

# 竖直矩形窄缝通道内近壁汽泡生长和脱离研究

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:** 可视化研究窄缝通道内汽泡生长和脱离对于揭示窄缝通道内的沸腾传热机理具有重要意义。本文采用高速摄影仪从宽面和窄面可视化观察了常压条件下矩形窄缝通道内汽泡核化生长和脱离规律。研究表明, 汽泡在核化点生长时, 汽泡底部与加热面存在一小的接触面, 总体而言, 汽泡在生长过程中基本呈球状。在相同热工参数下, 不同核化点处汽泡生长规律基本相同, 但汽泡脱离直径相差较大。窄缝通道内汽泡生长速率小, 脱离时间较长, 可采用修正的 Zuber 公式预测窄缝通道内汽泡生长直径。在同一拍摄窗口内, 统计分析了热工参数对汽泡平均脱离直径的影响规律。随热流密度的增加, 汽泡平均脱离直径减小; 随入口欠热度的增加, 汽泡平均脱离直径减小; 随主流速度的增加, 汽泡平均脱离直径减小。

**关键词:** 汽泡生长; 汽泡脱离; 汽泡直径; 矩形窄缝

**中图分类号:** TL334; TK124

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2010)11-1349-06

## Study on Bubble Growth and Departure 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:** It is very important to visually study bubble growth and departure for better understanding of boiling heat transfer in a narrow channel. Bubble growth and departure in a narrow rectangular under atmosphere pressure were visually observed by the wide and narrow side of narrow rectangular channel using high speed digital camera. There is a small interface between the bubble base and heated surface when the bubble is growing in the nucleate site, and the growing bubble shape is almost spherical. The bubble growth laws in different sites are almost uniform under the condition of the same thermal parameters, but bubble departure diameters are obvious distinct because of different sizes of nucleate sites. The bubble growth rate in a narrow rectangular channel is small, and the bubble departure time is long, the bubble growth diameter can be predicted using the amendatory Zuber expression. The effect of thermal parameters on bubble departure diameters of the mean was statistically analyzed in the camera view. Bubble

departure diameters of the mean decrease with increasing heat flux, bubble departure diameters of the mean decrease with increasing inlet subcooling, and bubble departure diameters of the mean decrease with increasing bulk velocity.

**Key words:** bubble growth; bubble departure; bubble diameter; narrow rectangular channel

矩形窄缝流道在工程上应用广泛,如核反应堆工程中的板型燃料组件,以及化工领域内的紧凑型板型换热器和蒸发器,航空航天行业中的冷却系统也经常使用矩形窄缝流道。然而,窄缝流道内的沸腾换热机理非常复杂,国内外的研究者虽对其进行了一定的研究,但迄今为止,其沸腾换热机理未形成清晰统一的认识<sup>[1]</sup>。

沸腾中汽泡的核化、生长和脱离等行为是微观传热中重要的组成部分,这种微观传热现象与宏观传热的内在联系,以及其对总体传热的影响和作用一直都是沸腾传热研究中的经典问题之一<sup>[2]</sup>。从沸腾传热学发展的历程看,可视化观察汽泡动力特性一直是研究沸腾传热机理的基本方法之一,也是获得沸腾新现象和新机理的重要技术源泉。鉴于窄缝通道内沸腾现象的复杂性和不确定性,可视化研究单个汽泡的动力特性对于开发可信的沸腾传热模型是非常重要的,有助于揭示沸腾传热机理。在现有沸腾传热研究中,众多的研究者报道了两相条件下窄缝通道内的传热特性与常规通道内差异较大<sup>[3-4]</sup>,其沸腾传热机理仍不明确,需进一步的研究以揭示其实质。

本工作采用可视化方法,借助高速摄影仪从宽面和窄面可视化观察常压条件下矩形窄缝

通道内汽泡核化生长和脱离规律,获得相关汽泡信息图像资料,以及不同核化点处汽泡生长和脱离直径,分析局部拍摄窗口内热工参数对汽泡脱离直径的影响。

## 1 实验装置和实验方法

实验在开式回路上进行。为保证实验支路中小流量的稳定性,利用高位处稳压器内水的重力压头作为实验支路中水运行的驱动力。实验本体出口处的流体直接排放到地沟中。回路流程图示于图 1a。实验段横截面尺寸为  $2\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ ,有效加热长度为  $300\text{ mm}$ ,单面加热方式。实验本体主要由承压体、光学石英玻璃、压紧块和密封装置等部件组成。如图 1b 所示,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,实现矩形窄缝通道的立体可视化。实验段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。横截面上热电偶的布置形式如图 1b 所示,在有效加热长度上共布置了 12 对  $\phi 1\text{ T}$  型铠装热电偶,用来测量壁面温度和有效热流密度。

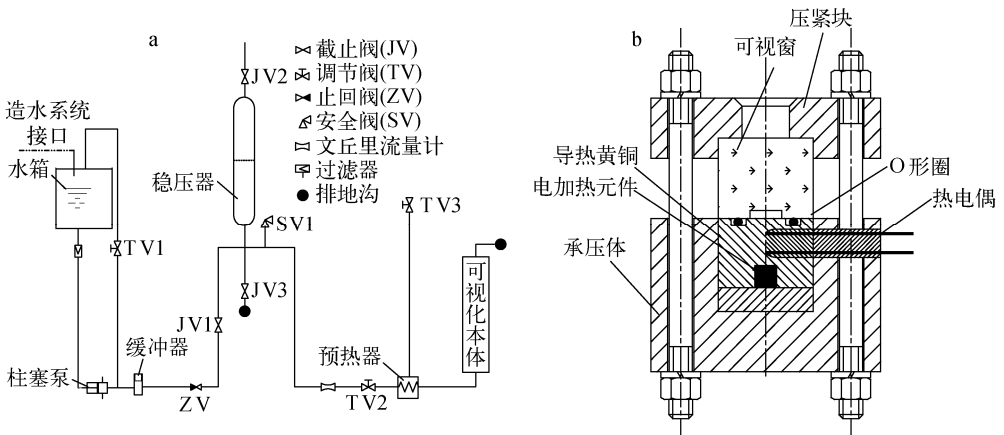


图 1 实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

a——实验回路;b——实验段横截面

## 2 可视化测量方法和汽泡数据处理方法

采用 PhantomV9.0 高速摄像机观察单个汽泡核化生长和脱离过程。PhantomV9.0 彩色高速摄像机的最高帧频为 10 000,并配有定焦镜头、定焦微距镜头和变焦镜头。本研究选用尼康微距镜头,最大放大倍率为 1 : 1,具体型号为 Nikon/200mmF/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 × 576。

在汽泡数据测量时,采用 Phantom V9.0 高速摄像机自带的控制软件 Phantom Camera Control 中的测量功能进行数据处理,该软件可获得汽泡直径、汽泡前后接触角、汽泡运动速度等实验数据。在汽泡尺寸处理的过程中,汽泡脱离直径的处理方法如图 2 所示。 $\alpha$  和  $\beta$  分别为汽泡与壁面的前接触角和后接触角,汽泡的长轴和短轴分别为  $D_x$  和  $D_y$ 。假定汽泡的两个

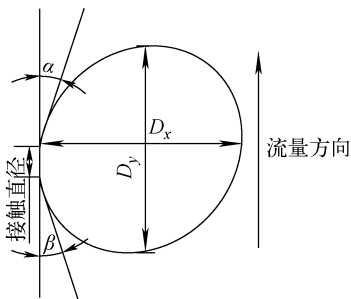


图 2 汽泡等效直径计算方法

Fig. 2 Calculational method for bubble equivalent diameter

短轴轴长相等,可按等效体积法计算出汽泡的等效直径,计算方法如下:

$$\frac{\pi}{6} D^3 = \frac{\pi}{6} D_x D_y^2 \Rightarrow D = \sqrt[3]{D_x D_y^2} \quad (D_x > D_y)$$

## 3 实验结果

### 3.1 汽泡核化生长现象

图 3 为从窄边可视化观察的汽泡核化生长和脱离的情况。汽泡底部与壁面存在一小的接触面,并在壁面上投下清晰的阴影。总体而言,汽泡在核化点生长时基本呈球状,但在汽泡脱离的时刻,汽泡在流动方向上存在一小的轴心倾斜角。汽泡在核化点生长的时间较长,从核化生长到脱离所需的时间约为 1.25 s。图 4 示出从正面可视化观察的单个汽泡核化生长和脱离的情况。从正面来看,汽泡在生长的过程中基本呈球状。在生长的过程中,汽泡中间存在一较亮的圆,且随汽泡直径的增加而增大,文献[5]中通过比较浮升汽泡和附壁滑移汽泡,以及从窄面和宽面测量同一核化点处汽泡与壁面接触面的情况,证实了接触圆形汽泡为附壁汽泡,中间亮圆即为汽泡底部与壁面的接触面。与窄边可视化观察的相似,汽泡生长较慢,脱离时间较长,约为 2.7 s,需注意的是上述从宽面和窄面观察的汽泡不是同一核化点处的汽泡。由上述可视化图像可知,汽泡基本呈球状,表明上述汽泡等效直径的计算方法合理。

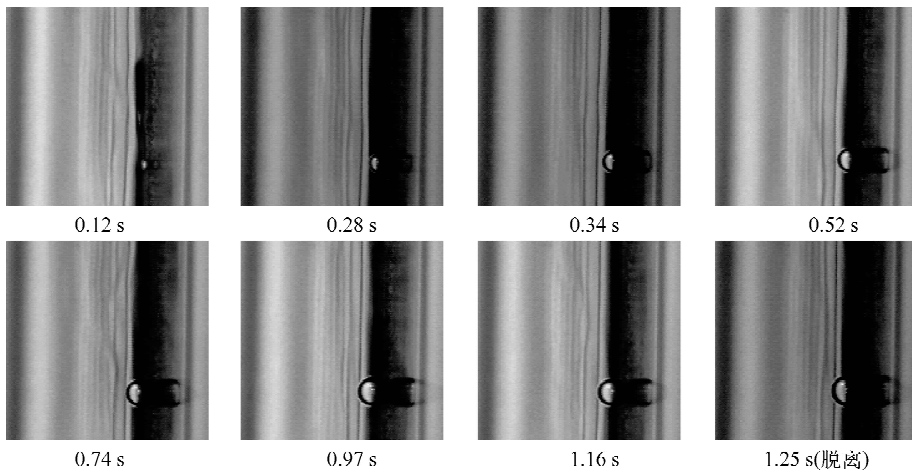


图 3 窄面观察汽泡生长和脱离

Fig. 3 Visualization of bubble growth and departure from narrow side

$t_{in} = 79.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $q = 31.1 \text{ kW/m}^2$ ,  $G = 139.2 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$

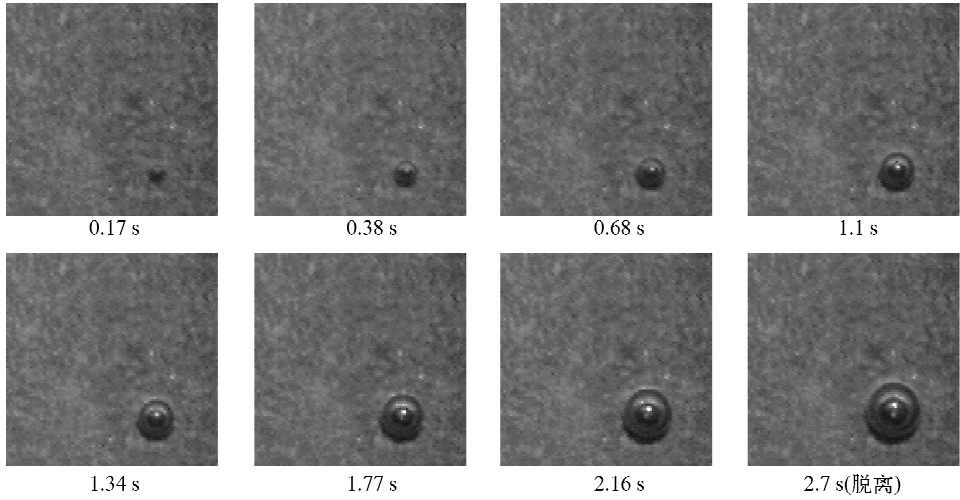


图4 宽面观察气泡生长和脱离

Fig. 4 Visualization of bubble growth and departure from wide side

$$t_{in}=79.5\text{ }^{\circ}\text{C}, q=31.1\text{ kW/m}^2, G=139.2\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

### 3.2 气泡生长

图5示出同一拍摄窗口内不同核化点处气泡的生长情况。在气泡生长至脱离的整个过程中,随着时间的增加,气泡生长直径逐渐增加,且在初始阶段,气泡生长速率较快,后期气泡生长速率变缓慢。值得注意的是,在相同的热工参数下,不同核化点处气泡生长直径与时间的变化规律基本相同,即不同核化点处气泡生长曲线趋于一致,其相对偏差在20%内。但由于气泡的脱离时间明显不同,因此导致气泡的脱离直径不同。再进一步分析,核化空穴尺寸的不同对气泡生长变化规律影响不明显,主要是影响了气泡脱离时间,并对气泡脱离直径产生了较大的影响,

但核化空穴尺寸对气泡脱离时间以及脱离直径的影响机理并不明确,需借助微观显微镜镜头测量核化点尺寸,以及气泡脱离直径,进一步深入分析空穴尺寸与气泡脱离直径之间的内在联系和规律。一般气泡生长曲线方程可表示为 $d(t) = Bt^n$ , $d(t)$ 为气泡直径, $B$ 为常系数, $n$ 为指数。Zuber开发了气泡生长曲线方程:

$$d(t) = \frac{2b}{\sqrt{\pi}} Ja \sqrt{\eta t} = Bt^{0.5} \quad (1)$$

$$Ja = \frac{\rho c_{pl} \Delta T_{sat}}{\rho_v h_{fg}} \quad (2)$$

其中: $c_{pl}$ 为比定压热容; $\Delta T_{sat}$ 为壁面过热度; $h_{fg}$ 为汽化潜热; $\eta$ 为热扩散率。

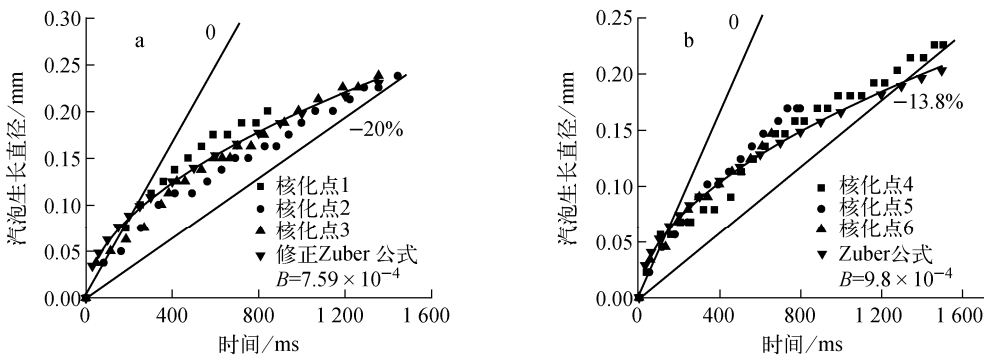


图5 气泡在不同核化点的生长

Fig. 5 Bubble growth in different nucleate sites

a: 工况 1,  $t_{in}=79.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $q=31.1\text{ kW/m}^2$ ,  $G=139.2\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;

b: 工况 2,  $t_{in}=74.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $q=46.33\text{ kW/m}^2$ ,  $G=253.6\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

Zeng 等<sup>[6]</sup>认为  $b=1.73$  时,Zuber 公式与其实验数据符合较好。Thorncroft 等<sup>[7]</sup>认为  $b=0.9$ 时,Zuber 公式与其实验数据符合较好。采用 Zuber 公式形式对汽泡生长过程进行了拟合。总体而言,窄缝通道内汽泡的生长曲线仍可采用修正的 Zuber 公式计算,即  $n=0.5$  时, $B$  为  $7.59 \times 10^{-4} \sim 9.8 \times 10^{-4}$ 。如采用 Zuber 公式,当  $b=0.9$  时, $B$  介于  $37.8 \times 10^{-4} \sim 49.2 \times 10^{-4}$  之间,其值远大于实验修正值,表明 Zuber 公式不能直接用于窄缝通道内,需对其进行修正。现有报道中,在常规通道内, $B$  在  $1.6 \times 10^{-3} \sim 4.7 \times 10^{-3}$  之间<sup>[8]</sup>。结合汽泡可视化现象观察,本研究的结果显示窄缝通道内核化汽泡生长速率比常规通道内的小,且汽泡在核化点经较长时间的生长后才脱离,即汽泡核化生长和脱离与常规通道内的规律不同,这或许是由于流道尺寸减小后,受到尺度效应的影响,使汽泡生长和脱离更加困难。田勇等<sup>[9]</sup>的研究表明,核化过程易在狭缝较宽的地方发生,而在狭缝宽度很小的地方不易发生。在狭缝宽度较大的地方汽泡尺寸大、生长速率较快,而在狭缝宽度很小的地方,汽泡生长受到明显抑制。

图 6 示出其他热工参数近似相同的条件下,热流密度不同时同一核化点处汽泡的生长曲线。随着热流密度的增加,汽泡生长速率逐渐增加,但汽泡的脱离时间变短。这主要是由于随着热流密度的增加,在其他热工参数近似不变的条件下,汽泡在生长的过程从加热面上吸收了更多的热量,使汽泡的生长速率增加;但另一方面,由于热流密度的逐渐增加,使汽泡的核化和脱离数目增多,通道内流体的扰动程度

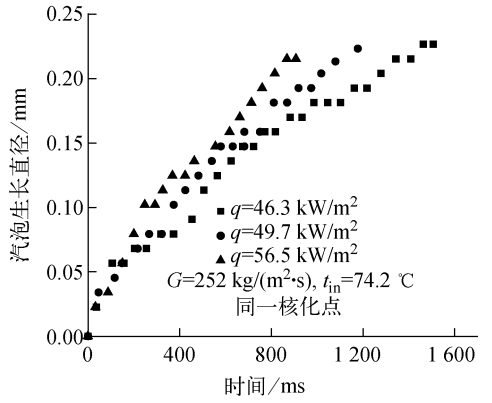


图 6 热流密度对汽泡生长的影响  
Fig. 6 Effect of heat flux on bubble growth

增强,促使汽泡脱离时间变短。从综合效果看,热流密度的增加虽有利于汽泡脱离直径的增加,但其生长速率增加较为缓慢;同时,通道内流体扰动程度的增加,促使汽泡过早脱离,从而使得汽泡的脱离直径减小。

### 3.3 热工参数对汽泡脱离直径的影响

采用汽泡数目统计的方法,在一定的时间内,拍摄窗口内测量汽泡的脱离直径,并将统计和测量的汽泡直径进行平均,其平均值即为该位置处热工参数下汽泡脱离直径,值得注意的是,应在同一位置的拍摄窗口内比较分析汽泡平均直径,而不是比较不同位置处的汽泡平均直径(图 7)。图 7a、b 为同一拍摄窗口,图 7c 为另一位置处的拍摄窗口(图中  $t_{in}$  为入口温度)。

#### 1) 热流密度对汽泡平均脱离直径的影响

图 7a 中,散点表示拍摄窗口内局部核化点处单个汽泡脱离直径,曲线表示局部核化点处所有汽泡的平均脱离直径。在同一工况参数下,拍摄窗口内局部不同的核化点处的汽泡脱

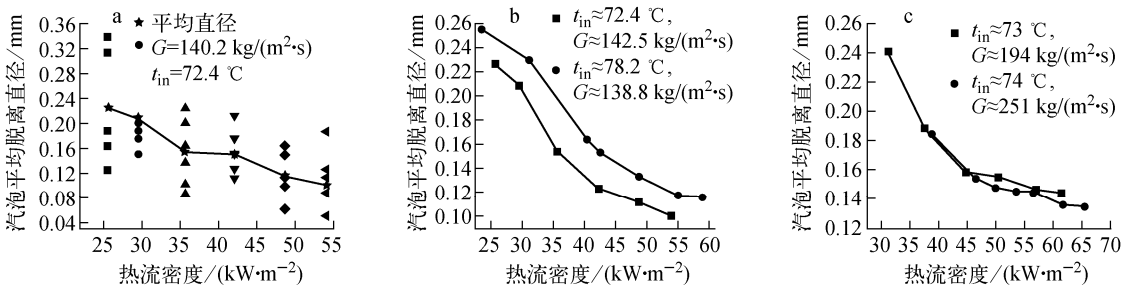


图 7 热工参数对汽泡脱离平均直径的影响

Fig. 7 Effect of thermal parameters on bubble departure diameter

a——热流密度;b——入口欠热度;c——主流速度

离直径相差较大,难以反映热流密度对汽泡脱离直径的影响规律。就汽泡的平均脱离直径而言,在其他参数近似不变的条件下,随热流密度的增加,汽泡的平均脱离直径逐渐减小,这主要是随热流密度的增加,汽泡的生长速率虽增加,但同时由于汽泡数量增加后,使主流流体的扰动增强,汽泡脱离时间变短,从而使汽泡的平均脱离直径变小。

#### 2) 入口欠热度对汽泡平均脱离直径的影响

图 7b 中,随入口欠热度的增加,汽泡的平均脱离直径减小,这主要是由于在其他热工参数基本不变的条件下,入口欠热度增加导致汽泡生长速率减小,阻止汽泡脱离的生长力减小,从而使汽泡脱离直径减小。

#### 3) 主流速度对汽泡平均脱离直径的影响

图 7c 中,在其他热工参数近似相同的条件下,随主流速度的增加,汽泡的平均脱离直径减小,这主要是随主流速度的增加,使核化点处汽泡所受的曳力增加,从而导致汽泡脱离的动力项增加,汽泡脱离时间减小;同时,随主流速度的增加,单相对流传热作用增强,相应带走的加热面上的热量增加,从而导致汽泡的生长速率有所下降,上述两个方面的综合效应使得汽泡的脱离直径减小。

## 4 结论

1) 汽泡在核化点生长时,汽泡底板与加热面存在一小的接触面,总体而言,汽泡在生长过程中基本呈球状。

2) 在相同热工参数下,不同核化点处汽泡生长规律基本相同,但汽泡脱离时间明显不同,导致汽泡脱离直径相差较大。汽泡生长速率随热流密度的增加而增大。

3) 窄缝通道内汽泡生长速率小,脱离时间较长,可采用修正的 Zuber 公式预测窄缝通道内汽泡生长直径。

4) 在同一拍摄窗口内,统计分析了热工参数对汽泡平均脱离直径的影响规律。随热流密度的增加,汽泡平均脱离直径减小;随入口欠热度的增加,汽泡平均脱离直径减小;随主流速度的增加,汽泡平均脱离直径减小。

## 参考文献:

- [1] 徐建军,陈炳德,王小军. 窄缝流道内流动与换热机理及关键问题[J]. 核动力工程,2008,29(3): 9-13.  
XU Jianjun, CHEN Bingde, WANG Xiaojun. Flow and heat transfer mechanism and key issues in a narrow channel[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(3): 9-13(in Chinese).
- [2] KLAUSNER J F, MEI R, BERNHARD D M, et al. Vapor bubble departure in forced convection boiling[J]. Int J Heat Transfer, 1993, 36(3): 651-662.
- [3] ZHANG W, HIBIKI T, MISHIMA K. Correlation for flow boiling heat transfer in mini-channels[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2004, 47(26): 5 749-5 763.
- [4] KANDIKAR S G. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(2-4): 389-407.
- [5] 徐建军. 矩形窄缝通道内近壁滑移汽泡动力特性及其传热机理研究[D]. 成都:中国核动力研究设计院,2009.
- [6] ZENG L Z, KLAUSNER J F, BERNHARD D M, et al. A unified model for the prediction of bubble detachment diameters in boiling systems-II: Flow boiling[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1993, 36(9): 2 271-2 279.
- [7] THORNCROFT G E, KLAUSNER J F, MEI R. Bubble force and detachment models [J]. Multiphase Science and Technology, 2001, 13(3&4): 35-76.
- [8] WU W, CHEN P P, JONES B G, et al. A study on bubble detachment and the impact of heated surface structure in subcooled nucleate boiling flows [J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238(10): 2 693-2 698.
- [9] 田勇,徐罕,彭晓峰,等. 楔形夹缝内部液体核态沸腾特性[J]. 航空动力学报,2004,19(2): 190-195.  
TIAN Yong, XU Han, PENG Xiaofeng, et al. Nucleation boiling characteristics of liquid in wedged gaps [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(2): 190-195(in Chinese).