



基于气泡运动的液体表面张力系数测量方法研究

苑志江, 蒋晓刚, 张志友, 金良安

(海军大连舰艇学院航海系, 辽宁 大连 116018)

摘要: 为提高液体表面张力测量的准确性和稳定性, 提出一种基于气泡运动的液体表面张力系数测量方法。根据气泡在液相中的受力情况, 建立气泡在液相中脱离体积及瞬时稳态上浮速度数学模型, 基于搭建的气体水下生成及控制平台, 采用水浴加热法改变液相温度, 将 6 种不同温度下蒸馏水及空气, 分别作为实验的液相和气相进行实验测量, 使用高速摄像机采集气泡运动图像, 所采集图像使用 Matlab 软件进行图像处理与数据分析, 将实验数据及液相物性, 代入到所建立的模型中, 推导出不同温度下蒸馏水的表面张力系数大小, 采用最小二乘法线性对测算结果进行拟合。结果表明该方法具有可行性。

关键词: 气泡运动; 表面张力系数; 生成体积; 上升速度

中图分类号: O552.4

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2018)12-0046-05

Study on measuring method of liquid surface tension coefficient based on bubble motion

YUAN Zhijiang, JIANG Xiaogang, ZHANG Zhiyou, JIN Liang'an

(Dept. of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and stability of surface tension measurements, a measuring method of liquid surface tension coefficient based on bubble motion is put forward. According to the force of the bubble in the liquid phase, the volume of bubbles in the liquid phase and the instantaneous steady - state floating velocity model were established. Through the construction of gas underwater discharge test bed, the water bath heating method to change the liquid temperature, the 6 different temperatures of distilled water and air as the experimental liquid and gas phase, the experimental measurements of liquid and gas phases were carried out respectively. The bubble motion was observed by the high velocity photography technique. The image was analyzed by Matlab program, and the volume of bubble detachment and the instantaneous steady velocity were measured. The experimental data and liquid physical properties were substituted into the established model, and the surface tension coefficient of distilled water at different temperatures was deduced. The measured results was performed by the least squares linear fitting method on. The results show that the experimental data are in good agreement with the theoretical value.

Keywords: bubble motion; surface tension; volume of bubbles; floating velocity

收稿日期: 2018-09-07; 收到修改稿日期: 2018-10-15

基金项目: 海军国防预研课题(401040301)

作者简介: 苑志江(1983-), 男, 河北邢台人, 讲师, 博士, 主要从事流体力学等方面的研究。

0 引言

液体与气体接触的表面存在一个薄层,不可避免地产生一种使液体表面缩小的液体表面张力,这一张力作为多相流系统的重要界面性质,是表征液体性质的一个重要参数,直接影响多种化学工业过程^[1]。液体中气泡作为一种特殊的气体形式,其生成与上升运动过程,均受到液体表面张力的作用^[2]。目前,液体表面张力的测定大都是在常压或沸点等条件下进行的,测定方法主要包括两种方法:动力学法和静力学法,其中动力学法原理复杂、测试精度较低,从而导致该测定方法的成功应用实例鲜有报道^[3]。因此,目前实际多采用静力学测定法。主要包括:最大气泡压力法、毛细管上升法、滴重法、悬滴法等方法,随着电子及激光技术的发展,静力学测定方法的测试精度虽然得到了一定程度的提高。然而,上述静力学测定方法均存在测试设备复杂、操作流程繁琐、数据处理量大、测试过程难以控制、测量数据读取不精准等问题。

研究结果表明液体表面张力系数受到液体性质、温度、浓度等因素的影响。国内外学者也在努力寻找一种操作灵活、测量精度高、适用性广的液体表面张力系数测量方法,并开展了一些基础性研究工作。Akhatov^[4]通过数值模拟研究了液体表面张力与气泡上浮关系,提出表面张力影响气泡运动。黄继汤^[5]、倪宝玉^[6]等国内学者通过高速摄影实验,研究表面张力对气泡膨胀生成阶段影响,表明气泡流动状态与气液物理性质条件密切相关,气泡在液体中生成、上升运动都会受液体表面张力、密度、粘度等物理性质影响^[7]。

鉴于此,气泡生成与运动与液体表面张力系数存在的内在关系,本文提出一种基于气泡运动的液体表面张力系数测量的新方法,通过建立气泡在液体中生成体积及上升瞬时稳态速度的数学模型,基于搭建的气泡水下生成及控制平台,使用不同温度溶液和空气分别作为测试的液相和气相,用高速图像采集技术对气泡运动进行测量,通过 Matlab 软件对采集的气泡图像进行处理与分析,得到不同液相条件下,气泡生成体积与气泡上浮速度等测算结果,将液体密度、粘度系数等基本物性参数代入到气泡运动模型中,以测算液体的表面张力系数。

1 测量方法理论模型

液体中气泡自水下生成至水面破碎,其气液两

相流动,主要包括管口气泡的生成、上浮、破碎等阶段。其中,处于生成、上浮阶段气泡的脱离体积与瞬时稳态上浮速度,这两个重要数值便于观测与测量,可以通过测算这两个数值的变化,从而反演出液相物理参数的具体变化。气泡在液体中的运动特性,受到液体粘度、表面张力、密度等因素的直接影响。其中,液体密度测定精度高,液体粘度系数的量级很小,可以忽略其改变量,而表面张力的测定对仪器设备的测量精度要求高、条件要求较为苛刻。因此,急需一种操作灵活、测量精度高、适用性广的液体表面张力系数测量方法。

本文提出的基于气泡运动的液体表面张力系数测量方法,主要基于气泡脱离体积和气泡上升速度,进行反演。

1.1 气泡脱离体积模型建立

前期实验结果表明,当水下气体排放处于低流量时,气泡往往以单个形态生成,其形成阶段主要包括膨胀和脱离两个过程。在膨胀过程,气泡顶部的运动速度,可视为气泡半径变化率,气泡底部与喷孔边沿接触并相对静止。在此阶段,气泡受到的作用力主要包括:液体表面张力 F_σ 、气体动量力 F_m 、粘性阻力 F_d 、浮力 F_V 、压差力 F_p 、附加质量力 F_i ,满足的受力平衡方程^[8]如下所示:

$$F_V + F_m = F_d + F_i + F_\sigma \quad (1)$$

通过对式(1)的整理,得到气泡膨胀结束时,气泡体积 V_1 :

$$V_1 = \frac{1}{(\rho_L - \rho_g)g} \left[\frac{2}{\pi} \rho_L C_D q_V^2 \left[\frac{6}{\pi} \right]^{-2/3} V_1^{-2/3} + \pi d_h \sigma + \frac{(\rho_g + 11\rho_L/16)}{12\pi \left[\frac{3}{4\pi} \right]^{2/3}} q_V^2 V_1^{-2/3} - \frac{\rho_g q_V^2}{\frac{\pi}{4} d_h^2} \right] \quad (2)$$

其中, σ 是液体表面张力系数、 ρ_L 是液相密度、 ρ_g 是气相密度、 g 是重力加速度、 $V = q_V t = \pi d^3/6$ 是气泡体积、 d 是气泡直径、 q_V 是气体流量。

C_D 代表气泡的阻力系数,计算公式如下:

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0.15Re^{0.687})/Re & Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases}$$

其中,雷诺数 $Re = \rho_L u d / \mu_L$, μ_L 是液体粘度系数。

1.2 气泡上升速度模型建立

在气泡膨胀结束后,进入上浮阶段。在此过程中,气泡受到的作用力,直接影响其上升速度与气泡形状。当气泡上升一段时间后,达到平衡状态,

其体积基本不变,以某一稳定的速度上浮,此刻其所受的力包括浮力与液体粘滞阻力,两者处于平衡状态。对于球形气泡而言,满足:

$$\frac{1}{2}C_D\rho_L\pi R^2v_b^2 = \frac{4}{3}\pi R^3(\rho_L - \rho_g)g \quad (3)$$

其中,含有待定值阻力系数 C_D , C_D 是雷诺数 Re 的函数。 Re 的值一般可将流动划分为层流、过渡及湍流 3 个流型。考虑大气泡上升过程中尺寸变化,计算不同尺度气泡的瞬时稳态上升速度 v_b (式中 R 为气泡等效半径):

$$\begin{cases} v_b = \frac{2\rho_L g R^2 \sqrt{gR + \frac{\sigma}{\rho_L R}}}{9\mu \sqrt{gR + \frac{\sigma}{\rho_L R} + \frac{\rho_L^2 g^2 R^4}{20.25\mu^2}}} & (R < 7\text{mm}) \\ v_b = \sqrt[4]{\frac{4g\sigma(\rho_L - \rho_g)}{C_D^2 \rho_L^2}} & (R > 7\text{mm}) \end{cases}$$

由式(2)和式(3)建立的气泡脱离体积与上升速度数学模型,可以方便地反演出不同条件下的液体表面张力系数。

2 实验测量平台及步骤设计

2.1 实验测试平台

实验研究目的是得出气体所形成的气泡在不同温度液相中上升过程的气泡脱离体积及瞬时稳态上升速度。气体生成气泡实验在室温、常压下开展,空气密度 $\rho_l=1.293 \text{ kg/m}^3$ 。实验装置如图 1 所示。

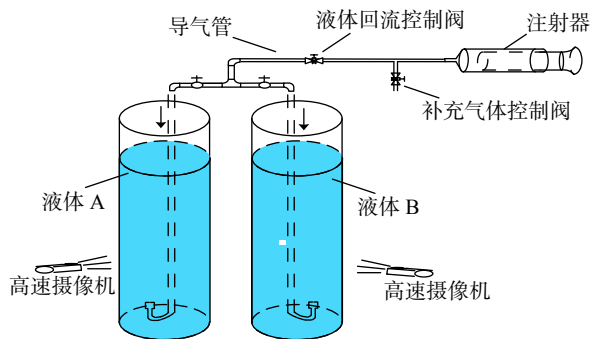


图 1 实验装置图

在实验室条件下,采用自然光光源、高速图像采集技术、图像处理与分析技术相结合的方法,建立了气泡产生及控制平台。分别在不同温度蒸馏水溶液中,通过调节控制阀门,以产生不同流量的运动气泡源,并使用短曝光时间设置下的高速相机,对不同水下气泡进行了图像采集。实验通过研究蒸馏水温度改变对气泡脱离体积及上升速度的影响。

选用不同温度的蒸馏水进行气泡运动对比实验,通过水浴法调整蒸馏水温度,选取蒸馏水温度为 15~40 ℃,其物性参数如表 1 所示。

表 1 实验物性参数

蒸馏水温度/℃	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	粘度系数/($10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$)
15	999.12	1.140 4
20	998.23	1.005 0
25	997.07	0.893 7
30	995.68	0.800 7
35	994.06	0.722 5
40	992.22	0.656 0

研究气泡在不同温度的蒸馏水中气泡生成体积及上升速度规律,并分析其影响因素。

2.2 实验测试步骤

实验步骤如下:

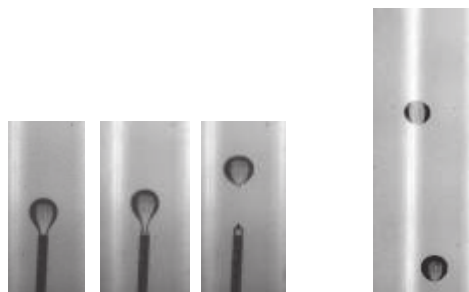
- 1)数据采集,在室温、常压条件下,生成单个气泡,对其上升运动过程使用摄像机进行实时拍摄;
- 2)数据存储,将摄像机图像逐帧分解,并进行存储;
- 3)图像筛选;4)数据处理。

首先,选取气泡脱离喷嘴的截图,对截取的视频图像进行去噪预处理,采用自适应降噪滤波算法,经过去噪预处理的图像主体较去噪前更清晰可辨,有利于后续图像处理的进行;其次,将去噪图像进行平滑处理,采用形态学操作对图像进行平滑,消除气泡边缘的细小毛刺,便于气泡的检测和质心提取;再次,采用霍夫变换方法检测气泡并利用 Matlab 中 Regionprops 函数提取气泡质心等相关信息;最后,选取合适的两帧气泡图像作为样本图像,根据气泡质心上升高程及所用时间,求出气泡平均上升速度。

3 实验测试验证与分析

在静水中设定 6 种不同温度的蒸馏水,分别进行 15 次重复测试,测算液体中气泡脱离体积和瞬时稳态上浮速度的数值。为消除误差的影响,人工剔除实验测试结果中偏差较大的数据,选取每组实验中 10 组的数据,求取其平均值以减小误差。

针对实验测试中采集的气泡运动图像,使用 Matlab 软件图像处理模块,经灰度归一化处理,得到气泡生成和上浮过程的图像,如图 2 所示。对图片进行分析时,选取气泡质心上升运动的数据,因



(a) 气泡生长过程典型状态 (b) 气泡上浮过程典型状态

图 2 经处理后的气泡运动状态照片

此, 图像处理与分析不会对气泡质心的位置产生较大误差。

3.1 气泡脱离体积及上浮速度测定

1) 气泡脱离体积

设置喷口直径 $d_b=4$ mm, 此时气泡在非射流情况下生成时, 处于小半径缓慢上浮低雷诺数 Re 数过程。实验时气体体积流量为 $10 \text{ mm}^3/\text{s}$ 。

在不同温度海水溶液中进行实验, 得到气泡脱离体积如表 2 所示。

表 2 不同温度海水溶液中气泡脱离体积

温度/℃	体积/ mm^3	温度/℃	体积/ mm^3
15	290.218	20	283.305
25	279.174	30	272.968
35	268.751	40	263.156

2) 气泡上浮速度

不同尺度气泡的瞬时稳态上升速度有所差异, 因此针对此种情况, 设定两种排气状态。气体喷口直径 $d_b=1$ mm, 气体体积流量 $5 \text{ mm}^3/\text{s}$, 这种状态上浮气泡半径小、速度慢、雷诺数低。调整喷口直径至 $d_b=4$ mm, 气体体积流量 10 mL/s , 这种状态上浮气泡半径大、速度快、雷诺数高。根据气泡瞬时稳态上浮速度模型, 以气泡半径 7 mm 为分界, 在不同温度溶液中进行实验, 得到气泡瞬时稳态上浮速度实验数据如表 3、表 4 所示。

3.2 测试结果分析

当处于小半径缓慢上浮低雷诺 Re 数流动过程时, 对气泡脱离体积、瞬时稳态上浮速度等进行计算, 并且将测量时的液体温度一同代入气泡脱离体积模型和气泡上升速度模型, 通过求解气泡脱离体积模型和等效半径 $R<7 \text{ mm}$ 下的气泡瞬时稳态上浮速度模型, 分别获得蒸馏水在不同温度条件下, 气

表 3 当等效半径 $R<7 \text{ mm}$, 稳态上浮速度

温度/℃	速度/ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	温度/℃	速度/ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
15	28.71	20	27.31
25	26.79	30	25.12
35	24.36	40	23.44

表 4 当等效半径 $R>7 \text{ mm}$, 稳态上浮速度

温度/℃	速度/ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	温度/℃	速度/ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
15	30.17	20	30.72
25	31.3	30	31.84
35	32.12	40	32.85

泡表面张力系数测算值, 为验证测算值准确程度, 将文献[9]、文献[10]中蒸馏水表面张力系数与本次测算数据进行比对, 如表 5 所示。

表 5 蒸馏水表面张力系数与本次测算数据

温度/℃	测算值/ $(10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1})$	理论值/ $(10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1})$	误差/%
15	73.37	73.49	0.163
	73.61		0.163
20	73.08	72.94	0.192
	72.79		0.206
25	71.74	71.90	0.222
	71.98		0.112
30	71.09	71.21	0.168
	71.00		0.294
35	70.70	70.51	0.269
	70.68		0.241
40	69.54	69.47	0.101
	69.28		0.273

通过分析, 温度 t 与表面张力系数 σ 两者间呈近似线性关系, 拟合的方程式:

$$\sigma=75.96-0.1597t$$

气泡在低雷诺数时生成与上浮运动过程, 表面张力系数测算值与理论值误差在 0.3% 内, 实验测算结果与理论值吻合程度高。且数据拟合方程和方差 SSE 仅为 0.516 3, 说明数据预测较成功, 拟合效果好。

实验中, 测定值与理论值存在误差, 除气泡在不同运动状态下的受力影响外, 其误差还来源为: 气体间存在温度差及浓度差, 气泡在上升过程中,

气液间存在不等温传热及传质过程;受力方程建立假设气泡为固定球形,实验中进行图像筛选, Matlab 对实验图像进行处理后,边界及气泡质心的获取存在一定程度偏离;模型的建立过程中,忽略 Basset 力、压差力等影响极小的力;本实验中,使用电子温度计进行测量,其数据读取精度及可靠性有待加强。且水浴法进行液体加热,数据测量会产生一定滞后性。

本文研究模型可以有效获得蒸馏水温度对表面张力的影响关系,且计算测量方式简单,准确率较高,测定便捷。利用计算式,可求得液体表面张力,从而为军事、化工等诸领域工程应用提供参考依据。

4 结束语

通过对采集得到的气泡运动图像进行编程图像处理和分析数据后,得到了不同温度蒸馏水中,气泡脱离体积及瞬时稳态上浮速度等数值,代入到所建立的气泡在气泡运动模型中,得到的主要结论:

气流流速较低的非射流工况时,处于小半径缓慢上浮低 Re 数流动。此时表面张力极大影响着气泡脱离体积及瞬时稳态上浮速度,因此蒸馏水温度对表面张力影响拟合公式效果理想,拟合和方差小,数据与模型偏离程度低。

本文是在数学模型建立基础上,通过实验测得气泡脱离体积及瞬时稳态上浮速度,反推出液体表面张力系数。该方法测定简单,精度高,而且该方

法可以推广到对不同液体表面张力的测量,具有较广的应用前景。

参考文献

- [1] 朱英昊,康娟,桑涛,等.基于光纤干涉法的液体表面张力系数测量及温度影响研究[J].光电子·激光,2015(1):130-134.
- [2] ZHANG X B, XIANG S J, CAO X L, et al. Effects of surface tension on bubble growth in an extensive uniformly superheated liquid[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(30): 3191-3198.
- [3] 赵贯甲,毕胜山,吴江涛.表面光散射法液体黏度和表面张力实验系统研制[J].工程热物理学报,2015(1):36-40.
- [4] AKHATOV A R. Methods for controlling the authenticity of textual information transfer on the basis of statistical and structural redundancy[J]. International Journal of Automation & Computing, 2012(5): 518-529.
- [5] 黄继汤,陈嘉范,丁彤,等.表面张力对单空泡运动特性的影响[J].水利学报,1996(12):1-7.
- [6] 倪宝玉.水下粘性气泡(空泡)运动和载荷特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
- [7] 田恒斗,金良安,王涌,等.考虑单气泡运动特性的舰船尾流气泡分布研究[J].兵工学报,2011(9):1126-1130.
- [8] CHEN B B, ZOU D H. Altered seawater salinity levels affected growth and photosynthesis of *Ulva fasciata*(Ulvales, Chlorophyta)germlings[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015(8): 108-113.
- [9] 陈世哲,刘世萱,范秀涛,等.基于棱镜模型多次折射法的海水盐度检测系统[J].光学学报,2011(7):22-26.
- [10] 田恒斗,金良安,迟卫,等. Basset 力对液体中易溶性气泡运动的影响[J].力学学报,2011(4):680-687.

(编辑:刘杨)