



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

大学物理-基础实验 | 实验报告

姓名 kyle

学号

班级

日期

表面张力

1 实验背景

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。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。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。

2 实验目的

- 本实验通过焦利氏秤法，学习确定锥形弹簧的劲度系数，用金属圈测量自来水的表面张力系数，用金属丝测量洗洁精溶液的表面张力系数。
- 了解液体表面张力的原理，掌握焦利氏秤的搭建和使用。
- 用最小二乘法拟合计算弹性系数，对表面张力测量数据进行不确定度分析，熟练数据处理方法。

3 实验原理

表面张力原理

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不同。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,

$$F = \sigma l$$

其中 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。

实验方法

本实验采用焦利氏秤法, 焦利氏秤结构如图 1, 它实际上是一种用于测微小力的精细弹簧秤, 一般弹簧秤是弹簧秤上端固定, 在下端加负载后向下伸长, 而焦利氏秤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, 即玻璃圆筒上的刻线、小平面镜上的刻线、圆筒上的刻线在小平面镜中的像, 三者始终重合。

先计算弹簧劲度系数, 向托盘中加砝码, 由 $F = k\Delta l$, 可测得 k , 进而可通过弹簧伸长量测的外力 F 。金属丝框缓慢拉出水面的过程中 (如图 2), 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

$$F = mg + 2F'$$

由 $F = \sigma l$, 可得

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

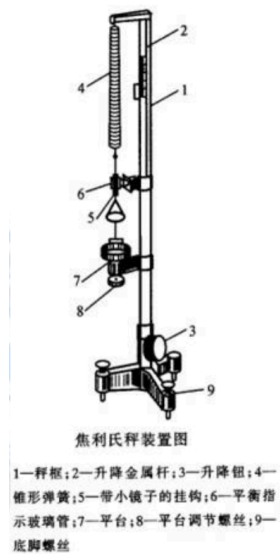


图 1: 焦利氏秤

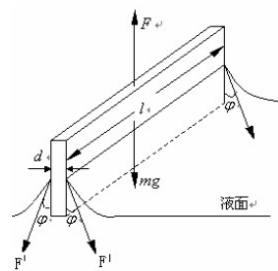


图 2: 拉出水面平衡位置

4 实验仪器

焦利氏秤 (含锥形弹簧, 带镜子的挂钩等), 砝码盘, 砝码, 烧杯, 直尺, 镊子, 自来水与洗洁精, 金属框, 金属圈。

5 实验步骤

1. 确定锥形弹簧的劲度系数

(1) 搭建焦利氏秤: 把锥形弹簧, 带小镜子的挂钩和小砝码盘依次安装秤框内的金属杆上。调平: 通过调节底角螺丝使秤框竖直, 小镜子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。

(3) 数据处理, 最小二乘法, 和作图法求出弹簧的劲度系数。

2. 用金属圈测量自来水的表面张力系数

(1) 用直尺测量金属圈的直径 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。

(5) 重复上述步骤五次, 计算表面张力系数和不确定度。

3. 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 2 中 (2) - (4) 步骤, 计算溶液的表面张力系数。

4. 自主配置三种洗洁精溶液, 运用金属丝测量表面张力系数, 拟合得出浓度与表面张力的关系曲线。

6 测量记录及数据处理

6.1 确定锥形弹簧劲度系数

质量 m/g	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
距离 x/cm	1.98	2.39	2.85	3.28	3.69	4.12	4.55	5.01	5.45	5.88	6.32

作图法

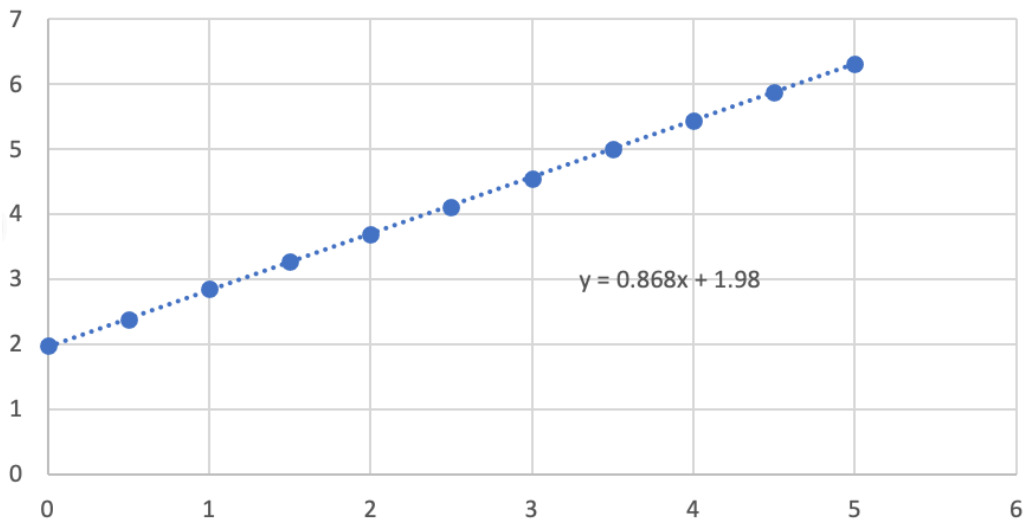


图 3: 作图法测劲度系数

弹性系数拟合

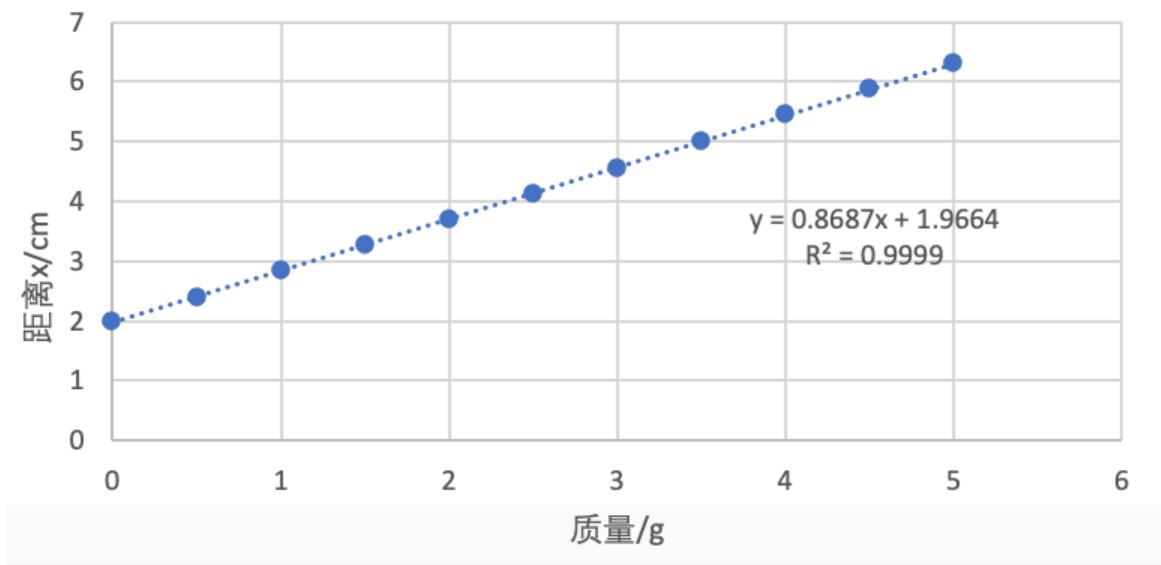


图 4: 最小二乘法测劲度系数

图像斜率为 $m_{\text{斜}} = \Delta m / \Delta l$, 由 $F = k\Delta l = mg$ 可得:

$$k = \frac{g}{m_{\text{斜}}}$$

合肥市重力加速度取 $g = 9.7947$, 计算可得

$$k = 1.1752\text{N/m}$$

根据斜率标准差公式

$$s_m = m_{\text{斜}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{R^2} - 1\right) / (n - 2)} = 0.00259 \text{cm/g}$$

$$U_m = t_{0.95} s_m = 2.26 \times 0.00259 = 0.0057 \text{cm/g}, P = 0.95$$

根据不确定度传递公式

$$\frac{U_k}{k} = \frac{U_m}{m}$$

解得 k 的不确定度为

$$U_k = k \frac{U_m}{m_{\text{斜}}} = 0.0078 \text{N/m}$$

故 $k = 1.1752 \pm 0.0078 \text{N/m}, P = 0.95$

6.2 测量自来水的表面张力系数

金属圈直径 d/cm		金属丝长度 s/cm			
2.71	2.72	2.74	3.65	3.66	3.65

表 1: 金属丝和金属圈参数测量

测量液体: 自来水	初始距离 l_0						破裂时距离 l			
测量工具: 金属圈	2.25	2.24	2.25	2.28	2.26	2.99	3.02	3.02	3.05	3.01

表 2: 水的表面张力测量数据

金属圈直径的平均值为

$$\bar{d} = \frac{1}{3}(d_1 + d_2 + d_3) = 2.723 \text{cm}$$

标准差为

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1}{3-1} \sum_{i=1}^3 (\bar{d} - d_i)^2} = 0.0124 \text{cm}$$

直尺的仪器误差取 $\Delta_{\text{仪}} = 0.1 \text{mm}$, $\Delta_{\text{估}} = 0.05 \text{mm}$

故 B 类不确定度为

$$\Delta_B = \sqrt{\Delta_{\text{仪}}^2 + \Delta_{\text{估}}^2} = \sqrt{0.01^2 + 0.005^2} \text{cm} = 0.0118 \text{cm}$$

钢尺为正态分布取 $C = 3, K_P = 1.96, t_P = 4.3$, 铁丝圈直径 d 的展伸不确定度为

$$U_d = \sqrt{\left(t_P \frac{\sigma_d}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(k_P \frac{\Delta_B}{C}\right)^2} = 0.0328 \text{ cm}, P = 0.95$$

弹簧伸长量 Δl 的平均值为

$$\overline{\Delta l} = \frac{0.74 + 0.76 + 0.77 + 0.77 + 0.75}{5} \text{ cm} = 0.758 \text{ cm}$$

标准差为

$$\sigma_{\Delta l} = \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_{i=1}^5 (\Delta l_i - \overline{\Delta l})^2} = 0.0116 \text{ cm}$$

计算 B 类不确定度

$$\Delta_{Bl} = \sqrt{\Delta_{\text{仪}}^2 + \Delta_{\text{估}}^2} = \sqrt{0.01^2 + 0.005^2} \text{ cm} = 0.0118 \text{ cm}$$

焦利氏秤的标尺为游标卡尺, 均匀分布, 取 $C = \sqrt{3}, K_P = 1.645, t_P = 2.78$, 故弹簧伸长量 Δl 的展伸不确定度为

$$U_{\Delta l} = \sqrt{\left(t_P \frac{\sigma_{\Delta l}}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(k_P \frac{\Delta_{Bl}}{C}\right)^2} = 0.0178 \text{ cm}, P = 0.95$$

计算表面张力系数

$$\delta = \frac{k\Delta l}{2\pi d} = 0.05206 \text{ N/m}$$

利用不确定度的合成公式, 表面张力系数的展伸不确定度为

$$U_{\sigma} = \sigma \cdot \sqrt{\left(\frac{U_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{U_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta l}}{\Delta l}\right)^2} = 0.0016 \text{ N/m}$$

故表面张力系数为 $\sigma = 0.05206 \pm 0.0016 \text{ N/m}$

6.3 测量未知溶液的表面张力系数

测量液体: 洗洁精溶液	初始距离 l_0					破裂时距离 l				
测量工具: 金属丝	2.14	2.13	2.12	2.10	2.16	2.36	2.35	2.36	2.33	2.39

表 3: 未知溶液的表面张力测量数据

金属丝长度的平均值为

$$\bar{s} = \frac{3.65 + 3.66 + 3.65}{3} \text{ cm} = 3.653 \text{ cm}$$

弹簧伸长长度的平均值为

$$\overline{\Delta l} = \frac{0.22 + 0.22 + 0.24 + 0.23 + 0.22}{5} \text{ cm} = 0.226 \text{ cm}$$

计算表面张力系数为

$$\sigma = \frac{k\Delta l}{2s} = 0.0363 \text{ N/m}$$

6.4 自配溶液测量表面张力系数

体积分数	1%	0.5%	0.25%	纯水
表面张力系数	0.036	0.039	0.04	0.052

表 4: 不同浓度的洗洁精溶液

利用指数拟合，可以近似得到

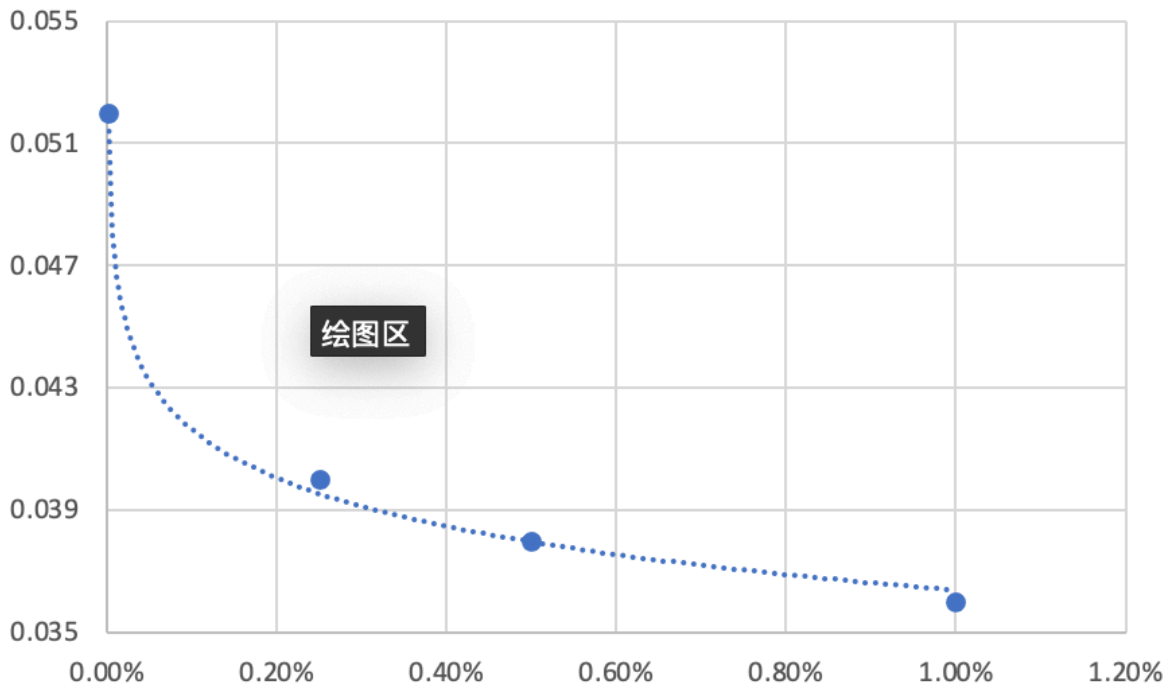


图 5: 不同浓度洗洁精拟合函数

事实上，刚开始加入少量洗洁精会使表面张力系数快速下降，随后这一趋势趋于平缓。

7 实验讨论

实验出现了较大的误差，测得表面张力系数偏小，分析可能造成误差的因素有：

- 水混入杂质，根据拟合图像，表面张力近似指数衰减，加极少的洗洁精就可以使液体的表面张力迅速下降，也有可能水久置后溶解了其他杂质，温度也会影响表面张力系数。

金属圈形状不规则，用 $2\pi r$ 计算周长可能有误差

- 测量误差：焦利氏秤没有调平，小镜子和玻璃管之间有摩擦。

在破裂临界点很难准确测定，破裂瞬间三线没有对齐，造成误差。

在测量自配洗洁精的实验中，配制完的洗洁精溶液可能没有达到均一稳定，表面有泡沫影响测量。

• 通过本实验，我掌握了用焦利氏秤测量液体表面张力的实验方法，熟练了最小二乘法，作图法，函数拟合等实验操作。

8 思考题

(1) 焦利氏秤法测定液体的表面张力有什么优点？

1. 使用锥形弹簧，能消除弹簧自重对实验结果的影响，锥形弹簧的劲度系数相对较小，可以测量微小力。
2. 焦利氏秤弹簧下端位置固定，便于通过微调找到拉脱的临界状态。
3. 标尺精确到 0.01 cm，测量精度较高。

(2) 焦利氏秤的弹簧为什么做成锥形？为了消除弹簧自重的影响，使弹簧均匀伸长。

单圈弹簧的劲度系数为 $k = \frac{GR^4}{4r^3}$ ，其中 G 为切变模量， R 为金属丝的半径， r 为弹簧圈的半径。弹簧每一处的伸长量为 $\Delta l = \frac{mg}{k(r)}$ 从上到下质量依次减少，故需要 $K(r)$ 减小， r 逐渐增大。

(3) 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，保持焦利氏秤水平，防止水平镜面升降过程中与玻璃管摩擦。
3. 配制完溶液后，要将液体搅匀。
4. 配制完溶液后，将表面的泡沫舀走，防止泡沫影响表面张力的测量。
5. 缓慢地旋转平台微调螺丝和升降钮，始终保持三线重合。