

液体表面张力测定(拉脱法)的误差分析与修正*

王祥委 段娟娟 彭朝阳

(云南师范大学物理与电子信息学院 云南 昆明 650500)

(收稿日期:2016-05-02)

摘要:拉脱法是测量液体表面张力最常见的一种方法,此方法具有现象直观,实验原理易被学生接受,仪器简单等优点.但在大学物理实验教学中忽略金属丝框所受的浮力和水膜所受的重力对测量公式进行了简化,给测定结果带来了误差.从误差分析的角度对拉脱法测定液体表面张力系数公式进行了分析与修正,得出了相关结论.

关键词:表面张力 拉脱法 误差分析 修正

1 表面张力概述

液体表面张力是液体由于表面层的分子受力不平衡而产生的沿表面切线方向的相互作用力,表面张力分为静态表面张力和动态表面张力.通常自液体表面形成之后,随着时间的推移液体表面张力也有所变化.在新的液体表面形成的瞬间,表面张力经过约1 s以上时,称静态表面张力;在1 s以下时,称动态表面张力^[1].由于液面上方为气相层,单位体积内分子数较少,所以受到向上的引力比向下的引力要小,使其产生一个垂直于液面并指向液体内部的力,即表面分子有从液面插入液体内部的倾向使液面具有收缩的趋势.如落在树叶上的水珠、撒在桌面或者玻璃上的水银珠等呈球状,就是由于表面张力使其表面收缩而成的.

2 几种液体表面张力测定方法的优缺点

液体表面张力的测定方法包括拉脱法、毛细管法、Wilhelmy盘法、悬滴法等,其中毛细管法是直接测定表面张力的最为准确的方法,也是常用方法之一.此方法不仅理论完整,而且实验条件可以严格控制,但仍然存在缺点. Sugden于1921年提出差分毛细管上升法^[2]. Wilhelmy在1863年提出了Wilhelmy

盘法,此方法操作方便,设备简单,直观可靠,不需要密度数据,既可以测定气-液表面张力,也可以测定液-液界面张力^[3]. Dognon和Arbribut将其做了进一步的改进^[4],提出了悬滴法,其优点在于不仅对样品的湿润性无严格要求,不受接触角的影响,而且测定范围广(能测定液体静态,也能测定液体动态表面张力),它是一种液体用量少而且应用广泛的方法.此方法测定的关键在于获取悬滴的几何图形,所以必须精选垫片的材质和严格控制垫片的水平位置.另外,还要选用合适的镜头,排除光学上的干扰,选择细粒乳胶底片保证液滴影像的真实性.近年来,出现了用双坐标读数显微镜和X光照相技术替代传统光学照相的实例,克服了许多光学干扰因素,较大提高了悬滴法照片的清晰度以及保真度,从而提高测量精度^[5].拉脱法是大学中最常用的方法,跟其他几种方法相比,此方法设备简单,更容易被学生接受.

3 实验原理

3.1 简化后测表面张力系数

如图1所示,将一宽为 l 的金属丝框浸入水中后再慢慢地将其拉出水面,在该金属丝框表面将会带起一层水膜,当水膜将要被拉直的时候,则有

* 本文获云南省高校高能天体物理重点实验室资助.

作者简介:王祥委(1990-),男,在读硕士研究生,研究方向物理学科教学.

通讯作者:彭朝阳(1971-),男,博士,教授,研究方向物理课程教学.

$$F = W + 2\gamma l + ldh\rho g \quad (1)$$

式中 F 为向上的拉力, W 是金属丝框框所受到的重力和浮力之差, d 为细金属丝的直径(也就是水膜的厚度), h 为水膜刚被拉断前的高度, ρ 为水的密度, g 为重力加速度. $ldh\rho g$ 为水膜的重量, 其数值很小可以忽略. 式中比例系数 γ 为液体表面张力系数. 它表示沿着液体表面作用在单位长度上的表面张力的. 因为水膜有前后两个面, 所以上式中表面张力为 $2\gamma l$, 那么由式(1) 变形可得

$$\gamma = \frac{(F - W)}{2l} \quad (2)$$

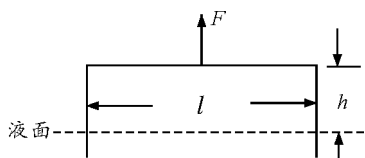


图1 实验原理图

本实验用焦利秤测量 $(F - W)$ 之值, 即可计算表面张力系数 γ 之值.

3.2 表面张力系数的分析与修正

3.2.1 表面张力的修正

如图2所示, 对液体表面张力而言, 其大小与其作用的接触面的周长 $2(l + d)$ 成正比^[6], 所以表面张力应为

$$f = 2\gamma(l + d)\cos\varphi$$

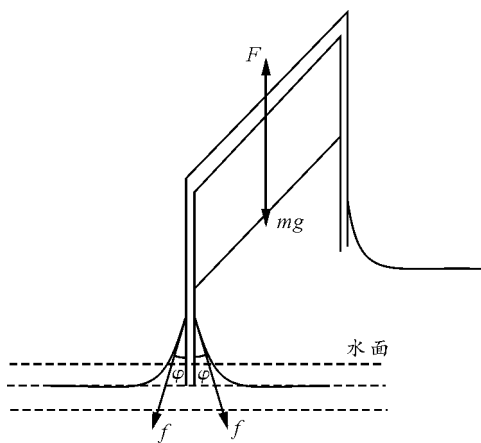


图2 表面张力示意图

当水膜被慢慢拉起的时候, 金属丝框所受拉力与被拉起部分液体的重量及表面张力平衡, 但表面张力的方向在不断改变^[7], 当 φ 角趋于零时, $\cos\varphi = 1$.

3.2.2 金属丝框所受浮力的分析

对金属丝框所受的浮力而言, 如图3所示, 当金

属丝框上表面与液面相平时, 金属丝框所受的浮力应为

$$F'_1 = \frac{1}{4}\pi d^2(l + 2l_0)\rho g \quad (3)$$

式中 l 为金属丝框的宽度, l_0 为浸在水中部分金属丝的长度.

如图4所示, 当水膜即将破裂时, 金属丝框所受的浮力应为

$$F'_2 = \frac{1}{2}\pi d^2(l_0 - h)\rho g \quad (4)$$

式中 h 为水膜的高度.

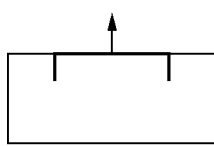


图3 金属丝框贴紧水面图

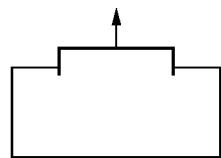


图4 拉脱水面图

当金属丝框上表面与液面相平时, 诸力的平衡条件为

$$F_1 + F'_1 = mg \quad (5)$$

式中 F_1 为向上的拉力, F'_1 为此时金属丝框所受到的浮力, mg 为框的重力.

当水膜即将破裂时, 诸力的平衡条件为

$$F_2 + F'_2 = mg + f + ldh\rho g \quad (6)$$

式中 F_2 为向上的拉力, F'_2 为此时金属丝框受到的浮力, $ldh\rho g$ 水膜的重力, f 为表面张力.

由式(5)、(6) 得

$$F_2 - F_1 = f + \frac{1}{4}\pi d^2(2h + l)\rho g + ldh\rho g \quad (7)$$

3.2.3 水膜重量的修正

在实际测量时, 水膜的宽度并不等于金属丝的直径 d . 液膜厚度是一个较难确定的量, 但如果用金属丝直径代替液膜厚度来计算表面张力系数则显然是错误的, 除非金属丝直径非常小^[8]. 为做精密测量, 水膜的厚度为 d' , 取 d' 为 10^{-5} m^[9], 所以修正后的水膜重量为 $ld'h\rho g$. 对式(7) 变形可得表面张力系数 γ 为

$$\gamma = \frac{(F_2 - F_1) - \frac{1}{4}\pi d^2(2h + l)\rho g - ld'h\rho g}{2(l + d)} \quad (8)$$

4 实验方法及内容

4.1 测量弹簧的劲度系数 κ

图5所示为此实验的实验装置图,焦利秤是一个精细的弹簧测力计,常常用来测量一些微小的力,将一塔形弹簧S竖直悬挂在焦利秤上的金属杆A的横梁上,随后调节支架的底脚螺旋I,使镜面C竖直穿过支架上的玻璃管D的中心,这时塔形弹簧S将与金属杆A相互平行^[10].

在秤盘M上加1.00 g砝码,旋转螺旋G使弹簧上升,至玻璃管D上的横线、横线的像及镜面C的标线三者相重合时为止(以下称三者相重合时为“三线合一”).从金属杆A上的游标读出标尺之值L,以后每次加1.00 g砝码测一次L,直至加到6.00 g后再依次减下来.将测量的数据按所加砝码的多少分组,用逐差法处理数据求出弹簧的伸长量,再由胡克定律求出弹簧的劲度系数 κ 之值.

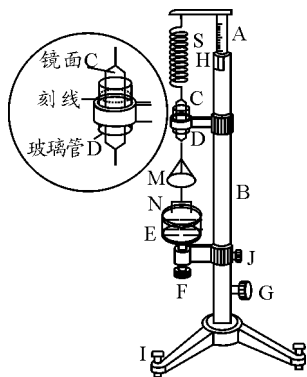


图5 实验装置图

4.2 测量 $(F_2 - F_1)$ 和 h

将盛有水的烧杯放在平台E上,使金属丝框完全浸入水中,旋转螺母F缓慢调节平台H的上下位置,再配合调节螺旋G,使得“三线合一”,并选定参考点.继续用一只手缓慢调节螺旋G使弹簧继续向上伸长,另一只手则慢慢旋转螺母F使烧杯下降,在该过程中始终要保持C处于“三线合一”.当金属丝框的上沿部分刚好到达水面时,用游标卡尺记录下旋钮F的位置 s_1 .继续转动螺旋G和螺母F,直到水膜刚好破裂为止,记录下金属杆A上的刻度值为 L_0 和旋钮F的位置 s_2 .

将金属丝框上的小水珠用纸拭去后,继续转动螺母F使金属丝框慢慢下降,直至C再次回到“三线合一”的状态,读出金属杆A之值为 L_1 ,则有

$$F_2 - F_1 = \kappa |L_1 - L_0|$$

测量中,对应 s_1 和 s_2 之差,即为水膜拉断时的高度 h ,即 $h = |s_2 - s_1|$.重复上述步骤测量5次,并取平均值^[6].

4.3 对金属丝框的测量和数据处理

用游标卡尺和螺旋测微计分别测出金属丝框的宽度 l 和细金属丝直径 d ,并记录数据.由公式计算出水的表面张力系数 γ ,再比较忽略水膜的重量,忽略金属丝框所受到的浮力对实验结果的影响.

5 实验数据及结果

20 °C 温度下,纯水的表面张力系数标准值 $\gamma = 7.275 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ ^[9].金属丝框宽 $l = 4.158 \times 10^{-2} \text{ m}$,金属丝直径 $d = 0.0268 \times 10^{-2} \text{ m}$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$.

5.1 弹簧的劲度系数 κ 的测定

表1 测定弹簧劲度系数数据记录

砝码质量 m/g	增重位置 $L/(\times 10^{-2} \text{ m})$	减重位置 $L/(\times 10^{-2} \text{ m})$	平均位置 $L/(\times 10^{-2} \text{ m})$
1.00	3.94	4.02	3.98
2.00	5.36	5.42	5.39
3.00	6.79	6.88	6.835
4.00	8.21	8.26	8.235
5.00	9.63	9.67	9.65
6.00	11.10	11.10	11.10

表2 用逐差法求得弹簧劲度系数

$\Delta L = (L_{k+2} - L_k)/(\times 10^{-2} \text{ m})$	$\kappa = \frac{2 \times 10^{-3} \times 9.8}{\Delta L} \text{ N/}$ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
2.855	0.687
2.845	0.689
2.815	0.696
2.865	0.684

由上表数据对弹簧劲度系数取平均值 $\kappa =$

0.689 N/m.

5.2 测量 L_1 和 L_0 与水膜的高度 s_1 和 s_2

表3 测定水膜破裂前、后弹簧伸长量数据记录

水膜破裂时位置 $L_0 / (\times 10^{-2} \text{ m})$	水膜破裂前位置 $L_1 / (\times 10^{-2} \text{ m})$	伸长量 $ L_1 - L_0 /$ $(\times 10^{-2} \text{ m})$
3.41	2.50	0.91
3.43	2.52	0.91
3.41	2.48	0.93
3.41	2.50	0.91
3.40	2.50	0.90

表4 测定水膜高度数据记录

刚到水面时位置 $s_1 / (\times 10^{-3} \text{ m})$	水膜破裂时位置 $s_2 / (\times 10^{-3} \text{ m})$	水膜高度 $h / (\times 10^{-3} \text{ m})$
12.00	16.80	4.80
11.80	16.00	4.20
12.00	16.78	4.78
12.00	16.76	4.76
12.00	16.80	4.80

将上表数据取平均值后代入修正后的式(8)中

得

$$\gamma = \frac{(F_2 - F_1) - \frac{1}{4}\pi d^2(2h + l)\rho g - ld'h\rho g}{2(l + d)} = 7.356 \times 10^{-2} \text{ N/m}$$

相对误差

$$\Delta\gamma = \frac{|\gamma_{\text{测}} - \gamma_{\text{理}}|}{\gamma_{\text{理}}} \times 100\% = 1.18\%$$

如果忽略金属丝框所受的浮力,则液体表面张力系数

$$\gamma = \frac{(F_2 - F_1) - ld'h\rho g}{2(l + d)} = 7.512 \times 10^{-2} \text{ N/m}$$

相对误差

$$\Delta\gamma = 3.26\%$$

由于金属丝的直径 d 很小,如果忽略水膜的重力,则液体表面张力系数

$$\gamma = \frac{(F_2 - F_1) - \frac{1}{4}\pi d^2(2h + l)\rho g}{2(l + d)} = 7.391 \times 10^{-2} \text{ N/m}$$

相对误差

$$\Delta\gamma = 1.59\%$$

6 结论与误差分析

本实验的操作关键在玻璃管的横线、横线的像及镜面标线三者相重(三线合一),但焦利秤采用的是用弹簧测拉力,在操作过程中,弹簧会上下、左右摆动,很容易使水膜过早破裂,因此在实验中动作一定要缓慢。

无论是忽略金属丝框的浮力还是忽略水膜的重力,都会给测量结果引入误差,前一项对测量结果影响较大,后一项对测量结果影响较小,因此对液体表面张力系数的修正是十分重要的。

本实验的主要误差来源:(1)由于做实验时,采用的是自来水而不是纯水,含有少量杂质。(2)在测量时未考虑水膜的边角,认为 $\varphi = 0$ 。但实际测量过程中 $\varphi \neq 0$, $\cos \varphi < 1$ 。(3)在操作过程中由于向上调节弹簧使得弹簧会上下晃动或者操作过急都会使水膜过早破裂,影响测量。(4)由于金属丝框是自制的,挂点两侧分布不对称,使金属丝框上沿各部分不能同时到达水面,在拉液膜时易呈歪斜状态,同样影响测量。

参考文献

- 尹东霞,马沛生,夏淑倩.液体表面张力测定方法的研究进展.科技通报,2007(3):425~428
- Sugden S. The determination of surface tension from the rise in capillary tubes. Chem Soc, 1921(2): 148~149
- 奚新国.表面张力测定方法的现状与进展.盐城工学院学报(自然科学版),2008(3):2~3
- 于军胜,唐季安.表(界)面张力测定方法的进展.化学通报,1997(11):11~15
- 李大勇,石德全,李峰,等.液态合金表面张力检测技术研究与应用进展.铸造,2004(1):12~17
- 王廷兴,郭山河,文立军.大学物理实验(上册,理工基础部分).北京:高等教育出版社,2003.126~127
- 祝桂芝,卢湛铨.用拉脱法测定液体表面张力系数实验中被忽略是一种错误.物理实验,1989(4):148
- 魏杰,张拥军,李超.一种测量液膜高度的方法.大学物理,2005(1):34
- 许森东,胡炜,李祖樟,等.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.河北北方学院学报(自然科学版),2007(5):7~8
- 梁兵.拉脱法测定液体表面张力系数实验原理的改进.百色学院学报,2011(3):81~83