

文章编号: 1000-8055(2002) 02-0240-06

加热丝上核态沸腾时汽泡间的热相互作用

王 昊, 彭晓峰
(清华大学 热能工程系, 北京 100084)

摘要: 本文分析讨论加热丝上汽泡生长过程中加热丝的温度变化特征, 揭示一个活化核心的起泡对周围其他活化核心起泡过程以及其自身的影响, 进而讨论两个核心之间起泡的相关性。分析还发现由于气泡生长造成的局部温度下降是加热丝表面沸腾需要较高过热度的一个重要原因。通过对温度场的计算, 模拟了两个临近核心之间的热相互作用, 得出一些有益的结论。

关键词: 核态沸腾; 相互作用; 核化; 相关性; 温度场

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

Interaction between Boiling Bubbles on a Heated Wire

WANG Hao, PENG Xiao-feng

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: When the bubbles grow from the surface of heated wall, violent interaction takes place among them. Disturbance in temperature field plays a key role by affecting forming and growing of bubbles. The relationship between bubbles and temperature distribution of a heated thread was analyzed. The physical models and mathematic descriptions were proposed to understand the mechanism of interaction among bubbles. The temperature sharp decrease was found to greatly depress the bubble generation in the adjacent region. The observation indicated that boiling on a wire and boiling on wall are different. Bubble can cause major temperature decrease on a thread. This kind of temperature decrease even breaks off bubble growing and/or generation. It is an important reason for higher superheat of boiling on a thread due to its weaker capability of heat conduction. Finally, computer simulation was carried out and some new aspects were observed.

Key words: nucleate boiling; heated wire; temperature field; bubble interaction; computer simulation

1 引言

沸腾相变传热方式广泛存在于机械、动力和石油化工等传统工业中。随着社会的发展, 新技术不断出现, 沸腾相变的应用延伸到高新科技领域, 其研究也赋予了新的内涵。人们不仅遇到了像微

重力或者微尺度这样特殊条件下的传热问题, 而且设计精度的提高需要人们更好地控制传热过程, 精确地计算出传热量。于是, 从更深的层次和更新的视角开展常规条件下沸腾传热的研究也就成为当务之急^[1]。

经典的沸腾传热研究多数是建立在平均化方

法和线性化方法的基础上。在处理许多宏观现象时,平均化和线性化方法是非常有效的,但当深入到微观领域和有强非线性相互作用的领域时,这种方法将变得很不适用,至少要提出疑问^[2~4]。

现有的非线性沸腾传热研究大大加深了对沸腾机理的认识,但在很多方面仍有明显的不足,缺乏对沸腾系统中核化点、汽泡之间的相互作用过程和本质的深刻理解,数学描述更是少之又少,具体细致的核心之间的作用没有太多涉及,非线性研究多停留在定性阶段^[5]。本工作从简单情况着手分析,得到一个或者几个核心起泡对于一维上加热丝的温度场的影响,以此为基础,讨论两个或多个核心的起泡通过温度场的相互影响和作用。

$$\theta(x, \tau) = -4 \frac{(q_b - q_v) \cdot \tau}{2 \cdot w \cdot \rho \cdot c} \left[\operatorname{erf} \left[\frac{x + R_d}{4a\tau} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{x - R_d}{4a\tau} \right] \right] + \frac{-Q_{r0}}{2w \rho c} \exp \left[\frac{-x^2}{4a\tau} \right] + \frac{1}{2\pi r \cdot \alpha} \left\{ q_v - [q_v - T_g \cdot 2\pi r \cdot \alpha] \exp \left[\frac{-2\pi r \cdot \alpha \cdot \tau}{\omega \cdot \rho \cdot c} \right] \right\} \quad (2)$$

式中: q_b 为汽泡吸热; q_v 为内热源; τ 为汽泡生长时间; R_d 为汽泡的脱离半径; 式子右边第三项里的 α 为加热丝和工质之间的对流换热系数; T_g 为胚泡形成的过热度。(2) 式右边第一项表明汽泡成长吸热对温度场的影响, 第二项表明胚泡对温度场的影响, 第三项表明内热源和对流换热对温度场的影响。(2) 式适用于描述起泡后的温度场变化。以水为工质, 如果假定加热丝材料为纯铜, 半径 $r = 0.05 \text{ mm}$, 起泡时的接触角为 30° ; 胚泡形

2 理论模型及分析

2.1 一个活化核心的起泡

把一个汽泡的生长分为胚泡、成长和脱离后 3 个阶段, 3 个阶段用不同的方程进行描述以简化理论分析。在胚泡阶段, 认为胚泡是一个瞬时吸热的点热源。由数物方程描述可获得其温度场^[6]:

$$\theta = \frac{-Q_{r0}}{2w \rho c} \frac{1}{\pi a \tau} \exp \left[\frac{-x^2}{4a\tau} \right] \quad (1)$$

式中: θ 为温度变化量; Q_{r0} 为胚泡产生吸收的热量; a , c 和 ρ 分别为加热丝的热扩散系数、比热以及密度; w 为加热丝横截面积。

在汽泡脱离阶段:

度变化 $\theta(x, \tau)$, 如图 1 所示。可以看到在 0.014 s 时, 从原点到 $x = 2.1 \text{ mm}$ 的加热丝上的温度都有不同程度的下降, 在 origin 附近的温度沉降尤其剧烈。作出不同时刻的温度变化曲线, 还可以发现随着时间推移, 固有内热源的存在, 起起点周围温度会迅速回升。单个汽泡对加热丝温度场的影响是局部而短暂的。

2.2 2 个或者多个活化核心之间的相互作用

由温度场叠加原理, 得到 2 个临近点同时起

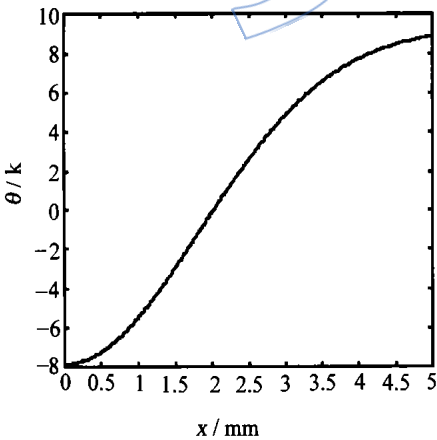


图 1 单个汽泡起泡 0.014 s 时温度场
Fig. 1 Temperature change at 0.014 s after a single bubble formation

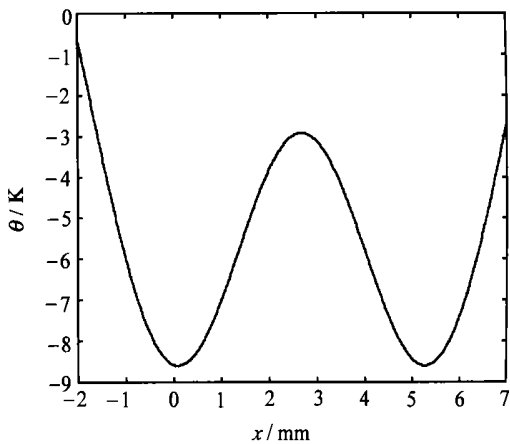


图 2 2 个汽泡起泡 0.014 s 时的温度场
Fig. 2 Temperature change at 0.014 s after two bubble formation

成的过热度为 $T_g = T_b - T_s = 10 \text{ K}$ 。在上述假设条件下对起泡过程以及汽泡对温度场的影响进行计算, 得到时刻 0.014 s 时加热丝上 $x = 0$ 处的过热

泡时加热丝温度变化描述方程^[7], 可以推测, 多个临近点同时起泡时造成更持久更大范围内的温度波动。用与上述工况(即与图 1)相同的条件进行

计算,得到两个相距 5.2 mm 的核化中心同时起
泡后温度场变化如图 2 所示。在 0.014 s 的时
候,温度场的最大温降为 8.6 K,比单个汽泡时的 7.9
K 增加了 0.7 K,同时影响范围也扩大了。考察两
个汽泡之间的相互作用,得到两个汽泡之间的相
互作用方程:

$$\theta_2 = \frac{-Q_{bl}}{4 \cdot w \cdot \rho \cdot c \cdot R_d} \cdot \left[\operatorname{erf} \left(\frac{S + R_{d1}}{4a\tau} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{S - R_{d1}}{4a\tau} \right) \right] + \frac{-Q_{r01}}{2w\rho c} \exp \left[\frac{-S^2}{4a\tau} \right] \quad (3)$$

式中: θ_2 为汽泡 1 作用下汽泡 2 核化点的温度变
化; S 为两个汽泡核化点之间的距离。

分析上式可以知道汽泡间距离 S 对相互作
用有很大影响。沿用与图 1 相同的条件,分别作出
 $S = 3R_d$ 和 $S = 9R_d$ 时汽泡 1 对汽泡 2 的温度作用
曲线,如图 3 和图 4 所示。

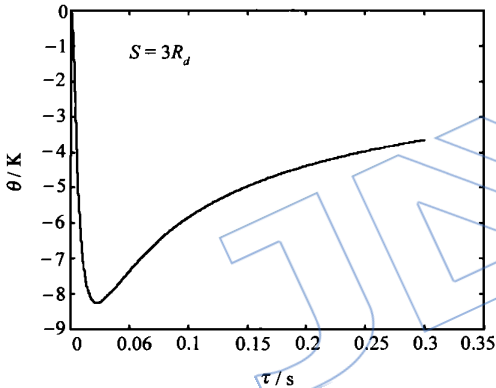


图 3 $S = 3R_d$ 处 θ 随时间的变化

Fig. 3 Temperature influence when $S = 3R_d$

从图 3 和图 4 的可以看到, $S = 3R_d$ 时,汽泡 1
对汽泡 2 的影响可以达到 -8 K,而在 $S = 9R_d$
时,影响最大只能达到 -2.7 K;另一方面,距离
越远,温降影响传到汽泡 2 的时间就要越长。 $S =$
 $3R_d$ 时,汽泡 2 的温降最大值出现在 0.025 s,而
在 $S = 9R_d$ 时,最大值是在 0.24 s 左右才出现
的。由于经历的时间长,当有内热源作用等其他扰
动时,汽泡 1 对汽泡 2 的作用可能很小。当有内热
源存在时, $S > 4R_d$ 时汽泡 2 上已经不存在对汽
泡 1 的明显的影响。在多数的研究报道中,一般都
认为 $S > 3R_d$ 时汽泡之间的相互影响就非常弱
了^[8,9]。

2.3 汽泡对于过热度的影响

在活化核心起汽泡时候,通过假设汽泡为一个

持续吸热的点热源,得到汽泡成长过程中温度场

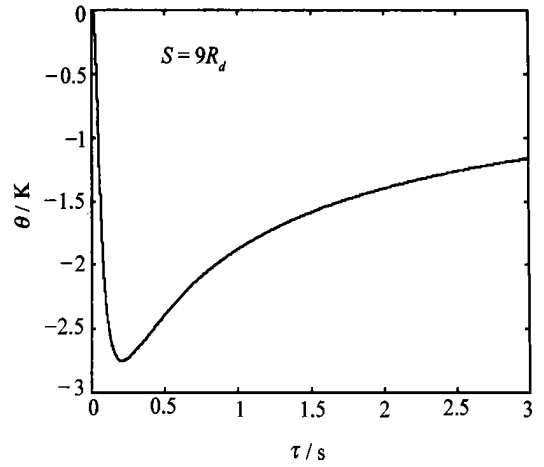


图 4 $S = 9R_d$ 处 θ 随时间的变化

Fig. 4 Temperature influence when $S = 9R_d$

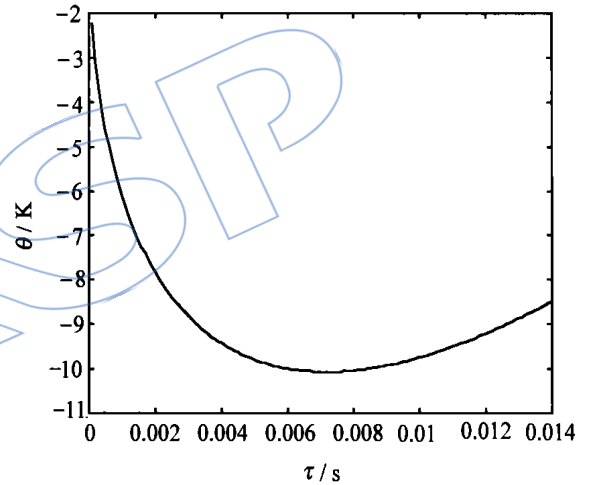


图 5 加热丝半径 0.05 mm

Fig. 5 Temperature decrease when wire radius
of 0.05 mm

的变化表达式:

$$\theta = \frac{q}{w c \rho} \left\{ \frac{\tau}{\pi a} \cdot \exp \left[\frac{-x^2}{4a\tau} \right] - \frac{x}{a} \cdot \operatorname{erf} c \left(\frac{x}{2 \cdot \frac{a}{\tau}} \right) \right\} + \frac{1}{2\pi r \cdot \alpha} \cdot \{ q_v - [q_v - T_g \cdot 2\pi r \cdot \alpha] \cdot \exp \left[\frac{-2\pi r \cdot \alpha \cdot \tau}{w \cdot \rho \cdot c} \right] \} \quad (4)$$

由式(4)明显看出,在汽泡成长过程中有可能
因为局部温度下降太多而造成汽泡成长中止。另
外发现,加热丝的半径和汽泡脱离半径对于起泡
点自身的温度变化有很大影响。比较图 5 和图 6
可以看到,半径减小 0.015 mm 后, θ 的最小值从

原来的- 10. 2 K 变为现在的- 20 K, 几乎是原来的两倍, 可见加热丝尺寸对 θ 的影响。

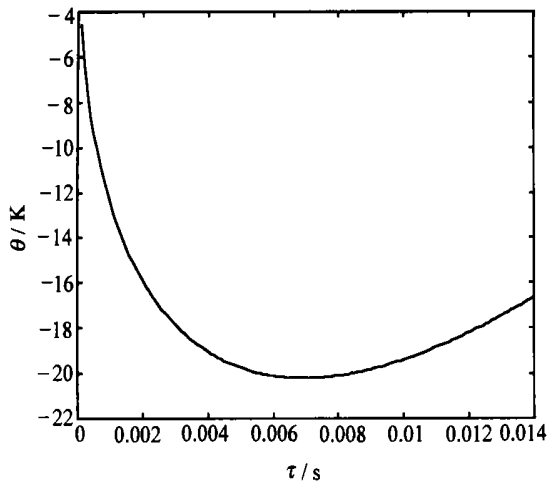


图 6 加热丝半径 0.035 mm

Fig. 6 Temperature decrease when wrie radius of 0.035 mm

3 程序模拟实验

3. 1 模型与步骤

在上边工作的基础上, 通过计算机模拟两个汽泡之间的热相互作用, 模拟时的工况与图 1 相同。模拟的思路如下: (1) 加热丝上两个临近汽泡, 泡 1 和泡 2, 假设两个汽泡的参数一样, 假设其距离为 S ; (2) 在内热源作用下加热丝均匀升温而达到起泡临界温度 T_i , 假设在扰动下汽泡 1 先发生, 计算泡 1 对自身核化点温度 T_1 以及泡 2 核化点温度 T_2 造成的影响; (3) 随着时间推移, 由于内热源以及热扩散的作用, T_1 和 T_2 都将回升, 随时判断 T_1 或者 T_2 是否达到了起泡临界温度 T_i , 哪个泡达到临界温度, 这个泡就发生, 然后又计算对 T_1 和 T_2 造成的沉降。(4) 如此类推, 随时判断, 然后计算。最后得到两个点在一个时间段内的起泡的时间序列以及汽泡个数 N 。

计算机模拟流程如图 7 所示。

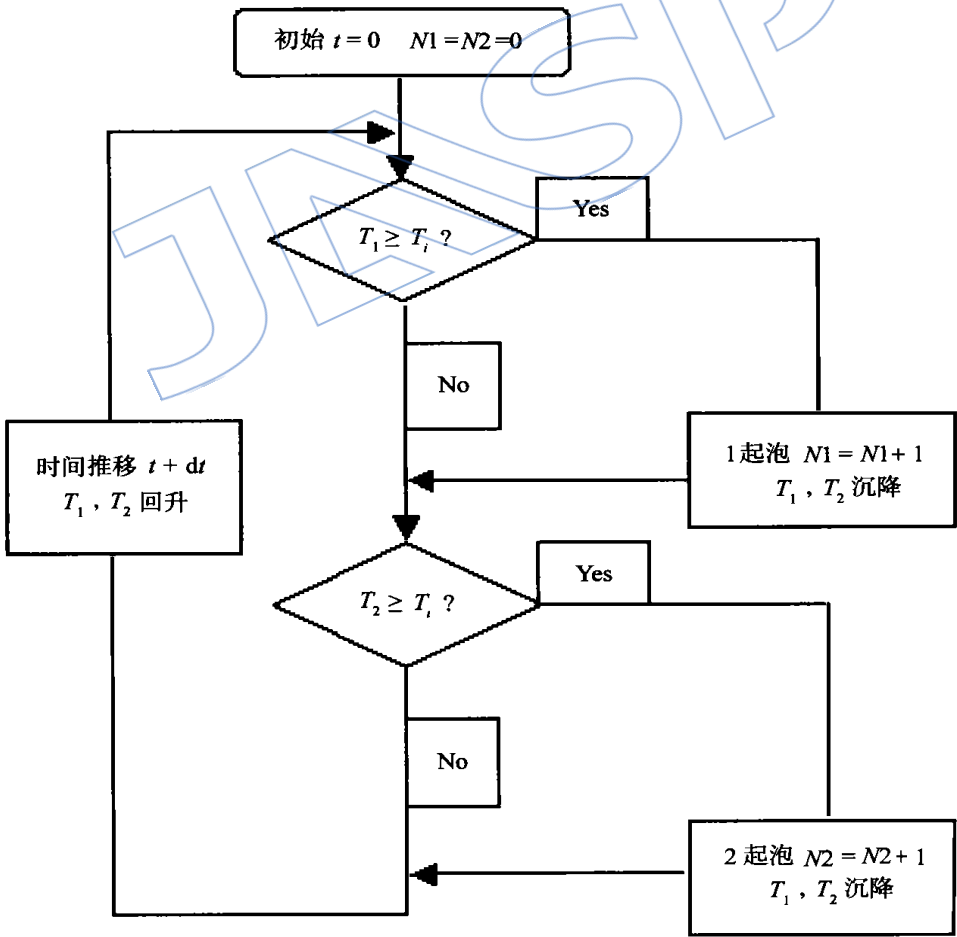


图 7 程序流程图

Fig. 7 Schematic reprenation of calculation routine

3.2 结果和分析

对核化点 1 和点 2 产生的气泡个数的模拟结果如表 1, 表中 D_d 表示气泡的脱离直径(由相关经验公式计算得到^[10]), 终止时间表示所模拟的这段过程的时间, 编号 1 到 3 的计算时间均为 10 s, 而 4 和 5 计算时间为 100 s。

表 1 气泡个数模拟结果

Table 1 Bubble number simulation for nucleation conditions					
工况	气泡间距 D_d	时间步长/s	终止时间/s	点 1 气泡个数	点 2 气泡个数
1	1	0.001	10	29	13
2	2	0.001	10	23	19
3	7	0.001	10	21	21
4	1	0.001	100	110	76
5	3	0.001	100	93	93

由编号 1 到 3 的数据进行对比, 可以发现:

(1) 由于相互作用和扰动, 两个起泡临界温度一样(也即起泡条件一样)的核化点产生了不同的气泡个数。在工况 1 中, 核化点点 1 产生气泡 29 个, 而点 2 仅仅产生 13 个气泡, 相差 16 之多。

(2) 随着两个气泡之间距离的增大, 相互作用减弱。当间距为 7 倍的气泡脱离直径的时候, 可以看到两个点的气泡数均为 21, 表明两个点之间的相互影响已经相当弱了。

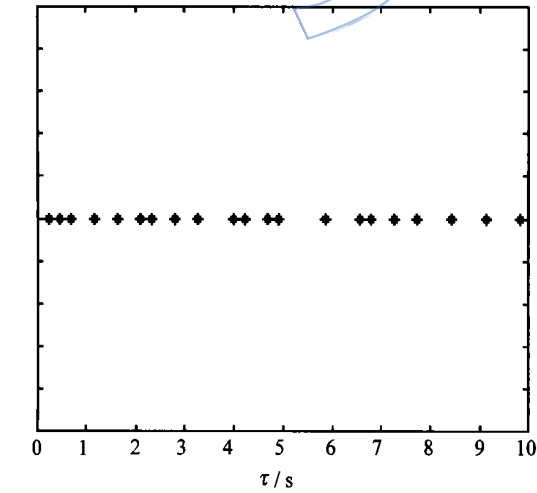


图 8 工况 1 下核化点点 1 的起泡时间序列 (间距 $1D_d$)

Fig. 8 Bubble producing sequence at site 1 (case 1 $S= 1D_d$)

通过对 4 和 5 两组数据的对比, 也可以发现

类似的结论: 当间距为 1 倍 D_d 时, 两点的气泡个数分别为 110 和 76, 而其他条件不变而将间距加大到 3 倍 D_d 时候, 两点的气泡个数一样均为 93, 表明之间只有较弱的相互作用。

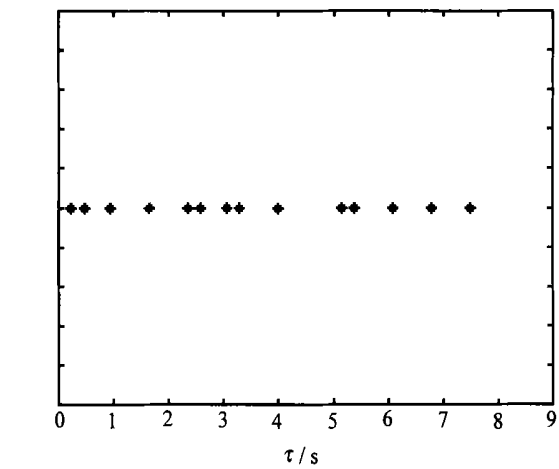


图 9 工况 2 下核化点点 1 的起泡时间序列 (间距 $2D_d$)

Fig. 9 Bubble producing sequence at site 1 (case 2 $S= 2D_d$)

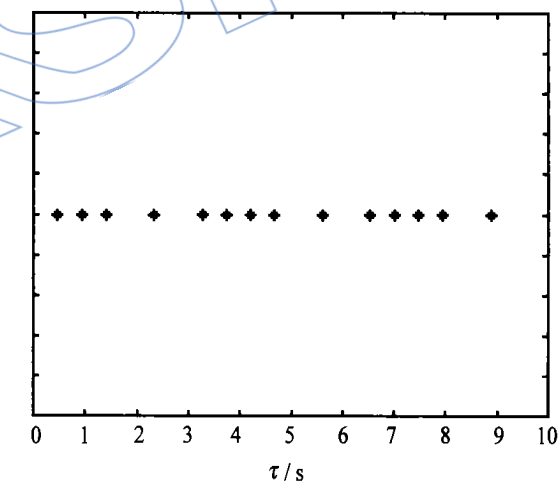


图 10 工况 3 下核化点点 1 的起泡时间序列 (间距 $7D_d$)

Fig. 10 Bubble producing sequence at site 1 (case 3 $S= 7D_d$)

对应于工况 1 得到的针对核化点 1 的起泡时间序列如图 8 所示, 图中每个星形点代表核化点 1 起泡一次, 横坐标是时间, 标明起泡进行的时间。从图中可以明显看到, 起泡不是均匀进行的, 随着时间推移, 起泡时而紧促, 时而稀疏。这表明了点 2 对它的影响。

对应于工况 2 得到的针对核化点 1 的起泡时间序列如图 9 所示。从图中同样可以明显看到, 起

泡不是均匀进行的, 起泡时而紧促, 时而稀疏。表明核化点 1 和 2 之间仍然存在较强的相互作用。

对应于工况 3 得到的针对核化点 1 的起泡时间序列如图 10 所示。在工况 3 中, 汽泡之间的距离为 7 倍的汽泡脱离直径。从图中同样可以明显看到, 相对于前面的工况 1 和工况 2 的图像而言, 工况 3 的起泡大致是均匀进行的, 表明两个汽泡之间的相互影响相当的弱了。在实际的沸腾过程中, 由于各种扰动因素, 一般都认为汽泡之间距离大于 3 倍的汽泡脱离直径时就没有直接的相互影响了。

3.3 起泡条件不同的临近核心的模拟

在实际的沸腾中, 由于各个核化点构造的不同, 起泡所需要的过热度是不一样的, 有的高一些, 有的则低一些。这里假设核化点 1 的起泡临界

温度 T_{i1} 比核化点 2 的起泡临界温度 T_{i2} 大, 也就是说点 1 的起泡比点 2 的起泡困难。表 2 汇总了计算机模拟的结果:

把表 1 和表 2 的数据进行对比, 可以发现:

- (1) 在表 2 中由于点 1 的起泡难于点 2 的起泡, 因此在 2 个点的竞争中处于劣势, 起泡次数明显不及点 2。当 2 个点间距为 1 倍 D_d 且点 1 起泡需要的临界温度比点 2 高出 0.5 K 时(见表 2 工况 3), 点 1 已完全被抑止, 成为非活化的核心了。
- (2) 随着两个点距离的加大, 两点相互作用减弱, 在表 2 中表现为点 2 对点 1 的抑止作用减弱。对比工况 3 和工况 6, 同样是点 1 起泡需要的临界温度比点 2 高出 0.5 K, 当间距加大为 3 倍 D_d 时, 点 1 还能够起泡 14 次, 而不是 1 倍 D_d 时候的完全被抑止。

表 2 汽泡个数模拟结果

Table 2 Bubble number simulation for different nucleation conditions

工况	汽泡间距 D_d	T_{i1} 与 T_{i2} 之差/K ($T_{i1} > T_{i2}$)	时间步 长/s	终止时 间/s	点 1 汽泡 个数	点 2 汽泡 个数
1	1	0.1	0.001	10	18	24
2	1	0.2	0.001	10	7	35
3	1	0.5	0.001	10	0	42
4	3	0.1	0.001	10	21	21
5	3	0.2	0.001	10	19	23
6	3	0.5	0.001	10	14	28

4 结 论

(1) 建立汽泡对加热丝温度场的影响方程, 分析了加热丝上核沸腾时的温度特性, 发现汽泡会造成较大的局部的温降。(2) 多个汽泡对温度场影响分析表明, 汽泡之间的相互作用与加热丝半径以及汽泡间距离有很大关系。(3) 汽泡起泡点自身的深刻影响是加热丝上沸腾过热度高于相同条件下壁面沸腾的原因之一。(4) 通过对两个临近点起泡的计算机模拟, 说明汽泡之间通过热传导造成相互作用。

参考文献:

[1] Carey V P. Liquid Vapor Phase-Transition Phenomena [M]. New York: Hemisphere Publishing House., 1992: 302- 303, 492- 493, 500- 501.
[2] Sultan M, Judd R L. Interaction of the Nucleation Phenomena at Adjacent Sites in Nucleate Boiling [J]. Journal of Heat Transfer, 1983, 105: 3.

[3] Kenning D B R, Victor H, Del Valle M. Fully-Developed Nucleate Boiling: Overlap of Areas of Influence and Interference Between Bubble Sites [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1981, 24(6): 1025- 1032.
[4] Chekanov V V. Interaction of Centers in Nucleate Boiling [J]. Translated from Teplofizika Vysokikh Temperatur, 1977, 102(3): 121- 128.
[5] 柴立和. 微重力下双组分沸腾机理及沸腾非线性特[D]. 北京: 清华大学, 1999.
[6] Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of Heat in Solids[M]. Sec ed. Oxford: Clarendon Press, 1986.
[7] 王昊. 加热丝上汽泡间相互作用探讨[D]. 北京: 清华大学, 2000.
[8] Calka Andrzej, Judd R L. Some Aspects of the Interaction Among Nucleation Sites During Saturated Nucleate Boiling[J]. Int. J. Heat Mass Transfer., 1985, 28(12): 2331- 2342.
[9] Kenning D B R. Wall Temperature Patterns in Nuclear Boiling[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1992, 35(1): 73- 85.
[10] 施明恒, 甘永平, 马重芳. 沸腾和凝结[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.

(责任编辑 吴一黄)