

物理实验报告



南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

学号: 11910104 姓名: 王奕童 日期: 2020 年 04 月 17 日 星期: 星期五下午

液体表面张力系数的测定

1. 实验目的

学习用提拉法测量液体表面张力系数的原理和方法

2. 实验原理

考虑一根悬挂在弹簧上的金属细丝, 如图 1 所示。先将金属细丝浸没到液体中, 再让液体缓缓下降, 使金属细丝露出液面, 并在其下方提拉出液膜。液面处分子在液体内部分子的吸引力作用下, 有向液体内部移动的倾向, 导致液膜趋于收缩而“绷紧”, 形成表面张力。表面张力 F_s 会传递到金属细丝上, 如图 2 所示。

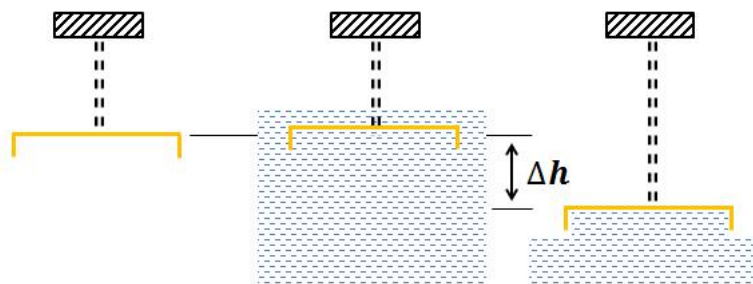


图 1 液膜正面示意图

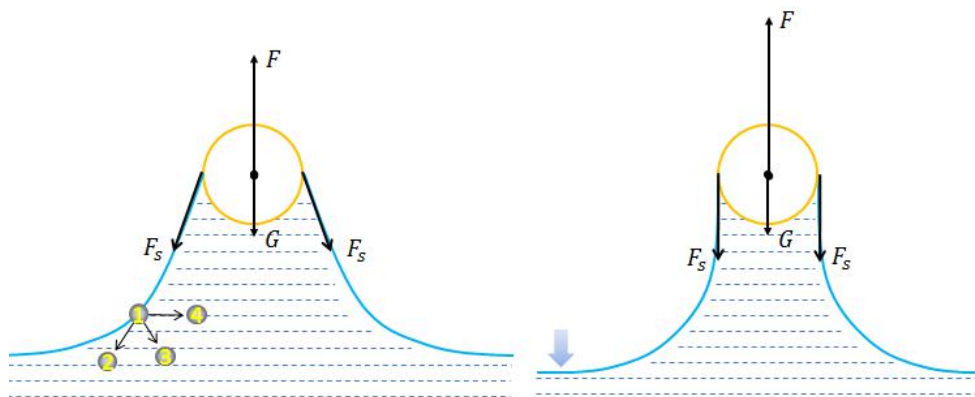


图 2 液膜切面示意图。液面处分子 (圆球 1) 受到液体内部分子 (圆球 2-4) 的吸引力后有

向液体内部移动的倾向，导致液膜收缩而“绷紧”。当液面下降时，液膜收窄，表面张力施加在金属细丝（橙色圆圈）上的竖直分量增加。

随着液面的持续下降，液膜逐渐收窄，表面张力施加在金属细丝上的竖直分量增加，弹簧持续伸长。当液膜临近破裂时，金属细丝受到的表面张力 F_s 与重力 G 和弹簧拉力 F 达到共线。此时，根据力的平衡有

$$2F_s = F - G \quad (1)$$

显然， $2F_s = \Delta hk$ ， k 为弹簧劲度系数， Δh 为弹簧伸长量，如图1所示。另外，由于表面张力与金属细丝两脚间距近乎成正比，据此可定义表面张力系数

$$\sigma = \frac{F_s}{l} \quad (2)$$

其中， l 是金属细丝两脚间距。联立式（1）和（2），可得表面张力系数的计算式

$$\sigma = \frac{\Delta hk}{2l} \quad (3)$$

3.实验器材

铁架台、弹簧、金属细丝、烧杯和游标卡尺等

4.实验步骤

（1）用温度计测量室温，实验开始和结束时各测一次，取平均值 T ；

（2）确定弹簧的劲度系数：

a. 将弹簧上端固定在铁架台上，下端悬挂托盘；

b. 待弹簧静止后，记录弹簧下端位置示数 a_1 。在托盘中加载一块砝码，待弹簧静止后，记录弹簧下端位置示数 a_2 。按类似步骤，依次在托盘中加载第二、三、四和五块砝码，记录弹簧下端位置示数 a_3 、 a_4 、 a_5 和 a_6 ；

c. 在托盘中放入第六块砝码，待弹簧静止后卸载一块砝码；

d. 待弹簧再度静止后，记录弹簧下端位置示数 b_6 。在托盘中卸载一块砝码，待弹簧静止后，记录弹簧下端位置示数 b_5 。按类似步骤，依次在托盘中卸载第二、三、四和五块砝码，记录弹簧下端位置示数 b_4 、 b_3 、 b_2 和 b_1 ；

e. 将相应示数取平均后，作出弹簧拉力增量（以仅悬挂托盘时弹簧中的拉力为参考点）随弹簧下端位置示数变化的散点图。砝码质量均为 0.5 g ，不确定度极小，可以忽略。重力加速度为 9.7883 m/s^2 ，不确定度极小，可以忽略；

f. 拟合弹簧拉力增量—弹簧下端位置示数散点图，确定弹簧劲度系数。

(3) 用提拉法测量自来水的表面张力系数

a. 用游标卡尺测量金属细丝两脚间距 l ；

b. 取下托盘，在弹簧下端挂上金属细丝；

c. 待金属细丝静止后，记录弹簧下端位置示数 h_1 ；

d. 用烧杯取来适量自来水，将金属细丝浸没在水中。让烧杯缓缓下降，使金属细丝露出水面并提拉起水膜；

e. 让烧杯继续缓缓下降，直至水膜破裂。记录水膜第一次破裂瞬间弹簧下端位置示数 h_2 。重复类似步骤，记录水膜第二次和第三次破裂瞬间弹簧下端位置示数。运用三个 h_2 的平均值以及 h_1 ，确定表面张力导致的弹簧伸长量 Δh ；

f. 根据公式 (3) 确定自来水的表面张力系数及不确定度。

5. 实验数据

(1) 实验室温度

实验开始时	实验结束时	平均值
21.0°C (294.15K)	23.2°C (296.35K)	22.1°C (295.25K)

(2) 加载和卸载砝码过程中，弹簧下端位置示数

砝码个数	0	1	2	3	4	5
加载过程弹簧下端	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
位置示数	1.09 cm	3.04 cm	5.01 cm	6.95 cm	8.92 cm	10.85 cm
卸载过程弹簧下端	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6

位置示数	1.05 <i>cm</i>	3.03 <i>cm</i>	4.99 <i>cm</i>	6.97 <i>cm</i>	8.99 <i>cm</i>	10.85 <i>cm</i>
平均值	1.07 <i>cm</i>	3.04 <i>cm</i>	5.00 <i>cm</i>	6.96 <i>cm</i>	8.95 <i>cm</i>	10.85 <i>cm</i>

(3) 金属细丝两脚间距

$l = 4.560\text{cm}$

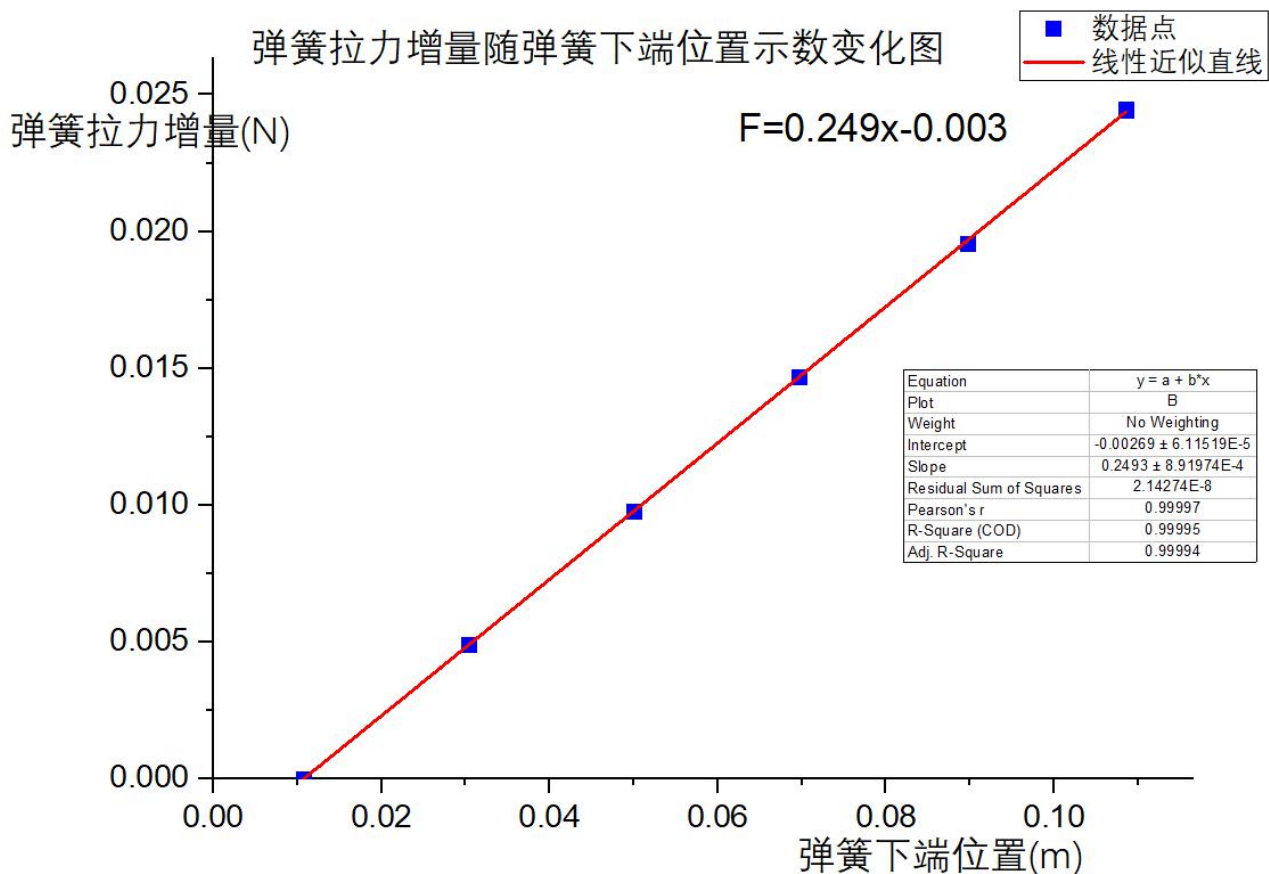
(4) 提拉水膜过程中，弹簧下端位置示数

	第一次提拉	第二次提拉	第三次提拉
h_1	1.02 <i>cm</i>		
h_2	3.48 <i>cm</i>	3.50 <i>cm</i>	3.35 <i>cm</i>
Δh	2.46 <i>cm</i>	2.48 <i>cm</i>	2.33 <i>cm</i>
Δh 平均值	2.42 <i>cm</i>		

6.实验数据处理

(1) 弹簧拉力增量随弹簧下端位置示数变化图（附带拟合结果）

使用 OriginLab 的线性拟合功能，得到弹簧拉力增量随弹簧下端位置的变化图，如下图所示。



由 OriginLab 的线性近似得到 $F = (0.249x - 0.003)N$

(2) 弹簧的劲度系数

由图像的物理意义可知，图像斜率即代表其劲度系数， $k = 0.249 N/m$

(3) 表面张力系数平均值

$$\sigma = \frac{\Delta h \cdot k}{2l} = \frac{(2.42cm) \times (0.249N/m)}{2 \times 4.560 \times 10^{-2}m} = 0.0661N/m$$

(4) 表面张力系数不确定度（弹簧下端位置测量仪器的允差为 0.1 mm，且服从正态分布；

弹簧劲度系数和金属细丝两脚间距的不确定度均可忽略不计）

表面张力系数公式 $\sigma = \frac{\Delta h \cdot k}{2l}$ ，其中 k 为弹簧劲度系数， Δh 为弹簧伸长量， l 是金属细丝两脚间距。在求取不确定度时，弹簧劲度系数和金属细丝两脚间距的不确定度均可忽略不计。

①A 类不确定度计算

(1) 先用 OriginLab 软件计算 Δh 的标准差，如下表所示。

Statistics on Columns (17/04/2020 16:24:53)

Notes							
Input Data							
Descriptive Statistics							
	N total	Mean	Standard Deviation	Sum	Minimum	Median	Maximum
A	3	2.42	0.07937	7.26	2.33	2.45	2.48

得到标准差 $\sigma_N = 0.07937\text{cm} = 0.7937\text{mm}$

(2) 根据 A 类不确定度公式 $u_A = \frac{\sigma_N}{\sqrt{n}}$ 求得 $u_A = 0.04582\text{cm} = 0.4582\text{mm}$

②B 类不确定度计算

弹簧下端位置测量仪器的允差为 0.1 mm，且服从正态分布，故此时置信系数 $c = 3$

$$u_B = \frac{\Delta_{\text{允}}}{c} = \frac{0.1\text{mm}}{3} = 0.0333\text{mm}$$

③标准不确定度合成

$$u(\Delta h) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0.4582\text{mm})^2 + (0.0333\text{mm})^2} = 0.4594\text{mm}$$

根据公式 $\sigma = \frac{\Delta h \cdot k}{2l}$ ，得到

$$u(\sigma) = \frac{k}{2l} \cdot u(\Delta h) = \frac{(0.249\text{N/m}) \times 0.4594\text{mm}}{2 \times 4.560\text{cm}} = 1.254 \times 10^{-3}\text{N/m}$$

④扩展不确定度合成($P = 0.95$)

$$u_{0.95} = \sqrt{(t_{0.95}u_A)^2 + (K_p u_B)^2}$$

在 $n = 3, P = 0.95$ 时， $t_{0.95} = 4.30, K_p = 1.96$ 。

$$u_{0.95} = \sqrt{(t_{0.95}u_A)^2 + (K_p u_B)^2} = \sqrt{(4.30 \times 0.4582\text{mm})^2 + (1.96 \times 0.0333\text{mm})^2} = 1.971\text{mm}$$

根据公式 $\sigma = \frac{\Delta h \cdot k}{2l}$ ，得到

$$u_{0.95}(\sigma) = \frac{k}{2l} \cdot u_{0.95}(\Delta h) = \frac{(0.249\text{N/m}) \times 1.971\text{mm}}{2 \times 4.560\text{cm}} = 0.0054\text{N/m}$$

(5) 表面张力系数测量结果的完整表述 ($\sigma = \bar{\sigma} \pm u, P = 0.95$)

$$\sigma = (0.0661 \pm 0.0054)\text{N/m}, \quad P = 0.95$$

7. 实验结论

本实验通过提拉法，利用铁架台、弹簧、金属细丝、烧杯和游标卡尺等实验仪器对液体的表面张力系数 σ 进行了测量，测量结果为 $\sigma = (0.0661 \pm 0.0054) \text{ N/m}$ ， $P = 0.95$ 。另外，本次实验过程中通过线性拟合得出弹簧的劲度系数 $k = 0.249 \text{ N/m}$ 。

通过本次实验，学习了用提拉法测量液体表面张力系数的原理和方法，掌握了不确定度的合成与传递方法，学习了 OriginLab 软件的线性拟合的数据处理方法。

8. 误差来源分析

①实验过程中烧杯缓缓下降，不完全等同于匀速直线运动，金属细丝受到的合外力有可能不为 0

$$2F_S = F - G \quad (1)$$

因此利用方程（1）来进行实验测量有可能存在误差；

②实验中金属细丝可能会晃动，不一定能始终保持水平状态，有可能金属细丝不能使全长 l 都受到液体表面张力的作用，也有可能使液体发生波动，可能带来实验的误差；

③根据公式（1），在测量过程中吸附起的水膜的重力忽略不计，而实际上该层水膜存在重力 m_0g ，会造成实验中测得表面张力系数偏大；

④液体表面张力系数与温度有关，而实验前后温度有变化，有可能带来误差；

⑤实验过程中液体可能会受到空气的影响（如 CO_2 溶解等等），会使测得的表面张力系数偏小；

⑥方程（1）忽略了实验中浮力对金属细丝的影响，可能会使测得的表面张力系数偏大；

⑦实验过程中水膜并非同时完全断裂，会有一部分水膜在断裂瞬间仍然对金属细丝有表面张力，也有可能带来误差。

9. 思考题

a. 在确定弹簧劲度系数的过程中，先后进行了砝码的加载和卸载操作，然后将相应的弹簧下端位置示数作平均，这样做的好处是什么？

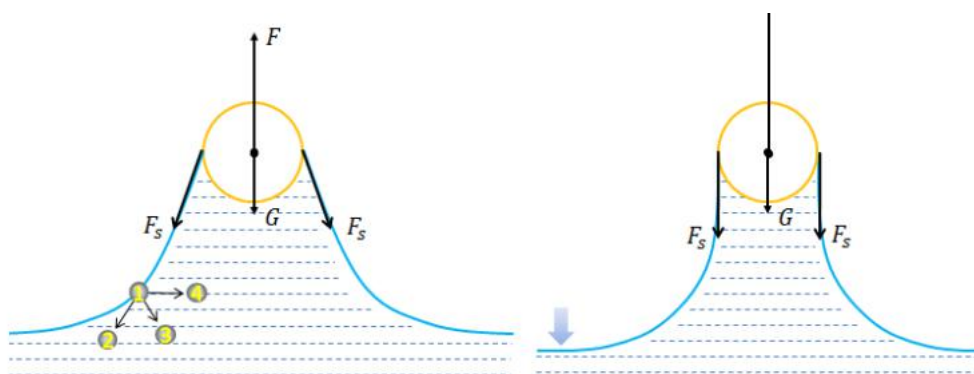
答：本实验中需要用到弹簧，而本实验中弹簧存在弹性滞后现象。在本实验中，弹性滞后对

实验中弹簧劲度系数的测量产生不利影响：如下根据本次实验数据所制得的表所示，若仅使用加载时的弹簧形变量，则测得弹簧形变量偏小，导致测得劲度系数偏大；若仅使用卸载时的弹簧形变量，则测得弹簧形变量偏大，导致测得劲度系数偏小。为减小实验中因弹簧的弹性滞后现象对实验结果带来的误差，故采用先后进行砝码加载和卸载操作再取平均值的方法。取平均值后，形变量与弹簧拉力增量之间关系近似满足一条直线，而该条直线的斜率可以更准确地反映所测弹簧的劲度系数，提高测量的准确性。

两组间砝码个数 i, j	1,2	2,3	3,4	4,5	5,6	平均值
加载形变量 Δa_{ij}	1.95 cm	1.97 cm	1.94 cm	1.99 cm	1.91 cm	1.952 cm
卸载形变量 Δb_{ij}	1.98 cm	1.96 cm	1.98 cm	2.02 cm	1.86 cm	1.960 cm

b. 从微观粒子间吸引力的角度，分析如何挑选适合本实验的金属细丝材质？

答：在本实验中需使本实验中下图所示液膜临近破裂过程在上升过程中保持一段时间，则从微观粒子吸引力的角度来说，需要增加金属细丝与液体的吸引力，则最好选取一些与水浸润程度较好的金属细丝材质，以延长液膜临近破裂这一阶段的时长，从而提高测量的准确度，减小实验中测量表面张力大小的误差。



c. 若更换金属细丝，新的金属细丝材质满足要求，形状与原来一致，但质量加倍，表面张力系数测量结果如何变化？

答：在不考虑材料变化导致材料与水的浸润性的变化的条件下，

在液膜临近破裂时，有表面张力系数的推导过程如下：

$$2F_s = F - G$$

$$\therefore 2F_s = \Delta h k$$

$$\sigma = \frac{F_s}{l}$$

$$\therefore \sigma = \frac{\Delta h k}{2l}$$

在该过程中，表面张力大小反映为此刻弹簧拉力 F 和金属细丝重力 G 的差值，金属细丝的重力 G 被消去了，没有出现在结果中，故金属细丝的质量不对表面张力系数的测量产生影响，因此表面张力系数测量结果不变。

d. 生活经验表明，直接用自来水吹泡泡，泡泡半径较小，但是加入洗衣粉或洗衣液后，泡泡半径较大。从表面张力系数的角度如何解释？

答：洗衣粉或洗衣液主要成分是一种相当大的有机分子，比水分子大许多。加入洗衣粉或洗衣液后表面张力系数增大许多，从而大大增大了表面张力。在气泡能存在的情况下，有公式 $\Delta P = \frac{4\sigma}{R}$ ，其中 ΔP 为内外压强差， σ 为表面张力， R 为泡泡半径。由于水分子自身分子较小，不易抵抗大气压力差，故吹出的水泡泡很容易破碎；加入洗衣粉或洗衣液等后，表面张力增强，水溶液对大气压力差的抵抗能力增强，可以吹起更大的泡泡。