

# 流动沸腾空穴核化机理的实验研究

姜 茂 白博峰

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘 要** 针对水在垂直矩形通道内的流动沸腾, 对空穴核化的机理进行了实验研究. 不同表面物性的沸腾对比发现良好湿润性表面成核更为持续稳定. 空穴成核过程中形成的低过热区域超出了气泡直径大小, 影响因素在 1.3~1.8 范围内变化. 微液膜蒸发模型分析液膜厚度在活化核心处最小, 而热流密度刚好相反. 流动条件加强了气泡脱离运动, 致使主流对流冷却作用增强, 影响范围超出了气泡直径区域. 核心间的相互作用导致核心状态出现间断性, 同时主流对流冷却也是重要原因.

**关键词** 流动沸腾; 空穴; 活化核心

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2008)03-0434-05

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON CAVITY NUCLEATION MECHANISM OF FLOW BOILING

JIANG Mao BAI Bo-Feng

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract** An experiment was conducted to investigate the nucleation mechanism of flow boiling in an upwards rectangular channel. The good wettability surface can create more continuous and stable nucleation based on the experimental boiling phenomena at the different surfaces. A low superheat wall temperature area occurs during the nucleating, and it is larger than the bubble radius. The ratio of the superheat area and the projected bubble area ranges between 1.3 and 1.8. With the microlayer evaporation model, it is concluded that the microlayer thickness is the least at the nucleation site and the heat flux density is just reverse. The flow enhances bubble deviation and convection cooling effect, which results in the low superheat area exceeds the bubble diameter. The non-linear interaction among nucleated cavities and the convection cooling of main flow cause the discontinuity of nucleation.

**Key words** flow boiling; cavity; nucleation site

## 0 前 言

核态沸腾系统的中心因素是活化核心, 即加热面上生成气泡的空穴. 活化核心的形成及其行为、活化核心间的相互作用等对沸腾系统影响很大. 活化核心的形成受很多因素的影响, 如加热壁与流体物性、壁面过热度、空穴的微几何结构、壁面湿润性等, 同时这些因素相互联系. Bankoff<sup>[1]</sup> 首次提出了沸腾表面空穴核化条件. Sato & Matsumura<sup>[2]</sup> 针对 Bankoff 核化理论进行了修改, 提出了新的预测沸腾开始时刻壁面过热度的公式. 随后 Davis & Anderson<sup>[3]</sup> 将 Sato & Matsumura 预测式推广到非圆形气泡形状条件. Lorenz<sup>[4]</sup> 在 Bankoff 理论上

引入了新的空穴半径条件. Wang & Diril<sup>[5]</sup> 通过最小化单个空穴沸腾系统的赫尔姆兹自由能改进了接触角条件. Mikic & Rohsenow<sup>[6]</sup> 指出相邻的活化核心间存在相互作用, 受此作用核心行为并不固定. Judd & Hwang<sup>[7]</sup> 提出用影响面积因数来表示活化核心的影响范围, 定义为活化核心影响面积与该点上平均气泡脱离直径的比值, 并认为该影响因数为 1.8. Dhir<sup>[8]</sup> 进一步指出活化核心受其相互作用影响可能会暂时失去活性, 核心相互作用的影响因数为 2. Bergez<sup>[9]</sup> 发现活化核心相互作用的影响范围随沸腾系统不同而变化, 影响因数变化范围为 1.8~4. Kenning & Yan<sup>[10]</sup> 在池沸腾实验中发现气泡生长形

收稿日期: 2007-10-17; 修订日期: 2008-01-10

基金项目: 本项目受到国家自然科学基金面上项目 (No.50476049); 新世纪优秀人才的资助 (No.NCET-04-0923)

作者简介: 姜 茂 (1979-), 男, 四川攀枝花人, 硕士研究生, 主要从事流动沸腾热物理方面的研究.

成的过冷区域大小等于该点上气泡脱离时的投影范围。Zhang & Shoji<sup>[11]</sup> 的人工空穴实验将活化核心间相互作用分为四类, 根据各种作用随核心间距变化的趋势, 将影响范围分为三个区域, 并指出不同区域相互作用对气泡生长的影响。综合分析发现活化核心之间的相互作用包括热力学和动力学两方面的效应。热力学作用主要通过气泡生长过程中形成的过冷效应实现, 而动力学效应主要是气泡间的合并。活化核心受此相互作用影响状态不断变化, 呈现出非线性特征。

目前对于活化核心的研究主要是基于池沸腾条件, 较少涉及流动沸腾, 而流动沸腾与池沸腾相比, 空穴核化机理存在一定差异。本文针对工业常见表面, 通过水在竖直矩形管内的核态沸腾实验, 研究了流动沸腾中加热表面空穴的核化机理。

## 1 实验系统

实验系统主要由水箱、变频循环泵、流量计、电加热预热器、实验段、冷凝器及相关的连接管路和阀门组成, 见图 1。沸腾工质选用法离子水。

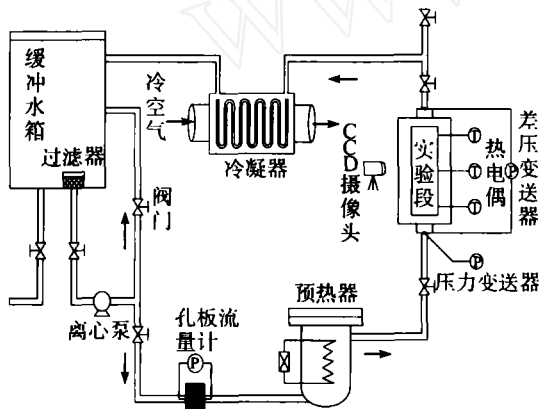


图 1 流动沸腾实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of flow boiling experimental setup

如图 2 所示, 实验段为垂直放置、单侧电加热的矩形通道  $13 \times 10 \times 900$  mm。主体采用透光性良好的聚碳酸酯材料。整个实验段长度为 900 mm, 其中加热区 300 mm, 进口段 450 mm, 尾部稳定段 150 mm。加热板采用冷轧不锈钢板, 厚度 0.13 mm, 宽度 9 mm, 长度 298 mm, 固定在酚醛塑料上以减少热损失。实验段通过大电流发生器进行加热。在加热板背面  $4 \times 4$  mm<sup>2</sup> 的区域上均匀布置 16 对 T 型热电偶以测量瞬态壁温, 测点间距为 1 mm。热电偶不确定度为 0.1 K。使用高速摄像机对实验过程中加热板表面的气泡形态进行观察和记录。实验参数范围: 质量流速  $280 \sim 670$  kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 实验段入口过

冷度  $-2 \sim -25$  K、压力  $0.11 \sim 0.115$  MPa。

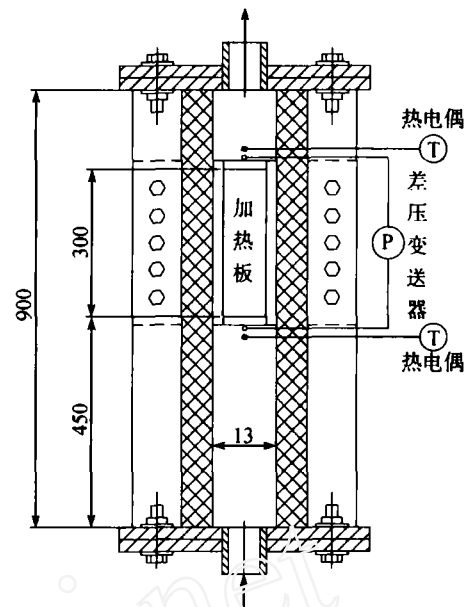


图 2 实验段结构示意图

Fig.2 structural diagram of the test section

## 2 表面特性对沸腾的影响

对加热试件中间区表面用 1000 目砂纸进行打磨, 并用硝酸浸泡 24 小时, 随后试件整体用丙酮清洗, 用清水洗净然后在空气中自然晾干。利用轮廓仪和扫描电子显微镜对两段不同的表面微观特性进行了测定。发现经过处理后的表面粗糙度较大, 各种粗糙度指标均大于未处理表面, 空穴数目增多。表 1 为测量的粗糙度结果, 其中  $R_a$  为轮廓算术平均偏差、 $R_q$  轮廓均方根偏差、 $R_p$  轮廓最大高度和  $R_v$  轮廓最小高度。

表 1 轮廓仪测量结果

Table 1 Results measured by profilometer

|      | $R_a$ (Å) | $R_q$ (Å)     | $R_p$ (Å)       |
|------|-----------|---------------|-----------------|
| 原表面  | 1109      | 1631          | 2373            |
| 处理表面 | 2624      | 3266          | 5789            |
|      | $R_v$ (Å) | Max. Peak (Å) | Min. Valley (Å) |
| 原表面  | -8684     | 13911         | -9666           |
| 处理表面 | -14232    | 4577          | -15445          |

对于润湿性较差的表面, 在  $20$  kWm<sup>-2</sup> 的低热流密度下就开始出现气泡, 气泡小但数目多, 脱离频率快。随热流密度增加, 气泡频率继续增大。对于润湿性较好的表面, 在热流密度低于  $50$  kWm<sup>-2</sup> 时, 只能观察到少量的气泡产生。部分活化核心以较低频率产生较大的气泡, 其他活化核心产生的气泡直径较小但频率较高。沸腾过程图像见图 3。

造成两段表面沸腾现象出现差异的原因是表面物理性质的不同。对于未打磨试件段,表面平滑,空穴密度小,液固接触良好,只有最适合成核的空穴才能够成功孕育气泡,该段表面多为稳定的低频率大直径气泡。对打磨试件段,表面粗糙度增大,空穴密度大,湿润性较差,液体与固体接触面较小,因此气泡较多但直径较小,频率较高。

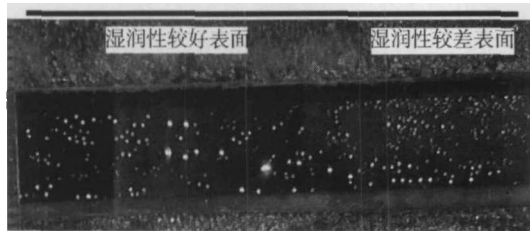


图 3 不同加热表面沸腾现象

Fig.3 Boiling phenomena on the different heating surface

### 3 活化核心行为

#### 3.1 成核过程温度时空分布

图 4 是生成气泡的活化核心周围壁温过热度的时空分布,过热温度间隔为 1 K,时间间隔为 5 ms,  $y$  轴方向为流动方向。气泡在垂流流动方向的横向上具有对称性(图中用阴影表示气泡投影形状)。气泡在 1.970~1.980 s 之间某个时刻成核,此时成核点温度为 118.4°C。气泡在 1.990 s 时可达到最大直径 1.6 mm。然后气泡与壁面的接触面积缓慢减小直到在 2.000 s 前的某个时刻完全脱离。在成核前及成核时壁面过热度分布不均匀;气泡成核后,随着核化进行在 1.985 s 时刻出现一个椭圆形的低过热度区,气泡生长直径变大造成这个区不断扩大,在气泡达到最大直径的 1.990 s 时刻增大到最大。随后气泡开始脱离,接触面积减小,此过低过热区域温度缓慢回升。

气泡生长过程中壁面各测量点温度都存在不同程度的降低,根据各点的温度信息可以判断出该影响区域的范围。气泡最大直径为 1.6 mm,故气泡的冷却区域超出了气泡直径范围。在该活化核心周围相邻的 4 个测温点中,水平方向两个测温点温降幅度基本一致,沿流动方向下游侧温降最大,逆流方向的温降最小。气泡生长过程热效应的影响区域范围用无量纲参数影响面积因数来表示,定义为活化核心影响面积与该点上平均气泡脱离直径的比值,确定该参数在 1.3~1.8 范围内变化。这与池沸腾存在差异,在池沸腾中气泡生长造成的冷却范围限制在气泡平均脱离直径内。

#### 3.2 温度分布的机理分析

活化核心在气泡生长过程中温度下降最大,表明它为气泡生长提供最多能量。气泡影响区域内各点对气泡生长的贡献可以通过各点上传递的热量进行确定。根据 Kenning & Yan<sup>[10]</sup> 提供的公式:

$$q = q_{in} + \lambda_s \left( \frac{\partial T_w}{\partial x} + \frac{\partial T_w}{\partial y} \right) - \rho_s C_s H \frac{\partial T_w}{\partial t} \quad (1)$$

式中,  $\lambda_s$  为加热壁的导热系数,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $\rho_s$  为加热壁的密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $q_{in}$  为输入热流密度,  $kW \cdot m^{-2}$ ;  $T_w$  为沸腾表面壁温, K;  $C_s$  为加热壁的比热,  $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $H$  为加热壁的厚度, m;  $q$  为沸腾表面局部热流密度,  $kW \cdot m^{-2}$ ;  $x$ 、 $y$  为试件表面坐标, m;  $t$  为时间, s。

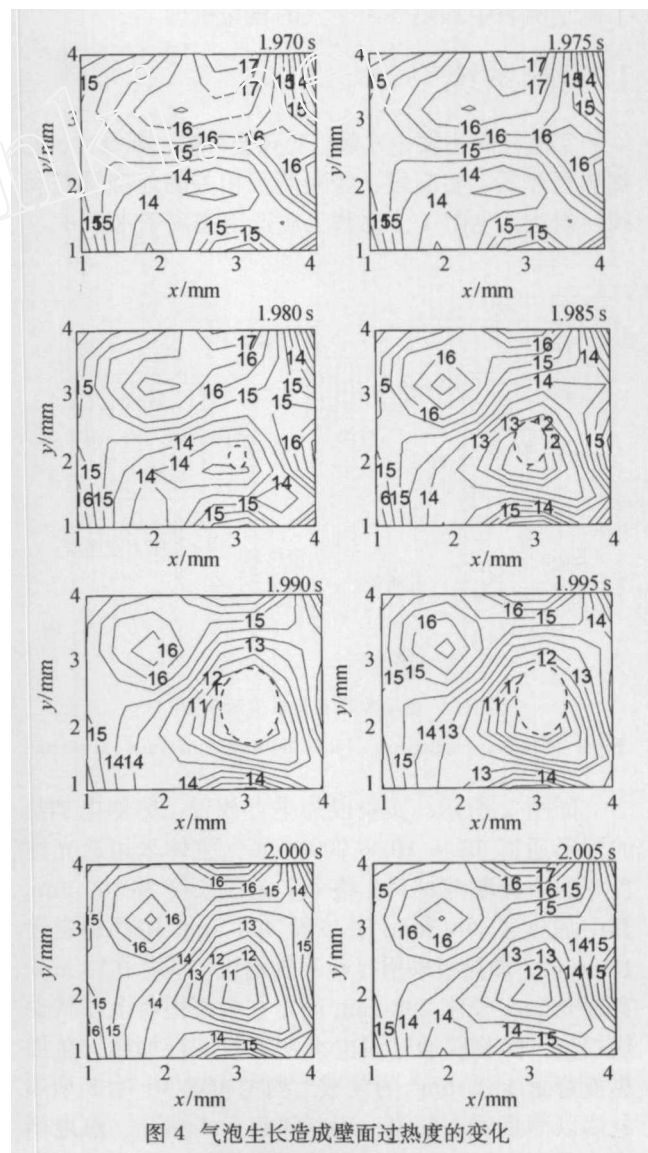


图 4 气泡生长造成壁面过热度的变化  
(等过热度温度线单位, °C)

Fig.4 Change of wall superheat caused by bubble growth  
(the unit of iso-superheat line is °C)

图 5 显示的 1.990 s 时刻各点传递的热量比较。从图上可以看出产生气泡的活化核心传递热量最多，对气泡生长贡献最大，活化核心周围相邻四个测温点也都参与了气泡的生长。对比图 3 可以发现参与气泡生长的区域(气泡生长影响区域)，即温度突降的区域。

根据气泡生长的微液膜机理，气泡生长过程中底部会形成微液膜层，通过该液膜的蒸发促进气泡生长。通过上图可以发现微液膜的范围超出了气泡与加热表面的接触区域，可以推断微液膜的大小即为参与气泡生长的区域范围，也就是气泡生长造成的冷却影响范围。对于一个局部厚度为  $\delta$  的微液膜，在局部壁面过热度  $\Delta T$  下，通过其传递的半稳态热流密度计算公式为：

$$q = (\lambda_l \Delta T) / \delta \quad (2)$$

通过该式可以看出微液膜圆周上的厚度最大，而在靠近活化核心方向上呈下降趋势，直到在核化点处为最小值。本文利用上述的半稳态热流密度公式计算了 1.990 s 时刻参与气泡生长的五个点分别所对应微液膜厚度，算术平均液膜厚度为 32  $\mu\text{m}$ 。Cooper & Lloyd<sup>[12]</sup> 公式计算出的微液膜平均厚度为 51  $\mu\text{m}$ ，数量级相同但存在一定差异。

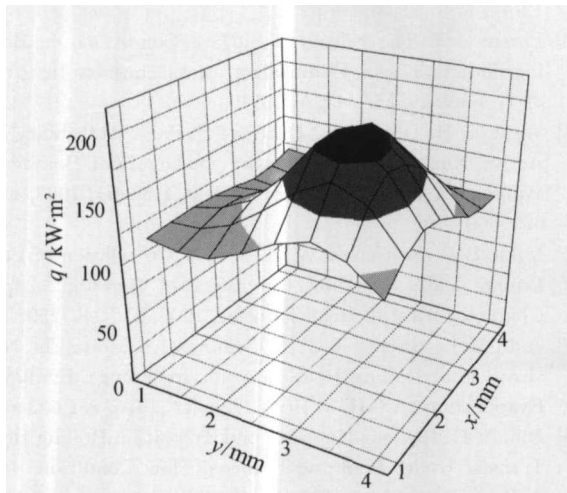


图 5 气泡生长过程热流密度分布

Fig.5 Heat flux distribution during bubble growth process

### 3.3 气泡运动的影响

气泡脱离后壁温持续保持较低过热度，根据摄像机拍摄结果判断这段时期周围没有大气泡产生，气泡脱离造成的流体扰动范围超出了气泡直径的投影面积。Kenning & Yan<sup>[7]</sup> 在池沸腾实验中观察到壁面上的这种传热范围并不超出气泡的最大投影区域。流动条件下，气泡发生变形，沿流动方向呈椭圆形，在流量较大情况下气泡甚至出现滑移现象，这都

说明流体作用下影响区域超出了气泡直径投影圈。

### 3.4 活化核心间相互作用

图 6 为 120  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$  热流密度下各活化核心处温度随时间变化情况。符号  $B_A$ 、 $B_C$  分别表示气泡 A、气泡 C。核心 B 点在 A 点一侧，与流动方向垂直，而 C 点在 A 点的逆流方向侧，B、C 两核心与 A 点的距离相同，见图 7。通过高速摄像机记录发现 A 核心产生气泡频率较小但气泡直径较大，属于稳定的核化点。B、C 两核心气泡直径很小，且状态不稳定。A 上的成核在点 B 位置处造成了 5.6 K 左右的温降，给点 C 位置处造成 3.2 K 的温降。B、C 两核心与 A 点的距离相同，但影响效果却相差 2.4 K，其原因是流动造成气泡沿纵向方向伸展，因此影响区域不再对称。

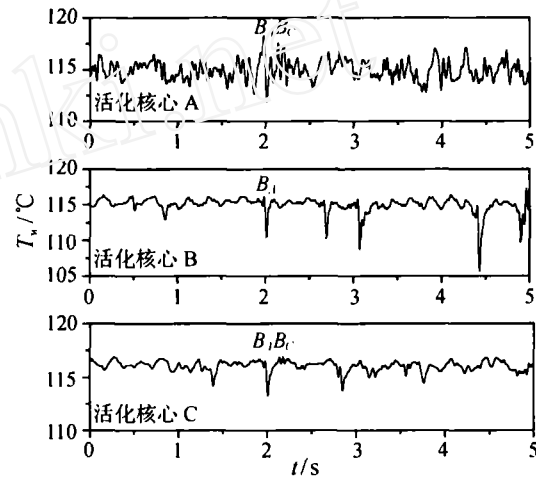


图 6 120  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$  热流密度下各活化核心行为

Fig.6 Active nucleations behaviors at 120  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$

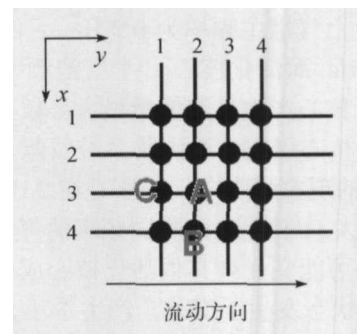


图 7 测温点图及活化核心 A、B、C

测温热电偶网格间距 1 mm

Fig.7 Temperature measuring points distribution and the active nucleations A B and C. (the distance among temperature thermocouple grids is 1 mm)

壁温时序图显示出了活化核心间的相互作用，活化核心 A 的成核及气泡生长对点 B、C 产生冷却

作用。观察温度图发现 C 点产生气泡  $B_C$  时点 A 温度降低大约 2 K 左右, 此时 A 点附近并没有成核现象发生, 分析原因可能是气泡长成后受流动影响脱离运动涉及到了 A 点区域, 引起该点流体扰动造成的冷却作用降低了该处的壁面过热度。活化核心 B 产生的气泡由于直径过小没有影响点 A 或者点 C。对于点 A, 在测量周期内除了产生气泡  $B_A$  外, 温度一直低于成核温度  $118.4^\circ\text{C}$ , 所以核心 A 处于暂时失活状态。这可能是由于主流流体的局部对流冷却, 没有影响到整个沸腾系统。类似的暂时失去活性的现象在所有核化点的温度-时间序列图上都可以观察到。气泡产生的间断是对流的波动和各点之间相互作用的综合结果造成的。

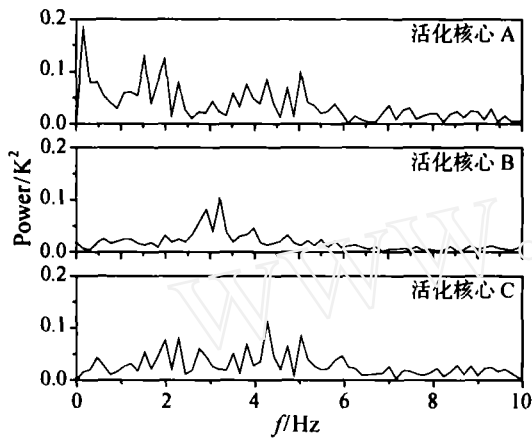


图 8  $120 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  热流密度下各活化核心的谱分析

Fig.8 Spectrum analysis of different active nucleations at  $120 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$

如图 8 所示, 气泡频率在  $0.1\sim 5 \text{ Hz}$  变化, 其中活化核心 A 上气泡主频率为  $0.2 \text{ Hz}$ , 活化核心 B 上主频率为  $3 \text{ Hz}$ , 而活化核心 C 上气泡频率为  $4.2 \text{ Hz}$ , 同时发现 A 核心产生气泡能量最大, 频率区域也相比其他 2 个核心更宽, 对沸腾系统贡献更大, 这与实验观察到的现象相吻合。A 核心在  $2 \text{ Hz}$  左右的气泡能量也较大, 与 B、C 相同频率的气泡相当, 这说明 A 核心可能在受到其他活化核心成核作用或者流体冷却后状态发生了变化, 产生了小直径但频率更高的气泡, 对应的时序图上 A 核心在大气泡  $B_A$  后再没有出现明显的温度突降现象。

实验没有发现直径过大的气泡覆盖其他活化核心的情况, 即使在低流速、高热流密度情况下也没有出现气泡半径超出活化核心间距, 即气泡重叠的情况, 说明活化核心间距大于其上气泡中心距离。这与 Kenning<sup>[7]</sup> 在高过冷度流动沸腾实验中发现的活化核心不能在气泡直径内共存的现象相符合。

## 4 结 论

(1) 由于受到流动的影响, 气泡形态沿流动方向发生变化导致该低过热度区域也相应地由池沸腾的圆形变为椭圆形。通过温度的变化发现低过热度区域超出了气泡直径, 并测得影响面积与该活化核心上平均气泡脱离直径比值在  $1.3\sim 1.8$  范围内变化。气泡生长过程中壁面温度的降低是由于气泡底部液膜的蒸发造成的, 液膜厚度分布在活化核心处最小, 界面上最大, 而热流密度刚好相反。

(2) 核心间通过气泡生长造成的壁温波动相互作用。活化核心间的相互作用可以通过核心间的链接效应超出作用范围限制而涉及到更多的核心。相互作用导致活化核心状态出现间断性, 同时主流流体的对流冷却造成的波动也可能导致活化核心的间断性。

## 参 考 文 献

- [1] Bankoff S G. Entrapment of Gas in the Spreading of a Liquid Over a Rough Surface. *AIChE J.*, 1958, 4: 24-26
- [2] Sato T, Matsumura H. On the Conditions of Incipient Subcooled Boiling with Forced Convection. *Bulletin of JSME*, 1964, 7(26): 392-398
- [3] Davis E J, Anderson G H. The Incipience of Nucleate Boiling in Forced Convective Flow. *AIChE Journal*, 1966, 12(4): 774-780
- [4] Lorenz J J. The Effects of Surface Conditions on Boiling Characteristics. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, MA, USA, 1971
- [5] Wang C H, Dhir V K. Effect of Surface Wettability on Active Nucleation Site Density During Pool Boiling of Water on a Vertical Surface. *J. Heat Transfer*, 1993, 115: 659-669
- [6] Mikic B B, Rohsenow W M. A New Correlation of Pool Boiling Data Including the Effect of Heating Surface Characteristics. *J. Heat Transfer*, 1969, 91: 245-250
- [7] Judd R L, Hwang K S. A Compressive Model for Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Including Microlayer Evaporation. *ASME J. Heat Transfer*, 1976, 98: 623-629
- [8] Dhir V K. Review, Nucleate and Transition Boiling Heat Transfer Under Pool and External Flow Condition. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 1991, 12(4): 290-313
- [9] Bergez W. Nucleate Boiling on a Thin Heating Plate: Heat Transfer and Bubbling Activity of Nucleation Sites. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1995, 38: 3117-3137
- [10] Kenning D B R, Yan Y Y. Pool Boiling Heat Transfer on a Thin Plate: Features Revealed by Liquid Crystal Thermography. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1996, 39: 3117-3137
- [11] Zhang L, Shoji M. Nucleation Site Interaction in Pool Boiling on the Artificial Surface. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2003, 46(3): 513-522
- [12] Cooper M G, Lloyd A J P. The Microlayer in Nucleate Pool Boiling. *Int. J. Heat Mass Transfer* 1969, 12: 895-913