

小型平板 CPL 蒸发器耦合计算及 优化设计研究

万忠民 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 蒸发器毛细多孔芯内汽液两相流动与传热的模型以及金属外壁和工质区的导热模型, 并进行耦合求解。分析了金属侧壁效应对蒸发器性能的影响, 提出小型平板 CPL 存在着侧壁效应传热极限。数值结果表明, 工质蒸发发生在多孔芯加热表面附近, 蒸发器采用单一金属外壁时由于侧壁效应导致系统传热极限低, 而上壁采用导热系数大, 侧壁及下壁采用导热系数小的新型结构能够明显的提高系统的传热能力, 同时使加热表面的温度维持在较低的水平。

关键词 CPL; 平板蒸发器; 多孔介质; 侧壁效应传热极限; 耦合数值计算;
中图分类号: TK124 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2007)Suppl.2-0017-04

CONJUGATE NUMERICAL SIMULATION AND PERFORMANCE OPTIMIZATION OF SMALL-SCALE FLAT CAPILLARY PUMPED LOOP EVAPORATOR

WAN Zhong-Min LIU Wei

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

Abstract The numerical model for the small-scale flat capillary pumped loop (CPL) evaporator is presented, which includes liquid and vapor flow, heat transfer and phase change in the porous wick structure and heat transfer in the fluid region and metallic wall, 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 liquid evaporation occurs near the heated wick structure surface, and the metallic wall of evaporator with single material leads to low side wall effect heat transfer limit. The small-scale flat evaporator with combined wall which is composed of upper wall with high thermal conductivity and side and bottom wall with low thermal conductivity can increase heat transfer capacity greatly and maintain a suitable temperature level on the heated surface.

Key words capillary pumped loop; flat evaporator; porous media; side wall effect heat transfer limit; conjugate numerical computation

1 前 言

蒸发器是毛细抽吸两相流体回路 (CPL) 的关键部件之一, 因此对蒸发器的研究显得非常重要^[1]。近年来对 CPL 蒸发器的研究取得一定的进展, 许多学者提出了各种数学模型, Figus 用饱和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^[2], 韩延民等用数值方法

研究了 CPL 蒸发器启动与变工况运行过程两相温度场与压力场的分布特性^[3]。但是这些研究都是针对蒸发器多孔芯的局部单元结构进行数学建模, 没有考虑蒸发器金属壁的影响, 这显然不能真实的反映 CPL 蒸发器的工作过程, 特别对于小型平板 CPL 蒸发器, 由于金属外壁的导热系数大, 热量从蒸发器的侧壁导入下壁加热多孔芯底部及液体补偿槽道中

收稿日期: 2007-01-17; 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.2007CB206901)

作者简介: 万忠民 (1977-), 男, 重庆人, 博士研究生, 主要从事航天器热控技术及高热流密度电子器件散热的研究。

的液体,引起该处出现局部过热,产生气泡,导致CPL系统运行失败,因此需要对蒸发器进行整体研究。本文建立了CPL蒸发器的整场数学模型,并利用SIMPLE算法对小型平板CPL蒸发器进行了整场耦合求解,并根据数值计算结果对小型平板CPL的蒸发器进行了优化设计,大大提高了系统的传热能力。

2 蒸发器的数学模型

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。考虑CPL蒸发器的对称性,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。为了简化模型,对蒸汽槽道假设蒸汽能迅速导出,蒸汽槽道内热量传递主要以导热方式进行,故对区域1,2,5建立导热微分方程为:

$$(\rho c)_i \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_i \nabla T)$$

区域4为多孔毛细芯,在建立多孔介质数学模型时,提出如下假设:(1)多孔孔隙内蒸汽的压力为饱和压力;(2)毛细多孔芯处于局部热力学平衡态;(3)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,分别对多孔区的液相和汽相建立如下控制方程:

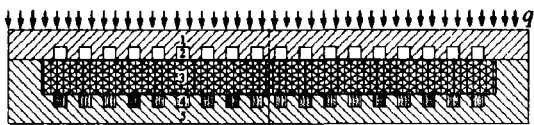


图1 平板CPL蒸发器结构示意图

连续方程:

$$\frac{\partial(\varepsilon_\alpha \rho_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_\alpha \vec{V}_\alpha) = 0$$

动量方程:

$$\frac{\rho_\alpha}{\varepsilon_\alpha} \frac{\partial \vec{V}_\alpha}{\partial t} + \frac{\rho_\alpha}{\varepsilon_\alpha^2} \nabla \cdot (\vec{V}_\alpha \cdot \nabla) \vec{V}_\alpha = -\nabla p -$$

$$\left(\frac{\mu_\alpha}{K} + B \frac{C|\vec{V}|}{\sqrt{K}} \right) \vec{V}_\alpha + \frac{\mu_\alpha}{\varepsilon_\alpha} \nabla^2 \vec{V}_\alpha$$

能量方程:

$$(\overline{\rho c})_\alpha \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_\alpha c_\alpha (\vec{V}_\alpha \cdot \nabla) T = \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}\alpha} \nabla T)$$

汽相时下标 α 为 v , $B=0$;液相时下标 α 为 l , $B=1$ 。

对液体补偿腔区域4,由于回流冷凝液直接流入此处,因此取该处的温度为回流液温度,即:

$$T = T_{\text{in}}$$

汽液相变界面:

$$T_l = T_v = T_{\text{sat}}, \rho_l \vec{V}_l = \rho_v \vec{V}_v, P_c = P_v - P_l$$

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

式中, \vec{V} 为速度矢量; T 为温度; T_{in} 为CPL系统回流工质温度; P 为压力; P_c 为毛细抽吸力; ε 为相含量; ρ 为密度; c 为比热容; μ 为流体的动力粘度; K 为流体的渗流参数; λ 为热传导系数; $\lambda_{\text{eff}l}$, $\lambda_{\text{eff}v}$ 为多孔芯的有效导热系数; 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; $i, j, 1, 2, 3, 4, 5$ 表示各区域; \vec{n} 为单位法向量。其中, $\lambda_{\text{eff}l} = \lambda_l \varepsilon_l + (1 - \varepsilon_l) \lambda_s$, $\lambda_{\text{eff}v} = \lambda_v \varepsilon_v + (1 - \varepsilon_v) \lambda_s$

3 计算结果讨论及蒸发器优化设计

在数值计算中,蒸发器的几何尺寸如下:长 \times 厚为43 mm \times 10 mm,金属壁面厚度为3 mm,多孔芯厚度为4 mm,蒸汽槽道、液体补偿腔为1 mm \times 1 mm的方形腔。选取甲醇为工质。其它参数: $T_{\text{in}} = 32^\circ\text{C}$, $T_{\text{sat}} = 35^\circ\text{C}$ 。

利用SIMPLE算法对模型进行求解^[4],考虑与甲醇的相容性。图2、3所示为小型平板CPL加热热流为80000 W/m²,外壁分别采用铜、不锈钢时蒸发器温度场分布。从图2、3可见,由于加热翅片与甲醇蒸汽导热系数相差很大,使温度分布在多孔芯上表面附近呈现出与加热翅片形状相似的波浪型曲线。同时,甲醇工质的蒸发换热主要发生在多孔芯上表面^[5]。由于侧壁金属的导热系数很大,在加热热流为80000 W/m²时,侧壁导热影响已非常明显,在 $x=3$ mm处,汽液界面已深入到多孔芯底部,这对CPL的正常运行非常不利,随着热流密度的继续增大,导致下壁的温度升高,使下壁加热多孔芯下部以及液体补偿腔内液体,导致多孔芯的下部以及液体补偿腔内产生气泡,随着加热的继续进行,生成的气泡生长,最后堵塞多孔芯,使多孔芯内加热面供液不足,导致CPL运行失败。因此,对小型平板CPL系统,侧壁导热的影响使系统存在一个最大热流极限,在此定义为侧壁效应传热极限。侧壁效应传热极限相对于平板CPL的其它传热极限如毛细限、粘性限、声速限、携带限以及沸腾限在有效的工作温度下都小,因此侧壁效应传热极限是影

响平板 CPL 传热能力的重要的极限, 特别是对小型平板 CPL 系统, 因此, 对小型平板 CPL 系统, 提高侧壁效应传热极限对提高系统的传热能力非常重要。

采用不锈钢时, 下壁绝大多数区域对多孔芯底部液体以及液体槽道液体都没有加热, 有利于 CPL 的正常运行。

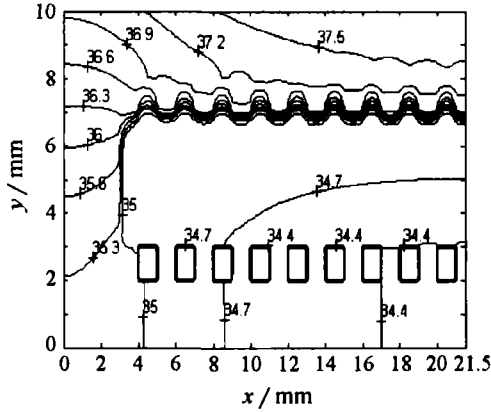


图 2 金属外壁采用铜时蒸发器温度场

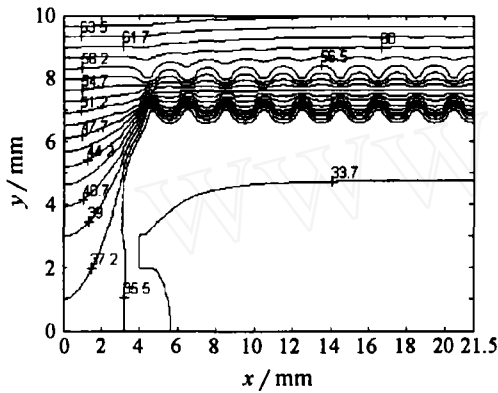


图 3 金属外壁采用不锈钢时蒸发器温度场

图 4 所示加热热流为 80000 W/m^2 时小型平板 CPL 蒸发器上表面的温度分布。图 5 所示加热热流为 80000 W/m^2 时蒸发器下表面的温度分布。图中, 曲线 1、2 分别表示金属外壁 1 采用铜与不锈钢时的温度分布。从图 4 可见, 在相同的热流密度下, 采用铜外壁时, 加热壁面的温度较低, 维持在 37°C 左右; 采用不锈钢壁面时, 温升很高, 壁面温度维持在 66°C 左右, 此时蒸发器的热阻较大, 不利于热量的传递, 同时使待冷却器件的工作环境恶化。图 5 可知, 采用铜外壁时, 下壁面的温度较高, 在 35°C 左右, 说明从侧壁传入下壁的热量较大, 下壁处于加热多孔芯底部以及液体补偿槽道中液体的状态, 这对 CPL 的运行非常不利。采用不锈钢外壁时, 在侧壁附近, 下壁温度衰减较快, 最后趋近 32.3°C , 在 $x > 4 \text{ mm}$ 时, 下壁面温度小于采用铜时温度, 所以

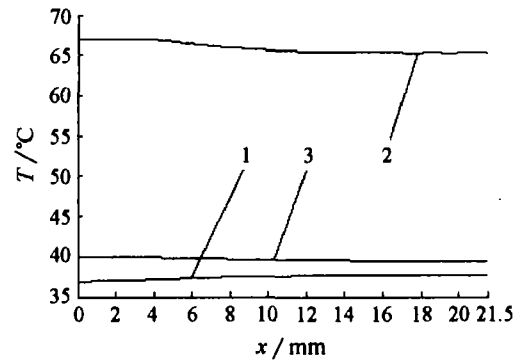


图 4 蒸发器 $y = 10 \text{ mm}$ 的温度分布

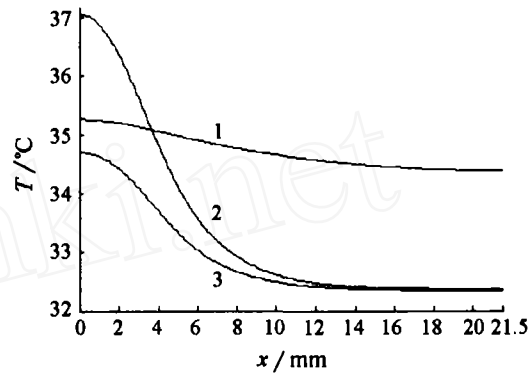
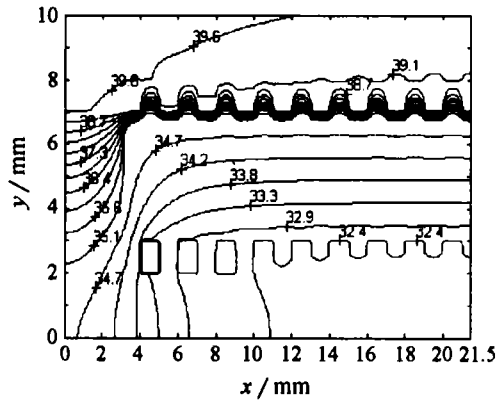
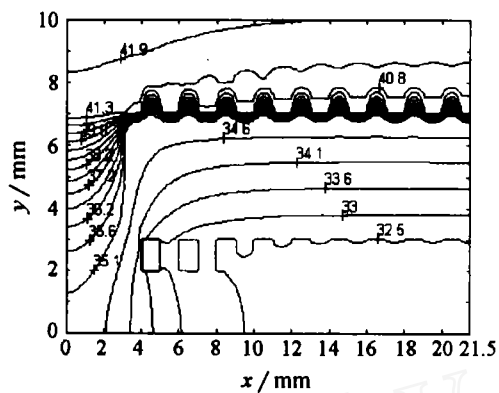


图 5 蒸发器 $y = 0 \text{ mm}$ 的温度分布

考虑上述采用铜和不锈钢外壁的优缺点, 提出一种新的小型平板 CPL 蒸发器结构, 即蒸发器上壁面采用导热系数较大的材料, 侧壁和下壁采用导热系数较小的材料。本文以区域 1 采用铜, 5 区域采用不锈钢为计算实例来说明。

图 4、5 中曲线 3 表示新结构的温度分布, 可见, 新结构上壁面温度比采用铜时稍高, 但比采用不锈钢时低的多, 加热表面可以维持在一个适合的温度水平; 下壁面温度比单独采用铜和不锈钢都低, 可见, 新型结构可以减小侧壁效应, 提高小型平板 CPL 系统的侧壁效应传热极限。图 6 所示为蒸发器新型结构在加热热流为 80000 W/m^2 时的温度分布, 图中可见, 在 $y = 3 \text{ mm}$ 界面处, 汽液界面并没有深入到多孔芯下部。图 7 所示为蒸发器新型结构在加热热流为 150000 W/m^2 时的温度分布, 可见, 在 $y = 3 \text{ mm}$ 界面处, 汽液界面仍然没有深入到多孔芯下部, 因此小型平板 CPL 新型蒸发器结构能明显的改善蒸发器的工作能力, 提高了侧壁效应传热极限, 即提高了系统的最大传热热流。

图6 80000 W/m² 蒸发器的温度分布图7 150000 W/m² 蒸发器的温度分布

4 结论

针对小型平板 CPL 的特点, 分析了蒸发器金属壁面所形成的侧壁效应对多孔芯传热传质的影响, 提出了小型平板 CPL 存在着侧壁效应传热极限,

它对 CPL 传热能力的影响非常大。基于体积平均法建立了毛细多孔芯的二维汽液两相饱和多孔介质模型, 同时对金属壁面以及工质区分别建立了导热模型, 并进行了耦合求解。数值研究表明, 工质蒸发主要发生在多孔芯加热表面附近, 不同的金属外壁对蒸发器的传热传质有着不同的影响。蒸发器采用单一金属外壁, 侧壁效应的影响较严重, 侧壁效应传热极限较低, 系统的传热能力较小; 蒸发器加热表面采用导热系数较大的金属, 侧壁与下壁采用导热系数较小的金属, 可以明显提高小型平板 CPL 的传热能力, 使蒸发器加热表面的温度维持在合适的水平, 使其能适应高热流密度散热。

参 考 文 献

- [1] Chen Pin Chih, Lin Wei Keng. The Application of Capillary Pumped Loop for Cooling of Electronic Components. *Applied Thermal Engineering*, 2001, 21(11): 1739-1754
- [2] 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
- [3] Han Yan-Min, Liu Wei, Huang Xiao-Ming. The Numerical Simulation for the Unsteady Heat and Mass Transfer Process in Capillary Pumped Loops Evaporator. *Journal of Astronautics*, 2003, 24(4): 397-403
- [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
- [5] Zhao T S, Liao Q. On Capillary-Driven Flow and Phase-Change Heat Transfer in a Porous Structure Heated by a Finned Surface: Measurements and Modeling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43(4): 1141-1155