

竖直狭缝通道内水沸腾换热的气泡动力学研究

郭雷, 张树生, 陈雅群, 程林

(山东大学热科学与工程研究中心, 250061, 济南)

摘要: 为加深对狭缝通道内水沸腾换热机理的探索, 对宽度为 2 mm、长度为 300 mm 的竖直狭缝通道内水沸腾气泡动力学展开研究, 通过数值模拟的方法探索气泡生成、长大和脱离的过程, 分析了壁面过热度、泡底微层的运动对沸腾换热的影响, 并与实验数据进行了对比. 数值计算中考虑了重力、表面张力和壁面黏附作用. 研究表明: 表面张力在细通道沸腾换热过程中所起的作用要远远大于重力; 壁面过热度越高, 气泡脱离直径越大; 随着加热时间的增加, 气泡直径 d 不断增大, 当 $d \geq 1.5$ mm 时, 就会受到来流的影响而发生形变; 泡底微层的存在加速了壁面对流, 对换热系数的提高有一定作用; 数值模拟结果与实验数据吻合良好.

关键词: 气泡动力学; 沸腾换热; 数值模拟; 强化换热

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)11-0012-05

Bubble Dynamics of Water Boiling Heat Transfer in Vertical Rectangular Mini-Channel

GUO Lei, ZHANG Shusheng, CHEN Yaqun, CHENG Lin

(Institute of Thermal Science & Technology, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Boiling heat transfer in a vertical rectangular mini-channel 2 mm in breadth and 300 mm in length was investigated to further understand the mechanism of water boiling heat transfer in narrow channels. The numerical simulation was performed to explore the course of bubble generation, growth and departure and analyze the influence of the superheat degree of wall surfaces and the movement of phase interfaces on boiling heat transfer. The gravity, surface tension and wall adhesion were considered in the calculation, and the calculation results were compared with the experimental data. The results show that surface tension is much more important than gravity in the process of boiling heat transfer. The departure diameter of bubbles increases significantly with an increase in the superheat degree. When the bubble diameter is larger than 1.5 mm, it will be influenced by incoming flow. In addition, the simulation results agree well with the experimental data.

Keywords: bubble dynamics; boiling heat transfer; numerical simulation; heat transfer enhancement

Ishlbashi^[1]等率先在不同工作压力下, 对多种工质在流道间隙 σ 为 0.97~20 mm 的竖直环缝流道中的饱和沸腾进行了实验, 结果发现: 当 $\sigma < 3$ mm 时, 沸腾换热得到显著强化, 换热系数随压力的升高呈增大的趋势. Wambsganss 等^[2]也对细通道内 R-

113 的沸腾换热进行了研究, 发现核态沸腾和对流沸腾对换热有重要影响. Bowers 等^[3]对当量直径为 0.51、2.54 mm 的两种微细通道进行了研究, 发现微细通道内的流动沸腾特性与常规尺度通道有明显的差异. Suo 等^[4]最早对直径为 1、1.6 mm 细管内

的汽液两相流进行了实验研究,认为表面张力的作用远大于重力.许多有关微细通道内汽液两相流的研究也都表明,表面张力是影响微细通道内汽液两相流流型的重要因素^[5-9]. Coleman 等^[10]对水力直径为 1.3~5.5 mm 的水平细管和水力直径为 5.36 mm 的矩形通道内的两相流动进行了研究,认为直径在 10 mm 以下的细管的管径和表面张力对流型的产生和转变起重要作用,另外在细矩形通道中,通道的高宽比也是影响流型转变的重要因素之一.

高集成度微电子器件的产生对芯片冷却提出了更高的要求,客观上加速了微细通道内沸腾汽液两相流动换热机理的研究进程,但截至目前仍未有能系统揭示微细通道沸腾换热机理的成果出现,大部分成果都集中于实验研究.由于实验条件的限制,实验的可重复性较差,导致细通道内沸腾换热的研究进展缓慢.另外,由于国内微细通道沸腾换热的研究起步较晚,因此与国际相比还有较大差距.本文针对细通道内沸腾实验条件要求苛刻、实验结果可重复性差等缺点,提出利用数值模拟的方法对细通道内水沸腾现象进行研究.参照文献^[11]的实验条件,借助 Fluent 软件,通过 UDF 编程的方法,对所建立的二维细通道模型内的沸腾气泡动力学特性进行探索,并将模拟结果与文献实验结果进行了对比分析.

1 数值模拟过程

1.1 模型建立

本文的数值模拟以文献^[11]的实验件为原型,建立宽度为 2 mm、长度为 300 mm 的竖直矩形狭缝通道模型.通道左侧壁作为加热面,右侧壁绝热,工质从底部入口流入,从上部出口流出.

1.2 数学模型及其求解方法

水沸腾换热的数值模拟,需要获得气泡的生成、长大、脱离等过程,所以必须选用 VOF 模型进行模拟.对相界面的跟踪通过求解两相容积比率方程来实现,选取几何重构选项,考虑体积力的影响.由于 Fluent 软件本身没有计算沸腾的模型,需要通过用户自定义函数 UDF 来实现.沸腾换热的 UDF 程序主要包括:从液相向汽相转化的质量、从汽相向液相转化的质量、相变潜热及表面张力随温度的变化.另外,考虑到实际的沸腾过程皆为非均质沸腾,UDF 中还需定义气泡只能在加热壁面处产生.

1.3 网格划分及边界条件的设定

狭缝通道内的沸腾模型对网格的敏感度非常高,贴近加热壁面的薄层是气泡产生的区域,其对网

格要求更加苛刻,此处网格尺寸的细微变化都有可能引起解的不收敛.本文对贴壁薄层进行网格加密处理,最小网格尺寸由气泡临界半径确定.根据气泡临界半径公式^[12]

$$r_c = \frac{2\sigma T_{\text{sat}}}{h_{\text{fg}}\rho_v(T_l - T_{\text{sat}})_c}$$

在加热表面温度确定的情况下,可以估算出气泡半径,依据本文经验,最小网格尺寸取为 r_c 的 1/10 较为合适.

表面张力是一种作用在表面上的力,表面张力的不同会引起液体与壁面接触角的变化. FLUENT 中的表面张力模型是 Brackbill 提出的连续表面力模型.由于三角形和四面体网格上表面张力影响的计算不如四边形和六面体网格的计算精确,所以表面张力影响最重要的区域应当采用四边形和六面体网格.

采用 VOF 模型进行相界面跟踪时,必须设定表面张力,在细通道沸腾换热中,有时表面张力的影响甚至大于重力的影响.表面张力对数值模拟的影响是否重要决定于两个参数:雷诺数 Re 和毛细数 Ca ,或 Re 和韦伯数 We .

在水沸腾的过程中,壁面处有气泡产生,当壁面、水、蒸汽 3 种物质互相接触时,气泡和壁面之间会形成一个角度,我们把该角度称为接触角.当 VOF 模型与表面张力模型联合使用时,指定一个壁面接触角是必要的.在 Young 方程中,接触角的值不是唯一的,具有随意性,可在 2 个相对稳定值之间变化,最大值称为前进接触角,最小值称为后退接触角^[13].在 UDF 中,我们设定气泡产生的一刻为气泡生长周期的零时刻,气泡脱离的时刻为这一周期的终时刻.在一个气泡周期内假定气泡接触角随时间线性单调递减变化,根据铜和水的物性,设定接触角的变化范围为 $120^\circ \sim 60^\circ$.

在模拟过程中,根据文献^[11]的实验条件,设定左侧竖直壁面为加热面,底部流体流入的质量流量为 $83.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,上部出口为自由出口,采用恒定热流加热方式.设定系统初始温度为 97°C ,UDF 中设定沸腾温度为 100.15°C ,入口压力为 125 kPa,壁面粗糙度为 $6.4 \mu\text{m}$.

1.4 求解设置

计算中采用 Geo-Reconstruct 的方法,定义水为主相,汽相为第 2 相.为提高解的收敛性,打开 Body Force Formulation 选项.选择 Specified Operating Density,并且在 Operating Density 下设定汽

相密度. 压力插值采用 PRESTO 方法, 速度压力耦合方案采用 PISO 方法.

1.5 相界面热质交换

本文所建模型的两相努曾数 k_n 远远小于 0.001, N-S 方程适用于本模拟对象. 本模型沸腾换热过程的汽液界面 $S(r, t)$ 上同时存在着传热和传质过程, 在相界面上, 温度连续但不光滑, 比焓、密度和法向渗流速度都不连续.

在相界面上, 存在质量守恒方程, 对于汽相有

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v V_v) = \nabla \cdot (\rho_v D_v \nabla \alpha_v) + \Gamma_{lv}$$

对于液相有

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l V_l) = \nabla \cdot (\rho_l D_l \nabla \alpha_l) + \Gamma_{vl}$$

式中: α_v 、 α_l 分别代表汽相和液相的体积分数, $\alpha_v + \alpha_l = 1$.

蒸发、冷凝速率由下式给出^[14]

$$\Gamma_{lv} = \frac{h_{lv} A_{lv} (T_{sat} - T_l)}{h_{fg}}; \Gamma_{vl} = \frac{h_{lv} A_{lv} (T_l - T_{sat})}{h_{fg}}$$

式中: h_{lv} 为相间传热系数; A_{lv} 为单元体积的界面面积; T_{sat} 为饱和温度; h_{fg} 为汽化潜热. 质量守恒方程中的 D 代表与相的有效黏度相等的扩散系数.

在相界面上, 还存在能量守恒方程, 本研究中液相和汽相假设为不可压缩, 压力对时间的倒数可以忽略, 汽相能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v c_{pv} T_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v c_{pv} V_v T_v) =$$

$$\nabla \cdot (k'_v \nabla T_v) + q_{lv} + \Gamma_{lv} h_l$$

液相能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l c_{pl} T_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l c_{pl} V_l T_l) =$$

$$\nabla \cdot (k'_l \nabla T_l) + q_{vl} + \Gamma_{vl} h_v$$

式中: q_{lv} 、 q_{vl} 分别代表汽液两相转化所需要的能量; h_l 为液相的焓; h_v 为汽相的焓. 界面处的传热量通过下式计算

$$q = h_{lv} A_{lv} (T_v - T_l) = m \times h_{fg}$$

式中: m 为汽液间相互转化的质量, FLUENT 中可以通过 C-VOF 和 C-R 两个宏得到.

1.6 气泡动力学模型

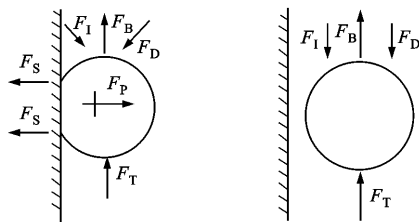
附着在加热壁面上生长着的气泡受到浮力 F_B 、气泡生长的压力 F_P 、主流速度推力 F_T 、表面张力 F_S 、阻力 F_D 及惯性力 F_I 的作用^[15], 见图 1a.

图 1 中 F_S 和 F_D 阻止气泡脱离壁面, F_I 阻止气泡生长, 这 3 个力视为负力; F_B 、 F_P 和 F_T 促使气泡脱离壁面, 视为正力. 它们之间的平衡方程为

$$F_S + F_D + F_I = F_B + F_P + F_T$$

气泡直径较小时, 垂直方向上受到的 F_B 和 F_T 的合力较小, 当气泡直径逐渐变大, 气泡会在 F_B 和 F_T 的合力作用下发生变形.

假定气泡的生长主要在加热壁面上完成, 气泡完全脱离壁面后所受力如图 1b 所示, $F_D + F_I = F_B + F_T$, 只要存在 $|F_I| > 0$, 则气泡将加速上浮.



(a) 脱离壁面前

(b) 脱离壁面后

图 1 动态气泡生长所受矢量力图

2 数值模拟结果及分析

2.1 气泡生长与壁面过热度变化

图 2 所示是加热壁面上单个气泡从生成、长大直至脱离壁面的全过程. 数值模拟发现在开始加热后的 48 ms 时, 壁面上特定区域附近流体过热, 开始有气核生成. 在气核长大的时间段内, 壁面过热度有所下降, 如图 3 所示. 待过热边界层将气核的上部全部包围之后, 气核的旺盛生长时期开始, 此时壁面过热度不断升高. 当壁面过热度达到 4 °C 之后, 壁面处气泡稳定地不断产生, 其生长周期大约在 4 ms 左右. 自壁面有气泡产生直至 360 ms 的时间段内, 壁面过热度基本维持在 4~5 °C 的范围内, 此时系统处于稳定的核态沸腾阶段, 气泡的产生与脱离对壁面附近流动的扰动剧烈, 使热量沿径向迅速扩散, 阻止了壁面过热度的上升.

2.2 气泡成核及其对流动换热的影响

气泡的成核是在壁面的特定区域产生的, 即便是在流速极低的狭缝通道内, 成核区域周围的液体流速也是很大的, 可以达到 0.3 m/s, 如图 4 所示. 如此高的速度是造成壁面附近温度边界层扰动的动力, 这种扰动所影响的区域是以气泡核为中心, 两倍于气泡直径的区域, 被扰动的液体产生了平移、旋转和振动, 并且造成了气泡底部上下两侧产生了漂流区. 漂流区的存在将过热液体推向主流, 在来流速度的影响下, 过热液体的速度方向又发生了改变, 如图 5 所示. 剧烈的扰动是换热系数增大的主要原因, 但此时泡底微层的存在对换热系数的增大也有着重要

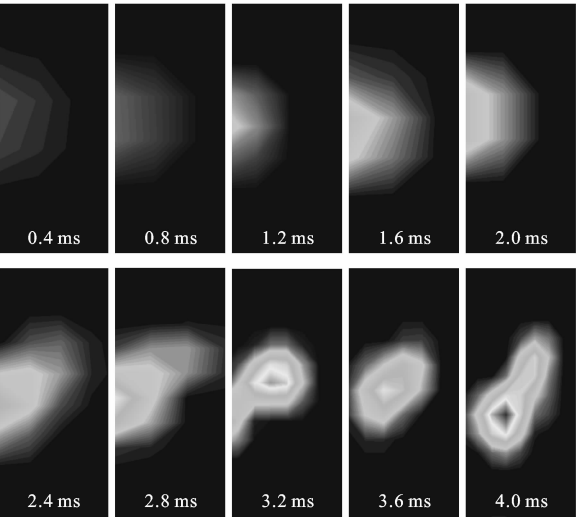


图 2 单个气泡生长过程图

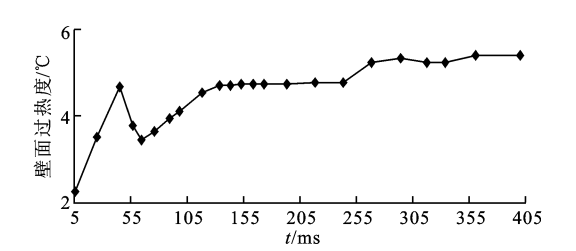


图 3 壁面过热度与加热时间的关系

的贡献. 图 5 所示泡底微层沿壁面以与主流方向相反的速度流入成核区域,此微层液体所传递的热量大大超过形成气泡所需的汽化潜热. 气泡底部的温度低于壁面温度,气泡要从壁面吸热,气泡顶部的温度高于周围液体的温度,气泡向液体放热. 图中所示换热系数最大处即为泡底微层所在处.

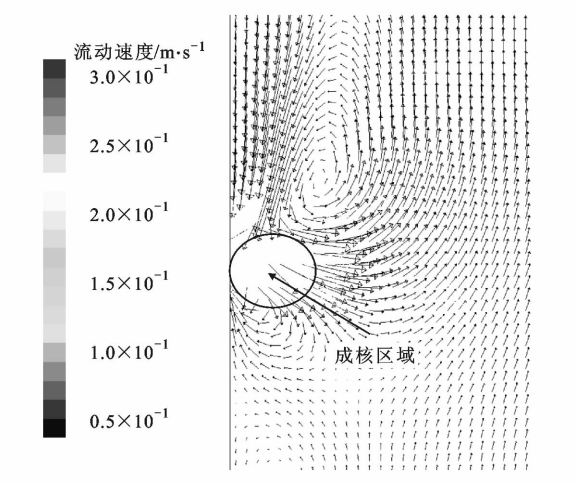


图 4 气泡成核区域及速度场分布

2.3 压力及换热系数与加热时间的关系

如图 6 所示,加热开始的一刻是单相液体的流

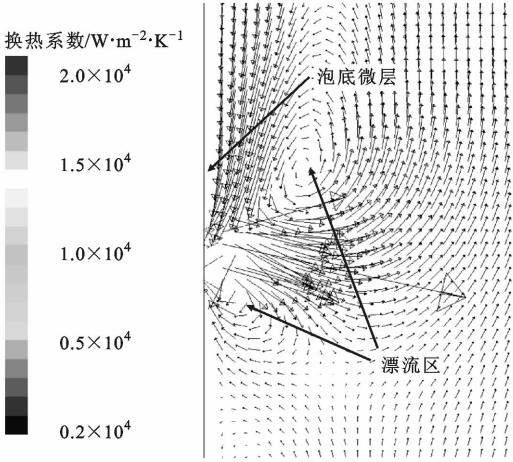


图 5 泡底微层及漂流区对换热系数的影响

动,入口压力为 125 kPa,系统压降为 2 kPa. 气泡的产生约开始于 48 ms 时,系统压力开始出现波动,此时壁面过热度下降,温度边界层还不足以将所产生的气泡完全包围,大部分气泡形成后又消亡. 虽然此时系统最高压力不稳定,但整体出现振荡上扬趋势. 300 ms 之后即便系统达到稳定的核态沸腾阶段,最高压力依然会有振荡,这与沸腾换热系统的不稳定性相对应. 相比最高压力的振荡,系统出口的最低压力基本保持不变,所损失的压力用来平衡气泡扰动带来的能量损失.

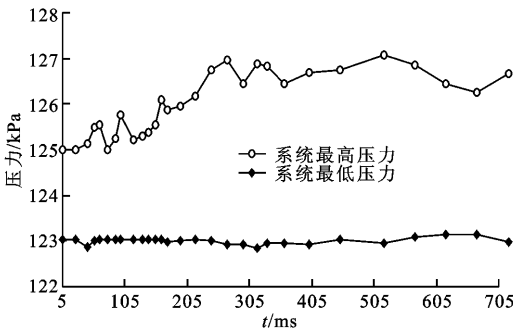


图 6 系统压力与加热时间的关系

图 7 所示为壁面附近的沸腾换热系数与加热时间的关系,在加热初始时刻,单相流体的换热系数随着壁面过热度的升高不断减小. 48 ms 之后气泡的产生增强了扰动,强化了换热,但壁面过热度的降低并不能维持气泡的生长,产生的气泡大部分消亡. 这种气泡生成又消失的状况一直持续到 300 ms 左右. 在气泡的孕育期内,换热系数会随着过热度的升高而减小. 在气泡生长期,换热会随着扰动的产生而得到强化. 300 ms 之后,壁面附近的温度边界层足以覆盖整个气泡,产生的气泡得以稳定生长,此时气

泡数量已经相当可观,无数泡底微层和漂流区的存在形成了无数的扰动区域,温度边界层被撕裂并推向周围流体,较冷流体能及时补充到蒸发区内,整个系统的换热系数显著增大。

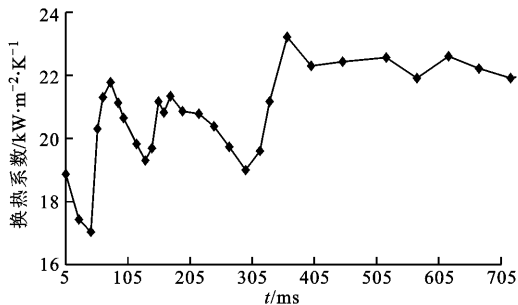


图7 系统换热系数与加热时间的关系

2.4 气泡脱离直径与壁面过热度的关系

图8所示气泡最大脱离直径为2 mm,这与文献[11]的研究结果基本一致,但数值模拟结果显示,气泡脱离直径随壁面过热度的升高而增大,这与单个气泡脱离直径的理论计算值有较大差距,却与刻尼格的实验曲线^[12]变化趋势一致。刻尼格实验是在人造孔穴的表面上进行的,孔穴形状比较一致,是一种比较理想化的实验模型。过热度小于7℃时,刻尼格曲线与模拟结果符合得较好,过热度大于7℃以后,其变化趋势较本文研究结果斜率大,气泡脱离直径对温度的变化更加敏感。刻尼格的气泡脱离直径计算式是在理论分析的基础上,结合实验数据所得出的,当壁面过热度增大时,雅克布数增大,气泡脱离直径增大。本文的模拟结果与这一计算结果相一致。

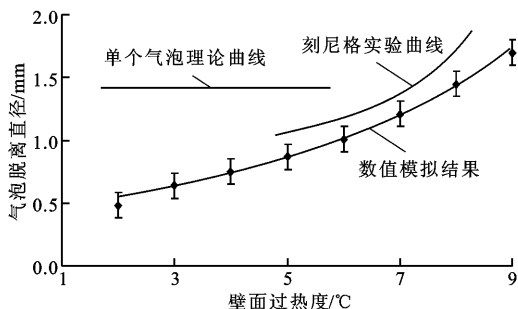


图8 气泡脱离直径与壁面过热度的关系

3 结 论

(1)气泡生成周期随壁面过热度增大而减小,当壁面过热度为4℃时,气泡的生长时间为4 ms,由于核态沸腾的产生,壁面过热度在一定时间内保持

相对稳定。

(2)泡底微层的存在加速了壁面附近的对流换热,气泡运动产生的漂流区加剧了扰动,破坏了温度边界层,对提高沸腾换热系数有较大贡献。

(3)流动沸腾过程中由于气泡运动导致系统压力损失有所增加,从过冷沸腾到核态沸腾换热系数整体振荡上扬,说明气泡运动对系统压力和换热系数的变化都有影响。

(4)当生长中的气泡直径 $d \geq 1.5$ mm时,会受到来流速度的影响而发生形变。气泡脱离直径随过热度的增大而增大,这与前人实验结果趋势一致,也符合理论计算式的结果,但因数值模拟过程中引入了壁面接触角为线性变化和表面张力是温度的函数等理想化假设,模拟结果与实验值仍有较大误差。接触角的不同对气泡形成、生长、脱离等过程均有重大影响,但模拟过程中如何明确接触角的变化是比较困难的,应通过更为精确的实验数据和理论分析进行确定。

参考文献:

- [1] ISHIBASHI E, NISHIKAWA K. Saturated boiling heat transfer in narrow spaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1969, 12(8): 863-894.
- [2] WAMBSGANSS M W, FRANCE D M, JENDRZEJCZYK J A, et al. Boiling heat transfer in a small diameter tube[J]. Journal of Heat Transfer, 1992, 115(4): 963-972.
- [3] BOWERS M B, MUDAWAR I. High flux boiling in low flow rate, low pressure drop mini-channel and micro-channel heat sinks[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37(2): 321-332.
- [4] SUO M, GRIFFITH P. Two-phase flow in capillary tubes[J]. Journal of Basic Engineering, 1964, 86(3): 576-582.
- [5] MISHIMA K, HIBIKI T. Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1996, 22(4): 703-712.
- [6] 陈二锋, 厉彦忠, 王斯民. 竖直环管内低压水过冷沸腾数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 855-859.
- [7] CHEN Erfeng, LI Yanzhong, WANG Simin. Numerical simulation of subcooled boiling water in vertical concentric annulus under low pressure[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(7): 855-859.
- [7] 吴鸽平, 吴埃敏, 郭赞, 等. 环形窄缝通道内流动沸

- 腾干涸点的研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(7):686-689.
- WU Geping, WU Aimin, GUO Yun, et al. Experimental research on dryout point of flow boiling in narrow annular channel[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(7):686-689.
- [8] WAMBSGANSS M W, JENDRZEJCZYK J A, FRANCE D M. Determination and characteristics of the transition to two-phase slug flow in small horizontal channels[J]. Journal of Fluids Engineering, 1994, 116(1):140-146.
- [9] YANG C Y, SHIEH C C. Flow pattern of air-water and two-phase R134a in small circular tubes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27(7):1163-1177.
- [10] COLEMAN J W, GARIMELLA S. Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(15):2869-2881.
- [11] 陈德奇, 潘良明, 袁德文, 等. 竖直矩形窄流道内汽泡生长的实验研究[J]. 核动力工程, 2008, 29(5):52-55.
- CHEN Deqi, PAN Liangming, YUAN Dewen, et al. Experimental study on bubble growth in vertical narrow channel[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(5):52-55.
- [12] 林瑞泰. 沸腾换热[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [13] 王新平, 陈志方, 沈之荃. 高分子表面动态行为与接触角时间依赖性[J]. 中国科学: B辑, 2005, 35(1):64-69.
- [14] TALEBI S, ABBASI F, DAVILU H. A 2D numerical simulation of sub-cooled flow boiling at low-pressure and low-flow rates[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(1):140-146.
- [15] 哈恩 E, 格里古尔 U. 沸腾换热[M]. 王兴国, 等译. 北京: 国防工业出版社, 1988.

(编辑 荆树蓉)