

# 微细加热丝上沸腾换热特性分析

任飞<sup>a</sup>, 楚化强<sup>ab</sup>, 陈光<sup>ab</sup>, 卫言<sup>a</sup>, 丑鹏飞<sup>a</sup>

(a. 能源与环境学院; b. 冶金减排与资源综合利用教育部重点实验室, 安徽工业大学 安徽 马鞍山 243002)

**摘要:** 沸腾换热是一种高效换热方式。基于本课题组搭建的可视化池内沸腾实验台, 以直径为0.1, 0.2 mm加热丝上的沸腾换热为研究对象, 利用高速相机与电子显微镜探究过冷状态下微细加热丝上气泡的状态, 分析热流密度和过冷度对加热丝上气泡脱离直径及生长时间的影响。结果表明: 在过冷状态下, 加热丝上的气泡会出现4种扫荡现象, 并且在气泡长大过程中出现射流现象, 在热流密度 $3.35 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 、主液体温度 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 直径为0.2 mm加热丝上气泡的射流现象可持续13 s; 在热流密度 $4.53 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 、主液体温度为 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 直径为0.1 mm加热丝上气泡出现了多射流现象; 主液体温度达到 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 气泡扫荡现象强烈, 气泡的脱离直径与生长时间均显著减小。

**关键词:** 沸腾换热; 气泡扫荡; 气泡射流; 脱离直径

中图分类号: O 359.1 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1671-7872.2017.03.006

## Analysis of Characteristics of Boiling Heat Transfer over Micro-wire

REN Fei<sup>a</sup>, CHU Huaqiang<sup>ab</sup>, CHEN Guang<sup>ab</sup>, WEI Yan<sup>a</sup>, CHOU Pengfei<sup>a</sup>

(a. School of Energy and Environment; b. Ministry of Education Key Laboratory of Metallurgical Emission Reduction & Resources Recycling, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

**Abstract:** Boiling heat transfer is a highly effective mode of heat transfer. Based on the visually experimental platform for pool boiling designed by research group, taking the boiling heat transfer over micro-wires with the diameters of 0.1, 0.2 mm as objects, the states of bubbles over the micro-wire under sub-cooled condition were studied with a high speed camera and the electronic microscope. The influence of heat flux and sub-cooling degree on the departure diameter and growth time of the bubble over micro-wire were analyzed, respectively. The results show that four kinds of bubbles sweeping movements and jet flow in the growth process can be observed on the heated micro-wire. The bubble jet flow continues for 13 s on the heated wire with the diameter of 0.2 mm, when the heat flux is  $3.35 \times 10^6 \text{ W/m}^2$  and mainstream temperature is at  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . And the multi jet phenomenon appears over the bubble on the heated wire with diameter of 0.1 mm under the condition of heat flux  $4.53 \times 10^6 \text{ W/m}^2$  and mainstream temperature at  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . When the temperature of mainstream reaches  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ , the bubble sweeps strongly on the wire, therefore, the bubble departure diameter and growth time are significantly reduced.

**Key words:** boiling heat transfer; bubble sweeping; bubble jet; departure diameter

沸腾换热是对流换热中最为重要的一种方式, 因其具有高效的换热系数而被广泛应用于动力、冶金、石油、化工、机械、制冷等传统领域<sup>[1-4]</sup>。与辐射换热不同, 沸腾换热需要工质, 主要特征为工质中有气泡产生<sup>[1, 5]</sup>。微细尺度传热是近些年形成的一个新的科学分支, 主要研究微细情况下空间尺度和时间尺度的传热

收稿日期: 2017-02-14

基金项目: 安徽工业大学教改课题项目(2016jy39, 2015006); 安徽省高等学校省级精品开放课程(2012gkk022); 安徽工业大学实验技术开发基金和高等学校能源动力类专业教育改革发展项目(NDJZW2016Y-1)

作者简介: 任飞(1994—)男, 安徽阜阳人, 硕士生, 主要研究方向为相变传热特性。

通信作者: 楚化强(1982—)男, 山东菏泽人, 博士, 副教授, 主要研究方向为沸腾换热分析及检测。

规律。随着航空航天热环境控制技术、微电子工程技术等的发展,高效能质传递技术越来越被重视,微尺度传热也愈显重要,而微尺度下的沸腾换热规律也逐渐引起国内外研究者的兴趣。

Nukiyama<sup>[6]</sup>利用铂丝第一次获得了水的完整沸腾换热曲线,Paul等<sup>[7]</sup>同样利用铂丝作为加热丝研究水饱和和沸腾时的气泡动力学,发现平均活化穴密度与热流量呈线性关系。Pascual等<sup>[8]</sup>统计分析电场对加热丝上沸腾换热的影响,结果表明,在已知热流量的情况下,电场会增大自然对流换热的贡献,而汽化潜热和强制对流的贡献会减弱。基于精细可视化沸腾实验平台,王昊等<sup>[9-10]</sup>系统研究了加热丝上气泡运动的各种现象,并建立相应的动力学模型,结果表明,气泡会造成局部温降,且通过高速相机和PIV(Particle Image Velocimetry)技术对过冷沸腾中气泡顶部的射流进行观察,并测量其速度场。陆建峰等<sup>[11]</sup>通过对过冷核态池沸腾过程中气泡横向运动现象的分析,认为周围液体中的热毛细流是影响气泡横向运动的最大因素。彭晓峰等<sup>[12]</sup>观察到倒置气泡核态沸腾的射流现象。Zhou等<sup>[13]</sup>发现加热丝上相邻气泡间的相互作用对沸腾换热有着重要的作用。李媛园<sup>[14]</sup>利用激光技术对不同工质的过冷沸腾过程中微尺度铂金加热丝表面的气泡进行观测,并进行数值模拟。Wang等<sup>[15]</sup>研究了表面活性剂溶液中加热丝上气泡爆炸这一新现象。

为进一步探究微细加热丝上气泡的运动特性,笔者利用本课题组设计并搭建的大容器沸腾换热实验台,分别以直径为0.1,0.2 mm微细加热丝为实验对象,观察微细加热丝上气泡的行为特征,分析过冷度和热流密度对加热丝上气泡的脱离直径和生长时间的影响。

## 1 实验

### 1.1 实验原料

为排除液体的导电和水中各种物质对加热丝表面和气泡生成的影响,实验主体溶液选为不含离子的高纯度蒸馏水。

### 1.2 实验装置与方法

实验装置总体框架为钢制立体架,立体架上焊有2根用来固定加热丝和电线的不锈钢管,不锈钢管上下左右均可调,可将加热丝调整至所需位置。实验系统分为三大部分:观测系统、加热系统和实验本体,见图1。

观察系统主要包括高速相机和电子显微镜。高速相机为美国Phantom V311,其由高速摄像头、高分辨率图像采集卡和一系列光学镜头组成,最大拍摄速度可达50万帧/s。根据实验需要,相机拍摄速度设为100帧/s,最大分辨率1280×800时可达到较好效果。利用Phantom公司提供的PCC软件进行数据收集,并进行逐帧筛选捕捉加热丝上的气泡活动。

为清晰地捕捉到气泡的各种射流现象,利用手持式扫描电镜进行拍摄,该电镜最大可对气泡放大800倍,最大像素为200万。加热系统主要为加热丝,以长度为9.5 mm、直径分别为0.1 mm金属铂加热丝和0.2 mm镍铬加热丝为加热表面,以2根500 W镍铬加热丝用于加热外部水。实验本体是透明的PC材料方形耐高温塑料箱,强度较好,耐150℃温度,透明度高,可满足观察和图片采集的需要。为维持实验容器的温度,利用半水浴方法,即将实验容器放入加热容器中,一半在水中,一半在空气中,利用容器下部的水加热实验容器,容器中的水温会缓慢上升,这样有利于在不同过冷度下观察与数据采集。水浴容器采用PC材料,自行设计底座和不锈钢光滑钢板,2根500 W镍铬加热丝固定在底座上用于加热外部水。

采用兆信RXN-305D直流电源供电,最大可输出30 V直流电压和5 A电流,电压稳定度为0.01%±2 mV,电流稳定度为0.1%±3 mA,显示最大误差为1%,可满足实验需要。采用胜利万用表(VC890C+)测量加热丝两端电压,万用表直流电压精度为0.5级,温度精度为1级。

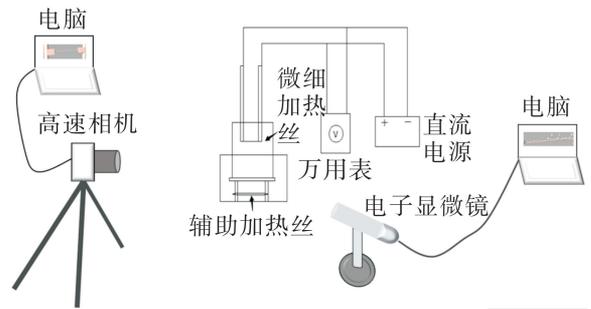


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 气泡扫荡现象

通过实验发现,随着热流密度的升高,气泡会在加热丝上出现反复的扫荡现象。图2为热流密度为 $1.04 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ 、主液体温度为 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 、直径为 $0.1 \text{ mm}$ 加热丝上气泡的扫荡现象。

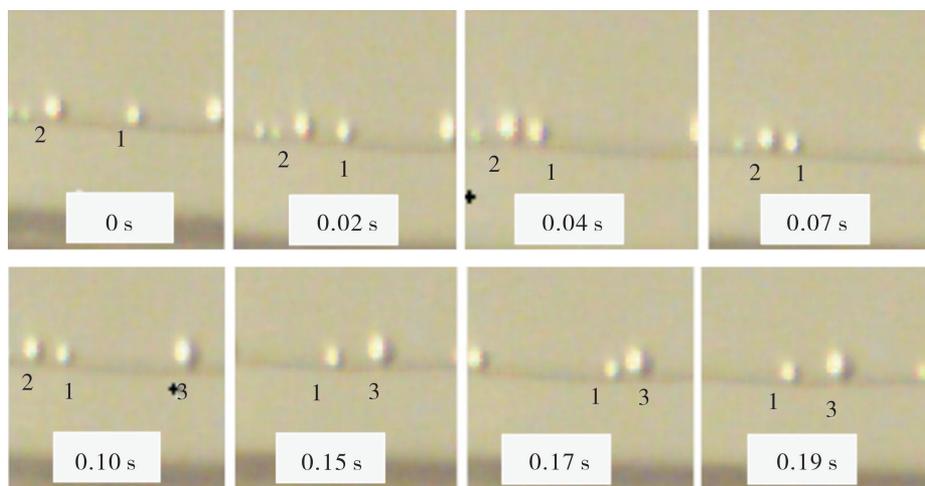


图2 气泡扫荡现象

Fig. 2 Phenomenon of bubble sweeping

由图2可看出:零时刻开始,气泡1向左运动,运动至气泡2时,受到惯性作用一起向左轻微颤动,相连 $0.03 \text{ s}$ 后气泡2依然静止不动,气泡1开始向右运动;运动至气泡3后与其碰撞,气泡3依然静止不动,气泡1开始向左运动,重复上述运动。通过观察总结,可将扫荡现象分为四类:气泡1在气泡2和气泡3中间往复扫荡;运动中的气泡1碰撞静止的气泡2,气泡1速度逐渐减为零,气泡2向前运动;气泡1与气泡2相向运动后合并一起脱离加热丝;气泡1与气泡2同方向运动,碰撞后合并脱离加热丝。

通过分析知,扫荡现象主要由气泡附近的温度梯度和所受热毛细力决定。气泡在生长过程中,其底部微液层开始蒸发,周围的过冷液体进入微液层留下的空缺,使得气泡底部温度迅速降低,当稍微受到气泡外部因素扰动时,气泡两侧温度梯度的平衡就会被打破,从而托着气泡开始运动。

### 2.2 气泡射流现象

实验发现过冷工质时气泡会发生射流现象,当过冷度较大且热流密度较小时,气泡生长较慢,在加热丝上停留时间较长,在此环境下,可方便观察气泡射流。泡顶射流因不具有反射作用,很难捕捉。实验过程中,射流大多发生在较小气泡上,并且射流现象明显,而尺寸较大的气泡上几乎看不到射流,图3为热流密度为 $3.35 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 、主液体温度为 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0.2 \text{ mm}$ 加热丝上的气泡现象。图3中左侧小气泡顶部可清晰观测到射流现象,而右侧的大气泡顶部则没有射流现象。



图3 加热丝上大小气泡射流现象

Fig. 3 Jet phenomenon of small and big bubbles on heated wire

气泡的射流主要是由热毛细力决定,而热毛细力是由温度梯度引起的。气泡在长大过程中需向外界吸热,小气泡长大的趋势更明显,所以会产生更大的温度梯度,气泡射流情况也就更明显。随着气泡的长大,气泡的成长速度减慢,泡顶的射流也会慢慢变弱,甚至消失。图4为热流密度 $3.35 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 、主液体温度 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0.2 \text{ mm}$ 加热丝上气泡射流的消失过程。

实验过程中偶尔会发现气泡上不止一股射流的情况,这种情况称之为“多射流”。多射流现象出现的几率较小,只能在某一瞬间看到,很难捕捉。王昊等<sup>[9]</sup>通过实验与模拟相结合的方式证实了多射流的客观存在,多射流是由自然对流和Marangoni效应共同作用形成的。由于温度梯度与Marangoni效应的共同作用,气泡前后两侧的温度小于加热丝附近与气泡顶部的温度,这与单射流的不同,从而为形成2个独立的射流创造条

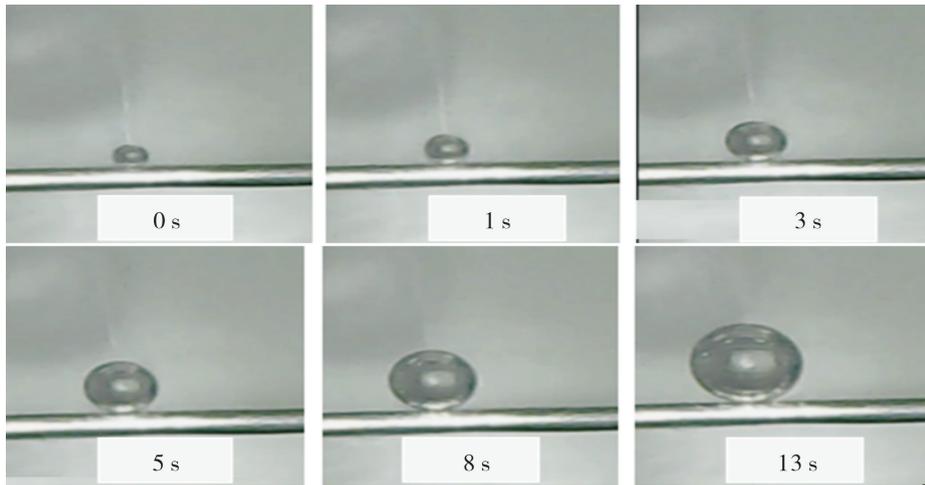


图4 泡顶射流消失过程

Fig. 4 Disappearance of bubble-top jet flow

件,图5为热流密度  $4.53 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ ,主液体温度  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $0.1 \text{ mm}$ 加热丝上的多射流现象。

图6为热流密度  $4.53 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ ,主液体温度  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $0.1 \text{ mm}$ 加热丝上气泡射流现象。加热丝近似圆柱体,四周与水接触,加热丝上部和下部都能生成气泡,射流同样会出现在气泡的顶部,如图6(a)所示。气泡长大到一定程度,由于受到浮力的影响,其会绕着加热丝转至加热丝上部,利用加热丝与气泡间的应力而继续在加热丝上成长,气泡顶部射流由气泡附近温度梯度决定,故射流也会随气泡而转动,如图6(b)。



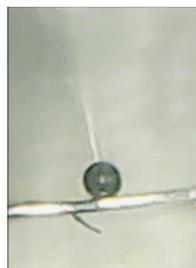
图5 多射流现象

Fig. 5 Phenomenon of multiple jets

图7为热流密度为  $3.35 \times 10^6, 4.53 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ ,直径为  $0.2, 0.1 \text{ mm}$ 时加热丝上气泡射流现象。利用电子显微镜会更清楚地观察到射流的方向,当两个临近的气泡都有射流时,射流的影响区域是重叠的,两个气泡的射流方向也会受到影响,如图7(a)。由于气泡长大过程中需要吸热,故两个气泡都充当了冷源,射流会相向,并使气泡有互相远离的趋势,较大的气泡冷源作用越明显,对射流的吸引作用也越明显,如图7(b)。



(a) 方向向下的射流



(b) 方向向上的射流

图6 气泡顶部射流

Fig. 6 Bubble-top jet flows



(a) 直径  $0.2 \text{ mm}$ 加热丝上



(b) 直径  $0.1 \text{ mm}$ 加热丝上

图7 气泡射流方向

Fig. 7 Orientation of jet flows

### 2.3 气泡的脱离直径与生长时间

加热丝上气泡的脱离对换热和加热丝温度有重要的影响。图8为主液体温度  $74 \text{ }^\circ\text{C}$ (过冷度  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ )时气泡脱离直径与生长时间随热流密度的变化。

从图8可看出,随着热流密度的增加,气泡的脱离直径变大,气泡的生长时间也变长。当热流密度增大时,加热表面对气泡的传热增强,从而增强了气泡边界表面与周围液体的换热,使得气泡周围的过热液体层

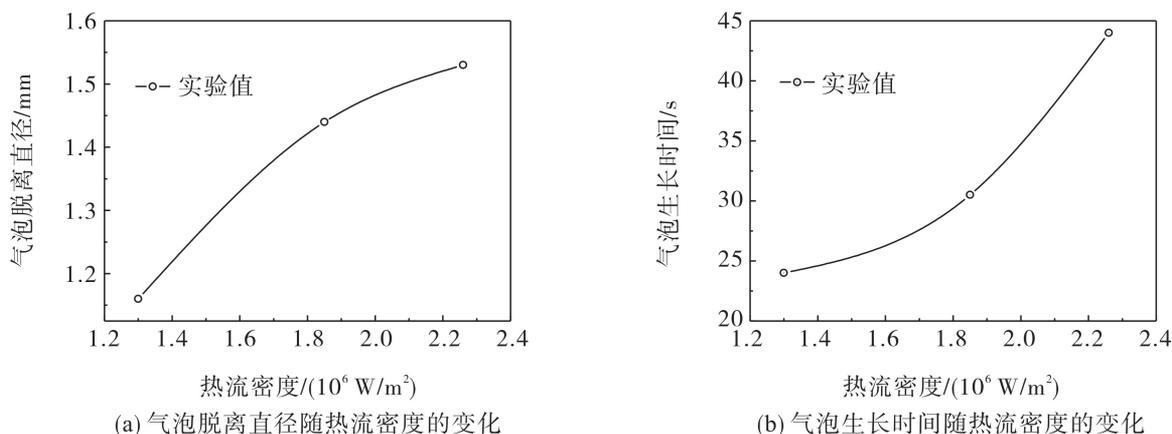


图8 热流密度对气泡脱离的影响

Fig. 8 Influence of heat flux on bubble detachment

变厚。附着在气泡边界上的过热液体和加热表面的张力一起与气泡受到的浮力得到新的平衡。故气泡的脱离需更大的浮力,而增厚的过热液体层延缓了气泡的脱离,气泡生长时间延长。气泡受力如图9。过热液体层延缓了气泡的脱离,过热液体层越厚,对气泡脱离的延缓越强,气泡脱离时间也就越长。

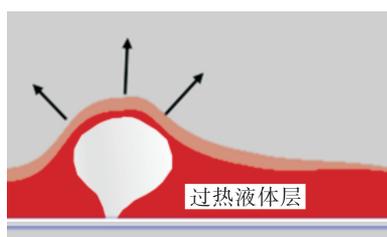


图9 气泡受力示意图

Fig. 9 Schematic diagram of bubble force

图10为热流密度为 $2.26 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 时气泡脱离直径与生长时间随主液体温度的变化。由图10可看出:不同过冷度下气泡的脱离直径和脱离生长时间与不同热流密度条件下的现象有所不同,气泡的脱离直径总体上随着温度的升高而升高,但在 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 时出现略微下降;而气泡生长时间规律不明显,在 $60, 67, 74 \text{ }^\circ\text{C}$ 时生长时间相差不大,在 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 时出现了较大波动。

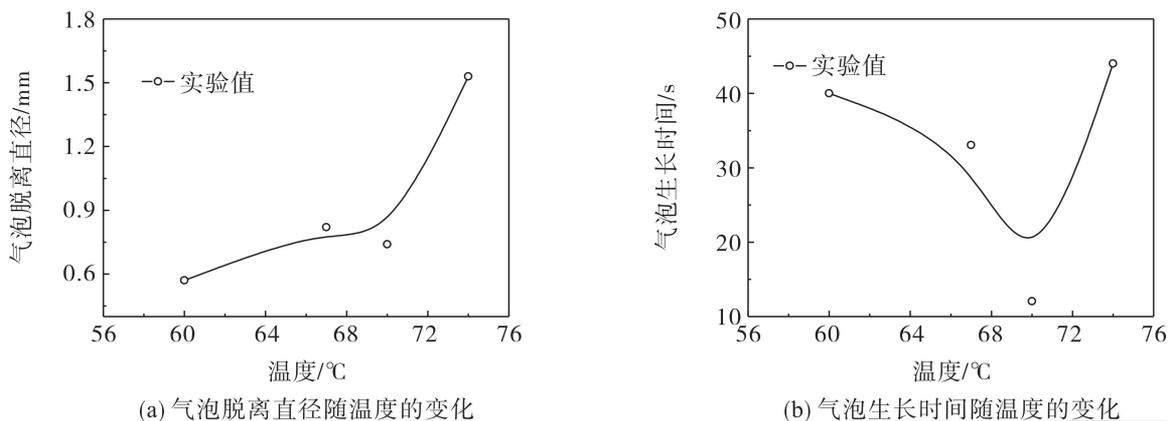


图10 过冷度对气泡脱离的影响

Fig. 10 Influence of subcooling on bubble detachment

进一步对比实验发现,主液体温度为 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,加热丝上气泡周围气泡的扰动状态较为严重,包括气泡围绕加热丝转动以及气泡的扫荡现象,如图11。扫荡气泡与目标气泡有一定的距离,但是气泡的扫荡运动对加热丝附近液体,尤其是过热液体层有很大的影响,液体的扰动导致温度梯度发生变化,增加了作用在气泡上的热毛细力。这会使气泡提前脱离加热丝,气泡的脱离直径与生长时间也随

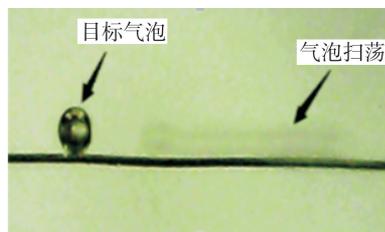


图11 气泡扰动现象

Fig. 11 Phenomenon of bobble disturbance

之减小,故出现了70℃时的转折点。随着主液体温度的升高,过冷度逐渐下降,气泡界面与主液体的凝结作用越来越小,凝结液对气泡长大的抑制作用也越来越弱,所以气泡能获得更大的直径。

### 3 结 论

对微细加热丝上气泡扫荡与射流现象进行探讨,得到以下主要结论。

1) 在合适条件下,微细加热丝上的气泡会出现不同形式的扫荡运动。

2) 在主流液体过冷状态下,微细加热丝上气泡顶部会产生射流现象,这主要由气泡附近温度梯度、气泡直径与加热丝直径、Marangoni效应和热毛细力等因素所致;此外,小气泡生长速度越快,形成的温度梯度越大,造成小气泡的射流现象相比于大气泡更明显。

3) 当主液体过冷度不变时,随着热流密度的增加,气泡的脱离直径不断增大,气泡的生长时间也不断延长;当热流密度不变时,随着主液体温度的增加,气泡的脱离直径显著增大,而生长时间变化不明显;主液体温度达到70℃时,气泡扫荡现象较明显,气泡的脱离直径与生长时间都有显著减小,可增强传热效果。

#### 参考文献:

- [1] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:315-320.
- [2] 林瑞泰. 沸腾换热[M]. 北京:科学出版社,1988:11-13.
- [3] 刘小芳. 射流曝气微细气泡的PIV测量[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版),2012, 29(2):167-170.
- [4] 戴欣怡,刘亦鹏,包轶颖,等. 低温气液两相流中Taylor气泡的合并[J]. 过程工程学报,2013, 13(5):776-780.
- [5] 楚化强,徐靖,顾明言,等. 基于统计窄谱带及关联K模型的气固非灰辐射特性研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2014, 31(1):1-5.
- [6] NUKIYAMA S. The maximum and minimum value of heat transmitted from a metal to boiling water under atmosphere pressure[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1966, 9(12):1419-1433.
- [7] PAUL D D, ABDEL-KHALIK S I. A statistical analysis of saturated nucleate boiling along a heated wire[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1983, 26(4):509-519.
- [8] PASCUAL C C, JETER S M, ABDEL-KHALIK S I. A statistical analysis of EHD-enhanced nucleate boiling along a heated wire[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(6):1201-1212.
- [9] 王昊. 微细丝上过冷沸腾核化多样性与近壁气泡动力特性[D]. 北京:清华大学,2004:41-115.
- [10] 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):241-245.
- [11] 陆建峰,彭晓峰,丁静. 微细丝上气泡射流间的相互作用特性[J]. 航空动力报, 2010, 25(2):264-269.
- [12] 彭晓峰,陆建峰,丁静. 加热丝上气泡射流的动力学特征[J]. 化工学报,2009, 60(10):2433-2437.
- [13] ZHOU L, WEI L, LI Y, et al. Bubble circling phenomena in subcooled nucleate pool boiling on microwires[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 64:945-951.
- [14] 李媛园. 微加热丝表面池核沸腾过程中气泡动态的数值模拟[D]. 北京:华北电力大学, 2013:13-41.
- [15] WANG J, LI F, LI X. Bubble explosion in pool boiling around a heated wire in surfactant solution[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 99:569-575.

责任编辑:何莉