

# 激光成像技术在气泡生成行为研究中的应用

姜韶堃<sup>1</sup>, 范文元<sup>1</sup>, 朱春英<sup>1</sup>, 马友光<sup>1</sup>, 李怀志<sup>2</sup>

(1. 天津大学化工学院化学工程联合国家重点实验室, 天津 300072;

2. Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, CNRS-ENSIC-INPL, 1, Rue Grandville, BP 451, 54001 Nancy Cedex, France)

**摘要:** 针对液相中单喷嘴的气泡生成过程, 采用激光成像技术结合电荷耦合器件(Charge Coupling Device, CCD)摄像机照相方法研究了甘油水溶液中的气泡生成行为, 结果表明该法能够获得清晰的二维气泡放大图像. 考察了溶液浓度、气室体积、喷嘴直径和气体流量对气泡分离体积的影响, 发现气泡分离体积分别随着溶液浓度和气室体积的增大而增大; 在所研究的喷嘴直径(1, 1.5 和 2 mm)范围内, 气泡分离体积随着喷嘴直径的增大而减小; 气体流量对气泡分离体积的影响与喷嘴直径有关, 当喷嘴直径为 1 和 1.5 mm 时, 气泡分离体积随着气体流量的升高而增大, 但当喷嘴直径为 2 mm 时, 气泡分离体积随着气体流量的升高先减小后增大.

**关键词:** 激光成像; 气泡生成; 甘油; 气室; 喷嘴

**中图分类号:** TQ021

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-606X(2008)01-0013-05

## 1 前言

流体中的气泡生成行为一直是国内外研究的热点, 气泡的生成行为在气液接触、气液分离、气体吸收、沸腾、鼓泡塔、发酵和气蚀等领域内都起着重要作用, 对气泡生成行为的研究有助于更好地掌握和控制这些过程及现象的产生. Marmur 等<sup>[1]</sup>对非粘性液体中的气泡生成进行了理论研究, 详细讨论了气体流量和气室体积的影响作用; Loubière 等<sup>[2]</sup>则着重研究了非粘性液体中不同柔性膜孔洞的气泡生成情况, 并结合柔性膜的弹性行为和润湿性特征建立了气泡生成理论模型; 对于粘性液体, 在常流速条件下, Snabre 等<sup>[3]</sup>建立了半经验球形气泡生成模型, 考察了流体粘度、气体流量、喷嘴直径和液位高度对气泡生成的影响; 关于润湿条件下气-液-喷嘴处接触角对气泡生成的影响也有广泛研究<sup>[4-6]</sup>; 喷嘴漏液现象在气泡生成过程中也频繁出现, Zhang 等<sup>[7]</sup>采用奥森修正势流理论对这一现象做了详细研究, 建立了用于预测气泡体积、漏液速率和漏液点的理论模型; Xiao 等<sup>[8]</sup>考察了容器的器壁效应和气泡之间的相互作用对气泡生成的影响, 采用势流理论和气泡尾流压力分析进行了理论研究; Valencia 等<sup>[9]</sup>和 Yang 等<sup>[10]</sup>分别采用流体体积法(Volume of Fluid, VOF)和 Lattice Boltzmann 方法对气泡生成过程进行了模拟; 此外, 关于非牛顿流体中气泡生成行为的理论和实验研究也有报道<sup>[11-15]</sup>. 尽管在气泡生成方面已有大量的理论和实验成果, 但对气泡生成行为的具体机理仍然没有完全掌握, 还需开展更深层次的研究.

对气泡的直观捕捉是对气泡生成行为研究中的重要组成部分, 是研究气泡生长过程中形状和体积变化的重要手段, 国内外众多学者多采用 CCD 摄像机直接拍照将气泡生成过程采集下来. 本工作重点从实验方法上进行改进, 采用激光成像技术结合 CCD(Charge Coupling Device, 电荷耦合器件)摄像机进行测量, 该方法相对于前人的实验手段具有明显的优点, 即可以轻易得到清晰放大的物像, 并且不出现失真现象.

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示. 该装置包括一个带有恒温水浴夹套的方形有机玻璃槽(0.15 m×0.15 m×0.30 m), 槽内盛有一定浓度的甘油水溶液. 实验所用气体为氮气, 通过调节转子流量计至一恒定流量, 气体经气室通过位于槽内中央浸没于液体中的喷嘴逐个产生气泡. 本实验分别考察了不同直径喷嘴(分别为 1, 1.5 和 2 mm)和不同体积气室(分别为 30, 90 和 270 cm<sup>3</sup>)对应的气泡生成行为. 所有实验均在恒定温度 293.15 K 完成.

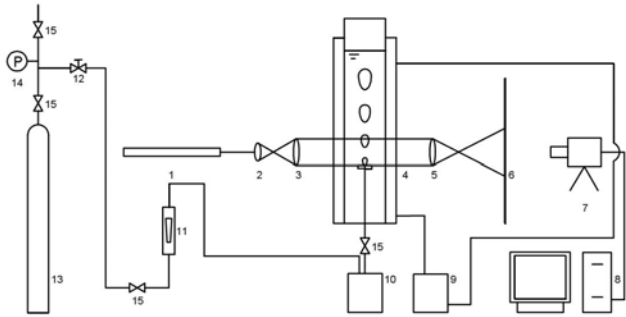
激光成像装置光路系统中, He-Ne 激光器产生的点光束经扩束镜、准直镜形成光强均匀的平行光, 再通过有机玻璃槽喷嘴位置和有机玻璃槽另一端的透镜, 在毛玻璃上得到清晰放大的物像, 该物像由 CCD 摄像机采集并及时传送到计算机中保存, 采用数字图像分析方法计算气泡体积. 本实验所采用 He-Ne 激光器功率为 40 mW, 足以克服光路中光损对测量的影响. 实验过程中, 整个光路均严格平行于水平操作台, 激光经扩束镜扩束后, 通过准直镜的光必须严格平行, 保持物像中气泡位

收稿日期: 2007-03-15, 修回日期: 2007-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 20476073); 高等学校学科创新引智计划基金资助项目(编号: B06006)

作者简介: 姜韶堃(1980-), 男, 河北省三河市人, 博士研究生, 化学工程专业; 马友光, 通讯联系人, Tel: 022-27404772, E-mail: ygma@tju.edu.cn.

置处于光斑中心, 有利于图像采集; 有机玻璃槽的透光面正交于通过玻璃槽的平行光束; 确定有机玻璃槽和毛玻璃的位置后, 调节透镜在二者之间的位置, 即可得到不同放大倍数的清晰物像。



- 1. He-Ne laser
- 2. Spatial filter
- 3. Collimator
- 4. Plexiglass square tank
- 5. Lens
- 6. Frosted glass
- 7. CCD camera
- 8. Personal computer
- 9. Thermostatic water bath
- 10. Chamber
- 11. Rotameter
- 12. Pressure maintaining valve
- 13. Compressed nitrogen cylinder
- 14. Manometer
- 15. Valves

图1 实验装置流程示意图

Fig.1 Schematic representation of experimental apparatus

### 3 气泡生长过程采集

尽管采用 CCD 摄像机直接对气泡进行拍摄也能够反映出气泡的生长过程, 但是通过这种传统方法得到的图像往往只能反映气泡实物大小, 而不能显示出细小环节的变化, 若要得到气泡的直观放大描述, 要么借助昂贵的变焦镜头配合相应的光源完成, 要么在图像后处理时采用特定的软件对图像进行放大降噪处理, 但会造成图像与实际物体之间的偏差, 因此这两种措施都存在各自相应的弊端. 采用激光成像技术结合 CCD 拍摄方法, 即直接用 CCD 摄像机拍摄由激光成像得到的放大物像, 照相结果不用再经过放大降噪处理就显示出细小环节的变化。

图2为气泡生长过程的实际照相结果, 考虑到篇幅限制, 将每一幅照片都进行了等比例缩小处理.  $D_o$ ,  $V_c$ ,  $Q_g$  和  $\Delta t$  分别表示喷嘴直径、气室体积、气体流量和时间间隔. 从图可以看出, 生成过程中气泡是关于中心轴对称的, 因此计算气泡体积时在气泡图像边缘取若干点, 将气泡图像分成数个梯形, 计算每个梯形对应的圆台体积, 累积求和得到气泡体积. 为了验证激光成像照相技术的准确性, 采用已知体积不锈钢小球沉降实验来进行验证, 按照以上方法计算小球体积, 结果表明小球计算体积与实际体积之间误差非常小。

与文献<sup>[16,17]</sup>中的图像效果相比, 自建的激光成像采集系统能够直观清晰反映气泡从开始到与喷嘴分离时的形状和体积变化: 在气泡生长初始阶段, 气泡由径向

和纵向生长, 逐渐变形偏离最初的半球形状. 结合图3可以看出, 在这一阶段, 气泡体积增长较慢; 紧接着, 气泡生长前期至中期, 气泡继续径向和纵向生长, 从图2可以看出气泡径向变化非常明显, 偏离半球形状的程度进一步加大, 这一阶段体积迅速增加; 从气泡生长中期至后期, 气泡径向变化大幅度减小, 而纵向拉长逐渐占据主导地位, 气泡上部逐渐由非球形向球形过渡, 这一阶段气泡体积增长速率明显小于上一阶段; 在气泡与喷嘴分离时刻, 气泡呈现出反泪滴形状, 并且在狭窄短小的气泡颈部以上显示出完美的球形形状. 气泡生成过程中气泡体积随时间的变化与文献<sup>[16,18,19]</sup>具有相同的变化趋势, 只是由于实验物系和实验装置的差异造成在具体数值上有所不同. 体积计算的准确性以及气泡图像的清晰效果都表明本工作提出的激光成像照相技术应用于气泡生成研究是可行的, 相对于传统照相技术具有很强的优越性。

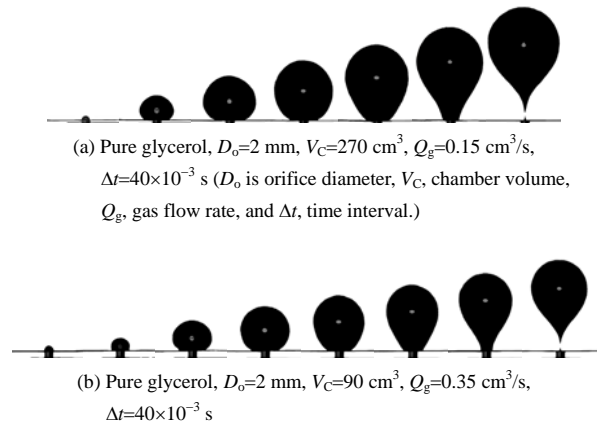


图2 不同时刻气泡形状图像

Fig.2 Bubble shape variation at different times

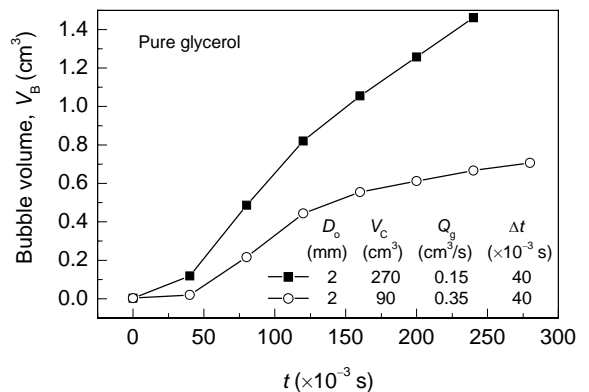


图3 气泡生长过程中气泡体积变化

Fig.3 Bubble volume ( $V_B$ ) change during bubble growing process

### 4 实验结果

实验过程中分别采用 97%( $\omega$ )和 98.5%( $\omega$ )的甘油水

溶液和纯甘油作为研究对象, 3 种溶液的粘度值都在 700 mPa·s 以上<sup>[20]</sup>, 远大于水的粘度, 并且随着浓度的增大而增大, 粘度增大直接导致气泡在生成过程中受到的粘性阻力增大, 有效地阻止了气泡与喷嘴的分离, 延长气泡的生长时间, 这样在气泡生长过程中进入气泡的气体体积相应增大, 使气泡体积增大, 如图 4 所示. Martín 等<sup>[21]</sup>从气泡生长过程中气泡周围的流动形态出发研究了溶液浓度对气泡体积的影响, 发现紧贴气液界面外层的液

相速度等于内层气相速度, 方向由气泡顶部沿着气泡边缘直至喷嘴, 当该液相流线达到气-液-喷嘴位置时, 流线产生的动压力引发气泡颈的形成, 溶液浓度升高即粘度升高导致液相流线中粒子运动速率降低, 动压力升高速率变慢, 因此在气-液-喷嘴位置处的动压力升高到足以切断气泡颈之前, 气泡将继续增大而不会与喷嘴分离, 从而使气泡分离体积相应增大.

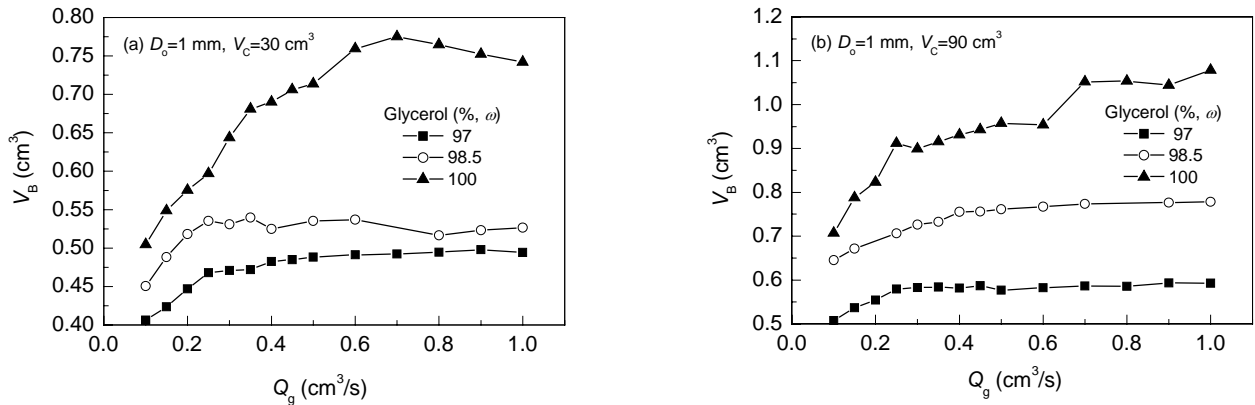


图 4 甘油溶液浓度对气泡分离体积的影响

Fig.4 Effect of gas volumetric flowrate ( $Q_g$ ) on bubble volume under different glycerol concentrations

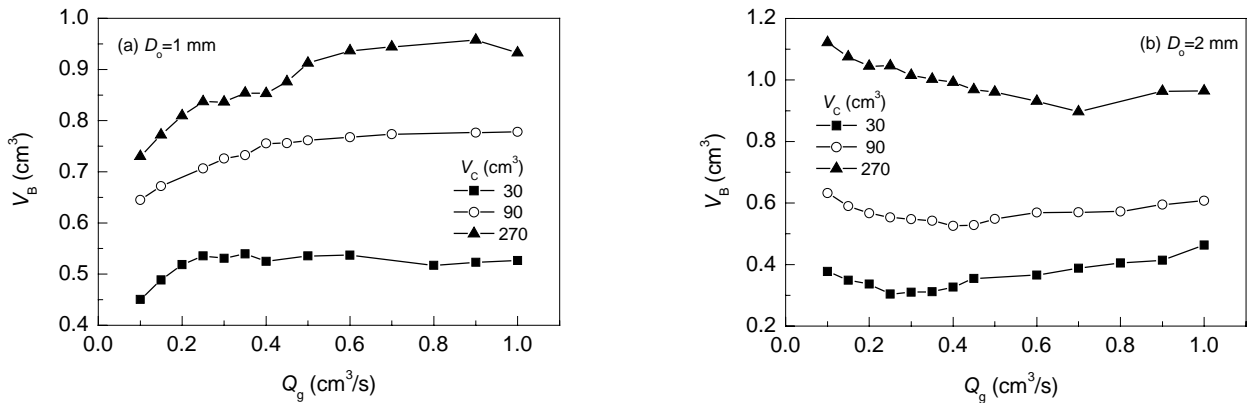


图 5 98.5% 甘油水溶液中气室体积对气泡分离体积的影响

Fig.5 Effect of gas volumetric flowrate on bubble volume under different chamber volumes in 98.5% ( $\omega$ ) glycerol aqueous solution

实验过程中气室内压力并不是恒定的, 而是在一定范围内波动, 随着气室体积的增大, 这种波动逐渐减小, 当气室增大到一定体积时, 气室内压力趋于恒定, 此时气泡分离体积不再受到气室大小的影响. 本实验所采用气室的体积均较小, 气室内压力波动不可忽略. 随着气室体积增大, 气室内压力梯度逐渐降低, 从而导致气泡生成推动力相应增大, 使气泡随着气室的增大而增大, 如图 5 所示. Xiao 等<sup>[8]</sup>对气室内压力进行了测量, 发现气室压力先逐渐升高, 再迅速降低, 然后再逐渐升高, 如此周期性重复. Park 等<sup>[22]</sup>采用空气-水物系对不同体积气室内的压力变化做了专门研究, 将气泡生成过程分

成快速自发生长和缓慢生长两个阶段. 对于小气室, 气室压力也经历周期性变化, 在一个周期内, 气室压力首先缓慢线性增加到一定值, 这一阶段对应于等待时期, 即没有气泡生成; 紧接着, 气室压力瞬间迅速降低, 对应于气泡快速自发生长阶段; 最后, 气室压力经历一个缓慢降低过程, 直至气泡与喷嘴分离, 即气泡缓慢生长阶段. 随着气室体积的增大, 气泡生成过程逐渐由快速自发生长控制, 缓慢生长阶段逐渐变短, 即气室压力变化幅度相应减小, 文献[16]的实验也表示出了这一变化过程, 随着气室体积的增大, 气泡在快速自发生长阶段迅速增大, 而在缓慢生长阶段气泡生长速率也略有增

加, 因此气泡体积会随着气室增大而增大。

图6为喷嘴直径与气泡分离体积之间的关系, 随着喷嘴直径的增大, 气泡体积反而减小, 这与文献<sup>[16]</sup>报道的结果截然不同, 产生这种现象可能是由于本实验中所采用的喷嘴材质和结构差异造成的. Hayes等<sup>[23]</sup>指出, 当喷嘴面积与喷嘴所在平板的面积比大于3%时, 喷嘴就不是实际意义上的喷嘴了, 而是按照喉管方式进行工作, Lin等<sup>[24]</sup>还认为喷嘴所在的平板材质对气泡生成行

为有很大的影响. 本工作所用喷嘴由在厚度1 cm的有机玻璃板上钻孔而成, 与其他文献中的喷嘴结构比较, 喷嘴平板材质、喷嘴材质、喷嘴的钻孔深度以及喷嘴与气室的连接方式都不完全相同, 再加上本工作所采用的甘油溶液的表面张力作用, 导致气泡生成过程中气泡与平板之间的相互作用与文献不同, 而且本工作只考察了低气体流量范围内的气泡生成行为, 这些可能是造成本工作实验结果与文献不一致的原因。

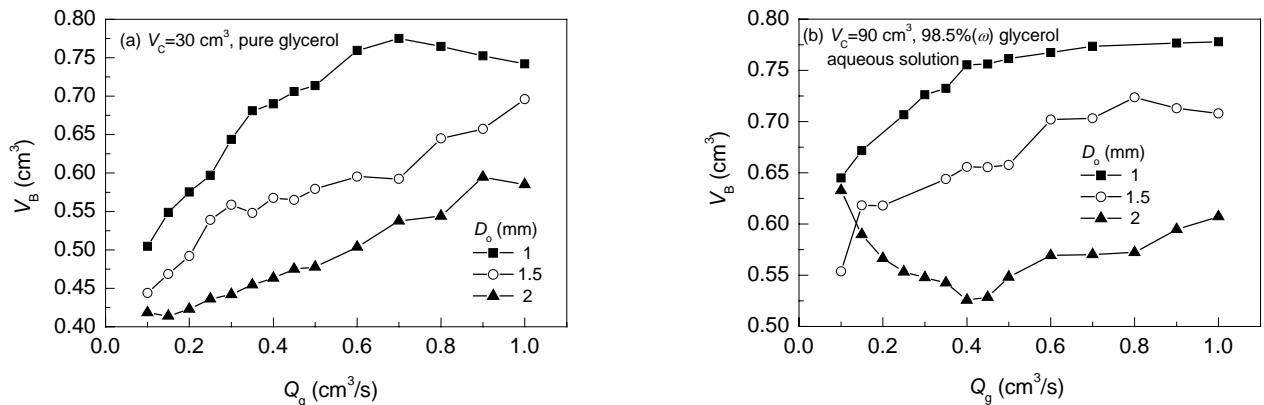


图6 喷嘴直径对气泡分离体积的影响

Fig.6 Effect of gas volumetric flowrate on bubble volume under different orifice diameters

从图4~6可以看出, 气体流量对气泡分离体积的影响与喷嘴直径有关, 当喷嘴直径分别为1和1.5 mm时, 气泡分离体积都随着气体流量的升高而增大; 但是当喷嘴直径为2 mm时, 图5(b)和图6(a)中气泡分离体积明显存在最小值, 气泡分离体积先随着气体流量的升高而减小, 达到最小值后再增大, 这与前人<sup>[16]</sup>报道的结果不同, 原因可能在于本工作所用气体流量范围低于文献, 此外实验装置材质和结构上的差异也可能导致这种现象的发生。

## 5 结论

将激光成像技术应用于甘油溶液中浸没喷嘴单气泡生成行为的研究, 得到以下主要结论:

(1) 采用自建激光成像装置结合 CCD 摄像机在线采集技术, 获得了清晰的二维气泡放大图像, 可准确反映气泡生成过程气泡形状和体积的变化。

(2) 气泡分离体积分别随着甘油溶液浓度和气室体积增大而增大. 在本工作所考察的喷嘴直径范围(1, 1.5和2 mm)内, 增大喷嘴直径, 气泡分离体积减小。

(3) 气体流量对气泡分离体积的影响与喷嘴直径有关, 当喷嘴直径为1和1.5 mm时, 气泡分离体积随着气体流量的升高而增大, 但当采用直径为2 mm的喷嘴时, 随着气体流量的增大, 气泡分离体积先减小后增大。

## 参考文献:

- [1] Marmur A, Rubin E. A Theoretical Model for Bubble Formation at an Orifice Submerged in an Inviscid Liquid [J]. Chem. Eng. Sci., 1976, 31(6): 453-463.
- [2] Loubière K, Hébrard G. Bubble Formation from a Flexible Hole Submerged in an Inviscid Liquid [J]. Chem. Eng. Sci., 2003, 58(1): 135-148.
- [3] Snabre P, Magnifotcham F I. Formation and Rise of a Bubble Stream in a Viscous Liquid [J]. Eur. Phys. J. B, 1998, 4(3): 369-377.
- [4] Gnyloskurenko S V, Byakova A V, Raychenko O I, et al. Influence of Wetting Conditions on Bubble Formation at Orifice in an Inviscid Liquid: Transformation of Bubble Shape and Size [J]. Colloids Surf. A, 2003, 218(1/3): 73-87.
- [5] Byakova A V, Gnyloskurenko S V, Nakamura T, et al. Influence of Wetting Conditions on Bubble Formation at Orifice in an Inviscid Liquid: Mechanism of Bubble Evolution [J]. Colloids Surf. A, 2003, 229(1/3): 19-32.
- [6] Corchero G, Medina A, Higuera F J. Effect of Wetting Conditions and Flow Rate on Bubble Formation at Orifices Submerged in Water [J]. Colloids Surf. A, 2006, 290(1/3): 41-49.
- [7] Zhang W X, Tan R B H. A Model for Bubble Formation and Weeping at a Submerged Orifice [J]. Chem. Eng. Sci., 2000, 55(24): 6243-6250.
- [8] Xiao Z Y, Tan R B H. A Model for Bubble-Bubble and Bubble-Wall Interaction in Bubble Formation [J]. AIChE J., 2006, 52(1): 86-98.
- [9] Valencia A, Cordova M, Ortega J. Numerical Simulation of Gas Bubbles Formation at a Submerged Orifice in a Liquid [J]. Int. Commun. Heat Mass Transfer, 2002, 29(6): 821-830.
- [10] Yang Z L, Dinh T N, Nourgaliev R R, et al. Numerical Investigation

- of Bubble Growth and Detachment by the Lattice-Boltzmann Method [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2001, 44(1): 195–206.
- [11] Terasaka K, Tsuge H. Bubble Formation at Orifice in Viscoelastic Liquids [J]. *AIChE J.*, 1997, 43(11): 2903–2910.
- [12] Li H Z. Bubbles in Non-Newtonian Fluids: Formation, Interactions and Coalescence [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 1999, 54(13/14): 2247–2254.
- [13] Li H Z, Mouline Y, Midoux N. Modelling the Bubble Formation Dynamics in Non-Newtonian Fluids [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2002, 57(3): 339–346.
- [14] Terasaka K, Tsuge H. Bubble Formation at a Single Orifice in Non-Newtonian Liquids [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 1991, 46(1): 85–93.
- [15] Terasaka K, Tsuge H. Bubble Formation at a Nozzle Submerged in Viscous Liquids Having Yield Stress [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2001, 56(10): 3237–3245.
- [16] Terasaka K, Tsuge H. Bubble Formation at a Single Orifice in Highly Viscous Liquids [J]. *J. Chem. Eng. Japan*, 1990, 23(2): 160–165.
- [17] Zhang L, Shoji M. Aperiodic Bubble Formation from a Submerged Orifice [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2001, 56(18): 5371–5381.
- [18] Kupferberg A, Jameson G J. Bubble Formation at a Submerged Orifice above a Gas Chamber of Finite Volume [J]. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 1969, 47: 241–250.
- [19] LaNauze R D, Harris I J. Gas Bubble Formation at Elevated System Pressure [J]. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 1974, 52: 337–348.
- [20] The Dow Chemical Company. OPTIM Glycerine: Resources [DB/OL]. <http://www.dow.com/glycerine/resources/dwnlit.htm>, 2003–10–24.
- [21] Martín M, Montes F J, Galán M A. The Influence of the Liquid Physical Properties on Bubble Volumes and Generation Times [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2006, 61(16): 5196–5203.
- [22] Park Y J, Tyler A L, Nevers N. The Chamber Orifice Interaction in the Formation of Bubbles [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 1977, 32(8): 907–916.
- [23] Hayes B W, Harley B W, Holland C D. Formation of Gas Bubbles at Submerged Orifices [J]. *AIChE J.*, 1959, 5(3): 319–324.
- [24] Lin J N, Banerji S K, Yasuda H. Role of Interfacial Tension in the Formation and the Detachment of Air Bubbles: 1. A Single Hole on a Horizontal Plane Immersed in Water [J]. *Langmuir*, 1994, 10(3): 936–942.

## Formation Behavior of Gas Bubbles with Laser Image Visualization Technique

JIANG Shao-kun<sup>1</sup>, FAN Wen-yuan<sup>1</sup>, ZHU Chun-ying<sup>1</sup>, MA You-guang<sup>1</sup>, LI Huai-zhi<sup>2</sup>

(1. State Key Lab. Chem. Eng., School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, CNRS-ENSIC-INPL, 1, Rue Grandville, BP 451, 54001 Nancy Cedex, France)

**Abstract:** Laser image visualization technique, combined with photographing method by charge coupling device, has been employed to study single bubble formation at a submerged orifice in glycerol aqueous solution. The photographs show that magnified two-dimensional bubble images have been obtained clearly. The effects of solution concentration, chamber volume, orifice diameter and gas volumetric flowrate on bubble volume are investigated experimentally. It is found that bubble volume increases with solution concentration and chamber volume, respectively, and decreases with the increase of orifice diameter in the range of 1, 1.5 and 2 mm. The effect of gas volumetric flowrate on bubble volume is related to orifice diameter. Bubble volume increases with gas volumetric flowrate when using the orifices with the diameters of 1 and 1.5 mm, respectively, but employing the orifice with the diameter of 2 mm, bubble volume decreases first, and then increases.

**Key words:** laser image; bubble formation; glycerol; chamber; orifice