

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2021.01.008

高温曲面过冷核态沸腾汽泡演化特性数值研究

纪国剑^{1,2}, 朱志伟¹, 李佩莹¹, 郭晶晶¹, 周 宁¹, 王政伟¹

(1. 常州大学 石油工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 江苏省绿色过程装备重点实验室(常州大学), 江苏 常州 213164)

摘要:基于 OpenFOAM6.0 软件编译了 NewInterPhaseChangeFoam(NIPCF)求解器,采用有限体积法 VOF (Volume of Fluid)数值计算高温曲面发生过冷核态沸腾时水中汽泡的运动过程。结果表明:上朝向曲面核化的汽泡的演化行为与平面上相似;侧朝向曲面核化的汽泡在上下压差的作用下呈扁椭圆形滑移,最终以不规则梨形脱离壁面;浮升力对下朝向曲面核化的汽泡的脱离行为起抑制作用;孤立汽泡区的两汽泡在浮升过程中相互靠近时,其中一个汽泡会出现短暂加速现象;气柱汽块区汽块在浮升过程中形成的汽液混合区的演化行为与区域内单相占比有关;若区域内汽相占比比较低,以汽相冷凝为主,反之,以液相蒸发为主。

关键词:高温曲面; 过冷核态沸腾; 汽泡; 汽液两相流; 相变; 传热

中图分类号:TK 124

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2021)01-0048-09

Simulation of Evolution Characteristics of Supercooled Nucleate Boiling Bubble on High Temperature Curved Surface

Ji Guojian^{1,2}, ZHU Zhiwei¹, LI Peiying¹, GUO Jingjing¹, ZHOU Ning¹, WANG Zhengwei¹

(1. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Green Process Equipment, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: The NewInterPhaseChangeFoam(NIPCF) solver was based on OpenFOAM6.0 software. The Volume of Fluid Method (VOF) was used to calculate the motion of bubbles in water during the supercooled nucleate boiling on high-temperature surfaces. The results show that the evolution of the bubble nucleation on the surface is similar to that on the plane. The bubble nucleation on the side toward the surface is flat and elliptical under the action of the upper and lower pressure difference, and the departure shape of the bubble is in irregular pear-shape. The buoyancy force inhibits the detachment behavior of vapor bubbles nucleated downward. When the two bubbles in the isolated bubble region approach with each other during the lifting process, one of the bubbles will briefly accelerate. For

收稿日期:2020-09-05。

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0805101); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX180966)。

作者简介:纪国剑(1980—),男,江苏句容人,博士,副教授。E-mail:jgj@cczu.edu.cn

引用本文:纪国剑,朱志伟,李佩莹,等. 高温曲面过冷核态沸腾汽泡演化特性数值研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2021, 33(1): 48-56.

the gas column block steam, the evolution behavior of the vapor-liquid mixing zone formed during the lifting process is related to the ratio of vapor to liquid in the region. If the vapor phase in the region is relatively low, the vapor phase condensation is dominant. On the contrary, when the vapor phase is high relatively, the liquid phase evaporation is dominant.

Key words: high temperature curved surface; supercooled nucleate boiling; bubble; gas-liquid flow; phase change; heat transfer

汽液两相流动和沸腾现象广泛存在于石油化工、电力、冶金、核能等领域的工业生产中,如核反应堆堆芯流道内的换热、制冷装置中制冷剂的蒸发、核电系统中非能动安全系统和乏燃料的储存冷却^[1]、高温熔融金属表面沸腾爆炸^[2]、金属圆管内流动沸腾和锅炉强化沸腾等。由于核态沸腾具有高效换热能力,核态沸腾过程中气液两相流动一直是人们的研究热点。迄今为止,大部分过冷核态沸腾研究以开放式或受限式水平/垂直/倾斜矩形板换热面沸腾为主^[3-6],对受限空间内管外和管间核态沸腾的汽泡行为特性研究相对较少。但在实际生产中,工艺设备不断更新,如新一代核电系统中相变换热设备中存在管间沸腾现象,因此,研究管外和管间的流动沸腾具有重要意义。

选用 OpenFOAM6.0 软件模拟受限空间内高温圆形曲面发生过冷核态沸腾时水中汽泡运动过程。区别于常用的商业软件,OpenFOAM 具有的开源性,可使用户根据需求设计流程匹配、物理模型和计算精度等细节进行模块化编译,进而实现用户自定义功能。研究将软件原有的相变求解器进行了一些发展后,通过观察汽泡轮廓和运动轨迹,以汽泡脱离直径、浮升速度和区域内单相占比等参数为指标,分区域探讨曲面上汽泡运动行为,进而研究过冷核态沸腾中孤立汽泡区和气柱汽块区的汽泡演化特性。

1 数值模型

数值计算以 Lee 模型^[7]作为汽液交界面处的质量转换模型,假定计算中汽、液相均为绝热、不混溶的不可压牛顿流体,基于 VOF 模型,使用多维通用显式求解法 MULES(Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution)求解质量方程,通过体积分数来保持界面平衡。再通过速度-压力耦合 PIMPLE 算法,初步预测速度场。同时,根据动量方程求解压力场、修正速度场,最后,求解能量方程。

1.1 理论方法

1.1.1 相变模型

与 Hertz-Knudsen 模型相比,Lee 模型更适用于观察流动沸腾过程中所有发展中的流动状态^[8]。此模型中汽液交界面处的传质速率为:

$$\dot{m}_v = r_v \alpha_l \rho_l \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}} \quad (T > T_{sat}) \quad (1)$$

$$\dot{m}_c = r_c (1 - \alpha_l) \rho_g \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}} \quad (T < T_{sat}) \quad (2)$$

式中:下标 l 和 g 分别为液相和汽相; T_{sat} 为饱和温度; T 为流体温度; α 为体积分数; ρ 为流体密度; \dot{m}_v 和 \dot{m}_c 分别为汽液交界面的汽相质量源项和液相质量源项; r_v 和 r_c 分别为蒸发和冷凝时的传质强度因子,通常取 0.1^[7-10] 或 100^[11-12],本文中取 100。

通过式(1)和式(2)得到的质量源项 \dot{m} 乘以汽化潜热 r ,得到能量源项 Q ,即相变过程中的能量变化,方程为

$$\dot{Q} = \dot{m} r \quad (3)$$

1.1.2 控制方程

采用 Navier-Stokes 方程描述不可压流体流动,以源项形式添加重力和表面张力,即

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \cdot \nabla u) + S_g + S_s \quad (4)$$

式中: ∇ 为拉普拉斯算子; u 为速度; μ 为动力黏度; ∇P 为压力降; C_p 为比热容; λ 为导热系数; ρ 为两相流密度; S_g 和 S_s 分别为重力项和表面张力项。

$$S_g = \rho g \quad (5)$$

$$S_s = \sigma \kappa \nabla \alpha_1 \quad (6)$$

式中: S_s 可由 CSF(Continuum Surface Force)连续表面力模型计算; σ 为表面张力; κ 为界面曲率,可结合 VOF 模型计算得到^[13]。

由于在沸腾换热过程中,汽液界面随时间不断变化,为了维持质量守恒,在输运方程中添加汽液交界面的汽相(液相)质量源项,即

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + u \cdot \nabla \alpha_1 = -\dot{m} \left[\frac{1}{\rho_l} - \alpha_1 \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_g} \right) \right] \quad (7)$$

汽液界面相变发生质量传输的同时伴随着两相间能量的转换,为了维持能量守恒,在能量方程中添加能量源项

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p (u \cdot \nabla) T = -\nabla \cdot (\lambda \nabla T) - Q \quad (8)$$

为实现汽液物性参数的平滑分布,求解域内汽液两相的比热容、密度和动力黏度等参数表示为:

$$C_p = \alpha_1 C_{p,l} + (1 - \alpha_1) C_{p,g} \quad (9)$$

$$\rho = \alpha_1 \rho_l + (1 - \alpha_1) \rho_g \quad (10)$$

$$\mu = \alpha_1 \mu_l + (1 - \alpha_1) \mu_g \quad (11)$$

1.1.3 壁面热导率

不同材质壁面的热导率差异导致各壁面传热效果不同,热导率可经过式(12)计算得到

$$\lambda_w = \rho_w C_{p,w} \alpha_w \quad (12)$$

式中: ρ_w 是壁面密度; α_w 是壁面热扩散系数; $C_{p,w}$ 是壁面比热容; 扩散系数和比热容可通过激光脉冲法进行材料热性能实验获得^[14]。

在 OpenFOAM6.0 软件的相变求解器(InterphaseChangeFoam)是压力驱动的不可压两相相变求解器。研究参考 Phase Change Heat Foam^[15-16],根据上述模型,在原有相变求解器中加入相变模型和能量方程,用适当的源项修改质量和动量方程。同时,边界条件的处理,直接影响了计算结果的精度。由于不同材质壁面的热传导系数不同,模拟中可通过调节热导率表征多种加热壁面,因此,等热流边界条件更适用于壁面换热的研究。结合式(12)引入热导率,在求解器内对壁面的密度、比热容和热扩散系数等参数进行定义,编译作为第二类边界条件的壁面热流边界,最终发展得到的 New Inter Phase Change Foam(以下简称 NIPCF)求解器可用于求解由压力和温度变化引起的相变。

1.2 算例验证

一维斯蒂芬问题常被用于验证相变模型^[17-19]。本文通过模拟由斯蒂芬流引起的蒸汽向外流动现象来验证 NIPCF 求解器的可行性,根据文献[15]设置数值计算参数。初始时刻,计算域为饱和温度、压力 1 MPa 的静止流域,其顶部和底部采用 empty 边界(空边界条件,说明此边界维度为零,常被用于模拟

一维或二维问题),左右两侧为壁面边界,过热度为 10 K,高温壁面速度边界为无滑移速度边界,计算域示意图如图 1 所示。

高温壁面过热,不断向液体传递热量,使饱和液体蒸发,形成的蒸汽团挤压液体,汽液交界面不断向右侧移动。汽液交界面位置随时间变化情况如图 2 所示,计算结果与文献[15]中计算精确解和模拟结果的吻合度良好,证明算法可行。

1.3 几何模型与计算条件

采用 NIPCF 求解器,以水为工质在竖直正方形流道(40 cm× 40 cm)内设置一圆形高温热源($R = 5\text{ cm}$)。分析结果时,将曲面划分为 I (上朝向曲面)、II (下朝向曲面)、III 和 IV (侧朝向曲面)4 个扇形区域,以便更好地研究高温曲面过冷核态沸腾汽泡演化特性。几何模型如图 3 所示,其中顶部为压力出口;左侧、右侧和底部均为壁面边界;圆形曲面设置为等热流壁面边界,材质选用工程上常用的 55CrMo^[20],导热系数为 33.75 W/(K·m)。计算考虑重力场,初始时刻水域静止,设定过冷度 10 K、压力 0.1 MPa、汽化潜热 2 260 kJ/kg、表面张力 0.059 N/m、圆形曲面热流密度 30 kW/m²,水和水蒸气的物性参数^[21]见表 1。

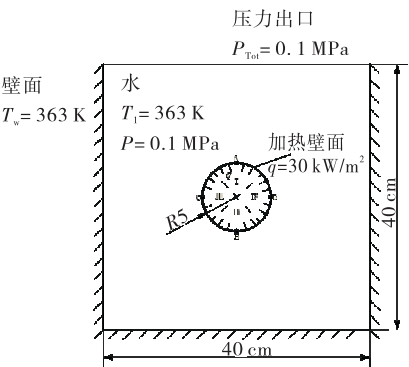


图 3 几何模型
Fig.3 Geometric model

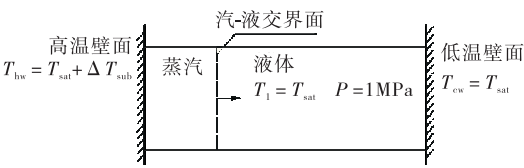


图 1 计算域示意图
Fig.1 Sketch of computational domain

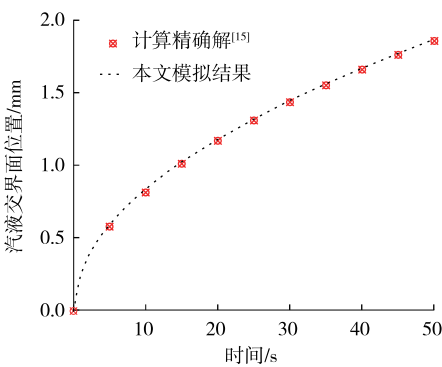


图 2 汽液交界面位置随时间变化曲线
Fig.2 Vapor-liquid interface position with time curve

表 1 水和水蒸气的物性参数表

Table 1 Physical property parameters of water and vapor				
物性	密度/ (kg·m ⁻³)	运动黏度/ (m ² ·s ⁻¹)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
水	958	2.95×10 ⁻⁷	4 220	0.679
水蒸气	0.597	2.01×10 ⁻⁵	2 030	0.025

2 过冷核态沸腾汽泡演化行为分析

过冷核态沸腾通常伴随着孤立汽泡的核化生长、脱离与浮升和气柱汽块区的形成,同时热流密度和传热系数急剧增加^[22-24]。

2.1 孤立汽泡区汽泡演化行为

按图 3 所示的 4 个区域分析曲面上汽泡演化行为。其中 III, IV 两区域对称,由于汽泡成核点具有随

机性,两区域的汽泡核化和生长情况不大一样,但是其汽泡受力和运动行为大致相同,因此,仅取图 3 中的 A,B,C 3 点为观察点,记录在 3 点处核化的第一个汽泡的运动情况(图 4),进而研究孤立汽泡区的汽泡演化行为,图 4 中红色区域代表水,蓝色区域代表水蒸气。

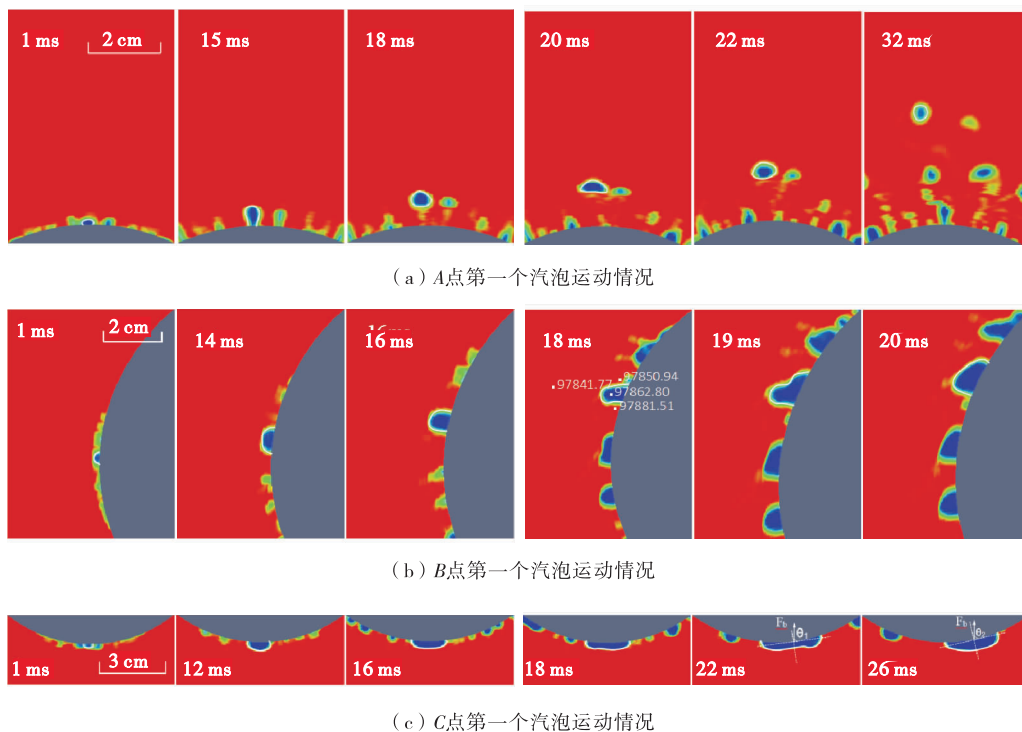


图 4 曲面上不同区域核化的汽泡的运动情况

Fig.4 Movement of bubbles nucleated in different regions of the surface

图 4(a)中 A 点处汽泡的核化、生成和脱离行为与 Tomohide 等^[25]通过实验得到的汽泡在水平壁上沸腾时的行为相似。对比脱离壁面时($t=22$ ms)和脱离 10 ms 后的汽泡直径可以发现,汽泡在浮升过程中由于蒸汽凝结导致汽泡收缩,直径由 6.7 mm 变为 4.5 mm。李少丹等^[26]在研究窄通道内过冷沸腾时拍摄到过这一现象。可见,在上朝向壁面区域核化的汽泡与水平壁面上核化的汽泡的演化行为几乎一致。

C 点的汽泡受重力场影响,整体呈浮升趋势,沿壁面顺次滑移、向 A 点靠拢。由图 4(b)可知,C 点处刚核化不久的汽泡($t=1$ ms)在表面张力 F_s 作用下^[27],汽泡内外压强处于平衡状态,汽泡在核化点稳定生长;随着热量不断汇入,汽泡在浮升力 F_b 作用下^[27]沿壁面开始滑移($t=14$ ms),滑移过程中汽泡内部压强大于外部流场压强、上下表面存在一个 32 Pa 的压力差,汽泡底部向上凹陷,成扁椭圆形($t=18$ ms)。通过图 4(b)、图 4(c)可以发现,C 点处 14 ms 内汽泡就开始滑移而 B 点处汽泡 22 ms 局部区域才出现滑移速度,且 18 ms 时 B 点处汽泡在浮升力 F_b 作用下更加贴近加热面。同时,对比 $t=22$ ms 和 $t=26$ ms 的汽泡滑移速度,发现 4 ms 内滑移速度从 0.31 m/s 升为 0.34 m/s。可见,对于下朝向曲面核化的汽泡而言,浮升力 F_b 对汽泡脱离壁面起抑制作用;将浮升力与曲面切向夹角称为倾斜角(如图 4(c)所示),在汽泡滑移过程中,倾斜角减小,浮升力的抑制作用逐渐减弱、滑移速度逐渐变大。

取 A 点处的连续产生的 3 个孤立汽泡 B1,B2,B3 为研究对象(如图 5(a)所示),以记录横纵坐标的形式还原 A 点处核化后汽泡在不同时刻的运动轨迹,进而研究 3 个汽泡核化后的浮升行为,如图 5(b)所示。可以发现,孤立汽泡区的各汽泡受周围汽泡影响边界层扰动增强、呈非直线运动。取汽泡中心流

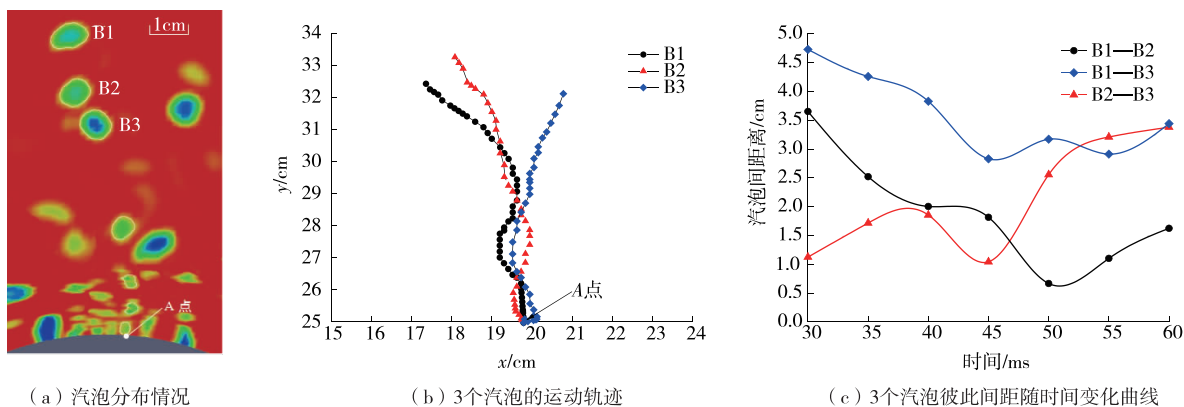


图 5 同一核化点汽泡运动轨迹 (B1, B2, B3)

Fig.5 Bubble trajectory of the same nucleation point (B1, B2, B3)

线上的速度为汽泡浮升速度,观察汽泡脱离壁面后不同时刻的浮升速度变化曲线(图 6)可发现,由于汽泡以梨形脱离壁面,为恢复汽泡稳定形态,表面张力导致浮升速度呈增长趋势;之后由于蒸汽凝结、汽泡收缩导致汽泡所受浮升力减小、浮升速度降低。结合图 5(c),对比汽泡浮升速度发现,当 B1—B2 间距缩小到 2.5 cm 时($t=35$ ms),B1 开始出现短暂加速现象、B2 浮升速度 5 ms 内降低 25%。当 $t=40$ ms 时,B1—B2 距离大于 B2—B3 距离,则 B1 对于 B2 的干扰小于 B3 对 B2 的干扰,B1 开始减速,B2 出现短暂加速现象,B3 浮升速度 5 ms 内降低了 47.9%,此时 B2—B3 间距为 0.8 cm。可见,两汽泡相互靠近时,流体对汽泡的反作用力使得其中一个浮升速度增加、另一个降低;多个汽泡间彼此的干扰程度与各汽泡间距密切相关,距离越近的汽泡越易受到干扰。

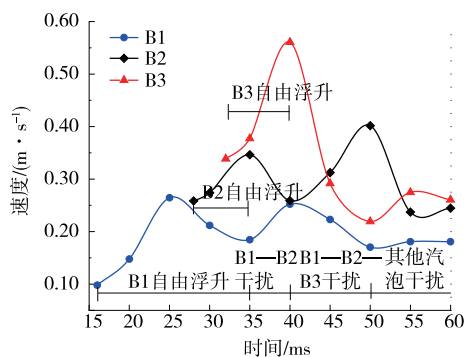


图 6 3个汽泡浮升速度随时间变化曲线

Fig.6 Three bubble rise speed curves with time

2.2 气柱汽块区汽泡演化行为

气柱汽块区汽泡演化行为以汽泡聚合为主,可将汽泡聚合过程分为靠近、融合、调整 and 稳定 4 个阶段^[24],如图 7 所示。在靠近和融合阶段汽泡表面能随表面积的增加而增大,单位长度两相摩擦压降减小^[28],流体扰动增强、加速汽泡融合;观察速度场可发现,调整阶段汽泡内水蒸气运动较为紊乱;直至稳定阶段,聚合后的汽泡统一呈顺时针旋转。在聚合行为快结束时,汽泡尾部受浮升力和流动曳力影响呈小幅度涡形转动甩出少量气体^[24],形成汽液混合区(如图 7 中 A, B 区域所示)。当 $t=52$ ms 时 A 区内液相占 75%、汽相占 25%,由于距融合后的汽泡较近的 A 区内部分液相吸收此汽泡冷凝时放出的热量而蒸发,3 ms 后汽相占比提高了 4%;而距离较远的 B 区内汽相在过冷液中逐渐发生冷凝,3 ms 后汽相占比从 10%降低至 5%。可见,汽液混合区的演化行为与区域内单相占比有关,若汽相占比较高,则以液相蒸发为主,反之,以汽相冷凝为主。此外,液体过冷度和混合区域位置也会对区域内汽相冷凝产生一定影响。

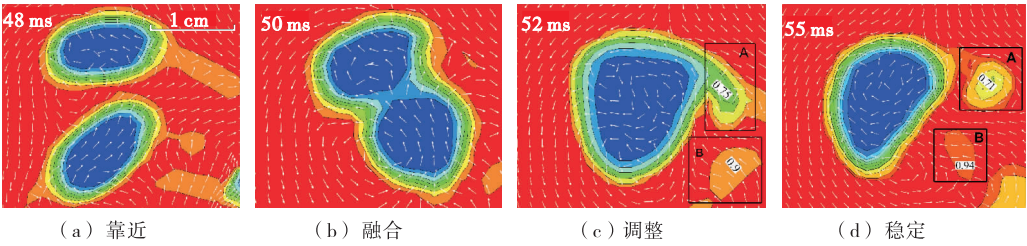


图 7 浮升过程中气泡聚合过程

Fig.7 Bubble polymerization process during the lifting process

徐建军等^[29]认为气泡聚合过程中气泡运动速度的增加会提高局部区域换热。观察图 8(a)和图 8(c)可发现,因气泡间扰动增强、气泡与周围区域的换热增加,气泡中心温度降低 0.8 K。在 $t = 55 \text{ ms}$ 时,气泡中心温度稍有回升,如图 8(d)所示,这是气泡为达到稳定状态而不断调整形态,随气泡表面积减小,表面能转变为内能引起^[30]。

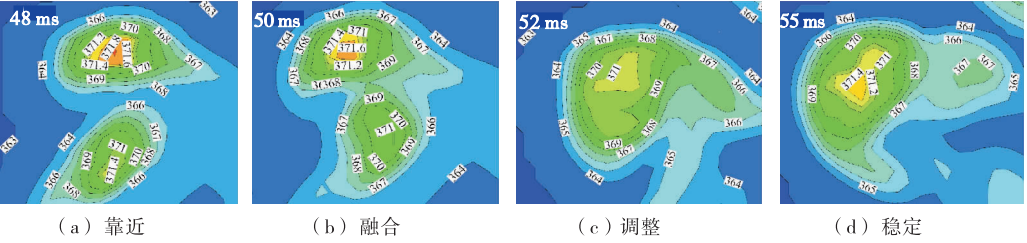


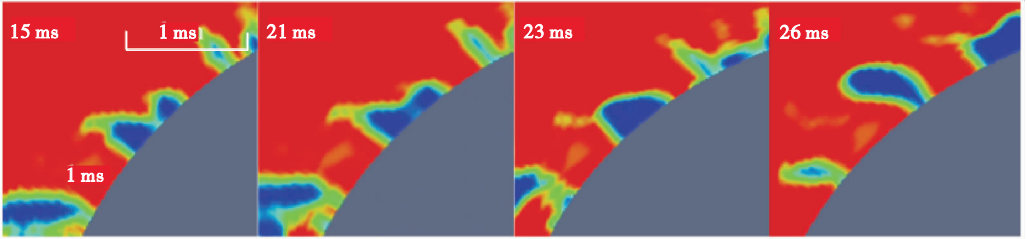
图 8 聚合过程中气泡内外温度变化

Fig.8 Temperature change inside and outside the bubble during polymerization

水平壁面上核化的气泡发生聚合行为时,以规则的梨形脱离壁面^[31-32],而曲面上核化的气泡聚合过程中在表面张力 F_s 、浮升力 F_b 和壁面黏滞力 F_r 共同作用下^[27],气泡被拉长、靠近壁面侧接触面积逐渐变小直至以不规则梨形状脱离壁面($t = 26 \text{ ms}$),如图 9 所示。



(a) 平面上气泡聚合过程^[32]



(b) 曲面上气泡聚合过程

图 9 滑移过程中气泡在壁面上的聚合过程

Fig.9 The polymerization process of the bubble on the wall during the slipping process

3 结 论

文章编写了可用于求解压力和温度相变的 NIPCF 求解器,经算例验证,算法可行。主要结论为:

1)对于上朝向曲面核化的汽泡,其核化、生成、脱离及蒸汽冷凝行为与平面上相似;侧朝向曲面核化的汽泡在上下压差的作用下呈扁椭圆形滑移;浮升力的抑制作用使下朝向曲面核化的汽泡相对较难脱离核化点;倾斜角减小,作用效果逐渐减弱。

2)脱离壁面自由浮升的汽泡受表面张力、浮升力和蒸汽冷凝行为影响,浮升速度先增长后减小;两汽泡相互靠近时,其中一个汽泡会出现短暂加速现象;同时,多个汽泡间彼此干扰程度与各汽泡间距密切相关,距离越近的汽泡越易受到干扰。

3)气柱汽块区汽块在浮升过程中形成的汽液混合区的演化行为与区域内单相占比相关;若区域内汽相占比较低,以汽相冷凝为主,反之,以液相蒸发为主。

4)气柱汽块区汽泡沿壁面聚合时,在浮升力、汽泡表面张力和壁面黏滞力作用下汽泡被不断拉长、靠近壁面侧的接触面积逐渐变小,最终以非对称梨形脱离壁面。

参考文献:

- [1]田永生. 大尺度受限空间核态池沸腾换热机理分析与实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [2]陆祺, 陈德奇, 宋家斑, 等. 高温熔融金属表面爆炸沸腾过程的实验研究[J]. 核动力工程, 2016, 37(3): 158-162.
- [3]何辉, 潘良明, 陈德奇. 池沸腾下朝向曲面加热面临界热通量分析模型[J]. 化工学报, 2014, 65(s1): 235-239.
- [4]李忠义. 不同曲率朝下加热曲面蒸汽泡的生长滑移和脱离的实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [5]李维仲, 姬安生, 董波. 过冷沸腾气泡在圆形朝下壁面上特性实验研究[J]. 大连理工大学学报, 2015, 55(5): 464-468.
- [6]姬安生. 过冷沸腾中汽泡在圆形朝下壁面上热动力学行为的实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [7]LEE W H. A pressure iteration scheme for two-phase flow modeling[R]. Los Alamos: [s.n.], 1979.
- [8]SANDRA C K, DE S, GERALDINE J H, et al. Modeling the evaporation of a hydrocarbon feedstock in the convection section of a steam cracker[J]. Computers and Chemical Engineering, 2009, 33(1): 122-132.
- [9]WU H L, PENG X F, YE P, et al. Simulation of refrigerant flow boiling in serpentine tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 50(5): 1186-1195.
- [10]ASGHAR A, MASOUD R, AMMAR A A. CFD modeling of flow and heat transfer in a thermosyphon[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009, 37(3): 312-318.
- [11]CHEN F, MILNES D, ANITA R, et al. Volume of fluid simulation of boiling two-phase flow in a vapor-venting microchannel[J]. Frontiers in Heat and Mass Transfer, 2010, 1(1): 1-11.
- [12]YANG Z, PENG X F, YE P. Numerical and experimental investigation of two phase flow during boiling in a coiled tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 51(5): 1003-1016.
- [13]BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surfacetension[J]. Journal of Computational Physics, 1992, 100(2): 335-354.
- [14]朱虹. 多孔陶瓷材料的弹性和传热性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [15]SAMKHANIANI N. The evaluation of the diffuse interface method for phase change simulations using OpenFOAM[J]. Heat Transfer-Asian Research, 2017, 46(8): 1173-1203.
- [16]SAMKHANIANI N. Numerical simulation of superheated vapor bubble rising in stagnant liquid[J]. Heat Mass Transfer, 2017, 53(9): 2885-2899.

- [17] SUN D L, XU J L, WANG L. Development of vapor-liquid phase change model for volume-of-fluid method in Fluent [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012, 39(8): 1101-1106.
- [18] GUO D Z, SUN D L, LI Z Y, et al. Phase change heat transfer simulation for boiling bubbles arising from a vapor film by the voset method[J]. Numerical Heat Transfer Part A: Applications, 2011, 59(11): 857-881.
- [19] SAMUEL W J, WELCH J W. A volume of fluid based method for fluid flows with phase change[J]. Journal of Computational Physics, 2000, 160(2): 662-682.
- [20] 王倩, 李辉平, 李保民, 等. 55CrMo 钢热物性参数的测定[J]. 试验技术与方法, 2012, 48(2): 109-111.
- [21] SATO Y, NICENO B. A depletable micro-layer model for nucleate pool boiling[J]. Journal of Computational Physics, 2015, 300: 20-52.
- [22] 沈秀中, 宫崎庆次, 徐济璠. 在垂直环形窄缝流道中的沸腾传热特性研究[J]. 核科学与工程, 2001, 21(3): 244-251.
- [23] 袁德文. 窄流道内高过冷流动沸腾条件下的气泡演化特性及机制[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [24] 郑强, 高璞珍, 许超, 等. 窄矩形通道内气泡聚合行为研究[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(6): 1105-1109.
- [25] TOMOHIDE Y, OSAMU N. Microscale wall heat transfer and bubble growth in single bubblesubcooled boiling of water[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 100: 851-860.
- [26] 李少丹, 谭思超, 许超, 等. 流动沸腾条件下窄通道内的气泡生长和冷凝[J]. 原子能科学技术, 2014, 43(s1): 233-238.
- [27] 管鹏. 流动沸腾中气泡行为的理论与实验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [28] 罗小平, 谢鸣宇, 郭峰, 等. 不同表面能对微细通道流动沸腾压降特性的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 406-412.
- [29] 罗小平, 邓聪, 冯振飞, 等. 制冷系统不同表面能微通道的流动沸腾传热特性试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 217-222.
- [30] 徐建军, 陈炳德, 王小军. 竖直矩形窄缝通道滑移气泡聚合作用可视化实验研究[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(5): 548-553.
- [31] 许川, 程宁, 彭常宏. 过冷沸腾水中单气泡成长的数值模拟[J]. 核动力工程, 2017, 38(6): 23-26.
- [32] 毕景良, 柯道友, 徐建军, 等. 微尺度核态沸腾气泡聚合特性研究[J]. 核动力工程, 2016, 37(3): 26-30.

(责任编辑:殷丽莉)