通量筒上使用, 注意一定要使用可调节水平底座), 然后架设一台摄像机, 调节好摄像机的距离、拍摄角度和高度, 使镜头正对量筒, 并且能清晰拍摄到钢尺的刻度. 实验装置如图 2 所示.

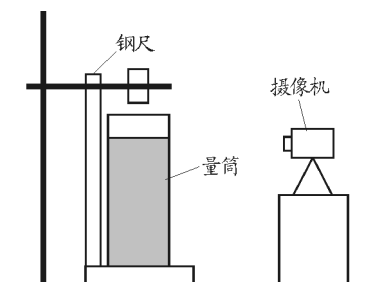


图2 视频法实验装置示意图

3.2 实验方法

实验过程直接使用录像的方式记录钢珠在液体中下落的全过程. 实验完成后使用计算机视频处理

软件处理所得的实验视频, 按所需时间间隔或者图像帧数间隔截取图片, 随后再用图像处理软件, 把截取得到的所有图片整合, 合成一幅小球下落运动轨迹图^[3]. 最后把图像放大数倍, 读取每个小球中心在钢尺上所对应的刻度, 即可得到小球的位置. 摄像机的录像帧数为 30 帧, 即得到每一秒的等分的 30 幅图, 则每两张图之间的时间间隔为 $\frac{1}{30}$ s. 通过读取每两幅小球位置图对应钢尺的刻度, 即可得这 $\frac{1}{30}$ s 内, 小球下落的距离, 再通过位移速度公式 $v = \frac{s}{t}$, 求得小球下落 $\frac{1}{30}$ s 的平均速度^[4]. 实验例图如图 3 和图 4 所示.



图3 单幅截图



图4 处理后的轨迹效果图

实验中选取 5 种直径规格不同的钢珠, 在相同的量筒中心且接触液面位置释放. 由于钢珠直径不同, 直径比较大的钢珠整体质量比较大, 在液体中下落的速度也比较大. 已知小球在液体中的运动速度比较大时, 需要考虑压差阻力的作用. 通过使用不同直径的钢珠进行实验, 观察所得的实验结果, 看钢珠下落速度较快情况下是否会因压差阻力的干扰而影响最后所得的液体的粘滞系数, 判断钢珠直径对实验产生的误差影响.

3.3 实验结果

3.3.1 钢珠与玉米油参数测量

实验使用 5 种钢珠, 按直径从小到大编号: 钢珠①、钢珠②、钢珠③、钢珠④、钢珠⑤. 螺旋测微器

测量每种钢珠的直径,采用多次测量,具体每一种钢珠取5颗,每颗在不同的位置测2次,每种钢珠总共测量10次,然后取平均值,数据记录如表1所示.

根据表1数据可得钢珠体积和质量的平均值,再根据密度公式 $\rho = \frac{M}{V}$,即可求得钢珠的密度.由于每一个钢珠的质量比较小,取30颗钢珠使用托盘天

平称量其质量,然后再求出单个的质量,数据记录如表2所示.玉米油参数测量,先称量200 ml规格量筒的质量,然后取少量玉米油置量筒中称总质量,读取量筒中玉米油的体积,用总质量减去量筒质量,得玉米油质量后代入密度公式 $\rho = \frac{M}{V}$,得玉米油的密度.数据如表3所示.

表1 钢珠直径记录表

钢珠类型	d_1/mm	d_2/mm	d_3/mm	d_4/mm	d_5/mm	d_6/mm	d_7/mm	d_8/mm	d_9/mm	d_{10}/mm	\bar{d}/mm
钢珠①	1.008	1.009	1.004	1.007	1.007	1.002	1.008	1.006	1.005	1.007	1.006
钢珠②	1.505	1.500	1.501	1.502	1.502	1.500	1.501	1.504	1.502	1.502	1.502
钢珠③	2.008	2.009	2.007	2.008	2.005	2.002	2.008	2.010	2.006	2.008	2.007
钢珠④	4.507	4.513	4.509	4.508	4.510	4.509	4.511	4.511	4.510	4.509	4.509
钢珠⑤	5.009	5.006	5.002	5.008	5.001	5.003	5.004	5.006	5.002	5.003	5.004

表2 钢珠质量密度对照表

钢珠类型	30颗钢珠总质量/g	单颗质量/g	单颗体积/ mm^3	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
钢珠①	0.11	0.003 8	0.53	7 139
钢珠②	0.37	0.012 0	1.77	6 779
钢珠③	1.08	0.036 0	4.23	8 511
钢珠④	11.40	0.389 0	48.02	8 100
钢珠⑤	15.00	0.500 0	65.53	7 630

表3 玉米油参数

玉米油+量筒总质量/g	量筒质量/g	玉米油质量/g	玉米油体积/ml	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
121.41	30.20	91.21	110	829

4 实验结果分析

实验时直径不同的5种钢珠在相同位置释放.每种钢珠的直径、极限速度和求得的粘滞系数如表4所示.

表4 钢珠数据对应表

钢珠类型	钢珠①	钢珠②	钢珠③	钢珠④	钢珠⑤
直径/mm	1.006	1.502	2.007	4.509	5.004
极限速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.018	0.036	0.058	0.167	0.177
粘滞系数/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	0.192 8	0.202 4	0.290 0	0.481 2	0.523 0

由表4数据可得,钢珠达到的极限速度和所得粘滞系数随着钢珠的直径增大而增大.钢珠①和钢

珠②的极限速度均在0.05 m/s以下,速度较小,而钢珠③、钢珠④和钢珠⑤的极限速度较大,钢珠在液体中运动时不仅会受粘滞阻力的影响,还有压差阻力的影响.根据压差阻力的计算公式,压差阻力与速度的平方成正比,而钢珠③、④、⑤的匀速运动速度比较大已引入压差阻力,导致求得的粘滞系数偏大,如下验证.

当钢珠⑤达到极限速度时,根据球体在粘性液体中沉降速度与雷诺数关系.得雷诺数

$$Re = \frac{\rho d v}{\eta} = 3.8$$

式中 ρ 是液体密度, η 是粘滞系数, d 是钢珠⑤直径,

v 为钢珠 ⑤ 极限速度.

当雷诺数 Re 取 3.8 时, 查阅资料得此时对应的阻力系数 $\varphi = 8.63^{[5]}$. 将其代入压差阻力计算公式

$$f = \frac{\varphi A \rho v^2}{2}$$

得 $f = 0.002\ 204\ \text{N}$

式中 $A = \pi r^2$.

用钢珠 ① 所得的 (23.5°C) 标准玉米油粘滞系数 $\eta = 0.192\ 8\ \text{Pa} \cdot \text{s}$ 计算钢珠 ⑤ 受到的粘滞阻力, 代入式(1), 得

$$f' = 0.001\ 609\ \text{N}$$

钢珠 ⑤ 受到的液体的浮力 $F = \rho g V$, ρ 为液体密度, V 为钢珠体积 $V = \frac{4}{3} \pi r^3$, 代入数据, 得

$$F = 0.000\ 533\ \text{N}$$

浮力、压差阻力、粘滞阻力, 这 3 个力方向相同, 得

$$F + f + f' = 0.004\ 346\ \text{N} \approx G$$

钢珠 ⑤ 重力 $G = 0.004\ 9\ \text{N}$. 在误差范围内验证

得四力平衡, 钢珠 ⑤ 下落过程受到粘滞阻力与压差阻力的作用.

5 结论

落球法测量低粘度液体的粘滞系数时小球在液体中匀速下落过程中, 小球除受到重力、浮力、粘滞阻力还受到了压差阻力的作用, 且小球匀速下落时, 四力达到平衡. 因此, 建立了一种通过研究小球四力平衡运动状态测量低粘度透明液体粘滞系数的新方法. 扩展了落球法测量液体的粘滞系数的适用范围.

参考文献

- 1 张也影. 流体力学(第2版). 北京: 高等教育出版社, 1999
- 2 杨兰田, 吴明遇. 力学. 武汉: 华中师范大学出版社, 1992
- 3 温建平, 刘通宁, 张亦翻, 等. 等变速落球法测液体黏度的研究. 大学物理, 2014, 33(1): 42 ~ 44
- 4 赵平华. 落球法测液体的粘滞系数的研究. 大学物理, 2002, 21(7): 29 ~ 30
- 5 熊国立. 泥沙沉速的另一种算法. 西北建筑工程学院学报, 1986(1): 69 ~ 72

The Application and Research on Pressure Difference Resistance in Measuring Liquid Viscosity Using Falling Ball Method

Mai Chicong Bu Shouliang Wen Jianping

(School of Physics and Optical Information Sciences, Jiaying College, Meizhou, Guangdong 514015)

Zhang Linghui

(School of Civil Engineering, Jiaying College, Meizhou, Guangdong 514015)

Abstract: Studied the method of falling balls when measuring the viscous coefficient of low viscosity liquid ball at a constant speed in a liquid drop, ball except by gravity, buoyancy and viscous drag is the function of differential pressure resistance, and four force balance. In this paper, we analysis and measuring the differential pressure resistance value and the introduction of the reason, put forward by studying the ball four force balance motion measurement a new method of low viscosity transparent liquid viscosity coefficient.

Key words: viscosity; falling - ball method; differential pressure resistance