

CPL 毛细芯冷凝器的数值模拟研究

刘志春 刘伟 杨金国

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 本文分析了蒸汽在具有毛细芯结构的冷凝器中的相变冷凝传热与流动特征, 采用流体体积函数 (VOF: Volume of Fluid) 方法建立了数学模型, 继而是用数值模拟方法, 研究了不同的壁面温度以及不同的蒸汽入口速度对冷凝相变界面的影响, 文中还对产生影响的原因进行了分析。

关键词 CPL; 冷凝器; 毛细芯; 相变; VOF

中图分类号: TK124 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2007)Suppl.2-0081-04

NUMERICAL SIMULATION OF TWO PHASE FLOW AND HEAT TRANSFER IN CPL CONDENSER WITH POROUS ELEMENT

LIU Zhi-Chun LIU Wei YANG Jin-Guo

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

Abstract In the present paper, the Volume of Fluid (VOF) method is introduced to model the two phase flow and heat transfer with phase change in CPL condenser with porous element and the effect of different wall temperature and inlet vapor velocity to condensation phase change interface was studied with numerical simulation method. The reason of the effects are also analysed in this paper.

Key words CPL; condenser; porous wick; phase change; VOF

1 前言

毛细抽吸两相流体回路 (CPL: Capillary Pumped Loop) 是一种利用工质相变传递热量并且利用毛细力驱动系统循环的装置, 具有高效、可靠、节能以及传输距离长等优点, 在航天器热控以及电子装置冷却等方面具有广阔的应用前景。但是国内外的研究表明, 由于各种原因传统 CPL 系统存在启动困难和运行过程中压力和温度的波动等问题, 这严重制约了其应用发展。国内外许多学者就此问题展开了广泛而深入的研究, 积极探索解决的方法。Gottschlich 等人^[1]在 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, 此后 Muraoka 等^[2]设计并制作了一个具有平板式冷凝器和蒸发器两相毛细泵回路, 并对系统进行了试验研究和理论分析, 结果表明, 在冷凝器中采用毛细芯结构, 可以在毛细芯表面形成一个稳定的物理界面, 从而可以

削弱甚至抑制系统的压力波动。此外, 在冷凝器内加入多孔芯, 可以使得凝结换热系数提高, 从而加速了蒸汽的冷凝过程。

但是对于蒸汽在毛细芯冷凝器中的冷凝, 涉及到多孔介质中的相变传热以及其运动界面的追踪, 因而实现起来具有较大的困难。VOF (Volume Of Fluid) 方法自 1987 年 Hirt 和 Nichols 等^[3]提出后, 在解决涉及到自由界面问题方面取得了良好的效果。本文将采用 VOF 模型对汽液相变换热过程进行模拟, 研究蒸汽在毛细芯冷凝器中的流动与相变传热特征。

2 毛细芯冷凝器内的流动与传热数理模型

图 1 为本文所研究的平板式多孔芯冷凝器结构示意图, 上部空间为纵向蒸汽冷凝槽道, 槽道下部

收稿日期: 2007-03-12; 修订日期: 2007-07-19

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (No.2007CB206900)

作者简介: 刘志春 (1976-), 男, 新疆沙湾人, 讲师, 博士, 主要从事空间热控制以及电子器件冷却的研究。

为毛细芯, 冷凝后的液体经毛细芯后进入冷凝器集液腔, 通过回流液体通道返回到蒸发器。

在对平板式毛细芯冷凝器换热进行数值模拟时, 把槽道和多孔芯作为整体来分析, 数值计算基于以下假设: (1) 流体不可压缩, 且为层流流动; (2) 蒸汽在进入冷凝器是饱和的, 因而蒸汽相中没有温度梯度存在; (3) 流体的热物性参数不随温度变化; (4) 汽液界面上无温差, 相变界面上温度为饱和温度; (5) 在蒸汽进入冷凝器之前, 冷凝器内完全为过冷液体充满; (6) 对于毛细芯, 采用局部热力学平衡, 即毛细芯内的工质和毛细骨架之间没有热量传递; (7) 能量方程中, 不考虑粘性耗散作用; (8) 由于蒸汽冷凝槽道比较小, 此时表面张力的作用比较显著, 因此不考虑重力的作用。

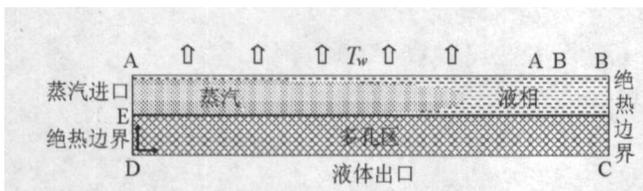


图 1 平板式毛细芯冷凝器物理模型

本文把槽道与多孔芯作为整体来分析, 对其内工质的流动与换热进行分析, 考虑汽液两相之间的热、质及动量传递, 通过求解完整的二维传热与流动控制方程, 模拟蒸汽在具有毛细表面的槽道中的冷凝过程。对于整个计算区域采用一套方程, 槽道区和多孔区设置不同的孔隙率来区分。

3 数理模型^[4]

由于 VOF 方程只对第二相求解, 在本文研究的问题里, 根据前面的假设, 蒸汽为第二相, 因此在 VOF 方程中, 只须列出蒸汽相方程, 对其进行求解。

对于蒸汽槽道和毛细芯区以及液相区和汽相区采用同一套方程:

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = - \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right) \dot{m} \quad (1)$$

蒸汽 VOF 方程:

$$\frac{D\alpha_v}{Dt} = - \frac{\dot{m}}{\rho_v} + \alpha_v \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right) \dot{m} = S_{\alpha_v} \quad (2)$$

动量方程:

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \\ \quad D \left(\frac{\mu}{K} + \frac{\rho C}{\sqrt{K}} |u| \right) u + F_x \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \\ \quad D \left(\frac{\mu}{K} + \frac{\rho C}{\sqrt{K}} |v| \right) v + F_y \end{cases} \quad (3)$$

上式中, D 为一个参变量, 在蒸汽槽道中, $D=0$, 在毛细芯中, $D=1$ 。

\vec{F} 为汽液界面的表面张力, 由连续表面张力 (CSF) 模型^[6] 确定:

$$\vec{F} = 2\sigma K\alpha_l \nabla \alpha_l, \quad K = \frac{1}{|\vec{n}|} \left[\left(\frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \cdot \nabla \right) |\vec{n}| - (\nabla \cdot \vec{n}) \right], \quad \vec{n} = \nabla \alpha_v \quad (4)$$

式中, σ 为表面张力系数, k 为汽液相变界面曲率, \vec{n} 为相变界面指向蒸汽侧正向量。

能量方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u h) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v h) = \\ \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S_{\Delta H} \\ S_{\Delta H} = -\rho_v h_{fg} \left[\frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_v u) + \frac{\partial}{\partial y}(\alpha_v v) \right] = \\ \quad -\rho_v h_{fg} \left[\frac{D\alpha_v}{Dt} + \alpha_v \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \end{cases} \quad (5)$$

上式中, $S_{\Delta H}$ 为能量方程得源项, 蒸汽冷凝率 \dot{m} 又可以写为:

$$\dot{m} = S_{\Delta H} / h_{fg} \quad (6)$$

由于对毛细芯冷凝器采用整场求解, 因而对于以上方程中物性参数采用等效参数表示:

$$\rho = \alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v) \rho_l, \quad \mu = \alpha_v \mu_v + (1 - \alpha_v) \mu_l,$$

$$\lambda_{\text{eff}} = [\alpha_v \lambda_v + (1 - \alpha_v) \lambda_l] \varepsilon + (1 - \varepsilon) \lambda_s,$$

$$\bar{\rho} c = [\rho_v c_v \alpha_v + (1 - \alpha_v) \rho_l c_l] \varepsilon + (1 - \varepsilon) (\rho c)_s,$$

以上各式中, μ 表示运力粘性系数, λ 表示导热系数, c 表示比热, ε 表示孔隙率, 在蒸汽槽道中, $\varepsilon = 1$, 在毛细芯中 $\varepsilon = 0.53$ 。

$$\text{AE: } u = u_{\text{in}}, \quad v = 0, \quad T = T_{\text{sat}}, \quad \alpha_v = 1;$$

$$\text{AB: } u = 0, \quad v = 0, \quad T = T_w$$

$$\text{BC 和 DE: } u = 0, \quad v = 0, \quad \partial T / \partial x = 0;$$

$$\text{DC: } u = 0, \quad \partial v / \partial y = 0, \quad \partial T / \partial y = 0, \quad \partial \alpha_v / \partial y = 0$$

在汽液相变界面上, 满足 $T = T_{sat}$ 。

4 数值计算

对于压力场和速度场的采用 SIMPLE 算法求解, 对流项采用乘方格式离散。对于采用 VOF 方法解决界面追踪问题, 通常分为两个步骤, 第一步, 采用 VOF 方程进行界面追踪, 第二步根据界面追踪的结果进行界面几何重构。在这里对于汽液相变界面的重构采用 Young 的 PLIC(Piecewise Linear Interface Calculation) 方法, 该方法在界面重构时, 采用分段线性策略, 因而与实际的运行界面较接近^[7]。

数值计算以甲醇为工质 (饱和温度为 337.15 K), 计算区域 (长 × 高) 的尺寸为 225×9 mm, 其中上部的槽道高度为 4 mm。

5 模型验证

为了验证本模型以及方法的正确性, 本文对甲醇蒸汽在半径 1.5 mm、长度为 2 cm 的微细通道内的冷凝进行了数值模拟, 这里假设蒸汽入口速度为 0.6 m/s, 蒸汽入口温度为 337.85 K, 壁面温度 $T_w = 383.15$ K。其温度场和 VOF 场如图 2 所示。

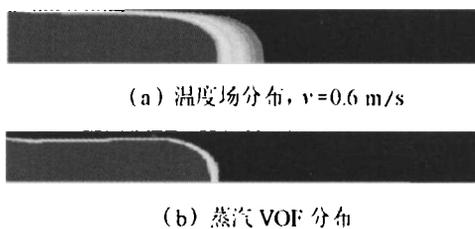


图 2 蒸汽速度 $v=0.6$ m/s 时, 甲醇蒸汽在微细通道内的冷凝

图 3 中给出了 Beeg 研究水蒸汽在微细通道内冷凝的可视化试验得到试验图像, 比较以上各图, 可以看出, 采用本模型计算出来的蒸汽冷凝分布图和试验结果十分近似, 从而证明了本模型可以描述蒸汽的冷凝放热过程。图 4 为 Yuwen Zhang 等^[4]采用数值模拟得到的蒸汽在微细通道的冷凝情况, 本文的计算结果与其相比较, 可以看出, 本文计算的相变界面更加光滑, 这是由于在 Yuwen Zhang 的计算中, 界面重构方法采用 Donor-Acceptor 方法, 该方法重构的界面比较粗糙, 而本文中采用了 Young 的 PLIC 方法, 界面重构的精度较高, 因而界面比较光滑。



图 3 低压蒸汽在微细通道内的完全冷凝可视化试验^[5]



图 4 Yuwen Zhang and A. Faghri 蒸汽在微细通道中的冷凝数值模拟结果: 蒸汽 VOF 分布图^[4]

6 计算结果及讨论

6.1 蒸汽入口速度对相变界面的影响

图 5 和图 6 分别为壁面温度恒定, 给定不同蒸汽入口速度时的蒸汽 VOF 分布图和温度场分布图, 可以看出, 蒸汽进口速度的大小直接影响着汽相区的深入长度, 随着进口速度的增加, 汽相区的长度增大, 较大的“冲入速度”使蒸汽较多地深入到冷凝器中去。由于蒸汽进入冷凝器槽道之前, 槽道中完全为液体充满, 因而蒸汽开始冲入槽道时, 由于受到的阻力比较大, 因而有少量的蒸汽冲入到了毛细芯中, 这从图中的蒸汽的 VOF 分布图可以看出。随着蒸汽推开槽道中的液体, 由于毛细芯的滞止作用, 冷凝液在毛细芯表面形成了一个稳定的冷凝界面。

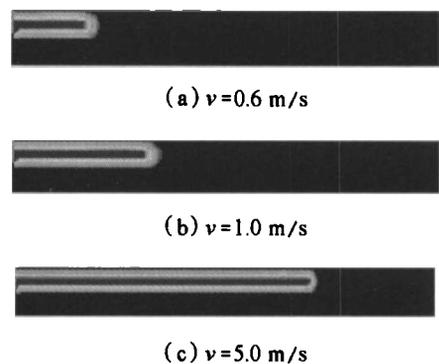


图 5 冷壁面为 $T_w=283.15$ K 时, 不同蒸汽入口速度条件下的蒸汽的 VOF 场图

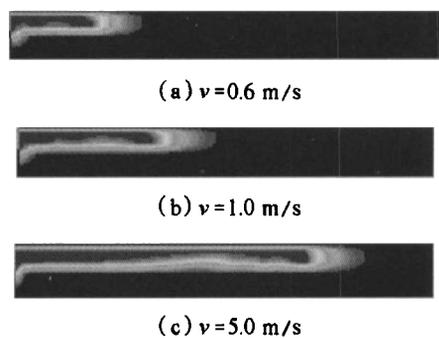


图 6 冷壁面为 $T_w=283.15$ K 时, 不同蒸汽入口速度条件下的温度场分布图

从冷凝器温度场分布图可以看出, 槽道的上壁面处由于直接和冷凝壁面相接触, 因而形成的冷凝液膜较薄, 而且有一非常明显的平整液膜区。从温

度分布图中还可以看出,在冷凝界面的锋面位置的前端,饱和蒸汽的影响较其它位置为显著。这是由于当蒸汽冲入蒸汽槽道开始冷凝之后,前冷凝锋面处,蒸汽达到完全冷凝,此时蒸汽速度降为零,此时能量损失也有部分传递给了液体,因此此处,热量较为深入地传递到了液体内部。

6.2 冷却壁面温度对相变界面的影响

图 7 和图 8 分别为蒸汽入口速度恒定,不同壁面温度时蒸汽 VOF 分布图和温度场分布图。从图中

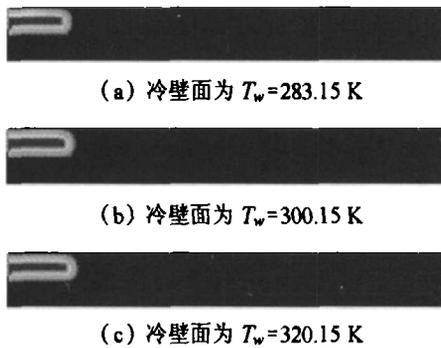


图 7 蒸汽速度 $v=0.6\text{ m/s}$ 时,不同壁面温度下的蒸汽的 VOF 场图



图 8 蒸汽速度 $v=0.6\text{ m/s}$ 时,不同壁面温度下的温度场分布图

可以看出,随着壁面温度的升高,蒸汽的冷凝长度略有增加,这是由于在计算时采用我们均采用 $T_s=337.15\text{ K}$ 的饱和蒸汽,因此为了冷却相同质量的蒸汽,壁面温度越高,所需的蒸汽冷凝面积就越大,因而冷凝长度越大,但是此方面的影响并不是很显著。

7 结 论

本文通过对毛细芯冷凝器内的流动与换热进行理论分析,采用 VOF 模型,建立了工质在蒸汽槽道以及在毛细芯中的冷凝相变过程的整场模型,同时模拟了新型平板式 CPL 冷凝器的多孔芯和槽道内蒸汽和凝结液的流动过程。文中给出了汽液界面的形成位置和温度场的分布状况,并分析了不同的进口蒸汽流速、冷凝器壁面温度对蒸汽在冷凝器中的相变冷凝过程的影响。

参 考 文 献

- [1] J M Gottschlich, R Richter. 1991 SAE Aerospace Atlantic. Dayton, OH, SAE Technical Paper, 911188, 1991
- [2] I Muraoka, F M Ramos, V V Vlassov. Experimental and Theoretical Investigation of a Capillary Pumped Loop with a Porouselement in the Condenser. Int. Comm. Heat and Mass Transfer, 1998, 25(8): 1085-1094
- [3] C W Hirt, B D Nichols. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. J. Comput. Phys., 1981, 39: 201-225
- [4] Yuwen Zhang, A Faghri. Numerical simulation of Condensation on a Capillary Grooved Structure. Numerical Heat Transfer, Part A, 2001, 39: 227-243
- [5] Eric K Beeg, Transport Phenomena in Micro/Miniature Channels for Two Phase Flow Heat Transfer Devices Including Heat Pipes and Fuel Cells: [Doctor Thesis]. Connecticut: University of Connecticut, 2003
- [6] J U Brackbill, D B Kothe, C Zemach. A Continuum Method for Modeling Surface Tension. J. Comput. Phys., 1992, 100: 335-354
- [7] 刘儒勋, 王志峰. 数值模拟方法和运动界面追踪. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001