

小型平板 CPL 蒸发器预热驱动过程研究

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 分析了小型平板 CPL 蒸发器毛细多孔芯上下表面温差对启动的影响, 建立了蒸发器满液启动的数学模型。结果表明, 对不同的金属外壁, 多孔芯上下表面平均温差存在一个最大值, 铜壁时, 温差较小, 侧壁效应明显; 采用不锈钢壁及上壁铜、侧壁下壁不锈钢时, 温差大, 侧壁效应小; 采用不锈钢外壁时蒸发器加热面的温度过高。上壁采用导热系数大、侧壁下壁为导热系数小的金属对小型平板 CPL 蒸发器的正常启动以及降低加热表面温度非常有利。

关键词 CPL; 小型; 平板蒸发器; 启动; 预热过程

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2007)05-0826-03

INVESTIGATION ON STARTUP PROCESS CHARACTERISTICS 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 influence of temperature difference between upper surface and bottom surface of wick structure on startup process of the small-scale flat capillary pumped loop evaporator is analyzed, and the unsteady heat transfer model of evaporator in the fully-flooded startup stage is presented. The numerical results show the average temperature difference between upper surface and bottom surface of wick has a steady maximum value corresponding to different material metallic wall. For the copper wall, the average temperature difference is small, and the effect of heat conduction of side wall on the startup process of evaporator is great. For the stainless steel wall, the average temperature difference is large, but the temperature of the heated surface of evaporator is high. For the combined wall which includes upper copper wall and side and bottom stainless steel wall, the average temperature difference is large and the heated surface maintains a suitable temperature level. The combined wall is advantageous for successful startup of small-scale flat CPL evaporator and decreasing the heated surface temperature of evaporator.

Key words capillary pumped loop; small-scale; flat evaporator; startup; preheating process

1 引 言

毛细抽吸两相环路 (CPL) 是一种采用相变的传热技术, 由于具有热传输能力大, 控温精度高, 等温性强, 无运动部件等优点, 成为航空高新领域热控技术及电子器件高热流密度散热的有效方式^[1,2]。许多学者对 CPL 蒸发器稳定运行时的局部结构建立了理论模型^[3,4], 但是却很少对蒸发器启动过程进行研究。对小型平板 CPL 蒸发器, 热量通过侧壁导入下壁较多, 使下壁加热多孔芯底部液体, 导致 CPL 启动失败。本文建立了小型平板 CPL 满液启动过程的非稳态数学模型, 分析了毛细多孔芯上下表面温

差以及侧壁效应对 CPL 蒸发器启动的影响, 同时研究了不同的金属外壁材料对蒸发器预热启动过程的影响, 其结果为小型平板 CPL 蒸发器的优化设计提供了理论基础。

2 小型平板 CPL 预热启动过程的数学模型

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

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工作。

壁 2。为了建立小型平板 CPL 预热阶段的非稳态传热模型, 提出了如下假设: (1) CPL 蒸发器满液启动; (2) CPL 蒸发器表面受到均匀热流的作用; (3) 预热启动阶段, 由于汽泡未产生, 故传热方式主要是导热, 忽略对流影响。

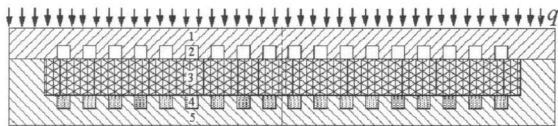


图 1 平板 CPL 蒸发器结构计算模型

考虑到蒸发器的对称性, 选取一半作为研究对象, 以左下角顶点为坐标原点。依据上述假设, 对各部分建立非稳态导热微分方程:

$$(\rho c)_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \right)$$

式中, ρc 为热容, λ 为导热系数, T 为温度, t 为时间, q 为加热热流; 下标 $i, j=1, 2, 3, 4, 5$ 表示区域代号。

初始条件为: $t=0, T_i(x, y) = t_0$

边界条件: 上壁面为均匀热流 q , 左、下边界为绝热边界, 右为对称边界。

多孔芯等效导热系数及等效热容:

$$\lambda_3 = \lambda_s(1 - \varepsilon) + \lambda_f \varepsilon, (\rho c)_3 = (\rho c)_s(1 - \varepsilon) + (\rho c)_f \varepsilon$$

式中 ε 为多孔介质的孔隙率; 下标 s 表示多孔芯材料, f 表示液体工质。

3 计算结果分析

在数值计算中, 小型平板 CPL 蒸发器的几何尺寸为长 \times 高 $43 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 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 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的方形腔, 选取甲醇为工质。

选取毛细多孔芯上表面中心点 a 为分析对象, a 点代表了启动过程中多孔芯内温度上升最快点, 是最有可能先蒸发的点。图 2 所示为 $q=50000 \text{ W/m}^2$ 不同的外壁材料时 a 点温度 T_a 随时间的变化, 图中, 曲线 1、2、3(曲线 1、2、3 意义下同) 分别表示蒸发器采用铜外壁、不锈钢外壁以及区域 1 采用铜, 区域 5 采用不锈钢组合结构(下同)的情况。可见, 采用铜外壁时 a 点温度上升比采用不锈钢以及组合结构慢, 采用组合结构外壁升温比不锈钢外壁时稍快。假设 T_a 达到 55°C 时 a 点开始汽化, 采用铜外壁所需的时间为 21.6 s , 采用不锈钢外壁时所需的时间为 19.6 s , 采用组合结构外壁时所需的

时间为 19.5 s , 可知, 对小型平板 CPL, 预热所需的时间较短。

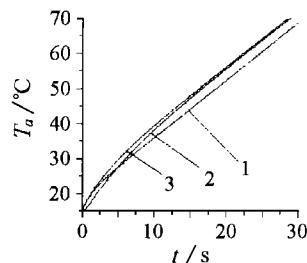


图 2 T_a 随时间变化关系

图 3 所示为 $T_a=55^\circ\text{C}$ 时, 采用不同的外壁材料时蒸发器内温度场分布。图 3(a) 中铜壁面温度分布, 图 3(b) 不锈钢壁面温度分布, 图 3(c) 组合结构的温度分布。可见, 采用铜外壁时, 加热表面的温度相对较低; 侧壁效应已比较突出, 在靠近壁面多孔芯区域, 等温线已明显的向下弯曲, 深入多孔芯下部, 通过侧壁传导的热量加热多孔芯下部以及液体补偿腔内液体, 这对小型 CPL 的启动不利。b, c 可知, 等温线比较平缓, 侧壁效应不明显; 而采用不锈钢表面时, 加热面的温度很高, 这对待冷却器件不利。

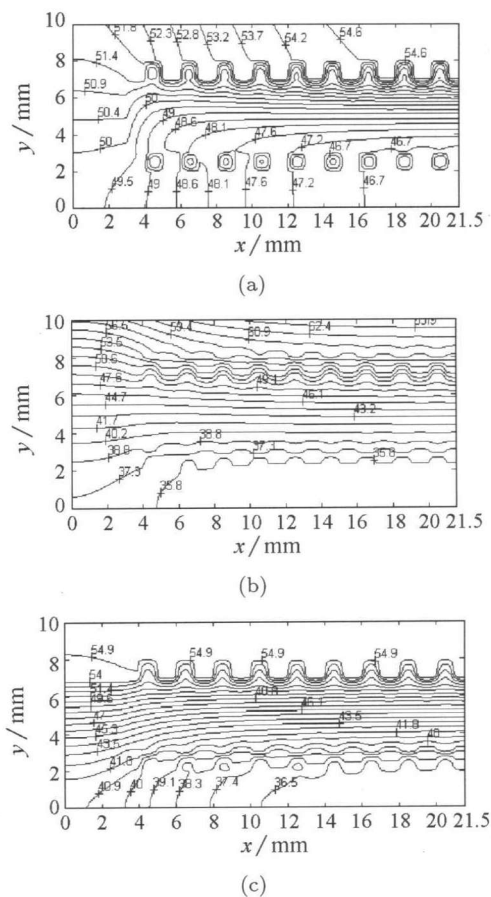


图 3 不同外壁材料蒸发器的温度场分布

在 CPL 蒸发器的预热启动过程中, 汽泡形成需要有一定液体过热度及汽化核心, 多孔芯内有众多细小的凹陷, 这些地方最有可能形成汽化核心。若毛细多孔芯上下表面的温差相差不大, 可能使多孔芯区域液体都处于过热, 由于实际多孔芯的复杂性, 在其内部可能存在较大的存气凹穴, 这些地方在较小的液体过热度下也能形成汽泡, 汽泡可能会推动液体进入蒸汽管道或者液体管道, 从而使蒸汽进入蒸汽槽道或液体补偿腔, 从而使蒸发器供液不足, 导致 CPL 系统启动失败。可见预热启动过程的瞬态温度场分布对 CPL 启动成功与否有着重要的意义, 大的多孔芯上下表面温差可以使 CPL 顺利启动。

多孔芯上下表面的平均温差 $\Delta \bar{T}$ 定义为上壁面平均温度与下壁面平均温度之差。图 4 为 $q=50000 \text{ W/m}^2$ 不同蒸发器外壁时平均温差随时间变化关系。可见, 不同的外壁材料, 平均温差都趋近于不同的定值, 达到定值所需的时间不一样。对于铜外壁, 达到稳定温差的时间很短, 为 6 s 左右, 且平均温差较小, 为 5.6°C ; 采用不锈钢外壁时达到稳定温差所需的时间最长, 大约为 27 s, 平均温差较大, 为 15°C 左右; 采用组合结构外壁时, 达到稳定温差的时间大约为 15 s, 平均温差为 14.5°C 左右。可知, 采用不锈钢外壁以及组合结构外壁所形成的平均温差较大, 对 CPL 的启动更有利。图 5 所示为 $q=50000 \text{ W/m}^2$, T_a 达到 55°C 时, 不同外壁材料多孔芯上下表面的温差 T 随 x 变化关系, 图中波浪曲线是由于蒸汽槽道及液体补偿腔中液体导热系数小所形成的。可知, 采用铜外壁时在侧壁附近温差很小, 最低小于 2°C , 因此汽化核心在侧壁附近除了在上部形成外, 在多孔芯下部区域形成汽化核心的可能性很大, 对 CPL 的启动不利; 采用不锈钢壁面和组合结构时, 侧壁处的温差也较大, 有利于 CPL 的启动。为了提高多孔芯上下表面的温差, 减小侧面效应, 外壁材料须采用导热系数较小的金属材料, 计算表明, 采用不锈钢以及组合结构更有利于 CPL 的启动。

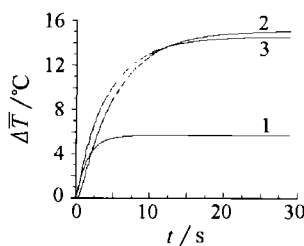


图 4 平均温差随时间变化

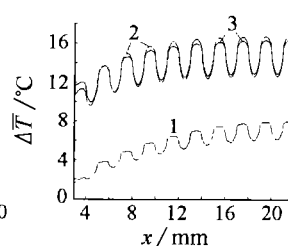


图 5 多孔芯上下表面的温差

图 6 所示为加热热流 $q=50000 \text{ W/m}^2$, T_a 达

到 55°C , 蒸发器不同外壁材料时加热表面温度的分布。可知, 采用单一材料为外壁时, 表面温度随 x 变化的梯度较大, 采用组合材料时温度变化平稳; 采用铜与组合材料作外壁时, 加热壁温度较低; 采用不锈钢外壁时温度高, 最高达到 65.4°C , 不利于待冷却器件的冷却, 甚至使器件不能正常工作。为了降低加热表面的温度, 提高被冷却器件的效率, 须选用导热系数较大金属, 特别是加热壁面。

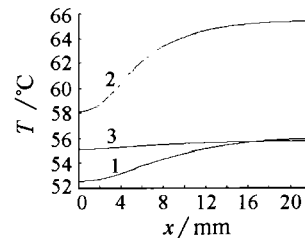


图 6 蒸发器上表面的温度分布

4 结 论

建立了小型平板 CPL 满液启动过程的非稳态数学模型, 分析了毛细多孔芯上下表面温差对 CPL 启动的影响, 大的温差可以提高 CPL 蒸发器启动的可能性。研究了导热系数较大的金属铜和导热系数较小的金属不锈钢以及它们的组合结构 (区域 1 采用铜, 区域 2 采用不锈钢) 对蒸发器预热启动过程的影响。数值结果表明, 小型平板 CPL 蒸发器的启动很快。在一定的热流密度下, 采用不同的金属外壁材料, 蒸发器多孔芯上下表面平均温差存在一个稳定的最大值, 铜外壁时, 平均温差较小, 且侧壁效应很明显, 对 CPL 的启动不利; 而采用不锈钢及组合结构时, 平均温差大, 侧壁效应很小, 有利于 CPL 的正常启动。同时, 采用不锈钢外壁时蒸发器加热面的温度过高, 不利于被冷却器件的冷却。综合考虑上述因素, 上壁采用导热系数大的金属, 侧壁及下壁采用导热系数小的金属对于小型平板 CPL 蒸发器的正常启动以及降低加热表面温度非常有利。

参 考 文 献

- [1] Pouzet E, Joly J L, Platel V, et al. Dynamic Response of a Capillary Pumped Loop Subjected to Various Heat Load Transients. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(10): 2293-2316
- [2] 曲伟, 伊勇, 侯增祺. 毛细抽吸两相流体回路 (CPL) 的控温特性和极限特性研究. *节能技术*, 1998, (2): 9-13
- [3] Chen PinChih, Lin WeiKeng. The Application of Capillary Pumped Loop for Cooling of Electronic Components. *Applied Thermal Engineering*, 2001, 21(11): 1739-1754
- [4] 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