

教师签字



实验日期 2023.10.27

预习成绩

总成绩

实验名称 液体表面张力系数测量

一. 实验预习

1. 什么是表面张力? 液体表面张力系数与哪些因素有关?

2. 拉脱法测量液体表面张力的实验原理是什么?

1. 表面张力: 液体表面层由于分子引力不均衡而产生的沿表面作用于任一界线上的张力。从微观上看, 其成因是液体表面薄层内分子间的相互作用。表面张力系数与液体的种类、纯度、温度和它上方的气体成分有关。
2. 将一洁净的圆筒形吊环浸入液体中, 然后缓慢提起吊环, 直到所带起液膜即将破裂, 此时液膜里外两个表面的张力 f 均垂直向下。

刚拉力 $F = (m + m_0)g + 2f$ 。 m 为粘附在吊环上的液体质量, m_0 为吊环质量。 f 与接触面边界长度成正比:

$$\Rightarrow 2f = L\alpha = \pi(D_{in} + D_{out})\alpha$$

$$\therefore \alpha = \frac{F - (m_0 + m)g}{\pi(D_{in} - D_{out})}$$

又因为金属环很薄, 故 m 可以忽略, 表面张力系数 $\alpha = \frac{F - m_0g}{\pi(D_{in} - D_{out})}$

二. 实验现象及原始数据记录

1. 吊环的内、外直径 (单位: mm)

测量次数	1	2	3	4	5	平均值
内径 $D_{内}$	32.96	32.90	33.00	32.98	33.00	32.968
外径 $D_{外}$	34.80	34.78	34.78	34.82	34.80	34.796

2. 利用逐差法求仪器的转换系数 K :

先记录砝码盘等作为初始读数 $V_0 = 2.170$ mV, 然后每次增加一个砝码 500mg, (该标准砝码符合国家标准, 相对误差为 0.05%)

砝码质量 10^{-6}Kg	增重读数 $V_i'(\text{mV})$	减重读数 $V_i''(\text{mV})$	$V_i = \frac{V_i' + V_i''}{2} (\text{mV})$
0	2.171	2.170	2.1705
500.00	2.654	2.656	2.655
1000.00	3.141	3.145	3.143
1500.00	3.630	3.630	3.630
2000.00	4.115	4.118	4.1165
2500.00	4.604	4.606	4.605
3000.00	5.093	5.095	5.094
3500.00	5.577	5.579	5.578

利用逐差法求出每 500mg 对应的电子秤的读数 ΔV , 则 $\bar{K} = \frac{mg}{\Delta V} = \frac{500 \times 10^{-6} \times 9.8 \text{ N/kg}}{\frac{1}{16} \times 7.7950} = \frac{4.9 \times 10^{-3}}{0.06121875} = 7.987 \times 10^{-2} \text{ N/mV}$

3. 用拉脱法求拉力对应的电子秤读数:

表 1 室温下表面张力系数测量表

水温(室温) 26.6 °C, 电子秤初始读数 $V_0 = 0.008$ mV

测量次数	拉脱时最大读数 V_1 (mV)	吊环读数 V_2 (mV)	表面张力对应读数(mV) $V = V_1 - V_2$
1	3.634	2.131	1.503
2	3.642	2.129	1.513
3	3.639	2.132	1.507
4	3.647	2.131	1.516
5	3.655	2.130	1.525
平均值			$\bar{V} = 1.5128$

表 2 不同温度下表面张力系数测量表

水温 31.6 °C, 电子秤初始读数 $V_0 = 0.000$ mV

测量次数	拉脱时最大读数 V_1 (mV)	吊环读数 V_2 (mV)	表面张力对应读数(mV) $V = V_1 - V_2$
1	3.629	2.129	1.500
2	3.544	2.127	1.417
3	3.559	2.128	1.431
4	3.637	2.134	1.503
5	3.656	2.129	1.527
平均值			$\bar{V} = 1.4756$

教师	姓名
签字	

三. 数据处理

1. 测量室温下水的表面张力系数，并计算不确定度。

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

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{K} \cdot \bar{V}}{\bar{L}}$$

$$\left(\frac{\Delta\alpha}{\bar{\alpha}}\right)^2 = \left(\frac{\Delta K}{\bar{K}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{\bar{V}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{\bar{L}}\right)^2$$

$$\alpha = \bar{\alpha} \pm \Delta\alpha$$

将室温下的实验数据代入， $\bar{L} = \pi(\bar{D}_{\text{内}} + \bar{D}_{\text{外}}) = \pi(32.968 + 34.796) = 212.887 \text{ mm}$,

$$\text{故 } \bar{\alpha} = \frac{\bar{K} \cdot \bar{V}}{\bar{L}} = \frac{1.00577 \times 10^{-2} \text{ N/mV} \times 1.5128 \text{ mV}}{212.887 \times 10^{-3} \text{ m}} = 7.147 \times 10^{-2} \text{ N/m}。$$

由于转换系数 K 是通过逐差法来计算的，计算公式为

$$K = \frac{mg}{\frac{\sum_{i=5}^8 V_i - \sum_{i=1}^4 V_i}{16}} = \frac{16mg}{\sum_{i=5}^8 V_i - \sum_{i=1}^4 V_i}$$

所以 K 的不确定度 $\left(\frac{\Delta K}{K}\right)^2 = \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2$ 。已知 500mg 砝码精度为 0.025mg，电子秤的最小读数为 0.001mV，故

$$\left(\frac{\Delta K}{K}\right)^2 = \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 = \left(\frac{\frac{0.001}{\sqrt{3}} \text{ mV}}{\frac{1}{16} \times 7.795 \text{ mV}}\right)^2 + \left(\frac{\frac{0.025}{\sqrt{3}} \text{ mg}}{500 \text{ mg}}\right)^2 \approx 1.4052 \times 10^{-6}$$

而对于主不确定度中 $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2$ 的值，其计算为：

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 = \left(\frac{\frac{0.001}{\sqrt{3}} \text{ mV}}{1.5128 \text{ mV}}\right)^2 \approx 1.4565 \times 10^{-7}$$

20 分度的游标卡尺的仪器误差为 0.05mm，所以

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 = \left(\frac{\frac{0.05}{\sqrt{3}} \text{ mm}}{\bar{D}_{\text{内}} + \bar{D}_{\text{外}}}\right)^2 \approx 1.8148 \times 10^{-7}$$

$$\therefore \left(\frac{\Delta\alpha}{\bar{\alpha}}\right)^2 = \left(\frac{\Delta K}{\bar{K}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{\bar{V}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{\bar{L}}\right)^2 = 1.7323 \times 10^{-6}$$

不确定度 $\Delta\alpha = \sqrt{\bar{\alpha}^2 \cdot 1.7323 \times 10^{-6}} = 9.407 \times 10^{-5} \text{ N/m}$

故最终的表面张力系数为 $\alpha = \bar{\alpha} \pm \Delta\alpha = (7.147 \pm 0.0094) \times 10^{-2} \text{ N/m}$ ，置信概率 $P = 68.3\%$ 。

2. 从附录中查出室温下水的表面张力系数 α 的理论值，把实验结果与此值比较求相对误差，

并进行分析。

从附录中得知室温 25°C 下，水的表面张力系数 α 的公认值为 $7.197 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ ，而实验中室温 26.6°C 下测得的表面张力系数为 $\alpha = 7.147 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ ，故相对误差为

$$\delta = \frac{|7.147 \times 10^{-2} - 7.197 \times 10^{-2}|}{7.197 \times 10^{-2}} \times 100\% = 0.69\%$$

由于温度升高，水的表面张力系数会有所减小，所以可以得出结论在室温 26.6°C 下测得的表面张力系数与公认值大致相符合。

3. 测量不同温度下表面张力系数，并与室温下水的表面张力系数理论值作分析比较。

31.6°C 下，实验测得的水表面张力系数为

$$\alpha = \frac{\bar{K} \cdot \bar{V}}{\bar{L}} = \frac{1.00577 \times 10^{-2} \text{ N/mV} \times 1.4756 \text{ mV}}{212.887 \times 10^{-3} \text{ m}} = 6.971 \times 10^{-2} \text{ N/m}$$

与 26.6°C 下测量的 α 值相比有所降低，符合表面张力系数的变化规律。

从附录得知室温为 30°C 下水的表面张力系数 α 公认值为 $7.118 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ ，故相对误差为

$$\delta = \frac{|6.971 \times 10^{-2} - 7.118 \times 10^{-2}|}{7.118 \times 10^{-2}} \times 100\% = 2.07\%$$

四. 实验结论及现象分析

(讨论液体表面张力系数测量中误差的来源，如何提高测量精度?)

液体表面张力系数测量中误差来自多个方面。首先，在测量转换系数时引起误差的因素有：砝码与电压测量重复性和电压表示数的误差；测量金属环直径时存在测量重复性和游标卡尺示值的误差；进行拉脱实验时存在控制水膜的测量重复性和电压表示值的误差。

在实验操作过程中，金属环与水面不平行、实验环境出现振动也会造成结果误差。

为了提高测量精度，首先需要保持待测液体的纯净和金属环、砝码的清洁。其次在操作时，保持金属环与水面平行，避免实验环境出现较大的振动。最后，使用精度更高的测力计和游标卡尺可以提高精度。

五. 讨论题

1. 在推导液体表面张力系数测量公式中作了哪些近似？式中各量的物理意义是什么？

a) 实验将液膜视为了平面，而忽略了液膜的曲率，此时表面张力的方向被近似为竖直向下。

b) 实验忽略了粘附在吊环上液体的质量，因而表面张力近似为 $F - m_0 g$ 。

公式 $\alpha = \frac{F - m_0 g}{\pi(D_{内} + D_{外})}$ 中， F 为液膜将要破裂时的拉力， m_0 为吊环质量， g 为重力加速度，

$D_{内}$, $D_{外}$ 为金属环内、外直径。

2. 若考虑拉起液膜的重量, 实验结果应如何修正?

设拉起液膜的质量为 m , 则表面张力应为 $f = \frac{1}{2}[F - (m + m_0)g]$, 表面张力系数的表达

式为 $\alpha = \frac{F - (m_0 + m)g}{\pi(D_{内} + D_{外})}$ 。