



大学物理-基础实验 | 实验报告

姓名 王元叙
学号 PB22000195
班级 22 级少年班学院 5 班
日期 2023 年 5 月 22 日

表面张力的测定

1 实验目的

1. 了解表面张力产生原理及特性，理解表面张力的测定原理
2. 通过实际操作，掌握焦利氏秤的基本调节要求、方法和使用规范。
3. 探究浓度与表面张力的关系。
4. 合理分析误差，推断出表面张力系数测量误差的主要来源

2 实验装置

焦利氏秤（包括锥形弹簧）、若干 0.5g 砝码和 1g 砝码、镊子、刻度尺、烧杯、针筒注射器、清水、配置好的位置浓度洗洁精水溶液、洗洁精

3 实验原理

3.1 表面张力作用原理原理

液体表面层（其厚度等于分子的作用半径）内的分子所处的环境跟液体内部的分子是不同的。

表面层内的分子合力垂直于液面并指向液体内部，所以分子有从液面挤入液体内部的倾向，并使液体表面自然收缩。

想象在液面上划一条直线，表面张力就表现为直线两旁的液膜以一定的拉力相互作用。拉力 F 存在于表面层，方向恒与直线垂直，大小与直线的长度 l 成正比，即

$$F = \sigma l$$

式中 σ 称为表面张力系数，它的大小与液体的成分、纯度、浓度以及温度有关。

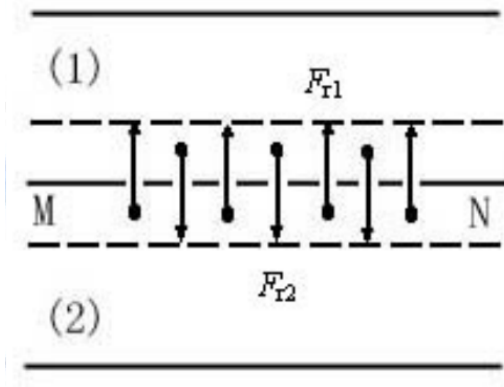


图 1: 表面张力产生原理示意图

3.2 拉脱法测量原理

在实验操作中, 将金属丝(金属环)框缓慢拉出水面的过程中, 金属丝框下面将带起一水膜, 当水膜刚被拉断时, 诸力的平衡条件是

$$F = mg + 2F'$$

联立

$$F' = \sigma l$$

得到

$$\sigma = \frac{F - mg}{2l}$$

对金属环来说, 同样可以得到

$$\sigma = \frac{F - mg}{2\pi d}$$

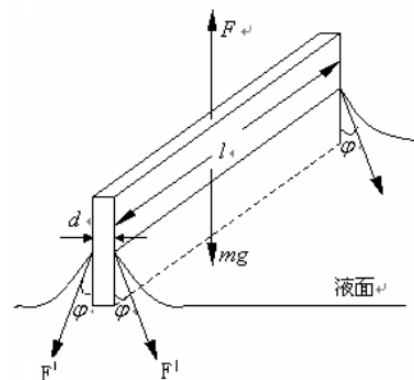
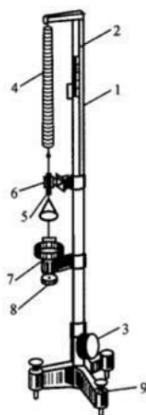


图 2: 金属丝测量表面张力示意图

3.3 焦利秤测量原理

焦利秤是一种用于测微小力的精细弹簧秤。一般的弹簧秤都是弹簧秤上端固定, 在下端加负载后向下伸长, 而焦利秤与之相反, 它是控制弹簧下端的位置保持一定, 加负载后向上拉动弹簧确定伸长值。

为了保证弹簧下端的位置是固定的, 必须三线对齐, 即玻璃圆筒 E 上的刻线、小平面镜上的刻线、 E 上的刻线在小平面镜中的像, 三者始终重合。在力 F 作用下弹簧伸长 Δl , 根据虎克定律可知, 在弹性限度内 $F = k\Delta l$, 将已知重量的砝码加在砝码盘中, 测出弹簧的伸长量, 由上式即可计算该弹簧的 k 值, 由 k 值就可测量外力 F 。



焦利氏秤装置图

1—秤框; 2—升降金属杆; 3—升降钮; 4—锥形弹簧; 5—带小镜子的挂钩; 6—平衡指示玻璃管; 7—平台; 8—平台调节螺丝; 9—底脚螺丝

图 3: 焦利秤示意图

4 实验步骤

1. 确定焦利氏秤上锥形弹簧的劲度系数

- (a) 把锥形弹簧, 带小镜子的挂钩和小砝码盘依次安装到秤框内的金属杆上。调节支架底座的底脚螺丝, 使秤框竖直, 小镜子应正好位于玻璃管中间, 挂钩上下运动时不致与管摩擦。
- (b) 逐次在砝码盘内放入砝码, 每次增量 0.5g 的砝码, 从 0.5g ~ 5g 范围内增加。每次操作都要调节升降钮, 做到三线对齐。记录升降杆的位置读数。用最小二乘法和作图法计算出弹簧的劲度系数 k 。

2. 用金属圈测量自来水的表面张力系数

- (a) 用游标卡尺测量金属圈的直径 d ; 当液膜刚要破裂时, 记下金属杆的读数。测量 5 次, 取平均, 计算自来水的表面张力系数和不确定度。
- (b) 取下砝码, 在砝码盘下挂上金属圈, 仍保持三线对齐, 记下此时升降杆读数 l_0
- (c) 把盛有自来水的烧杯放在焦利氏秤台上, 调节平台的微调螺丝和升降钮, 使金属圈浸入水面以下

(d) 缓慢地旋转平台微调螺丝和升降钮，注意烧杯下降和金属杆上升时，始终保持三线对齐。当液膜刚要破裂时，记下金属杆的读数。测量 5 次，取平均，计算自来水的表面张力系数和不确定度。

3. 用金属丝测量洗洁精溶液的表面张力系数

(a) 用游标卡尺测量金属丝两脚之间的距离 s

(b) 取下砝码，在砝码盘下挂上金属丝，仍保持三线对齐，记下此时升降杆读数 l_0 ，然后重复上述 2 中的步骤 (c) 和 (d) 步骤即可

4. 探究不同浓度的洗洁精的表面张力系数，得出浓度与表面张力的关系曲线

5 实验数据与分析

5.1 测量弹簧劲度系数

表 1 测量弹簧劲度系数原始数据

质量 m/g	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
距离 x/cm	1.20	1.63	1.98	2.43	2.93	3.37	3.86	4.23	4.65	5.11

使用最小二乘法得到结果图：

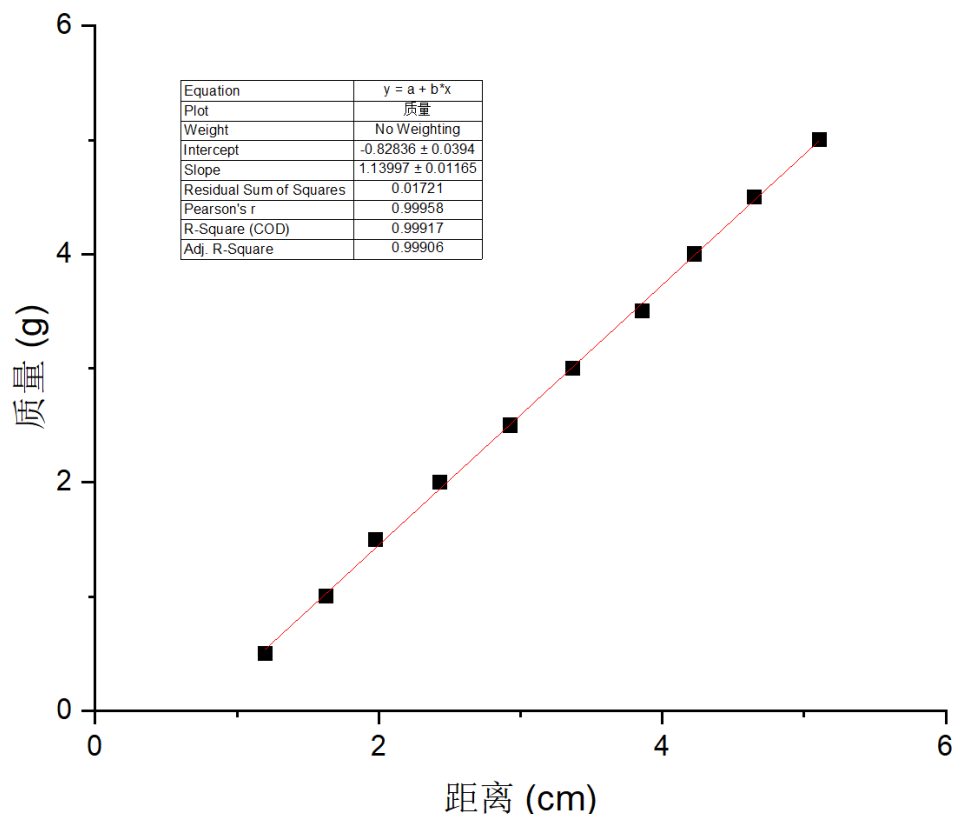


图 4: 最小二乘法拟合劲度系数

采用合肥本地参考重力加速度 $g = 9.7933 \text{ m/s}^{-2}$ 可以得到

$$k = \frac{x}{m} g = (1.13997 + 0.01165) \times 10^{-1} \times 9.7933 \text{ N/m}^{-2} = 1.1164 \pm 0.0114 \text{ N/m}^{-2}$$

采用作图法，使用代入计算得到

$$k = \frac{x}{m} g = 1.1271 \text{ N/m}^{-2}$$

采用最小二乘法得到的结果作为下面计算过程中使用的劲度系数

5.2 用金属圈测量自来水的表面张力系数

表 2 金属圈直径测量数据

金属圈直径 d/cm		
3.49	3.47	3.37

金属圈直径测量平均值

$$\bar{d} = \frac{3.49 + 3.47 + 3.37}{3} = 3.443 \text{ cm}$$

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (d_i - \bar{d})^2}{2}} = 0.0906 \text{ cm}$$

A 类不确定度为

$$u_A = \frac{\sigma_d}{\sqrt{3}} = 0.0522 \text{ cm}$$

B 类不确定度为

$$u_B = K_p \frac{\Delta_B}{C} = 1.960 \times \frac{0.02}{3} = 0.013 \text{ cm}$$

由不确定度合成公式 (钢尺允差为 0.02cm), 金属圈直径的不确定度为

$$\begin{aligned} U_{d,0.95} &= \sqrt{(t_{0.95}u_A)^2 + u_B^2} \\ &= \sqrt{(4.3 \times 0.0522)^2 + 0.013^2} \text{ cm} \\ &= 0.0711 \text{ cm}, P = 0.95 \end{aligned}$$

表 3 金属圈测量自来水表面张力数据

初始距离 l_0/cm	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
破裂时的距离 l/cm	2.66	2.67	2.66	2.65	2.63

位移量平均值

$$\bar{\Delta l} = \frac{\sum_{i=1}^5 \Delta l_i}{5} = 1.154 \text{ cm}$$

$$\sigma_{\Delta l} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\Delta l_i - \bar{\Delta l})^2}{4}} = 0.012 \text{ cm}$$

由不确定度合成公式 (弹簧长度允差为 0.01cm), A 类不确定度为

$$u_A = \frac{\sigma_{\Delta l}}{\sqrt{5}} = 0.0054 \text{ cm}$$

B 类不确定度为

$$u_B = K_p \frac{\Delta_B}{C} = 1.960 \times \frac{0.01}{3} = 0.0065 \text{ cm}$$

弹簧伸长量的不确定度为

$$\begin{aligned} U_{l,0.95} &= \sqrt{(t_{0.95}u_A)^2 + u_B^2} \\ &= \sqrt{(4.3 \times 0.0054)^2 + 0.0065^2} \text{ cm} \\ &= 0.0239 \text{ cm}, P = 0.95 \end{aligned}$$

自来水的表面张力系数为

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{k\bar{\Delta l}}{2\pi\bar{d}} \\ &= \frac{1.1271 \times 1.154}{2 \times 3.1416 \times 3.443} \times 10^1 \text{ N/m} \\ &= 0.0601 \text{ N/m} \end{aligned}$$

由间接不确定度合成公式

$$\frac{U_{\sigma,0.95}}{\sigma} = \frac{\Delta k}{k} + \frac{U_{\Delta l,0.95}}{\Delta l} + \frac{U_{d,0.95}}{\bar{d}} = 0.05147$$

$$U_{\sigma,0.95} = \frac{U_{\sigma,0.95}}{\sigma} \times \sigma = 0.0031 \text{ N/m}, P = 0.95$$

综上，自来水的表面张力系数为

$$\sigma = (0.0601 \pm 0.0031) \text{ N/m}$$

5.3 用金属丝测量洗洁精溶液的表面张力系数

表 4 金属丝长度测量数据

金属丝长度 s/cm		
4.00	4.02	4.09

金属圈直径测量平均值

$$\bar{d} = \frac{3.49 + 3.47 + 3.37}{3} = 4.037 \text{ cm}$$

表 5 金属丝测量洗洁精溶液表面张力数据

初始距离 l_0/cm	1.35	1.35	1.34	1.35	1.35
破裂时的距离 l/cm	1.55	1.55	1.54	1.56	1.57
距离差值 $\Delta l/\text{cm}$	0.20	0.20	0.20	0.21	0.22

位移量平均值

$$\overline{\Delta l} = \frac{\sum_{i=1}^5 \Delta l_i}{5} = 0.206 \text{ cm}$$

洗洁精溶液的表面张力系数为

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{k\overline{\Delta l}}{2\bar{d}} \\ &= \frac{1.1271 \times 0.206}{2 \times 4.037} \times 10^1 \text{ N/m} \\ &= 0.0287 \text{ N/m} \end{aligned}$$

5.4 探究不同浓度的洗洁精的表面张力系数

在全部三次测量之前均使用金属圈进行预实验，得到的结果都是液膜不破裂，因此三次测量都使用金属丝。中间计算过程从略。

表 6 自配不同浓度洗洁精溶液表面张力测量数据

浓度	初始距离 l_0/cm	破裂时的距离 l/cm			$\overline{\Delta l}/\text{cm}$	$\sigma/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
1.0‰	1.35	1.56	1.57	1.55	0.210	0.0292
0.4‰	1.35	1.60	1.59	1.60	0.247	0.0344
0.1‰	1.35	1.64	1.66	1.65	0.300	0.0417

使用幂函数拟合得到的结果如图所示

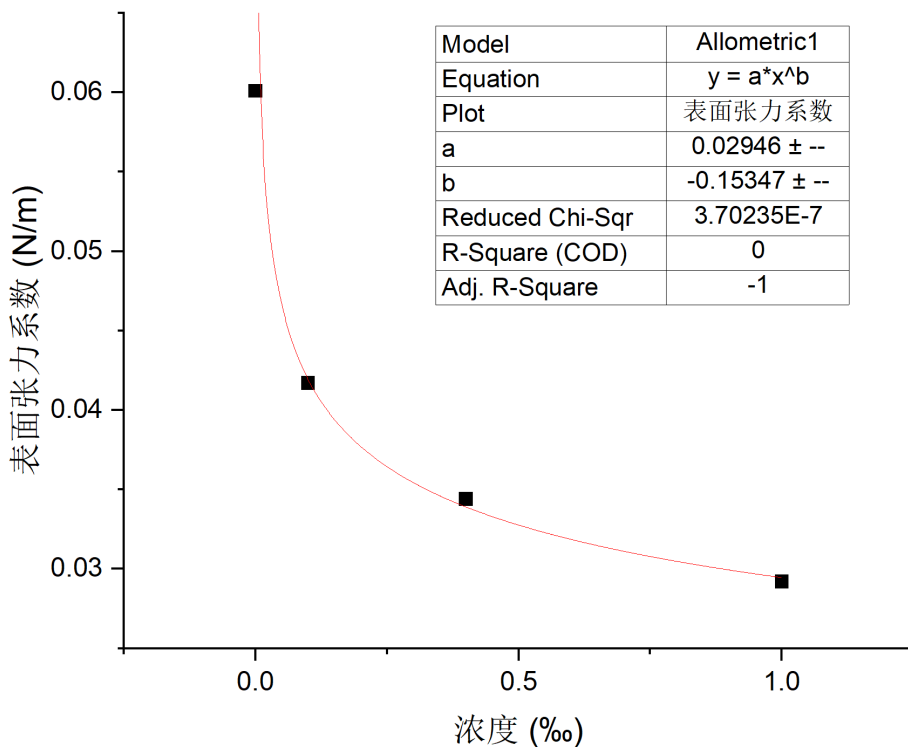


图 5: 洗洁精溶液的表面张力系数与浓度的关系

6 误差分析

本实验中实验误差主要来自于几个方面

1. 用焦利称测量移动距离时，读数有一定误差。
2. 金属圈与金属框并不是严格规整，金属圈各处直径有偏差，进而导致测量误差。
3. 液膜刚要破裂的临界点难以准确确定，容易因震动或过度调节导致液膜提前批列，造成误差。
4. 实际上表面张力方向也并不严格非垂直水面，与理想状态的受力分析存在差异。

7 思考题

问题 焦利氏秤法测定液体的表面张力有什么优点？

1. 焦利氏称在测量过程中下端保持在三线对齐的位置上，在正确操作的前提下能够保证较高的实验精度。
2. 实验中要判断液膜刚好拉脱的临界点，这就需要保证弹簧下端不动，否则难以观察。而测量时焦利氏秤弹簧下端位置固定，便于找到拉脱的临界状态，易于观察。
3. 焦利氏秤使用锥形弹簧，克服了因弹簧自重引起弹性系数的变化，实验精度较高。

问题 焦利氏秤的弹簧为什么做成锥形？

1. 为了使弹簧均匀伸长，消除其自重的影响。

问题 实验中应注意哪些地方，才能减小误差？

1. 实验前先调节底脚螺丝，使焦利氏秤竖直，防止平面镜升降过程中与玻璃管摩擦，使结果不准确。
2. 缓慢且同时地转动平台的高度调节螺母和升降钮，始终保持三线合一，防止液膜断裂时玻璃管内不处于三线合一的状态。
3. 实验中尽量保证液面没有抖动，这就要求实验调节焦利氏秤时一定要轻微调节，否则水面出现波动会干扰液膜，使拉脱时测量不准
4. 每次试验前分别测量对应的原始长度，提高精度。