

# 竖直矩形窄缝通道滑移汽泡聚合作用 可视化实验研究

徐建军, 陈炳德, 王小军

(中国核动力研究设计院 空泡物理和自然循环重点实验室, 四川 成都 610041)

**摘要:**采用高速摄像仪从宽面和窄面立体可视化观察了滑移汽泡间的聚合特性。研究表明,在低热流密度孤立汽泡区域,近壁滑移汽泡间的聚合作用过程较快,聚合重新形成的汽泡仍沿加热面平行滑移;在滑移汽泡间开始相互作用的影响距离约是其平均直径的2倍,滑移汽泡间的聚合作用是一种积极的作用,共同使得滑移汽泡的运动速度增加,有利于该区域附近换热的提高。最后探讨了核化生长汽泡间的作用及其对汽泡浮升的影响。

**关键词:**滑移汽泡;聚合作用;窄缝

中图分类号:TK124;TL331

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2011)05-0548-06

## Experimental Visualization Coalesced Interaction of Sliding Bubble Near Wall in Vertical Narrow Rectangular Channel

XU Jian-jun, CHEN Bing-de, WANG Xiao-jun

(Key Laboratory of Bubble Physics & Natural Circulation, Nuclear Power Institute of China,  
Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The characteristic of the coalesced sliding bubble was visually observed by wide side and narrow side of the narrow rectangular channel using high speed digital camera. The results show that the coalesced time among the sliding bubbles is quick, and the new formation of coalesced bubble is not lift-off, and it continues to slide along the heated surface in low heat flux for the isolated bubble region. The influence region is about 2 times projected area of the sliding bubble when the sliding bubbles begin to interact. The sliding bubble velocities increase duo to the interaction among the bubbles, which contributes to enhance heat transfer of this region. Finally, the effect of coalesced interaction of growing bubble in the nucleation sites on bubble lift-off was discussed and analysed.

**Key words:** sliding bubble; coalesced interaction; narrow channel

在经典沸腾理论框架中,研究者通过核化点密度将单个汽泡和宏观传热量进行联系,即通过线性叠加的方法获得汽泡生长和脱离对传热的影响,忽略了汽泡间的非线性相互作用<sup>[1]</sup>。实际上,沸腾是一个复杂的过程,表现为强烈的随机性、非线性,如何把沸腾中的非线性作用与经典理论进行有机结合一直都是沸腾现象研究的难点和瓶颈所在。

随着测量技术的快速发展,研究者开始重视从微观角度探析沸腾中汽泡间的相互作用关系<sup>[2-5]</sup>,丰富了经典沸腾理论的研究内涵,有利于沸腾理论的进一步完善。在现有的研究中,研究者基本都是对池沸腾核化点处生长汽泡间的聚合特性进行可视化观察和分析,有关窄缝通道内汽泡间相互作用研究还鲜有报道。在前期可视化研究中,笔者发现在低热流密度下,矩形窄缝通道内存在典型滑移汽泡现象<sup>[6-7]</sup>。在常规通道研究中,研究者提出了近壁滑移汽泡提高了通道内换热。Thorncroft 等<sup>[8-9]</sup>可视化观察到,上升流时,汽泡脱离核化点后均沿加热面滑移,未观察到汽泡浮升现象,并通过计算认为滑移汽泡换热量占 52%。Qiu 等<sup>[10]</sup>观察到滑移汽泡周围存在典型的涡旋,证实了滑移汽泡提高了换热能力。他们认为滑移汽泡的换热主要来自于两部分:1) 微液膜蒸发和导热,其中导热占 17%;2) 滑移汽泡尾流。Baris 等<sup>[11]</sup>在池沸腾矩形通道内发现滑移汽泡底部微液膜蒸发和汽泡尾流提高了局部换热系数,建立了

微液膜换热数值模型,推算出了微液膜的厚度。与常规通道相比,这种近壁滑移汽泡以及它们之间的聚合作用在窄缝通道有限的空间内所占的地位或许更加重要。因此,研究窄缝通道内近壁滑移汽泡的聚合作用特性有助于进一步深入了解其沸腾传热机理。

本文采用高速摄像仪可视化观察窄缝通道内孤立汽泡区域内滑移汽泡聚合特性,获得低热流密度下滑移汽泡间聚合作用的直观信息,分析滑移汽泡开始相互作用的影响区域,并探讨孤立汽泡区汽泡间的聚合作用与浮升的关系。

## 1 实验装置

实验回路示于图 1a。主要由柱塞泵、开式水箱、稳压器、缓冲罐和预热器等部件组成。实验过程中,首先将稳压器内注满水,利用其高位处水的重力压头作为实验支路中水运行的驱动力,实验段出口水直接排放到地沟。在实验本体入口附近设置 1 个 6 kW 的预热器,兼具除氧功能,每次实验时,需将水箱内的水加热至饱和温度,非凝结性气体通过水箱上部的脉冲管排出。改造后的实验支路能满足实验的要求,可保证实验段出口压力为 0.1 MPa,流量波动范围在 2% 以内。实验本体如图 1b 所示。流道截面尺寸为 2 mm×8 mm,在可视窗(光学石英玻璃)中加工和制作矩形窄缝通道,同时对矩形窄缝通道中的 3 个表面进行精细抛光,其透光率达 95% 以上,可从流道宽面和窄面进行可

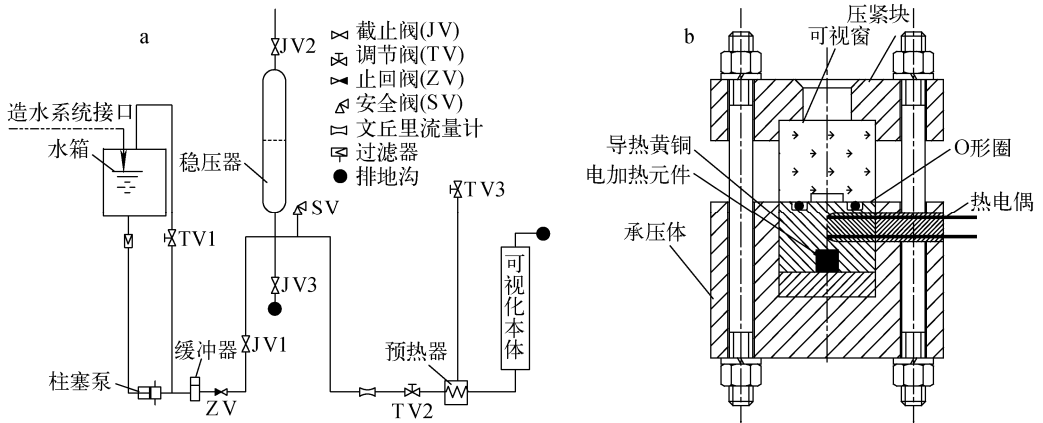


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Scheme of experimental apparatus

a——实验回路;b——实验段横截面

视化。实验本体主要由承压体、压紧块、导热铜块、间接加热元件、可视窗和密封装置等部件组成。一面由光学石英玻璃和压紧块组成；另一面由导热铜块、间接加热元件和承压体等部件组成。可视窗和导热铜块构成了矩形窄缝通道，通过压紧块压紧 O 形圈实现流道的密封。横截面上布置了 12 对热电偶，用于测量壁面温度和有效热流密度。

本研究采用 PhantomV9.0 高速摄像机从正面和窄面可视化观察近壁滑移汽泡聚合作用过程。PhantomV9.0 彩色高速摄像机主要由摄像机主机、高亮度无频闪直流光源和图像存储器等部件组成。选用尼康微距镜头，最大放大倍率为 1:1，具体型号为 Nikon/200 mmF/4D/macro 1:1。采样频率为 3 800 帧，在最大放大倍率 1:1 的条件下，所对应的有效像素为  $576 \times 576$ ，完全满足实验的要求。在汽泡数据测量时，采用了高速摄像自带的控制软件 Phantom Camera Control 中的测量功能进行数据处理。在汽泡数据处理时，通过比例缩放计算有效窗口的实际物理尺寸，同时从拍摄图像中读出汽泡的运动帧数，获得相对应汽泡的运动时间。本文采用向前差分的方法计算滑移汽泡速度，即有效窗口的实际物理尺寸除以汽泡的运动时间即为滑移汽泡速度。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 滑移汽泡聚合作用过程的可视化观察

图 2 为从窄面观察的小汽泡在流动方向上聚合大汽泡的作用过程。在初始 0 ms 时，上部

的大汽泡在加热面上核化生长。从下游来的小汽泡沿加热面平行滑移，约在 12.89 ms 时，两个汽泡开始相互接触和作用，在 14.465 ms 后，重新组合成 1 个新的汽泡，从两个汽泡开始接触到重新形成 1 个新的滑移汽泡所需的时间较短，约为 1.575 ms。聚合后的新汽泡仍沿加热面平行滑移，未脱离壁面，并在其周围产生了涡流，有利于促进局部区域的换热。

图 3 为从宽面观察的两个滑移汽泡在流动方向上的聚合作用过程。通过宽面和窄面对比分析可知，从宽面观察，汽泡浮升后，会在加热面上投下清晰的阴影。而附壁滑移汽泡中心有接触亮圆，即为汽泡底部与加热面的接触面，以此可从正面判断出汽泡是滑移还是浮升。两个滑移汽泡均从上游运动到拍摄窗口内。在 26 ms 时，两个滑移汽泡开始接触，30.9 ms 时，重新组合形成 1 个新的滑移汽泡，从两个汽泡开始接触到聚合形成新的滑移汽泡所需的时间约为 3.1 ms。在聚合的过程中，汽泡产生了较大的变形，如 29.6 ms 时所示。但在这个过程中，汽泡的底部始终与加热面相接触，即存在接触圆，未发生浮升现象。

图 4 为从宽面观察的两个滑移汽泡在横向上的聚合作用过程。在 2.367 ms 时，两个滑移汽泡开始接触，在 4.21 ms 时，汽泡由于聚合发生了较大变形，约到 6.05 ms 时，聚合形成 1 个新的滑移汽泡，从两个汽泡开始接触到聚合成新滑移汽泡所需的时间约为 1.84 ms。在这个过程中，汽泡的底部始终与加热面相接触，即存在接触面，未发生汽泡浮升现象。

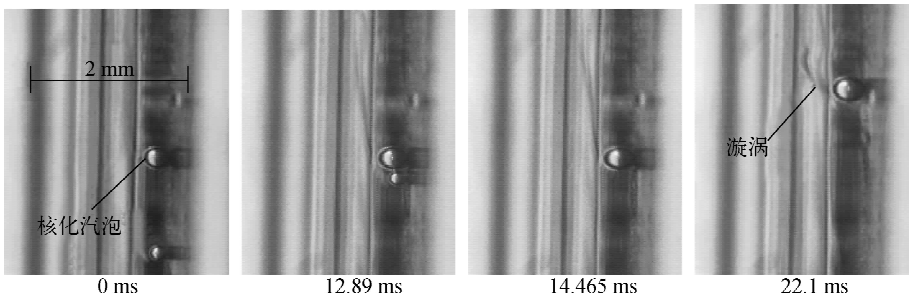


图 2 小汽泡聚合核化汽泡(窄面)

Fig. 2 Coalescence between sliding and growing bubbles at nucleation site from narrow view

$$G=190.5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}), T_{\text{in}}=57.4 \text{ }^\circ\text{C}, q=65.1 \text{ kW}/\text{m}^2$$

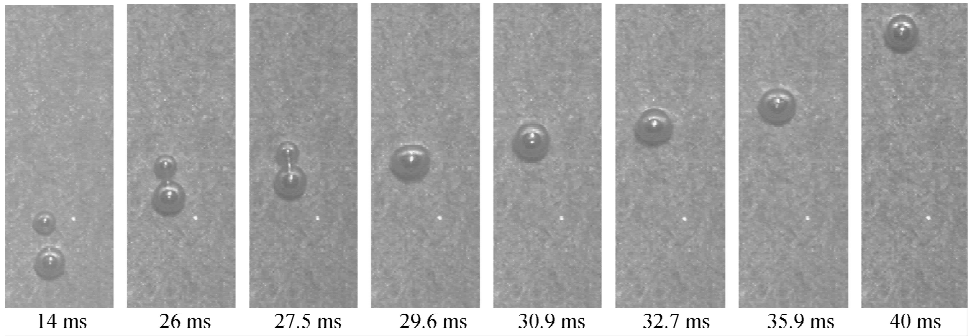


图3 大汽泡聚合小汽泡(宽面)

Fig. 3 Coalescence between sliding bubbles in flow direction from top view

$$G=137.1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}), T_{\text{in}}=78.65 \text{ }^\circ\text{C}, q=42.5 \text{ kW}/\text{m}^2$$

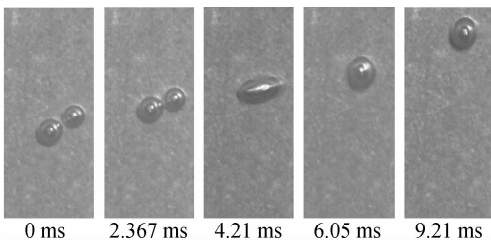


图4 汽泡横向聚合(宽面)

Fig. 4 Coalescence between sliding bubbles in vertical to flow direction from top view

$$G=194.4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}), T_{\text{in}}=72.8 \text{ }^\circ\text{C}, q=44.7 \text{ kW}/\text{m}^2$$

### 2.2 滑移汽泡聚合作用影响区域分析

基于图3中滑移汽泡在流动方向上的聚合作用过程,图5示出了两个滑移汽泡聚合前后的滑移速度以及汽泡位置与时间的关系。从图5可看出,由于两个滑移汽泡处于流动方向上,且大汽泡的滑移速度大于小汽泡的滑移速度,因此,在一定时间后,大汽泡开始聚合小汽泡。在低热流密度下,滑移汽泡生长速率较慢,汽泡间不发生相互作用时,单个滑移汽泡基本呈匀速运动状态。当两个汽泡开始相互作用时,势必会对滑移汽泡速度产生一定影响,因此,本文以滑移汽泡速度开始变化为基准,来确定两个汽泡开始相互作用的时刻和作用距离。滑移汽泡在运动过程中产生了尾流和绕流,在两个滑移汽泡未接触前,即14 ms左右,就开始产生相互作用。此时,两个汽泡质心的距离约是小汽泡直径的2.2倍,大汽泡直径的1.7倍。在这个过程中,由于大汽泡处于小汽泡的尾流中,使得小汽泡运动速度增加;同时,小汽泡加速运动又推动了大汽泡的运动。从上述运动过程看,

汽泡间的作用是相互的,且是一种积极的作用,共同使得两个滑移汽泡的运动速度增加,有利于该区域附近换热的提高。约在26 ms时,两个滑移汽泡开始接触,并迅速聚合,聚合重组形成1个新的稳定汽泡的时间仅需3.1 ms。在汽泡聚合重组过程中,由于汽泡碰撞和变形使得其运动速度达到一最大值,之后,速度开始减小,并最终达到一较为稳定的水平。从整个曲线图可看出,两个聚合汽泡开始相互作用到形成新的滑移汽泡速度稳定所需的时间约为27 ms。

由上述分析可知,以图5中聚合汽泡为例,聚合前两个汽泡的平均直径约为0.325 mm,其聚合作用距离约是两个汽泡平均直径的2倍,因此,影响区域为0.63 mm,在流道间隙2 mm方向上,其影响范围所占比例达31.5%。同时,近壁滑移汽泡聚合作用使得滑移汽泡运动速度增加。显然近壁滑移汽泡的聚合作用过程有利于提高窄缝通道内局部区域换热。这种滑移汽泡聚合作用与流道尺度关系值得进一步研究,以进一步明确窄缝通道内沸腾传热机理。

### 2.3 聚合汽泡作用及浮升关系讨论

基于上述分析,在低热流密度孤立汽泡区域,即使滑移汽泡在流动方向或在垂直于流动方向(横向)上发生汽泡聚合现象,聚合重组后形成的新的汽泡仍沿加热面平行滑移,并未脱离加热面,即这种汽泡相互作用所产生的力较小或并不作用在汽泡浮升的方向上,因此,这种聚合并不影响滑移汽泡的运动轨迹。

随着热流密度的进一步增加,汽泡数目逐渐增多,尤其是核化点之间的距离较小时,汽泡

间的相互作用较强,可能导致汽泡浮升。在本文竖直向上流动沸腾汽泡可视化实验中,由于热流密度不高,绝大部分核化点之间的距离远大于汽泡脱离直径,即可不考虑汽泡间的相互作用。在整个汽泡可视化实验图像资料中,仅在两组图片中观察到由于核化点间的距离较近而导致汽泡浮升的现象(图 6、7)。从图 6 可看

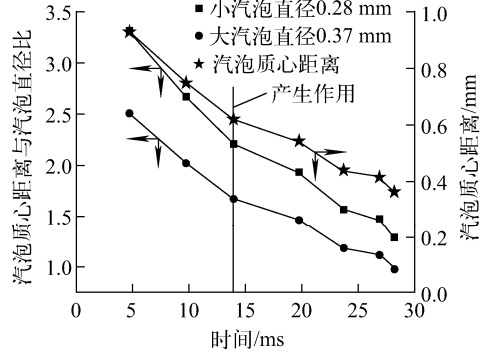
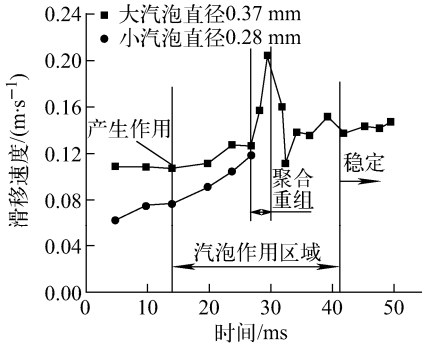


图 5 聚合汽泡的作用过程

Fig. 5 Coalescence interaction between sliding bubbles in flow direction

$$G=137.1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}), T_{\text{in}}=78.65 \text{ } ^\circ\text{C}, q=42.5 \text{ kW}/\text{m}^2$$

与图 6 不同,在图 7 中未观察到浮升汽泡反弹回壁面的现象。汽泡逐渐进入主流区域,在此过程中,由于汽泡界面发生冷凝现象,以及尾流扰动作用,汽泡的运动轨迹会发生变化。进一步解释汽泡反弹现象,汽泡相互作用浮升后,没有进入主流区域,仍处于近壁面附近,此时,如果汽泡运动速度超过当地流体流速,剪切升力方向指向近壁面,使得汽泡又附着在壁面上滑移。相反,如果汽泡进入了主流区域,则汽泡界面上速度梯度较小,因此,汽泡所受的剪切升力为 0,汽泡会在主流区域内运动,不会发生反弹回壁面的现象。

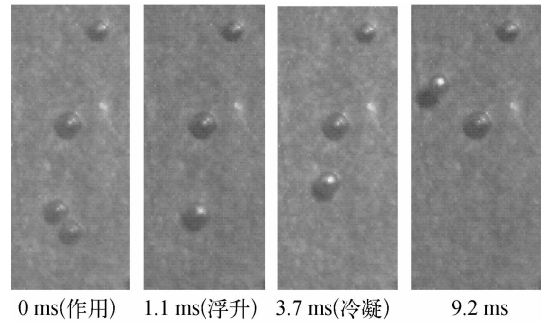


图 7 两个核化汽泡相互作用后浮升  
Fig. 7 Bubble lift-off after interaction  
at nucleation sites

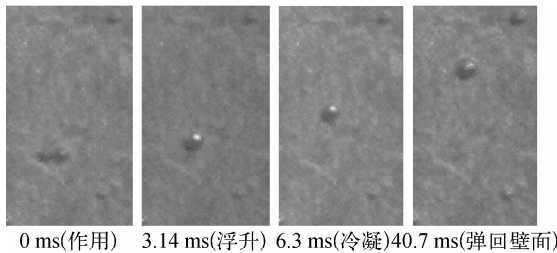


图 6 两个核化汽泡脱离、浮升和反弹

Fig. 6 Bubble departure, lift-off and rebound

出,两个邻近的汽泡在核化点生长,长大到一定程度后,两个汽泡开始在横向上聚合,聚合后开始浮升,由于主流流体过冷使得浮升后的汽泡尺寸开始减小。运动一段距离后,浮升汽泡又反弹回壁面,沿加热面平行滑移,由于汽泡质心处流体速度减小,使得汽泡速度明显减慢。

由图 6、7 中汽泡可视化结果可进一步推断,如果两个核化汽泡间的距离与其平均脱离直径处于一定临界关系,两个正在核化点膨胀长大的汽泡间的相互作用较强,且其作用力是汽泡浮升的动力,可能导致汽泡从加热面浮升。当前有限的数据显示,两个核化汽泡间距离不大于汽泡平均脱离直径时,两个核化生长汽泡会浮升,此结论还有待于更多的实验数据来证实,并进一步探讨核化汽泡生长作用机理。

### 3 结论

1) 在低热流密度孤立汽泡区域, 近壁滑移汽泡间的聚合作用过程较快, 聚合重新形成的新汽泡仍沿加热面平行滑移;

2) 滑移汽泡间开始相互作用时, 其质心的距离约为汽泡平均直径的 2 倍。近壁滑移汽泡聚合作用使得滑移汽泡的运动速度增加, 有利于提高窄缝通道内局部区域的换热;

3) 当核化汽泡间的距离与汽泡平均脱离直径处于一定的临界关系时, 两个正在核化点膨胀长大的汽泡间的相互作用较强, 可能导致汽泡从加热面浮升。

### 参考文献:

- [1] 柴立和, 彭晓峰, 王补宣. 池沸腾传热基础理论新视角探索[J]. 应用基础与工程科学学报, 1999, 7(1): 74-80.  
CHAI Lihe, PENG Xiaofeng, WANG Buxuan. New perspective on fundamental theory of pool boiling heat transfer[J]. J Basic Sci Eng, 1999, 7(1): 74-80(in Chinese).
- [2] KENNING D B, BUSTNES O E. Liquid crystal study of sliding vapour bubbles[J]. Heat and Mass Transfer, 2009, 45(7): 867-880.
- [3] NITESH D N, SUSHIL H B, RICHARD C J. Effect of nucleation site spacing on the pool boiling characteristics of a structured surface[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2006, 49(17-18): 2 829-2 839.
- [4] ERICH H, GERRIT B. Heat transfer and nucleation in pool-boiling[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 45(3): 209-216.
- [5] BENJAMIN R J, BALAKRISHNAN A R. Nucleation site density in pool boiling of saturated pure liquids: Effect of surface microroughness

and surface and liquid physical properties[J]. Exp Therm Fluid Sci, 1997, 15(1): 32-42.

- [6] 徐建军, 何军山, 陈炳德, 等. 矩形窄缝流道内过冷沸腾汽泡行为的可视化[J]. 动力工程, 2007, 27(3): 389-392.  
XU Jianjun, HE Junshan, CHEN Bingde, et al. Visualization of subcooled boiling bubble behaviors in a narrow rectangular channel[J]. Power Engineering, 2007, 27(3): 389-392 (in Chinese).
- [7] 徐建军, 陈炳德, 王小军, 等. 矩形窄缝流道内窄边近壁面汽泡运动现象及分析[J]. 化学工程, 2007, 35(8): 22-24.  
XU Jianjun, CHEN Bingde, WANG Xiaojun, et al. Phenomenon and analysis of motive bubbles near the wall in a rectangular narrow channel[J]. Chemical Engineering, 2007, 35(8): 22-24 (in Chinese).
- [8] THORNCROFT G E, KLAUSNER J F, MEI R. An experimental investigation of bubble growth and detachment in vertical upflow and downflow boiling[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1998, 41(23): 3 857-3 871.
- [9] THORNCROFT G E, KLAUSNER J F. The Influence of vapor bubble sliding on forced convection boiling heat transfer[J]. Journal of Heat Transfer, 1999, 121(1): 73-79.
- [10] QIU D, DHIR V K. Experimental study of flow pattern and heat transfer associated with a bubble sliding on downward facing inclined surface[J]. Exp Therm Fluid Sci, 2002, 26(6-7): 605-616.
- [11] BAYAZIT B B, HOLLINGSWORTH K, WITTE L C. Heat transfer enhancement caused by sliding bubbles[J]. Journal of Heat Transfer, 2003, 125(3): 503-509.