

液体表面张力系数的测量

Measurement of Surface tension coefficient

【实验目的】

1. 学习掌握力敏传感器的使用，采用图示法对该传感器进行定标，计算灵敏度；
2. 了解拉脱法的原理，用拉脱法测量室温下液体（水）的表面张力系数；
3. 了解读数显微镜的结构、原理及使用方法，用毛细管法测量室温下液体（水）的表面张力系数；
4. 认真观察实验现象，仔细分析实验过程，加深对物理规律的认识。

【预备问题】

1. 表面张力是如何形成的？表面张力系数与哪些因素有关？
2. 为什么吊环拉起时，表面张力表示为 $F = \sigma \cdot 2L = \sigma \cdot \pi(D_1 + D_2)$ ？
3. 为了减小测量误差，实验时应该注意哪些问题？

【实验背景】

表面现象广泛见诸于钢铁生产、焊接、印刷、复合材料的制备等过程中。许多涉及液体的物理现象都与液体的表面性质有关，液体的表面张力系数是表征液体性质的一个重要参数。例如：液体与固体接触时出现的浸润与不浸润现象、毛细现象、以及液体泡沫的形成等就是液体表面张力的表现。此外，工业生产中使用的浮选技术、动植物体内液体的运动和土壤中水的运动等也都是液体表面张力的表现。因此，研究表面现象、测量表面张力系数具有极其重要的意义。

【思政元素】

2021 年 12 月 9 日下午 15 时 40 分，王亚平在“天宫课堂”演示微重力、零重力条件下表面张力等实验现象，向全世界展现了我国航空航天科技实力。鼓励青年学生踊跃投身到祖国需要的科技领域中去。

【实验原理】

一般而言，由于液体的分子间存在有相互作用力，导致液体表面宏观上具有收缩到尽可能小的趋势。从微观角度看，这说明了处于表面层的分子要比液体内部的分子少了一部分能够与之有吸引作用的分子，因此出现了一个指向液体内部的吸引力，使这些分子具有向液体内部收缩的趋势。从能量角度看，任何液体内部的分子欲进入表面层，就必须克服这个吸引力而做功。显然，表面层有着比液体内部更大的势能（表面能），液体表面积越大，表面能也越大。而任何体系总是以势能最小的状态最为稳定，所以液体要处于稳定状态，液面就必然缩小，以使其表面能尽可能小，宏观上就表现为液体表面层内的表面张力。

可以认为，液体的表面在宏观上就好像一张绷紧的橡皮膜，存在沿着表面并使表面趋于收缩的应力，这种力称为表面张力，用表面张力系数 σ 来描述。因此，液体表面张力系数是表征液体性质的一个重要参数。对液体表面张力系数的测定，可以为分析液体表面的分子分布及结构提供帮助。

通常，液体的表面张力系数 σ 与液体的性质、杂质情况和温度等有关。当液面与其蒸汽相接触时，表面张力仅与液体性质及温度有关。一般来讲，密度小，易挥发液体的 σ 小；温度愈高， σ 愈小。测量液体表面张力系数有多种方法，例如：拉脱法，毛细管法，平板法和最大泡压法等。

本实验采用拉脱法和毛细管法测量液体（水）的表面张力系数。

一、拉脱法

测量一个已知周长 L 的金属片从待测液体表面脱离时需要的力，求得该液体表面张力系数的实验方法称为拉脱法。若金属片为环状吊片时，考虑一级近似，可以认为脱离力为表面张力系数乘上脱离表面的周长，即

$$F = \sigma \cdot 2L = \sigma \cdot \pi(D_1 + D_2) \quad (1)$$

式中， F 为脱离力， D_1 ， D_2 分别为圆环的外径和内径， σ 为液体的表面张力系数。脱离力的测量应该为即将脱离液面测力计的读数 F_1 减去吊环本身的重力 mg 。吊环本身的重力即为脱离后测力计的读数 F_2 。所以表面张力系数为：

$$\sigma = \frac{F_1 - mg}{\pi(D_1 + D_2)} = \frac{F_1 - F_2}{\pi(D_1 + D_2)} \quad (2)$$

硅压阻式力敏传感器由弹性梁和贴在梁上的传感器芯片组成，其中芯片由四个硅扩散电阻集成一个非平衡电桥，当外界压力作用于金属梁时，在压力作用下，电桥失去平衡，此时将有电压信号输出，输出电压大小与所加外力成正比，即

$$\Delta U = K \Delta F \quad (3)$$

式中， ΔF 为外力的大小， K 为硅压阻式力敏传感器的灵敏度， ΔU 为传感器输出电压的大小。综合（2）和（3）得表面张力系数为：

$$\sigma = \frac{\Delta U}{\pi(D_1 + D_2)K} \quad (4)$$

二、毛细管法

将玻璃毛细管插入无限广阔的水中，由于水对玻璃是浸润的，在管内的水面将成凹面。在液体表面张力的作用下，凹面有变平的趋势，因此下层的水受到一个提升的力，或它对下层的水施加以负压，使管内水面 B 点的压强比水面上方的大气压强小，如图1中（a）所示，而在管外的平液面处，与 B 点在同一水平面上的 C 点仍于水面上方的大气压强相等。在此压差的作用下，水将从管外流向管内使管中水面升高，直至 B 点和 C 点的压强相等为止，如图1（b）所示。设毛细管的截面为圆形，则毛细管内的凹水面可近似地看成为半径 r 的半球面，若管内水面下 A 点与大气压的压强差为 Δp ，则水面平衡的条件应当是

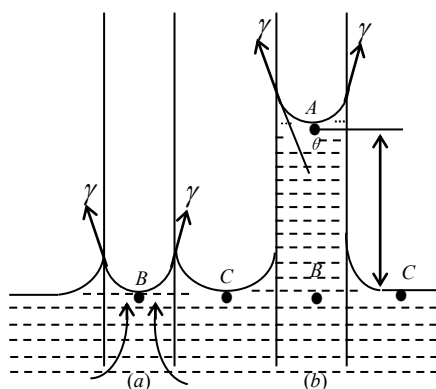


图1. 水与玻璃浸润

$$\Delta p \pi r^2 = 2 \pi r \sigma \cos \theta \quad (5)$$

式中， r 为毛细管半径， θ 为接触角， σ 为表面张力系数。

如水在毛细管中上升的高度为 h ，则

$$\Delta p = \rho gh$$

式中， ρ 为水的密度。将此公式代入式（5），可得

$$\rho gh\pi r^2 = 2\pi r\sigma \cos \theta$$

$$\sigma = \frac{\rho ghr}{2 \cos \theta} \quad (6)$$

对于清洁的玻璃和水，接触角 θ 近似为零，则

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho ghr \quad (7)$$

测量时是以管中凹面最低点到管外水平液面的高度为 h ，而在此高度以上，在凹面周围还有少量的水，因为可以将毛细管中的凹面看成为半球形，所以凹面周围水的体积应等于 $\pi r^2 \cdot r - \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) = \frac{1}{3} \pi r^3 = \frac{r}{3} (\pi r^2)$ ，即等于管中高为 $\frac{r}{3}$ 的水柱的体积。因此，上述讨论中的 h 值，应增加 $\frac{r}{3}$ 的修正值。于是公式（7）成为

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho g r \left(h + \frac{r}{3} \right) = \frac{1}{4} \rho g d \left(h + \frac{d}{6} \right) \quad (8)$$

由此可见，通过测量毛细管内径 d ，液面高 h 就可以得到液体表面张力系数 σ 。

【实验仪器】

表面张力系数的测量装置（图 2）主要包括：

1. 拉脱法液体表面张力系数测量装置一套（支架及升降台，力敏传感器，数字电压表，砝码七片，金属吊环，砝码盘，镊子，玻璃器皿等）；
2. 毛细管法测量液体表面张力系数装置一套（读数显微镜，烧杯，玻璃毛细管等）；
3. 台灯和待测液体（如水）等。

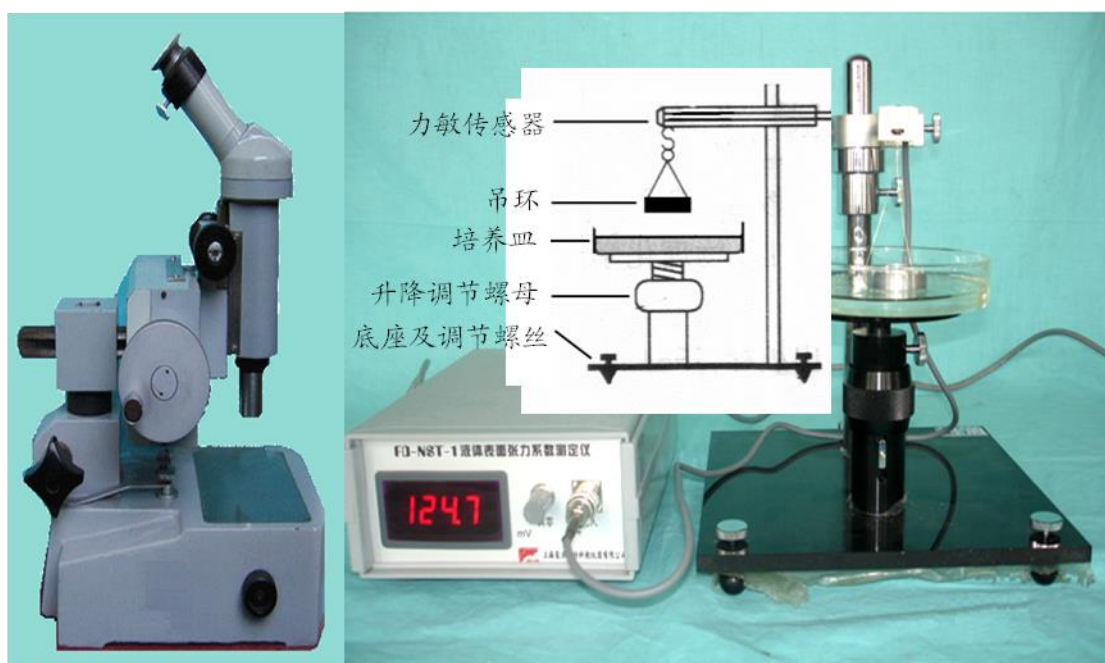


图 2. 表面张力系数的测量装置（读数显微镜与拉脱法表面张力系数测量装置）

【实验内容】

实验 1. 拉脱法测量水的液体表面张力系数

实验 2. 毛细管法测量水的液体表面张力系数

实验 3. 不同浓度盐水的表面张力系数测量（拓展选做）

【实验步骤与要求】

实验 1. 拉脱法测量水的液体表面张力系数

- (1) 实验准备：预热数字电压表 10 分钟。
- (2) 对力敏传感器定标：将砝码盘挂在力敏传感器的挂钩上，对数字电压表调零。然后，用镊子将七片砝码依次一片片放在砝码盘上，待稳定后依次记下电压表的读数 U_i （每片砝码为 0.500g），并将数据记录在自拟的数据表格中。
- (3) 测量液膜拉断前瞬间电压 U_1 和拉断后达到稳定的电压 U_2 ：
 - (a) 取下砝码盘，换上吊环；
 - (b) 将装有液体的玻璃器皿安放在升降台上；
 - (c) 调整吊环高度，贴近水面，使吊环下沿平面与玻璃器皿内的水面平行；
 - (d) 拧转升降调节螺母（图 2），升高升降台，吊环浸入水中；再反向拧螺母，缓慢降低升降台，观察力敏传感器示数；测量液膜拉断前瞬间和拉断后电压 U_1 和 U_2 ；
 - (e) 重复（d）6 次，测量数据记录在自拟的数据表格中。

实验 2. 毛细管法测量水的液体表面张力系数

- (1) 将装水的烧杯安放在升降台上；
- (2) 将洗净烘干的毛细管一端浸入液体后，使之铅直，观察液面高度；
- (3) 用双面胶将毛细管固定在传感器上，保持铅直（图 3）。用读数显微镜测量该毛细管中液柱的高度 h （重复 h 测量 5 次，测量数据记录在自拟的数据表格中）；
- (4) 将烧杯中毛细管取出，甩出毛细管中的液柱，端口横截面对准物镜，水平放置在烧杯上（图 4）。用读数显微镜测量该毛细管的内径 d （重复 d 测量 5 次，测量数据记录在自拟的数据表格中）。

【数据处理】

1. 对硅压阻力敏传感器的定标

采用图示法（坐标纸-手绘-选点-求斜率）进行数据处理，求得力敏传感器的灵敏度 K 。

$$K = \quad (\text{V/N})$$

2. 拉脱法测量液体（水）的表面张力系数

- (a) 将测量数据带入公式（4），可计算得出水的表面张力系数 σ ；
- (b) 计算结果与实验室温度下的标准值 $\sigma_{\text{公}}$ 比较；
- (c) 计算相对误差 U_r ，写出结果表达式；
- (d) 针对自身实验过程，分析实验误差因素，找出误差的关键原因。

3. 毛细管法测量液体（水）的表面张力系数

- (a) 将测量数据带入公式（8），可计算得出水的表面张力系数 σ ；
- (b) 计算结果与实验室温度下的标准值 $\sigma_{\text{公}}$ 比较；

(c) 计算相对误差 U_r ，写出结果表达式；

(d) 针对自身实验过程，分析实验误差因素，找出误差的关键原因。

注：本实验数据处理的参数取值和相关公式。

已知：武汉地区重力加速度 $g=9.79338\text{ m/s}^2$ ，吊环内外直径 $D_1=3.310\text{ cm}$ ， $D_2=3.496\text{ cm}$ 。

水的密度和表面张力系数随温度变化的标准值可参见附录 2，亦可参见实验室黑板上粘贴的数据。

相对误差计算公式：
$$U_r = \frac{|\sigma - \sigma_{\text{公}}|}{\sigma_{\text{公}}} \times 100\%。$$

【注意事项】

1. 实验安全第一，认真操作，如实记录，规范处理。
2. 确保吊环、毛细管、盛液器皿等的清洁，可用 NaOH 溶液洗净油污等后再用纯净水冲洗干净，并用热风吹干或凉干。
3. 使用力敏传感器时要轻柔，拉力不能超过 0.098N。
4. 给力敏传感器定标时，要用镊子取用砝码，禁止用手直接拿取砝码。
5. 使用读数显微镜时要注意消除视差和空程差。
6. 实验中，吊环下沿平面要与玻璃器皿内的水面平行；毛细管插入液体要保持铅直。
7. 实验结束后，清点并整理好所用仪器及附件；将吊环、毛细管和砝码等放在塑料工具箱中，不得乱放；清洁和整理个人实验台面。
8. 请 1~4 号负责实验室的清洁值日，检查仪器。

【思考题】

1. 若吊环下沿所在平面与液面不平行，对表面张力系数测量结果有何影响？
2. 拉脱过程中为什么 U_1 会经历一个先增大后减小的过程？为什么计算表面张力需用拉断前瞬间电压表的读数而不是最大值作为 U_1 ？
3. 液体表面张力系数实验中，拉脱法和毛细管法有何异同点，试分析其误差和优缺点。
4. 液体表面张力系数实验总结，包括主要误差来源和原因、实验操作技巧、经验分享、体会、感想以及建议等。

【拓展思考】

1. 还可以用什么方法来测量液体的表面张力系数？
2. 试分析几种其他常见液体的表面张力现象。

【重点难点】

1. 测量液膜拉断前瞬间电压 U_1

指导建议：在将吊环缓慢拉出水面的过程中，认真观察电压变化，会发现电压会先增加后减小，直至拉脱瞬间即水膜破裂瞬间的电压 U_1 。观察时既要电压表又要注意用眼睛的余光捕捉水膜破裂瞬间。

2. 使吊环下沿平面与玻璃器皿内的水面平行

指导建议：吊环的 3 根金属吊丝最好保持一样长并且对称，以保证吊环下沿平行水面入水后，在缓慢拉脱的过程中仍然能与水面平行。

3. 用读数显微镜测量该毛细管中液柱的高度 h

指导建议：毛细管经读数显微镜成倒立像，用叉丝水平线切毛细管凸液面得凸液面的位置坐标 y_1 ，再将读数显微镜测微轮鼓顺着一个方向缓慢连续调节，寻找的烧杯中水面的位置坐标 y_2 ，即可得到液柱高度 h 。

【常见易错】

1. 对力敏传感器定标的整个过程中并不是采用单一砝码增或单一砝码减的方法

指导建议：由于力敏传感器相当灵敏，为减少实验误差，在对其进行定标过程中，要注意要么选择逐渐增加砝码记录电压值，要么选择逐渐减少砝码记录电压值。

2. 使用读数显微镜测量的过程中引入了空程差

指导建议：读数显微镜测微轮鼓是齿轮结构传动，因此使用读数显微镜测量毛细管中液柱的高度 h 和毛细管的内径 d 时，要保证读数显微镜的轮鼓调节顺着一个方向来读取两个不同位置的坐标，否则可能引入毫米级的空程差。尤其毛细管的内径 d 仅仅约 1mm，如果引入空程差将直接导致 d 测量结果错误而不是误差了。

【参考文献】

[1] 熊永红等. 大学物理实验(第一册). 科学出版社, 2007 年 8 月.

[2] 任忠明等. 大学物理实验(第二册). 科学出版社, 2007 年 8 月.

【附录 1】实验数据记录表格与计算公式

1. 力敏传感器的定标

表格 1.

$$U = K \cdot F$$

i	1	2	3	4	5	6	7	8
砝码质量 m / g	0.000	0.500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500
砝码重量 F / N								
电压 U / mV								

采用图示法（坐标纸-手绘-选点-求斜率）进行数据处理，求得力敏传感器的灵敏度 K 。

$$K = \quad (\text{V/N})$$

2. 拉脱法测量水的表面张力系数

表格 2. 液膜破裂前后数字电压表读数

$$\sigma = \frac{\overline{\Delta U}}{\pi(D_1 + D_2)K}$$

室温: $T = \quad ^\circ\text{C}$, 吊环直径 $D_1 = 3.310\text{cm}$, $D_2 = 3.496\text{cm}$, $\sigma_{\text{公}}(T) = \quad (\text{N/m})$

i	1	2	3	4	5	6	平均值
破膜前 U_1/mV							
破膜后 U_2/mV							
$(U_1-U_2) / \text{mV}$							

结果表达式: $\sigma_{\text{测}} =$ (N/m) , $U_r = \frac{|\sigma_{\text{测}} - \sigma_{\text{公}}|}{\sigma_{\text{公}}} \times 100\% =$

3. 毛细管法测量水的表面张力系数

表格 3. 管内液柱高度 h 和毛细管内径 d 测量数据 $\sigma = \frac{1}{4} \rho g \bar{d} (\bar{h} + \frac{\bar{d}}{6})$

室温: $T =$ °C, $g_{\text{武汉}} = 9.79338(\text{m/s}^2)$, $\rho_{\text{水}}(T) =$ (kg/m³)

i	1	2	3	4	5	平均值
y_1 / mm						
y_2 / mm						
h / mm						
y_1' / mm						
y_2' / mm						
d / mm						

结果表达式: $\sigma_{\text{测}} =$ (N/m) , $U_r = \frac{|\sigma_{\text{测}} - \sigma_{\text{公}}|}{\sigma_{\text{公}}} \times 100\% =$

【附录 2】水的密度与表面张力系数随温度变化标准值

在标准大气压下不同温度的水的密度					
温度 $t/(^{\circ}\text{C})$	密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	温度 $t/(^{\circ}\text{C})$	密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	温度 $t / (^{\circ}\text{C})$	密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$
0	999.841	17	998.774	34	994.371
1	999.990	18	998.595	35	994.031
2	999.941	19	998.405	36	993.68
3	999.965	20	998.403	37	993.33
4	999.973	21	997.992	38	992.96
5	999.965	22	997.770	39	992.59
6	999.941	23	997.638	40	992.21
7	999.902	24	997.296	41	991.83
8	999.849	25	997.044	42	991.44
9	999.781	26	996.783	50	988.04
10	999.700	27	996.512	60	983.21
11	999.605	28	996.232	70	977.78
12	999.498	29	995.944	80	971.80
13	999.377	30	995.646	90	965.31
14	999.244	31	995.340	100	958.35
15	999.099	32	994.025		
16	998.943	33	994.702		

在不同温度下与空气接触的水的表面张力系数					
$t / (^{\circ}\text{C})$	$\sigma / (\text{mN}/\text{m})$	$t / (^{\circ}\text{C})$	$\sigma / (\text{mN}/\text{m})$	$t / (^{\circ}\text{C})$	$\sigma / (\text{mN}/\text{m})$
0	75.62	16	73.34	30	71.15
5	74.90	17	73.20	40	69.55
6	74.76	18	73.05	50	67.90
8	74.48	19	72.89	60	66.17
10	74.20	20	72.75	70	64.41
11	74.07	21	72.60	80	62.60
12	73.92	22	72.44	90	60.74
13	73.78	23	72.28	100	58.84
14	73.64	24	72.12		
15	73.48	25	71.96		

【附录 3】毛细管法中读数显微镜测量的物像实例

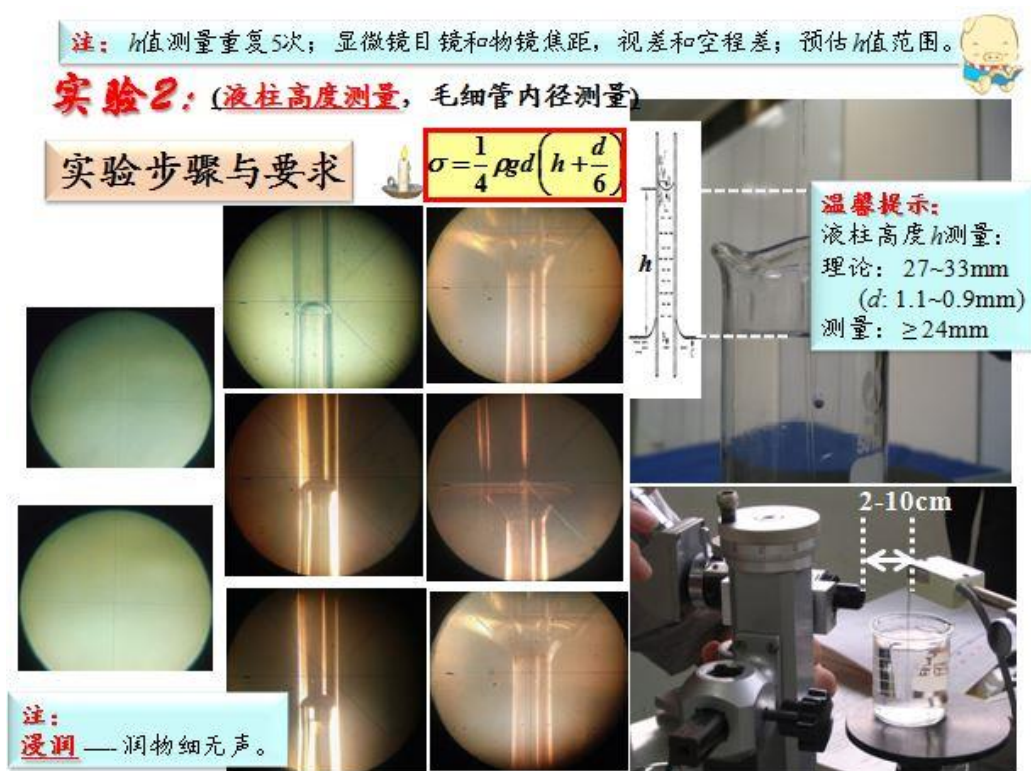


图 3. 读数显微镜测量毛细管中液柱高度 h 的物像图例

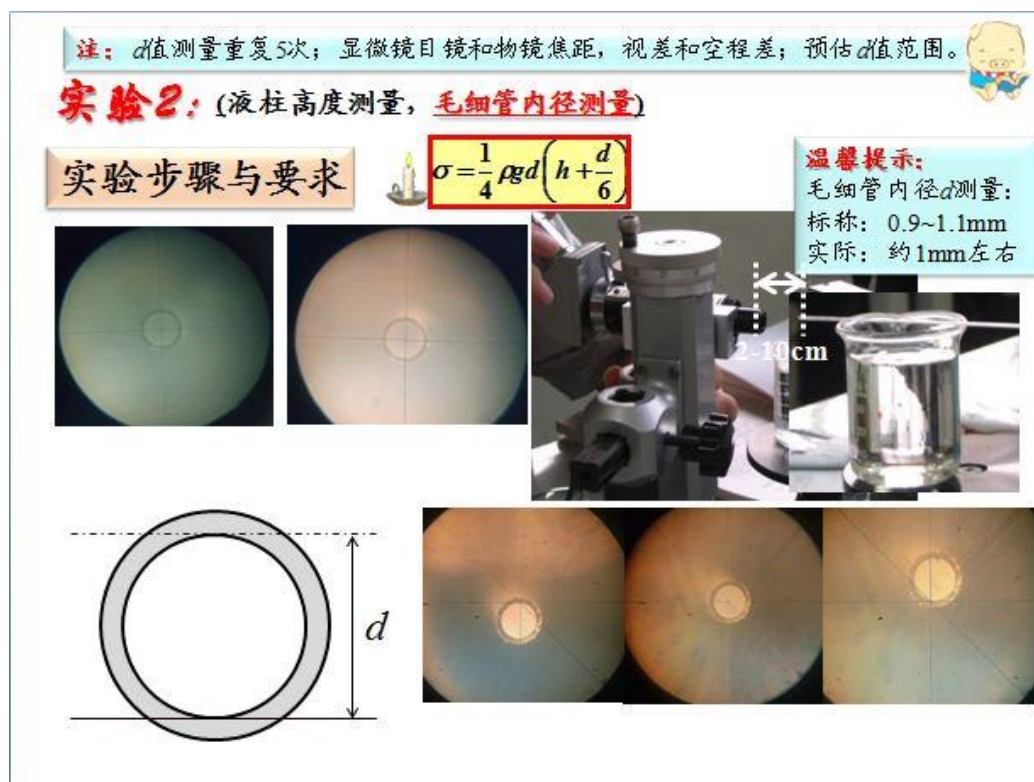


图 4. 读数显微镜测量毛细管内径 d 的物像图例

【附录 4】仪器简要说明

本实验采用的读数显微镜(图 3)。

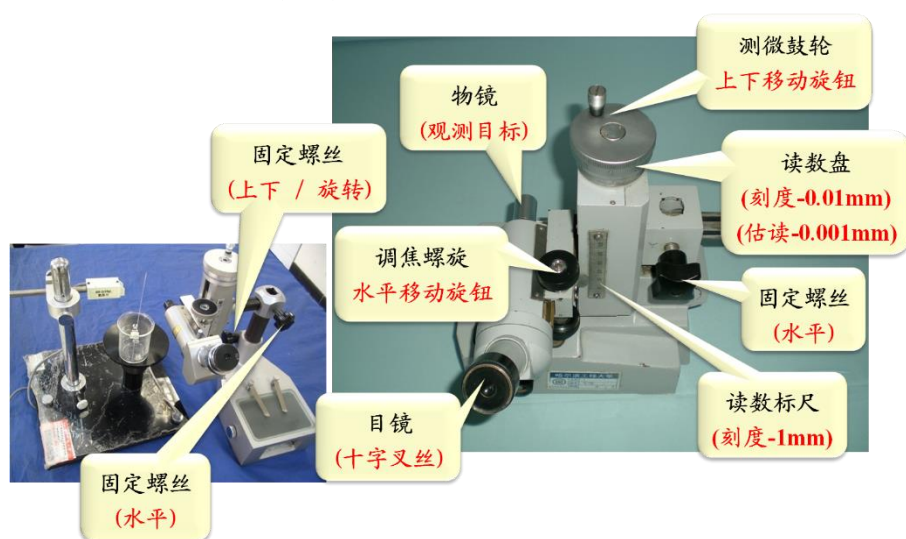


图 5. 读数显微镜功能概要

【附录 5】评分细则

实验课堂评分

序号	要 求	分值
1	预习报告：内容完整（目的、原理、仪器、内容）。 原理部分描述清晰、重点突出。	20
2	理解实验设计，实验操作思路清晰，方法得当。	40
3	测量准确，过程清楚，数据记录完整，表格设计合理。 按时完成实验，实验仪器的摆放整齐有序，桌面整洁等。	40
4	重大扣分项与标准： 上课未带预习报告：-30； 有抄袭、造假等违纪等行为实验成绩记 0 分。 拉脱法：定标称重时电压差/g >液膜拉脱时电压差，-20。 数据记录有效数字错误，-5； 记录不完整，-5。 毛细管法：液柱高度测量值<20mm，-10；最大差>0.1mm，-10。 内径测量值的最大差>0.01mm，-10；测量错误，-10。 数据记录有效数字错误，-5；记录不完整，-5。	

实验报告评分

序号	要 求	分值
1	报告形式规范，文字清晰工整，实验结果表达清晰、简洁易懂。 实验简要步骤和数据的整理列表（ 注：原始数据记录随报告上交 ）。	20
2	实验数据符合要求，现象记录正确，坐标纸手绘作图，作图规范。 数据处理：过程清楚，计算正确，表达规范，误差分析。 定标（20）；拉脱法（20）；毛细管法（20）。	60
3	结果表达规范，误差分析、思考题和实验的经验分享等。 实验总结要求紧密结合自己在实验中的问题。	20
4	重大扣分项与标准： 原始数据记录未随报告上交：-10；有抄袭、造假等违纪行为记 0 分。 定标：未按图示法要求，-20；标度、分度格和过程等不规范，-15。 定标结果有效数字错误或无量纲表示，-5。 拉脱法：计算过程无列表，-10；列表内容不完整，-5。 计算结果有效数字错误或无量纲表示，-5；结果错误，-5。 毛细管法：计算过程无列表，-10；列表内容不完整，-5。 计算结果有效数字错误或无量纲表示，-5；结果错误，-5。	