

含不凝气蒸汽气泡凝结过程的数值模拟

王效嘉, 田茂诚, 唐亮亮, 张冠敏

(山东大学能动学院热科学研究所, 济南, 250061, Email: Wangxj95@mail.sdu.edu.cn)

摘要: 该数值模拟通过建立二维旋转轴对称模型研究了含不凝气的蒸汽气泡的凝结过程。使用 PID 算法对传统 Lee 相变模型中的相变系数进行调节, 拟合得到相变系数的取值公式, 并通过 UDF 在计算过程中加入自编相变换热模型, 同时记录冷凝过程各项参数, 对气泡的相变换热过程进行研究, 并与实验数据的对比验证了该模型的可靠性。模拟结果表明: 气泡内部的蒸汽浓度分布是不均匀的, 不凝气体在气泡冷凝过程中聚集在气-液界面处, 影响蒸汽的冷凝换热。

关键词: 数值模拟; 气泡; 凝结换热; 混合气体; UDF

1 引言

Lee 模型^[1]是个基于物理基础的相变模型, 在 Lee 模型中, 液体-气体传质 (蒸发冷凝) 过程由气体传输方程控制:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \bar{V}_v) = \dot{m}_{lv} - \dot{m}_{vl} \quad (1)$$

正如方程 (1) 所示, Fluent 将正向传质定义为液体到蒸汽的蒸发-冷凝问题, 基于不同的温度状态, 蒸发和冷凝状态的传质模型分别可描述如下:

$$\dot{m}_{lv} = \text{coeff} \times \alpha_l \rho_l \frac{(T_l - T_{sat})}{T_{sat}} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{vl} = \text{coeff} \times \alpha_v \rho_v \frac{(T_{sat} - T_v)}{T_{sat}} \quad (3)$$

式中传质系数 coeff 可定义为:

$$\text{coeff} = \frac{6}{d_b} \beta \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_{sat}}} L\left(\frac{\alpha_v \rho_v}{\rho_l - \rho_v}\right) \quad (4)$$

由式 (4) 可以看出, Lee 模型^[1]的运算过程不仅需要得到网格单元的温度、物性和相体

积分外, 还需要定义系数 coeff 。由于式中 d_b 为索特平均直径 (Sauter mean diameter) 难以确定, 从而 coeff 难以确定, 在实际的使用过程中, 其值常作为经验常数 (指定为 $0.1 \times 10^6 \sim 5 \times 10^6$)。需要针对具体工程选取不同值。

2 模型改进与验证

PID 算法是一种控制调节方法, 具有算法简单、可靠性高和鲁棒性好等优点, 在很多领域可以用来对参数进行整定和控制过程量。PID 可以根据设定值 $r(t)$ 与实际的输出值 $c(t)$ 之间的差值:

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (5)$$

并将 $e(t)$ 的比例、积分和微分进行组合构成控制方程, 对被控对象进行控制。其公式为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (6)$$

PID 算法调节分为比例控制、微分调节及积分调节三个部分, 为方便计算机编程, 需要将公式 (6) 进行离散^[2]后简化为位置式 PID, 进一步转化为增量式 PID 控制算法后进行合并得到可用于 Fluent 的 UDF 编程代码的公式如下:

$$\Delta u(t) = A \cdot e(k) - B \cdot e(k-1) + C \cdot e(k-2) \quad (7)$$

已有大量学者对于蒸汽气泡冷凝换热进行了实验研究, 并通过高速摄像和图像处理得到气泡冷凝换热系数, 总结了 Nusselt 数实验关联式。根据 Kim^[3]对几种 Nusselt 数关联式的对比, 考虑到精确性、适用性和是否存在实验数据, 本研究选取 Kim 的公式对 coeff 进行训练:

$$Nu_c = 0.2575 Re_b^{0.7} Pr^{-0.4564} Ja^{0.2043} \quad (8)$$

具体操作步骤如图 1 所示。计算的过程中, 气泡的直径和平均速度通过下式定义:

$$D_b = \sqrt[3]{\frac{6V_b}{\pi}} \quad (9)$$

$$v_b = \frac{\sum_i v_{g,i} \rho_{g,i} \alpha_{g,i} V_i}{\sum_i \rho_{g,i} \alpha_{g,i} V_i} \quad (10)$$

为计算实际换热系数, 需将质量变化率 ΔM 带入下式:

$$h = \frac{\Delta M (h_s - h_w)}{A_b (T_b - T_w)} \quad (11)$$

图 2 显示了采用 PID 调节相变系数 coeff 的数值模拟中, 气泡冷凝过程的 Nusselt 数和采用 Kim 关联式^[3]计算的 Nusselt 数的对比。可以看出采用 PID 调节相变系数可以使气泡冷凝过程与关联式计算的过程保持一致。假设 coeff 与气泡当前直径、气泡速度相关, 认为存在 $\text{coeff} = f(D_b, v_b)$ 。因此选取计算工况中随机时间点的 coeff 、 D_b 、 v_b 数据, 在 MATLAB 中进

行关联式拟合，得到以下 coeff 关联式：

$$coeff = -2266 + 7626v_b^{0.4528} D_b^{-0.366} \quad (12)$$

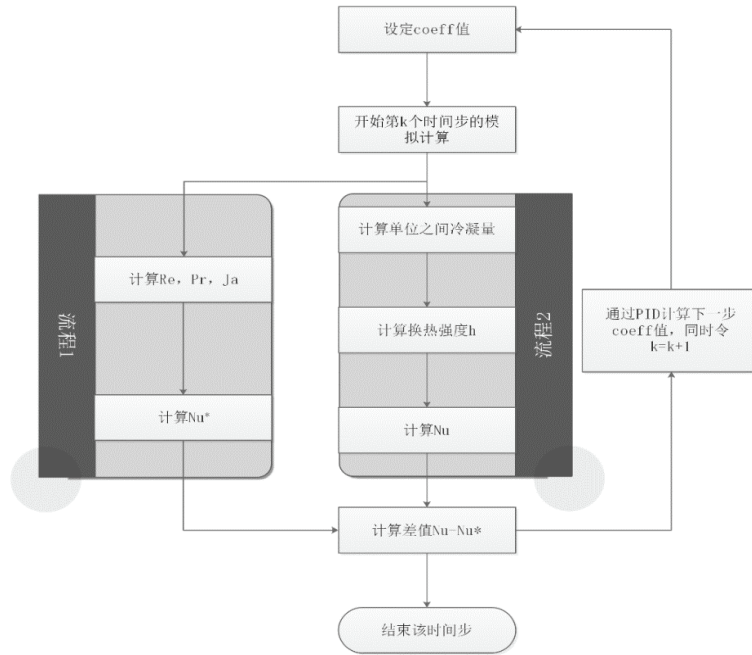


图1 coeff 值调整流程

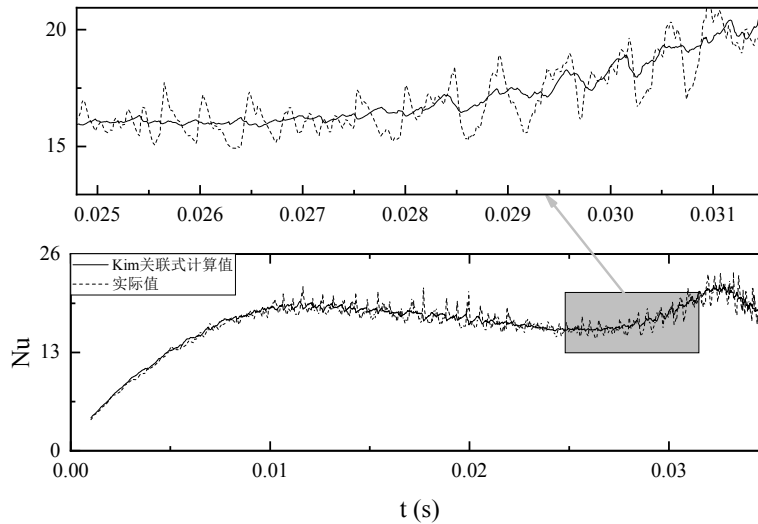


图2 Nusselt 数实际值与计算值

假设气泡的上升过程为二维轴对称过程，将三维模型简化为二维旋转轴对称模型。采用结构化网格对计算域进行划分，计算域的大小为 $D_0 \times 6D_0$ ，其中 D_0 为气泡初始尺寸。采用了 6 种网格尺寸进行无关性验证。在初始化后，气泡分别包含了 337、629、987、1416、1922 和 2513 个网格单元，最终选取的气泡网格数为 1416。为验证判断采用改进的 Lee 模型对含不凝气气泡冷凝过程模拟的准确性，选取 $Qu^{[4]}$ 实验采用的实验工况进行数值模拟，分析选用模型的准确性。经过数值模拟得到的气泡大小随时间变化的曲线与实验结果的对比如图 3 所示。由图 3 可以看出不同工况的实验结果和模拟结果的趋势一致，偏差不大，验证了使用改进型 Lee 模型预测含不凝气气泡冷凝过程方案的可行性。

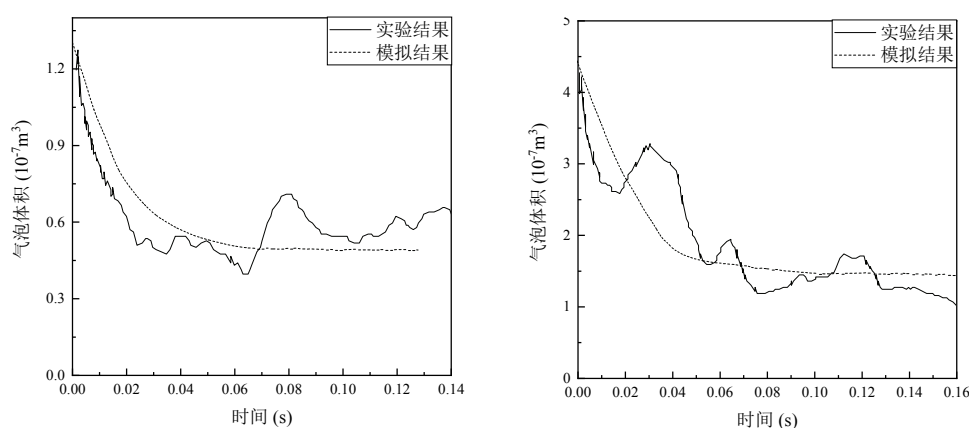


图 3 气泡直径变化

3 结论

由于不凝气体的加入，气泡前期的体积收缩速率较后期快，后期气泡大小已无明显变化，说明气泡内部不凝气在该温度下已达到饱和。气泡位置随时间保持上升趋势，气泡速度也会由于形状的改变发生变化。为观察气泡上升过程中内部不凝气体质量分布的情况，采用图 4 表示气泡冷凝过程中各个时刻的空气含量云图。冷凝伊始，气泡由静止状态开始向上运动，气-液界面处的质量源项基本相同，不凝气按照距离气-液界面的距离分布，气-液界面附近处不凝气含量都较高。发展阶段气泡底部冷凝量较大，导致气泡底部不凝气含量增加，随着气泡形状逐渐变为扁球状，气泡两翼处不凝气含量增加，可能是由于气泡呈扁球状时，两翼微循环效果较强，气-液界面处冷凝速率较大。冷凝后期气泡内部各处不凝气均达到该温度下饱和浓度，不再发生冷凝。

图 5 为含不凝气体蒸汽气泡冷凝过程中气泡轮廓变化和气-液界面的传质速率极坐标图。可以看出冷凝初期，含不凝气的气泡冷凝速率相对纯蒸汽气泡冷凝速率较小，但差别不大。随着冷凝过程的进行，气泡内不凝气体含量提高，同时由图 4 可看出，不凝气主要聚集在气-液界面附近，这也使浓度较高的蒸汽需通过扩散作用接近液体侧并与之发生传热传

质，以上原因致使气液交界处传质速率逐渐降低，直至 60 ms 后基本不发生冷凝，气泡内部不凝气质量分数达到该温度下饱和浓度。进一步体现了不凝气对蒸汽气泡冷凝的阻碍效果。



图4 气泡内空气质量分数云图

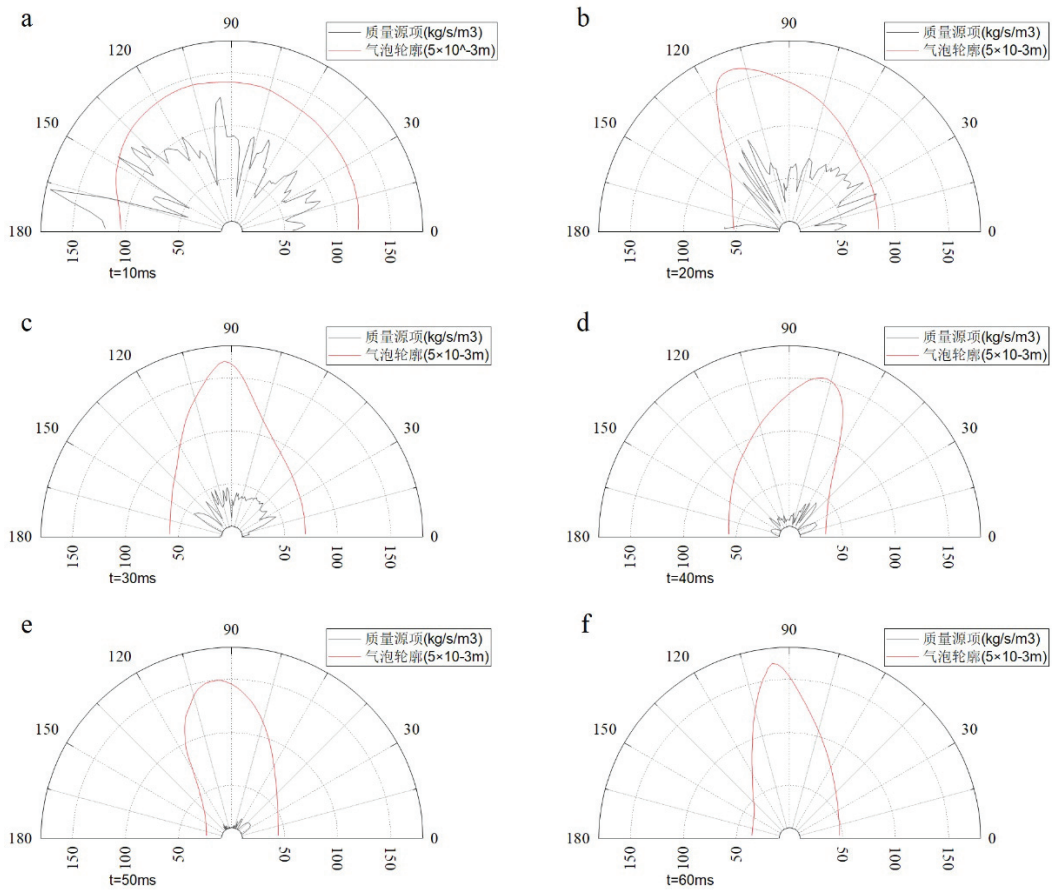


图5 气-液界面传质速率极坐标

参 考 文 献

- 1 Wen H L. A Pressure Iteration Scheme for Two-Phase Flow Modeling. 1980b, 61-82.
- 2 陶永华. 新型PID控制及其应用. 北京: 机械工业出版社, 2002: 59-61.
- 3 Kemei S, Hirata M. Study on condensation of a single vapor bubble into subcooled water-Part 2; Experimental analysis. Studio Vista. 1990, 1-10.
- 4 Qu X, Tian M, Zhang G, Leng X. Experimental and numerical investigations on the air-steam mixture bubble condensation characteristics in stagnant cool water. Nucl. Eng. Des., 2015, 285: 188-196
- 5 Kim S J, Park G C. Interfacial heat transfer of condensing bubble in subcooled boiling flow at low pressure. Int. J. Heat Mass Transfer., 2011, 54(13-14): 2962-2974

Numerical study on condensing process of the air-steam mixture bubble

WANG Xiao-jia, TIAN Mao-cheng, TANG Liang-liang, ZHANG Guan-min

(Thermal Sciences Institute in School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan, 250061.

Email: Wangxj95@mail.sdu.edu.cn)

Abstract: A two-dimensional rotational axisymmetric model was developed in this study to analyze the condensing process of air-steam mixture bubble. The PID algorithm was used to adjust Nusselt number by adjusting the phase change coefficient of the Lee model in the bubble condensation process, and the formula of phase change coefficient was obtained by fitting the phase change coefficient during the bubble condensation process. The improved phase change model was added to the calculation process by UDF, and the parameters in the phase change process are recorded to study the heat and mass transfer of bubble during the condensation process. The accuracy of this model was verified by comparison with various types of experimental data. The simulation results showed that the distribution of vapor concentration in bubbles is not uniform, the non-condensation gas accumulates at the gas-liquid interface during the bubble condensation process, which affects the condensation mass and heat transfer of vapor.

Key words: Numerical simulation; Bubble; Condensation heat transfer; UDF