

表面活性剂对中尺度气泡形状及速度的调控研究

刘艳艳, 李彦鹏, 朱婷婷

(长安大学环境科学与工程学院, 710064, 西安)

摘要: 为了有效调控中尺度气泡的行为,在纯水中通过添加不同浓度的 3 种表面活性剂实验研究了气泡上升过程中的形状与速度的变化.在一个方截面柱形容器内生成了 4 种中尺度气泡,再利用高速摄影仪记录了气泡的瞬时运动过程,通过图像处理软件分析了气泡的形状和速度.结果表明,由于 Marangoni 效应,适量的表面活性剂可以有效抑制中尺度气泡的变形,减小气泡的形状变化幅度,降低气泡的上升速度.相比于纯水,当曲拉通的浓度为 0.15 mmol/L 时,气泡高宽比的变化幅度缩减了 57%;当曲拉通的浓度为 0.05 mmol/L 时,气泡终端上升速度降低了 35%.实验中还发现,气泡的形状变化影响着气泡的瞬时速度,气泡高度比越小,上升得越快.在实验条件范围内,不同表面活性剂对气泡的调控效果有所不同,曲拉通的调控效果优于聚乙二醇和正戊醇.

关键词: 表面活性剂;中尺度气泡;气泡调控;高速摄影

中图分类号: TK124;O363 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)10-0093-05

Study on Modulating Shape and Velocity of Meso-Scale Bubble Using Surfactants

LIU Yanyan, LI Yanpeng, ZHU Tingting

(School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Experiments were conducted on the variations of shape and velocity of single bubbles during rising in three types of surfactant solutions with different concentration in order to effectively modulate the behavior of meso-scale bubbles in bubbly flow. Single bubbles with the size of 1.3-6 mm were generated in a square glass column, and the instantaneous motion of single bubbles was recorded using a high-speed camera. Then bubble shape and velocity were determined from the recorded frames using the image analysis software. The results show that the right concentration of surfactants used here would dampen bubble deformation, reduce shape oscillation amplitude and slow down the bubble rise velocity significantly due to the Marangoni effect. The addition of 0.15 mmol/L Triton X-100 would reduce the oscillation amplitude of the bubble aspect ratio by 57% while the addition of 0.05 mmol/L Triton X-100 would lower the terminal velocity of bubbles by 35% compared with those in pure water. Moreover, The bubble shape oscillation would influence the bubble transient velocity. It seems that under the present experimental conditions, the modulation effect of the addition of different types of surfactants on meso-scale bubble behavior is quite different. The addition of Triton X-100 has stronger effect on the modulation than the addition of Polyethylene glycol or n-Pentanol.

Keywords: surfactant; meso-scale bubble; bubble modulation; high-speed photography

气液两相泡状流广泛存在于能源、动力和化工等工程领域. 系统中的气体通常以气泡的形式分散在液体中, 其在上升过程与周围气泡和液流发生作用, 从而影响系统的传质、传热或反应特性. 因此, 深入研究气泡的界面动力学特征和控制气泡行为的方法对系统的高效运行具有重要意义.

近年来, 各国学者对气泡的生成与上升行为以及系统操作参数和物性参数对气泡行为的影响进行了大量研究, Kulkarni 等^[1]和 Clift 等^[2]分别综述了该领域研究所取得的进展. 在此基础上, 国内外学者尝试使用电场^[3]、机械振动^[4]和声场^[5-6]等物理方法来调控气泡行为. 由于采用外加力场需增加能量输入设备, 由此增加了系统的能耗, 导致了系统的复杂化, 因此近来采用物理化学的方法来调控气泡受到了越来越多学者的广泛关注. Finch 等^[7-8]研究了浮选柱中起泡剂对气泡尺寸及分布的影响, 结果表明, 起泡剂(表面活性剂)可以有效控制气泡的大小, 促进泡沫的形成. Krzan 等^[9]研究了表面活性剂下气泡的局部和终端速度的变化, 并指出表面活性剂可以明显降低气泡的速度. Takagi 等^[10]探讨了表面活性剂对泡状流动结构的影响, 发现表面活性剂可以引起气泡的横向迁移. 杜建伟等^[11]研究了表面活性剂对甲烷生成速率和储气密度的影响. 上述研究主要针对的是直径小于 1 mm 的小气泡, 此时的气泡变形很小, 而实际中广泛存在着直径为 1.3~6 mm 的中尺度气泡, 其在表面张力起主导作用下的变形行为不能忽略. 表面活性剂对中尺度气泡的速度和变形的影响势必与小气泡的有所不同, 目前这方面的研究仍然较少. 鉴于此, 本文采用高速摄影技术记录了 3 种表面活性剂在不同浓度条件下的中尺度气泡的上升运动, 并通过图像处理软件分析了气泡的变形与速度, 探索了用表面活性剂调控中尺寸气泡行为的效果.

1 实验装置与方法

实验装置如图 1 所示. 该装置包括一个方截面柱形有机玻璃容器(150 mm×150 mm×1 000 mm), 容器内盛有高度为 500 mm 的纯净水. 实验所用气体为空气, 由蠕动泵提供. 空气通过转子流量计、经位于容器内中央浸没于液体中的喷嘴产生气泡. 实验中表面活性剂分别是曲拉通、正戊醇和聚乙二醇, 中尺度气泡(4 种尺度)是通过采用不同内径的喷嘴生成的. 为了保证气泡在稳定状态下的运动与实验一致, 测试均在静止液体中及避免周围扰动

下进行, 所有实验均在室温 20 ± 1 °C 下完成.

由高速摄影仪(MS 75K, Mega Speed)拍摄气泡运动, 并通过千兆数据线将数据传送到计算机, 最终由图像处理软件 AVI Player 进行逐帧分析. 分析中, 气泡特征尺寸是由气泡处于同一焦平面的标尺刻度与像素点距离的比值来确定. 为了优化拍摄效果, 白色漫反射板将配合金属卤化灯(DCI-2000)一起使用, 以使光在容器中均匀分布, 从而避免气泡表面反光. 为了提高数据分析的可靠性, 每一实验条件均重复拍摄 3 次, 取其平均值作为计算所需参数.

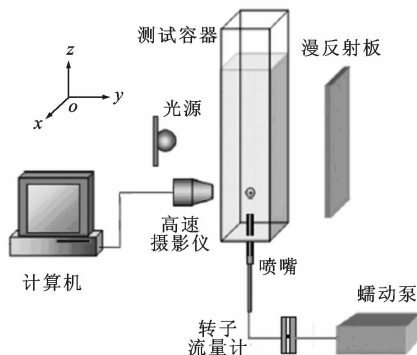


图1 实验装置示意图

气泡的瞬时速度和局部速度定义如下

$$U = \frac{((z_{i+1} - z_i)^2 + (x_{i+1} - x_i)^2)^{1/2}}{t_{i+1} - t_i} \quad (1)$$

$$U_b = \frac{((z_i - z_0)^2 + (x_i - x_0)^2)^{1/2}}{t_{i+1} - t_0} \quad (2)$$

式中: (x_{i+1}, z_{i+1}) 、 (x_i, z_i) 和 (x_0, z_0) 分别表示气泡质心在时刻 t_{i+1} 、 t_i 和初始时刻 t_0 的位置.

中尺度气泡的形状通常为椭球形, 这里参照前人的处理方法^[8-9], 分别采用当量直径 d_{eq} 和高宽比 χ 表示气泡大小和气泡变形程度

$$d_{eq} = (d_v d_h^2)^{1/3} \quad (3)$$

$$\chi = d_v / d_h \quad (4)$$

式中: d_v 和 d_h 分别表示气泡在平行和垂直于运动方向上的直径, 由图像处理软件得到.

2 结果与讨论

2.1 表面活性剂对气泡形状的调控

图 2 比较了在纯水和浓度为 0.15 mmol/L 的曲拉通溶液中气泡上升初期形状变化的可视化结果. 图中照片序列的时间间隔是 10 ms, 采用的喷嘴直径为 2.2 mm, 生成气泡的当量直径约为 4.4 mm. 从图 2 可以看到: 在纯水中气泡脱离喷嘴后呈现近似球形—球帽形—扁椭球形的变化过程; 在曲拉通溶液中气泡呈现出近似球形—球帽形—椭球形

的变化过程. 显然,当水中添加曲拉通时,气泡变形程度减小.

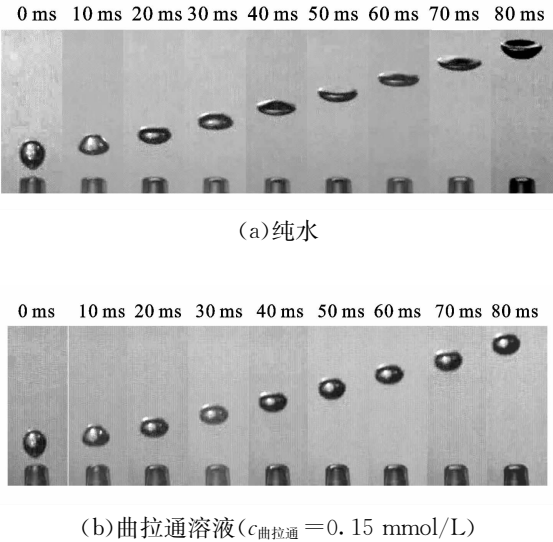


图 2 单个气泡上升过程中形状变化的可视化比较

为了定量比较气泡的变形程度,图 3 绘出了气泡高宽比随时间的变化. 从图 3 可以看到:纯水中气泡的高宽比由初始时段(0~45 ms)的 1.2 迅速降低至 0.2 后又在 0.2~0.9 范围内振荡;曲拉通溶液中气泡的高宽比由初始时段的 1.2 降至 0.6 后又在 0.6~0.9 范围内振荡,相比纯水的变形程度减小了 57%. 实验中使用正戊醇和聚乙二醇也得到了相似的趋势,表明在纯水中添加表面活性剂可以有效调控气泡的形状,抑制气泡变形. 根据文献[12]的气泡变形机理知,气泡上下表面的压差诱导出方向向上的射流,该射流挤压气泡底部,使得气泡形状趋向于椭圆. 在含有表面活性剂的非纯水中,气泡上升时受到了水流的作用,使得表面活性剂主要聚集在气泡底部,形成了表面张力梯度,从而生成所谓的 Marangoni 切应力^[10]. 该切应力与压差的作用反向,进而导致气泡变形的净作用力减小,最终起到了阻碍气泡变形的作用.

图 3 中一个需要注意的现象是,气泡在上升的最初时段(0~15 ms 内),其高宽比变化基本一致,说明此时段表面活性剂对气泡的变形影响很小. 也就是说,表面活性剂的吸附过程不是一蹴而就的,需要一段时间才能在气泡表面实现非均匀分布. 对于不同浓度的表面活性剂,这种现象也是存在的,如图 4 所示. 从图 4 可以看到,在 3 种不同浓度的曲拉通溶液中,气泡初始变形时的高宽比变化基本一致,大约 15 ms 后,高宽比变化出现异同. 从图 4 还可以看到,在实验浓度范围内增加表面活性剂浓度,气泡的

高宽比逐渐增大,气泡的变形程度逐渐缩小,但表面活性剂浓度增加到一定程度时,气泡的高宽比及变形程度趋于恒定. 这可能与气泡的吸附容量有关,需要进一步深入研究.

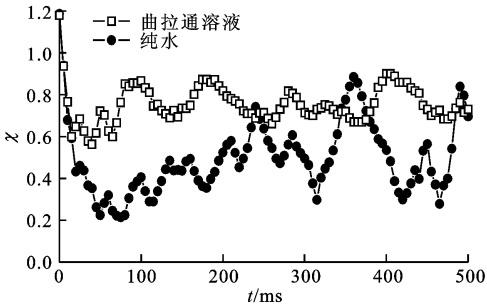


图 3 纯水与曲拉通水溶液中气泡高宽比随时间的变化

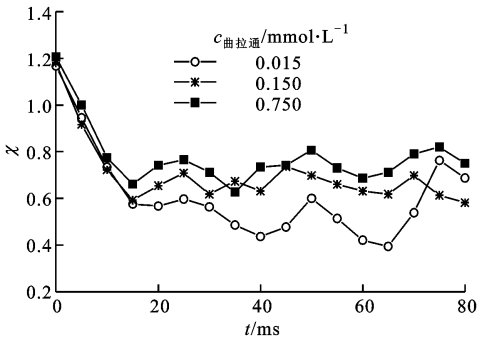


图 4 不同浓度的曲拉通溶液中气泡高宽比随时间的变化

2.2 气泡形状与瞬时速度的关系

最近有研究^[13]指出,纯水中气泡形状的变化与瞬时速度相关. 图 5 分别给出了直径为 4.4、3.6 mm 的气泡在曲拉通溶液($c_{\text{曲拉通}} = 0.15 \text{ mmol/L}$)中其高宽比和瞬时速度随时间的变化. 从图 5 发现:对于不同尺寸的中尺度气泡,当气泡高宽比的变化达到波峰时,气泡瞬时速度的变化接近波谷;当气泡高宽比的变化接近波谷时,气泡瞬时速度的变化达到波峰. 这说明,当上升气泡的形状接近球形时,瞬时速度小;当上升气泡的形状接近扁球形时,瞬时速度大. 显然,上升气泡的形状影响着气泡的瞬时速度,主要原因是气泡受到的附加质量力随气泡形状的改变而变化.

图 6 为气泡的瞬时速度与高宽比之间的关系. 图中数据取自图 5 中直径为 4.4 mm 的气泡在 20~100 ms 时的瞬时速度和高宽比. 从图 6 看出,气泡在上升过程中,高宽比相同的气泡其瞬时速度不一定相同. 这表明,气泡的瞬时速度除了与高宽比有关,还可能与流场的历史、表面活性剂的吸附动力特性有关,相关内容将在以后进一步研究.

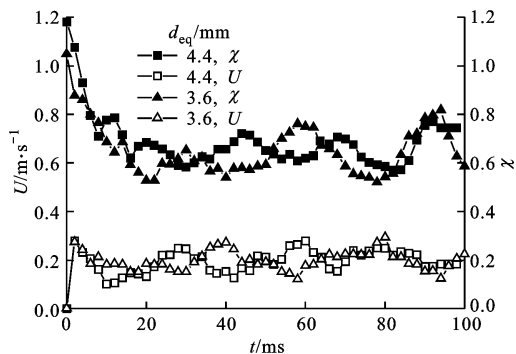


图5 气泡的瞬时速度、高宽比随时间的变化

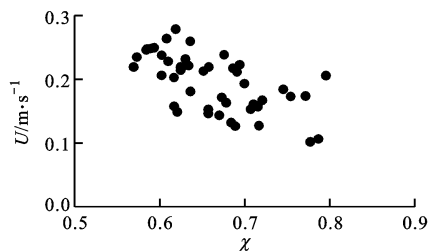


图6 气泡的瞬时速与高宽比的关系

2.3 表面活性剂对气泡速度的调控

图5中气泡瞬时速度的变化比较剧烈,利用它不能直接比较表面活性剂对气泡的终端上升速度的影响,所以下述的气泡速度采用式(2)定义的局部速度.图7为不同浓度的曲拉通溶液中气泡局部速度随时间的变化.这里采用的喷嘴直径为0.39 mm,生成的气泡直径为2.5 mm.从图7看出,在纯水中添加不同质量的曲拉通,气泡上升过程均呈现出初始加速和后期恒速(终端上升速度)两个阶段,但是各种曲拉通溶液中气泡的终端上升速度不尽相同.当 $c_{\text{曲拉通}}$ 由0增大到0.05 mmol/L时,气泡的终端上升速度由0.308 m/s剧减到0.20 m/s,减小的幅度为35%;当 $c_{\text{曲拉通}}$ 增加到1.8、3.6 mmol/L时,气泡的终端上升速度分别减小到0.183、0.180 m/s,减小的幅度分别为40%和41%.可见,用少量的表面活性剂可以减小气泡的终端上升速度,但是表面活性剂浓度增加到一定程度时,气泡的速度变化就不明显了.

实验还比较了不同浓度的正戊醇和聚乙二醇溶液中气泡局部速度随时间的变化,如图8所示.实验中的喷嘴直径与气泡大小同上文所述.对于正戊醇,当 $c_{\text{正戊醇}}$ 由0增大到3.6 mmol/L时,气泡的终端上升速度由0.308 m/s减小到0.244 m/s,减小的幅度为20.7%;对于聚乙二醇,当 $c_{\text{聚乙二醇}}$ 由0增大到3.6 mmol/L时,气泡的终端上升速度由0.308 m/s减小到0.243 m/s,减小的幅度为21.1%.图8表

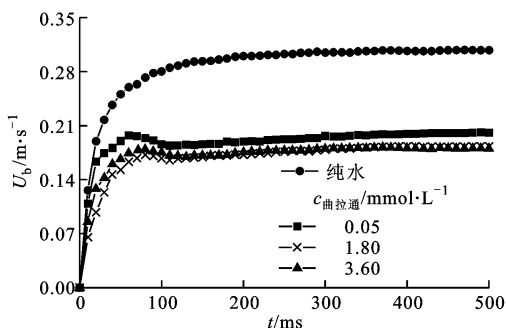
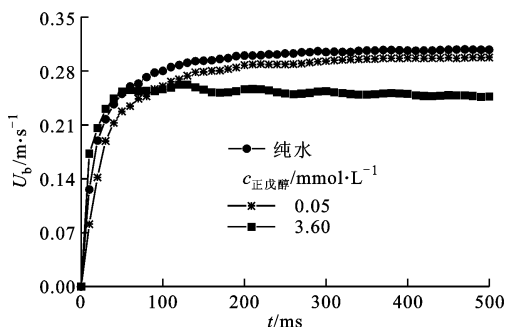
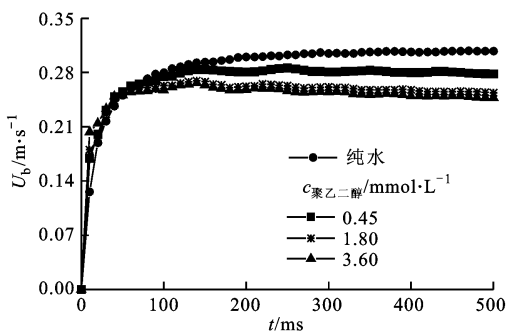


图7 不同浓度的曲拉通溶液中气泡速度的比较

明,在纯水中添加一定量的表面活性剂可以降低气泡的终端上升速度,但是不同的表面活性剂对速度的调控效果有强弱之分:曲拉通的调控效果强于聚乙二醇和正戊醇,而正戊醇、聚乙二醇二者的调控效果差别不大.添加表面活性剂降低气泡上升速度的原因也在于 Marangoni 效应.受表面活性剂“污染”的气泡存在着表面张力梯度诱导的表面切应力,使得气泡表面由柔性变为刚性,由此气泡的阻力增加,气泡的上升速度降低.



(a) 添加正戊醇



(b) 添加聚乙二醇

图8 不同浓度的2种表面活性剂中气泡速度的比较

本文实验还考察了4种中尺度气泡在 $c_{\text{曲拉通}} = 1.8 \text{ mmol/L}$ 时的终端上升速度,如图9所示.由图9可见,对于不同大小的中尺度气泡,其上升过程均包括初始加速和最终恒速两个阶段,但气泡的终端上升速度不尽相同,随着气泡直径的增加,气泡的终

端上升速度相应增大,这与 Clift 等^[2]的定性研究结果相似。

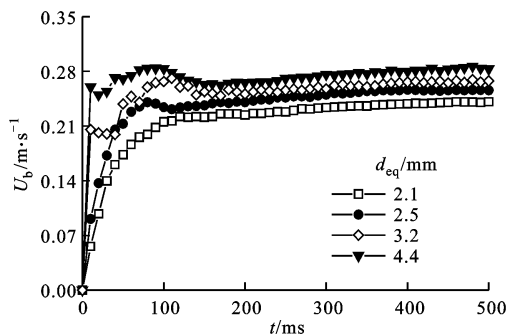


图 9 $c_{\text{曲拉通}} = 1.8 \text{ mmol/L}$ 时不同当量直径的气泡的终端上升速度比较

3 结 论

(1) 纯水中添加适量的表面活性剂可以有效调控中尺度气泡的形状,抑制气泡变形. 增加表面活性剂的浓度可使气泡的高宽比增大,但当浓度增加到一定程度时,气泡的高宽比及形状变化趋于恒定.

(2) 纯水中添加适量的表面活性剂可以有效降低中尺度气泡的上升速度. 相比于纯水, $c_{\text{曲拉通}} = 0.05 \text{ mmol/L}$ 时,气泡的终端上升速度减小了 35%, $c_{\text{正戊醇}}$ 和 $c_{\text{聚乙二醇}}$ 为 3.6 mmol/L 时,气泡的终端上升速度分别减小了 20.7% 和 21.1%. 显然,曲拉通的调控效果优于聚乙二醇和正戊醇.

(3) 上升气泡的形状影响着气泡的瞬时速度:当气泡形状接近于球形时,气泡瞬时速度减小;当气泡形状为椭圆时,气泡的瞬时速度增大.

(4) 对于本文的中尺度气泡,其在表面活性剂溶液中的直径越大,终端上升速度也越大.

参考文献:

- [1] KULKARNI A A, JOSHI J B. Bubble formation and bubble rise velocity in gas-liquid systems: a review [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2005, 44 (16): 5873-5931.
- [2] CLIFT R, GRACE J R, WEBER M E. Bubbles, drops, and particles [M]. 2nd ed. New York, USA: Academic Press, 2005.
- [3] TSUKADA T. The effect of EHD convection on motion of a bubble under microgravity [J]. Journal of Chemical Engineering, 1995, 28(6): 810-815.
- [4] ELLENBERGER J, KRISHNA R. Levitation of air bubbles in liquid under low frequency vibration excitation [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62

(18): 5669-5673.

- [5] CUI Zhe, LI Yanpeng, GE Yang, et al. Bubble modulation using acoustic standing waves in a bubbling system [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60 (22): 5971-5981.
- [6] 李彦鹏, FAN L S. 鼓泡塔中驻波声场调制大气泡的直接模拟 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2007, 15(2): 217-225.
- LI Yanpeng, FAN L S. Direct simulation of a large bubble modulation with an acoustic standing wave in a bubble column [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2007, 15(2): 217-225.
- [7] FINCH J A, NESSET J E, ACUNA C. Role of frother on bubble production and behavior in flotation [J]. Minerals Engineering, 2008, 21(12/13/14): 949-957.
- [8] KRACHT W, FINCH J A. Effect of frother on initial bubble shape and velocity [J]. International Journal of Mineral Processing, 2010, 94(3/4): 115-120.
- [9] KRZAN M, ZAWALA J, MALYSA K. Development of steady state adsorption distribution over interface of a bubble rising in solutions of n-alkanols and n-alkyltrimethylammonium bromides [J]. Colloids and Surfaces: A Physicochem Eng Aspects, 2007, 298(1/2): 42-51.
- [10] TAKAGI S, OGASAWARA T, MATSUMOTO Y. The effect of surfactant on the multiscale structure of bubbly flows [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society: A, 2008, 366(3): 2117-2129.
- [11] 杜建伟, 唐翠萍, 樊栓狮, 等. Span20 促进甲烷水合物生成的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42 (9): 1165-1168.
- DU Jianwei, TANG Cuiping, FAN Shuanshi, et al. Experimental investigation on Span20 promoting effect on methane hydrate formation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(9): 1165-1168.
- [12] 王焕然, 李彦鹏, 杨栋, 等. 粘性液体中单个气泡上升的形状特性 [J]. 工程热物理学报, 2009, 30(9): 1492-1494.
- WANG Huanran, LI Yanpeng, YANG Dong, et al. On the shape feature of a single bubble rising in viscous liquids [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30 (9): 1492-1494.
- [13] 何丹, 李彦鹏, 刘艳艳. 初始形状对浮升气泡动力特性的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(1): 6-10.
- HE Dan, LI Yanpeng, LIU Yanyan. Effect of initial bubble shape on the dynamics of a buoyancy-driven bubble [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(1): 6-10.

(编辑 苗凌)