

平板多孔芯冷凝器内工质相变换热的 EOF 方法

邓芳芳 刘伟 彭仕文 杨金国

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘要 本文采用一种新的方法—流体能量 (EOF) 法, 来研究平板多孔芯冷凝器内工质流动与相变换热特性, 重点讨论了冷凝器内汽液相变界面的位置及其影响因素, 对其进行了理论建模与数值计算, 得出了蒸汽冷凝时所形成的汽液相变界面位置, 并与现有的实验结果进行了对比, 最后定性分析了不同入口速度和冷却热流量下的汽液界面情况。

关键词 平板冷凝器; 多孔芯; 相变换热; 汽液界面; EOF

中图分类号: TK124 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2005)04-0644-03

AN EOF METHOD FOR TWO-PHASE FLOW WITH PHASE CHANGE IN PLATE CONDENSER WITH POROUS ELEMENT

DENG Fang-Fang LIU Wei PENG Shi-Wen YANG Jin-Guo

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract An Energy of Fluid (EOF) based iterative scheme coupled with the SIMPLE algorithm is introduced in a specific plate condenser with porous element to analyze the heat and mass transfer of two-phase flow with phase change. Simulated liquid-vapor interfacial boundary is compared with the experimental one. Numerical result of the liquid-vapor interface during different inlet velocity and heat load is present.

Key words plate-condenser; porous; phase-change; liquid-vapor interface; EOF

1 引言

毛细泵回路 (CPL) 的冷凝器内的汽液界面位置影响着系统的压力波动, 1991 年首次提出在冷凝器内加入毛细多孔芯的方法, 来缓解系统的压力波动。冷凝槽道内的蒸汽与液相之间存在着动态的热、质以及动量传输关系, 涉及复杂的相变换热问题, 多孔芯的加入更增加了问题的难度。传统的方法采用两套方程分别对汽相和液相进行数值求解, 但是由于相变界面上密度、压力、速度等流体热物性参数及流动特性参数发生突变, 界面条件难以给定, 导致程序发散。

过去二十年来, 在对两相流动系统进行直接模拟的过程中发展了一些新方法, 如两流体模型法^[1], 分区函数法^[2], 流体体积 (VOF) 法^[3] 等。流体能量 (EOF) 法^[4] 是最近发展起来的一种模拟两相流动与换热的新方法, 该方法通过加入一个新的连续性方程, 与原有的控制方程联立, 利用 SIMPLE 算法进行求解, 可以模拟出汽液相变边界, 并计算出

整个区域的物理量场。EOF 方法解决了界面上参数突变的问题, 能够较好地求解有相变的两相流动换热问题。本文将详细介绍 EOF 方法, 并将其引入到平板式多孔芯冷凝器的相变换热问题中, 对该物理模型建立控制方程并进行数值求解, 得出汽液相变界面的理论计算结果, 最后对结果进行定性分析。

2 物理模型

图 1(a) 为平板式多孔芯冷凝器的横切面示意图, 上部空间为纵向冷凝槽道, 下部为多孔芯; 图 1(b) 为沿纵向选取的冷凝器的计算单元。来自蒸发器的工质蒸汽进入冷凝器的槽道空间, 槽道入口处逐步冷凝形成层流液膜, 冷凝主要发生在槽道上壁面与多孔芯表面, 并在多孔芯表面形成稳定的相变界面。冷凝器内汽液界面的位置影响着液体联管中的压力波动, 是整个 CPL 系统压力波动源之一, 汽液界面的位置及其影响因素是研究的重点。在冷凝负荷以及蒸汽入口速度的影响下, 汽液界面的位置

收稿日期: 2005-03-13; 修订日期: 2005-05-01

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (No. G2000026303)

作者简介: 邓芳芳 (1980-), 女, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要从事毛细泵两相回路 (CPL) 中的相变换热研究。

将在冷凝槽道内发生变化, 甚至有可能深入到多孔芯的内部, 有必要把槽道和多孔芯作为整体来分析。

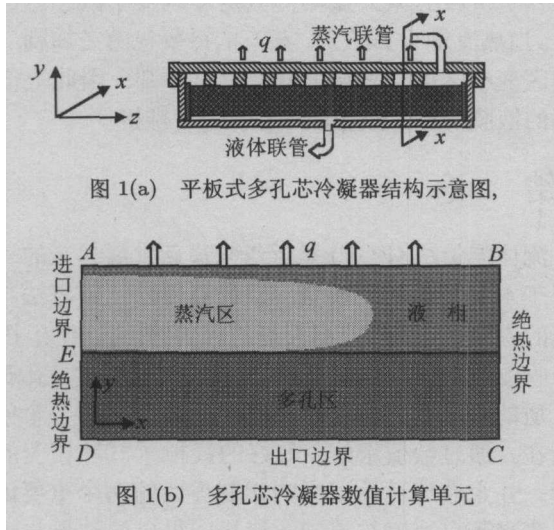


图 1(a) 平板式多孔芯冷凝器结构示意图,

图 1(b) 多孔芯冷凝器数值计算单元

3 研究方法

3.1 流体能量 (EOF) 法^[4]

本文将采用一种新的方法——流体能量 (EOF) 法, 来对平板式多孔芯冷凝器内工质的流动与相变换热问题进行求解。该方法通过引入一个“流体内能分数”, 可以直接模拟出汽液相变界面, 同时求解出整个两相区域内的温度、压力以及速度场。“流体内能分数” f 定义为计算微元体内, 处于相同温度压力条件下的流体 (相变区域为汽液共存状态) 与饱和液体的比内能之差与汽化潜热的比值:

$$f = \frac{e_{\text{流体}} - e_{\text{饱和液}}}{h_{fg}} \quad (1)$$

$f = 1$ 的区域为饱和蒸汽区, $f = 0$ 的区域为饱和液相区, $0 < f < 1$ 的区域即为汽液相变区域, f 场即可反映出汽液存在的状态。EOF 法在原有的 NS 控制方程上加入一个关于 f 的 EOF 输运方程, f 通过一个简单的连续性方程的形式与其它流动参数耦合。“流体内能分数” f 是时间与坐标的函数 $f = f(x, y, t)$, 满足连续性条件:

$$\frac{\partial f(x, y, t)}{\partial t} + \text{div}[\vec{U}f(x, y, t)] = 0 \quad (2)$$

流体的热物性参数定义为 f 的函数:

$$\rho(f) = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho_l f + \rho_v (1 - f)} \quad (3)$$

$$\mu(f) = \frac{1}{2} \left[\frac{\mu_l \mu_v}{\mu_l f + \mu_v (1 - f)} + f \mu_v + (1 - f) \mu_l \right] \quad (4)$$

$$\lambda(f) = \frac{1}{2} \left[\frac{\lambda_l \lambda_v}{\lambda_l f + \lambda_v (1 - f)} + f \lambda_v + (1 - f) \lambda_l \right] \quad (5)$$

3.2 控制方程

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U}) = 0 \quad (6)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U} u) = \text{div}\left(\frac{\mu}{\varepsilon} \text{grad} u\right) - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\mu}{K} u \quad (7a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U} v) = \text{div}\left(\frac{\mu}{\varepsilon} \text{grad} v\right) - \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\mu}{K} v \quad (7b)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} + \text{div}(\rho c \vec{U} T) = \text{div}(\lambda_{eff} \text{grad} T) + \dot{Q} \quad (8)$$

$$\dot{Q} = \Delta e \frac{\partial(\rho f)}{\partial t} + \Delta e \nabla \cdot (\rho \vec{U} f), \quad \Delta e = h_{fg} \quad (9)$$

ε 和 K 分别为多孔芯的孔隙率和渗透率, 槽道区动量方程右边的最后一项取 0, ε 取 1; λ_{eff} 和 ρc 分别为流体的等效传导系数和等效热容, 对于多孔芯有:

$$\lambda_{eff} = (1 - \varepsilon) \lambda_s + \varepsilon \lambda_l, \quad \rho c = (1 - \varepsilon) (\rho c)_s + \varepsilon (\rho c)_l \quad (10)$$

4 数值计算结果与分析

将连续性方程、动量方程、能量方程、EOF 方程联立求解, 可以得出各个物理量场。计算工质选用为甲醇, 由得出的 f 场图即可知道汽液相变界面的情况, 目前国内外对于多孔芯冷凝器的研究报道中, 仅见清华大学的可视化实验结果^[5], 所用的实验工质为甲醇。将计算结果与实验结果进行对比, 两者可以较好的符合。

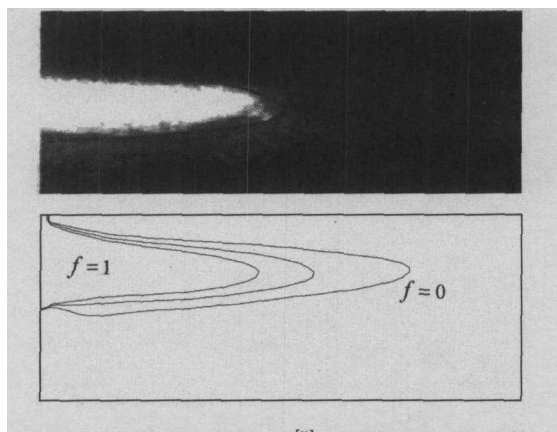


图 2 可视化实验结果 (上)^[5] 与计算结果 (下) 比较

现在我们来考虑蒸汽入口速度以及热流量对相变界面的影响。图 3 为热流量恒定, 给定不同蒸汽

入口速度时的相变情况,可以看出,蒸汽进口速度 u 的大小直接影响着汽相区的深入长度,随着进口速度的减小,汽相区的长度变小。因为较大的“冲入速度”可以使蒸汽较多地深入到冷凝器中去。

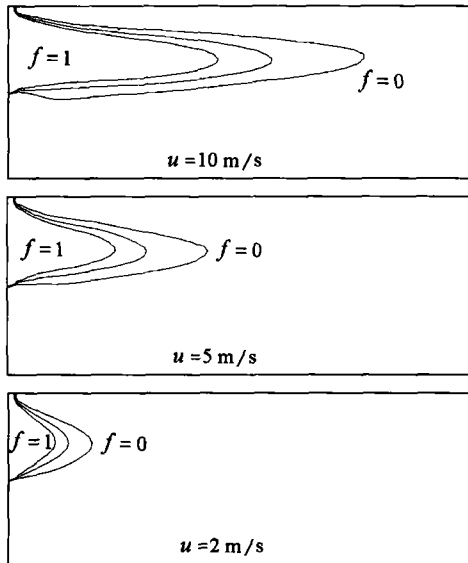


图3 冷却热流 $Q = 1000 \text{ W}$ 时的 f 场图

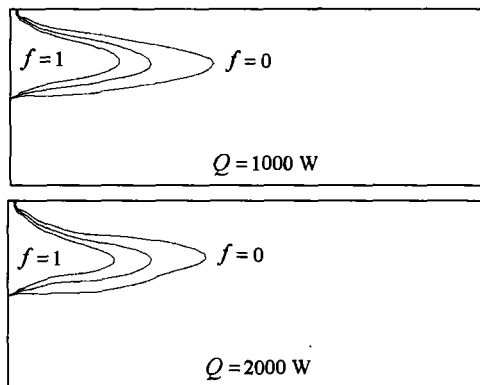


图4 蒸汽入口速度 $u = 5 \text{ m/s}$ 时的 f 场图

给定蒸汽的入口速度而改变冷却热流量大小时所得的汽液界面情况如图4所示:热流对于汽相区的深入长度没有太大影响,但是却改变了汽相区的形状。当热流量 Q 加大时,蒸汽的冷凝也随之加剧,汽相区变小,由于是从上壁面进行冷却,因此上部空间的液膜变厚,汽相区域被往下“排挤”。

5 结 论

流体能量法 (EOF) 是近年来最新发展起来的一种用于求解复杂相变换热问题的新方法,该方法与传统的方法相比,体现出较好的准确性、稳定性、以及易收敛等特性。将 EOF 方法引入到平板式多孔芯内工质的流动与相变换热问题中,是本文的一个创新所在,通过数值求解,较好的模拟了汽液相变的位置,并定性地讨论了影响相变界面的两个重要因素:蒸汽入口速度与冷却热流量,得出的结果与现有实验结果能够较好的相符合。

参 考 文 献

- [1] I Toumi. An Upwind Numerical Method for Two-Fluid Two-Phase Flow Model. Nuclear Science and Engineering, 1996, 123(1): 147-168
- [2] W Shyy, M Chen. Steady-state Natural Convection with Phase Change. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1990, 33(11): 2545-2563
- [3] C W Hirt, B D Nichols. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundary. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225
- [4] Samim Anghaie, Gary Chen, Sin Kim. An Energy Based Pressure Correction Method For Diabatic Two Phase Flow with Phase Change. Trends in Numerical and Physical Modeling for Industrial Multiphase Flows, Institut d'Etudes Scientifiques de Cargèse, France, 2000
- [5] 曲艺等. 多孔芯冷凝器内流动与换热特性. 工程热物 理学报, 2001, 22(3): 351-353