

文章编号:1007-2934(2013)02-0085-03

拉脱法测量液体表面张力系数  $\alpha$  实验误差分析

苏启录

(闽江学院, 福建 福州 350108)

**摘 要:** 在液膜拉脱过程中, 对吊环的受力以及受力的变化情况进行分析, 以便正确测量求得液体表面张力, 减少  $\alpha$  的实验测量误差。

**关 键 词:** 拉脱法; 液体表面张力; 液体表面张力系数; 误差

**中图分类号:** O 241.1

**文献标志码:** A

拉脱法测量液体表面张力系数  $\alpha$  实验原理方法示意如图 1 所示。吊环悬挂于安装有力敏传感器的悬臂梁上, 悬臂梁受力变化由力敏传感器转换为电压变化由毫伏表监测。盛水器皿放在一可上下移动的台面上。实验测量方法是: 先对力敏传感器进行定标, 测量出力敏传感器将力的变化量转换为电压的变化量的灵敏度  $k(\text{mV} \cdot \text{N}^{-1})$ ; 而后测量出水膜拉断前、后毫伏表的电压示值  $V_1(\text{mV})$  和  $V_2(\text{mV})$ , 则液体表面张力系数  $\alpha$  的大小为:

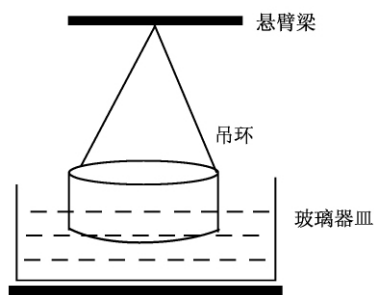


图1 拉脱法实验原理图

$$\alpha = \frac{V_1 - V_2}{k\pi(d_1 + d_2)} \quad (1)$$

其中:  $d_1$  和  $d_2$  分别为吊环的内径与外径。

将(1)式根据液体表面张力系数的定义式  $\alpha = \frac{F}{L}$  进行分解: 液膜张力  $F$  与液膜内总长度  $L$ , 结果如下:

$$F = \frac{V_1 - V_2}{k} \quad (2)$$

$$L = \pi(d_1 + d_2) \quad (3)$$

从学生实验的结果来看, 大部分学生实验测

量出的  $\alpha$  值要大于标准值。说明很可能是实验测量原理方法上存在系统误差。这个系统误差一般而言是来源于对  $F$  的测量求得问题上。

1 张力  $F$  测量误差分析

为了更好地研究实验过程吊环受力变化情况, 本人对原有的实验装置加装一标尺, 使得实验过程吊环的位置变化得以观测, 进而研究吊环受力变化与位置变化之间的关系。

吊环底边沿与水平面接触的临界状态位置定为  $x=0$ , 吊环底边沿浸入水中  $x<0$ , 吊环离开水面  $x>0$ 。一开始让吊环浸入水中一定深度  $x_A(x_A<0)$ , 测量得对应的毫伏表电压示值  $V_A$ , 将安放玻璃器皿的实验平台缓慢下移, 毫伏表电压示值逐渐增大, 当吊环离开水面高度为  $x_C$  时, 毫伏表电压示值达到最大值为  $V_C$ , 随后继续下移实验平台, 毫伏表电压示值逐渐下降, 直至液膜断裂前瞬间电压示值为  $V_D$ , 对应吊环离水面的高度为  $x_D$ , 水膜断裂后电压示值为  $V_E$ 。实验数据如下表:

表1 毫伏表电压示值  $V$  与吊环位置 的关系数据

位置	$x/\text{mm}$	$V/\text{mm}$	$\bar{V}/\text{mV}$
A	-1.5	67.0 67.1 67.1 67.0	66.9
B	1.5	88.7 88.5 89.2 89.3	88.9
C	3.0	93.7 93.6 93.7 93.8	93.7
D	4.0	89.2 89.0 89.3 89.3	89.2
E	$\geq 4.0$	68.2 68.2 68.2 68.2	68.2

由表1数据作毫伏表电压示值  $V$  与吊环位置

收稿日期: 2012-07-28

$x$  的关系图线如图 2 所示。

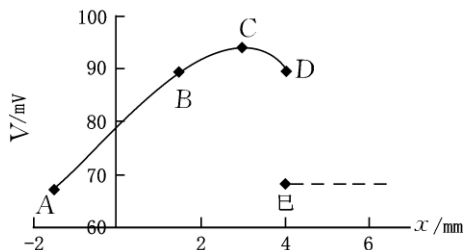


图 2  $V-x$  关系图

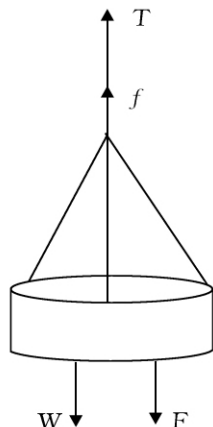


图 3 吊环受力示意图

吊环受力如图 3 所示。吊环受力平衡,应有:  $T = W + F - f$ , 吊环对悬臂梁的拉力  $T'$  的大小为  $T' = T = W + F - f$ , 即:

$$T' = W + F - f$$

$$T' = W_{\text{环}} + W_{\text{膜}} + F - f \quad (4)$$

式中:  $W_{\text{环}}$  为吊环重力,  $W_{\text{膜}}$  为吊环拉起的液膜的重力,  $F$  为液体表面张力,  $f$  为浮力。

吊环所处位置不同受力情况也不同, 讨论如下:

对于位置 A, 吊环尚未拉起液膜, 有:

$$T'_A = W_{\text{环}} - f_A \quad (5)$$

对于位置 B、C、D, 吊环底边沿已经高出水平面, 所受浮力皆为零, 故有:

$$T'_B = W_{\text{环}} + W_{\text{膜B}} + F_B \quad (6)$$

$$T'_C = W_{\text{环}} + W_{\text{膜C}} + F_C \quad (7)$$

$$T'_D = W_{\text{环}} + W_{\text{膜D}} + F_D \quad (8)$$

对于位置 E, 吊环不受浮力作用, 同时液膜已断裂脱离, 故有:

$$T'_E = W_{\text{环}} \quad (9)$$

力敏传感器将悬臂梁所受拉力的变化量转换为毫伏表电压示值的变化量的灵敏度为  $K$ , 即:

$$\Delta V = k \Delta T'$$

$$V - V_0 = k(T' - T'_0)$$

$$V = kT' + V_0 - kT'_0$$

$$T' = \frac{1}{k}V + C \quad (10)$$

$$\text{式中: } C = T'_0 - \frac{1}{k}V_0$$

由(6)、(7)、(8)、(9) 式可得:

$$\frac{V_B}{k} = W_{\text{环}} + W_{\text{膜B}} + F_B - C \quad (11)$$

$$\frac{V_C}{k} = W_{\text{环}} + W_{\text{膜C}} + F_C - C \quad (12)$$

$$\frac{V_D}{k} = W_{\text{环}} + W_{\text{膜D}} + F_D - C \quad (13)$$

$$\frac{V_E}{k} = W_{\text{环}} - C \quad (14)$$

在吊环高出水平面, 水膜越拉越薄也越长的过程中, 水膜的水量也越拉越少, 即有  $W_{\text{膜B}} > W_{\text{膜C}} > W_{\text{膜D}}$ , 又由表 1 (或图 1) 可见有  $V_C > V_D > V_B$ , 结合(11)、(12) 两式可判断  $F_C > F_B$ , 至于  $F_C$  和  $F_D$  的大小关系还不能判定, 不过根据分析可知: 从 B、C 到 D 的过程中张力  $F$  不是一个恒定值。那么应该取哪个位置的张力计算液体表面张力系数较为合理呢? 实际教学实践中, 发现有不少学生存在是选择 C 位置还是选择 D 位置的困惑与争议。

在忽略液膜重力影响的情况下, 分别取 C 和 D 位置计算  $F$  和  $\alpha$ 。

力敏传感器的定标实验数据见表 2。

表 2 力传感器定标实验数据

$m/g$	$P/N$	$V/mV$	$m/g$	$P/N$	$V/mV$
1.0	0.009 8	20.7	5.0	0.049 0	72.2
2.0	0.019 6	33.6	6.0	0.058 8	85.1
3.0	0.029 4	46.4	7.0	0.068 6	98.0
4.0	0.039 2	59.3	8.0	0.078 4	110.9

根据表 2 数据用逐差法求得灵敏度为:

$$k = 12.9 (\text{mV} \cdot \text{g}^{-1}) = 1.32 \times 10^3 (\text{mV} \cdot \text{N}^{-1})$$

由 C 位置计算  $\alpha_C$ 。由(12)、(14) 得

$$\alpha_C = \frac{F_C}{L} = \frac{V_C - V_E - kW_{\text{膜C}}}{k\pi(d_1 + d_2)}, \text{忽略 } W_{\text{膜C}}, \text{ 可得:}$$

$$\begin{aligned} \alpha_C &= \frac{V_C - V_E}{k\pi(d_1 + d_2)} \\ &= \frac{93.7 - 68.2}{1.32 \times 10^3 \times 3.14(3.26 + 3.5) \times 10^{-2}} \\ &= 91.01 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \end{aligned}$$

实验室温度  $30^\circ\text{C}$ , 水表面张力系数的标准值为:

$$\alpha_0 = 71.18 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

相对百分误差为:

$$E_C = \frac{|\alpha_0 - \alpha_C|}{\alpha_0} \times 100\% = 27.8\%$$

同理,忽略  $W_{\text{膜D}}$ ,由  $D$  位置计算得:

$$\alpha_D = 74.95 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}。$$

相对百分误差为:

$$E_D = \frac{|\alpha_0 - \alpha_D|}{\alpha_0} \times 100\% = 5.3\%$$

显然选择  $D$  位置计算  $\alpha$  结果更准确。

选择  $C$  位置计算  $\alpha$  相对不准确的原因是什么?是因为忽略了更大的液膜重力吗?显然不是,因为在  $A$  到  $C$  的过程中,还能找到根据(1)式计算出更加准确的  $\alpha$  值的位置,而对应的液膜重力相比  $C$  位置应该更大。可见:在  $\alpha$  的测量求得过程中,不仅要考虑液膜重力相比张力是否可忽略,还要考虑张力本身的科学性。在吊环拉起液膜,随着吊环的缓慢拉高液膜越绷越紧,直至绷裂。绷裂前那一瞬间的张力达到最大,这最大张力就是所要求得的液体表面张力。所以,在肯定液膜同是完整的情况下,选择  $D$  位置计算  $\alpha$  显然是比较科学且正确的。

将选择  $D$  位置测量计算出的  $\alpha_D$  与标准值  $\alpha_0$  比较,将误差归结为液膜重力  $W_{\text{膜D}}$ ,看液膜厚度大小。

$$\begin{aligned} W_{\text{膜D}} &= \pi(d_1 + d_2)(\alpha_D - \alpha_0) \\ &= 3.14(0.0326 + 0.035)(0.07495 - 0.07118) \\ &= 8.0 \times 10^{-4} \text{ N} \end{aligned}$$

内、外环形液膜厚度大约相同为  $h_D$ ,则有:

$$\pi(d_1 + d_2)x_D h_D \rho_0 g = W_{\text{膜D}} \quad (15)$$

由表 1 知  $x_D = 0.40 \text{ cm}$ ,将有关物理量的数值代人(15)、(16)可得:

$$h_D = 0.096 \text{ mm} \approx 0.1 \text{ mm}$$

水分子的直径大约为  $2 \times 10^{-9} \text{ m}$ 。说明液膜的拉薄还有很大的余地。

## 2 结 论

拉脱法测量液体表面张力系数,其中张力的测量与求得是实验的关键点。造成张力测量误差的主要原因有:位置选择不对,如合力极大的位置代替张力最大的位置;虽然位置选择正确,但由于实验操作不规范不细心,液膜过早或不完整拉断。

参考文献:

- [1] 陈洪叶,曹学.拉脱法测液体  $\alpha$  的数据处理探讨[J].山东农业大学学报:自然科学版,2002(2).
- [2] 王桂莲,盖立平,柴英,陈艳霞.液体表面张力系数测量与实验现象讨论[J].实验科学,2009(5).
- [3] 方涌.液体表面张力系数及其试验方法的探讨[J].中国科教创新导刊,2007(18).
- [4] 许森东,胡炜,李祖樟,冯元新.拉脱法测液体表面张力系数公式及其简化对实验结果影响的分析[J].河北北方学院学报:自然科学版,2007,5.
- [5] 赵文丽,高峰,曹学成,等.基于力敏传感器测量液体表面张力系数的不确定度评估[J].大学物理实验,2012(1).

## The Analysis of Experimental Errors about Liquid Surface Tension Coefficient $\alpha$ by the Measurement of Pull-off Method

SU Qi-lu

(Minjiang University, Fujian Fuzhou 350108)

**Abstract:** The paper aims to analyze the forces of the rings as well as their changes in the process of liquid membrane pulling off so as to obtain an accurate measurement of the liquid surface tension and reduce the experimental measurement errors of  $\alpha$ .

**Key words:** pull-off method; liquid surface tension; liquid surface tension coefficient; errors