

CPL 蒸发器多孔芯传热传质特性的新数学模型

黄晓明 刘伟 韩延民

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 毛细循环泵 (CPL), 由于具有高热传输性能, 目前已经成为大功率载荷的电子芯片排热系统的一个重要发展方向, 尤其是在航空航天飞行器上。选择一种具有较大相变潜热的工质, 例如甲醇, CPL 可以传输相当大的热流。本文对 CPL 蒸发器多孔芯流动和传热的数值模拟提出了一个新的发展方向, 就是在计算中加入非饱和模型数值计算。文中阐述了加入非饱和计算的三层模型对真实模拟蒸发器多孔芯流动和传热问题的重要性, 并给出了应用新的三层模型所得到的初步计算结果。

关键词 CPL 蒸发器; 多孔芯; 数值计算; 三层模型; 流动及传热

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2004)04-0652-03

A NEW MODEL FOR THE HEAT AND MASS TRANSFER CHARACTER OF CPL EVAPORATION

HUANG Xiao-Ming LIU Wei HAN Yan-Min

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

Abstract A capillary pumped loop (CPL), because of its high power thermal transport character, has been developed as an attractive system for the thermal discharge of electronic chips with high power loads, especially on the spacecrafts. With a working fluid having relatively larger heat of evaporation, methanol for example, it may transfer significant heat flux. In this paper a new mathematic model is constructed, in which the most important character is the treatment for the unsaturated region of porous wick in evaporator. Numerical simulation of heat and mass transfer in the porous wick of evaporator is carried out with the new three-layer model, and the importance of the consideration of unsaturated layer to simulate the present problem actually is clear.

Key words CPL evaporation; porous wick; numerical calculation; three-layer model; heat and mass transfer

1 前言

毛细抽吸两相回路 (Capillary Pumped Loop, 简称 CPL) 是一种高传热、高可靠性的传热装置, 具有可靠性高、传输能力较大以及调控方便等多种优点, 因此自八十年代起世界各国都对其展开了广泛的研究。Yiding Cao 等^[1]对平板式 CPL 蒸发器内蒸汽的流动进行三维数值模拟, C.Figus^[2]等对 CPL 毛细结构中的相变传热采用两种数值模拟方法进行计算并做了详细的比较和讨论。但是在这些文献中, 对毛细芯的研究均使用饱和多孔介质模型, 例如文献 [2] 中, 在考虑多孔芯的相变时, 作者只是将毛细芯内的流动划分为饱和蒸汽区和饱和液体区, 他们都没有考虑在蒸汽区和液体区之间的非饱和多

孔区内的流动和传热问题, 而实际上, 液体的蒸发相变不可能之发生在主汽液界面上, 因此在这两个饱和区之间必然有非饱和区存在。

鉴于以上原因, 本文将着重讨论对多孔介质流动和传热建立新的模型, 考虑将毛细芯内的流动划分为单项蒸汽区, 两相非饱和区和单项饱和液体区, 并对这一三层模型进行耦合计算及分析。

2 物理模型

本文的计算主要针对平板式 CPL 的一个典型计算单元, 如图 1 所示。众所周知, 毛细抽吸力是来自覆盖在固体骨架表面液膜所形成的液桥的表面张力。在稳态工况下, 有较强润湿性的液体的液桥会在固体表面形成一个薄液膜, 其厚度取决于液体和固

收稿日期: 2004-01-07; 修订日期: 2004-04-22

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: 黄晓明 (1976-), 女, 浙江余姚人, 博士研究生, 主要从事多孔介质传热传质研究。

体的性质以及表面张力的。而表面张力的大小为温度的函数。在温度较高的地方, 表面张力较弱, 所以所形成的液体薄膜也比较薄。这就意味着, 当温度梯度存在时, 就会有表面张力梯度存在。从毛细结构的这些特性来看, 将相变区简单地处理成一个零厚度界面并不合适, 而应该将它看作是一个两相非饱和层。在这个非饱和层中, 蒸发主要发生在液相薄膜和蒸汽的比表面上。本文中提出的新模型就是建立在这一理论基础, 认为多孔层在运行过程中, 由三个区域组成: 干饱和蒸汽区, 湿饱和和液相区, 以及它们之间的非饱和和两相区。

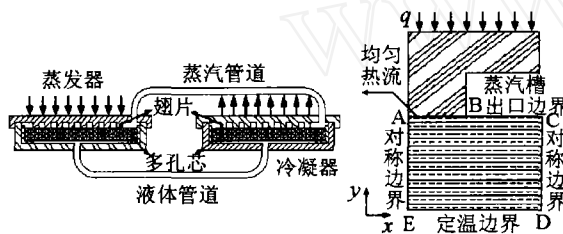


图 1 CPL 平面蒸发器 (a) 和多孔芯数值计算单元 (b) 示意图

3 数学模型^[4~7]

对上述物理模型考虑下面一些假设来简化模型: (1) 多孔介质属于刚性介质, 均匀且各项同性。(2) 忽略重力影响。(3) 在整个分析范围内, 局部热平衡假设成立。(4) 在非饱和区域, 液相和蒸汽相区域各自连续, 遵从连续介质假说。

• 单相区:

连续方程
$$\frac{\partial(\varepsilon_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i \vec{V}_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\rho_i}{\varepsilon_i} \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\varepsilon_i^2} (\vec{V}_i \cdot \nabla) \vec{V}_i = -\nabla P_i - \frac{\mu_i}{K_i} \vec{V}_i + \frac{\mu_i}{\varepsilon_i} \nabla^2 \vec{V}_i \quad (2)$$

能量方程

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \rho_i c_i (\vec{V}_i \cdot \nabla) T = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T), \quad i = (l, v) \quad (3)$$

其中, ε 为相含量; \vec{V} 速度矢量; c 为比热容; ρ 为密度; T 为温度; P 为压力; μ 为流体的动力粘度; K 为流体的渗流参数; k_{eff} 为有效热传导系数, $k_{\text{eff}} = (1-\varepsilon_s)k_i + \varepsilon_s k_s$; t 为时间。下标 g 表示气相, v 表示蒸汽, l 表示液相, s 表示固相。能量方程中热容的定义为: $\rho c = [\rho_l c_l \gamma + (1-\gamma)\rho_v c_v] \varepsilon + (1-\varepsilon)(\rho c)_s$ 。

• 两相区:

对于两相区, 我们采用了已有的六场量非饱和模型^[4], 同时模拟包括温度 T , 液含量 ε_l , 压力 P , 液相速度 \vec{V}_l , 蒸汽速度 \vec{V}_v , 蒸发相变率 \dot{m} 在内的六个场量。

连续方程:

液相:
$$\frac{\partial(\varepsilon_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_l \rho_l \vec{V}_l) = -\dot{m} \quad (4)$$

汽相:
$$\frac{\partial(\varepsilon_v \rho_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_v \rho_v \vec{V}_v) = \dot{m} \quad (5)$$

动量方程:

液相:
$$\frac{\partial \vec{V}_l}{\partial t} + \vec{V}_l \cdot \nabla \vec{V}_l - \frac{\dot{m}}{\varepsilon_l \rho_l} \vec{V}_l = -\frac{\mu_l D_l}{\rho_l K_l} \nabla \varepsilon_l - \frac{\mu_l}{K_l \rho_l} \nabla^2 \vec{V}_l \quad (6)$$

汽相:
$$\frac{\partial \vec{V}_v}{\partial t} + \vec{V}_v \cdot \nabla \vec{V}_v + \frac{\dot{m}}{\varepsilon_v \rho_v} \vec{V}_v = -\frac{1}{\rho_v} \nabla p - \frac{\mu_v}{K_v \rho_v} \nabla^2 \vec{V}_v \quad (7)$$

能量方程:

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + [(\rho c)_l \vec{V}_l + (\rho c)_v \vec{V}_v] \cdot \nabla T + [(\rho c)_l \vec{V}_l \cdot \nabla \varepsilon_l + (\rho c)_v \vec{V}_v \cdot \nabla \varepsilon_v] T = \lambda_m \nabla^2 T - \dot{m} \gamma + S \quad (8)$$

• 边界条件

底边界 (D-E):

$$p_l = p_0, \quad T_l = T_0 \quad (10)$$

对称边界 (A-E, C-D):

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

左上边界 (A-B):

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q \quad (12)$$

右上边界 (B-C):

$$p_v = p_1, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

其中 q 为系统的热负荷 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)。

4 数值计算结果

计算中选择甲醇为工质, 多孔芯孔隙率 $\varepsilon = 0.5$, 渗透率 $K_l = 1.869 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 。计算中有关热参数如下: $\lambda_s = 27 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\lambda_l = 0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\lambda_v = 0.02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\gamma = 1.12 \times 10^6 \text{ J/kg}^{-1}$ 。系统热负荷变化范围为 $250 \sim 500 \text{ W}$ 。几何尺寸为 $AB = 2 \times 10^{-3}$, $AC = 5 \times 10^{-3}$, $CD = 5 \times 10^{-3}$ 。边界参数: $T_0 = 30^\circ \text{C}$, $T_{\text{ref}} = 37^\circ \text{C}$, $P_1 = P_{\text{sat}}(T_{\text{ref}})$, $P_0 = P_{\text{sat}}(T_{\text{ref}}) - 40 \text{ Pa}$ 。

不同热负荷下多孔芯液相含量场如图 2 所示。计算中, 我们将 $\varepsilon_l \leq 0.01$ 当作干饱和蒸汽区。考虑 CPL 运行过程中的一种较为理想的稳定工况, 在这种工况下认为多孔芯被分为两个区: 饱和蒸汽区和非饱和区。而液相饱和区仅限于蒸发器的液相槽。从图 2 可以很明显看出当系统热负荷增加, 即加热

板上的热流密度逐渐加大时, 蒸汽区的范围也逐渐加大。而同时液相含量较大的区域 ($\epsilon_l \geq 0.371$) 也增大了。这种变化趋势说明液相含量的变化越来越集中在靠近蒸汽饱和区的一个小范围内。这一现象可能是由于较大热流对应较大的传质率引起的。因此, 当热流密度较大的工况下, 大量的液体会以较高的速度被抽吸到蒸发器中 (这里认为工质始终能够保证足够的供液)。当液体迁移到温度较高的区域 (即靠近加热板的地方), 表面张力变弱, 而温度梯度越大, 表面张力减弱的速度越快。这就解释了为什么在热流越大的情况下蒸汽区越大。从图 2 给出的这些液相含量场图的变化趋势, 可以得到如下一个结论, 有关汽液相变仅发生在一个零厚度界面这样的假设, 只有在对应于热流密度足够大情况下才适合。

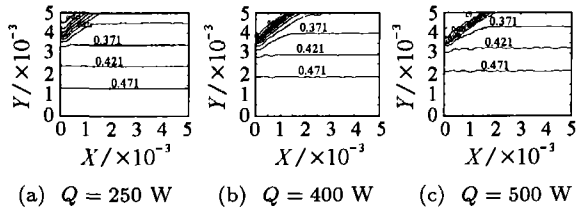


图 2 多孔芯液含量场

图 3 所示为不同热流密度下的多孔芯的温度场分布。从图上我们可以看到温度场分布图中并没有如液相含量场分布图中的清晰的分界面来隔开两相区和蒸汽区。但是温度梯度较大的区域主要集中在对应于气相区以及与气相区邻近的一小块区域中。这样的区域越大, 温度上升的就越快, 如图 3 中的 (c) 图。由于多孔芯底部区域温度的变化很小, 所以蒸发相变率和液相含量的变化都显得非常弱。与 Figus(1999)^[2] 的结果相比较, 在考虑了非饱和区图 3 所示为不同热流密度下的多孔芯的温度场分布。从图上我们可以看到温度场分布图中并没有如液相含量场分布图中的清晰的分界面来隔开两相区和蒸汽区。但是温度梯度较大的区域主要集中在对应于气相区以及与气相区邻近的一小块区域中。这样的区域越大, 温度上升的就越快, 如图 3 中的 (c) 图。由于多孔芯底部区域温度的变化很小, 所以蒸发相变率和液相含量的变化都显得非常弱。与 Figus(1999)^[2] 的结果相比较, 在考虑了非饱和区域后, 高温区域的温升要小得多, 显然这样的结果更符合 CPL 蒸发器的实际运行情况。

图 4 中给出了多孔芯的蒸汽速度的矢量图, 从图上可以看出蒸汽运动的速度大小和方向。我们可以看出, 无论是在蒸汽区, 还是在高液相含量区, 蒸

汽的对流运动都比较小。流动大部分都发生在液相含量变化较大的地方。这是因为在单相区缺乏液体和蒸汽的相互作用, 因而也缺乏汽液蒸发界面上的毛细压差来驱动流体的流动。

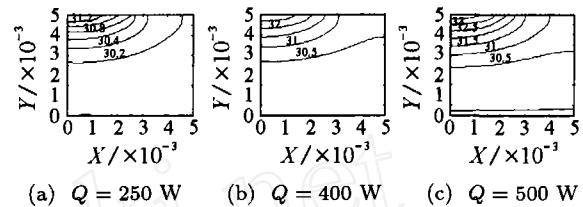


图 3 多孔芯内的温度场

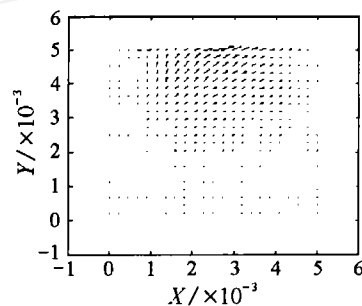


图 4 多孔芯内的速度场

5 结 论

从上面对 CPL 蒸发器多孔芯三层模型初步计算的结果, 我们可以得到如下结论。液相含量变化十分明显, 这为我们前面所提出的假说, 将汽液相变区处理为一个非饱和区提供了充分依据。当热流量增加时, 液相含量越来越集中在一个狭窄的区域。这说明非饱和区域的厚度在热流量增大的同时变薄。

参 考 文 献

- [1] Yiding Cao, Amir Faghri. Conjugate Analysis of a Flat-Plate Type Evaporator for Capillary Pumped Loops with Three-Dimensional Vapor Flow in the Groove. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 1994, 37(9): 401-409
- [2] C Figus, Y Le Bray, S Bories, et al. Heat and Mass Transfer with Phase Change in a Porous Structure Partially Heated: Continuum Model and Pore Network Simulations. *Int. J. Heat and Mass Trans.*, 1999, 42: 2557-2569
- [3] 马庆芳, 方荣生等编. 实用热物性性质手册. 北京: 中国农业机械出版社, 1986
- [4] W Liu, et al. A General Mathematical Modeling for Heat and Mass Transfer in Unsaturated Porous Media: an Application to Free Evaporative Cooling. *Heat and Mass Transfer*, 1995, 31(1): 49-55
- [5] W Liu, et al. Moisture Evaporation and Migration in Thin Porous Packed Bed Influenced by Ambient and Operative Conditions. *Int. J. of Energy Research*, 1997, 21(1): 41-53