

小型平板 CPL 蒸发器优化设计研究

涂正凯 万忠民 盖东兴 刘伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 本文建立了小型平板 CPL 蒸发器二维的整场数学模型, 并用 SIMPLE 程序对蒸发器进行整场耦合求解。研究表明, 平板型 CPL 蒸发器存在着侧壁效应传热极限, 减小液体补偿腔的高度, 减小侧壁以及下壁的厚度以及增加毛细芯的高度可以提高 CPL 的传热能力。

关键词 CPL; 蒸发器; 多孔介质; 侧壁导热; 优化设计

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2009)04-0668-03

OPTIMIZATION DESIGN FOR A FLAT PLATE EVAPORATOR OF MINIATURE CAPILLARY PUMPED LOOP

TU Zheng-Kai WAN Zhong-Min GAI Dong-Xing LIU Wei

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

Abstract The 2D model for the small-scale flat capillary pumped loop (CPL) evaporator is presented, and the entire evaporator is solved with SIMPLE algorithm as a conjugate problem. The effect of heat conduction of side metallic wall on the performance of evaporator is analyzed, and the side wall effect heat transfer limit of flat evaporator is introduced. The numerical results show that the heat transfer capacity can be improved not only by reducing the height of the compensator and the thickness of the side wall and the bottom wall but also by increasing the height of the capillary wick.

Key words CPL; evaporator; porous media; side wall effect; optimization design

0 引言

蒸发器是 CPL 的核心部件之一, Figus 等^[1]基于饱和多孔介质连续介质理论和网络结构模型建立了 CPL 蒸发器毛细芯的传热传质模型; 刘志春等^[2]分析了平板型蒸发器多孔芯微元内的传热现象, 并讨论了芯内的传热强化问题。但是这些研究都是针对蒸发器多孔芯的一个很小局部单元结构进行数学建模, 没有考虑蒸发器金属外壁以及蒸汽、液体槽道的影响, 不能准确有效地反映蒸发器的实际传热过程。在高热流密度情况下, 小型平板 CPL 通过蒸发器侧壁传导的热量经过下壁反向加热多孔芯底部及液体槽道的液体, 可能导致下部液体局部过热, 产生气泡, 严重的影响着 CPL 蒸发器的正常运行, 甚至导致系统运行失败。本文提出了小型的平板 CPL 蒸发器的整场耦合数学模型, 对小型平板 CPL 的结构以及物性参数进行了优化设计研究。

1 数学模型

根据平板蒸发器对称的结构特点, 采取蒸发器的一半作研究对象, 以蒸发器左下角为坐标原点建立各区域的控制方程。图 1 所示为小型平板 CPL 蒸发器的结构示意图, 图中区域 1, 2, 3, 4, 5 分别为蒸发器的金属外壁 1, 蒸汽槽道, 毛细多孔芯, 液体补偿槽道, 金属外壁 2。

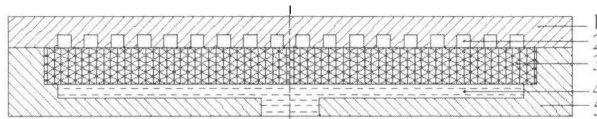


图 1 微小型平板式蒸发器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the flat evaporator

在建立毛细芯的数学模型时提出如下假设: (1) 多孔介质属刚性介质, 各向同性; (2) 多孔孔隙内

收稿日期: 2008-12-12; 修订日期: 2009-03-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (No.2007CB206903); 国家自然科学基金资助项目 (No.50721005)

作者简介: 涂正凯 (1981), 男, 湖北鄂州人, 博士研究生, 主要从事多孔介质以及相变换热的研究。

蒸汽的压力为饱和压力; (3) 毛细多孔芯处于局部热力学平衡态; (4) 相对于毛细抽吸力, 重力的影响较小, 在此忽略重力的影响。运用体积平均法, 根据 Brinkman 和 Forchheimer 对 Darcy 定律的修正理论, 分别对多孔芯内的液相和汽相区建立连续, 动量和质量控方程。汽液相变界面的处理为:

$$T_l = T_v = T_{\text{sat}}, \quad \rho_l V_l = \rho_v V_v, \quad P_c = P_v - P_l$$

$$\lambda_v \nabla T_v \cdot n - \lambda_l \nabla T_l \cdot n = \rho_l |\vec{V}| h_f$$

式中, \vec{V} 为速度矢量; T 为温度; T_{in} 和 T_{sat} 分别为 CPL 系统回流工质温度和工作温度; P 为压力; P_c 为毛细抽吸力; λ 为热传导系数; h_f 为工质汽化潜热。下标 v 表示蒸汽; l 表示液相; s 表示固相; 1, 2, 3, 4, 5 表示各区域; n 为单位法矢量。

2 优化设计

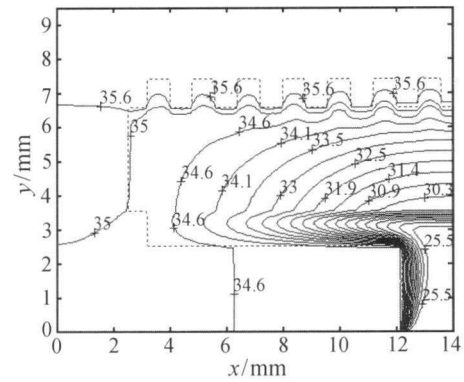
采用高纯氨作为工质, 多孔芯采用烧结不锈钢芯, 其它参数: $T_{\text{in}}=25^\circ\text{C}$, $T_{\text{sat}}=35^\circ\text{C}$ 。考虑到与工质的相容性, 金属外壁采用铝金属材料。本文采用 SIMPLE 程序对模型进行求解^[4]。

2.1 侧壁导热效应分析

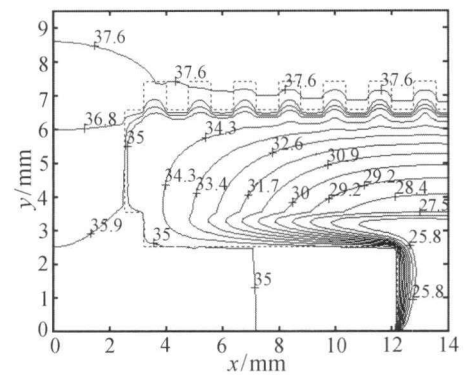
图 2 所示的蒸发器的几何尺寸为: 长 \times 高为 $28 \text{ mm} \times 9.5 \text{ mm}$, 金属上壁厚度为 3 mm , 下壁厚度为 2.5 mm , 侧壁厚度 2.5 mm , 多孔芯厚度为 3 mm , 液体补偿腔的高度为 1.0 mm , 蒸汽槽道为 $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 的方形腔, 外壁为金属铝。图中可见, 工质的蒸发主要发生在多孔芯的加热表面附近 (储液器的设点温度为 35°C), 即多孔芯上表面以及侧壁附近。在不同的加热热流时, 汽液界面所处的位置不同, 在较小的加热热流 ($3.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2$) 时, 如图 2(a) 汽液界面位于多孔芯左界面附近, 未深入到多孔芯底部, 此时蒸发器能有效地工作, 即 CPL 能安全地工作。但当热流继续增大, 如图 2(b) 所示, 饱和温度等温线已深入到了液体补偿腔的下面中部附近, 此时通过侧壁导热传入下壁的热量继续增大, 使下壁反向加热多孔芯下部以及液体补偿腔内液体的热量增加, 可能导致多孔芯的下部以及液体补偿腔内产生气泡, 生成的气泡生长, 从而堵塞多孔芯内液体的正常供液, 从而使多孔芯出现干涸, 导致 CPL 的运行失败。因此, 侧壁导热传热的影响是小型及微型平板 CPL 系统设计优化过程中必须予以考虑的重要因素。

2.2 CPL 的优化设计

图 3 给出了液体补偿腔的高度对 CPL 蒸发器



(a) $q=3 \times 10^4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$



(b) $q=6 \times 10^4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

图 2 蒸发器内温度分布

Fig.2 Temperature distributings of evaporator

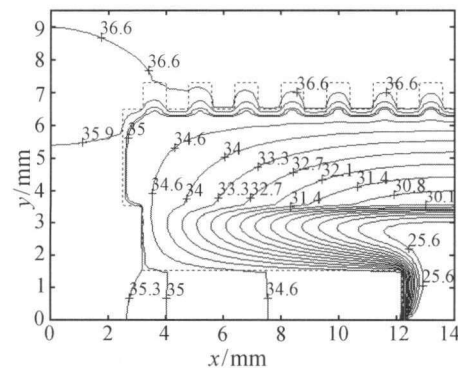


图 3 蒸发器内的温度分布 ($q=3 \times 10^4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)

Fig.3 Temperature distributings of evaporator

性能的影响, 图中加热热流 $q=3 \times 10^4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 液体补偿腔的高度增加为 2 mm 。从图中可见, 在相同的热负荷下, 增加液体补偿腔的高度后, 相对于图 2(a), 35°C 饱和等温线已经向下延伸到液体补偿腔底部, 此时底部金属壁面的反向加热能力增加, 在液体补偿腔底部可能形成气泡, 引起 CPL 运行失败。所以, 对于平板型 CPL 蒸发器应在保证液体流通通畅的情况下尽量减小液体补偿腔的高度, 从而提高 CPL 的传热能力。

图 4 给出了壁面厚度对蒸发器传热能力的影响, 计算中的蒸发器的几何尺寸如下: 长 \times 高为 26 mm \times 8.5 mm, 下壁厚度为 1.5 mm, 侧壁厚度 1.5 mm。图中可见, 即使在加热热流为 $6 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 相对于图 2(b) 所示的情况, 饱和温度等温线只延伸至液体补偿腔侧壁处, 未深入补偿腔的底部, 此时 CPL 能正常的工作, 因此减小侧壁以及下壁的厚度可以减小侧壁以及下壁导热的不良影响, 提高系统的侧壁效应传热极限, 提高 CPL 系统的传热能力。

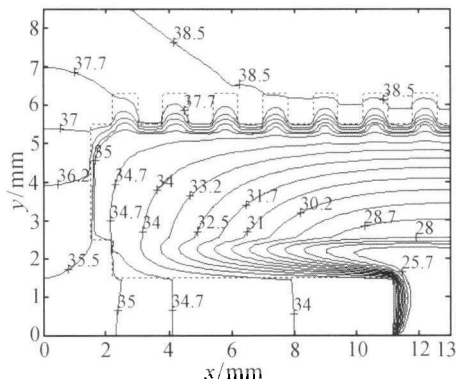
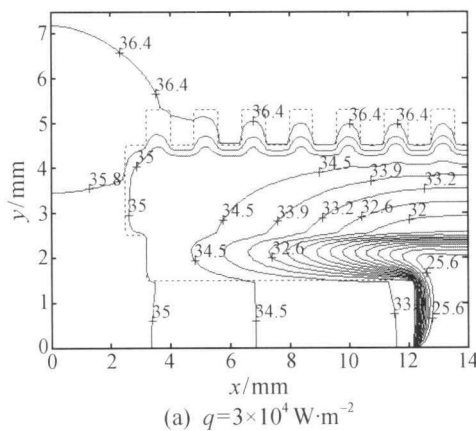


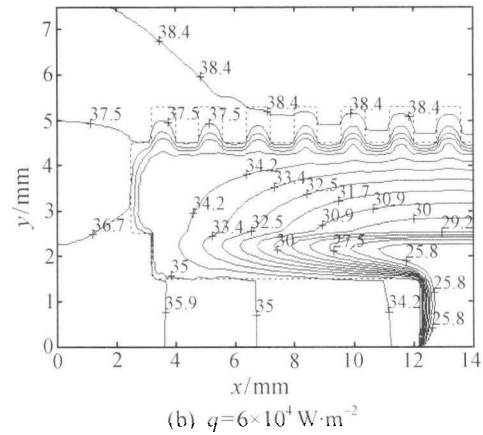
图 4 蒸发器内的温度分布 ($q=6 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig.4 Temperature distributings of evaporator

图 5 给出了多孔芯的高度对蒸发器传热能力的影响。



(a) $q=3 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$



(b) $q=6 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

图 5 蒸发器内的温度分布

Fig.5 Temperature distributings of evaporator

3 结 论

本文建立了小型平板 CPL 蒸发器的二维整场数学模型, 通过 SIMPLE 程序对其进行耦合求解, 数值结果表明, 由于平板 CPL 系统特殊的平板结构, 使侧壁导热引起侧壁及下壁反向加热液体补偿腔以及多孔芯内的液体, 在优化设计中必要予以重视。减小液体补偿腔的高度, 减小侧壁以及下壁的厚度以及增加毛细芯的高度可以提高 CPL 的传热能力。

参 考 文 献

- [1] Figus C, Le Bray Y, Prat M, et al. Heat and Mass Transfer with Phase Change in a Porous Structure Partially Heated: Continuum Model and Pore Network Simulation. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1999, 42(11): 2557-2569
- [2] Liu Z C, Liu W, Nakayama A. Flow and Heat Transfer Analysis in Porous Wick of CPL Evaporator Based on Field Synergy Principle. *Heat and Mass Transfer*. 2007, 43(12): 1273-1281
- [3] Wan Z M, Liu W, Tu Z K, et al. Conjugate Numerical Analysis of Flow and Heat Transfer with Phase Change in a Miniature Flat Plate CPL Evaporator. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2009, 52: 422-430
- [4] 陶文铨, 编著. 数值传热学. 第 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2003
TAO Wen-Quan. *Numerical Heat Transfer*. Second Edition. Xi'an: Publishing Company of Xi'an Jiao Tong University, 2003