

求解两相蒸发和冷凝问题的气液相变模型

孙东亮¹, 徐进良², 王丽²

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 102206, 北京;

2. 华北电力大学低品位能源多相流与传热北京市重点实验室, 102206, 北京)

摘要: 为了更精确简单地求解两相流中的蒸发和冷凝问题, 基于 FLUENT 中的流体体积 (VOF) 方法提出了一种气液相变模型, 该模型适应于两相中一相为非饱和相, 即处于过热或过冷状态, 另一相为饱和相, 即处于饱和状态. 该气液相变模型中: 非饱和相导热系数和比热容为真实的物性参数; 假设饱和相导热系数等于 0, 饱和相比热容等于非饱和相比热容; 界面处相变率仅由非饱和相决定. 最后, 通过一维 Stefan 问题相界面位置的分析解和二维膜态沸腾气相体积比的精确解, 验证了该相变模型的精确性和可行性. 文中工作为该相变模型的推广应用奠定了基础.

关键词: 两相流; 气液相变模型; 流体体积方法

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)07-0007-05

A Vapor-Liquid Phase Change Model for Two-Phase Boiling and Condensation

SUN Dongliang¹, XU Jinliang², WANG Li²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Beijing Key Laboratory of Multi-Phase flow and Heat Transfer of Low-Grade Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A vapor-liquid phase change model on the basis of the volume of fluid (VOF) method in FLUENT was proposed to solve the two-phase boiling or condensation problems. This model is suitable for the case where one is unsaturated phase and the other is saturated phase. In the model proposed here, the unsaturated-phase thermal conductivity and specific heat are actual physical parameters; the saturated-phase thermal conductivity is assumed to be zero and the saturated-phase specific heat is assumed to equal the unsaturated-phase specific heat; the interfacial mass-transfer rate is determined only by the unsaturated phase. In addition, our phase change model was verified by the analytical solutions of the one-dimensional Stefan problem and the accurate results of the two-dimensional boiling problem. The work will lay a foundation for the application of this model.

Keywords: two-phase flow; vapor-liquid phase change model; volume of fluid method

模拟气液两相流动与传热的数值方法主要分为颗粒轨道模型、双流体模型和运动界面追踪技术, 其中运动界面追踪技术最能准确、全面地反映气液两相相间的信息. 目前, FLUENT 是最广泛使用的数值

模拟软件, 它采用流体体积 (VOF) 方法追踪相间的运动界面, 但该方法仍缺乏准确的气液相变模型, 无法准确模拟相间的蒸发和冷凝现象.

在已有的相变模型中, Lee^[1]提出的模型得到了

收稿日期: 2011-11-17. 作者简介: 孙东亮(1977—), 男, 博士, 副教授; 徐进良(通信作者), 男, 教授. 基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51106049); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB710703); 北京市自然科学基金资助项目(3112022); 河北省自然科学基金资助项目(E2011502057).

网络出版时间: 2012-05-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120511.1144.002.html>

最广泛的应用,其具体表达式为

蒸发过程

$$\dot{m}_g = -\dot{m}_l = r\alpha_l\rho_l \frac{T - T_{\text{sat}}}{T_{\text{sat}}}, \quad T > T_{\text{sat}} \quad (1)$$

冷凝过程

$$\dot{m}_l = -\dot{m}_g = r\alpha_g\rho_g \frac{T_{\text{sat}} - T}{T_{\text{sat}}}, \quad T < T_{\text{sat}} \quad (2)$$

式中: $\dot{m}_g$ 和 $\dot{m}_l$ 分别为气相和液相的相变率, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; r 为控制相变强度的因子,该变量的设定依据为使包含相界面的计算网格的温度值维持在饱和温度,针对不同问题该变量具有不同的取值. De Schepper 等^[2]采用该模型对换热管内的沸腾过程进行了模拟, r 设为 0.1 s^{-1} ; Alizadehdakhel 等^[3]对热管内的蒸发冷凝现象进行了计算, r 也设为 0.1 s^{-1} ; 文献[4-5]中 r 均设为 100 s^{-1} .

在蒸发和冷凝问题中,相界面温度通常设定为饱和温度 T_{sat} . 根据傅里叶定律,可计算出相界面两侧热流密度的界跃值

$$\| \mathbf{q}_s \| = \left[\left(-\lambda_l \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_l \right) - \left(-\lambda_g \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_g \right) \right] \mathbf{n} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{n}$ 为相界面单位法线矢量,方向指向气体侧.

文献[6]根据式(3)推导出了以下相变模型

$$\dot{m}_g = -\dot{m}_l = \frac{(\alpha_g \lambda_g + \alpha_l \lambda_l)(\nabla \alpha_l \cdot \nabla T)}{h_{\text{fg}}} \quad (4)$$

由于推导过程的假设不合理,导致在部分问题中该模型的计算结果与实际物理过程具有较大的偏差. 例如在一维 Stenfan 问题中,界面位置随时间的变化规律与液体的导热系数 λ_l 无关,具体见其分析解表达式(28),而在式(4)中却包含了 λ_l 的信息,导致模拟结果与 λ_l 具有相关性.

目前,许多作者^[7-8]基于 VOF 方法开发了求解相变问题的程序代码,这些方法的核心内容就是如何精确求解相界面两侧的热流密度,即式(3)中的 $-\lambda_l \partial T / \partial n|_l$ 和 $-\lambda_g \partial T / \partial n|_g$. 虽然这些方法可以精确地模拟蒸发和冷凝问题,但求解过程较为复杂,需要获取相界面位置和相界面附近网格的信息,很难在 FLUENT 中推广.

本文基于 FLUENT 中的 VOF 方法,提出了一种求解两相蒸发和冷凝问题的精确简单的气液相变模型,该模型适应于两相中一相为非饱和相,即处于过热或过冷状态,另一相为饱和相,即处于饱和状态. 本文还通过两个经典的相变问题验证了该相变模型的精确性和可行性,表明该模型可应用于微通道内的蒸发和冷凝问题.

1 控制方程

VOF 方法是 Hirt 等^[9]在 1981 年首先提出的,它引入了流体体积分数的概念,各相流体体积分之和等于 1,即

$$\alpha_s + \alpha_{\text{uns}} = 1 \quad (5)$$

式中:下标 s, uns 分别代表饱和相、非饱和相.

饱和相与非饱和相体积分数的控制方程为

$$\frac{\partial \alpha_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \alpha_s) = \frac{\dot{m}_s}{\rho_s} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \alpha_{\text{uns}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \alpha_{\text{uns}}) = \frac{\dot{m}_{\text{uns}}}{\rho_{\text{uns}}} \quad (7)$$

式中: $\dot{m}_s = -\dot{m}_{\text{uns}}$.

动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{\text{vol}} \quad (8)$$

其中

$$\rho = \rho_s \alpha_s + \rho_{\text{uns}} \alpha_{\text{uns}} \quad (9)$$

$$\mu = \mu_s \alpha_s + \mu_{\text{uns}} \alpha_{\text{uns}} \quad (10)$$

表面张力为表面力,通过 CSF(Continuum Surface Force)模型^[10]可将表面力转化为体积力

$$\mathbf{F}_{\text{vol}} = \sigma \frac{\alpha_s \rho_s \kappa_s \nabla \alpha_s + \alpha_{\text{uns}} \rho_{\text{uns}} \kappa_{\text{uns}} \nabla \alpha_{\text{uns}}}{0.5(\rho_s + \rho_{\text{uns}})} \quad (11)$$

式中: σ 为表面张力系数;界面曲率

$$\kappa_s = -\kappa_{\text{uns}} = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \alpha_s}{|\nabla \alpha_s|} \right) \quad (12)$$

能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_h \quad (13)$$

其中

$$h = \frac{\alpha_s \rho_s h_s + \alpha_{\text{uns}} \rho_{\text{uns}} h_{\text{uns}}}{\alpha_s \rho_s + \alpha_{\text{uns}} \rho_{\text{uns}}} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} h_s &= C_{p,s}(T - 298.15) \\ h_{\text{uns}} &= C_{p,\text{uns}}(T - 298.15) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\lambda = \lambda_s \alpha_s + \lambda_{\text{uns}} \alpha_{\text{uns}} \quad (16)$$

$$S_h = \begin{cases} -\dot{m}_s h_{\text{fg}} & \text{饱和相为气相} \\ \dot{m}_s h_{\text{fg}} & \text{饱和相为液相} \end{cases} \quad (17)$$

式中: h_{fg} 为汽化潜热.

2 相变模型的构建

该相变模型主要包括以下 3 部分.

(1) 非饱和相导热系数 λ_{uns} 和比热容 $C_{p,\text{uns}}$ 为真实的物性参数.

(2) 假设饱和相导热系数 $\lambda_s = 0$, 比热容 $C_{p,s} =$

$C_{p,uns}$, 饱和相各点温度相等, 不存在导热, 因此饱和相导热系数的大小对结果没有影响. 本模型从数值计算角度出发, 强制设定 $\lambda_s = 0$, 从而可以强制保证饱和相内温度保持不变. 同时, 饱和相温度保持不变, $C_{p,s}$ 的大小对计算结果不产生影响, 因此为了计算方便, 本模型设定 $C_{p,s} = C_{p,uns}$.

(3) 求解界面处相变率 $\dot{m}$. 该模型针对一相为非饱和相、另一相为饱和相的情况, 故式(3)可写成

$$\| \mathbf{q}_s \| = \left(-\lambda_{uns} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{uns} \right) \mathbf{n} \quad (18)$$

式中: $\| \mathbf{q}_s \|$ 为相界面上热流密度界跃值, W/m^2 ; $\mathbf{n}$ 指向饱和相侧.

与将表面张力由表面力转化为体积力的 CSF 模型相似, 将表面上的 $\| \mathbf{q}_s \|$ 转化为相界面两侧有限宽度内单位体积的热量值 q_v , 即

$$\| \mathbf{q}_s \| = \int_{-L}^L q_v d\mathbf{l} \quad (19)$$

式中: L 表示相界面两侧有限宽度值, m ; q_v 表示单位体积的热量值, W/m^3 . 假设相界面附近非饱和相温度呈线性分布, 则可构建出

$$q_v = 2\lambda_{uns} (\nabla \alpha_{uns} \cdot \nabla T) \quad (20)$$

以下基于图 1 证明式(20)的合理性. 根据式(20), 得出在网格点 i 处

$$q_{v,i} = 2\lambda_{uns} (\nabla \alpha_{uns,i} \cdot \nabla T_i) = 2\lambda_{uns} \left(\frac{\partial \alpha_{uns}}{\partial x} \right)_i \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_i \quad (21)$$

其中

$$\left(\frac{\partial \alpha_{uns}}{\partial x} \right)_i = \frac{\alpha_{uns,i+1} - \alpha_{uns,i-1}}{2\delta x} = -\frac{1}{2\delta x} \quad (22)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_i = \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2\delta x} =$$

$$\frac{T_{sat} - T_{i-1}}{2\delta x} = \frac{1.5\delta x}{2\delta x} \frac{T_{sat} - T_{i-1}}{1.5\delta x} = \frac{3}{4} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{uns} \quad (23)$$

将式(22)、(23)代入式(21), 得出

$$q_{v,i} = \frac{3}{4\delta x} \left(-\lambda_{uns} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{uns} \right) \quad (24)$$

同理, 可得出在网格点 $i+1$ 处

$$q_{v,i+1} = \frac{1}{4\delta x} \left(-\lambda_{uns} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{uns} \right) \quad (25)$$

将式(24)、(25)代入式(19)的右侧, 得出

$$\int_{-L}^L q_v d\mathbf{l} = (q_{v,i}\delta x + q_{v,i+1}\delta x) \mathbf{n} = \left(-\lambda_i \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{uns} \right) \mathbf{n} = \| \mathbf{q}_s \| \quad (26)$$

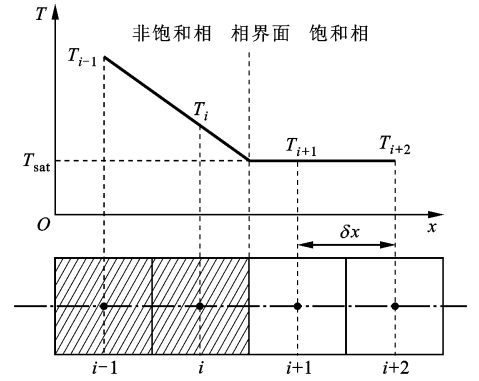


图 1 相界面、饱和相、非饱和相及温度分布示意图
通过式(21)~(26), 即可验证式(20)的合理性.

最后, 基于式(20), 可以得出界面处的相变率

$$\dot{m}_s = -\dot{m}_{uns} = \frac{2\lambda_{uns} (\nabla \alpha_{uns} \cdot \nabla T)}{h_{fg}} \quad (27)$$

3 相变模型的应用及验证

将本文提出的气液相变模型应用于一维 Stefan 问题和二维膜态沸腾问题, 以验证模型的精确性和可行性, 其中采用 Youngs 的 PLIC 方法捕捉相界面, 采用 SIMPLE 算法对速度和压力进行耦合求解.

3.1 一维 Stefan 问题

一维 Stefan 问题是带有相变的两相流动的经典问题, 如图 2 所示. 当给气体侧的固体壁面上施加一个较高的温度边界条件时, 气体侧就会产生温度梯度, 热量向液体部分传递, 由于液体部分已经处于饱和状态, 因此传递到液体部分的热量会使得液体部分开始气化, 在相界面处产生相变. 该问题相界面位置 $\delta(t)$ 的分析解^[11]为

$$\delta(t) = 2\epsilon \left(\frac{\lambda_g t}{\rho_g C_{p,g}} \right)^{1/2} \quad (28)$$

式中: ϵ 是一个超越方程的解, 该超越方程为

$$\epsilon \exp(\epsilon^2) \text{erf}(\epsilon) = \frac{C_{p,g} (T_w - T_{sat})}{L\pi^{1/2}} \quad (29)$$

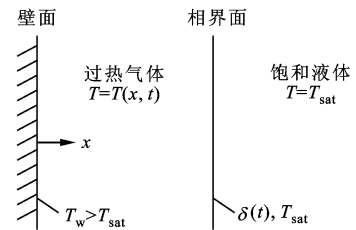


图 2 一维 Stefan 问题示意图

该问题中非饱和相为过热气体, $\rho_g = 0.001, 0.01, 0.1 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\lambda_g = 0.005 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $C_{p,g} = 200 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 饱和相为饱和液体, $\rho_l = 1 \text{ kg}/\text{m}^3$, 根据

本文提出的模型,假设 $\lambda_l=0$, $C_{p,l}=C_{p,g}=200\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; $h_{fg}=10\text{ kJ}/\text{kg}$,壁面温度与饱和温度的差值 $\Delta T=T_w-T_{\text{sat}}=10\text{ K}$.

通过网格独立性考核,选取宽度为 0.001 m 的网格进行计算,时间步长为 $1\times 10^{-4}\text{ s}$.图3给出了一维Stefan问题中不同密度比率下气液界面位置随时间的变化曲线,从图中可以看出,本文相变模型的模拟结果与分析解相一致,验证了模型的精确性和可行性.

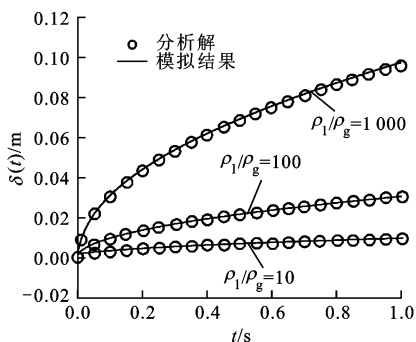


图3 相界面位置随时间的变化

3.2 二维膜态沸腾

图4给出了二维膜态沸腾示意图.该问题中非饱和相为过热气体, $\rho_g=5\text{ kg}/\text{m}^3$,动力黏度 $\mu_g=0.005\text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\lambda_g=1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $C_{p,g}=200\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;饱和相为饱和液体, $\rho_l=200\text{ kg}/\text{m}^3$, $\mu_l=0.1\text{ Pa}\cdot\text{s}$,根据本文提出的模型,假设 $\lambda_l=0$, $C_{p,l}=C_{p,g}=200\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $h_{fg}=10\text{ kJ}/\text{kg}$; $\sigma=0.1\text{ N}/\text{m}$, $g=9.81\text{ m}/\text{s}^2$.图4中 λ_0 为Taylor不稳定性波长

$$\lambda_0 = 2\pi \left(\frac{3\sigma}{(\rho_l - \rho_g)g} \right)^{1/2} \quad (30)$$

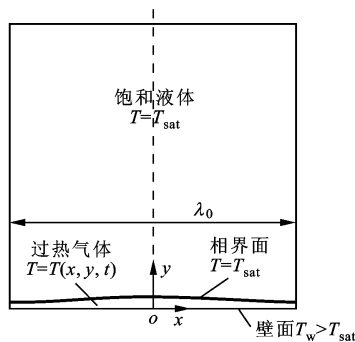


图4 二维膜态沸腾示意图

由于流动结构的对称性,本文选取一半区域作为计算区域,宽度为 $\lambda_0/2$,高度为 λ_0 .边界条件:底部壁面速度为无滑移边界条件,温度为定壁温边界条件,壁面温度比饱和温度高 5 K ,即 $\Delta T=T_w-T_{\text{sat}}=5\text{ K}$;左右均为对称边界条件;上部为压力出口边界条件.初始条件:速度初始条件为 $u=v=0\text{ m}/\text{s}$;液体侧初始温度为饱和温度,气体侧初始温度分布为沿着气液界面到底部壁面呈线性分布;初始气液界面位置为

$$y = \frac{\lambda_0}{128} \left(4.0 + \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \right) \quad (31)$$

通过网格独立性考核,计算区域网格数选为 32×64 ,同时相界面附近进行局部加密,最小网格为初始网格的 $1/4$,时间步长为 $1\times 10^{-5}\text{ s}$.

图5显示了初始气泡形成过程中不同时刻的气

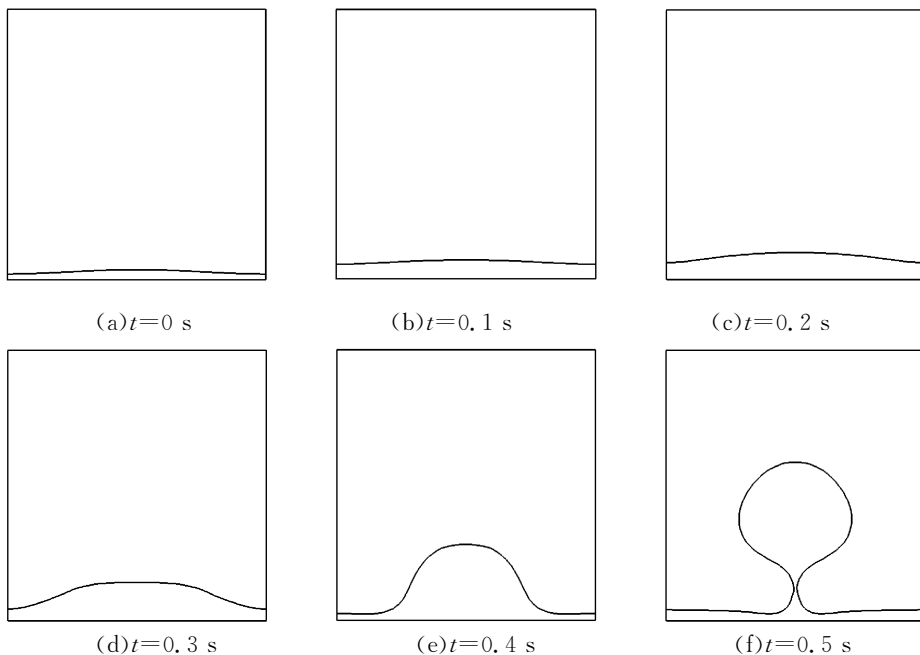


图5 不同时刻相界面分布图

液界面分布. 图 6 给出了该过程中气相体积比(当前时刻的气相体积/初始时刻的气相体积)随时间变化的曲线.

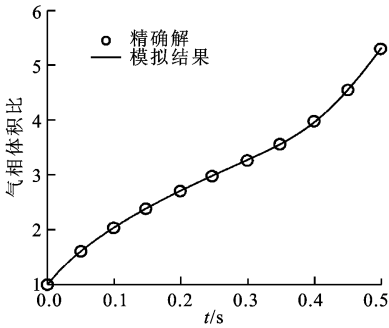


图 6 气相体积比随时间的变化

图 6 中精确解为 Guo 等^[8]基于自己开发的程序代码得出的计算结果,从图中可以看出,本文相变模型的模拟结果与精确解完全吻合,进一步验证了模型的精确性和可行性.

4 结 论

本文基于 FLUENT 中的 VOF 方法,提出了一种求解两相蒸发和冷凝问题的精确简单的气液相变模型,并通过一维 Stefan 问题和二维膜态沸腾问题验证了该模型的精确性和可行性. 该气液相变模型主要针对两相中一相为非饱和相、另一相为饱和相的情况,主要包括以下 3 部分:

(1)非饱和相导热系数 λ_{uns} 和比热容 $C_{p,uns}$ 为真实的物性参数;

(2)假设饱和相导热系数 $\lambda_s=0$,比热容 $C_{p,s}=C_{p,uns}$;

(3)界面处相变率

$$\dot{m}_s = -\dot{m}_{uns} = 2\lambda_{uns}(\nabla\alpha_{uns} \cdot \nabla T)/h_{fg}$$

在该气液相变模型的基础上,作者正在开发可以应用于两相同时处于非饱和状态的相变模型,以进一步扩大模型的应用范围.

参考文献:

[1] LEE W H. A pressure iteration scheme for two-phase

flow modeling [M]. Washington, USA: Hemisphere Publishing, 1980.

[2] DE SCHEPPER S C K, HEYNDRICHX G J, MARIN G B. 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.

[3] ALIZADEHDAKHEL A, RAHIMI M, ALSAIRAFI A A. CFD modeling of flow and heat transfer in a thermosyphon [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, 37 (3): 312-318.

[4] 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, 2008, 51 (5/6): 1003-1016

[5] FANG C, DAVID M, ROGACS A, 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.

[6] 毛文彬. 微流控系统中混合及汽液相变传热的数值模拟 [D]. 广州: 中国科学院广州能源研究所, 2009.

[7] WELCH S W J, WILSON J. A volume of fluid based method for fluid flows with phase change [J]. Journal of Computational Physics, 2000, 160 (2): 662-682.

[8] 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 VOSET method [J]. Numerical Heat Transfer; Part A, 2011, 59 (11): 857-881.

[9] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundary [J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39 (1): 201-225.

[10] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension [J]. Journal of Computational Physics, 1992, 100 (2): 335-354.

[11] ALEXIADES V, SOLOMON A D. Mathematical modeling of melting and freezing processes [M]. Washington, USA: Hemisphere Publishing, 1993.

(编辑 荆树蓉)