

《物理实验》注意事项

- 上课期间，不得使用手机(ipad、笔记本电脑等)以及任何自带资料，违者第一次扣10分，第二次本次实验计0分。
- 不得伪造数据或抄袭，违者本次实验计0分（教室均装有摄像头）
- 手机静音或关机后放在书包里，书包和水杯按要求统一放置在指定位置。
- 每次课3小时，不得迟到，不得早退。
- 按要求独立完成实验内容，规范记录实验数据。
- 实验结束，整理仪器及配件，保持整洁。
- 实验完成后1周内提交报告。

桌上仅放：

预习报告

空白数据记录纸

必要文具或计算器

注意：实验桌上打印的讲义和ppt，均不得带走。

如不小心带走，请返还（讲义有编号）

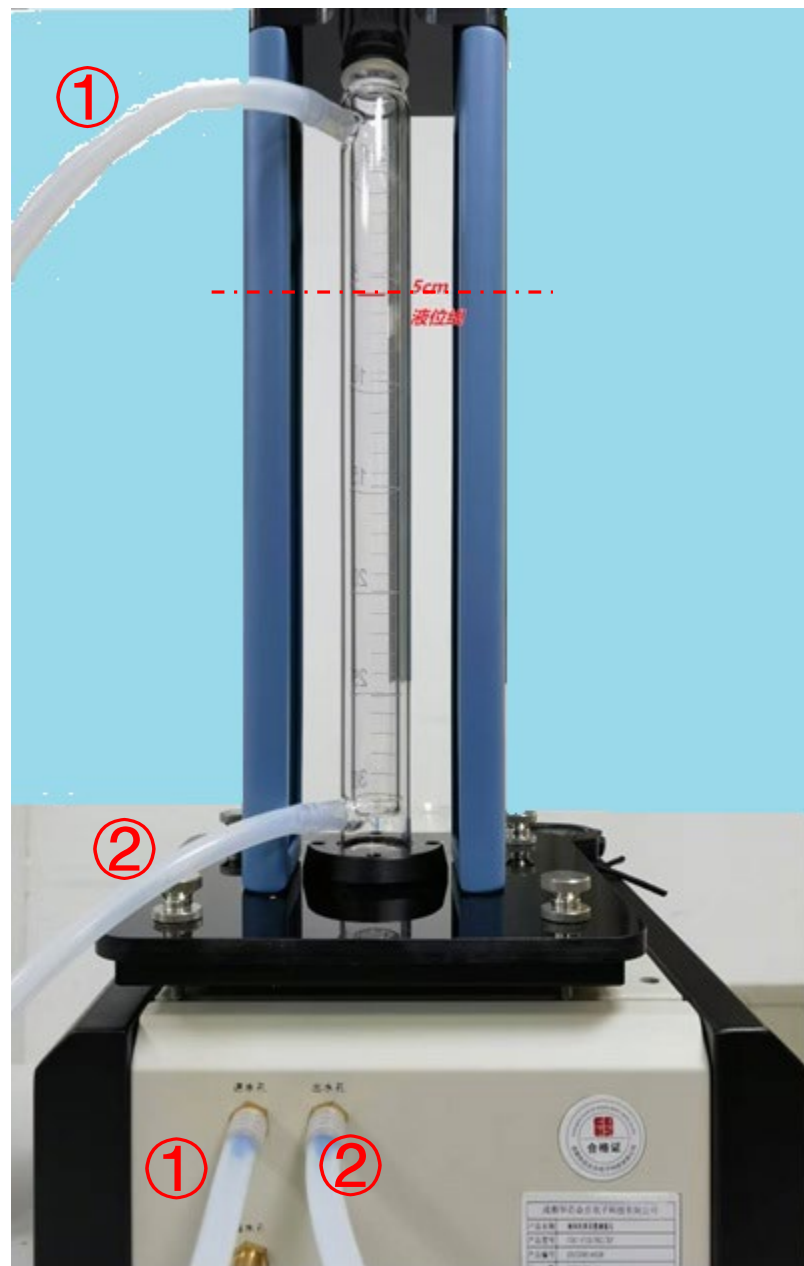
预备工作

- 1、借助气泡仪，通过调节变温粘滞系数实验仪的底座螺钉，使样品管铅直
- 2、检查PID仪器后面的水管是否与变温粘滞系数实验仪接通、是否连接正确。

注意：样品管上端（即“出水孔”）接PID的“进水孔”，下端（即“进水孔”）接PID的“出水孔”，不得反接。

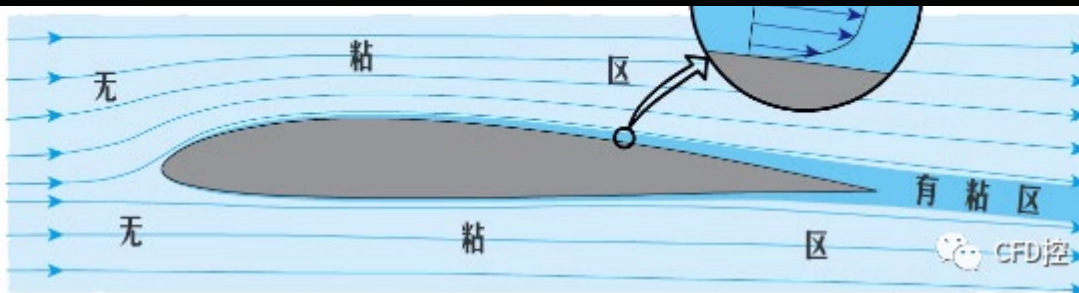
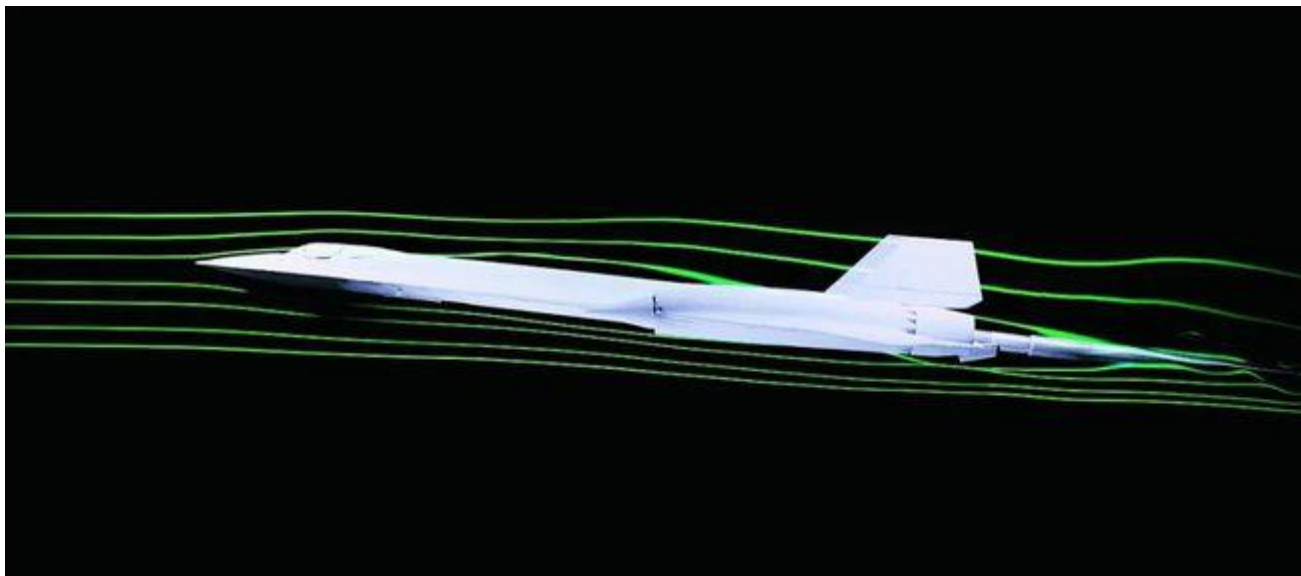
- 3、检查PID仪器前面的水位，如低于最低水位，利用漏斗将水箱水加到适当值，不得高于最高水位。

- 4、检查样品管中蓖麻油，如其液位线读数 $>5\text{cm}$ ，报告老师添加。



落球法测量液体粘滞系数

Measuring Liquid Viscosity Coefficient with Falling Balls



华中科技大学物理实验中心

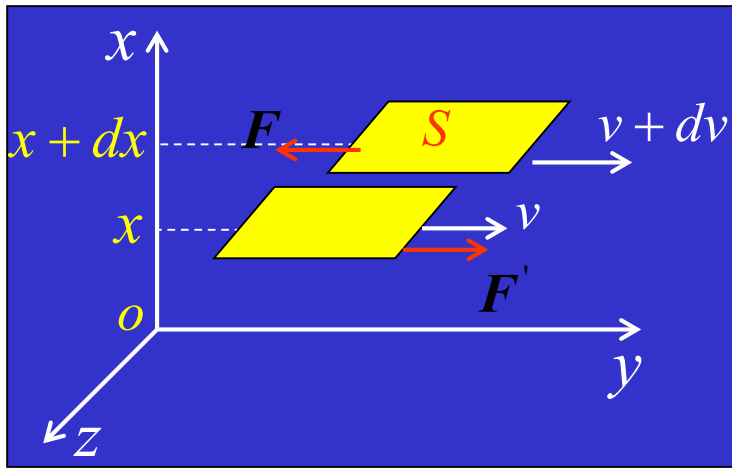
2025年秋

一、粘滞系数 η

史上耗时时间最长的实验-沥青滴落实验

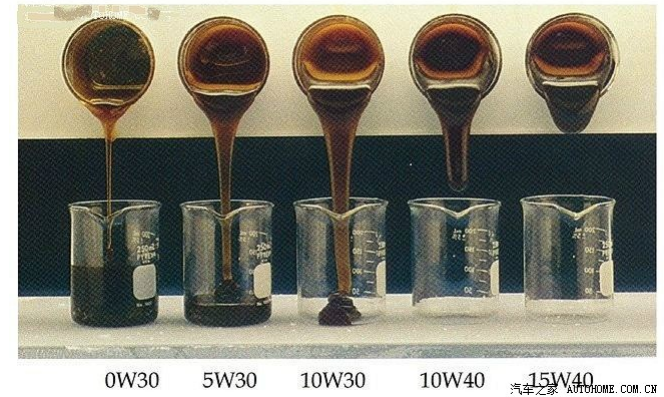
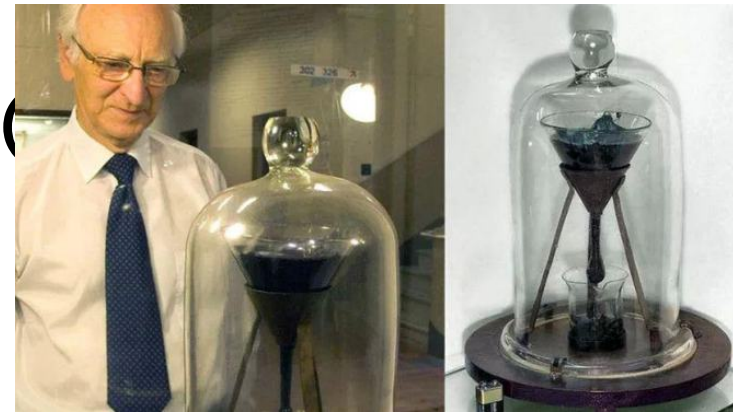
粘度又称粘滞系数 η ：流体对流动所表现的阻力，是流体反抗形变的能力

$$\eta = \frac{F/S}{dv/dx} \quad \text{Pa}\cdot\text{s}$$



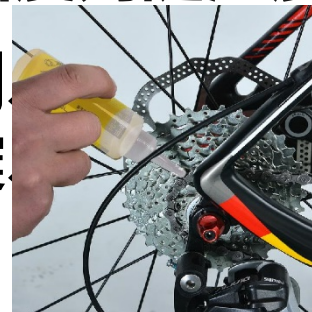
η 的大小与流体的性质、温度、压力等因素有关。

应用：润滑油的选择、管道流量的控制、机械设备的润滑系统设计、桥梁的抗震、血液及体液的生理和病理过程等



不同粘度机油

*液体的粘度随着温度升高而减小，
气体粘度则随温度升高而增大



二、实验目的

1、用落球法测量不同温度下蓖麻油粘滞系数；
($d \sim 1\text{mm}$ 的1#样品)

要求：室温 $\sim 60^{\circ}\text{C}$ ，共六组，温度间隔 $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$

2、掌握用显微镜测量小球直径的方法

3、（拓展）研究小球直径对实验结果的影响

要求： $d \sim 1.5\text{-}2.5\text{ mm}$ 规格中至少选2个
目标温度 $T \leq 45^{\circ}\text{C}$

4、认真观察、分析实验现象，加深对物理规律的认识。

三、实验原理

无限广域的牛顿流体 层流

粘滞

重力 阻力 浮力

$$ma = mg - F - f$$

斯托克斯定律 $F = 3\pi\eta vd$

运动方程

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

初始条件 ($t=0, v=0$)

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

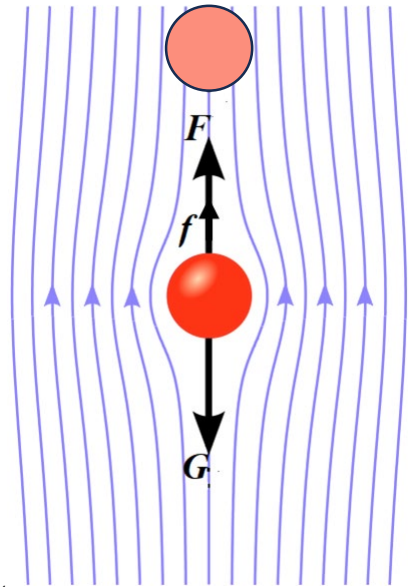
平衡速度
(收尾速度)

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

粘滞系数

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

ρ : 小球密度
 ρ_0 : 液体密度
 d : 小球直径



三、实验原理

修正一：小球在直径为 D 的玻璃管中下落

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

修正二：流体状态雷诺数修正

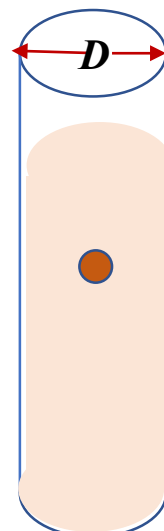
雷诺数 $Re = v_0 d \rho_0 / \eta$

粘滞系数

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18v_0(1 + 2.4d/D)} \quad Re < 0.1 \\ \eta_1 = \eta - \frac{3}{16}v_0 d \rho_0 \\ \eta_2 = \eta \left(1 + \frac{3}{16}Re - \frac{19}{1080}Re^2 + \dots\right)^{-1} \quad Re > 1 \end{array} \right.$$

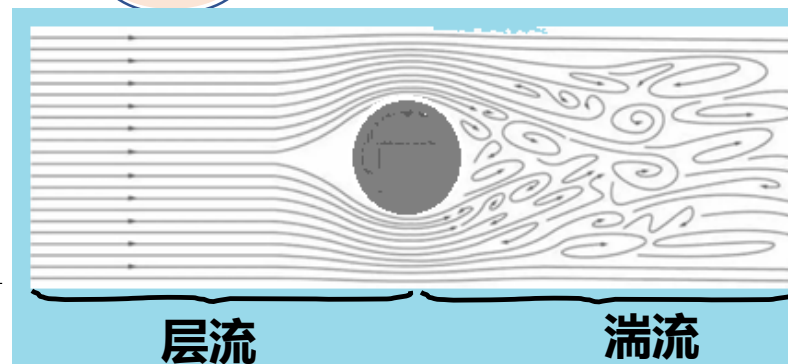
$$F = 3\pi\eta v_0 d \left(1 + \frac{3}{16}Re - \frac{19}{1080}Re^2 + \dots\right)$$

η 的国际单位：Pa·s (帕斯卡·秒)



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

ρ : 小球密度
 ρ_0 : 液体密度
 d : 小球直径

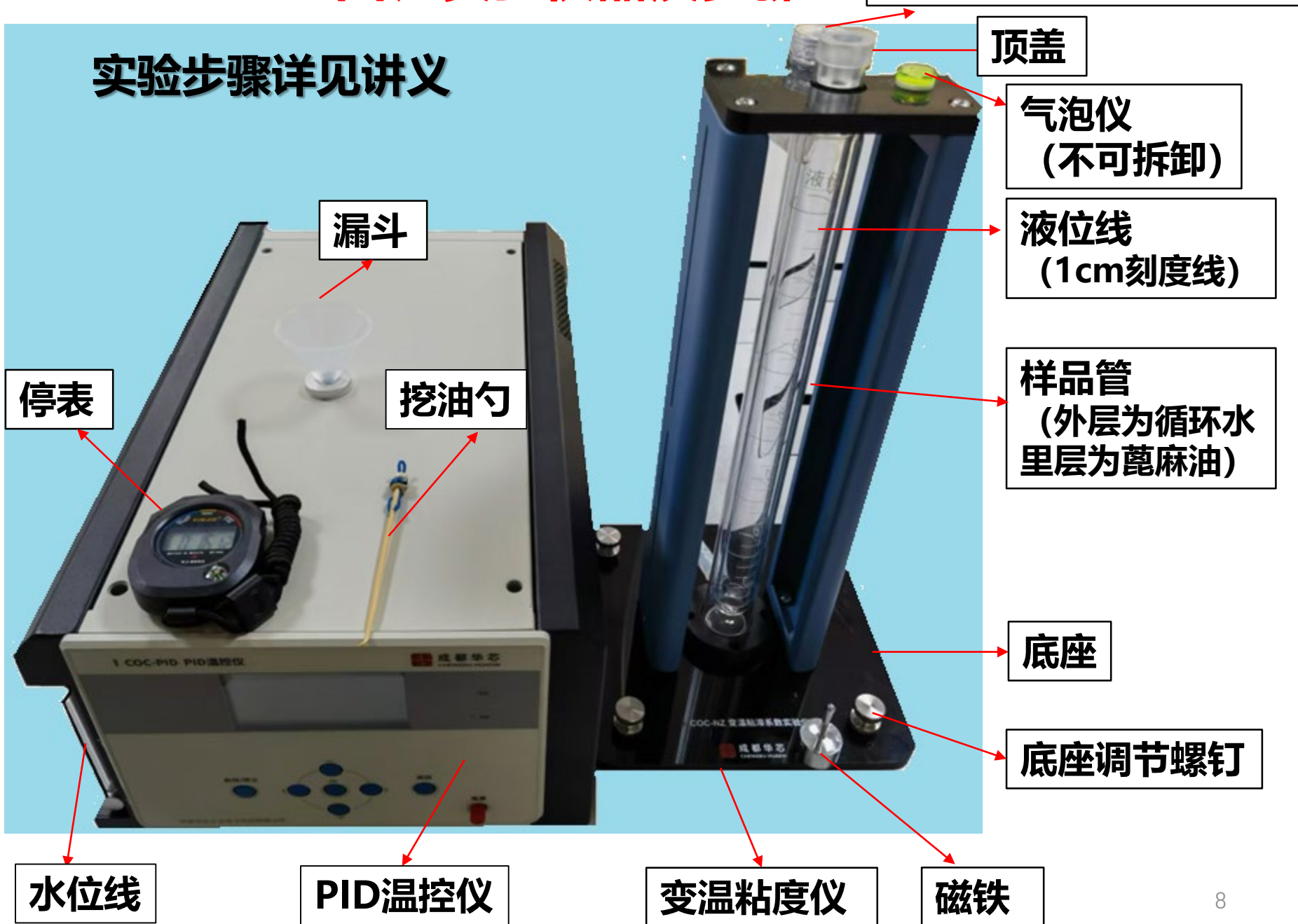


$0.1 < Re < 1$ 一级修正

高级修正

四、实验仪器及步骤

实验步骤详见讲义



调节目镜使十字叉丝清晰

目镜

读数标尺

d_1

d_2

小球所成像

调焦螺旋
上下移动
旋钮

读数盘

物镜

测微鼓轮
移动旋钮

毛玻片

显微镜底座

调光板旋钮

注意： $d=|d_1-d_2|$ ，5个不同方位进行测量，每个方位的 d_1 、 d_2 测量时测微鼓轮只能朝一个方向旋转，避免空程差

记整：9

估读一位：0.647



毫米为单位，小数点后有几位有效数字？

结果：9.647mm

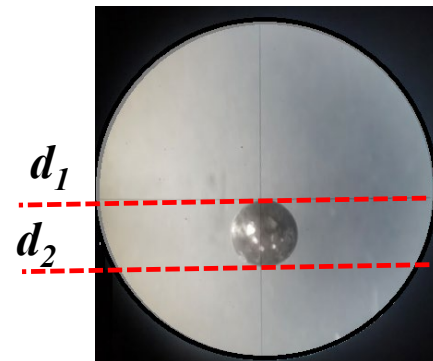
读数标尺读数

读数盘读数

五、数据记录

参考表1 不同小球直径 d 的测量

| 样品 小球 | 次数 | | | | | | | | | | 平均值 \bar{d} mm |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | |
| | d_1 | d_2 | d_1 | d_2 | d_1 | d_2 | d_1 | d_2 | d_1 | d_2 | |
| 1 [#] | | | | | | | | | | | |
| 2 [#] | | | | | | | | | | | |
| 3 [#] | | | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | | | |



注意：避免小球掉落，测量时可在桌面摊开一张白纸接住

规划时间：升温阶段测量直径

要求：

- 1、1#样品必须为 $d \sim 1$ mm
- 2、至少选3个不同规格的样品

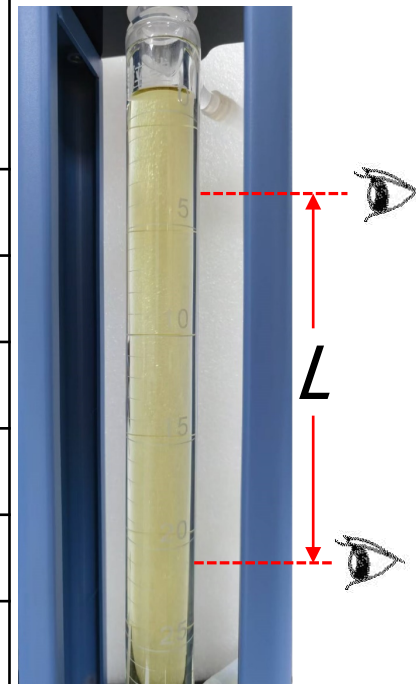
五、数据记录

参考表2 1#样品在不同温度下速度的测定

$$\rho = 7.81 \times 10^3 \text{kg/m}^3 \quad \rho_0 = 0.95 \times 10^3 \text{kg/m}^3 \quad D = 2.0 \text{cm} \quad g = 9.794 \text{m/s}^2$$

$L = \underline{\hspace{2cm}} \text{cm}$ (L 不低于20cm)

| 温 度 $T/^\circ\text{C}$ | | 时间 t/s | | | | | 平均值 $/\text{s}$ | 平均速度 $\bar{v}_0 / \text{cm.s}^{-1}$ |
|---------------------------|--|-----------------|---|---|---|---|--------------------|--|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | |



注意： T 在室温~60°C之间，温度间隔 $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ ；小球沿中轴线从最上端的液面由静止释放；

眼睛平视刻度线读数（厘米为单位，小数点后有几位有效数字？）；

温控仪出现“请开始实验”，稳定1~2分钟后开始实验；

实验期间要处于保温状态，切勿再按“启控/停止”键。

五、数据记录（拓展实验）

选择表2中某一温度 T ($\leq 45^\circ\text{C}$) 下，对不同规格的小球做对比实验（要求见参考表2）

建议：先做对比实验再升温（无法人工降温）

参考表3 不同小球速度的测定

$L = \underline{\hspace{1cm}} \text{ cm}$ （ L 不低于20cm）， $T = \underline{\hspace{1cm}} ^\circ\text{C}$

| 样 品 小球 | 时间 t/s | | | | | 平 均 值 t/s | 平均速度 $\bar{v}_0/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ |
|-----------|-----------------|---|---|---|---|-----------------------|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| ... | | | | | | | |

（1#样品数据已测，不重复测）

六、数据处理

(要求有计算过程)

1、利用 $\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18\nu_0(1 + 2.4d/D)}$ 及 $Re = \nu_0 d \rho_0 / \eta$, 分别计算不同

温度下粘滞系数平均值 $\bar{\eta}$ 及雷诺数 Re

2、根据 Re 的大小, 计算修正的 $\bar{\eta}$, 将最后结果记入下表中, 并计算相对误差 (如有标准值) 及绝对误差, 给出最后结果; 画出 $\eta \sim T$ 曲线, 并分析结果

$$\text{粘滞系数} \begin{cases} \eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18\nu_0(1 + 2.4d/D)} & Re < 0.1 \\ \eta_1 = \eta - \frac{3}{16}\nu_0 d \rho_0 & 0.1 < Re < 1 \end{cases} \quad \text{如 } Re > 1 \text{ 为高级修正}$$

| | | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|--|
| 温度 $T/^\circ\text{C}$ | | | | | | |
| $\bar{\eta}/\text{Pa}\cdot\text{s}$ | | | | | | |
| Re | | | | | | |
| 修正后的 $\bar{\eta}/\text{Pa}\cdot\text{s}$ | | | | | | |
| 相 对 误 差 $E_r\%$ | | | | | | |

六、数据处理 (要求有计算过程)

3、(拓展实验) 计算不同小球的 $\bar{\eta}$ 及雷诺数Re, 验证Re与小球直径的关系, 给出结论; 根据Re的大小计算修正的 $\bar{\eta}$, 将最后结果记入下表中; 计算相对误差(如有标准值)及绝对误差, 给出最后结果

| 样品小球 | 1 | 2 | 3 | ... | | |
|---|---|---|---|-----|--|--|
| $\bar{\eta}/\text{Pa}\cdot\text{s}$ | | | | | | |
| Re | | | | | | |
| 修正后的 $\bar{\eta}/\text{Pa}\cdot\text{s}$ | | | | | | |
| 相对误差 $E_r\%$ | | | | | | |

$$E_r = \left| \frac{\bar{\eta} - \eta^*}{\eta^*} \right| \times 100\% \quad \Delta\eta = |\bar{\eta} - \eta^*| \quad \eta = \bar{\eta} \pm \Delta\eta$$

七、思考题

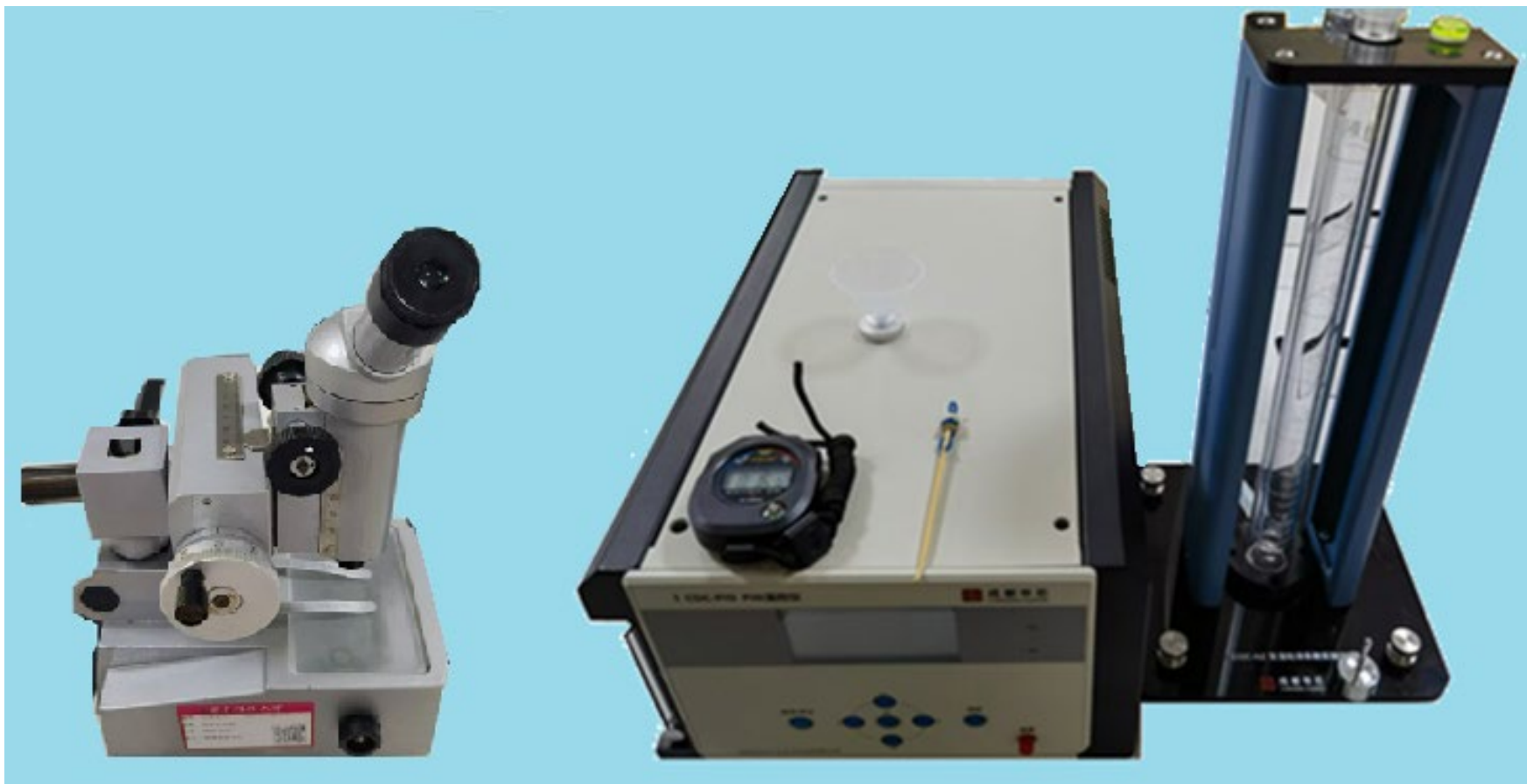
(选两道题, 4 必做)

- 1、如何判定小球已进入匀速运动状态?
- 2、小球可否从样品管顶端释放? 为什么?
- 3、若小球偏离样品管中线释放, 会产生何种影响?
- 4、实验总结(主要误差来源分析、操作技巧、经验分享、体会、感想、建议等.....)

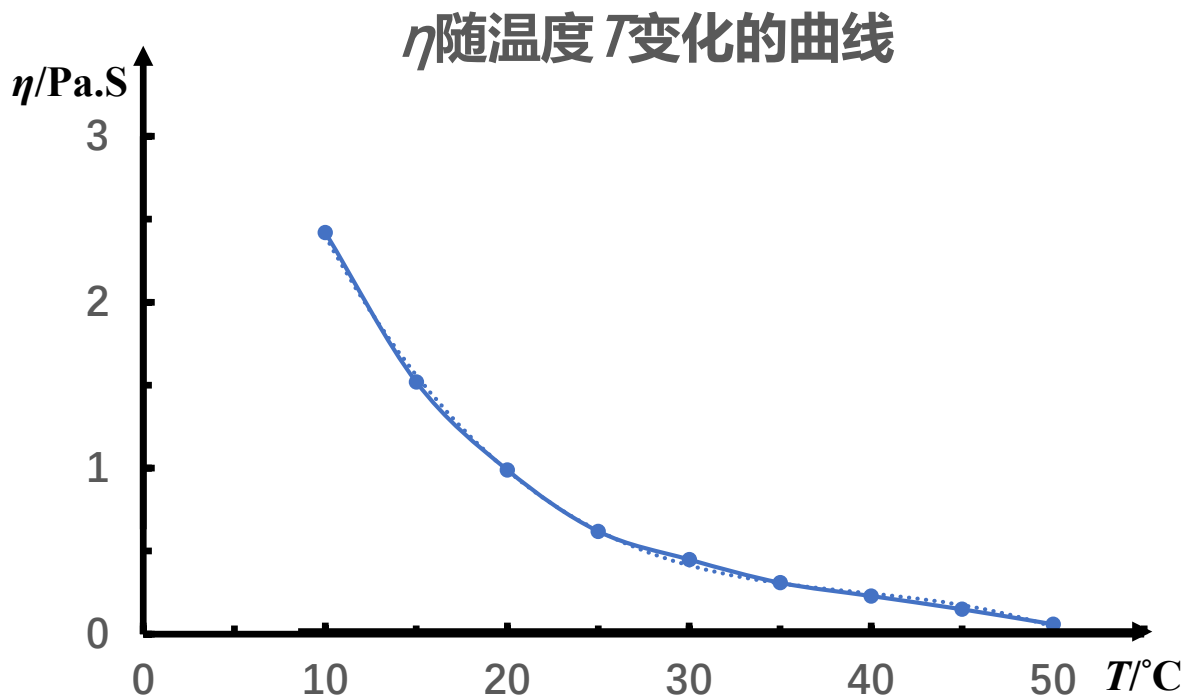
八、注意事项

- 1、通电前, 应保证水位指示在水位上限; 若水位指示低于水位下限, 严禁开启电源, 必须先用漏斗加水;
- 2、实验过程中, 不得用手触摸样品管及软管, 不得直接拔软管, 避免高温烫伤;
- 3、实验过程中, 注意用电及用水安全;
- 4、实验全部完成后, 用磁铁将小球吸引至样品管口, 用挖油勺挖出, 放入样品盒, 以备下次实验使用;

5、实验结束后，全部零部件复原，关闭电源、盖上样品管盖子及清理桌面。



附1:



作图要素:

图名、坐标轴、刻度线、物理量、物理量单位、
数据点、光滑曲线

附2： 一球体在静止的粘滞流体中运动时（初速度为0）

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

$$\frac{dv}{dt} + \frac{18\eta}{d^2 \rho} v = (1 - \frac{\rho_0}{\rho}) g$$

$$\longrightarrow v = (1 - \frac{\rho_0}{\rho}) g \cdot \frac{d^2 \rho}{18\eta} + C e^{-\frac{18\eta}{d^2 \rho} t}$$

$$\text{收尾速度: } v_0 = \frac{d^2 g}{18\eta} (\rho - \rho_0)$$

设从速度为0到速度达到平衡速度的99.9%这段时间为平衡时间 t_0 ，即令：
$$e^{-\frac{18\eta}{d^2 \rho} t_0} = 0.001$$

已知小球直径，密度 ρ ，蓖麻油的密度 ρ_0 及蓖麻油的粘滞系数 η ，可由此计算出平衡速度 v_0 及所需时间（平衡时间） t_0 ，可估算平衡距离 $L < v_0 \cdot t_0$

| 温度 (°C) | 粘滞系数 η (Pa.s) | 温度 (°C) | 粘滞系数 η (Pa.s) |
|---------|--------------------|---------|--------------------|
| 4.5 | 4.00 | 20.5 | 0.94 |
| 5.0 | 3.76 | 21 | 0.90 |
| 6.0 | 3.46 | 21.5 | 0.86 |
| 7.5 | 3.03 | 22 | 0.83 |
| 9.5 | 2.53 | 22.5 | 0.79 |
| 10.0 | 2.42 | 23 | 0.75 |
| 10.5 | 2.32 | 23.5 | 0.71 |
| 11.0 | 2.23 | 24 | 0.69 |
| 11.5 | 2.14 | 24.5 | 0.64 |
| 12.0 | 2.05 | 25 | 0.62 |
| 12.5 | 1.97 | 25.5 | 0.58 |
| 13 | 1.87 | 26 | 0.57 |
| 13.5 | 1.79 | 27 | 0.53 |
| 14 | 1.71 | 28 | 0.49 |
| 14.5 | 1.63 | 29 | 0.47 |
| 15 | 1.52 | 30 | 0.45 |
| 15.5 | 1.49 | 31 | 0.42 |
| 16 | 1.4 | 32 | 0.40 |
| 16.5 | 1.34 | 33.5 | 0.35 |
| 17 | 1.27 | 35 | 0.31 |
| 17.5 | 1.23 | 35.5 | 0.30 |
| 18 | 1.17 | 39 | 0.25 |
| 18.5 | 1.13 | 40 | 0.23 |
| 19 | 1.08 | 42 | 0.20 |
| 19.5 | 1.04 | 45 | 0.15 |
| 20 | 0.95 | 48 | 0.10 |
| | | 50 | 0.06 |