

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.05.006

气泡生长及脱离过程的格子玻尔兹曼模拟

汪鹏军^{1,2}, 祁影霞^{1,2}, 谢荣建³

- (1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;
2. 上海理工大学 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093;
3. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:为了研究气液相变过程中重力加速度、壁面温度以及成核点间距离对气泡生长及脱离的影响,课题组在Shan-Chen 伪势格子 Boltzmann 模型的基础上,通过将密度分布函数与温度分布函数进行耦合求解的方式建立了气液相变模型。同时采用此模型计算得到了液滴内外压差与液滴半径倒数之间的关系,发现其符合 Young-Laplace 定律,从而验证了模型的正确性。进而利用此模型对气液相变现象中的气泡生长及脱离过程进行了二维数值模拟。结果表明:气泡脱离直径会随着重力加速度的增大而呈现出逐渐减小的规律,而且气泡生长及脱离的过程与文献结果甚为相符,此外将模拟得到的气泡脱离直径进行了非线性拟合,发现其结果与新的经验关系式吻合良好;同时较高的壁面温度会增大气泡断裂颈部与壁面之间的距离,而且壁面温度的升高会增大气泡的脱离直径;还发现随着成核点间距离的增加,气泡的脱离直径会呈现出先减小而后增大的趋势。

关键词:气液相变;气泡生长;伪势模型;格子 Boltzmann 方法;Young-Laplace 定律

中图分类号:O359 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)05-0032-07

Lattice Boltzmann Simulation of Bubble Growth and Detachment

WANG Pengjun^{1,2}, QI Yingxia^{1,2}, XIE Rongjian³

- (1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

Abstract: In order to study the effects of gravity acceleration, wall temperature and distance between nucleation points on bubble growth and detachment in vapor-liquid phase-change, a vapor-liquid phase-change model was established by coupling density distribution function and temperature distribution function on the basis of Shan-Chen pseudo-potential lattice Boltzmann model. At the same time, the relationship between the pressure difference inside and outside the droplet and the reciprocal radius of the droplet was obtained by using the model. It was found that the model conforms to Young-Laplace law, thus verifying the correctness of the model. Then, the two-dimensional numerical simulation of bubble growth and detachment in vapor-liquid phase-change was carried out by using this model. The calculation results show that the bubble detachment diameter decreases gradually with the increase of gravity acceleration, and the process of bubble growth and detachment is in good agreement with the literature results. In addition, the simulated bubble detachment diameter is fitted by non-linear method and the results are in good agreement with the new empirical formula; at the same time, the higher wall temperature will increase the distance between the bubble neck and wall, and the increase of wall temperature will increase the detachment diameter of bubbles. The detachment diameter of bubbles decreases first and then increases with the increase of the distance between nucleation points.

Keywords: vapor-liquid phase-change; bubble growth; pseudo-potential model; lattice Boltzmann method; Young-Laplace law

收稿日期:2019-11-08;修回日期:2020-05-25

基金项目:上海市动力工程多相流动与传热重点实验室项目(13DZ2260900)。

第一作者简介:汪鹏军(1995),男,甘肃定西人,硕士研究生,主要研究方向为介观格子玻尔兹曼模拟。E-mail:1743623236@qq.com

在现代工业生产中,气液两相流动与沸腾传热现象普遍存在,特别是在制冷、医药、冶炼与电子散热等行业中显得尤为重要,所以研究气液相变现象中气泡的成核、生长以及脱离壁面的动态过程对上述行业的发展意义重大^{[1]520}。目前针对气液两相流动以及气液相变现象的研究方法主要有2种:一种是基于实验,另一种是基于数值模拟。但是由于在气液两相之间不仅存在着相互作用,而且还会存在着强烈的传热传质现象,同时气液相变过程也会夹杂其中,所以气液两相流动与沸腾传热现象的机理比纯粹的单相流动更为复杂,采用传统的实验和理论方法很难得到精确的结果。随着计算机技术的不断发展,计算流体力学也得到了充分地发展。截止到目前已经有许多国内外学者对气液两相流动以及气液相变过程进行了大量的数值模拟研究同时也取得了很多成果。其中,通过研究和分析气液相变过程中气泡成核、生长以及脱离壁面等一系列动态行为特征来研究气液相变现象一直是一种的重要研究手段^[2]。

格子 Boltzmann 方法 (lattice-Boltzmann method, LBM) 是一种介于微观与宏观数值模拟之间的介观数值模拟的新方法,其特点是在微观层面上无穷大,而在宏观层面上无穷小^[3],流体的宏观热力学参数通过统计粒子在不同迁移方向上的运动过程来获得。正是由于 LBM 的微观粒子背景使其可以方便地处理流体与流体之间和流体与周围环境之间的相互作用,从而在描述一些复杂流动与传热现象时,如多孔介质内的流体流动、气液相变现象、多相流等问题时比传统的数值模拟方法更有优势,同时由于其良好的并行性以及高精度,在计算流体力学中得到了广泛的应用^[4]。目前已经有许多格子 Boltzmann 模型被提出,其中伪势格子 Boltzmann 模型由于其可以自动追踪界面的运动,计算效率高,能够反映多组分多相流体动力学的物理本质等优点,进而被广泛地应用到两相流动与气液相变模拟中。早在 1993 年,Shan 和 Chen^{[5]1815} 提出了一种指数形式的伪势函数来直接刻画粒子间相互作用的多相流格子 Boltzmann 模型。在随后的研究中有学者多次对伪势模型进行了改进,并且应用于气液相变的模拟研究中。Gabor 等^{[6]1472} 在伪势模型的基础上提出了一种新的伪势函数来体现粒子间的相互作用,并利用此模型对池沸腾与流动沸腾现象进行了数值模拟,结果表明在静止状态下,模拟得到的气泡脱离直径、气泡脱离频率与重力加速度之间成指数关系,这与 Fritz^{[7]379} 提出的经验关联式甚为符合,此外还发现

气泡的脱离直径与静态接触角之间没有明显关系。曾建邦等^{[1]520} 通过在引入精确差分方法的单组分多相格子 Boltzmann 模型的基础上耦合能量方程的方法对池沸腾中气泡生长的过程进行了数值模拟,其模拟结果与 Gabor 等^{[6]1472} 的结果相一致。Attila 等^[8] 模拟了微尺度下核态沸腾现象,重点研究了空腔尺寸与密度对单气泡生长和脱离的影响;除此之外,还详细研究了两个相邻的成核位置脱离气泡间的相互作用。赵凯等^[9] 通过改进伪势多相模型来替代颜色模型,建立了一种新的描述气液相变过程的格子 Boltzmann 理论模型,利用此模型模拟了蒸发过程,且得到较好的计算结果。同时应用该模型从孔隙尺度模拟了多孔介质中的相变现象,验证了该模型模拟复杂相变问题的可行性。Gong 和 Cheng 等^{[10]4923} 通过改进 Shan 和 Chen^{[5]1815} 提出的伪势多相模型,提出了一种适用于气液相变换热的新模型,同时提高了模型的计算稳定性,并且基于该模型对气泡在水平面上的生长和脱离现象进行了数值模拟。Sun 等^[11] 利用 Gong 等^{[10]4923} 提出的气液相变模型对垂直管道中的流动沸腾现象进行了数值模拟,重点研究了重力加速度、接触角与壁面过热度对气泡脱离直径与成核时间的影响。Gong 等^[12] 提出了一种新的伪势多相模型,同时将改进的能量方程也耦合到此模型中进行求解,其中能量方程采用经典的四阶龙格-库塔法来计算。结果表明,数值模拟可以捕捉到基本的液相变化,此外还利用此模型对核态沸腾、过渡沸腾和模态沸腾这 3 个不同的沸腾阶段进行了数值模拟。Li 等^[13] 综述了过去几十年中,格子 Boltzmann 方法在热流体与能源方面的应用,重点介绍了其在多相流、流体传热和流体相变方面的应用,同时也揭示了多相热格子 Boltzmann 方法的某些不一致性与缺陷。Li 等^[14] 通过改进 Gong 等^{[10]4923} 提出的气液相变模型,在孔隙尺度上对回路热管平板蒸发器多孔毛细芯中的蒸发现象进行了二维数值模拟,结果表明,随着热流密度的增加,气液界面将呈现出 5 种不同的形态或动力学规律。课题组在 Shan-Chen 伪势格子 Boltzmann 模型的基础上,通过将密度分布函数与温度分布函数进行耦合求解的方式建立了气液相变模型,同时采用 Young-Laplace 定律验证了模型的正确性,最后基于此模型对相变中的气泡生长及脱离过程进行了二维数值模拟。

1 数值模型

1.1 格子 Boltzmann 模型

课题组采用单松弛格式的 D2Q9 模型来对相变中

的气泡生长及脱离过程进行二维数值模拟,其 D2Q9 模型的格子排列如图 1 所示。同时在文中所涉及到的所有模拟中,除特殊说明,计算结果一般采用格子单位。其单组分多相格子 Boltzmann 模型的密度演化方程可以表示为:

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(x, t) - \frac{1}{\tau} [f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)] \quad (1)$$

式中: i 表示离散粒子的运动方向; x 和 t 分别表示位置与时间; τ 为松弛时间; 运动黏度 ν 与松弛时间有关, $\nu = c_s^2(\tau - 1/2) \Delta t$; c_i 表示离散方向上的粒子移动速度,在 D2Q9 模型中 c_i 可表示为:

$$c_i = \begin{cases} (0, 0), & i = 0; \\ (\pm 1, 0)c, (0, \pm 1)c, & i = 2 \sim 4; \\ (\pm 1, \pm 1)c, & i = 5 \sim 8. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $c = \Delta x / \Delta t$ 为格子速度,其中 Δx 为格子步长, Δt 为时间步长,文中取 $\Delta x = \Delta t$; c_s 为格子声速, $c_s^2 = c^2 / 3$; f_i 表示离散方向上的密度分布函数; f_i^{eq} 为离散方向上的局部平衡态分布函数,它与宏观密度 ρ 和速度 u 有关。

$$f_i^{eq} = w_i \rho \left[1 + \frac{c_i \cdot u}{c_s^2} + \frac{(c_i \cdot u)^2}{2c_s^4} - \frac{u^2}{2c_s^2} \right] \quad (3)$$

式中: w_i 为权重因子,当 $i = 0$ 时, $w_i = 4/9$, 当 $i = 1, 2, 3, 4$ 时, $w_i = 1/9$, 当 $i = 5, 6, 7, 8$ 时, $w_i = 1/36$ 。

其宏观密度与速度可通过下式来计算:

$$\rho = \sum f_i; \quad (4)$$

$$\rho u = \sum f_i c_i. \quad (5)$$

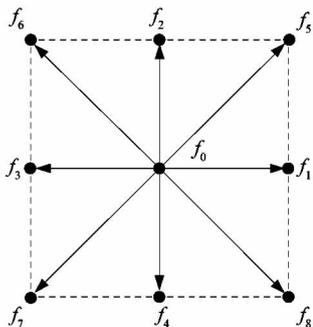


图 1 D2Q9 模型示意图

Figure 1 Schematic diagram of D2Q9 model

在单组份多相伪势模型中气液两相的分离是通过两相粒子间的相互作用力来驱动完成的,根据文献 [15] 其流体间作用力的表达式为:

$$F_{int} = -g_{int} \psi(x) \sum w_i \psi(x + c_i \Delta t) c_i. \quad (6)$$

式中: g_{int} 为粒子间相互作用强度; $\psi(x)$ 为有效密度,它与状态方程的选取有关,根据文献 [16] 其表达式

如下:

$$\psi(\rho) = \sqrt{\frac{2(p - \rho c_s^2)}{c_s^2 g_{int}}}. \quad (7)$$

式中: p 为系统压力; c_s 为格子声速。

课题组采用 Redlich-Kwong (R-K) 状态方程来进行模拟计算。

$$p = \frac{\rho RT}{1 - b\rho} - \frac{a\rho^2}{\sqrt{T}(1 + b\rho)}. \quad (8)$$

式中: $a = 0.42748R^2 T_c^{2.5} / p_c$; $b = 0.08664RT_c / p_c$ 都为常数; p 为压力; T 为温度; 而 p_c 与 T_c 分别为临界压力与临界温度,在本文模拟中分别取 $a = 2/49$, $b = 2/21$, $R = 1$, 计算可得 $p_c = 0.178396$, $T_c = 0.1961$ 。根据文献 [17] 流体与固体壁面间的黏性作用力

$$F_{abs} = -g_w \psi(x) \sum w_i s(x + c_i \Delta t) c_i. \quad (9)$$

式中: g_w 为固-液间相互作用强度; $s(x + c_i \Delta t)$ 为一个开关函数,当该点为固体壁面时取值为 1, 当该点为流体时取值为 0。

通过修正平衡态速度 u^{eq} 就可以将外力项引入到模型中,其修正后的平衡态速度

$$u^{eq} = u + (F\tau / \rho). \quad (10)$$

式(10)中的 u 不是流体真实的速度,流体真实的速度

$$U = u + (F\Delta t / 2\rho). \quad (11)$$

式(10)和式(11)中 $F = F_{int} + F_{abs} + F_g$ 为合外力,其中 F_g 为重力,且

$$F_g = \rho g. \quad (12)$$

式中 g 为重力加速度,方向竖直向下。

1.2 温度方程与相变源项

与密度演化方程相似,其温度演化方程可表示为:

$$g_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) = g_i(x, t) - \frac{1}{\tau_T} [g_i(x, t) - g_i^{eq}(x, t)] + \Delta t w_i \Phi. \quad (13)$$

式中: g_i 表示离散方向上的温度分布函数; τ_T 为温度松弛时间; 温度扩散系数 α 与温度松弛时间有关, $\alpha = c_s^2 \cdot (\tau_T - 1/2) \Delta t$; g_i^{eq} 为离散方向上的温度局部平衡态分布函数,且

$$g_i^{eq} = w_i T \left[1 + \frac{c_i \cdot U}{c_s^2} + \frac{(c_i \cdot U)^2}{2c_s^4} - \frac{U^2}{2c_s^2} \right]. \quad (14)$$

Φ 为相变源项,根据文献 [6] 第 1479 页的内容,可得

$$\Phi = \frac{T}{\rho^2 c_v} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_\rho \frac{d\rho}{dt}. \quad (15)$$

式中: c_v 为定容比热容; $d\rho/dt$ 表示密度随时间的变化量; T 表示温度,且

$$T = \sum g_i \quad (16)$$

2 模型验证

与其他文献中的方法相类似,课题组也采用 Young-Laplace 定律来验证其模型的正确性。在 200×200 的矩形格子计算区域的中心放置一个半径为 r 的饱和液滴,其余部分充满饱和和气体,由 Young-Laplace 定律可知当系统达到热平衡与力平衡状态时,在表面张力的作用下液滴将保持一个稳定的圆形,并且根据 Young-Laplace 定律可得稳定时液滴内外的压力差 ΔP 与表面张力 σ 和液滴的半径 r 满足:

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} = \sigma/r \quad (17)$$

在验证模拟中,选择 R-K 状态方程,计算域四周均取周期性边界条件,气相和液相的初始密度由 Maxwell 重构得到,初始液滴半径依次取 20,30,40,50 和 60,温度分别取 $0.7T_c$, $0.8T_c$ 和 $0.9T_c$,松弛时间 τ 取 1,经过 40 000 步迭代后计算收敛。图 2 所示为不同温度下液滴内外压差 $\Delta P = P_{in} - P_{out}$ 与液滴半径的倒数 $1/r$ 之间的关系,将模拟结果进行线性拟合后发现液滴内外压差与液滴半径的倒数成正比关系,数值模拟结果符合 Young-Laplace 定律。同时根据公式 (17) 可知直线的斜率为液滴的表面张力,在文中温度依次为 $0.7T_c$, $0.8T_c$ 和 $0.9T_c$ 时的表面张力分别为 0.466 30,0.256 80 和 0.096 47,从中可以看出随着系统温度的下降,液滴的表面张力在不断增大,这与实际的物理现象完全一致,从而进一步验证了此模型的正确性。

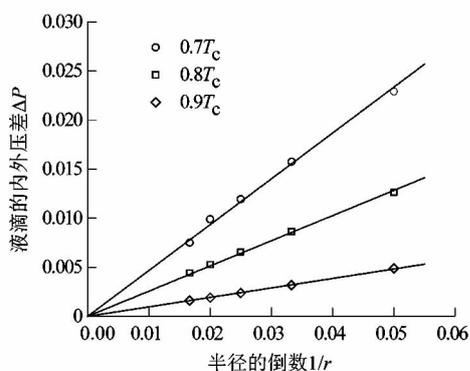


图 2 液滴内外压差与半径倒数之间的关系

Figure 2 Relation between pressure difference inside and outside droplets and reciprocal radius

3 计算结果及分析

3.1 初始化模型

为了模拟相变中气泡的生长及脱离过程,课题组选取了计算域大小为 150×250 的矩形格子区域。初

始时刻整个计算区域温度为 $T_s = 0.9T_c$,由 Maxwell 重构可以得到 T_s 温度下所对应的饱和气液相的密度分别为 $\rho_v = 0.81$, $\rho_l = 5.44$,同时整个计算区域都被液相所占据,根据文献 [18] 上边界采用定温定压边界条件,其温度为 T_s 、压力为 T_s 所对应的饱和压力,左右取周期性边界条件,下边界为无滑移壁面边界条件,取固-液间相互作用强度 $g_w = -2.0$ 。

3.2 重力加速度对气泡生长及脱离的影响

本节将探讨气泡的脱离直径、气泡的生长过程和重力加速度之间的关系。将一个高温的热源放置在计算域下边界的中心处,高温热源的实现方式一般有 2 种:一种是定壁温、另一种是定热流。在本节的所有模拟中高温热源都采用定壁温的方式来实现,同时取定壁面温度为 $T_w = 1.27T_c$ 。由于高温热源处不断有热流导入,使得该点附近的温度迅速升高,进而在下壁面中心处发生汽化产生气化核心,随后气化核心不断生长成为气泡,当气泡长大到一定程度时,在表面张力与浮升力的共同作用下会形成一个气泡颈部,气泡在此处发生断裂,下部气泡在表面张力与壁面黏性力的作用下收缩并仍然留在下壁面上,上部气泡在表面张力与浮升力作用下发生变形,并同时向上移动。课题组依次模拟了重力加速度 g 为 3.00×10^{-5} , 3.25×10^{-5} , 3.50×10^{-5} , 3.75×10^{-5} 和 4.00×10^{-5} 时气泡生长及脱离的过程,结果发现无论是在气泡脱离时、气泡脱离后还是在气泡上升时,都会在气泡的周围产生 2 个对称的漩涡,这是因为气泡在不断生长的同时还在浮升力的作用下向上运动,其气液界面附近处的热流体也跟着气泡向上运动,进而迫使冷流体向气泡的底部移动,所以在气泡的周围产生了 2 个对称的漩涡,其漩涡的作用是将温度较低的冷流体运送到温度相对较高的气泡底部,这与曾建邦等^{[1]525}的计算结果相一致,其具体结果如图 3~4 所示,取气液界面处密度为 $\rho_s = (\rho_v + \rho_l)/2$ 。

在研究沸腾相变现象时气泡脱离直径常被认为是一个重要的参数,早在 1935 年, Fritz^{[7]381} 通过实验和理论分析就提出了静止平衡态液体中的气泡脱离直径的关系式:

$$D = 0.0208\theta \left[\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)} \right]^{0.5} \quad (18)$$

式中: D 为气泡脱离直径; θ 表示气泡与壁面的接触角; σ 为气泡的表面张力; g 为重力加速度; ρ_g , ρ_l 分别为气体密度和液体密度。

但也有学者认为用此关系式计算得到的气泡脱离

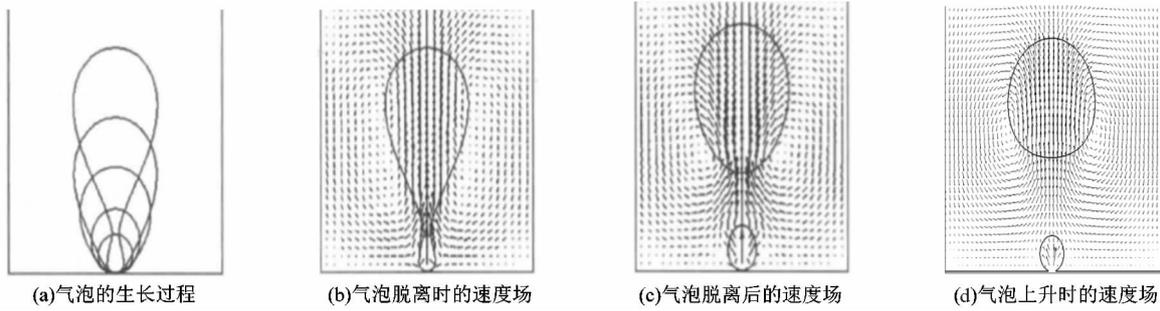


图3 $g = 3.00 \times 10^{-5}$ 时气泡的生长及脱离过程

Figure 3 Growth and detachment process of bubble at $g = 3.00 \times 10^{-5}$

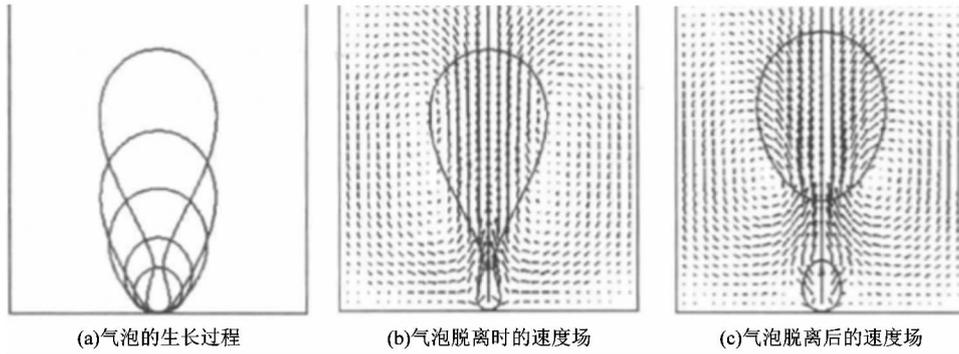


图4 文献[1]中的模拟结果

Figure 4 Simulation results in reference [1]

直径与实际气泡脱离直径不符, Gorenflo 等^[19]通过实验发现气泡脱离直径 D 与重力加速度 g 的 $-1/3$ 次方成正比, 后来 Golorin 等^{[20]92}又提出了新的关系式:

$$\frac{2R_d}{d_1} = 1 + \frac{d_2}{d_1}; \quad (19)$$

$$d_1 = \frac{1.65d^* \sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}; \quad (20)$$

$$d_2 = \left[\frac{15.6\rho_l}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/3} \cdot \left[\frac{\beta_d k_1 (T_{wall} - T_{sat})}{\rho_v h_{fg}} \right]^{2/3}. \quad (21)$$

式中: R_d 为气泡脱离半径; k_1 为液体导热系数; d^* , β_d 为常数。

如果我们仅考虑气泡脱离直径与重力加速度之间的关系时, 其他参数可以按照常数来处理, 则有:

$$D = a_1 g^{-1} + a_2 g^{-1/3}. \quad (22)$$

式中: D 为气泡脱离直径; a_1, a_2 为常数; g 为重力加速度。

如图5所示, 我们发现随着重力加速度的增大其气泡的脱离直径在逐渐减小。同时我们将模拟得到的气泡脱离直径进行了非线性拟合后得到:

$$D = 0.000828g^{-1.06} + 0.009143g^{-1/3}. \quad (23)$$

通过比较我们发现其计算结果与 Golorin 等^{[20]92}

提出的关系式吻合良好。

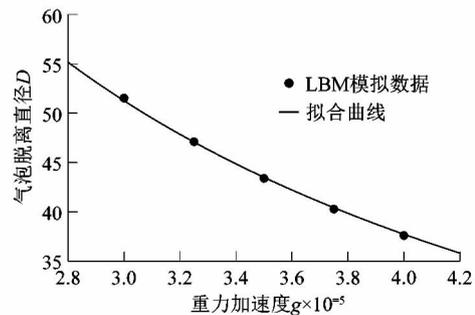


图5 气泡脱离直径与重力加速度的关系

Figure 5 Relationship between bubble detachment diameter and gravitational acceleration

3.3 壁面温度对气泡生长及脱离的影响

本节将探讨气泡的脱离直径、气泡的生长过程和壁面温度之间的关系, 在本节的模拟中取重力加速度 $g = 3 \times 10^{-5}$, 取壁面温度 T_w 依次为: $1.19T_c, 1.23T_c, 1.27T_c$ 和 $1.31T_c$, 其他条件不变。图6所示为不同壁面温度下气泡脱离壁面时的速度矢量图, 从图中可以看出壁面温度对气泡的生长过程影响很大, 随着壁面温度的增加气泡在脱离壁面时其断裂颈部与壁面之间的距离逐渐增大。之所以出现这种现象是因为当壁面

温度升高时,其界面液相转化为气相的速度增加同时气相在浮升力的作用下向上移动,此时气泡的表面张力不足以抗衡气液相变的速度,所以气泡被逐渐拉长,而随着气泡的不断上升,其表面张力又逐渐占据主导地位进而气泡开始收缩变形渐渐形成一个颈部并且在

此处发生断裂,同时在气泡的周围依然存在着2个对称的漩涡。图7所示为气泡脱离直径与壁面温度之间的关系,从图中可以看出,随着壁面温度的不断升高气泡的脱离直径将非线性地增加。

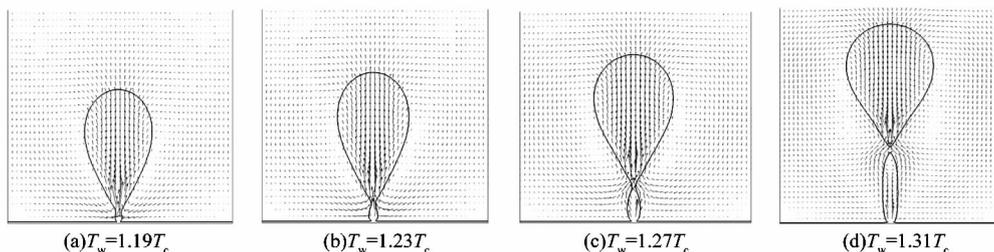


图6 不同壁面温度下气泡脱离壁面时的速度图

Figure 6 Velocity diagram of bubble separating from wall at different temperatures

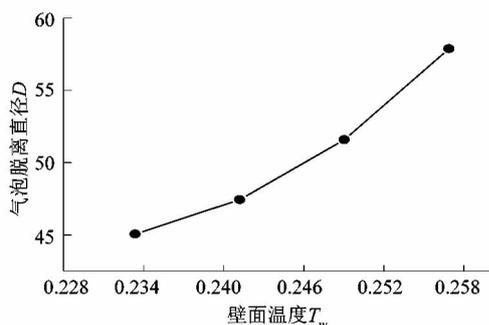


图7 气泡脱离直径与壁面温度的关系

Figure 7 Relationship between bubble detachment diameter and wall temperature

3.4 成核点间距离对气泡生长及脱离的影响

本节将探讨气泡的脱离直径、气泡的生长过程和两成核点间距离之间的关系,在本节的模拟中取重力加速度 $g = 3 \times 10^{-5}$ 、壁面温度 $T_w = 1.27T_c$,取两成核点间距离 l 依次为:20,30,40和50,其他条件不变。图8所示为 $l = 50$ 时两气泡的生长过程,从图中可以看出气泡的生长经历了成核、长大、相互吸引并融合、变形、最后在颈部脱离的一系列过程。图9所示为气泡脱离直径与成核点间距离之间的关系,从图中可以看出,随着两成核点间距离的增加气泡的脱离直径会出现先减小而后增大的趋势。

4 结论

课题组在 Shan-Chen 伪势多相模型的基础上,通过耦合密度分布函数与温度分布函数建立了气液相变模型。同时采用 R-K 状态方程在此模型下模拟发现液滴内外压差与液滴半径的倒数成正比关系,此数值模拟结果完全符合 Young-Laplace 定律从而验证了模

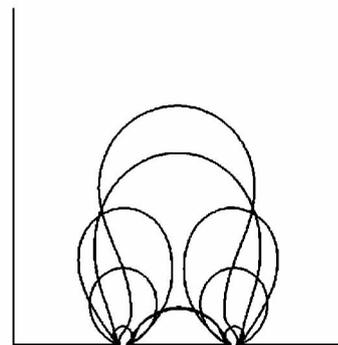


图8 $l = 50$ 时气泡的生长过程

Figure 8 Growth process of bubbles at $l = 50$

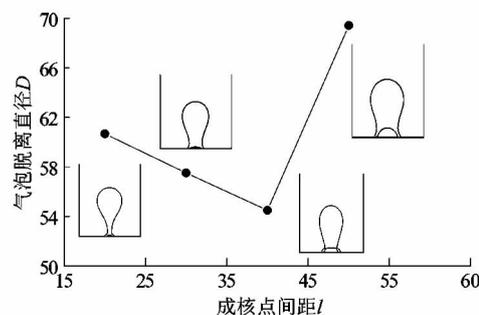


图9 气泡脱离直径与成核点间距离的关系

Figure 9 Relation between bubble detachment diameter and distance between nucleation points

型的正确性;最后利用此模型对相变过程中的气泡生长现象进行了二维数值模拟,得知气泡脱离直径会随着重力加速度的增大而减小,而且通过拟合曲线我们发现模拟得到的气泡脱离直径与重力加速度的 -1.06 次方和 $-1/3$ 次方成线性递减关系,这与文献中的关系式十分吻合。同时考虑了壁面温度对气泡生长及脱

离的影响,发现壁面温度的升高会增大气泡在脱离壁面时断裂颈部与壁面之间的距离,而且气泡的脱离直径也会随着壁面温度的增加而增大。最后考虑了成核点间距离对气泡生长及脱离的影响,发现增加两成核点间距离会使气泡的脱离直径出现先减小而后增大的现象。其模拟结果具有一定的意义,对介观尺度下气液相变现象的模拟仿真有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 曾建邦,李隆键,廖全,等. 池沸腾中气泡生长过程的格子 Boltzmann 方法模拟[J]. 物理学报,2011,60(6):520-529.
- [2] 何航行. 两相流动及沸腾过程气泡动态特性的多尺度模拟研究[D]. 重庆:重庆大学,2016:1.
- [3] 何雅玲,王勇,李庆. 格子 Boltzmann 方法的理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2009:2-9.
- [4] 穆罕默德·阿卜杜勒马吉德. 格子玻尔兹曼方法:基础与工程应用[M]. 杨大勇,译. 北京:电子工业出版社,2015:3.
- [5] SHAN Xiaowen, CHEN Hudong. Lattice Boltzmann model for simulating flows with multiple phases and components[J]. Physical review E,1993,47(3):1815-1819.
- [6] HAZI G, MARKUS A. On the bubble departure diameter and release frequency based on numerical simulation results[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2009,52(5/6):1472-1480.
- [7] FRITZ W. Maximum volume of vapour bubbles[J]. Physik Zeitschr, 1935,36:379-384.
- [8] MARKUS A, HAZI G. Numerical simulation of the detachment of bubbles from a rough surface at microscale level [J]. Nuclear Engineering & Design,2012,248(1):263-269.
- [9] 赵凯,李强,宣益民. 相变过程的格子 Boltzmann 方法模拟[J]. 计算物理,2008,25(2):151-156.
- [10] GONG Shuai, CHENG Ping. A lattice Boltzmann method for simulation of liquid - vapor phase-change heat transfer [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2012,55(17/18):4923-4927.
- [11] SUN Tingzhen, GUI Nan, YANG Xingtuan, et al. Numerical study of patterns and influencing factors on flow boiling in vertical tubes by thermal LBM simulation[J]. International Communications in Heat & Mass Transfer,2017,86:32-41.
- [12] GONG W, YAN Y Y, CHEN S, et al. A modified phase change pseudopotential lattice Boltzmann model[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2018,125:323-329.
- [13] LI Q, LUO K H, KANG Q, et al. Lattice Boltzmann methods for multiphase flow and phase-change heat transfer [J]. Progress in Energy & Combustion Science,2016, 52:62-105.
- [14] LI Jian, HONG Fangjun, XIE Rongjian, et al. Pore scale simulation of evaporation in a porous wick of a loop heat pipe flat evaporator using Lattice Boltzmann method[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2019,102:22-33.
- [15] LIU Malin, YU Zhao, WANG Tiefeng, et al. A modified pseudopotential for a lattice Boltzmann simulation of bubbly flow [J]. Chemical Engineering Science,2010,65(20):5615-5623.
- [16] CHEN Hangyu, ZHANG Jinya, Zhang Yongxue, et al. Simulation on a gravity-driven dripping of droplet into micro-channels using the lattice Boltzmann method[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2018,126:61-71.
- [17] MARTYS N S, CHEN Hudong. Simulation of multicomponent fluids in complex three-dimensional geometries by the lattice Boltzmann method[J]. Physical Review E,1996, 53(1):743-750.
- [18] ZOU Qisu, HE Xiaoyi. On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model[J]. Physics of Fluids,1997,9(6):1591-1598.
- [19] GORENFLO D, KNABE V, BIELING V. Bubble density on surfaces with nucleate boiling-it's influence on heat transfer and burnout heat fluxes at elevated saturation pressures [C]//Proceedings of 8th International Heat Transfer Conference. San Francisco: World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 1986: 1995-2000.
- [20] GOLORIN V S, KOL' CHUGIN B A, ZAKHAROVA E A. Investigation of the mechanism of nucleate boiling of ethyl alcohol and benzene by means of high-speed motion-picture photography [J]. Heat Transfer Research,1978,10:79-98.
- [5] KIM G D, LOH B G. Characteristics of chip formation in micro V-grooving using elliptical vibration cutting [J]. Journal of Micromechanics & Microengineering,2007,17(8):1458-1466.
- [6] NEGISHI N. Elliptical vibration assisted machining with single crystal diamond tools[EB/OL]. [2020-2-10]. <https://repository.lib.ncsu.edu/handle/1840.16/650>.
- [7] 于海鹏. 基于有限元法的椭圆振动切削机理研究[D]. 北京:北京化工大学,2014:71-72.
- [8] 赵绍昕. 椭圆振动切削机理的研究[D]. 长春:吉林大学,2012:61-62.
- [9] 管亮. 椭圆振动切削切屑形成及其对切削过程影响的研究[D]. 长春:长春工业大学,2018:67-68.
- [10] 于金有. 高锰钢超声振动车削的仿真研究[D]. 大连:大连交通大学,2013:54-55.
- [11] SHAMOTO E, SUZUKI N, HINO R. Analysis of 3D elliptical vibration cutting with thin shear plane model [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology,2008, 57(1):57.
- [12] ZHANG X Q, KUMAR A S, RAHMAN M, et al. An analytical force model for orthogonal elliptical vibration cutting technique [J]. Journal of Manufacturing Processes,2012,14(3):378-387.
- [13] Hibbit, Karlsson & Sorensen INC. ABAQUS/Standard 有限元软件入门指南[M]. 朱以文,蔡元奇,译. 武汉:武汉大学,2003.
- [14] 朱文明. 高速切削 Ti6Al4V 切屑形成仿真研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2007:32-33.
- [15] LESUER D R. Experimental investigations of material models for Ti-6Al-4V titanium and 2024-T3 aluminum [EB/OL]. [2020-2-10]. <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/ar00-25.pdf>.

(上接第31页)