

肥皂泡的光学和力学性质

冷文秀^a, 胡家晨^b, 张鑫杰^c, 高健祎^c, 钟寿仙^a

(中国石油大学(北京) a. 理学院;

b. 化学工程学院; c. 石油工程学院, 北京 102249)

摘 要:从光学、力学、热学角度对肥皂泡的基本物理性质进行了实验研究,应用光学干涉原理实现对肥皂泡折射率及厚度较精确测量,并利用受力平衡原理求体积一定的肥皂泡的质量,再利用拉脱法测量肥皂液表面张力系数,进而研究肥皂泡表面自由能和内外压强差等。

关键词:肥皂泡;折射率;厚度;质量;表面张力;表面自由能

中图分类号: O313; O435

文献标识码: A

文章编号: 1005-4642(2013)02-0029-05

1 引 言

肥皂泡是由肥皂液形成的带彩虹表面的空心球体薄膜,它的厚度一般在 μm 量级,且肥皂泡的存在时间通常很短,测量肥皂泡厚度对仪器的要求很高. 肥皂泡的物理变化涉及表面张力、表面内外压强差等多个方面,对于其热学性质的探究也很有价值. 早期对肥皂泡有过详细研究的科学家主要有3位,分别是比利时科学家 Joseph Plateau, 英国科学家 Rayleigh 和 C. V. Boys. 过去人们对肥皂泡的性质只有零零散散的研究. 相对来说,英国科学家 C. V. 波易斯的著作《肥皂泡和形成它们的力》^[1]、日本科学家长谷川治的著作《小小肥皂泡也有大学问》^[2]、中国科学家欧阳钟灿和刘寄星合作的“从肥皂泡到液晶生物膜”^[3]课题,以及吕梦雅等人对肥皂泡颜色形状及其在风场中运动的真实模拟^[4],对肥皂泡某些特性做了比较完整的研究. 近年来,肥皂泡又有了新的用途,科学家们开始研究肥皂泡结构的保温效果,希望可以运用于农作物的防寒. 建筑师也对肥皂泡产生了极大的兴趣,中国国家游泳馆就是肥皂泡运用的一个杰作^[5]. 但是世界各国对肥皂泡的深入研究才刚刚开始,这块研究领域还有许多空白. 总之,对肥皂泡性质的研究涉及物理、化学、生物、数学等多门学科,近年来世界各国都兴起了对肥皂泡的研究热潮. 本实验中以肥皂泡为研究对象,系统地测量其体积、厚度、质量、表面自由能和内

外压强差等物理量.

2 实验原理与实验装置

实验时用 100 mL 注射器吸入足量空气,蘸取少量肥皂液(实验所用肥皂液的体积配方为 20% 洗涤剂,60% 水和 20% 甘油),缓缓推动注射器,形成肥皂泡,当停止推入空气时,记录注射器内的体积变化,迅速提起注射器,肥皂泡即与注射器脱离,就制造出了体积已知的肥皂泡. 注射器内的体积变化量就是肥皂泡内的气体的体积,本实验中用注射器制造出体积为 100 mL 的肥皂泡来进行实验.

2.1 用肥皂液薄膜劈尖(激光光源)测量肥皂液折射率

用一定厚度的塑料薄片夹在 2 块相叠的光学平玻璃板之间,在底板滴入少许的待测肥皂液,轻轻盖上上层玻璃板(要注意防止肥皂液溢出或流到薄片处),形成空气-肥皂液薄膜劈尖,如图 1(a)所示. 当单色光(波长 $\lambda=632.8\text{ nm}$ 激光光源)垂直照射时,在薄膜上下表面反射的 2 束光发生干涉,形成等间距明暗相间的条纹,如图 1(b)所示. 通过测量空气薄膜和肥皂液薄膜产生的干涉条纹间距之比,来计算肥皂液薄膜的折射率. 根据干涉原理,2 个相邻的明条纹或暗条纹之间的条纹间距为

$$l = \lambda / (2n \sin \theta), \quad (1)$$

其中, λ 为光波波长, θ 为劈尖夹角, n 为介质折射

收稿日期:2012-04-27;修改日期:2012-06-21

基金项目:中国石油大学(北京)基本科研基金资助项目(No. KYJJ2012-06-27)

作者简介:冷文秀(1976—),女,辽宁丹东人,中国石油大学(北京)理学院讲师,博士,主要从事合金析出强化研究.

率. 分别用显微镜观察空气薄膜和肥皂液薄膜的干涉条纹, 记录 25 条暗纹间距. 根据(1)式得出

$$L_1/L_2 = n_2/n_1, \quad (2)$$

其中, L_1 为空气薄膜 25 条暗纹间距, L_2 为肥皂液薄膜 25 条暗纹间距, n_1 为空气折射率 ($n_1 = 1$), n_2 为肥皂液折射率, 则可求出

$$n_2 = L_1/L_2. \quad (3)$$

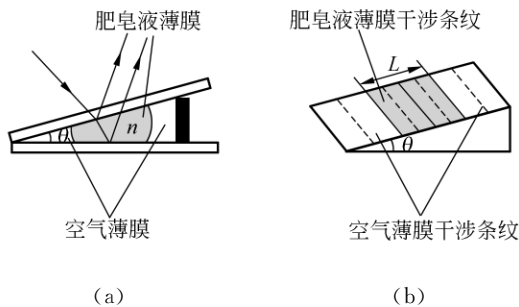


图1 劈尖测量折射率实验示意图

2.2 用迈克耳孙干涉仪测量肥皂泡的厚度

用迈克耳孙干涉仪分振幅法来测量肥皂泡的厚度. 将肥皂泡置于图2中的(1)光路中, 当光通过肥皂泡的中心时, 光垂直入射皂泡膜, 则(1)和(2)光路光程差的变化为

$$\Delta\delta = 4(n-1)d = N\lambda, \quad (4)$$

其中, n 为肥皂泡的折射率(肥皂泡表面的肥皂液在实验时间较短的范围内挥发较小, 可以近似认为 n 等于肥皂液的折射率), N 为明圆环吞吐个数, λ 为实验中迈克耳孙干涉仪的激光光源的波长 632.8 nm , d 就是所求的肥皂泡的厚度, 通过观察放入肥皂泡前后屏幕上明圆环吞吐个数, 可以计算肥皂泡厚度.

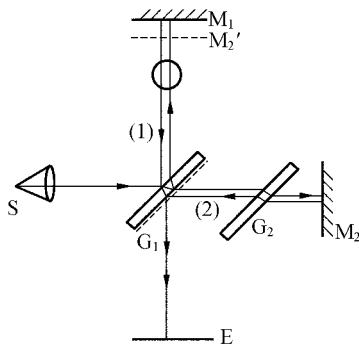


图2 迈克耳孙干涉仪的光路图

2.3 受力平衡法测量肥皂泡的质量

为了防止空气对流对肥皂泡的运动产生影

响, 让肥皂泡在透明圆筒中运动, 透明圆筒高度 2.000 m , 直径 0.800 m , 如图3所示. 当肥皂泡在透明圆筒中匀速下落时, 它受到 3 个竖直方向的力: 肥皂泡的重力 mg (m 为内含空气的肥皂泡质量), 空气作用于肥皂泡的浮力 $\rho g V$ (ρ 为空气密度, V 是肥皂泡体积, g 为当地的重力加速度) 和黏滞阻力 f (其方向与肥皂泡运动方向相反). 如果考虑肥皂泡下落路径无限深广, 在肥皂泡下落速度较小时, 满足斯托克斯公式^[6], 即

$$f = 6\pi\eta Rv, \quad (5)$$

其中, R 为肥皂泡的半径, η 为空气黏度, v 是肥皂泡的匀速运动速度. 肥皂泡开始下落时, 由于速度尚小, 所以阻力也不大, 但随着下落速度的增大, 阻力也随之增大. 最后 3 个力达到平衡, 满足

$$mg = \rho g V + 6\pi\eta Rv, \quad (6)$$

得

$$m = \rho V + \frac{6\pi\eta Rv}{g}. \quad (7)$$

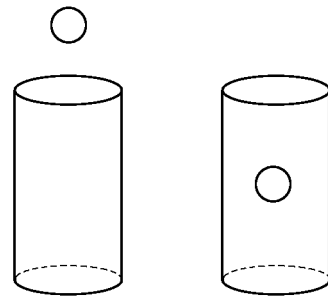


图3 肥皂泡下落示意图

2.4 拉脱法测定肥皂液的表面张力系数, 研究肥皂泡表面张力、表面自由能和内外压强差

用拉脱法测量肥皂液表面张力系数^[7], 如图

4所示, 金属片脱离前满足

$$F = mg + f \cos \varphi, \quad (8)$$

其中, F 为向上的拉力, mg 为金属片的重力(黏附在金属片上的肥皂液重力远远小于金属片重力, 可忽略), f 为由于液面收缩而产生的沿切线方向的表面张力, φ 为接触角^[8], 又有

$$f = \alpha\pi(D_1 + D_2), \quad (9)$$

其中, D_1 和 D_2 分别为圆环外径和内径; α 为液体表面张力系数, 其值与液体的种类、纯度、温度和它上方的气体成分有关系. 慢慢提起金属环, $\varphi \rightarrow 0$, 则有

$$F = mg + f. \quad (10)$$

金属环从肥皂液中提起时,由于表面张力作用,一部分液体被金属环带起,形成肥皂膜.当施加外力 $F > mg + f$ 时,液体薄膜破裂,金属环脱出液面.只要测出薄膜脱出金属环瞬间的外力 F 和金属环重力 mg 的差值 f 及 D_1 和 D_2 就可以计算出表面张力系数 α .

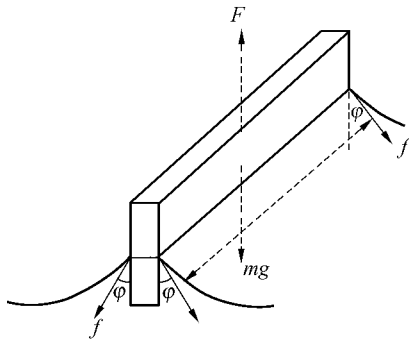


图 4 拉脱法原理等效示意图

然后,利用已知公式求半径 R 已知的肥皂泡表面张力^[9]

$$f = \alpha(2 \times 2\pi R) . \quad (11)$$

此外,还有如下原理:当肥皂膜的一端在力 F 作用下移动(肥皂膜沿金属丝框被拉伸过程),沿 x 方向移动了 dx 的距离,当它匀速运动时,拉力 F 与肥皂膜的表面所产生的张力大小相等,方向相反. α 表示单位长度表面张力数值.肥皂膜拉伸 dx 的距离所做的功 W ^[10] 为

$$W = \alpha dx ,$$

或

$$W = \alpha dA , \quad (12)$$

其中, dA 为 l 与 dx 乘积,即肥皂膜表面积的变化, α 数值上也等于单位面积的能量(表面自由能).

利用杨氏-拉普拉斯公式即可求已知半径的肥皂泡的内外压强差^[11-12]

$$\Delta p = 4\alpha/R . \quad (13)$$

此压强差远远小于标准大气压.

3 实验方法与实验结果

3.1 肥皂液的折射率

实验的具体方法是:

1) 打开光源,预热几分钟后,将扩束器置于光

源和显微镜之间,使激光光束直射到显微镜半反射镜上.

2) 将空气-肥皂液薄膜劈尖置于显微镜载物台上,使光束垂直入射劈尖.

3) 调节目镜看清分划板上的十字叉丝刻线,旋转调焦手轮,使物镜由下向上调节,直至看清干涉图样,如图 5 所示.

4) 将十字叉丝对准空气薄膜产生的 1 条干涉暗纹,记录此时读数.转动显微镜读数鼓轮,使载物台与劈尖一起平移,同时数 25 条条纹,转动完毕记录读数.前后 2 次读数差值即是 L_1 .

5) 重复上述步骤,测得肥皂液薄膜 25 条干涉暗纹间距 L_2 . 重复测量 5 次,测量得到数据如表 1 所示,计算得所用肥皂液的折射率平均值为 1.415 ± 0.013 .

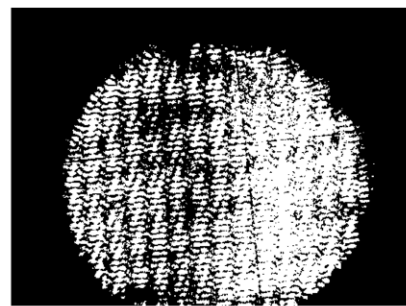


图 5 肥皂液薄膜劈尖干涉图样

表 1 肥皂液折射率测量数据

次数	L_1	L_2	n
1	5.493	3.872	1.419
2	5.564	3.956	1.406
3	6.372	3.792	1.417
4	4.353	3.787	1.414
5	5.467	3.857	1.417

3.2 肥皂泡的厚度

实验方法如下:依据实验原理中所述,将肥皂泡置于图 2 中的光学通路(1)中,观察肥皂泡放入过程中,迈克耳孙干涉仪屏幕上的明圆环的变化,记录光通过肥皂泡的中心时明圆环吞吐个数 N ,重复上述实验步骤 6 次,求得 N 的平均值,实验所得数据如表 2 所示,计算得明圆环吞吐个数是 2.0 ± 0.1 .

表 2 肥皂泡厚度测量数据

测量次数	明圆环吞吐个数
1	2.0
2	1.5
3	2.0
4	2.0
5	2.5
6	2.0

根据光程差方程：

$$\Delta\delta=4(n-1)d=N\lambda, \quad (14)$$

代入实验所得出的肥皂泡的折射率 n , 其中 $N=2$, $\lambda=632.8 \text{ nm}$. 解得

$$d=(762\pm 39) \text{ nm}. \quad (15)$$

3.3 肥皂泡的质量

令肥皂泡在一定高度下落, 落入竖直透明圆筒中, 研究肥皂泡匀速运动的过程, 记录肥皂泡匀速运动路径长度为 H , 运动时间为 T .

经过大量的实验验证, 100 mL 体积的肥皂泡在距离地面大于 3.000 m 的高度处竖直下落后, 经透明圆筒内运动一段时间后, 在距离地面 0.880 m 的路程里可以近似为匀速直线运动, 则可以计算出肥皂泡的质量 m . 肥皂泡的质量由肥皂膜质量和肥皂泡内的空气质量组成. 实验所得数据如下: $T=2.10 \text{ s}$, $\Delta_{\text{时}}=0.01 \text{ s}$, $H=0.880 \text{ m}$, $\Delta_{\text{高}}=0.003 \text{ m}$, 已知 $V=100 \text{ mL}$, $\rho=1.293\times 10^3 \text{ g/m}^3$, $g=9.8 \text{ m/s}^2$, $\eta=17.9\times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$. 实验满足 $mg=\rho gV+6\pi\eta Rv$, $v=H/T$. d 是肥皂膜厚度, $d=762 \text{ nm}$ 得 $R=\sqrt[3]{3V/4\pi+d}\approx 0.0287 \text{ m}$, 根据公式可得含有空气的整个肥皂泡质量 $m=0.133 \text{ g}$. 肥皂膜质量 $M=m-\rho V$, 可得 $M=0.004 \text{ g}$.

因为肥皂泡只能测 1 次下落时间和高度, 计算不确定度主要是 B 类不确定度, 计算结果肥皂泡质量的不确定度为 0.000 001 4 g. A 类不确定度虽然存在, 但无法算出, 所以实际不确定度数值大于此计算值.

3.4 测定肥皂液的表面张力系数

1) 测量传感器灵敏度 K

用逐差法计算得 $K=(3.149\pm 0.014) \text{ N}^{-1}$.

2) 测量肥皂液表面张力系数 α

对肥皂液的表面张力系数进行测量, 其实验数据如表 3 所示.

表 3 肥皂液的表面张力系数测量(肥皂液温度 14 °C)

测量次数	U_1/mV	U_2/mV	$\Delta U/\text{mV}$	$\Delta F/(\text{10}^{-3} \text{ N})$	$\alpha/(\text{10}^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1})$
1	25.7	0.1	25.8	8.19	38.30
2	26.2	0.2	26.4	8.38	39.19
3	26.1	0.1	26.2	8.32	38.91
4	26.3	0.3	26.6	8.45	39.52
5	26.0	0.1	26.1	8.29	38.77
6	26.1	0.1	26.2	8.32	38.91

由 $U=KF$ 得, $\Delta F=\Delta U/K$. 又有

$$\Delta F=F-mg=f=\alpha\pi(D_1+D_2),$$

其中 $D_1=3.496\times 10^{-2} \text{ m}$, $D_2=3.310\times 10^{-2} \text{ m}$,

计算 $\alpha_1\sim\alpha_6$ 值, 则可得

$$\bar{\alpha}=(38.93\pm 0.17)\times 10^{-3} \text{ N/m}.$$

也可得出肥皂泡的表面自由能 W 为

$$W=(38.93\pm 0.17)\times 10^{-3} \text{ J/m}^2,$$

计算得肥皂泡表面张力

$$f=(0.01404\pm 0.00006) \text{ N}.$$

利用杨氏-拉普拉斯公式即可求已知半径的肥皂泡的内外压强差为

$$\Delta p=(5.426\pm 0.024) \text{ Pa}.$$

4 结束语

本实验研究了肥皂泡力学、光学和热学等多方面的性质, 肥皂泡虽小, 但其中涉及的物理知识十分丰富. 本文描述的一系列实验综合利用物理学知识, 实现多个知识点的有机结合, 可作为多门学科的演示实验. 肥皂泡的研究甚至可以成为一门独立的学科, 可以对肥皂泡进行更深入更有创新价值的研究与应用.

参考文献:

- [1] 波易斯 C V. 肥皂泡与形成它们的力[M]. 谈镐生, 译. 北京: 科学出版社, 1974: 1-95.
- [2] 长谷川治. 小小肥皂泡也有大学问[M]. 长春: 吉林文史出版社, 2011: 1-109.
- [3] 欧阳钟灿, 刘寄星. 从肥皂泡到液晶生物膜[M]. 台北: 牛顿出版公司, 1995: 113-149.
- [4] 吕梦雅, 张蕾, 唐勇. 肥皂泡颜色形状及其在风场中运动的真实模拟[J]. 燕山大学学报, 2011, 35(6): 544-548.
- [5] 游少萍. 肥皂泡与建筑[J]. 华中建筑, 2008, 26(11): 20-23.
- [6] 孙为, 唐军杰, 王爱军, 等. 大学物理实验[M]. 北

- 京:中国石油大学出版社,2007:151-153.
- [7] 颜军,耿名扬. 液体表面张力的实验研究[J]. 中国科技博览,2011,13:65-67.
- [8] 王小平,江键,宋茂海. 液膜气泡法测洗涤溶液的表面张力系数[J]. 物理实验,2005,25(11):37-41.
- [9] 李洪芳. 热学[M]. 北京:高等教育出版社,2001:330-340.
- [10] 崔国文. 表面与界面[M]. 北京:清华大学出版社,1990:2-8.
- [11] 亚当森 A W. 表面物理化学(上)[M]. 顾惕人,译. 北京:科学出版社,1986:1-5.
- [12] 腾新荣. 表面物理化学[M]. 北京:化学工业出版社,2009:7-8.

Optical and mechanical properties of soap bubble

LENG Wen-xiu^a, HU Jia-chen^b, ZHANG Xin-jie^c, GAO Jian-yi^c, ZHONG Shou-xian^a
(a. College of Science; b. College of Chemical Engineering; c. College of Petroleum Engineering,
China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: Some basic physical properties of soap bubble were studied from the optical, mechanical and thermal point of view to broaden the teaching ideas of university physics experiments. The refractive index and thickness of the soap bubble were accurately measured using optical interference principle and then its mass was determined using the force balance principle. The surface tension coefficient of the soap bubble was achieved using pull-off method; the surface free energy and the pressure difference inside and outside the soap bubble were calculated.

Key words: soap bubble; refractive index; thickness; mass; surface tension; surface free energy
[责任编辑:郭 伟]

欢迎订阅 欢迎投稿

《物理实验》创刊于1980年,是教育部主管、东北师范大学主办的学术期刊,是教育部物理学与天文学教学指导委员会的会刊。

《物理实验》主要刊载物理实验成果,交流物理实验教学改革的 new 思想、新方法、新动态。开设的栏目有:实验教学,实验与应用,数据处理与误差分析,仪器设计与使用,实验教学研究,基础教育研究,实验技术与技巧,集锦,问题讨论,国外实验教学介绍,学生园地等。适合于物理实验工作者,大、中学校的物理教师,理工科的本科生、研究生及教学仪器研制人员阅读。

《物理实验》愿为广大作者提供交流信息的窗口,展示成果的园地,为广大读者提供丰富的精神食粮,为广大仪器生产厂家提供展示成果的舞台。

《物理实验》杂志为月刊,全国各地邮局均可订阅,邮发代号为12-44。若错过邮局订阅时间,可直接与编辑部联系。

《物理实验》编辑部