

# 一、预习报告

## 1. 实验综述

**实验原理：**液体表面张力产生于表面分子之间的相互作用，由引力和斥力两部分组成。处于液体表层以下的分子受到来自各个方向的引力和斥力，总体呈相互抵消态势，因而对外表现为总合力为0。但液体表面的分子受到合力不为0，在液体表面形成一个分子引力场，使表面的分子有进入液体内部的收缩趋势，这就是表面张力。表面张力的方向与液面相切，并与液面的任意两部分分界线垂直，它正比于表面分解的长度，即有： $F_{\text{拉}} = \delta \cdot l$ ， $l$ 为分界线段长度， $\delta$ 为表面张力系数（N/m）。

本实验采用环状法测量，内半径为 $r$ 的圆环浸没在盛水的容器中，圆环上部用线连接到扭力计的左臂，当容器中的水慢慢吸出，圆环上液体膜被撕破时，读取此时扭力计上的刻度数。若取圆环周长上一小段为 $dl$ ，在忽略浮力的情况下可得到： $dF = dm \cdot g + 2dF_{\text{拉}} \cdot \cos\theta$ ，由于 $\theta$ 极小， $\cos\theta \approx 0$ ，因此可以算得： $\delta = \frac{F-mg}{4\pi r}$ ，由于扭力计已作了重力补偿，所以 $\delta = \frac{F'}{4\pi r}$ ， $F'$ 即为扭力计读数。

**实验方法：**开机预热力敏传感器，清洗圆环和容器，容器中加入待测液体（蒸馏水），安装砝码盘，力传感器定标，取下砝码盘安装铝圆环，测量表面张力，计算表面张力系数以及不确定度。

**实验现象：**逐渐拉出圆环的过程中可以观察到力敏传感器的示数变化，同时即将拉出圆环时可以观察到液体膜。

## 2. 实验重点

- (1) 了解什么是表面张力及其产生的原因。
- (2) 学会推导表面张力系数的计算公式，并通过对拉力的测量来计算出近似表面张力系数。
- (3) 学会对实验中扭力计的使用和调整，保证悬挂时竖直，避免水平分力带来误差。

## 3. 实验难点

- (1) 使用拉脱法进行测量时，要保证仪器测量时铅直，否则会有水平拉力的存在引起误差。
- (2) 实验中对拉脱时的判断要尽量准确，以便读取最准确的拉力最大值。
- (3) 实验要对结果进行多方面分析讨论，以得到最佳实验结果。

## 二、原始数据

1. 逐差法求仪器转换系数  $K$  ( $N/mV$ )

砝码盘初读数  $V_0 = 65.6 mV$  一个砝码  $m = 500.00 mg$  (相对误差为 0.005%)

砝码质量 ( $10^{-6} kg$ )	增重读数 $V_i' (mV)$	减重读数 $V_i'' (mV)$	$V_i = \frac{V_i' + V_i''}{2} (mV)$	逐差 ( $mV$ )
0.00	65.6	64.5	65.0	$\delta V_i = V_{i+1} - V_i$
500.00	77.3	76.5	76.9	
1000.00	89.5	89.0	89.2	
1500.00	101.8	100.7	101.2	
2000.00	113.7	112.5	113.1	
2500.00	125.0	124.3	124.6	
3000.00	136.3	135.9	136.1	
3500.00	148.0	147.8	147.9	

$$\bar{sv} = \frac{1}{16} (\delta V_1 + \delta V_2 + \delta V_3 + \delta V_4) \quad K = \frac{g \cdot m}{\bar{sv}} = \text{_____} (N/mV)$$

81.0

2. 拉脱法求拉力对应的读数 水温(室温)  $23.8^{\circ}C$  电子秤初读数  $V_0 = 81.0 mV$

次数	拉脱时最大读数 $V_1 (mV)$	吊环读数 $V_2 (mV)$	$V = V_1 - V_2 (mV)$
1	117.5	81.2	
2	116.1	81.3	
3	116.7	81.1	
4	116.8	81.3	
5	117.1	81.3	
平均值			$\bar{V} = \text{_____}$

3. 吊环的内、外直径

测量次数 1 2 3 4 5 平均

内径  $D_{内}/mm$  32.96 32.98 32.96 32.94 32.96

外径  $D_{外}/mm$  34.92 34.90 34.92 34.90 34.94

印东江

### 三、结果与分析

#### 1. 数据处理与结果

(1) 逐差法求仪器转换系数  $K$  (N/mV): 根据实验数据记录, 砝码盘初读数为  $V_0 = 65.6\text{mV}$ , 一个砝码  $500.00\text{mg}$  (相对误差为  $0.005\%$ ), 实验中取  $g=9.793\text{m/s}^2$ , 可以列出表格 (表 1)

表 1

砝 码 质 量 ( $10^{-6}\text{kg}$ )	增 重 读 数 $V_i'(\text{mV})$	减 重 读 数 $V_i''(\text{mV})$	$V_i = \frac{V_i' + V_i''}{2}(\text{mV})$	等 间 距 逐 差 : ( $\text{mV}$ ) $\delta V_i = V_{i+4} - V_i$
0.00	65.6	64.5	65.0	$\delta V_1 = V_4 - V_0 = 48.1$
500.00	77.3	76.5	76.9	
1000.00	89.5	89.0	89.2	$\delta V_2 = V_5 - V_1 = 47.7$
1500.00	101.8	100.7	101.2	
2000.00	113.7	112.5	113.1	$\delta V_3 = V_6 - V_2 = 46.9$
2500.00	125.0	124.3	124.6	
3000.00	136.3	135.9	136.1	$\delta V_4 = V_7 - V_3 = 46.7$
3500.00	148.0	147.8	147.9	

$$\overline{\delta V} = \frac{1}{16}(\delta V_1 + \delta V_2 + \delta V_3 + \delta V_4) = 11.8 \text{ mV}, K = \frac{g \cdot m}{\delta V} = 4.14 \times 10^{-4} \text{ N/mV}$$

(2) 拉脱法求拉力对应的电子秤读数: 实验中水温为  $23.8^\circ\text{C}$ , 电子秤读数  $V_0 = 81.0 \text{ mV}$ , 数据表格 (表 2) 如下:

表 2

测量次数	拉脱时最大读数 $V_1(\text{mV})$	吊环读数 $V_2(\text{mV})$	表面张力对应读数 $V = V_1 - V_2(\text{mV})$
1	117.5	81.2	36.3
2	116.1	81.3	34.8
3	116.7	81.1	35.6
4	116.8	81.3	35.5
5	117.1	81.3	35.8
平均值	116.8	81.2	$\bar{V} = 35.6$

(3) 吊环的内、外直径: 由实验数据记录有表 3

表 3

测量次数	1	2	3	4	5	平均值
内径 $D_{\text{内}}/\text{mm}$	32.96	32.98	32.96	32.94	32.96	32.96
外径 $D_{\text{外}}/\text{mm}$	34.94	34.90	34.92	34.92	34.90	34.92

$$\text{因此 } \bar{L} = \pi \cdot (\bar{D}_{\text{内}} + \bar{D}_{\text{外}}) = 213.25 \text{ mm}$$

$$\text{由此综上数据计算可得: } \bar{\alpha} = \frac{K \cdot \bar{V}}{\bar{L}} = \frac{4.14 \times 10^{-4} \times 35.6}{\pi \cdot (\bar{D}_{\text{内}} + \bar{D}_{\text{外}})} = 6.91 \times 10^{-2} \text{ N/m}$$

现进行不确定度分析: 对于电子秤:  $\Delta_{\text{仪}} m = 0.25 \text{ mg}$ , B 类不确定度为  $u_B(m) = \frac{\Delta_{\text{仪}} m}{\sqrt{3}} = 0.14 \text{ mg}$

对于力传感器:  $\Delta_{\text{仪}} V = 0.1 \text{ mV}$ , B 类不确定度为  $u_B(V) = \frac{\Delta_{\text{仪}} V}{\sqrt{3}} = 0.06 \text{ mV}$

对于游标卡尺:  $\Delta_{\text{仪}} D = 0.02 \text{ mm}$ , B 类不确定度为  $u_B(D) = \frac{\Delta_{\text{仪}} D}{\sqrt{3}} = 0.01 \text{ mm}$

对  $\delta V$ , A 类不确定度  $u_A(\delta V) = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{i=4} (\delta V_i - \bar{\delta V})^2}{3 \times 4}} = 0.330 \text{ mV}$ , 合成不确定度  $u(\delta V) = \sqrt{(u_A(\delta V))^2 + (u_B(V))^2} = 0.336 \text{ mV}$

对  $L$ , 不确定度  $u(L) = \sqrt{(u(D_{\text{内}}))^2 + (u(D_{\text{外}}))^2} = \sqrt{(u_A(D_{\text{内}}))^2 + (u_A(D_{\text{外}}))^2 + 2(u_B(D))^2} = 0.017 \text{ mm}$

对  $V$ , 不确定度为  $u(V) = \sqrt{(u_A(V))^2 + (u_B(V))^2} = 0.25 \text{ mV}$

对于液体表面张力系数不确定度  $u(\bar{\alpha}) = \bar{\alpha} \cdot \sqrt{\left(\frac{u(L)}{L}\right)^2 + \left(\frac{u(\delta V)}{\delta V}\right)^2 + \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(V)}{V}\right)^2} = 0.20 \times 10^{-2} \text{ N/m}$

所以, 实验结果为表面张力系数  $\alpha = \bar{\alpha} \pm u(\bar{\alpha}) = (6.91 \pm 0.20) \times 10^{-2} \text{ N/m}$ .

查阅可知该温度下水的表面张力系数约为  $7.16 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ , 实验结果相对误差为  $E = \frac{\alpha - \bar{\alpha}}{\alpha} \times 100\% = 3.49\%$ .

## 2. 误差分析

实验结果较真实结果略偏小, 现对误差来源分析如下:

(1) 实验过程中由于传感器下所悬挂的秤和圆环始终存在微小波动, 导致所测得的电压也在一定范围内波动, 因此读数上存在一定误差。

- (2) 实验过程中悬挂的圆环并非完全水平, 存在一定的微小倾角导致拉脱时的电压峰值并非水平时拉脱的最大值。
- (3) 使用的游标卡尺较为老旧, 测量内外径时读数难以准确判断, 存在误差。
- (4) 测量圆环的内外径时不一定准确找到位置, 由此会导致  $L$  值存在误差。
- (5) 实验中使用的水并非纯水, 存在杂质, 这也会导致与理论值存在差异。
- (6) 实验中砝码的标称都为 500.00mg, 但实际由于砝码老旧存在不同程度的误差。

### 3. 实验探讨

本次实验主要进行了对仪器转换系数的测定, 再使用拉脱法来计算推导液体表面张力系数。这让我对如何从电压值来定标转换到力的值有了一个认识。同时多个不确定度的计算以及误差传递让我对误差的来源和分析也有了深刻认识。

## 四、思考题

1、什么叫表面张力? 表面张力系数与哪些因素有关?

答: 表面张力产生于表面分子之间的相互作用, 因为液体表面的分子受到合力不为 0, 在液体表面形成一个分子引力场, 使表面的分子有进入液体内部的收缩趋势。

表面张力系数与分子之间的作用力大小有关, 与液体的纯度、温度、界面有关。

2、在推导测量公式时作了哪些近似? 式中各量的物理含义时什么?

答: 实验公式推导中近似认为内外的表面张力  $f$  相等, 拉脱时的角度  $\varphi$  很小, 近似认为  $\cos\varphi = 1$ 。公式中的  $F$  代表刚好拉脱时最大的拉力,  $m$  是液膜的质量,  $m_0$  是吊环的质量,  $g$  为实验测量时的重力加速度,  $D_{\text{内}}$  和  $D_{\text{外}}$  分别代表吊环的内径和外径大小。

3、拉脱法的物理本质是什么?

答: 拉脱法是通过测量物体从液体表面拉脱时所需要的力来间接计算液体表面张力系数, 是通过拉力的最大值与吊环质量之差测量表面张力; 再测量接触面边界长度从而计算出表面张力系数。

4、若考虑拉起液膜的重量, 实验结果应如何修正?

答：考虑拉起时液膜的重量则不应忽略，在计算过程中由于忽略的这部分造成的 $\Delta\alpha = \frac{mg}{\pi \cdot (\bar{D}_{\text{内}} + \bar{D}_{\text{外}})}$ ，由于每次拉起时的液膜质量近似相等，根据实验记录可知这部分造成的 $\Delta V = 0.2\text{mV}$ ，由此根据转换系数即可计算出 $\Delta\alpha$ ，再减去该值即可完成对结果的修正。