

实验 4-10 落球法测量液体粘滞系数

各种实际液体具有不同程度的粘滞性。当液体流动时，平行于流动方向的各层流体速度都不相同，即存在着相对滑动，于是在各层之间就有摩擦力产生。这一摩擦力称为粘滞力，它的方向平行于接触面，其大小与速度梯度及接触面积成正比，比例系数 η 称为粘滞系数，它是表征液体粘滞性强弱的重要参数。液体的粘滞性的测量是非常重要的。例如，现代医学发现，许多心血管疾病都与血液粘滞系数的变化有关，血液粘滞系数的增大会使流入人体器官和组织的血流量减少，血液流速减缓，使人体处于供血和供氧不足的状态，可能引发多种心脑血管疾病和其他许多身体不适症状，因此，测量血粘度的大小是检查人体血液健康的重要标志之一。又如，石油在封闭管道中远距离输送时，其输运特性与粘滞性密切相关，因而在设计管道前，须测量被输石油的粘滞系数。

测定液体粘滞系数有多种方法，本实验所采用的落球法是一种绝对法测量液体的粘滞系数。如果一小球在粘滞液体中铅直下落，由于附着于球面的液层与周围其他液层之间存在着相对运动，因此小球受到粘滞阻力，它的大小与小球下落的速度有关。当小球作匀速运动时，测出小球下落的速度，就可以计算出液体粘滞系数。

实验原理

1. 当金属小圆球在粘性液体中下落时，它受到三个铅直方向的力：小球的重力 mg （ m 是质量）、液体作用于小球的浮力 ρgV （ V 是小球体积、 ρ 是液体密度）和粘滞阻力 f （其方向与小球运动方向相反）。如果液体无限深广，在小球下落速度 v 较小的情况下，有

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

上式称为斯托克斯公式，其中 r 是小球的半径； η 称为液体的粘滞系数，其的单位是 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

小球开始下落时，由于速度尚小，所以阻力也不大；但随着下落速度的增大，阻力也随之增大。最后，三个力达到平衡，即：

$$mg = \rho gV + 6\pi\eta rv$$

于是，小球作匀速直线运动。由上式可得：

$$\eta = \frac{(m - V\rho)g}{6\pi rv}$$

令小球的直径为 d ，并用 $m = \frac{\pi}{6}d^3\rho'$ ， $v = \frac{l}{t}$ ， $r = \frac{d}{2}$ 代入上式得：

$$\eta = \frac{(\rho' - \rho)gd^2t}{18l} \quad (2)$$

其中 ρ' 为小球材料的密度， l 为小球匀速下落的距离， t 为小球下落 l 距离所用的时间。

2. 实验时，待测液体必须盛于容器中（如图 1 所示），故不能满足无限深广的条件，实验证明，若小球沿筒的中心轴线下落，式（2）须作如下改动方能符合实际情况：

$$\eta = \frac{(\rho' - \rho)gd^2t}{18l} \frac{1}{\left(1 + 2.4\frac{d}{D}\right)\left(1 + 1.6\frac{d}{H}\right)} \quad (3)$$

其中 D 为容器内径， H 为液柱高度。

3. 实验时小球下落速度若较大，例如气温及油温较高，钢珠从油中下落时，可能出现湍流的情况，使公式（1）不再成立。此时要作另一个修正（详见附录）。

实器装置

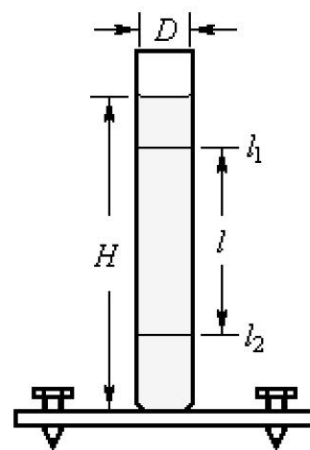


图 1 实验装置图

实验所用的主要装置即为图 1 中盛油的玻璃管筒。在管的上、下部各有一环线作为标记（即 l_1 和 l_2 ），彼此间的距离为 l 。小球在 l_1 至 l_2 间作匀速运动。量筒固定在附有三个水平调节螺旋的平台上，借助一铅垂线可调节玻管的铅直。

实验内容

一、必做部分

1. 将小球用有机溶剂（乙醚和酒精的混合液）清洗干净，并用滤纸吸干残液。从玻璃管内取少许油涂在小球上，备用。
2. 以铅垂线为基准，调节底盘的三个螺钉使油管保持铅直。将一颗小球沿玻璃管的中轴线投下，观察小球下落过程中是否与玻管壁平行。
3. 用温度计测量油温，在全部小球下落后再测量一次油温，取其平均值作为实际油温。
4. 用千分尺测量小球的直径（千分尺使用方法请阅实验 4-1）；用镊子夹住小球，将其放入玻璃管中的油面下，让小球沿着油柱的中轴线下落；用电子秒表测量小球经过距离 l 所需的时间 t 。如此重复多次。
5. 用游标卡尺测出玻璃管的内径 D （游标卡尺使用方法请阅实验 4-1）；用钢尺测出小球的下落距离 l 及油柱深度 H 。
6. 用密度计测量油的密度（为了避免因油浸润玻璃而产生读数误差，应从油面下方读数）。

二、选做部分

1. 让小球偏离中轴线下落，观测 v 值的变化。
2. 用激光光电门（关于光电门，请阅实验 4-2、）与电子计时仪代替电子秒表，测量液体的粘滞系数。（注意：激光束必须通过玻璃圆筒中心轴。）将测量结果与公认值进行比较。
3. 将三至四个激光光电门装在圆筒上下不同位置，测量小球下落过程中的速度，证明小球作匀速运动。
- *4. 用直径不同的多种小球，自行设计实验方案，证明式（3）。

思考题

1. 如何判断小球在作匀速运动？
2. 如果遇到待测液体的 η 值较小，而钢珠直径又较大，这时为何须用（5）式计算？
3. 用激光光电开关测量小球下落时间的方法测量液体粘滞系数有何优点？

参考资料

1. 贾玉润等. 大学物理实验. 上海：复旦大学出版社. 1988.1：142—146。
2. 郑永令. 贾起民. 方小敏. 力学.（第二版）. 高等教育出版社. 2002.8。
3. 上大电子设备有限公司. VM-1 落球法粘滞系数测定仪（激光光电计时）说明书. 2001.6。

附录

为了判断是否出现湍流，可利用流体力学中一个重要参数雷诺数 $R_e = \frac{\rho dv}{\eta'}$ 判断。当 R_e 不很小时，式（1）应予修正，但在实际应用落球法时，小球的运动不会处于高雷诺数状态，一般 R_e 值小于 10，故粘滞阻力 f 可近似用下式表示：

$$f = 6\pi\eta'vr \left(1 + \frac{3}{16} R_e - \frac{19}{1080} R_e^2 \right) \quad (4)$$

式中 η' 表示考虑到此种修正后的粘滞系数。因此，在各力平衡时，并顾及液体边界影响，可得：

$$\eta' = \frac{(\rho' - \rho)gd^2t}{18l} \frac{1}{\left(1 + 2.4 \frac{d}{D} \right) \left(1 + 3.3 \frac{d}{2H} \right) \left(1 + \frac{3}{16} R_e - \frac{19}{1080} R_e^2 \right)} = \eta \left(1 + \frac{3}{16} R_e - \frac{19}{1080} R_e^2 \right)^{-1}$$

式中 η 即为由式（3）求得的价值。上式又可写为

$$\eta' = \eta \left[1 + \frac{A}{\eta'} - \frac{1}{2} \left(\frac{A}{\eta'} \right)^2 \right]^{-1} \quad (5)$$

式中 $A = \frac{3}{16} \rho d v$ 。式 (5) 的实际算法如下：先将式 (3) 算出的 η 值作为方括弧中第二、三项的 η' 代入，于是求出答案为 η_1 ；再将 η_1 代入上述第二、三项中，求得 η_2 ；……。因为此两项为修正项，所以用这种方法逐步逼近可得到最后结果 η' （如果使用具有贮存代数公式功能的计算器，很快可得到答案）。一般在测得数据后，可先算出 A 和 η ，然后根据 $\frac{A}{\eta}$ 的大小来分析。如 $\frac{A}{\eta}$ 在 0.5% 以下（即 R_e 很小），就不再求 η' ；如 $\frac{A}{\eta}$ 在 0.5~10%，可以只作一级修正，即不考虑 $\frac{1}{2} \left(\frac{A}{\eta'} \right)^2$ 项；而 $\frac{A}{\eta}$ 在 10% 以上，则应完整地计算式 (5)。

