



论文

静态声空化泡内外的质量交换

苟杰, 陈伟中*

近代声学教育部重点实验室, 南京大学声学研究所, 南京 210093

*联系人, E-mail: wzchen@nju.edu.cn

收稿日期: 2011-05-15; 接受日期: 2011-06-20

国家自然科学基金资助项目(批准号: 10974095 和 11174145)

摘要 研究表明声空化泡内外存在着不可忽略的质量交换, 但目前的研究主要针对激烈脉动型的声空化泡. 本文利用驻波声场的 Bjerkes 力稳定悬浮非激烈脉动型声空化泡(静态声空化泡)来研究泡壁处气液间的质量交换特性. 结合实验结果, 我们分析了驱动声压、气体种类、液体的黏度、表面张力, 饱和蒸汽压等因素对静态声空化泡内外质量交换特性的影响. 同时, 我们设计的实验系统也为气液传质特性测量提供了一种方法.

关键词 静态声空化泡, 质量交换, 声悬浮

PACS: 43.35.+d, 47.55.dd

doi: 10.1360/132011-627

声空化泡可分为有稳定平衡半径的激烈脉动型、平衡半径变化的激烈脉动型和平衡半径变化的非激烈脉动型. 本文主要研究平衡半径变化的非激烈脉动型声空化泡. 所谓非激烈脉动指的是气泡半径脉动幅度相对较小, 接近无脉动状态, 所以, 我们以下称之为静态声空化泡, 而将前两种声空化泡称为动态声空化泡. 静态声空化泡虽然半径脉动幅度很小, 但其平衡半径仍然会随着时间变化, 或增大直至浮出液体, 或减少直至消融, 这表明静态声空化泡内外存在着不可忽略的质量交换.

气液间质量交换的主要途径可归结为扩散、对流、气液相变、化学反应等物理、化学过程. 人们基于实验结果, 发展了膜模型^[1]、渗透模型^[2]、表面更新模型^[3]、湍动漩涡模型^[4]等质量交换模型, 并在这

些基础上作了多种修正. 气液间质量交换特性的实验测量方法主要有示踪剂法^[5]、多点采样法^[6]、全息干涉法^[7]等.

目前, 对声空化泡内外质量交换特性的研究主要集中在动态声空化泡, 而对静态声空化泡的研究较少. 1996年, Hilgenfeldt 等人^[8]对动态声空化泡气液分界面处的气体扩散进行了研究, 并提出了氩气精馏理论^[9,10]. 1997年, Yasui^[11]研究了动态声空化泡的气液界面上的相变过程. 2003年, Toegel 和 Lohse^[12]研究了化学变化对动态声空化泡内外质量交换特性的影响. 2005年, An 等人^[13]提出了一个模型, 考虑了除化学反应外的多种机制, 系统地研究了动态声空化泡. 2008年, Gao 等人^[14]对动态声空化泡内外质量交换过程提出了简洁的唯象模型. 这些研究都在一

引用格式: 苟杰, 陈伟中. 静态声空化泡内外的质量交换. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42: 217-223

Gou J, Chen W Z. Mass exchange on the wall of static acoustic cavitation bubble (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2012, 42: 217-223, doi: 10.1360/132011-627

定程度上为动态声空化泡内外质量交换过程给出了解释, 并在一定程度上与实验结果一致.

本文中, 我们首先借助声悬浮技术使静态声空化泡在空间上定位. 然后, 使用显微摄像设备拍摄静态声空化泡半径随时间的演化图像, 并用图像处理技术得到不同时刻的静态声空化泡的平衡半径数据. 最后, 我们改变驱动声压、气体种类、液体的黏度、表面张力、饱和蒸汽压等主要实验参数, 研究静态声空化泡内外质量交换特性的参数相关性.

1 实验系统

在装有液体的矩形声谐振腔中输入超声波, 当驱动超声波接近谐振腔的本征频率时, 液体中会形成稳定的驻波场. 借助该驻波场可使液体中的声空化泡稳定的悬浮. 实验中采用的装置如图 1 所示. 黏贴在谐振腔底部的压电陶瓷换能器(PZT)在电信号的驱动下, 在谐振腔内部形成超声场. 调整信号源的输出频率与幅度使声空化泡稳定地悬浮在谐振腔的中部. 一束波长 532 nm 的 YAG 激光经准直镜、扩束镜照射到稳定悬浮的声空化泡, 透射光被长距离显微镜(KH-3000)采集到 CCD, 对声空化泡进行视频采集. CCD 曝光时间为 1/30 s, 实验中对每个声空化泡采集约 20000 幅图像. 用数字图像技术处理声空化泡从生成到崩溃全过程的图像, 得到声空化泡半径 R 随时间 t 演化的曲线.

2 质量交换系数

在声空化泡内外质量交换过程中, 单位时间内通过单位气液界面面积传输的气体质量 $\frac{1}{S} \frac{d(\rho V)}{dt}$ (其中 S 为泡的表面积, ρ 为泡内气体的密度, V 为泡的体积, t 为时间)可被用来描述声空化泡内外质量交换特性. 而利用锁相积分频闪脉冲法^[15]拍摄静态声空化泡在一个声周期内的半径随时间的演化图像(见图 2(a))表明, 静态声空化泡在一个声周期内半径脉动极小, 可近似认为不变化. 因此, 静态声空化泡从产生到消融全过程中泡内的气体密度 ρ 可很好的近似为常数. 我们便可定义静态声空化泡内外质量交换系数(简称质量交换系数)为单位时间通过单位气液

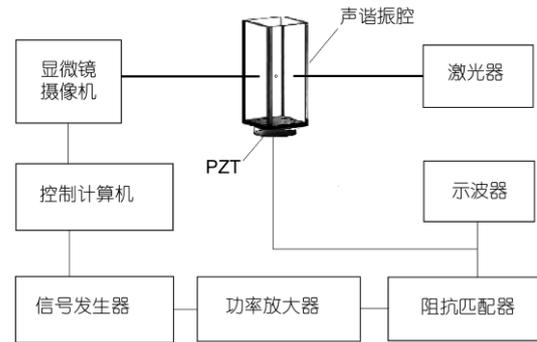


图 1 声悬浮实验系统

Figure 1 Experiment system of acoustic levitation.

界面面积传输的气体体积, 即

$$\alpha = -\frac{1}{S} \frac{dV}{dt}, \quad (1)$$

单位为 m/s , 并用 α 来描述静态声空化泡内外质量交换特性. 在球形静态声空化泡条件下, 质量交换系数简化为

$$\alpha = -\frac{dR}{dt}. \quad (2)$$

可见, 静态声空化泡的质量交换系数就是气泡平衡半径的变化率, 即 $R(t)$ 曲线斜率的负数. 当气泡膨胀, $dV > 0$, 则 α 为负; 反之, 如果气泡在缩小, 那么 α 是正的.

我们用前节的实验系统对某个静态声空化泡进行显微成像拍摄, 从 $t=0$ s 开始拍摄, 拍摄间隔为 1/30 s, 一共采集了 19170 幅图像. 图 2(b)给出了一些时刻的显微图像. 对这些显微图像进行处理后, 得到相应的半径演化 $R(t)$ 曲线, 由 $R(t)$ 曲线中的实验数据可求得该静态声空化泡的质量交换系数(见图 3).

由图 3(a)我们发现静态声空化泡半径的大小对泡内外质量交换特性有一定的影响. 在图 3(a)中, 静态声空化泡 $R(t)$ 曲线的斜率(即质量交换系数)总体上随着时间 t 增大, 直至静态声空化泡半径缩小到一定大小时泡瞬间崩溃(实验中静态声空化泡崩溃时半径的阈值为 60–80 μm).

为了描述静态声空化泡内外质量交换的总体特征, 我们把静态声空化泡从生成到消融全过程的 $R(t)$ 曲线作线性拟合(如图 3(b)), 拟合所得直线的斜率的负数即线性拟合的静态声空化泡的质量交换系数. 以下利用该质量交换系数来研究驱动声压、气体种类、液体的黏度、表面张力和液体的饱和蒸汽压等因

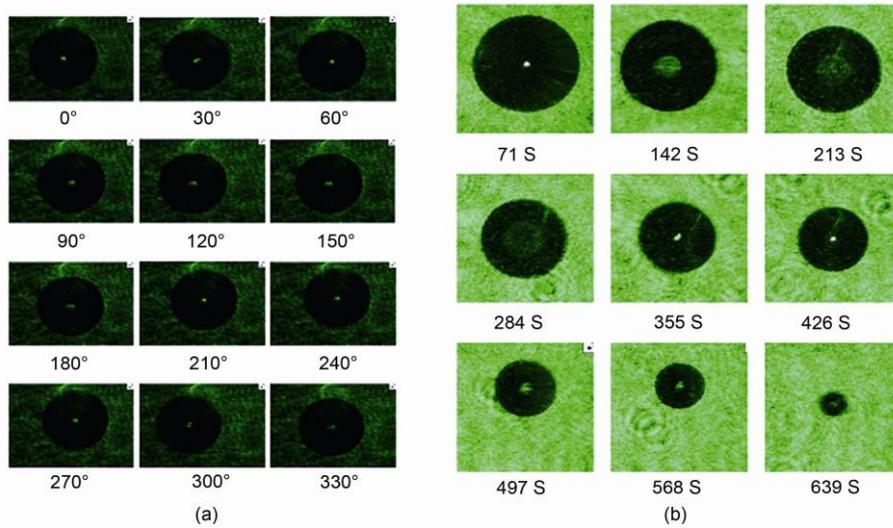


图2 (网络版彩图) 静态声空化泡时间演化图像

(a) 静态声空化泡在某个声周期内的各个相位的图像; (b) 静态声空化泡从生成到消融过程中各个时间点的图像

Figure 2 (Color online) Evolution of static acoustic bubble's radius by time. (a) Evolution of static acoustic bubble's radius by time in a sound period; (b) evolution of static acoustic bubble's radius by time in the whole process of existence.

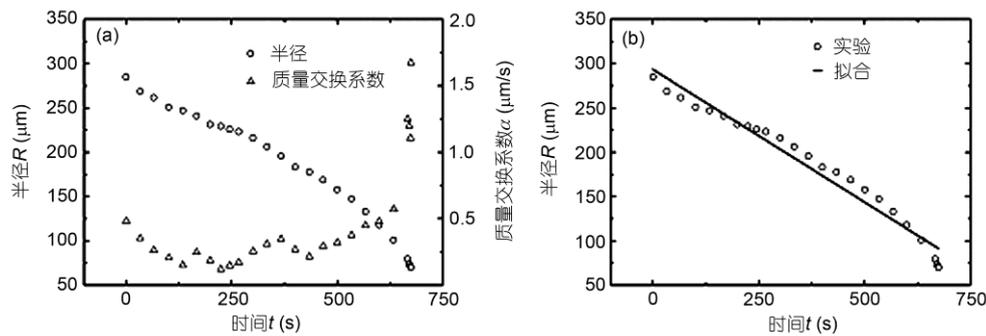


图3 静态声空化泡 $R(t)$ 及 $\alpha(t)$

(a) 静态声空化泡从生成到消融过程中实验测量的 $R(t)$ 关系及由 $R(t)$ 得到的 $\alpha(t)$ 关系; (b) 由实验测量的 $R(t)$ 关系作线性拟合, 该直线的斜率的负数即线性拟合的质量交换系数

Figure 3 $R(t)$ and $\alpha(t)$ of static acoustic bubble. (a) Static acoustic bubble's $R(t)$ and $\alpha(t)$ in the whole process of existence by experiment; (b) fit the $R(t)$ linearly and the slope is linearly fitting mass exchange coefficient.

素对静态声空化泡内外质量交换特性的影响.

3 质量交换系数的参数相关性

3.1 与声压的关系

让稳定悬浮的静态声空化泡所处声场频率、温度、工作液体和泡内气体种类相同, 而变化声场的声压, 实验结果如图 4. 鉴于在本实验中不能精确测量静态声空化泡处的声压级, 我们用驱动压电换能器的信号源的输出电压来相对表示声场声压的大小.

声空化泡分界面处质量交换的主要动力之一为压强梯度, 因此, 声悬浮驱动声压对该界面处质量交换特性有较大影响. 由图 4 的实验结果可知, 在其他条件相同时静态声空化泡的质量交换系数随声压增大而近似线性增大, 线性系数约为 $0.0043 \mu\text{m}/\text{mV}$ (mV 为电压单位毫伏).

3.2 与气体种类的关系

通常, 不同气体在液体中的扩散系数等特性是不同的, 这使得有相同浓度梯度的气液界面处质量

交换特性亦有一定的差异. 实验中选择了空气、氩气、氮气、六氟化硫等四种气体, 在所处声场频率、声压、温度、工作液体种类相同的条件下测量了四种气体的质量交换系数, 实验结果如图 5. 由图 5 可知, 分别含有此四种气体的静态声空化泡的质量交换系数差异较大, 在水中溶解性较小的六氟化硫的静态声空化泡的质量交换系数仅为 $0.09752 \mu\text{m/s}$, 而内含氩气的静态声空化泡的质量交换系数可达 $0.82591 \mu\text{m/s}$.

3.3 与表面活性剂的关系

为了研究工作液体表面张力系数的改变对静态声空化泡内外质量交换特性的影响, 我们选用表面活性剂十二烷基苯磺酸钠来配制了不同浓度的水溶液, 在声场频率、声压、温度、气体种类相同的条件下测量静态声空化泡的质量交换系数, 实验结果如图 6.

在水中加入了十二烷基苯磺酸钠后, 液体的饱和蒸汽压和黏度改变较小, 而主要是减小了其表面张力系数. 图 6 的实验结果表明, 十二烷基苯磺酸钠水溶液浓度越大, 静态声空化泡的质量交换系数越大, 即静态声空化泡的质量交换系数随工作液体表面张力系数的增大而减小.

3.4 与乙醇水溶液浓度的关系

乙醇的饱和蒸汽压为 5.33 kPa (温度为 19°C , 此条件下水的饱和蒸汽压为 2.20 kPa), 大于同条件下

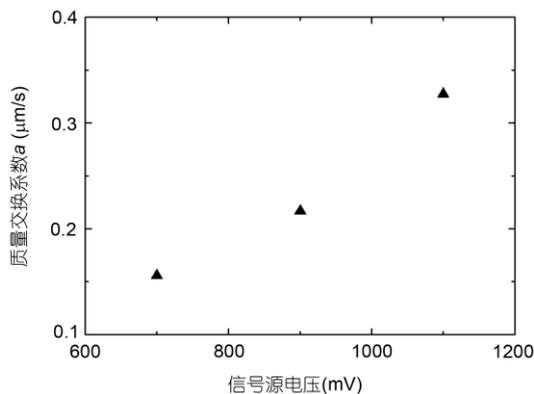


图 4 质量交换系数与声压的关系

该实验中工作液体为去离子水, 泡内气体为空气, 信号源输出频率为 43.20 kHz

Figure 4 The relationship between mass exchange coefficient and sound pressure. The liquid is water and the gas is air. The frequency of signal source is 43.20 kHz .

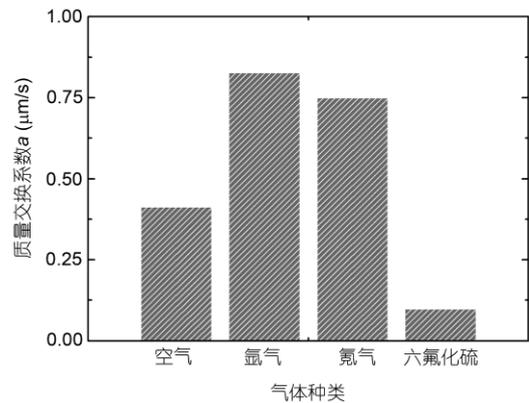


图 5 质量交换系数与气体种类的关系

该实验中工作液体为去离子水, 信号源频率为 43.01 kHz , 幅值为 900 mV

Figure 5 The relationship between mass exchange coefficient and gas's variety. The liquid is water. The frequency of signal source is 43.01 kHz and the amplitude of signal source is 900 mV .

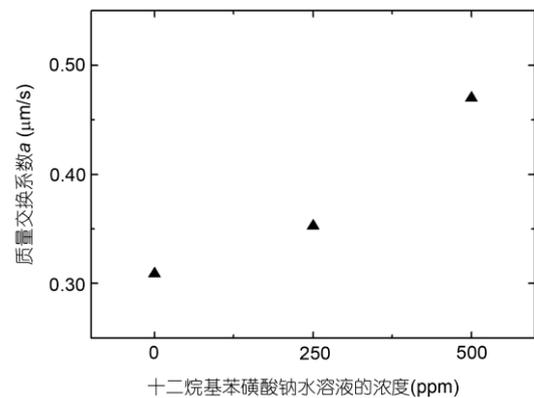


图 6 质量交换系数与表面活性剂浓度的关系

该实验中工作液体为不同浓度的十二烷基苯磺酸钠水溶液, 泡内气体为空气, 信号源频率为 43.28 kHz , 幅值为 900 mV

Figure 6 The relationship between mass exchange coefficient and the concentration of surfactant. The liquid is aqueous solution of SDBS and the gas is air. The frequency of signal source is 43.28 kHz and the amplitude of signal source is 900 mV .

水的饱和蒸汽压. 在水中加入少量的乙醇会较大的改变液体的挥发性, 而对表面张力和黏度等物理特性影响较小. 由此我们配制不同浓度的乙醇水溶液来研究静态声空化泡内外质量交换特性与工作液体挥发性的关系, 实验结果如图 7 所示.

该实验结果指出, 随着乙醇水溶液浓度的增加静态声空化泡的质量交换系数递减, 即静态声空化泡的质量交换系数随着工作液体挥发性(即饱和蒸汽压)的增大而减小.

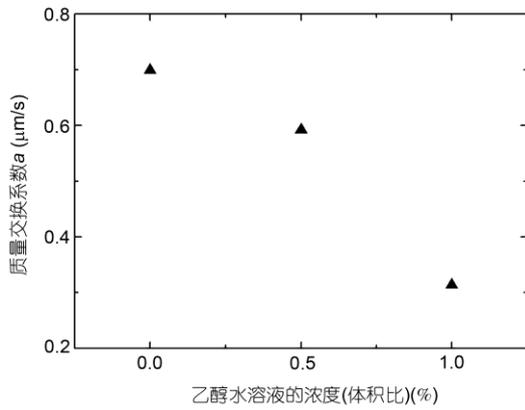


图7 质量交换系数与乙醇水溶液浓度的关系

该实验中工作液体为不同浓度的乙醇水溶液, 泡内气体为空气, 信号源频率为 43.40 kHz, 幅值为 1100 mV

Figure 7 The relationship between mass exchange coefficient and the concentration of alcohol. The liquid is aqueous solution of ethanol and the gas is air. The frequency of signal source is 43.40 kHz and the amplitude of signal source is 1100 mV.

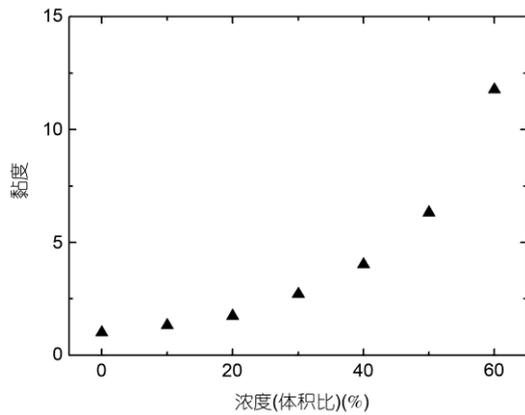


图8 丙三醇水溶液黏度与浓度(体积比)的关系

Figure 8 The relationship between viscosity and concentration of glycerin.

3.5 与丙三醇水溶液浓度的关系

实验测得丙三醇水溶液的黏度与浓度的关系如图 8. 该图表明随着丙三醇水溶液浓度的增大, 其黏度显著的增大. 为了研究静态声空化泡内外质量交换特性与工作液体黏度的关系, 我们配制不同体积浓度的丙三醇(甘油)水溶液, 得到如图 9 所示的质量交换系数与溶液浓度的关系. 该图表明静态声空化泡质量交换系数随着丙三醇水溶液的浓度增加而递减.

水的表面张力系数为 72.6×10^{-3} N/m, 饱和蒸汽压为 2.33 kPa(测量条件为 20°C), 在相同条件下纯丙三醇的表面张力系数为 63.3×10^{-3} N/m, 饱和蒸汽压为 0.4 kPa. 由此知, 不同浓度的丙三醇水溶液的表

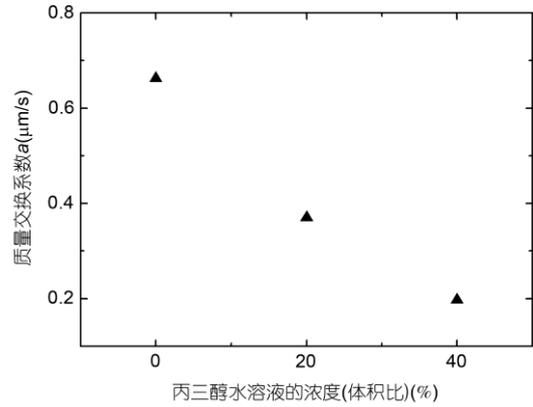


图9 质量交换系数与丙三醇水溶液的浓度的关系

该实验工作液体为不同浓度的丙三醇水溶液, 泡内气体为空气, 信号源频率为 44.50 kHz, 幅值为 1100 mV

Figure 9 The relationship between mass exchange coefficient and the concentration of glycerin. The liquid is aqueous solution of glycerin and the gas is air. The frequency of signal source is 44.50 kHz and the amplitude of signal source is 1100 mV.

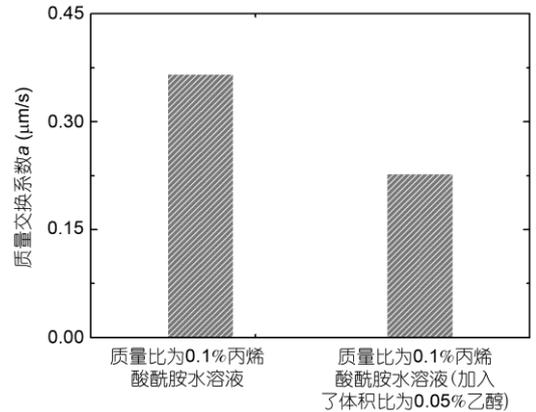


图10 丙烯酸酰胺水溶液中加入乙醇对质量交换系数的影响

该实验中工作液体为丙烯酸酰胺水溶液, 泡内气体为空气, 信号源频率为 43.84 kHz, 幅值为 1100 mV

Figure 10 The impact of ethanol on the mass exchange coefficient of PAM aqueous solution. The liquid is PAM aqueous solution and the gas is air. The frequency of signal source is 43.84 kHz and the amplitude of signal source is 1100 mV.

面张力系数变化较小, 而随着丙三醇水溶液浓度的增大, 其饱和蒸汽压减小. 结合 3.4 节和图 9 的结论分析得, 随着丙三醇水溶液黏度的增大悬浮在其中的静态声空化泡的质量交换系数减小.

3.6 与非牛顿流体的关系

我们对非牛顿流体中的静态声空化泡也作了研究, 我们选择的工作液体是质量比为 0.1%的丙烯酸酰

胺水溶液. 实验中对照的研究了向非牛顿流体中加入乙醇后静态空化泡内外质量交换特性的变化, 结果如图 10. 由图 10 可知, 乙醇的加入使得静态声空化泡的质量交换系数变小, 与对牛顿流体的影响相同.

4 结论

由以上实验结果可知, 静态声空化泡的质量交换系数随着驱动声压的增大而增大, 随着液体的黏

度的增大而减小, 随着表面张力系数的增大而减小, 随着液体挥发性的增大而减小. 静态声空化泡半径越小, 其质量交换系数越大, 泡内的气体种类对质量交换系数亦有较大的影响. 这些研究为声空化泡内外质量交换特性的研究及超声强化传质在工业生产的应用提供了理论基础. 此外, 在目前气液传质特性的实验测量中气泡都是自由悬浮于液体中, 而本实验系统利用声悬浮技术, 提出了一种新的测量气液传质特性的方法.

参考文献

- 1 Whitman W G. The two-film theory of gas absorption. *Chem Met Eng*, 1923, 29(4): 146–148
- 2 Higbie R. The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure. *Trans Am Inst Chem Eng*, 1935, 31: 365–389
- 3 Danckwerts P V. Significance of liquid-film coefficients in gas absorption. *Ind Eng Chem*, 1951, 43(6): 1460–1467
- 4 King C J. Turbulent liquid phase mass transfer at a free gas-liquid interface. *Ind Eng Chem Fundamentals*, 1966, 5(1): 1–8
- 5 Petermann J, Broecker H C, Sinn H. A spectroscopic method for investigating the adsorption of gases in fluid films. *Ger Chem Eng*, 1978, 1(5): 312–317
- 6 O'Hare D, Winlove C P, Parker K H. Electrochemical method for direct measurement of oxygen concentration and diffusivity in the intervertebral disc, electrochemical characterization and tissue-sensor interactions. *J Biomed Eng*, 1991, 13(4): 304–312
- 7 Kutepov A M, Pokusasey B G, Kazenin D A, et al. Interfacial mass transfer in the liquid-gas system: An optical study. *Theor Foundations Chem Eng*, 2001, 35(3): 213–216
- 8 Hilgenfeldt S, Lohse D, Brenner M P. Phase diagrams for sonoluminescing bubbles. *Phys Fluids*, 1996, 8(11): 2808–2826
- 9 Lohse D, Hilgenfeldt S. Inert gas accumulation in sonoluminescing bubbles. *J Chem Phys*, 1997, 107(17): 6986–6997
- 10 Lohse D, Brenner M P, Dupont T F, et al. Sonoluminescing air bubbles rectify argon. *Phys Rev Lett*, 1997, 78(7): 1359–1362
- 11 Yasui K. Alternative model of single-bubble sonoluminescence. *Phys Rev E*, 1997, 56(6): 6750–6760
- 12 Toegel R, Lohse D. Phase diagrams for sonoluminescing bubbles: A comparison between experiment and theory. *J Chem Phys*, 2003, 118(4): 1863–1875
- 13 An Y, Ying C F. Model of single bubble sonoluminescence. *Phys Rev E*, 2005, 71(3): 036308
- 14 Gao X X, Chen W Z, Huang W, et al. A phenomenological model of mass-exchange between the inside and outside of a cavitation bubble. *Chin Sci Bull*, 2009, 54(7): 1152–1157
- 15 Huang W, Chen W Z, Liu Y N, et al. Precise measurement technique for the stable acoustic cavitation bubble. *Chin Sci Bull*, 2005, 50(21): 2417–2421

Mass exchange on the wall of static acoustic cavitation bubble

GOU Jie & CHEN WeiZhong*

Key Laboratory of Modern Acoustics and Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Study shows that unegligible mass exchange does exist on the wall of acoustic cavitation bubble, but present study mainly focuses on violently pulsant acoustic cavitation bubble. We levitate nonviolently pulsant acoustic cavitation bubble (static acoustic cavitation bubble) using Bjerkes force of standing acoustic field, and study the mass exchange characteristic between liquid and gas on the bubble's wall. With the experiments result, we analysis the impact of acoustic pressure, gas species, liquid viscosity, liquid surface tension and liquid volatility on the mass exchange characteristic of static acoustic cavitation bubble. Furthermore, we provide a method to measure the gas-liquid mass transfer characteristic.

static acoustic cavitation bubble, mass exchange, acoustic levitation

PACS: 43.35.+d, 47.55.dd

doi: 10.1360/132011-627