

摘要

液体具有尽量缩小其表面的趋势，好象液体表面是一张拉紧了橡皮膜一样。把这种沿着表面的、收缩液面的力称为表面张力。表面张力的存在能说明物质处于液态时所特有的许多现象，比如泡沫的形成、润湿和毛细现象等等。

测定液体表面张力的方法很多，常用的有焦利氏秤法（拉脱法）、毛细管法、平板法、滴重法、最大泡压法等。

第一部分 实验目的

本实验采用焦利氏秤法（拉脱法）。该方法的特点是，用秤量仪器直接测量液体的表面张力，测量方法直观，概念清楚。

- 掌握焦利氏称法测量表面张力。
- 掌握对表面张力的受力分析。
- 可以根据实验原理测量自配溶液表面张力。

需测量物理量

- 锥形弹簧劲度系数
- 金属圈直径、金属丝长度
- 水的表面张力系数、洗洁精溶液的表面张力系数

第二部分 实验方法

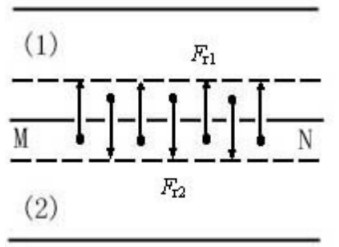
实验原理

I. 理解表面张力

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。



表面张力受力示意图

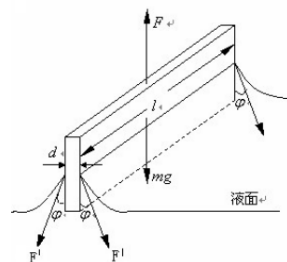
II. 受力平衡

金属丝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：

$$F = mg + 2F'$$

而 $F' = \sigma l$

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



受力平衡示意图

实验器材

焦利称、刻度尺、金属圈、金属丝、水、洗洁精、烧杯。

实验步骤

I. 确定焦利氏秤上锥形弹簧的劲度系数

- (1) 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。
- (2) 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。

II. 用金属圈测量自来水的表面张力系数

- (1) 测量金属圈的直径 d ；
- (2) 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 ；
- (3) 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；
- (4) 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。

III. 用金属丝测量肥皂水的表面张力系数

- (1) 测量金属丝两脚之间的距离 s ；
- (2) 重复上述 2 中的步骤(2)-(4)步骤；计算肥皂水的表面张力系数。
- (3) 自主配置三个不同浓度洗洁精溶液，测量不同浓度溶液的表面张力系数，得出关系曲线。

第三部分 实验结果与分析

测量记录

I. 锥形弹簧劲度系数数据测量表

质量 m/g	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
距离 X/cm	3.05	3.48	3.91	4.33	4.73	5.15	5.55	5.97	6.39	6.81	7.22

II. 金属圈直径及金属丝长度数据测量表

直径 d/cm			长度 s/cm		
3.51	3.51	3.50	2.08	2.10	2.11

III. 水及洗洁精溶液表面张力数据测量表

测量液体	测量组件	初始距离 l_0/cm	破裂时的距离 l/cm				
自来水	金属圈	3.40	4.23	4.25	4.24	4.26	4.26
洗洁精	金属丝	3.23	3.47	3.48	3.50	3.49	3.48

IV. 自配洗洁精溶液表面张力数据测量表

测量液体	测量组件	初始距离 l_0/cm	浓度 (体积比)	0.1%	0.2%	0.3%
洗洁精溶液	金属丝	3.23	破裂距离 l_0/cm	3.55	3.48	3.45

分析与讨论

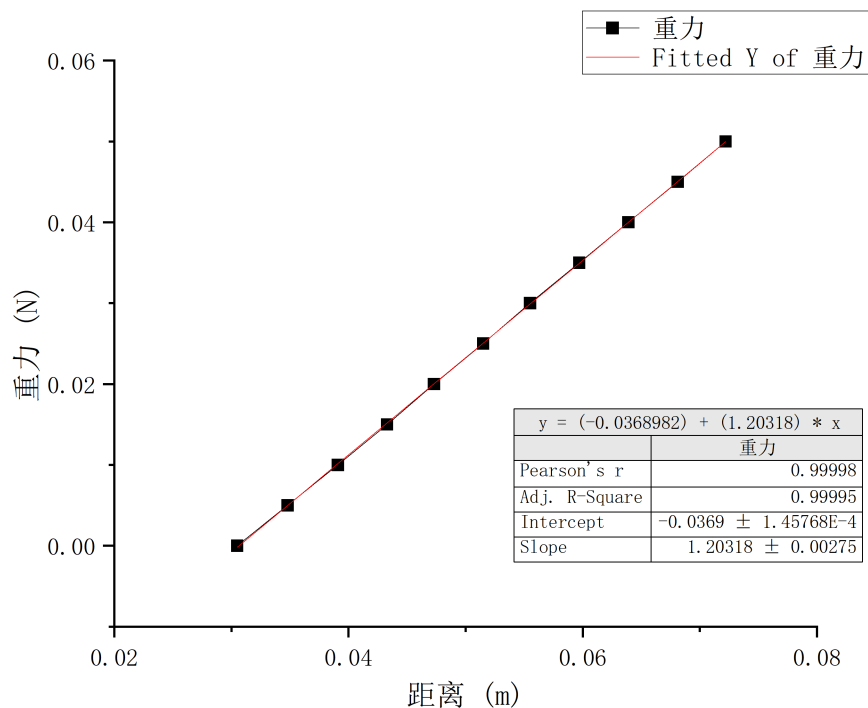
I. 锥形弹簧劲度系数

斜率

$$m = 1.2032 \text{ N/m}$$

截距

$$b = -0.0369 \text{ N}$$



线性拟合的相关系数

$$r = \frac{\overline{F\bar{l}} - \bar{F} \cdot \bar{l}}{\sqrt{(\overline{F^2} - \bar{F}^2)(\overline{l^2} - \bar{l}^2)}} = 0.99997657$$

斜率标准差

$$s_m = |m| \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{r^2} - 1\right) / (n - 2)} = 0.0026889 \text{ N/m}$$

截距标准差

$$s_b = s_m \cdot \sqrt{\bar{F}^2} = 0.00014278 \text{ N}$$

弹簧的劲度系数为：1.2032 N/m

II. 用金属圈测量自来水的表面张力系数

铁丝圈直径 d 的平均值

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i = \frac{3.51 + 3.5 + 3.5}{3} \text{ cm} = 3.5033 \text{ cm}$$

铁丝圈直径 d 的标准差

$$\begin{aligned}\sigma_d &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \\ &= \sqrt{\frac{(3.51 - 3.5033)^2 + (3.5 - 3.5033)^2 + (3.5 - 3.5033)^2}{3-1}} \text{ cm} \\ &= 0.0057735 \text{ cm}\end{aligned}$$

铁丝圈直径 d 的B类不确定度

$$\Delta_{B,d} = \sqrt{\Delta_{\text{仪}}^2 + \Delta_{\text{估}}^2} = \sqrt{0.01^2 + 0.005^2} \text{ cm} = 0.01118 \text{ cm}$$

铁丝圈直径 d 的展伸不确定度

$$\begin{aligned}U_{d,P} &= \sqrt{\left(t_P \frac{\sigma_d}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(k_P \frac{\Delta_{B,d}}{C}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(4.3 \times \frac{0.0057735}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(1.96 \times \frac{0.01118}{3}\right)^2} \text{ cm} \\ &= 0.016087 \text{ cm}, P = 0.95\end{aligned}$$

弹簧伸长量 Δl 的平均值

$$\bar{\Delta l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta l_i = \frac{0.83 + 0.85 + 0.84 + 0.86 + 0.86}{5} \text{ cm} = 0.848 \text{ cm}$$

弹簧伸长量 Δl 的标准差

$$\begin{aligned}\sigma_{\Delta l} &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta l_i - \bar{\Delta l})^2} \\ &= \sqrt{\frac{(0.83 - 0.848)^2 + \dots + (0.86 - 0.848)^2}{5-1}} \text{ cm} \\ &= 0.013038 \text{ cm}\end{aligned}$$

弹簧伸长量 Δl 的B类不确定度

$$\Delta_{B,\Delta l} = \sqrt{\Delta_{\text{仪}}^2 + \Delta_{\text{估}}^2} = \sqrt{0.01^2 + 0.005^2} \text{ cm} = 0.01118 \text{ cm}$$

弹簧伸长量 Δl 的展伸不确定度

$$\begin{aligned}U_{\Delta l,P} &= \sqrt{\left(t_P \frac{\sigma_{\Delta l}}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(k_P \frac{\Delta_{B,\Delta l}}{C}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(2.78 \times \frac{0.013038}{\sqrt{5}}\right)^2 + \left(1.96 \times \frac{0.01118}{3}\right)^2} \text{ cm} \\ &= 0.01778 \text{ cm}, P = 0.95\end{aligned}$$

表面张力 σ

$$\sigma = \frac{k\Delta l}{\pi d} = 0.092705 \text{ N/m}$$

表面张力 σ 的延伸不确定度

$$\begin{aligned} U_{\sigma,P} &= \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial \Delta l} U_{\Delta l,P}\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial d} U_{d,P}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{k}{\pi d} U_{\Delta l,P}\right)^2 + \left(-\frac{k\Delta l}{\pi d^2} U_{d,P}\right)^2} \\ &= 1.9898 \times 10^{-3} \text{ N/m}, P = 0.95 \end{aligned}$$

表面张力 σ 最终结果

$$\sigma = (0.0927 \pm 0.0020) \text{ N/m}$$

III. 用金属丝测量肥皂水的表面张力系数

铁丝长度 d 的平均值

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i = \frac{2.08 + 2.1 + 2.11}{3} \text{ cm} = 2.0967 \text{ cm}$$

弹簧伸长量 Δl 的平均值

$$\bar{\Delta l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta l_i = \frac{0.24 + 0.25 + 0.27 + 0.26 + 0.25}{5} \text{ cm} = 0.254 \text{ cm}$$

表面张力 σ

$$\sigma = \frac{k\Delta l}{2d} = 0.072881 \text{ N/m}$$

IV. 自配不同浓度洗洁精表面张力关系曲线

对于 0.1% 浓度的洗洁精溶液。

$$\sigma_1 = \frac{k\Delta l}{2d} = 0.0917 \text{ N/m}$$

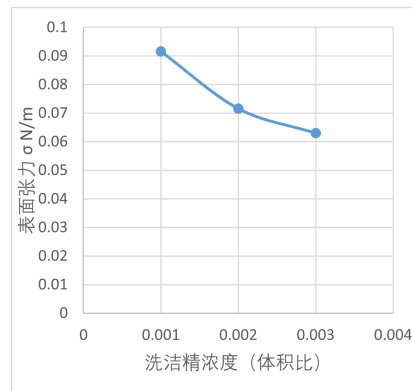
对于 0.2% 浓度的洗洁精溶液。

$$\sigma_2 = \frac{k\Delta l}{2d} = 0.0716 \text{ N/m}$$

对于 0.3% 浓度的洗洁精溶液。

$$\sigma_3 = \frac{k\Delta l}{2d} = 0.0630 \text{ N/m}$$

由此可绘出表面张力与洗洁精浓度关系曲线：



表面张力与洗洁精浓度关系曲线

V. 误差分析

该实验的误差来源主要是:

1. 金属圈材质对水表面张力测量的影响较大;
2. 金属圈和金属丝都不够光滑, 有弯折;
3. 实验所用自来水中混有杂质影响表面张力的测量;
4. 配置洗洁精溶液时定量不够准确。

VI. 实验讨论

本实验锻炼了细致思考、认真动手、分析数据、撰写报告等实验能力; 掌握了焦利氏称的使用方法, 理解了表面张力的物理原理。

思考题

1. 焦利氏秤法测定液体的表面张力有什么优点?

答: 焦利氏称可以很方便地捕捉到液体表面因表面张力形成的薄膜破裂瞬间的受力; 同时, 焦利氏称所用的锥形弹簧弹性系数小, 且读数方法类似游标卡尺, 使得测得数据精度较高。

2. 焦利氏秤的弹簧为什么做成锥形?

答: 消除自重。

3. 实验中应注意哪些地方, 才能减小误差?

答: 始终保持三线对齐; 等弹簧不再晃动时再读数; 不要让小镜子与玻璃管内壁接触。

致谢

感谢大物实验中心以及韦先涛、刘应玲、浦其荣老师