

微气泡发射沸腾形成机理

唐继国, 孙立成, 朱光昱

(哈尔滨工程大学 核科学与技术学院

核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为了探究具有超高换热性能的微气泡发射沸腾现象的形成机理, 采用 FLUENT 软件对加热面上单个气膜周围的速度场进行数值模拟, 并与实验结果进行对比. 实验结果表明, 对于水, 微气泡发射沸腾现象发生时, 加热壁上会出现气膜破裂的过程, 并且过冷度和壁面过热度的升高会加剧这一过程. 对于酒精, 微气泡发射沸腾现象很难发生. 计算结果表明, 在过冷条件下气膜周围存在 marangoni 对流, 对于水而言, 过冷度和壁面过热度的升高会增强气膜周围的 marangoni 对流过程, 而在酒精气膜周围 marangoni 对流相对较弱. 因此由气膜周围强烈的 marangoni 对流过程引起的气液界面上的扰动可能造成气膜破裂, 这可能是微气泡发射沸腾现象形成的原因之一.

关 键 词: 临界热流密度; 微气泡发射沸腾; 过冷沸腾; marangoni 对流; 气膜破裂

中图分类号: V129; TK124

文献标志码: A

Formation mechanism of microbubble emission boiling

TANG Ji-guo, SUN Li-cheng, ZHU Guang-yu

(National Defense Key Subject Laboratory for Nuclear Safety and Simulation Technology,
College of Nuclear Science and Technology,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to explore the mechanism of microbubble emission boiling with high heat transfer performance, numerical simulations were conducted for the velocity field around a single film on the heating surface with the software of FLUENT, and then compared with experimental results. Experimental results indicate that there exists the collapse of film on the heating surface as for water when microbubble emission boiling occurs, and the increase of subcooling and wall superheat would enhance the collapse of film. However, as for ethanol, microbubble emission boiling hardly occurs. Simulation results indicate that there exists marangoni convection around the film under subcooled condition. Moreover, increase of subcooling and surface superheat could enhance marangoni convection around film of water. However, marangoni convection is rather weak near the film of ethanol. Therefore, the disturbance caused by strong marangoni convection near the film at the interface of air and liquid may lead to the collapse of film. This may be one of the reasons triggering microbubble emission boiling.

Key words: critical heat flux; microbubble emission boiling; subcooled boiling; marangoni convection; collapse of film

收稿日期: 2013-01-18

基金项目: 教育部中央高校科研专项基金(HEUCFZ1122); 核安全与仿真技术国防重点学科实验室基金(HEUFN1102)

作者简介: 唐继国(1988—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士生, 主要从事沸腾换热研究.

随着航空航天技术的发展,涡轮喷气机、微型电子设备等的冷却遇到了严峻的挑战.为了解决这些高负荷部件的冷却问题,需要采用具有高冷却极限和高效率的换热技术.微气泡发射沸腾技术在这方面具有极大的优势,是未来最有希望的技术之一.

微气泡发射沸腾(microbubble emission boiling, MEB)现象是指在一定过冷度下热流密度远远超过临界热流密度(critical heat flux, CHF),并伴随气膜破裂释放大量微小气泡的一种特殊的沸腾现象.这一技术应用于换热设备,可有效解决换热设备换热极限的瓶颈问题,因此得到了一些学者的关注.日本学者 Inada 和 Suzuki 等^[1-5]用铜块, Tange 等^[6-7]用铂丝作为加热元件,进行了过冷沸腾中的微气泡发射沸腾实验.而 Wang, Suzuki 和 Nomura 等^[8-10]对流动过冷沸腾中的微气泡发射沸腾现象进行了大量的实验研究,认为过冷度和流速是触发微气泡发射沸腾现象的关键因素.俄罗斯学者 Zeigarnik 等^[11]用不锈钢作为加热部件,利用高速摄像机对微气泡发射沸腾现象进行了大量的实验观察. Kumagai 等^[12]利用高速摄像机观察微气泡发射沸腾发生时的气泡行为时,发现加热壁面上释放的微小气泡是由聚合的蒸汽气泡碎化分解而形成的. Ueno 等^[13]通过向过冷水中注入蒸汽气泡,利用气泡和过冷液体的相互作用,模拟微气泡发射沸腾现象中的传热过程,认为气液界面上出现的扰动和触发微气泡发射沸腾现象的条件是一致的. WANG 等^[14]在研究过冷沸腾中的 marangoni 对流时,发现一定条件下在铂丝周围存在直径为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 、速度达到 600 mm/s 的微小气泡,与微气泡发射沸腾现象中喷射的微小气泡类似.

目前,对于微气泡发射沸腾的研究还大多处在实验阶段,其形成机理尚不清楚.本文在实验的基础上,通过 FLUENT 软件,对加热壁面上单个气膜周围的流动过程进行数值解析,探究 marangoni 对流与微气泡发射沸腾现象之间的关系,分析微气泡发射沸腾发生的原因.

1 实验装置和实验现象

图1所示是微气泡发射沸腾实验装置,其中上表面是直径为 10 mm 的圆锥形铜芯,其底部有4个加热功率可调节的硅碳棒.铜芯上装有3个直径为 1 mm 的铜-康铜热电偶,分别距离加热面 $3, 5, 8, 8\text{ mm}$.过冷度的调节和维持由一个电加热

器和一个冷却器共同完成.水箱观察窗布置有高速摄影仪(Fastcam SA5)以及侧光和背光系统,可以在 $2000\sim 10\,000\text{ 帧/s}$ 范围内较为清晰地拍摄气泡行为.

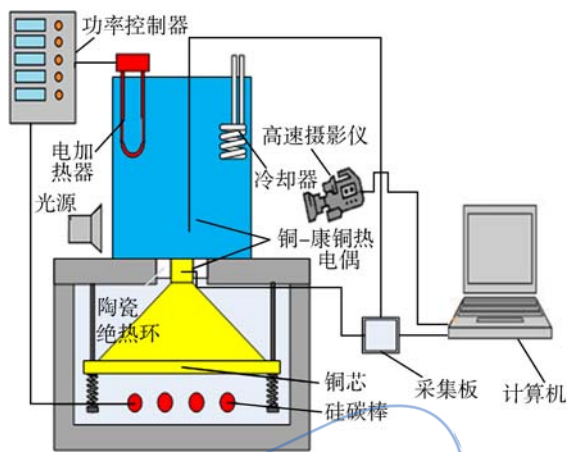


图1 微气泡发射沸腾实验装置

Fig.1 Experimental setup for microbubble emission boiling

在 $15\sim 60\text{ K}$ 过冷度下的过冷沸腾实验结果如图2所示,图中 ΔT_{sat} 为壁面过热度, ΔT_{sub} 为过冷度, q 为热流密度.与 Inada 等^[1-2]所得到的沸腾曲线趋势一致.水的过冷度在 15 K 时,没有微气泡发射沸腾现象发生.而当过冷度超过 30 K 时,微气泡发射沸腾现象剧烈发生,热流密度迅速升高.在加热壁面上周期性地重复出现气膜破裂并伴随大量微小气泡喷射、过冷液体涌入、气膜再次形成的过程.实验结果表明,过冷度或加热壁面过热度升高,会使气膜不稳定性加剧且破裂时间间隔缩短,如图3所示.

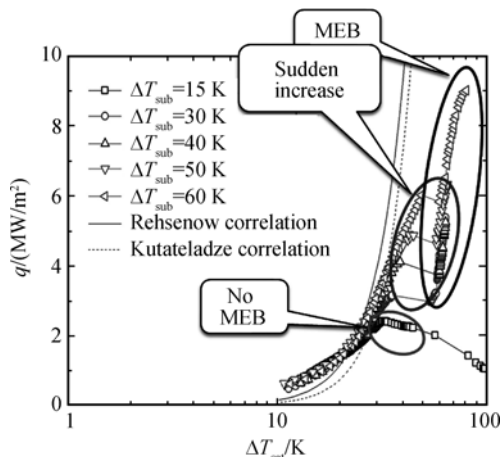


图2 不同过冷度下的沸腾曲线

Fig.2 Boiling curves with different subcoolings

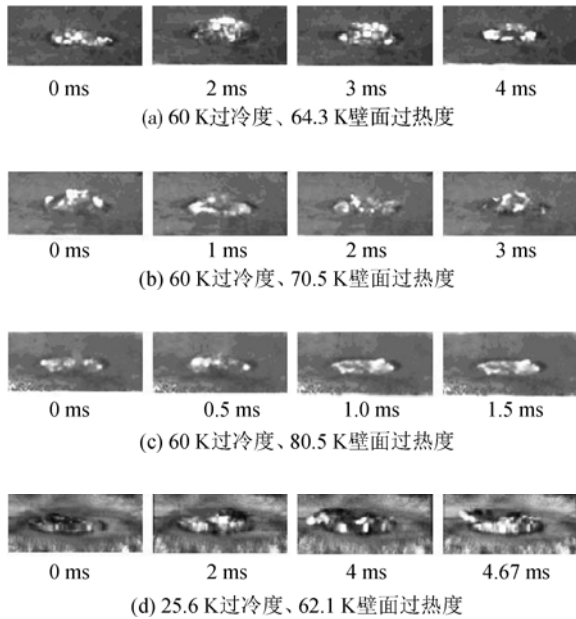


图3 不同过冷度和壁面过热度下的气泡行为
Fig. 3 Bubble behaviors with different subcoolings and wall superheat

2 数值模拟

微气泡发射沸腾具有如此高强度传热能力,其原因主要有两个:首先,加热壁面上气膜破裂可以提高过冷水向加热面的补充速度,起到了强化换热的作用;其次,喷射而出的微小气泡也会加剧过冷水的扰动,进而增强换热,其中气液界面上的冷凝蒸发和气膜周围 marangoni 对流过程可能是造成气膜破裂的主要原因. 本文通过 FLUENT 软件对加热壁面上二维中心对称的气膜周围流场进行数值模拟,以探究 marangoni 对流过程对气液界面稳定性的影响.

2.1 几何模型

数值模拟过程中几何模型和网格分布如图4

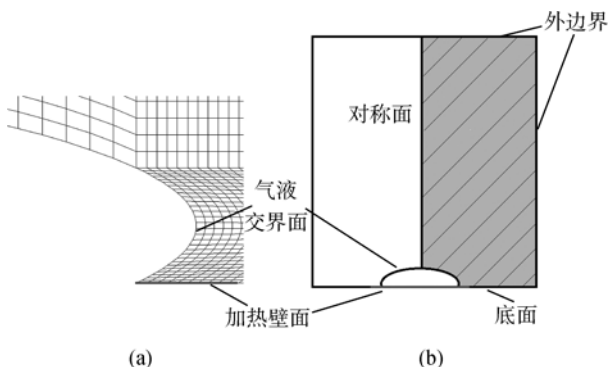


图4 几何模型和网格分布

Fig. 4 Geometry model and mesh distribution

所示,是加热壁面上的单个气泡. 整个计算区域采用结构化网格,气泡附近通过增加节点数来进行加密,如图4(a)所示. 总网格数目是329 595. 气泡横截面近似成一个长轴为8 mm、短轴为1 mm的椭圆形,在图中被放大. 加热壁面的长度是10 mm,与实验装置中加热面直径尺寸相同. 流体计算区域长为50 mm,高为100 mm,如图4(b)中阴影的部分所示. 这个尺寸足以忽略外边界对气泡附近流场计算产生的影响.

2.2 数学模型

2.2.1 控制方程与边界条件

在膜态沸腾区域,通常会在加热壁面上形成一层气膜,因此在研究 marangoni 对流对气膜破裂过程的影响时,可以首先假设在加热壁面上会形成气膜,之后根据 FLUENT 计算出的气膜周围的流场,进一步分析气膜是否能够继续存在. 近壁面单个气泡周围的流场可以用稳态层流的二维 N-S 方程及能量方程来描述. 自然对流采用 Boussinesq 模型近似描述,计算分析的对象为水和酒精. 由于在计算过程中温度变化对于黏度影响较大,黏度采用如下拟合公式计算:

$$\mu = 0.01965 - 0.000136T + 3.2 \times 10^{-7}T^2 - 2.53 \times 10^{-10}T^3 \quad (\text{水}) \quad (1)$$

$$\mu = 2.482 \times 10^{-7}T^2 - 1.692 \times 10^{-4}T + 0.02948 \quad (\text{酒精}) \quad (2)$$

其中 T 为液体的温度,黏度 μ 的单位是 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$. 加热壁面和外边界都设定为温度恒定的壁面条件,除加热壁面之外的底面区域均设为绝热的壁面条件. 由于蒸发引起的液体流动相对于 marangoni 对流引起的流动可以忽略^[15],因此只考虑由蒸发冷凝造成的换热. 气液界面的热边界条件设置为对流模型.

假定气泡内为饱和气体,因此气泡内部的温度等于相应压力的饱和温度. 气液交界面上由蒸发冷凝引起的表面传热系数为^[16]

$$h = \frac{2\sigma}{2 - \sigma} \frac{h_{fg}^2 \rho_v}{T_v} \left(\frac{\bar{M}}{2\pi R T_v} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{p_v}{2h_{fg} \rho_v} \right) \quad (3)$$

其中 h_{fg} 是相变潜热, ρ_v 是蒸汽密度, T_v 是气膜内气体温度, $\bar{M}$ 是蒸汽相对分子质量, R 是气体常数, p_v 是蒸汽压力, σ 为蒸发凝结系数,常压下对于水和酒精一般可以取 0.03. 水的气液界面的表面传热系数一般取 $230\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[17],酒精的取 $153\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[15]. 对于气液界面的动力学边界条件设置为 marangoni 应力模型,气液

界面的应力可表示为

$$\tau = \frac{d\sigma}{dT} \nabla_s T \quad (4)$$

其中 $\frac{d\sigma}{dT}$ 是表面张力随温度变化的系数, $\nabla_s T$ 是气液界面上的温度梯度。

2.2.2 参数设置

能量和动量方程对流项的插值采用2阶迎风格式, 压力速度耦合采取 semi-implicit method for pressure linked equation (SIMPLE) 模型, 其他计算中的边界参数设置如表1。

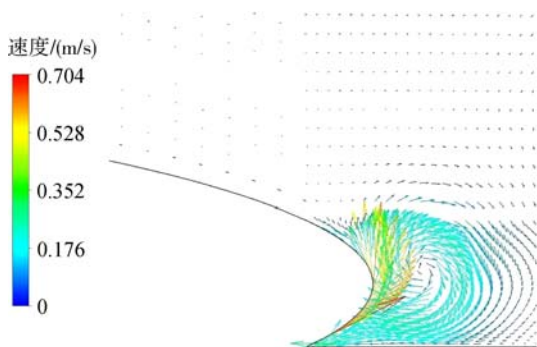
表1 边界参数

Table 1 Boundary parameters

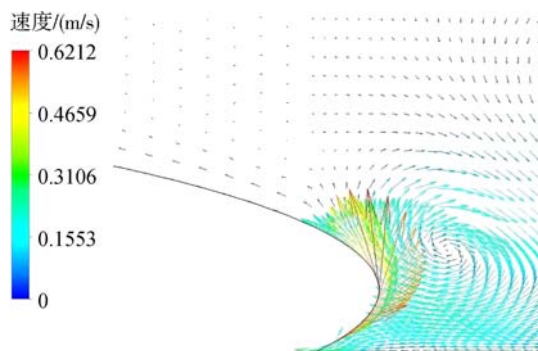
工质	$\Delta T_{\text{sub}} /$ K	$\Delta T_{\text{sat}} /$ K	$h / 10^5$ (W/(m ² · K))	$\frac{d\sigma}{dT} / 10^{-4}$ (N/(m · K))
水	40	64.3	2.30	-1.80
水	50	64.3	2.30	-1.80
水	60	64.3	2.30	-1.80
水	60	70.5	2.30	-1.80
水	60	80.5	2.30	-1.80
酒精	50	64.3	1.53	-0.991
酒精	60	64.3	1.53	-0.991

3 计算结果及分析

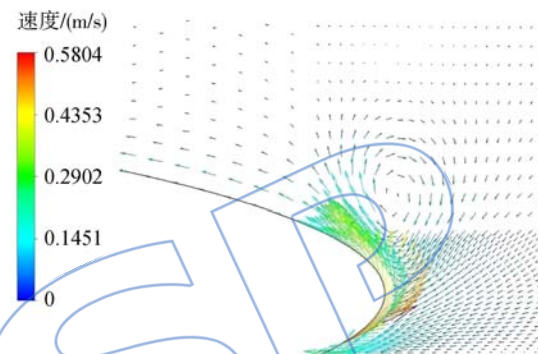
图5是水在40, 50, 60 K过冷度, 以及64.3, 70.5, 80.5 K壁面过热度条件下数值计算得出的气膜周围流体的速度矢量场。可以看出, 气液界面附近存在明显的 marangoni 对流过程, 其原因在于气膜顶部和底部的温度梯度引起过热液层内表面张力的变化, 从而引起气泡周围强烈的对流过程。过冷度或壁面过热度的升高, 都会增强气膜周



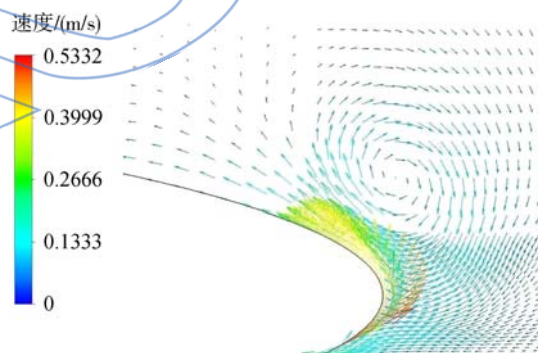
(a) 60 K过冷度、80.5 K壁面过热度



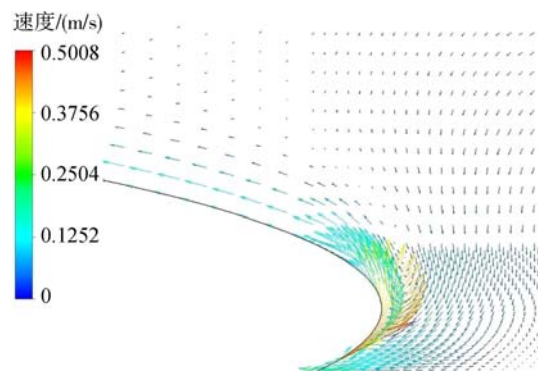
(b) 60 K过冷度、70.5 K壁面过热度



(c) 60 K过冷度、64.3 K壁面过热度



(d) 50 K过冷度、64.3 K壁面过热度



(e) 40 K过冷度、64.3 K壁面过热度

图5 气膜周围速度矢量场(水)

Fig. 5 Velocity vector field around film (water)

围的 marangoni 对流过程,如图 5 所示. Marangoni 对流会造成气液界面的波动,当 marangoni 对流进一步增强时,这种表面波动就可能造成气膜的破裂,进而形成微气泡发射沸腾现象.在图 3 中可以明显看出这一特点:壁面过热度的升高造成气膜更加不稳定,破裂时间间隔缩短,微气泡发射沸腾现象加剧.同样,壁面过热度为 60 K 时,过冷度的升高也会加剧气泡表面波动和气泡冷凝,使微气泡发射沸腾现象增强.

图 6 是酒精在 50 K 和 60 K 过冷度,64.3 K 壁面过热度下气膜周围流体的速度矢量场.酒精的表面张力以及表面张力随温度的变化率均小于水,使酒精气膜周围液体的 marangoni 数相对较小.因此相同条件下,酒精气膜周围的 marangoni 对流比蒸汽气膜周围弱很多,如图 6(a)与图 5(d)所示.除此之外,从图 6(a)和图 6(b)可以看出,过冷度对酒精气膜周围的 marangoni 对流影响很小.

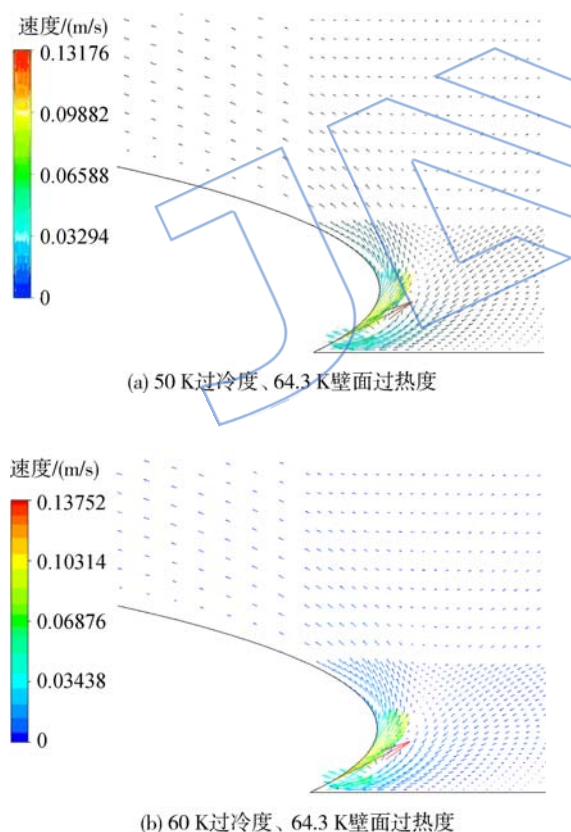


图 6 气膜周围速度矢量场(酒精)

Fig. 6 Velocity vector field around film (ethanol)

酒精气膜周围 marangoni 对流较弱,很难形成振幅较大的界面波动,此外酒精气膜周围不存在局部涡流,使气膜相对稳定.在 Suzuki 等^[5]的

实验中,酒精与其他工质的沸腾现象都不相同,在过冷条件下加热面上很难出现气膜破裂的现象,因此一般不会发生微气泡发射沸腾现象.这进一步说明 marangoni 对流可能是形成微气泡发射沸腾现象的关键因素之一.

综上所述,微气泡发射沸腾现象发生时,气膜周围必然存在较强的 marangoni 对流过程.因此微气泡发射沸腾现象的形成过程可以解释为,在一定的过冷度和壁面过热度下,气膜周围会形成较强的 marangoni 对流过程,这一过程会进一步加剧气液界面波动,当界面波动剧烈到一定程度后,气膜碎化破裂,喷射出大量微小气泡,形成微气泡发射沸腾现象.

4 结 论

在实验研究基础上,通过计算过冷沸腾中气膜周围的流场,分析了 marangoni 对流在微气泡发射沸腾现象形成过程中的关键作用,并得到如下结论:

- 1) 水在 30~60 K 过冷度下能产生稳定的微气泡发射沸腾现象.过冷度或壁面过热度的提高,会使微气泡发射沸腾现象更剧烈.
- 2) 数值计算结果表明,同样实验条件下,对于水和酒精而言,加热壁面上气膜周围均存在 marangoni 对流过程,但酒精气膜周围的 marangoni 对流过程比水弱很多.
- 3) 气膜周围强烈的 marangoni 对流过程会引起气液界面的强烈波动,甚至使气膜破碎,这可能是微气泡发射沸腾现象形成的主要原因之一.

参考文献:

- [1] Inada S, Miyasaka Y, Izumi R, et al. A study on boiling curves in subcooled pool boiling: 1st report an effect of liquid subcooling on local heat transfer[J]. Transaction of Japan Society of Mechanical Engineers, 1981, 47(417): 852-861. (in Japanese)
- [2] Inada S, Miyasaka Y, Sakumoto S, et al. A study on boiling curves in subcooled pool boiling: 2nd report an effect of contamination of surface on boiling heat transfer and collapse vapor slug[J]. Transaction of Japan Society of Mechanical Engineers, 1981, 47(422): 2021-2029. (in Japanese)
- [3] Inada S, Miyasaka Y, Izumi R. A study on boiling curves in subcooled pool boiling: 3rd report behaviors of bubble cluster and temperature fluctuations of heating surface[J]. Transaction of Japan Society of Mechanical Engineers, 1981, 47(422): 2030-2041. (in Japanese)
- [4] Inada S, Miyasaka Y, Izumi R, et al. A study on boiling

- curves in subcooled pool boiling; 4th report heat transfer mechanism in transition boiling[J]. Transaction of Japan Society of Mechanical Engineers, 1981, 47(423): 2199-2208. (in Japanese)
- [5] Suzuki K, Inagaki F, Hong C. Subcooled boiling in the ultrasonic field; on the cause of microbubble emission boiling[J]. Heat Transfer Engineering, 2011, 32(7/8): 673-682.
- [6] Tange M, Yuasa M, Takagi S, et al. Microbubbles emission flow boiling in a microchannel and minichannel [R]. New York: International Conference on Microchannels and Minichannels, 2004.
- [7] Tange M, Watanabe M, Takagi S, et al. Microbubble emission boiling in a rectangular channel flow[R]. Toronto, Canada: International Conference on Microchannels and Minichannels, 2005.
- [8] WANG Guodong, CHENG Ping. Subcooled flow boiling and microbubble emission boiling phenomena in a partially heated microchannel [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2009, 52(1): 79-91.
- [9] Suzuki K, Saitoh H, Matsumoto K. High heat flux cooling by microbubble emission boiling [J]. Annuals of the New York Academy of Sciences, 2002, 974(1): 364-377.
- [10] Nomura T, Shustov M, Suzuki K, et al. Subcooled flow boiling in mini and micro channel contribution toward high heat flux cooling technology for electronics [R]. San Francisco, US: International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition, 2009.
- [11] Zeigarnik Y A, Platonov D N, Khodakov K A, et al. Visualization of boiling of subcooled water [J]. High Temperature, 2011, 49(4): 566-570.
- [12] Kumagai S, Kawata K, Katagiri T, et al. Temperature and pressure fluctuation associated with bubble motion in microbubble emission boiling [J]. The Society of Mechanical Engineers, 2000, 43(2): 206-212.
- [13] Ueno I, Hattori Y, Hosoya R. Condensation and collapse of vapor bubbles injected in subcooled pool [J]. Microgravity Science and Technology, 2011, 23(1): 73-77.
- [14] WANG Hao, PENG Xiaofeng, Suresh V G, et al. Microbubble return phenomena during subcooled boiling on small wires [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(1): 163-172.
- [15] Christopher D M, Wang H, Peng X F. Numerical analysis of the dynamics of moving vapor bubbles [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(19): 3626-3633.
- [16] Carey V P. Liquid vapor phase-transition phenomena [M]. New York: Hemisphere Publishing House, 1992.
- [17] 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]. 航空动力学报, 2010, 25(2): 264-269.
LU Jianfeng, PENG Xiaofeng, DING Jing. Interaction between bubble jet flows on thin wires [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(2): 264-269. (in Chinese)