

气泡生长及脱离过程中下边缘的迁移行为

耿佃桥^{1,2}, 张立安², 勾大钊², 雷洪^{1,2}

(1. 东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 基于高速摄像技术记录静止液体中气泡生长及脱离过程, 并采用 Image-Pro Plus 6.0 软件进行后处理, 研究了两种管径下气泡生长过程的形状变化。实验结果表明: 由于不同管径下气泡生长过程中起主导的作用力不同, 导致小管径生成气泡的高宽比随时间变化呈先陡后缓的上升趋势, 大管径生成气泡的高宽比随时间变化呈先缓后陡的上升趋势; 由于生长前期不满足脱离条件, 小管径生成的气泡会出现下边缘向液体侧迁移的现象; 大管径生成的气泡在气液面与固液面夹角小于接触角时即达到脱离条件, 因此不会出现迁移; 3.80 mm 气泡脱离上浮的临界高宽比稍大于 9.28 mm 气泡相应值。

关键词: 气液反应器; 气泡生长; 气泡脱离; 气泡形状

中图分类号: O 359

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2017)08-1098-04

Bubble Bottom Edge Migration Behavior During Bubble Growth and Detachment Process

GENG Dian-qiao^{1,2}, ZHANG Li-an², GOU Da-zhao², LEI Hong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: GENG Dian-qiao, E-mail: gengdianqiao@epm.neu.edu.cn)

Abstract: The bubble growth and detachment was recorded using a high speed video technology. The post-processing of photos was completed by Image-Pro Plus 6.0 software. The bubble shape variation during bubble growth under the condition of two kinds of different tube diameters was investigated. The experimental results show that the dominant force during bubble growth is different for different diameter tube. The increment of bubble aspect ratio from the small diameter tube with time is greater at first and then becomes smaller, while that from the large diameter one with time is firstly smaller and then greater afterward. Since the bubble detachment condition cannot be satisfied for the small diameter tube, the bubble bottom edge migrates towards liquid side. On the other hand, the bubble detachment condition can be reached for the large tube when the angle between gas-liquid line and solid-liquid line is smaller than the contact angle, therefore the bubble bottom edge cannot migrate towards liquid side. The critical bubble aspect ratio for detachment of 3.80 mm bubble is slightly larger than that of 9.28 mm bubble.

Key words: gas-liquid reactor; bubble growth; bubble detachment; bubble shape

气液两相流中的气泡相关现象广泛存在于自然界和工业生产中, 特别是各种工业反应器, 如鼓泡塔^[1-2]、废水处理装置^[3]、钢铁冶金中的底吹钢包^[4-5]、中间包气幕挡墙^[6], 以及吹气法制备泡沫金属材料^[7-8]等。气泡在液体中的大小、分布及上浮行为决定了气液两相的接触时间和接触面积,

研究气泡的形成、尺寸及上浮对于提高气液反应器效率有重要意义; 另一方面, 气泡的初始脱离状态对其后面上浮行为有重要影响, 因而气泡形成及其在液体中的上浮行为得到了国内外研究人员的广泛关注。影响气泡生成行为的主要参数有输气管内外孔径、接触角、气体流量等参数^[9]。

收稿日期: 2016-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51304038); 国家自然科学基金与宝钢联合资助项目(U1460108); 中国博士后科学基金特别资助项目(2015T80261)。

作者简介: 耿佃桥(1982-), 男, 山东淄博人, 东北大学副教授; 雷洪(1973-), 男, 湖北武汉人, 东北大学教授, 博士生导师。

已有研究对诸如气体流量、出气管材质和接触角对气泡生成过程的影响进行了研究,但多数研究未涉及到气泡生长过程中气泡下边缘的动态运动行为;然而气泡下边缘迁移行为直接影响气泡脱离直径的大小,对单孔条件下控制生成气泡的直径具有重要影响.因此,本文通过研究气泡动态生长及脱离过程的受力及高宽比变化规律,分析气泡生长过程中高宽比变化、接触角动态变化与受力的关系,并采用两种不同管径,生成两种不同大小的典型气泡,揭示了在不同管径条件下气泡下边缘会出现两种不同的运动迁移现象.

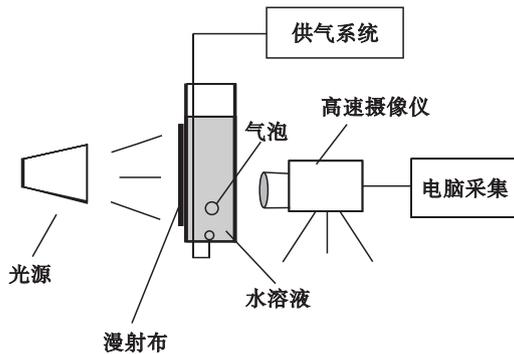


图 1 水模型实验装置

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

1 实验装置及方法

如图 1 所示,实验采用氮气瓶供气,通过减压阀、球阀、针阀、稳压器对气体流量进行调节,稳定气体压力.采用高速摄像机(型号 Ultima - Apx)搭配微距镜头对气泡生长过程进行拍摄,拍摄速度为 1 000 帧,采用 Image - Pro Plus 6.0 软件对拍摄照片进行分析处理.为提高气泡拍摄效果,采用 LED 光源和光漫散射幕布补光.本实验采用铜管向液体中吹入氮气,其内外径组合分别是 1.5 mm 和 3.0 mm,7.0 mm 和 10.0 mm,并对比分析其生长及脱离的行为.

2 结果分析及讨论

2.1 气泡生长过程

图 2 和图 3 为气泡生长过程微距图,其中图 2 生成气泡的当量直径为 3.80 mm,图 3 生成气泡的当量直径为 9.28 mm.使用 Image - Pro Plus 6.0 软件调节所拍摄照片的对比度及中间色调,时间可通过帧数计算得出.对比图 2 和图 3 可以看出,大孔径和小孔径生成的气泡都分别经历冒出、膨胀、纵向拉伸和孔口脱离等状态,即形成过程经历成核、成长、脱离三个过程.

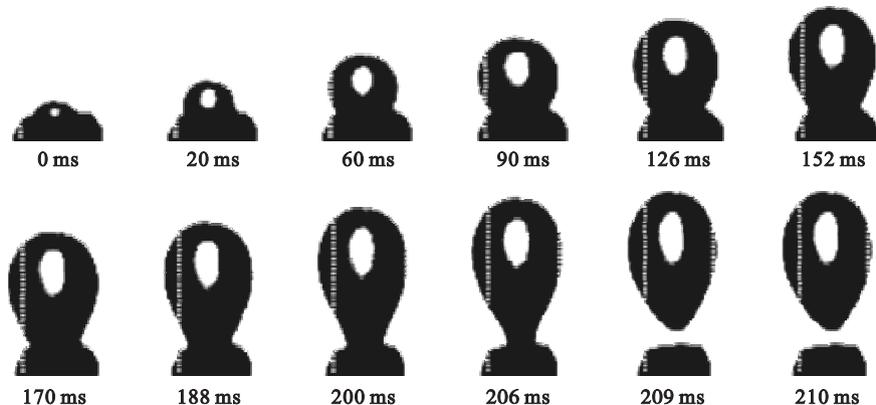


图 2 单孔铜管气泡生长过程(内径 1.5 mm,外径 3.0 mm)

Fig. 2 Bubble growth from a single copper tube (internal diameter 1.5 mm, external diameter 3.0 mm)

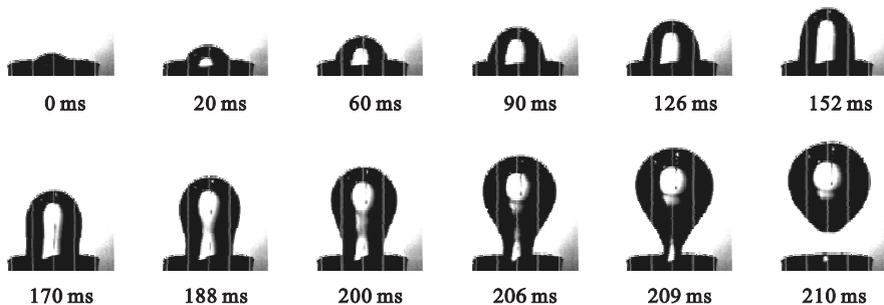


图 3 单孔铜管气泡生长过程(内径 7.0 mm,外径 10.0 mm)

Fig. 3 Bubble growth from a single copper tube (internal diameter 7.0 mm, external diameter 10.0 mm)

图 4 中横坐标为无量纲时间,选取 12 个时间点,分别与图 2 和图 3 的时间点对应.图 4 表明,小孔径铜管生成的气泡高宽比随时间逐渐增大,呈先陡再缓趋势;大孔径铜管生成的气泡高宽比随时间逐渐增大,呈先缓再陡趋势,且 3.80 mm 气泡最终脱离上浮的临界高宽比稍大于 9.28 mm 气泡的相应值.

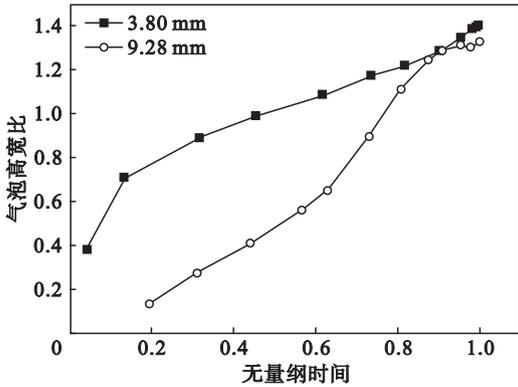


图 4 气泡生长过程高宽比随时间的变化

Fig. 4 Variation of bubble aspect ratio with time during bubble growth

2.2 气泡下边缘迁移过程

气泡在发生脱离之前,其下边缘与管壁面发生接触,出现固-气-液三相接触现象.如图 5 所示,气泡下边缘与内管径距离为 b ,设定管口内边缘为原点,向左迁移为负,向右迁移为正,采用 Image-Pro Plus 6.0 软件对迁移量进行测量.气泡生长过程中下边缘迁移量如图 6 所示:3.80 mm 与 9.28 mm 气泡的下边缘迁移距离绝对值都是先增大,保持平缓,突然下降;但 9.28 mm 气泡的迁移距离均为负值,即气泡下边缘在整个迁移过程中没有越过管口内径壁面;而 3.80 mm 气泡在长大过程中出现向液体侧凸出的现象.9.28 mm 气泡形成的内凹弧面是气液两相界面内凹造成的.

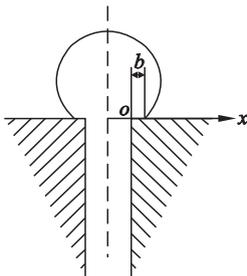


图 5 气泡生长过程中下边缘迁移示意图

Fig. 5 Schematic of bubble migration during bubble growth

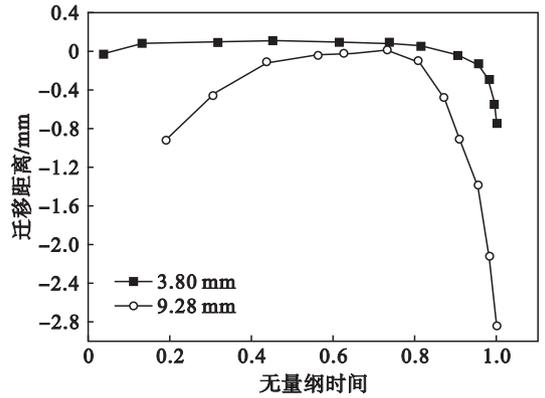


图 6 气泡生长过程中下边缘迁移量随时间的变化

Fig. 6 Variation of bubble migration length with time during bubble growth

2.3 气泡生长过程受力分析

本实验中气体流速较小,可认为是准静态过程,因而与时间相关的虚拟质量力、惯性力可忽略,并且由于黏性力与气液相对速度成正比,黏性力同样可忽略,因而只考虑浮力和表面张力的作用.

图 7 表明 3.80 mm 气泡与 9.28 mm 气泡受力变化趋势基本一致:表面张力随时间缓慢上升,再趋于平缓,然后急速下降,浮力随时间持续上升;表面张力在气泡生长的初期占主导作用,在接近脱离时表面张力急剧下降,气泡在脱离时只受浮力作用.3.80 mm 气泡需要经历更长的时间才能使浮力与表面张力相平衡.

随着气泡的长大,其所受浮力逐渐增大,导致气泡纵向拉伸,接触角增大.对于大口径管产生的气泡,气泡长大的同时底部边缘向液体侧迁移,导致气泡所受表面张力的竖直分量增加;当接触角为 90° 时,气泡底部直径最大,表面张力达到最大值.在气泡浮力增大到大于表面张力后,气泡浮力进一步增大,表面张力逐渐减小,气泡受力更不平衡,气泡开始纵向拉伸,底部收缩,然后脱离,进而导致气泡上浮,底部边缘不再向外扩展.

两种气泡高宽比变化趋势不同的原因如下:

①由于气泡高宽比远小于 1,表面张力越大,气泡初始高宽比也越大;②在气泡生长初期,两种气泡的浮力均接近于 0,而小气泡所受的表面张力大于大气泡的对应值,因而初期小气泡的高宽比大于大气泡的对应值,且其变化趋势更陡;③随着过程的进行,大气泡浮力增加更快,因而大气泡高宽比变化趋势更陡.由于 3.80 mm 和 9.28 mm 两种气泡高宽比达到 1 时的无量纲时间分别为 0.48 和 0.78,因而 3.80 mm 气泡脱离的临界高宽比稍大于 9.28 mm 气泡的对应值.

3. 80 mm 气泡无量纲时间小于 0.8 时, 浮力一直小于表面张力, 气泡不满足脱离条件, 进而出现了下边缘向液体侧迁移的现象, 并且接触角也保持不变, 当气泡所受浮力大于表面张力后, 气泡

满足脱离条件后上浮; 而 9.28 mm 气泡在生长过程中, 当无量纲时间为 0.5 时, 气泡浮力已经大于表面张力, 气泡已经满足脱离条件, 因而不会出现气泡下边缘向液体侧迁移的现象。

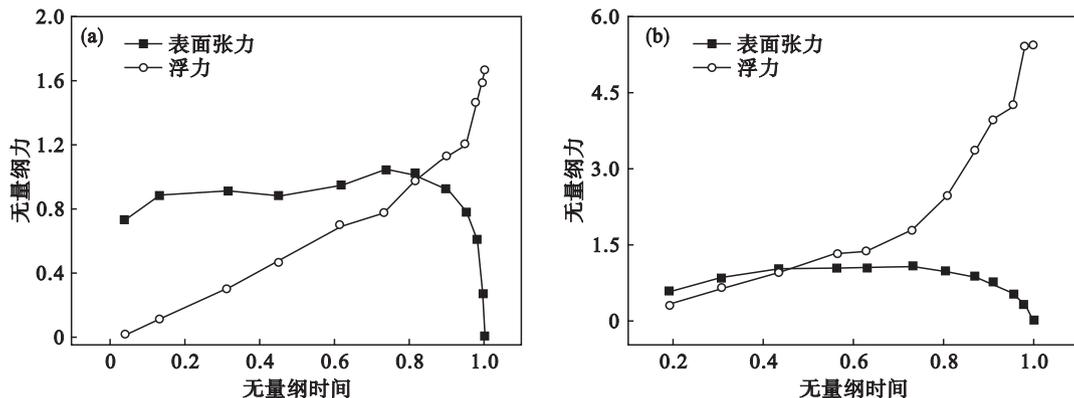


图 7 气泡生长过程受力随时间的变化

Fig. 7 Variation of force for different diameter bubble with time during bubble growth

(a)—3.80 mm 气泡; (b)—9.28 mm 气泡。

3 结 论

1) 在不同的主导作用力下, 两种不同管径生成的气泡高宽比变化趋势不同, 小管径生成气泡的高宽比随时间变化呈先陡后缓的上升趋势, 大管径生成气泡的高宽比随时间变化呈现先缓后陡的上升趋势。

2) 气泡整个生长过程按体积增长可分为冒头—膨胀—纵向拉伸—脱离四个阶段, 在生长前期不满足气泡脱离条件下, 小管径生成的气泡会出现下边缘向液体侧迁移的现象; 大管径生成的气泡在气液面与固液面夹角小于接触角时即达到脱离条件, 因此不会出现迁移。

3) 小气泡脱离上浮的临界高宽比稍大于大气泡的对应值。

参考文献:

[1] 李光, 杨晓钢, 戴干策. 鼓泡塔反应器气液两相流 CFD 数值模拟[J]. 化工学报, 2008, 59(8): 1958-1965.
(Li Guang, Yang Xiao-gang, Dai Gan-ce. CFD simulation of gas-liquid flow in bubble column [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2008, 59(8): 1958-1965.)

[2] 林松, 李良超, 王嘉骏, 等. 鼓泡塔中气泡尺寸分布和局部气含率研究[J]. 化学工程, 2008, 36(2): 21-24.
(Lin Song, Li Liang-chao, Wang Jia-jun, et al. Study on

bubble size distribution and local gas hold up in bubble column [J]. *Chemical Engineering*, 2008, 36(2): 21-24.)

- [3] 张大鹏, 徐亚同, 史家梁. 废水处理: 第十一篇废水的物理处理法(二)——气浮法[J]. 上海化工, 1998, 23(24): 40-41.
(Zhang Da-peng, Xu Ya-tong, Shi Jia-liang. Wastewater treatment: physical treatment methods of waste water (II)—aero-flotation method [J]. *Shanghai Chemical Industry*, 1998, 23(24): 40-41.)
- [4] Alexiadis A. Bubble dispersion patterns in bubbly-flow released from a porous plug into a gas-stirred ladle [J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2007, 31(8): 1534-1547.
- [5] Llanos C A, Garcia-Hernandez S, Ramos-Banderas J A, et al. Multiphase modeling of the fluidynamics of bottom argon bubbling during ladle operations [J]. *ISIJ International*, 2010, 50(3): 396-402.
- [6] Zhong L C, Li L Y, Wang B, et al. Water modeling experiments of argon bubbling curtain in a slab continuous casting tundish [J]. *Steel Research International*, 2006, 77(2): 103-106.
- [7] Fan X, Chen X, Liu X, et al. Bubble formation at a submerged orifice for aluminum foams produced by gas injection method [J]. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2013, 44(2): 729-737.
- [8] Yuan J, Li Y. Effect of orifice geometry on bubble formation in melt gas injection to prepare aluminum foams [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2015, 58(1): 64-74.
- [9] Kulkarni A A, Joshi J B. Bubble formation and bubble rise velocity in gas-liquid systems: a review [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, 44(16): 5873-5931.