

文章编号:1000-582X(2007)06-0044-04

## 双联毛细管管口气泡生长可视化实验

包立炯,朱 恂,廖 强,石 泳

(重庆大学 工程热物理研究所,重庆 400030)

**摘要:**利用高速摄影仪对双联毛细管管口气泡的生长和脱离特性进行了可视化实验研究。实验结果表明,当液体淹没双联毛细管管口时,在管内无气体流动情况下,管径大和亲水的毛细管易于成为液体通道,而管径小和憎水的毛细管易于成为气体通道;在有气体流动情况下,管径大的毛细管成为气体通道,而管径小的则成为液体通道。当气室的进气流量增大时,双联毛细管端口处气泡脱离直径变化很小,而气泡的脱离周期却随之明显减小,双联毛细管的气泡生长和脱离会发生明显的相互影响。此外,液体流速对气泡的生长和脱离有很大的影响,液体流速越大,气泡脱离越快,气泡的脱离直径则越小;在液体流速较大时,靠近流体进口处的毛细管端口气泡生长和脱离明显加快,从而导致相邻毛细管端口的液体回流现象。

**关键词:**双联毛细管;气泡生长与脱离;可视化实验

**中图分类号:** O359

**文献标志码:** A

在很多工业生产领域,如生物化学反应器中的发酵过程、生物废水处理过程以及池沸腾换热过程等,都存在气液泡状流这种基本流动及传递行为<sup>[1-4]</sup>。虽然很多工业应用设备非常简单,气泡传质行为的预测仍然非常困难。尤其是在多孔介质层中,由于气-液通道的连通和交叉,使得气泡生长和脱离更为复杂。研究多孔介质表面的气泡生长和脱离,对于揭示化工和生化反应器、蒸发器等设备中的气-液两相流动和传热传质机理及特性具有重要的意义。

许多科研工作者对单个气泡的形成和运动过程进行了研究。Vazquez等<sup>[5]</sup>利用3种不同测试方法研究了单个气泡的生长和脱离。Han等<sup>[6]</sup>研究了过热度等因素对R11和R113二元混和物池沸腾中的单个气泡生长的影响。另外,文献[7-9]等报道了静止液体中单个气泡的生长和运动速度的研究情况。

上述文献都是针对单个孔口处形成的单个气泡的形成以及运动过程,为了更好地研究多孔介质层表面气泡的生长和脱离以及相邻孔道间的相互影响,本文利用高速摄影仪对底部相连的两根毛细管管口气泡的生长和脱离进行了可视化实验研究。

### 1 实验装置及实验方法

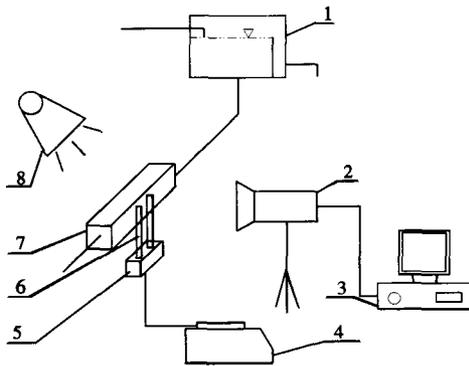
图1为实验系统的示意图,实验系统由可视化实验段、气源装置、高速摄像分析系统组成。可视化实验段和气室都为矩形结构,采用透明的有机玻璃材料制成,两根玻璃毛细管安装于实验段底板,管口插入实验段约5 mm,两毛细管另一段与气室顶部相连(称为双联毛细管),气室的容积为1 cm<sup>3</sup>。由DSP-2微量自动注射泵配以50 mL标准全玻璃注射器作为气源,利用硅胶管将注射器和气室进气口相连,通过调节注射泵的推注速度控制气体流量。可视化实验段液体流道的尺寸为30 cm×2 cm×1.8 cm。

实验中采用REDLAKE MotionXtra HG-100K高速摄影仪拍摄两毛细管管口气泡的生长脱离过程以及两管口气泡迁移的相互影响过程,该仪器最高拍摄速率可达每秒20 000帧,能够完整详细地记录气泡在生长脱离过程中的瞬间形态。在拍摄过程中,高速摄影仪、观察目标和光源处于同一水平面并呈一条直线布置。高速摄影仪与计算机相连,通过MotionCentral图像软件实时拍摄图像,最终利用图形分析软件对图像进行分析,从而获得气泡的生长和脱离特性。

收稿日期:2006-01-17。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90410005,90510020);教育部优秀青年教师资助计划项目(教人司[2003]355号文);高等学校博士学科点专项科研基金(20050611004)。

作者简介:包立炯(1982-),男,重庆大学硕士研究生,主要从事多孔介质内传热传质过程研究。朱恂(联系人),女,教授,博士生导师(Tel)023-65102474;(E-mail)lqzx@cqu.edu.cn。



1. 高位水箱;2. 高速摄影仪;3. 计算机;4. 注射泵;5. 气室;  
6. 毛细管;7. 透明液体流道;8. EH-1000 闪光灯

图1 实验系统示意图

实验分别采用了内径为不同管径的玻璃毛细管和 PTFE 毛细管进行实验,以研究管径尺寸大小对气泡的生长脱离的影响;通过改变注塞泵的推注速度改变注气流量的大小,研究气流量变化对气泡生长脱离过程的影响;此外,还研究了流道内液体的流速对气泡生长和脱离的影响,以及液体淹没管口的气液流动行为。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 液体淹没双联毛细管管口实验

#### 2.1.1 管内无气体流动的实验

本实验主要研究在管内没有气体流动,液面只沿毛细管轴向移动时毛细管端口被液体淹没时的气-液两相流情况。实验采用的毛细管管内径分别为 0.7 mm 和 1.7 mm,间距为 6 mm。

实验中,控制液体的液面缓慢上升(速度约为 0.5 mm/s),直到液面完全淹没两毛细管管口,其过程如图 2 所示。从图 2 中可看出:当流道内液面上升到毛细管管口高度时,内径为 0.7 mm 的毛细管(简称小管)管口处的气-液相界面先脱离管口,之后有少量液体进入该毛细管顶端。紧接着内径为 1.7 mm 的毛细管(简称大管)端口处气-液相界面也发生脱离,脱离之后液体持续回流进入毛细管,然后通过大管进入气室,从而将气室内的气体经由小管排入液体流道。由此可见,当液体淹没流道中底部相连的毛细管时,管径尺寸大的毛细管由于流动阻力和表面张力作用小,将首先成为液体通道,管径小的毛细管则成为气体通道。对于应用于沸腾换热强化的网络相连的多孔介质层,当被液体淹没时,其大孔势必将首先进入液体从而失活,而小孔将会因为封闭了部分气体,成为初始核化的活化腔。

#### 2.1.2 管内有气体流动的实验

在气室的进气流量为 3 mL/min 的情况下,内径分别为 0.7 mm 和 1.7 mm 的底部与气室相连的两根毛细管的淹没实验现象如图 3 所示。实验结果表明,当流道内液面淹没两毛细管管口时,两毛细管管口都有

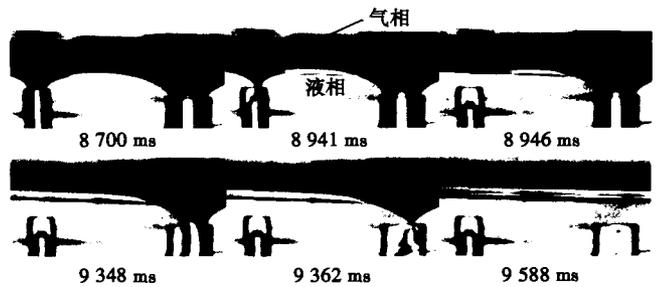


图2 无气体流动时双联毛细管管口气-液界面运动情况  
液体回流现象,但是小管管内的液体回流速度明显大于大管,最后液体通过小管进入气室,而大管则作为气体通道,在管口产生连续的气泡的生长和脱离过程。其主要原因是:当管内有气体流动时,一旦液面淹没两个毛细管的端口,大管端口的气-液相界面的曲率半径大于小管端口的气-液相界面的曲率半径,此时大管内气体流动的阻力小,大部分气体将从大管排出。而小管由于毛细力的作用,液体更易进入。因此,当多孔层存在由于沸腾、化学反应、以及生化反应而有气体产生时,气体更易从大孔排出,液体从小孔补入。

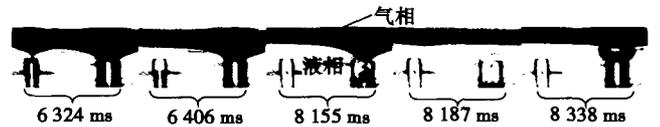


图3 有气体流动时双联毛细管管口气-液界面运动情况

#### 2.1.3 毛细管表面特性的影响

笔者选用十二烷基三氯硅烷作为憎水剂,利用浸泡方式对毛细管管口进行了憎水处理,并利用一个未经过憎水处理的管内径为 1.7 mm 的毛细管和相同管内径经过憎水处理的毛细管组成双联毛细管进行了实验,实验中管内无气体流动。图 4 为实验结果,其中左管为未经处理的玻璃毛细管,右管则为经过憎水处理的毛细管。从图中可知,当液面同时淹没毛细管端口时,经过憎水处理的毛细管端口气液相间面仍然位于管口处,而未经处理的毛细管端口处气液相间面则开始下降,液体开始回流通过毛细管进入气室,从而导致气泡在憎水管端口生长脱离。因此,多孔层内浸润性的孔道容易形成液体通道,而非浸润性孔道易形成气体通道。



图4 毛细管表面特性对气泡生长的影响

### 2.2 气体流量对双联毛细管管口气泡生长和脱离特性的影响

为了研究不同气体流量对毛细管端口的气泡生长和脱离过程的影响,实验采用管内径为 1.7 mm 的毛

细管构建双联毛细管,通过改变注射泵的推注速度来改变进入气室的气体流量。气体流量变化对毛细管管口气泡的脱离周期和脱离直径的影响如图5所示。由图可知,随着气体流量的增大,气泡的当量脱离直径 $d$ 随之增大,由此可见,气体流速增加所引起的气体惯性力的增大将使得气泡沿气流方向伸长,气泡的脱离直径增大。另外,气泡要脱离毛细管管口进入液体必须满足气泡内的气体浮力大于液相表面张力等阻力作用,而随着气流量的增大,气泡内的气相浮力的增大速率增大,从而气泡的脱离周期 $T$ 则随着气流量增大而减小。

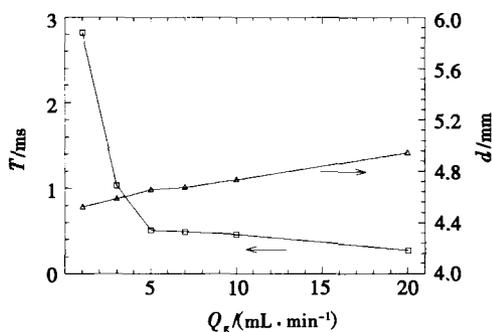


图5 气流量对气泡脱离的影响

不同气体流量下,两根双联毛细管管口气泡(分别称为气泡1和气泡2)生长的相互影响如图6-8所示,图中 $V_{b1}$ 和 $V_{b2}$ 分别为气泡1和气泡2的体积。由图可知,在气泡生长开始阶段,两气泡的生长速度近似相等,但随着时间 $\tau$ 的增长,气泡1的生长受到抑止,其体积迅速变小直至为零,气泡2的生长速度则加快直至脱离毛细管管口。在气泡2脱离后瞬间,气泡1的体积呈现快速增大然后再降低的一个脉动过程,其原因是由于气泡2的脱离将使得该管管内的气体流动阻力迅速增加,从而驱使部分气体进入管1,使气泡1的体积快速回升;而在短时间内,两管的气体压力很快达到平衡,气泡1的体积又迅速降低为零,从而进入下一个气泡生长和脱离的循环周期。因此,相联的多孔层的孔口处气泡生长将具有很大的相互影响,某一孔口处气泡的脱离,将可能导致相邻孔口处气泡生长的终止。另外,比较图6-8中气泡1的体积生长曲线可知,随着气体流量的增大,气泡1的最大生长体积也随之增大。

### 2.3 液体流速对气泡生长和脱离的影响

实验采用的双联毛细管的管内径均为1.7 mm,气室的进气流量为20 mL/min。当液体流速为 $8.76 \times 10^{-2}$  m/s时,毛细管管口气泡生长和脱离过程如图9所示。由图可知,当液体流速较小时,左右两毛细管端口处都有气泡生长脱离,并且与相同气体流量条件和液体静止状态下的实验结果相比得知,在液体流速比较小时,气泡的脱离周期比流体静止状态下要小,其原因为液体流动时,对毛细管端口的气泡有横向剪切力,

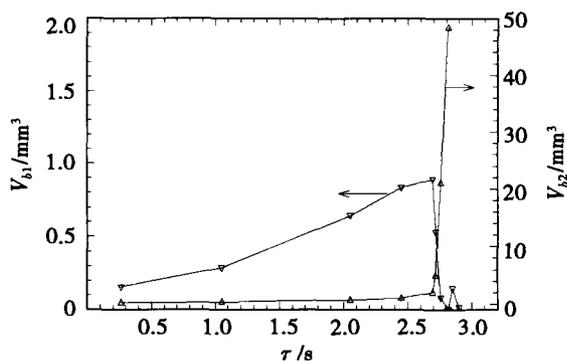


图6 气流量为1 mL/min时气泡生长特性

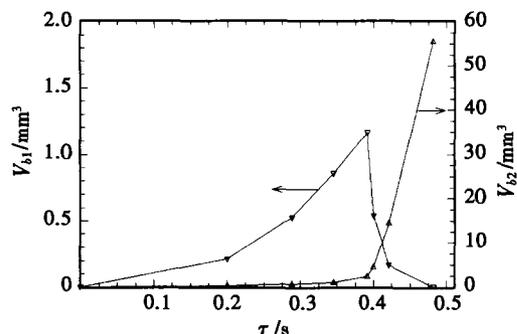


图7 气流量为10 mL/min时气泡生长特性

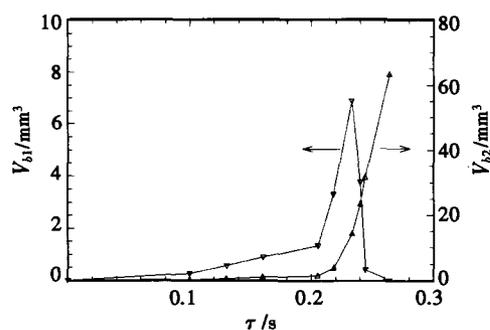


图8 气流量为20 mL/min时气泡生长特性促使气泡提前脱离。

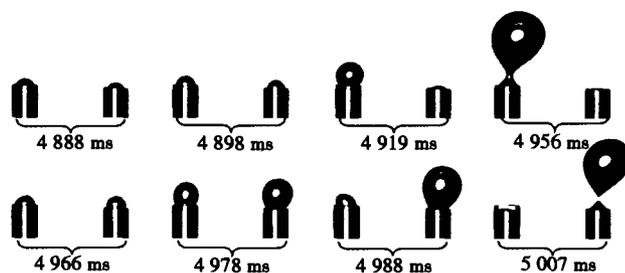


图9 小液体流速下气泡的生长脱离情况

当液体流速增大为 $19.34 \times 10^{-2}$  m/s时的实验结果如图10所示。由图可知,在液体流速较大时,靠近液体进口处的毛细管(称为左管)端口气泡的脱离周期明显变小,气泡的生长得到加速。而远离液体进口处的毛细管(右管)端口的气泡生长则受到抑止,并且发生液体回流进入气室的现象。其原因为:随着液体流速加快,

促进左管管口气泡的生长和脱离,从而导致气室内气体压力减小,从而使得流道内液体通过右管进入气室。因此,在较高的液体流速下,多孔层孔口处气泡的脱离,将可能导致液体进入相邻孔道,从而失活。

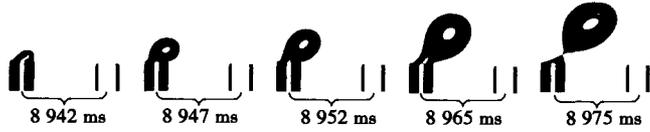


图10 大液体流速下气泡的生长脱离情况

### 3 结论

笔者主要利用高速摄影仪对双联毛细管管口气泡的生长脱离以及相互影响情况进行了可视化实验。实验结果表明,当液体淹没双联毛细管管口时,在管内无气体流动情况下,管径大的毛细管将成为液体通道,而管径小的则为气体通道;亲水管成为液体通道,而憎水管成为气体通道;在有气体流动情况下,管径大的毛细管成为气体通道,而管径小的则成为液体通道。当气室的进气流量增大时,等管径的双联毛细管端口处气泡脱离直径变化很小,但气泡的脱离周期则随之减小,并且双联毛细管的气泡生长和脱离会发生明显的相互影响。液体流速越大,气泡脱离越快,气泡的脱离直径则越小;在液体流速较大时,靠近流体进口的毛细管管口气泡生长和脱离得到大幅度促进,从而导致下游毛细管管口的液体回流现象。

#### 参考文献:

[1] MENSOUR N A, MARGARITIS A, BRIENS C L, et al. New

developments in the brewing industry using immobilized yeast cell bioreactor systems[J]. *Inst Brew*, 1997, 103:363-370.

- [2] KLEIN J, ROSENBERG M, MARKOS J. Biotransformation of glucose to gluconic acid by *Aspergillus niger*-study of mass transfer in an airlift bioreactor[Biochem[J]. *Eng*, 2002(10): 197-205.
- [3] PRAKASH A, MARGARITIS A, SAUDERS R C. High concentrations ammonia removal by the cyanobacterium *Plectononema boryanum* in a photobioreactor system[J]. *Chem Eng*, 1999(77):99-107.
- [4] BOLES J R, CLARK J F, LEIFER I, et al. Temporal Variation in natural methane seep rate due to tides, coil oil point area[J]. *Geophys Res*, 2000(11):27077-27086.
- [5] VAZQUEZ A, SANCHEZ R M. A look at three measurement techniques for bubble size determination[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2005(30):49-57.
- [6] HAN CHOON LEE, JEONGBAE KIM, BYUNG DO OH, et al. Single bubble growth in saturated pool boiling of binary mixtures[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2004(30):697-710.
- [7] 李小明,王冶,毕勤成,等. 气泡在不同液体中上升速度的实验研究[J]. *西安交通大学学报*, 2003, 37(9):971-978.
- [8] YOUICHI SHIMOMURA, TAKESHI NISHIMURA, HARUO SATO. Bubble growth processes in magma surrounded by an elastic medium[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2006(155):307-322.
- [9] FAVELUKIS M, RAMON, ALBALAK. Bubble growth in viscous newtonian and non-newtonian liquids[J]. *Chemical Engineering Journal*, 199(63):149-155.

## Visual Experiments on Bubble Growth and Departure at the Open Tip of Two Capillary Tubes Connected with a Gas Chamber

BAO Li-jiong, ZHU Xun, LIAO Qiang, SHI Yong

(Institute of Engineering Thermophysics, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The bubble growth and departure at the open tip of two capillary tubes joined with a gas chamber was investigated by using a high-speed video imaging system. The experimental results showed that the capillary tube with larger size and hydrophilic property act as the liquid flow channel while the one with smaller size and hydrophobic property as the gas flow channel when liquid submerged the tip of the two capillary tubes without internal gas flow. In contrast, the larger capillary tube become a gas flow channel and the smaller one a liquid flow channel when liquid submerges the tip of the two capillary tubes with internal gas flow. The bubble departure period significantly decreases and the bubble departure diameter eeps in gentle increase with the increase of the flow rate of gas injected into the gas chamber. The liquid flow rate in test section has a significant effect on the bubble growth and departure. A larger liquid flow rate led to a higher bubble departure frequency and a larger bubble departure diameter. At a larger liquid flow rate, the bubble growth and departure at the tip of the upstream capillary become faster, which result in the liquid return at the tip of the downstream capillary tube.

**Key words:** two capillary tubes; bubble growth and departure; visual experiment