

液体动力粘度的测定

液体稳定流动时处于层流状态,若平行于流动方向的各液层之间有相对运动,则任意两液层的接触面上将产生一对等值反向的力,阻碍液层间的相对运动。这种液层之间的相互作用力的性质与固体接触面间的摩擦力相似,所以称为内摩擦力或粘滞力。相邻两个液层之间的粘滞力 f 的方向沿液层的接触面,与流动方向相反,大小与两液层接触面积 A 及垂直于流速方向的速度梯度 $\frac{dv}{dx}$ 成正比,即

$$f = \eta A \frac{dv}{dx}$$

式中 η 为动力粘度,它表示液体粘滞性的大小。 η 的数值与液体的性质和温度有关。温度升高,粘度迅速地减小,所以当给出粘度时,一定要注明温度。 η 的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

在工农业生产和科学研究,如水工技术、热力技术及一切有关液体传输管道问题中,常常需要知道所采用液体的粘度。测定粘度的常用方法有:落球法、毛细管法、转筒法、扭摆法。要根据粘度的大小及透明度等进行选择。

一、实验目的

- ① 观察液体的内摩擦现象,用多管落球法测定液体的(动力)粘度;
- ② 掌握测量显微镜及停表的使用方法;
- ③ 学习用外延扩展法获得理想条件的思想方法;

④ 用作图法或使用微机用线性拟合法处理数据。

二、仪器用具

测量显微镜,装有待测液体、不同直径的圆柱透明管,停表,小钢球,铜镊子,磁铁,气泡水准器,密度计,温度计等。

三、实验原理

固体小球在液体中缓慢下落时,受到三个力的作用:重力、浮力和阻力。这里与运动方向相反的摩擦阻力就是粘滞力。如果液体粘滞性较大,且在各方向上都是均匀而无限广延的,球体小而光滑、质量均匀,在液体中下落时的速度很小,那么,小球在运动过程中不产生涡旋。根据斯托克斯定律,这时小球受到的粘滞力 f 为

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

式中 η 是液体的(动力)粘度, v 是小球下落时的速度, d 是小球的直径。

设小球的密度为 ρ , 体积为 V , 液体的密度为 ρ_0 , 重力加速度为 g 。当小球在液体中下落时,所受重力 ρVg 方向铅直向下,浮力 $\rho_0 Vg$ 和粘滞力 f 铅直向上,由式(1)可知 f 随小球速度的增加而增大。分析可知,小球开始下落时, $\rho Vg > \rho_0 Vg + f$, 小球作加速运动。当小球速度增加到某一值 v_0 时,小球所受合力为零,于是小球就以 v_0 匀速下落,这时

$$V(\rho - \rho_0)g = 3\pi\eta v_0 d$$

$$\text{即 } \frac{1}{6}\pi d^3(\rho - \rho_0)g = 3\pi\eta v_0 d \quad (2)$$

从而可得(动力)粘度 η 为

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18v_0} \quad (3)$$

式中 v_0 是小球在无限广延的连续液体中匀速下落时的速度,称为终极速度。

从式(3)可知,要测定液体的粘度 η , 关键是如何测得 v_0 。然而,装在容器内的液体不满足无限广延条件。那么,如果采用一组直径不同的圆管,垂直安装在同一水平底板上,如图 2-22 所示。在每个圆管上刻有间距为 s 的 A、B 两刻线,上刻线 A 与液面间具有适当的距离,使小球下落到接近 A 刻线时,已在作匀速运动,且可近似看作是无限广延的。下刻线与底面间也应该有较大的距离。依次测出同一个小球通过各圆管两刻线间所需的时间 t 。若各管的内直径用一组 D 值表示,大量的实验

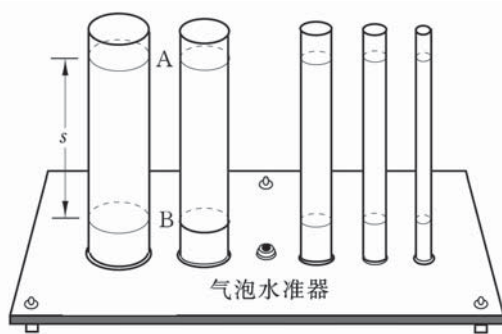


图 2-22 多管落球法测液体粘度装置图

数据分析表明, t 与 d/D 成线性关系。以 t 为纵轴, d/D 为横轴, 将测得的各实验点连成直线, 延长该直线与纵轴相交, 其截距为 t_0 。 t_0 就是当 $D \rightarrow \infty$ 时, 即在无限广延的液体中, 小球匀速下落通过距离 s 所需的时间, 故

$$v_0 = \frac{s}{t_0} \tag{4}$$

式(3)、(4) 中 ρ 、 g 、 s 的数值由实验室给出, 测出 d 、 ρ_0 , 求出 v_0 , 便可得到 η 。

落球法一般用来测量粘度较大的液体, 并要求液体有一定的透明度。

四、实验内容

- ① 调节安装在圆柱管底板上的螺钉, 用气泡水准器观察, 使底板水平, 以保证圆柱管中心轴线处于铅直状态。用温度计在放密度计的液体中测一次液体的温度 θ_1 。
- ② 用测量显微镜(使用方法见附) 测量小钢球的直径 d , 在不同部位测量 5 次, 求平均值。
- ③ 用铜镊子夹起测得直径的小钢球, 细心地放入最细圆柱管液体的中心处, 观察小钢球的运动情况, 应使小钢球沿圆柱管中心轴线下落, 用停表测量小钢球通过刻线 A、B 间距的时间。
- ④ 用磁铁将这个小钢球从管中沿管壁吸出。
- ⑤ 依次测出该小球在其它各管液体中心处做落体运动通过 A、B 刻线间距的时间。
- ⑥ 用密度计测量液体的密度 ρ_0 , 再用温度计测一次液体的温度 θ_2 , 然后求平均值 θ (摄氏温标)。
- ⑦ 抄录实验室给出的各圆柱管内径 D 、A、B 间的距离 s , 小钢球密度 ρ 的数值。当地重力加速度 g 的值查阅附录二。

五、数据记录及处理

- ① 数据记录表格。

表 1 小钢球直径的测量

| 测量次数 | 初读数 /mm | 末读数 /mm | 小球直径 $d = \text{末} - \text{初} $ /mm | 绝对误差 $\Delta d = d - \bar{d} $ /mm |
|-------|------------|------------|--|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| 平 均 值 | | | $\bar{d} =$ | $\overline{\Delta d} =$ |

表 2 小钢球下落时间的测量

| | | | | | |
|---------------------|--|--|--|--|--|
| 圆柱管内径 D/mm | | | | | |
| 下落时间 /s | | | | | |

$$\rho_0 = \quad \theta =$$

$$s = \quad \rho = \quad g =$$

② 若用微型计算机处理数据,要用高级语言编写计算程序,用线性拟合法(见第 1 章)进行数据处理,求出 t_0 、 v_0 和 η ,并给出 a_1 、 a_0 、 S_{a1} 、 S_{a0} 及相关系数 r 的值。

③ 若用作图法处理数据,要用直角坐标纸作出 $t-\frac{d}{D}$ 图线,从图上求出 t_0 ,再计算出 v_0 和 η 。

六、注意事项

- ① 液体必须静止,在投、取小钢球时,动作应轻缓。
- ② 实验时,液体中应无气泡。小钢球要圆,表面应该清洁。
- ③ 因随液体温度升高,粘度迅速地减小,所以在实验过程中不要用手触摸小钢球和圆柱管壁。

七、思考题

- ① 多管落球法测 η 实验是如何满足无限广延条件的?
- ② 试根据式(3)推导估算 η 的相对误差公式,并指出产生误差的主要因素是什么,如何减小误差?
- ③ 当使用一根圆柱管测定液体的粘度 η 时,由于管壁对小球运动的影响,应将求得的速度 v ,通过修正公式 $v_0 = v(1 + k\frac{d}{D})$ 修正得到 v_0 。试利用你的实验直线确定修正公式中的 k 值。

八、拓展实验

用单管落球法测定液体的粘度。要求推导测量公式,进行测量,计算出结果,并分析误差,与多管法进行比较。

附 测量显微镜(JLC 型)

1. 用途

测量显微镜是一种光学计量仪器,它是由显微镜把待测物放大后来测量长度或角度的。测量显微镜的结构简单,操作方便,适用范围广,主要用途如下:

① 在直角坐标中测量长度,例如测定孔距、基面距离、刻线距离、狭缝宽度等。

② 转动刻度盘测量角度,例如对刻度盘、样板、钻孔模板以及几何形状复杂的零件进行角度测量。

③ 用作观察显微镜,例如检查印刷照相版、检验纺织纤维,用比较法检测工件表面的光洁度等。

2. 仪器结构

① 光学系统如图 2-23 所示。外界光线通过反光镜,垂直向上反射到载物台上与被测工件相遇,被照亮的工件由物镜放大,再经过转向棱镜成像在分划板上,经过目镜进入观察者眼中。

② 仪器外形如图 2-24 所示。目镜 1 安装在棱镜座 18 的目镜套管内,目镜筒止动螺钉 2 可以固定目镜的位置。棱镜座能够转动,并可用止动螺钉 3 止动。物镜 5 直接旋在镜筒 4 上,组成显微镜。转动调焦手轮

17 可使显微镜的物镜上下升降,进行调焦。支架 15 用定位旋钮 14 紧固在立柱 16 的适当位置。测量载物台 6 装配在平台 13 上,平台与立柱可用旋钮 12 固紧。反光镜 8 装在底座 10 上,根据光源方向可以四面转动,以得到明亮的视场。

在 X-Y 直角测量坐标系中,旋转测微鼓轮 11 时,测量载物台 6 沿 X 轴方向移动。测微鼓轮边上刻线为 100 等分,螺杆 9 的螺距是 1 mm,故鼓轮每转过 1 格相当于移动 0.01 mm 距离。转动测微器 7,载物台则沿 Y 轴方向移动,测微器周边刻线为 50 等分,而螺距为 0.5 mm,每转 1 格也相当于移动 0.01 mm。

测量载物台圆周上刻有角度值,绕垂直轴旋转后可由游标读数,游标每格示值为 6'。

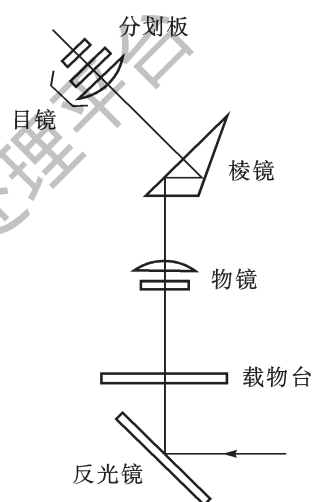


图 2-23 JLC 型测量显微镜光路图

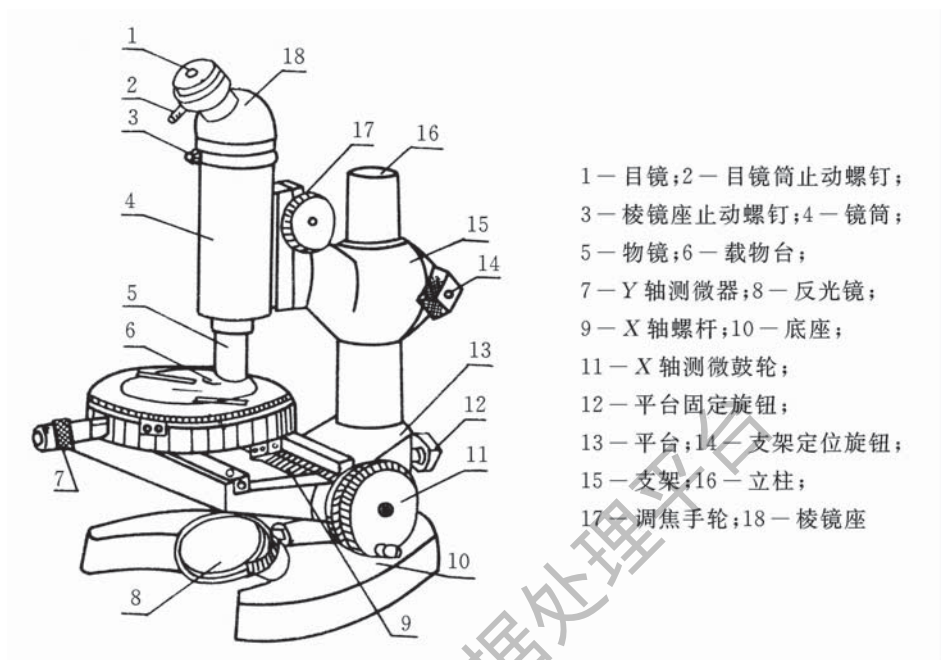


图 2-24 JLC 型测量显微镜外形图

3. 规格

(1) 光学系统规格

| 物 镜 | | 目 镜 | | 显微镜 放大倍数 | 工 作 距 离 /mm | 视 场 直 径 /mm |
|-------------|-----------|------|------------|-------------|-------------------|-------------------|
| 放大倍数 | 焦距 /mm | 放大倍数 | 焦 距 /mm | | | |
| 2.5 × /0.08 | 43.40 | 10 × | 25.00 | 25 × | 58.84 | 5.6 |
| 10 × /0.25 | 17.13 | | | 100 × | 7.81 | 1.4 |

(2) 载物台读数装置主要规格

| | |
|---------------|-----------|
| X 轴移动测量范围(量程) | 50 mm |
| Y 轴移动测量范围(量程) | 13 mm |
| 测微器分度值 | 0.01 mm |
| 载物台转动范围 | 不限 |
| 刻度盘分度范围 | 0° ~ 360° |
| 刻度盘分度值 | 1° |

(3) 测量准确度

仪器的示值误差： $\pm(5 + \frac{L}{15})\mu\text{m}$ ，式中 L 为被测件的长度 (mm)。测量地点温度变化范围 $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ 。仪器的示值误差可作为仪器误差。

4. 使用方法

① 调整反光镜的方位和角度，使目镜中出现明亮的视场。

② 调叉丝。从目镜中观察分划板上的十字叉丝是否清晰。如不清晰，微微转动目镜，使叉丝最清晰。松开目镜筒止动螺钉，转动目镜筒，从目镜中观察，目测粗调叉丝方位，使叉丝 X 线、 Y 线分别与 X 轴、 Y 轴平行，然后将目镜固紧。

③ 调焦。把被测物放在载物台上，并位于显微镜的物镜正下方。先从侧面观察，旋转调焦手轮使显微镜下移接近被测物，但不能触及。然后从目镜中观察，并旋转调焦手轮，使显微镜缓慢上移（千万不得向下移动，以防止物镜镜头与被测物相碰而损坏），直至看到被测物的清晰图像为止。

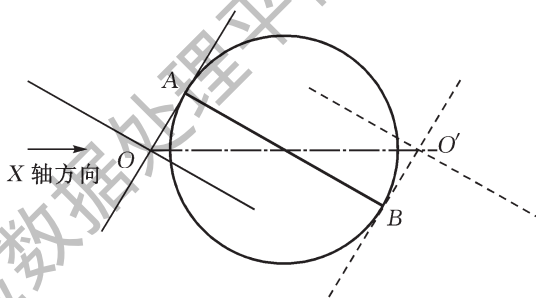


图 2-25 测量显微镜叉丝不正造成测量偏差示意图

④ 测量与读数。经生产厂家校准，载物台的 X 轴与 Y 轴严格垂直，叉丝的 X 线与 Y 线严格垂直。测量时，要进行精细调节，使得叉丝 X 线（或 Y 线）与载物台 X 轴（或 Y 轴）严格平行，否则，测量结果会偏大，如图 2-25 所示，测得钢球直径为 OO' ，显然大于实际直径 AB 。现就以测量小钢球直径 d 为例加以说明。将待测钢球放在载物台上，旋转 X 轴和 Y 轴测微鼓轮，使叉丝的 X 线、 Y 线与钢球的像同时相切，并且 X 向移动钢球时，钢球始终与叉丝 X 线相切，这说明叉丝的 X 线与载物台的 X 轴方向严格平行，这样才能保证钢球的像沿着待测直径方向移动，从而正确地测出直径。如果钢球偏离叉丝的 X 线，说明叉丝与载物台 X 、 Y 轴还没有严格平行，这时，可微微旋转目镜筒使叉丝改变一点方位后再进行检查，直到符合要求为止。测量读数时，可先使叉丝 Y 线与钢球像的一侧相切，从标尺和测微鼓轮上读出初读数 x_0 。然后转动 X 轴测微鼓轮，使叉丝 Y 线与像的另一侧相切，读出末读数 x 。钢球的直径为两者之差，即 $d = |x - x_0|$ 。应该注意，由于丝杆螺母机构在

倒向时会有空程,因此螺旋测微装置在倒向时,可能读数已有了改变,但尚未带动载物台,这样给测量带来的误差叫螺距差。为了避免螺距差,在测量某一长度的过程中,应使载物台单方向移动,即在读取两次读数之间不得改变载物台的移动方向,以避免由于螺纹间隙而产生误差。为减小随机误差,可将载物台转过一个角度,再进行测量,如此重复多次,求出直径的平均值及误差。

5. 注意事项

① 物镜和目镜不能用普通纸片、布块或手指擦拭,如有灰尘,需用洁净的软毛笔清除,如有污痕,只能用镜头纸轻拭。

② 注意 X 轴、 Y 轴方向的量程,当载物台移动到尽头时,绝对不能再继续旋转测微器的旋柄或鼓轮,以免损伤螺杆的精密螺纹。