

文章编号: 1000-8055(2010)02-0264-06

微细丝上气泡射流间的相互作用特性

陆建峰¹, 彭晓峰², 丁 静¹

(1. 中山大学 工学院, 广州 510006;

2. 清华大学 相变与界面传递现象实验室, 北京 100084)

摘 要: 实验考察微细加热丝上气泡射流间的相互作用现象, 发现相邻气泡射流间的相互吸引现象, 强相互作用时多股射流可以合并成一股射流. 分析揭示出气泡射流间相互吸引的物理机制在于, 气泡生长造成局部温度下降导致相邻气泡两侧的热毛细力不平衡, 进而引起两个气泡射流间的相互吸引, 而相邻气泡则有互相远离的趋势. 利用数值模拟给出了气泡射流系统的温度场和流场, 很好地验证气泡射流间相互吸引的物理机制.

关 键 词: 沸腾; 气泡射流; 相互作用; 传热

中图分类号: TK124

文献标识码: A

Interaction between bubble jet flows on thin wires

LU Jian-feng¹, PENG Xiao-feng², DIN G Jing¹

(1. School of Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China;

2. Laboratory of Phasechange and Interfacial Transport Phenomena,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Both visual experiment and numerical simulation were conducted to investigate the interaction between bubble jet flows on thin wires. The attractive interaction appeared between nearby bubble jet flows, and bubble jet flows would combine into one jet flow under strong interactions. A physical model was proposed to understand the mechanism of the interaction between bubble jet flows. The temperature in the adjacent region of the bubble sharply decreases due to the bubble growth, which induces unsymmetrical thermocapillary force around and/or in adjacent region of a bubble. As a result, the attractive interaction exists between nearby bubble jet flows, while the adjacent bubbles trends to separate from each other. The numerically simulated temperature and flow fields are in a good agreement with experimental results.

Key words: boiling; bubble jet; interaction; heat transfer

航空航天系统中, 热质传递过程直接影响供能效力和系统性能, 沸腾则是可以显著提高传热系数的传热方式. 实验表明, 沸腾系统中气泡周围存在规则流动, 这些流动可以强化换热, Forster 等^[1-2]最早提出沸腾系统中气泡的泵吸换热机理.

微尺度与微重力系统中, 气泡界面张力相比

重力将起重要作用. Rusanov 等^[3]研究了微重力条件下气泡动力学和沸腾换热. Christopher 等^[4]分析了过冷沸腾中气泡引起的 Marangoni 对流. Wang 等^[5-7]结合理论建模与数值模拟, 研究了微细丝上沸腾的泡顶射流, 表明气泡界面相变换热控制下的 Marangoni 效应是泡顶射流的形成原

收稿日期: 2009-01-17; 修订日期: 2009-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(50806084); 中国博士后科学基金(20080430803)

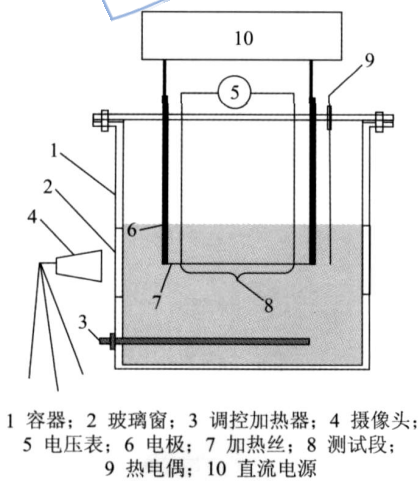
作者简介: 陆建峰(1978-), 男, 江苏海门人, 副教授, 博士后, 主要从事相变换热研究.

因. Lu 等^[8]根据实验观测和数值模拟,进一步分析微细丝上气泡射流的形成和发展过程. 王昊等^[9]的分析证实加热丝上核态沸腾时气泡间的热相互作用对沸腾传热起重要作用.

目前,气泡射流间相互作用的许多基本特性和机理还有待进一步的深刻认识和机理探讨. 本文利用可视化手段实验观测相邻气泡射流间的相互作用现象,认识微细加热丝上气泡射流间的相互作用特性,深刻探讨揭示气泡射流间互相作用的物理机制,尤其分析热毛细力与气泡换热的影响,并以数值模拟进一步验证气泡射流间相互作用的物理机制.

1 实验装置

微细丝上可视化沸腾实验装置主要分主体、加热装置和采集系统三部分,如图 1. 不锈钢容器 250 mm × 250 mm × 400 mm,两侧开有直径 100 mm 的观测窗口. 两根直径 5 mm 的铜电极固定在不锈钢盖板上,加热丝水平连接到两电极. 本实验采用长度 8~10 mm,直径 100 μm 的铂丝 (Pt: 99.99 %, 电阻约 1 Ω) 作为加热丝. 实验容器上装有调控加热器 (最大电压和功率分别为 220 V 和 1500 W) 以调节液体温度. 加热系统采用 HP Agilent Model 6031A 直流电源,可提供最大电压 20 V、最大功率 1200 W,直流电经加热丝形成均匀的热流密度. 为减小加热丝边界散热的影响,选取加热丝的中间段为测试段,两端电压通过导线直接由电压表测量. 实验工质为纯水,压力为大气压.



1 容器; 2 玻璃窗; 3 调控加热器; 4 摄像头;
5 电压表; 6 电极; 7 加热丝; 8 测试段;
9 热电偶; 10 直流电源

图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematics of testing system

实验采集系统包括图像和数据采集系统. 图

像采集系统由高速 CCD (charge coupled device) 摄像头、采集卡与镜头组成. 高速 CCD 摄像头图像数据采集系统为 Motionscope PCI, Redlake imaging. 实验采用 500 帧/s, 像素 320 × 280, 单位像素为 10 μm × 10 μm. 半径 0.3 mm 的 T 型热电偶测量主流液体温度, 精度 0.2 K. 电流直接由直流电源显示, 精度 0.005 A, 而电压表的测量精度为 0.001 V.

2 实验现象

图 2 为微细丝上气泡射流的影像, 液体温度 30 °C, 热流密度 $1.20 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. 实验表明, 相邻气泡射流间存在吸引作用, 从而形成一组相互吸引的气泡射流, 其他实验中也可观测到类似流动结构. 两个气泡间距越小, 气泡射流间的相互作用越强.

如果气泡射流间的相互作用较强, 则可能合成一股射流, 如图 3, 此时液体温度 30 °C, 热流密度 $1.40 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. 左侧两个气泡上的射流在丝上方约 0.4 mm 处合成一股. 右侧的 4 个气泡分为两组, 各组两个射流分别在 0.3 mm 与 0.6 mm 处合成一股射流, 两股合成的射流进一步在 1.2 mm 处合成一股射流.

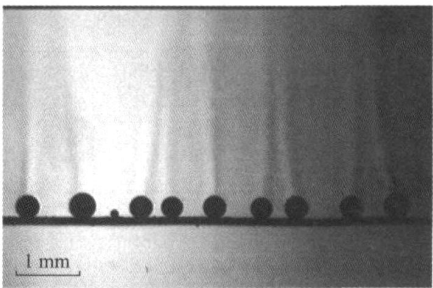


图 2 气泡射流间的吸引现象

Fig. 2 Interaction of bubble jet flows

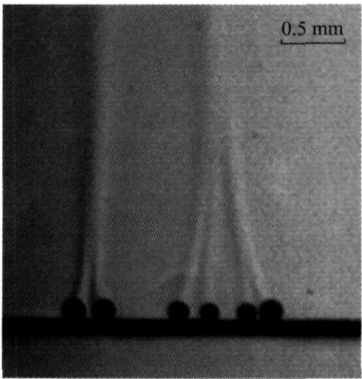


图 3 气泡射流的合并

Fig. 3 Combination of bubble jet flows

各种研究表明,气泡界面上温度梯度诱导的热毛细力将对气泡射流起决定性作用^[7-8].如图4,气泡由于界面蒸发起到冷源的作用,导致靠近相邻气泡侧的温度较低.根据热毛细力的特点,温度降低使热毛细力增大,从而使射流趋向于相邻气泡,其反作用力将驱动气泡远离其相邻气泡.

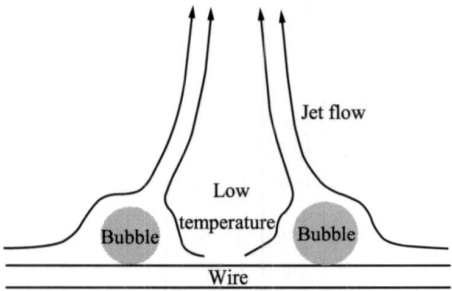


图 4 气泡射流相互作用示意图
Fig. 4 Interaction between bubble jet flows

3 数值模拟与结果分析

3.1 控制方程

实验中气泡半径 0.01~0.20 mm,流体速度通常为 20~80 mm·s⁻¹,流动计算采用三维层流模型.流体的控制方程如下:

$$\nabla \cdot (\rho V) = 0 \tag{1a}$$

$$\rho \cdot \nabla V = \mu \nabla^2 V - \frac{\nabla p}{\rho} - g \cdot j \tag{1b}$$

$$\rho \cdot \nabla (c_p T) = \frac{1}{\lambda} \nabla^2 T \tag{1c}$$

式中 ρ, c_p, μ 与 λ 分别为液体的密度,比热容、黏度与导热系数; V 为速度矢量; T 为温度; p 为压力; g 为重力加速度; j 为竖直方向的单位矢量.

气泡内为饱和蒸汽,温度等于相应压力的饱和温度 T_v . 气泡界面蒸发引起的换热可表示为^[10]

$$q = h \cdot (T_{li} - T_v) \tag{2}$$

式中 T_{li} 为气泡界面的液体温度,而传热系数可表达为^[10]

$$h = \frac{2\sigma}{2 - \sigma} \frac{h_{fg}^2 \rho_v}{T_v} \left[\frac{\overline{M}}{2\pi R T_v} \right]^{1/2} \left[1 - \frac{p_v}{2 h_{fg} \rho_v} \right] \tag{3}$$

其中 $\overline{M}$ 与 $\overline{R}$ 分别为蒸汽相对分子质量和气体常数, ρ_v 为蒸汽密度, h_{fg} 为相变潜热, p_v 为蒸汽压. 水的蒸发凝结系数 σ 通常为 0.02~0.04. 文中,蒸汽压取大气压, σ 为 0.03.

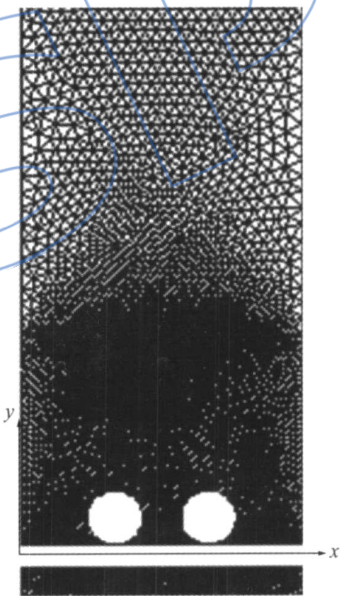
气泡边界动力学条件采用 Marangoni 模型,为

$$-\mu \left[\frac{\partial V}{\partial n} \right]_x = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \left[\frac{\partial T}{\partial s} \right]_x \tag{4}$$

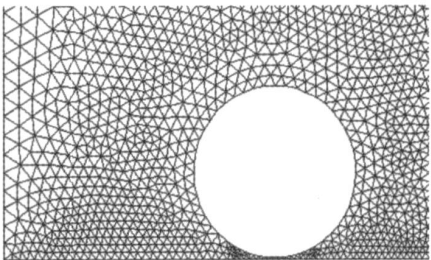
其中 σ 为界面应力, n 和 s 分别为气泡表面的法向和切向, x 为界面上任意位置.

3.2 计算网格与参数

本文选取的计算区域和参数主要依据图2. 整个计算区域为直径 2.5 mm, 长度 1.2 mm 的圆柱体, 轴向具有周期性, 见图5. 直径 0.1 mm 的铂丝贯穿于整个计算区域的轴线. 铂丝壁面设为等温, 温度 393 K, 无滑移. 丝上方有两个直径 0.12 mm 的球形气泡, 气泡间距为 0.16 mm. 气泡底部与丝表面间存在一微层, 最小厚度为 0.002 mm. 作为工质的水充满固体表面、气泡与外边界间. 计算区域外边界设置为压力出口边界, 允许计算区域内流体自由流出边界, 压力为大气压, 液体温度为 303 K.



(a) 计算区域



(b) 左侧气泡底部与邻近区域

图 5 模拟区域和网格分布

Fig. 5 Simulation model

水工质的比热容与导热系数假定为常数,即 $c_{p1} = 4\,182\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $\lambda_1 = 0.6\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. 密度采用 Boussinesq 模型,基本密度为 $\rho_0 = 998\text{ kg}/\text{m}^3$,膨胀系数取 $\beta = 0.000\,5$. 由于系统温度和黏度变化幅度较大,液体黏度采用线性模型,即 $\mu = 0.000\,8 - 0.000\,007\,14 \cdot (T - 303)\text{ Pa} \cdot \text{s}$. 气泡界面蒸发凝结传热系数为 $h = 2.3 \times 10^5\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

整个计算区域主要采用四面体网格,气泡底部的微液层区域网格进行了加密,总网格数为 227 875 个,如图 5. 流动和换热方程采用有限容积法进行求解,采用二阶迎风格式,收敛精度为 10^{-5} . 根据计算结果,不同网格的流场和温度场类似.

3.3 数值结果分析

图 6 为双气泡射流系统的温度场. 两个气泡

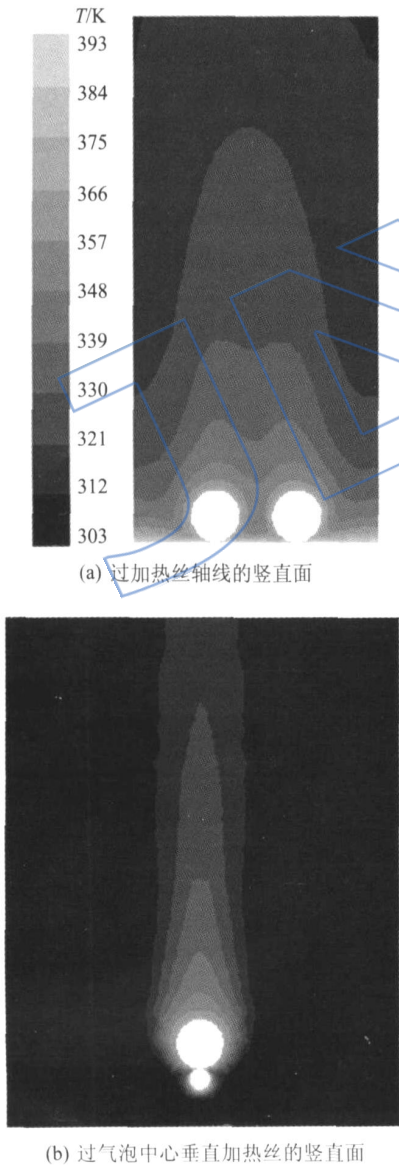


图 6 气泡射流系统温度场

Fig. 6 Temperature field of bubble jet flow system

上方均存在热毛细力引起的气泡射流,射流区内温度相对较高,而两个气泡之间温度相对较低. 两股气泡射流向上发展过程中,发生相互吸引现象. 加热丝上方 1.5 mm 以上时,两股射流逐渐合成一股. 由于射流和自然对流影响,加热丝上方流体温度显著高于主液区. 另一方面,过气泡中心垂直加热丝的竖直面,温度迅速地由射流中心降低至主液区温度,因此气泡射流在这个面上的边界层显著收缩,如图 6(b). 加热丝正上方不同高度处 ($y = 0.4, 0.8, 1.5\text{ mm}$) 的温度分布见图 7. 射流区相对主流区是温度较高的峰,射流向上过程中温度峰逐步扩展,但温度显著下降. 加热丝上方 1.5 mm 以上时,两个温度峰逐渐合成一个温度峰,其最高温度为 324.5 K.

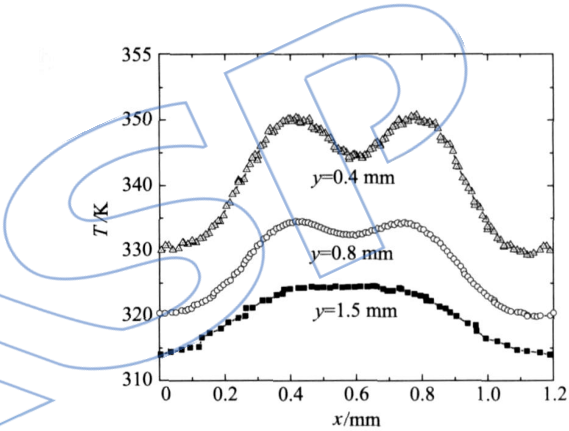


图 7 加热丝正上方的温度分布

Fig. 7 Temperature distributions above the wire

气泡射流流场主要由气泡界面温度场诱导,反过来流场也对温度场有重要影响. 双气泡射流系统的流场如图 8,两个气泡上方均存在明显的气泡射流,图中速度为矢量的模. 图 8(b) 清晰显示了射流的基本构型. 气泡顶部由于温度梯度小,流动速度较低,形成流动的滞止区. 气泡底部由于温度急剧变化,流动速度较高,流体被迅速泵吸并向上方移动,从而形成气泡上方高温高流速的射流. 图 8(a) 则显示了两个气泡射流间的相互关系. 两气泡正上方的射流具有相互吸引作用,而两气泡中间区域由于两个气泡的泵吸作用而使流速较高.

加热丝正上方不同高度处 ($y = 0.4, 0.8, 1.5\text{ mm}$) 的流动速度分布见图 9,其中速度为矢量的模. 与温度分布不同,气泡顶部流速较低,而且在向上过程中逐步增加. 加热丝上方 0.4 mm 时,流动速度在气泡上方出现两个低谷. 加热丝上方

0.8 mm 时,两个流动速度低谷开始消失. 加热丝上方 1.5 mm 时,流动速度在两个气泡中间达到峰值,两个射流合成一股.

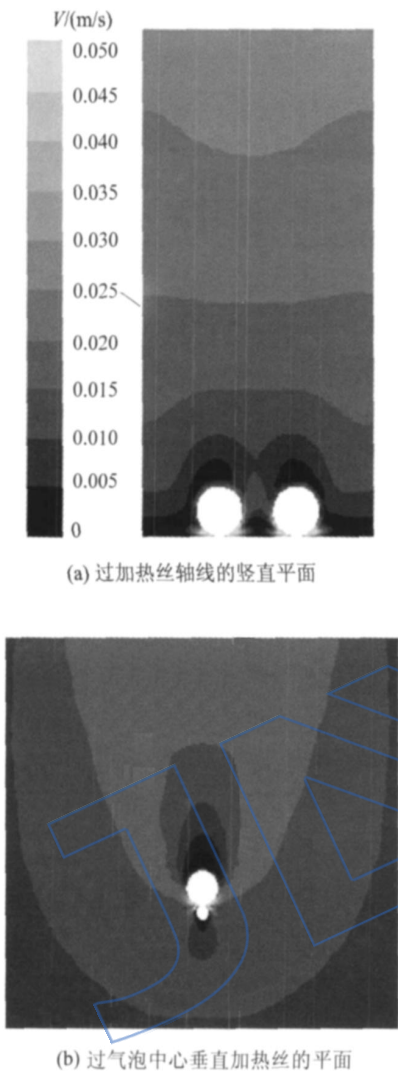


图 8 气泡射流系统速度场

Fig. 8 Velocity field of bubble jet flow system

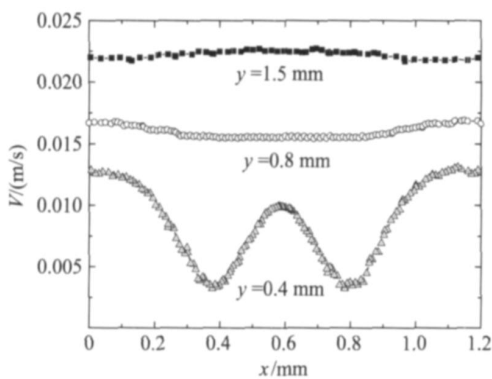


图 9 加热丝正上方的流速分布

Fig. 9 Flow velocity distributions above the wire

由左右对称性,图 10 给出过加热丝轴线竖直平面上右侧气泡的界面温度分布,其中横坐标为界面到气泡中心的水平距离. 气泡顶部界面温度基本稳定在 370 K,因此温度梯度和热毛细力均很小,形成流动的滞止区域. 气泡底部界面温度迅速上升,最高达到 386 K,形成很高的温度梯度和热毛细力,液体被迅速的泵吸. 气泡左侧的界面温度略低于右侧,因此左侧的表面张力将高于右侧,射流将偏向于左侧,与实验现象相一致. 此外,右侧气泡水平方向的受力约为 $1.8 \times 10^{-8}\text{ N}$,有远离左侧气泡的趋势.

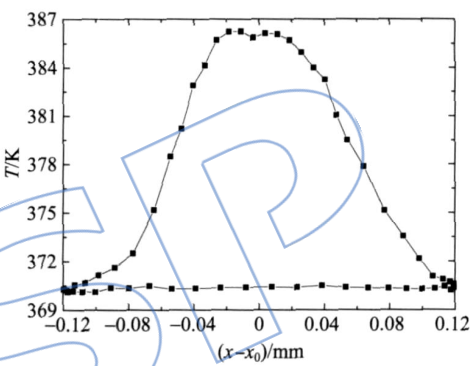


图 10 右侧气泡的界面温度分布

Fig. 10 Interface temperature distribution of the right bubble

4 结 论

本文研究微细加热丝上气泡射流间的相互作用与物理机制,结论如下:

- 1) 微细丝上相邻气泡射流间存在相互吸引现象,强相互作用时相邻射流可以合并成一股射流;
- 2) 气泡生长造成局部温度下降,导致相邻气泡两侧的热毛细力不平衡,引起两个气泡射流间的相互吸引;
- 3) 气泡射流流场主要由气泡界面温度场诱导,反过来流场也对温度场有重要影响,但两者的变化趋势不同. 从气泡顶部向上,射流区的温度不断降低,流速则升高.

参考文献:

[1] Forster H K, Greif R. Heat transfer to a boiling liquid, mechanism and correlations [J]. Trans. ASME, J. Heat Transfer, 1959, 81: 43-53.

[2] Forster H K, Zuber N. Dynamics of vapor bubbles and boiling heat transfer [J]. AIChE J, 1955, 1: 531-535.

- [3] Rusanov K V , Shcherbakova N S. Effect of reduced gravity and weightlessness on vapor bubble dynamics and heat transfer in boiling liquid [J]. Low Temp. Phys. , 1998 , 24 : 100-115.
- [4] Christopher D M , Wang B X , Peng X F. Flow field around a condensing and evaporating vapor bubble in microgravity [C] // Proc. Molecular and Microscale Heat Transfer in Material Processing and Other Applications. Yokohama , Japan : Internation Center for Heat and Mass Transfer , 1996 , Part 2 : 162-170.
- [5] Wang H , Peng X F , Lin W K , et al. Bubble top jet flow on microwires [J]. Int. J. Heat and Mass Transfer , 2004 , 47 : 2891-2900.
- [6] Wang H , Christopher D M , Peng X F. Jet flows from bubbles during subcooled pool boiling on micro wires [J]. Science in China Series E Engineering & Materials Science , 2005 , 48 : 385-402.
- [7] Wang H , Peng X F , Christopher D M , et al. Investigation of bubble-top jet flow during subcooled boiling on wires [J]. Int. J. Heat and Fluid Flow , 2005 , 26 : 485-494.
- [8] Lu J F , Peng X F. Bubble jet flow formation during boiling of subcooled water on fine wires [J]. Int. J. Heat and Mass Transfer , 2007 , 50 : 3966-3976.
- [9] 王昊 , 彭晓峰. 加热丝上核态沸腾时气泡间的热相互作用 [J]. 航空动力学报 , 2002 , 17 (2) : 240-245.
WANG Hao , PENG Xiaofeng. Interaction between boiling bubbles on a heated wire [J]. Journal of Aerospace Power , 2002 , 17 (2) : 240-245. (in Chinese)
- [10] Carey V P. Liquid vapor phase-transition phenomena [M]. New York : Hemisphere Publishing House , 1992.