

# 蒸汽 - 冷流体接触冷凝流动的数值模拟

李会雄<sup>1,2</sup> 邓 晟<sup>1</sup> 李良星<sup>1</sup> 陈听宽<sup>1</sup> 王 飞<sup>3</sup>

- (1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049;
2. 中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080;
3. 中国核动力研究设计院空泡物理和自然循环国家级重点实验室, 成都 610041)

**摘 要** 介绍了关于蒸汽 - 冷流体直接接触冷凝流动与传热的数值计算模型与部分研究结果。用 Level Set 方法确定蒸汽 - 冷流体接触界面的位置和形状, 建立了对蒸汽和冷流体普遍适用的动量、能量和质量守恒方程, 在能量和质量守恒方程中增加了部分项用于计算蒸汽冷凝所产生的影响。用有限差分法在交错网格上离散控制方程, 用 Runge-Kutta 法 - 五阶 WENO 组合格式求解 Level Set 输运方程, 用压力修正的迭代 Projection 方法求解动量方程, 而用 SIMPLE 方法求解温度控制方程。对算例的计算结果表明, 本文所建立的数值计算模型能反映物理现象的宏观特性。根据计算结果, 分析了本文模型的优缺点, 并指出了今后改进的方向。

**关键词** 冷凝传热; 两相流; Level Set 方法; 数值模拟; 相界面

**中图分类号:** TK121 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2005)06-0963-04

## NUMERICAL SIMULATION OF FLOWING CONDENSATION OF THE STEAM DIRECTLY CONTACTED WITH SUBCOOLED WATER

LI Hui-Xiong<sup>1,2</sup> DENG Sheng<sup>1</sup> LI Liang-Xing<sup>1</sup> CHEN Ting-Kuan<sup>1</sup> WANG Fei<sup>3</sup>

- (1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. National Micro-Gravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;
3. National Key Laboratory of Bubble Physics and Natural Convection, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

**Abstract** This paper reports a model developed for numerical study of the flowing condensation of steam directly contacted with subcooled water. With the help of a level set method that is employed to determine the position and morphology of the interface between the steam and water, equations that are globally suitable for the governing of momentum, energy and mass conservation of both the steam and water in the whole computation region are established. Special terms are formulated to take into account the effects of the steam condensation on the two-phase flow and heat transfer, and are respectively included in the momentum and energy equations. The governing equations are discretized using the finite difference method on a staggered Cartesian grid system. A 5-order WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) scheme, in combination with a 3-order Runge-Kutta scheme, is adopted to solve the advection equation of the Level Set function, and a pressure-correction projection method is employed to find solutions to the momentum equations of the two-phase flow, while a SIMPLE method is utilized to get temperature fields from the energy equation. Results of numerical tests show that the physical mechanism of the condensation phenomena can be reasonably revealed with the present model and method. Based on the numerical results obtained in the paper, both the merits and shortcomings of the present model are analyzed, and directions for future studies to improve the model are pointed out.

**Key words** steam condensation; gas-liquid two-phase flow; level set method; numerical simulation; interface

收稿日期: 2004-11-25; 修订日期: 2005-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.50106011); 空泡物理和自然循环国防科技重点实验室开放基金项目。

作者简介: 李会雄 (1966-), 男, 陕西眉县人, 西安交通大学教授, 博士生导师, 博士。主要从事多相流动及传热的理论与实验研究以及多相流的数值模拟研究。

## 1 引言

作为冷凝换热的一种特殊情况,冷流体-蒸汽直接接触的流动冷凝在反应堆、化工、低温、能源与动力等工程领域中很常见。蒸汽-冷流体直接接触的冷凝流动换热可能对系统产生不利影响,如诱发蒸汽快速凝结,造成容器中负压;导致管内流动形态(流型)变化,甚至引起反向流动;造成“水击”或对厚壁构件的承压热冲击和热疲劳损坏等<sup>[1~3]</sup>。这种现象的产生与发展对反应堆安全有重要影响。

蒸汽-冷流体的相界面随时间不断变化(生长、变形、破碎、融合等,并产生不同流型),给理论模型的建立和分析带来很大困难。过去对蒸汽的冷凝流动与换热研究主要依赖于试验测量。由于实验手段的制约,过去对蒸汽-冷流体直接接触时界面附近的温度场、速度场及传热与流动的微观特性的研究难以开展,对发生快速相变的过程无法做进一步的了解。

随着计算机技术和科学计算技术的发展,用数值模拟方法研究气-液两相这类复杂流动已逐渐成为可能。<sup>[4~6]</sup>但对于蒸汽-冷流体直接接触冷凝流动问题的数值模拟研究还很少见有报道。本文建立了蒸汽在冷流体表面凝结的数值计算模型,并进行计算,得出了一些有意义的结论。

## 2 物理问题

考虑图 1 所示的二维空间内的蒸汽冷凝问题。蒸汽占据上部的半无限大空间,而冷流体则充满下部半无限大空间;蒸汽的压力、温度、速度、粘性系数、导热系数、比热分别用  $P_G$ 、 $T_G$ 、 $\vec{u}_G$ 、 $\mu_G$ 、 $K_G$ 、 $c_{pG}$  表示,而冷流体的压力、温度、速度、粘性系数、导热系数、比热分别为  $P_L$ 、 $T_L$ 、 $\vec{u}_L$ 、 $\mu_L$ 、 $K_L$ 、 $c_{pL}$ ;蒸汽-冷流体相界面的状态参数为:压力  $P_i$ ,速度为  $\vec{v}_i$ ,温度为  $T_i$ ;蒸汽的饱和温度为  $T_s$ 。由于冷流体温度  $T_L < T_s$ ,蒸汽在相界面上冷凝,并由上部开口边界不断向内补充。

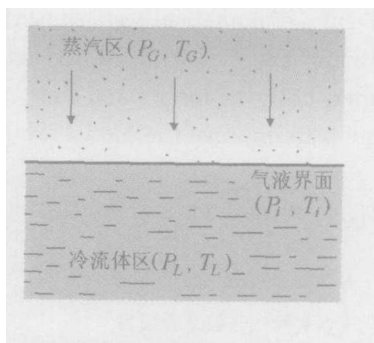


图 1 蒸汽-冷流体直接接触冷凝计算模型

## 3 基本控制方程

### 3.1 Level-Set 函数及其基本方程

如何准确地确定相界面的位置和状态是实现蒸汽-冷流体直接接触冷凝过程数值模拟的关键。本文用 Level Set 方法来实现这一目标。设在计算区域  $\Omega$  中气、液两相占据的区域分别为  $\Omega^1(t)$ 、 $\Omega^2(t)$ ,  $\Gamma(t)$  为气-液两相分界面。定义 Level Set 函数  $\Phi(\vec{x}, t)$ , 使得在任意时刻气-液相界面  $\Gamma(t)$  恰是  $\Phi(\vec{x}, t)$  的零等值面,即要求

$$\Gamma(t) = \{\vec{x} \in \Omega : \Phi(\vec{x}, t) = 0\} \quad (1)$$

同时,要求函数  $\Phi(\vec{x}, t)$  在  $\Gamma(t)$  附近为法向单调。Level Set 函数  $\Phi(\vec{x}, t)$  的变化由下述方程控制

$$\Phi_t + u \cdot \Phi_x + v \cdot \Phi_y = 0 \quad (2)$$

其中,  $u, v$  是主流场速度在  $x, y$  坐标方向上的分量。关于 Level Set 函数及其求解的具体细节可参见文献 [4]。

### 3.2 主流场控制方程组

借助于 Level Set 函数,在 Euler 坐标系中,含有相界面的气-液两相介质流动可用下述 Navier-Stokes 方程统一描述

$$\vec{u}_t + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \vec{F} + \frac{1}{\rho} [-\nabla p + \nabla(\mu \cdot D) + \sigma \cdot \kappa \cdot \delta(\Phi(\vec{x}, t)) \cdot \vec{n}] \quad (3)$$

其中,  $\vec{u}=(u, v)$  是流体速度,  $\rho = \rho(\vec{x}, t)$ 、 $\mu = \mu(\vec{x}, t)$  分别是流体的密度和粘性系数,  $D$  表示粘性应力张量,而  $\vec{F}$  代表体积力。方程 (3) 中的最后一项代表相界面上的表面张力,  $\sigma$  为表面张力系数,  $\kappa$  为相界面曲率,  $\delta$  是 Dirac Delta 函数,  $\vec{n}$  表示相界面上法向朝外的单位向量。规整后的 Delta 函数  $\delta$  被定义为

$$\delta_\epsilon(d) = \begin{cases} [1 + \cos(\pi d/\epsilon)]/(2\epsilon) & \text{if } |d| < \epsilon \\ 0 & \text{if } |d| \geq \epsilon \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\epsilon$  是一个小量规整参数。根据 Level Set 函数  $\Phi$  的分布,可计算相界面曲率  $\kappa$  和法向向量  $\vec{n}$ ,并将表面张力表示为连续函数形式。具体细节可参阅文献 [4]。

### 3.3 温度场控制方程组及相界面温度计算

对图 1 所示的问题,忽略温度对流体密度的影响,假设蒸汽和冷流体具有常物性,则包含相界面上冷凝传热的能量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u c_p T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v c_p T) = \frac{\partial}{\partial x}(K \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K \frac{\partial T}{\partial y}) + S_{\Delta L} \quad (5)$$

其中,  $S_{\Delta L}$  代表由于蒸汽冷凝释放出的潜热对能量方程的贡献, 可表示为

$$S_{\Delta L} = - \left[ \frac{\partial(\rho \cdot \Delta L)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u \cdot \Delta L)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v \cdot \Delta L)}{\partial y} \right] \quad (6)$$

$\Delta L$  表示由冷凝释放的热量。通过 Level Set 函数,  $\Delta L$  可表示成,

$$\Delta L = h_{fg} \cdot [1 - H(\Phi(\vec{x}, t))] \quad (7)$$

其中,  $H$  代表 Heaviside 函数, 被定义为

$$H_\epsilon(d) = \begin{cases} 0 & \text{if } d < -\epsilon, \\ (d+\epsilon)/(2\epsilon) + \sin(\pi d/\epsilon)/(2\pi) & \text{if } |d| \leq \epsilon, \\ 1 & \text{if } d > \epsilon; \end{cases} \quad (8)$$

在有蒸汽冷凝的条件下, 蒸汽-冷流体相界面的速度包括两部分: 一是气-液两相的宏观运动速度, 另一个是由冷凝液的积聚所造成的相界面迁移。因此, 相界面的实际速度应为

$$\vec{u}_i = \vec{u} + \vec{m}/\rho \quad (9)$$

其中,  $\vec{u}_i$  代表相界面速度, 而  $\vec{m}$  表示由于蒸汽冷凝所产生的质量传递通量。根据质量守恒和能量守恒原理可得出  $\vec{m}$  的表达式为

$$\begin{aligned} \vec{m} &= \rho_G \cdot (\vec{u}_i - \vec{u}_G) = \rho_L \cdot (\vec{u}_i - \vec{u}_L) \\ &= -K \cdot \nabla T / h_{fg} \end{aligned} \quad (10)$$

式中,  $h_{fg}$  表示蒸汽的冷凝潜热。在有蒸汽冷凝时, 控制蒸汽-冷流体相界面运动特性的 Level Set 方程应具有下述形式, 即

$$\Phi_t + \vec{u}_i \cdot \nabla \Phi = 0 \quad (11)$$

蒸汽-冷流体接触冷凝的质量守恒方程变化为,

$$\nabla \cdot \vec{u} = v_{fg} \cdot \vec{m} \cdot \nabla H \quad (12)$$

其中,  $v_{fg} = 1/\rho_L - 1/\rho_G$ 。借助 Level Set 函数  $\Phi$ , 蒸汽、冷流体的密度和比热可统一表示为

$$\rho(\vec{x}) = \rho_G + (\rho_L - \rho_G)H_\epsilon(\Phi(\vec{x})) \quad (13)$$

$$c_p(\vec{x}) = c_{pG} + (c_{pL} - c_{pG})H_\epsilon(\Phi(\vec{x})) \quad (14)$$

蒸汽、冷流体的粘性系数和导热系数可表示为

$$[\mu(\vec{x})]^{-1} = \mu_G^{-1} + (\mu_L^{-1} - \mu_G^{-1})H_\epsilon(\Phi(\vec{x})) \quad (15)$$

$$[K(\vec{x})]^{-1} = K_G^{-1} + (K_L^{-1} - K_G^{-1})H_\epsilon(\Phi(\vec{x})) \quad (16)$$

## 4 数值计算方法

本文采用有限差分法求解上述控制方程。用三阶 Runge-Kutta 法-五阶 WENO 组合格式来求解

气-液面输运方程, 用 Projection 方法求解气-液两相的动量控制方程, 而用 SIMPLE 算法求解温度场控制方程, 实现对蒸汽-冷流体直接接触冷凝流动的求解。计算区域为  $0.1 \times 0.1 \text{ m}$  或  $0.2 \times 0.2 \text{ m}$ 。在大部分计算中采用  $100 \times 100$  的均匀计算网格, 部分计算中采用  $200 \times 200$  的网格。在计算区域的上边界上采用开口边界条件, 而其余边界上则采用固体滑移绝热边界条件。求解步骤可参考文献 [4]。

## 5 计算结果分析及讨论

### 5.1 蒸汽-过冷水接触冷凝传热的模拟结果与分析

图 2 至图 4 表示对图 1 所示的蒸汽-冷流体直接接触冷凝流动问题的数值模拟的典型计算结果。计算条件为, 上部蒸汽的初始温度为  $T_G = 100^\circ\text{C}$ , 下部过冷流体的初始温度为  $T_L = 90^\circ\text{C}$ 。汽、液两相的密度、粘性系数、导热系数、比热分别取对应温度下对应介质的物性值 (压力为一个大气压)。液体的对应饱和温度为  $T_s = 100^\circ\text{C}$ , 冷流体的过冷度为  $\Delta T = T_s - T_L = 10^\circ\text{C}$ 。图 2 表示整个计算区域内 (包括蒸汽相、冷流体和接触界面) 的整体速度场分布; 图 3 则表示计算区域内气相、液相的速度场分布, 不包含蒸汽-冷流体相界面的速度; 图 4 则表示仅仅由蒸汽冷凝对气-液相界面的移动速度的贡献。由图 2、图 3 可看出, 由于计算区域的左、右及下边界为绝热固体壁面, 因此, 过冷水的速度始终保持为 0, 而蒸汽相则在整个汽相区具有较高的速度, 形成垂直向下的蒸汽流, 补充由于凝结对蒸汽的消耗。图 4 显示出, 由蒸汽冷凝对气-液相界面移动速度的贡献将使相界面垂直向上迁移。这一结果与蒸汽冷凝的物理图象完全一致。

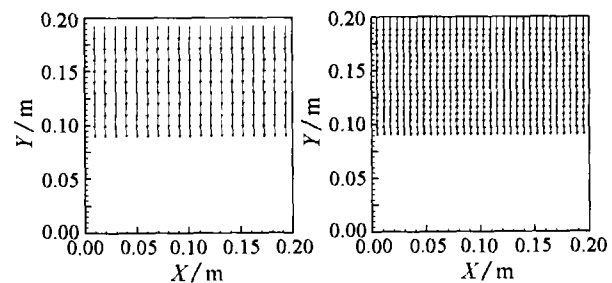


图 2 蒸汽冷凝时的整体速度场分布

图 3 蒸汽冷凝时的气、液相速度分布

图 5 给出了蒸汽-冷流体接触冷凝时相界面上的换热系数计算结果。可以看出, 冷凝传热仅仅出现在界面附近; 而且, 由于蒸汽-冷流体的接触界面为平面, 在  $x$  方向上的传热系数分布均匀, 仅在垂直方向有变化; 在其它区域, 冷凝传热系数为 0。

图6给出了另一工况下 ( $T_G = 100^\circ\text{C}$ ,  $T_L = 20^\circ\text{C}$ ) 界面附近蒸汽和冷流体的温度分布等值线的局部图象。显然,图6也反映了这样一个事实,即冷凝传热仅发生在界面附近很小的区域,其他区域的介质温度是均匀的。

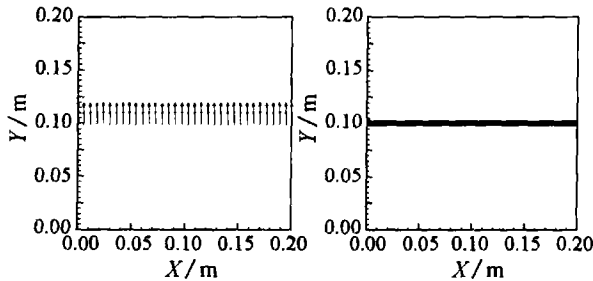


图4 由蒸汽冷凝产生的相界面迁移速度

图5 蒸汽冷凝时的界面传热系数分布

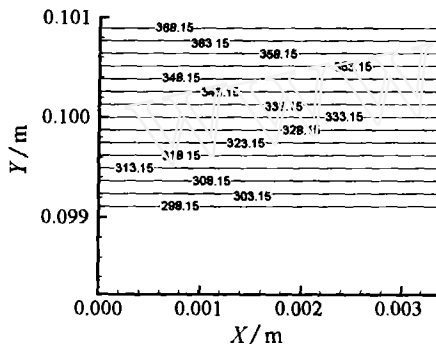


图6 蒸汽冷凝时界面附近温度分布等的局部放大

## 5.2 有关蒸汽-冷流体直接接触冷凝传热数值计算模型的讨论

对上述计算结果的深入分析发现,随着计算过程的进行,蒸汽-冷流体相界面实际上逐渐向下移动,而不是象图4表示的那样垂直向上。这不符合图1所示问题的物理规律。进一步的分析发现,导致相界面下移的原因在于相界面上的特殊物理条件在模型中没有得到体现。虽然蒸汽冷凝逐渐增加了冷流体的体积,使冷流体界面产生向上的迁移速度,但这一速度的数值很小(在本文计算条件下约为  $7.411 \times 10^{-6}$  m/s),而补充蒸汽的向下流动速度却比较大(在本文计算条件下,约为  $4.533 \times 10^{-3}$  m/s),因而合成的界面速度仍然向下。

在本文模型中,用 Level Set 方法捕捉相界面时,为了保证计算过程的稳定性,给相界面赋予了一个假想厚度  $2\epsilon$ ; 这种方式抹杀了界面上物性参数的阶跃式变化,使物性参数分布及与此相关的压力、

温度场的梯度等在某种程度上与实际情况偏离。

再者,蒸汽-冷流体接触冷凝时,界面温度  $T_i$  可能并不正好等于系统压力对应的饱和温度,而应与局部的界面压力相对应。计算中应当给出界面温度的物理条件。

由于赋予了相界面一个假想厚度,界面附近的导热系数、比热均存在过渡变化区,由此计算出的温度梯度和界面上的冷凝传热效率均可能比实际的小;由此计算得出的冷凝传热系数、冷凝传质通量、冷凝热流密度等也将偏小。更重要的一点就是,在这种情况下,冷凝传热系数等计算结果对网格尺寸和界面厚度 ( $2\epsilon$ ) 具有依赖性。这不符合实际物理现象。在这一方面需要对本文模型进行改进。

## 6 结 论

蒸汽-冷流体直接接触冷凝时界面附近的温度、速度及传热系数的分布对了解接触冷凝传热的机理和规律性非常重要。本文采用 Level set 界面捕捉技术,建立了蒸汽-冷流体直接接触冷凝流动与传热的数值计算模型,并用有限差分法对简单的平面接触冷凝问题进行了求解,得到了冷凝界面上的速度、温度及传热系数等分布,所得结果定性上符合冷凝现象的物理规律,证明了本文模型的有效性和好的应用前景。对研究结果的深入分析也发现,本文模型尚存不足,需对蒸汽-冷流体接触界面上的温度边界给出合理的约束条件,消除网格尺度可能对冷凝传热系数计算结果的影响。

## 参 考 文 献

- [1] 朱继洲. 核反应堆安全分析. 西安: 西安交通大学出版社, 2000
- [2] Liu T J. Reflux Condensation Behavior in a U-Tube Steam Generator with or Without Non-Condensables. Nuclear Engineering and Design, 2001, 204(1~3): 221-232
- [3] Choi C J, Lee S Y. Transient Analysis of a Condensation Experiment in the Non-Condensable Gas-Filled Closed Loop Using an Inverted U-Tube. Annals of Nuclear Energy, 1996, 23(14): 1179-1188
- [4] 李会雄, 杨冬, 陈昕宽等. LEVEL SET 方法及其在两相流数值模拟研究中的应用. 工程热物理论, 2001, 22(1): 233-236
- [5] Son G, Dhir V K. Numerical Simulation of Film Boiling Near Critical Pressure With a Level Set Method. J. Heat Transfer, 1998, 120(2): 183-192
- [6] Zhang Y W, Faghri A. Numerical Simulation of Condensation on a Capillary Grooved Structure. Numerical Heat Transfer, 2001, 39: 227-243