

研究论文

平板式 CPL 蒸发器启动特性研究*

刘志春 刘伟 宰军 邓芳芳

(华中科技大学能源与动力工程学院 武汉 430074)

摘要 在对 CPL 启动过程分析的基础上,采用数值分析方法研究了平板式蒸发器的启动特征,并将数值计算结果和试验结果进行了比较,结果表明计算结果与实验结果较吻合。还研究了不同的平板式蒸发器结构对系统启动性能的影响,而且提出了改善 CPL 系统蒸发器的启动性能以及增强系统的稳定性的一些方法及措施。

关键词 工程热物理;平板式 CPL;数值计算;蒸发器;冷却;启动性能

Study on Startup Performance of Flat - type of CPL Evaporator

Liu Zhichun, Liu Wei, Zai Jun and Deng Fangfang

School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Hubei, Wuhan, 430074, China

Abstract The startup process of CPL (Capillary pumped loop) was analyzed. Then a mathematical and physical model concerning CPL evaporator startup was established and the numerical method was applied to obtain the startup performance. A flat type CPL test-bed was designed and built. The results show that the numerical results agree well with the experimental data. In addition, the effects of different evaporator configurations on the startup characteristics were investigated and some methods and measures were discussed and presented to improve the startup performance and enhance the CPL operating stability.

Keywords Engineering thermophysics; Flat type of CPL; Numerical method; Evaporator; Cooling; Startup performance

1 引言

毛细抽吸两相流体回路(CPL)具有传热效率高、可靠性好、耗能低、传输距离长等优点,成为了航天器热控以及电子装置冷却等方面的理想的热控系统,在国内外得到了广泛的研究。地面及空间试验均发现,蒸发器启动困难是影响 CPL 性能的一个重要的因素,因而了解蒸发器在启动过程中温度分布及变化情况以及启动特性对提高和改善 CPL 的性能有十分重要的意义^[1-3]。Tim J LaClair 等^[3]、曲伟等^[4]分析了圆柱型 CPL 蒸发器启动预热情况,将 CPL 启动预热阶段看作一个非稳态导热过程,建立了数学物理模型,给出了分析解,在他们的研究中,忽略了蒸汽槽道的影响,曲伟等^[2]还将理论解和试验结果进行了比较,二者比较符合。平板式蒸发器由于其结构的特点,其启动特性有不同于管式蒸发器的特点,但是国内外还尚未见对其启动进行分析,因而论文将对平板式蒸发器的启动进行理论分析,并将理论分析结果和试验结果进行分析比较,从而提出改善 CPL 系统蒸发器启动性能以及增强系统稳定性能的一些措施。

2 数学物理模型

实验研究一种新型的平板式 CPL,其系统构成如图 1 所示。所研究的平板式蒸发器结构如图 2 所示。蒸发器主要四个部分构成:蒸发器壁面,蒸汽槽道,毛细芯,液体槽道。工作时蒸发器上部承受热负荷,四周其余部分为对流边界,毛细芯上下壁面分别和蒸汽槽道和液体槽道紧密接触,蒸发器启动之后产生的蒸汽通过蒸汽槽道排出。

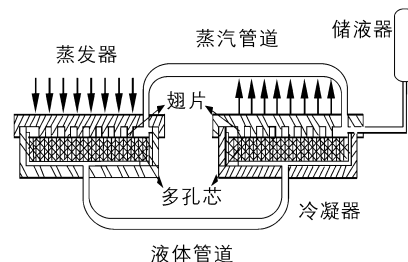


图 1 平均式 CPL 系统构成图

为了建立蒸发器启动过程的数学模型,根据蒸发器在启动过程中的特点,提出几点假设:1)热负荷均匀作用在蒸发器上表面;2)材料均为各向同性;3)

* 国家重点基础研究发展规划资助项目(C2000026303)。

收稿日期:2005 年 6 月 2 日

除了液态工质,其他材料均为恒定热物性;4)启动前,蒸发器液体槽道、蒸汽槽道以及毛细芯内均全部为液体工质充满;5)蒸发器在未达到储液器设定温度之前,不产生蒸汽。

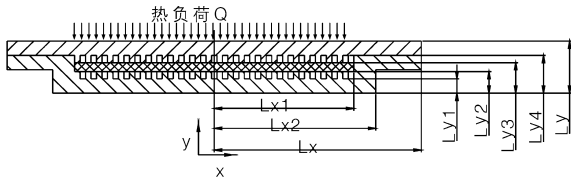


图 2 平板式蒸发器结构

通过这些假设,可将蒸发器的启动过程用一个非稳态导热过程描述,

$$i c_{pi} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(i \frac{\partial T_i}{\partial y} \right) \quad (1)$$

根据文献^[5],对于槽道结构的孔隙率,有效导热系数可用并联的模型计算,因而液体槽道和蒸汽槽道的有效导热系数和孔隙率分别为

$$i = (w_l i_l + w_s i_s) / (w_l + w_s); \quad i = w_l / (w_l + w_s) \quad (2)$$

对于丝网结构毛细芯,孔隙率和有效导热均可分别表示为

$$\epsilon = 1 - \frac{F M d}{1016}; \quad \epsilon = \epsilon_l + (1 - \epsilon) \epsilon_{wick} \quad (3)$$

初始条件 $t=0 \quad T = T_0$

边界条件:各个复合层之间 $y = ly_i$

$$i_1 (\partial T_i / \partial y_i) = i_{i+1} (\partial T_{i+1} / \partial y_{i+1}) \quad (4)$$

热流边界: $-lx_1 < x < lx_1: \quad \partial T_1 / \partial y_1 = \dot{Q}$

$x = \pm lx_1:$

$$ly_1 < y < ly_2 \quad i_1 (\partial T_1 / \partial x_1) = i_2 (\partial T_2 / \partial y_2);$$

$$ly_2 < y < ly_3 \quad i_1 (\partial T_1 / \partial x_1) = i_3 (\partial T_3 / \partial y_3);$$

$$ly_3 < y < ly_4 \quad i_1 (\partial T_1 / \partial x_1) = i_4 (\partial T_4 / \partial y_4);$$

其他边界条件:DEFGHIIA 对流边界条件:

$$i (\partial T_i / \partial x_i) = h (T_w - T_f)$$

其中 $(c_p)_m = (1 - i) (c_p)_s + i (c_p)_l$

上式中, $i = 1, 2, 3, 4$ 分别表示蒸发器壁面,液体槽道,毛细芯,蒸汽槽道。 i_l, i_s 分别表示各个复合层的等效空隙率、等效导热系数,下标 l, s 分别表示液相、固相。

3 数值求解过程

在研究中,将各个区域作为一个统一的求解域,各区域之间采用边界条件实现连续耦合,采用有限容积法离散微分方程,用 TDMA 法求解微分方程组,边界条件采用附加源项法处理。

4 实验简介

图 3 是实验设计的平板型的 CPL 实验系统,主要部件包括蒸发器、冷凝器、储液器、液体管道和蒸汽管道。采用一个电阻为 40 的加热器对蒸发器加热,用来模拟需要散热的部件;采用盐水机组控制冷凝器的热沉;对储液器进行加热或制冷,控制系统的温度。采用甲醇作工质,蒸发器采用 500 目的不锈钢网作为毛细芯,冷凝器采用 250 目的铜网作为毛细芯多孔芯,蒸发器壁面材料采用黄铜。

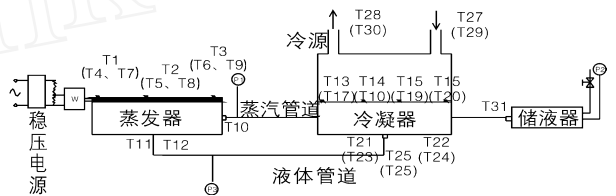


图 3 平板式 CPL 实验系统

用 31 个 T 型热电偶实时监测试验系统各个部位的温度变化,其中蒸发器上表面布置 9 个点,每个冷凝器表面布置了 4 个点;采用 3 个压力传感器来实时监测蒸发器、冷凝器以及储液器的压力变化。所有的测量数据都通过美国 KEITHLEY 公司的 KEITHLEY 2700 数据采集与控制系统实现。

5 结果分析

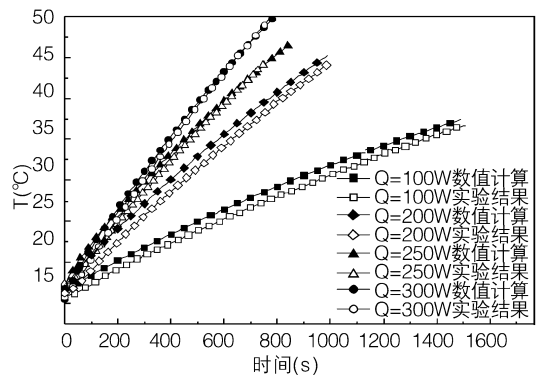


图 4 不同热负荷下 CPL 启动过程温度升情况

图 4 给出了 CPL 在不同热负荷启动过程中蒸发器壁面温度变化的数值模拟与实验结果曲线。图中, T_{up} 表示上壁面温度, T_{down} 表示下壁面温度, $T_{liquidG}$ 表示液体槽道温度。数值模拟以计算的温度值达到储液器的设定温度作为结束的标志,此时系统中液体工质开始汽化,启动预热阶段结束。从图 4 中可以看出,数值模拟的结果和实验结果比较吻合。图 5 给出了热负荷

$Q = 300W, t = 750s$ 时蒸发器温度场分布图,从图中可以看出,在启动过程中,蒸发器下表面的温度也随着上表面的温度升高,而且上下温差在 5 以内,这是由于平板式 CPL 蒸发器壁面采用导热系数比较大的黄铜、毛细芯采用不锈钢金属丝网,当热负荷作用在上表面时,热量通过蒸发器壁面以及毛细芯传递到了下表面,致使下表面温度升高。由于蒸发器在启动过程中,液体往往是过热的,如果下表面以及液体槽道中的液体温度过高,超过了蒸发器内的饱和温度,则有可能在蒸发器液体槽道内出现汽泡,这样将会导致蒸发器的启动失败;此外蒸发器运行过程中,如果热负荷变化过大,将会使蒸汽穿过毛细芯进入液体槽道,如果液体槽道的温度超过蒸汽的饱和温度,则汽泡不会破裂,反而会会长大,导致蒸发器的烧干,系统运行失败。为了改善蒸发器的启动特性,须采取一些措施,避免或者削弱这些现象的发生。

图 6 给出了蒸发器采用不同的毛细芯材料启动过程中温度变化情况,从图中可以看出,超高分子聚乙烯(UHMW)毛细芯与不锈钢毛细芯相比,上表面的温升速率要比不锈钢毛细芯快,但是下表面的温度却比其低。图 6(d) 给出了热负荷 $Q = 300W, t = 750s$ 时,蒸发器内温度场的分布,可以看出,采用 UHMW 毛细芯之后,由于 UHMW 材料的导热系数仅为 $0.49W/(m \cdot ^\circ C)$,施加到上表面的热量很难传递到蒸发器液体槽道以及下表面,因而蒸发器的温度分布有了较大的变化,从而缩短了蒸发器的启动时间,改善了蒸发器的启动性能。图 7 给出了蒸发器受热面采用黄铜、底座采用不锈钢 100W 启动过程中上、下表面温度变化情况,图 8 给出了蒸发器上下壁面间采用 3mm 厚 UHMW 隔热层后启动过程温升情况。从图 7~8 可以看出,采取这两种方式之后,均可以提高蒸发器加热面的温升速率,降低液体入口侧的温度,使启动过程蒸发器的温度分布大为改善,因而都可以作为改善蒸发器启动性能的措施。

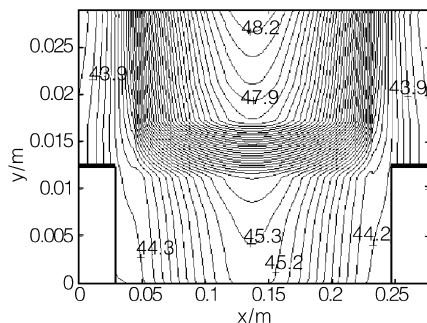
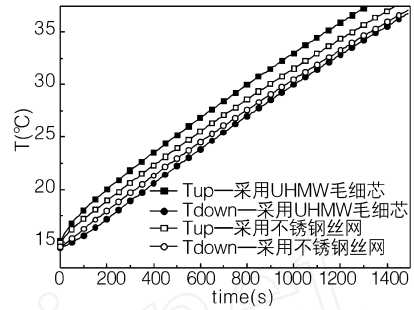
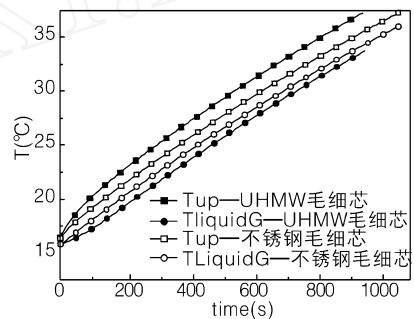


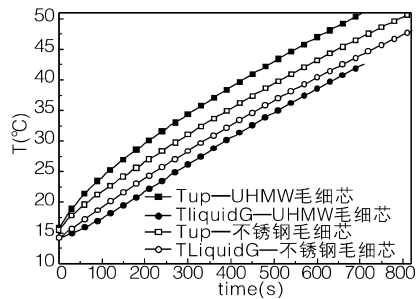
图 5 $Q = 300W, t = 750s$ 时温度场分布



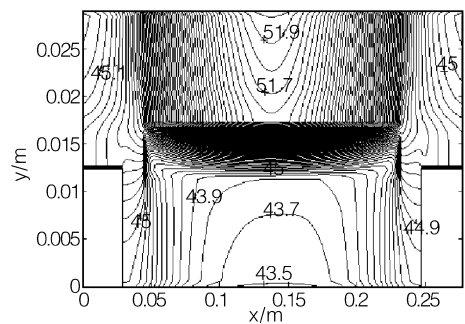
(a) $Q = 100W$



(b) $Q = 200W$



(c) $Q = 300W$



(d) 采用 UHMW 毛细芯, $Q = 300W, t = 750s$ 蒸发器温度分布
图 6 不同毛细芯材料对系统启动性能的影响

6 结论

对平板式蒸发器的启动过程进行了理论分析,并将理论结果和实验结果进行了比较分析,二者比较吻合。实验结果和计算结果均发现,平板式蒸发

器由于本身结构的特点,致使蒸发器液体入口侧的温度过高,影响了系统的启动以及运行性能。为了改善蒸发器的启动性能,研究了平板式蒸发器不同的结构对系统启动性能的影响,提出了改善 CPL 系统蒸发器的启动性能以及增强系统的稳定性的一些方法及措施。得出以下结论:

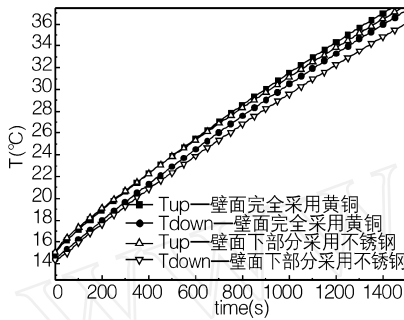


图 7 不同壁面材料 $Q = 100W$ 启动

1) 由于蒸发器在启动之前其内部全部充满液体工质,因而可以用一个瞬态导热方程来描述蒸发器的启动过程,建立的模型时采用等效参数法考虑了蒸汽槽道以及液体槽道的作用,因而所建立的模型比文献[3]更为全面。

2) 采用导热系数较小的 UHM 作为毛细芯材料可以使 CPL 的启动时间缩短,削弱加热表面向液体入口处的导热,改善 CPL 的启动以及运行性能。

3) 加热表面采用导热系数高的金属材料,而液体入口侧采用导热系数较低的材料也可以改善蒸发器的启动性能。

4) 蒸发器上下部分间采用隔热材料,也可以作

为改善平板式 CPL 蒸发器启动性能的一种措施。

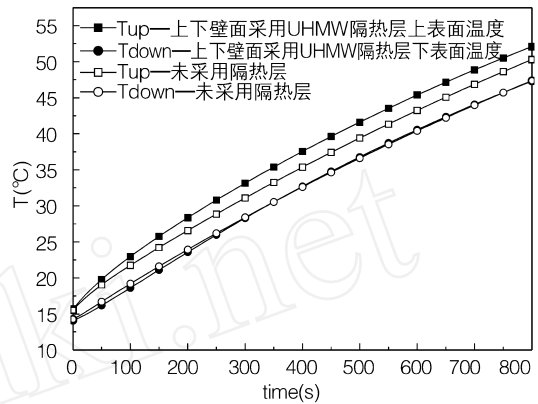


图 8 上下壁面间采用 UHMW 隔离层 $Q = 300W$ 启动

参考文献

- 1 Bazzo E, Riehl, R R. Operation characteristics of a small - scale capillary pumped loop. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(6) : 687 ~ 705
- 2 Laura Ottenstein, et al. Flight Testing of the Capillary Pumped Loop 3 Experiment. Space Technology and Applications International Forum - SATIF 2003. edited by M. S. El - Genk, 2003, 55 ~ 64
- 3 LaClair, Tim J, Mudawar, Issam. Thermal transient in a capillary evaporator prior to the initiation of boiling. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(21) :3937 ~ 3952
- 4 曲伟. 毛细抽吸两相流体回路 (CPL) 的启动特性研究. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(4) :74 ~ 76
- 5 马同泽, 候增祺, 吴文铁. 热管. 北京: 科学出版社, 1983

学会动态

“中美制冷空调采暖能效研讨会”在上海召开

2006 年 4 月 9 日,由中国制冷学会、中标认证中心、全国制冷标准化技术委员会联合主办的“中美制冷空调采暖能效研讨会”在上海双拥大厦举行。来自高校、设计、科研院所和企业的 60 余名代表出席了会议。美国 ASHRAE 副主席 Ronald E. Jarnagin 先生和刘冰女士就如何评估 HVAC 设备和系统能效、建筑物中使用的 HVAC 设备和系统的能效评估基本方法、气候对典型建筑物冷量使用影响的计算机模拟结果及示例、美国能源信息署 (EIA) 商用建筑能耗调查数据验证几种主要建筑类型的典型用能系数等内容进行了讲解;中国建筑设计研究院郎四维研究员详细介绍了国内建筑节能的设计标准以及制冷机能效的规定、中标认证中心岳宗文副部长介绍了中国制冷设备节能认证情况及相关认证政策。

“中德制冷空调标准研讨会”在上海召开

2006 年 4 月 10 日,由中国制冷学会、中标认证中心、全国制冷标准化技术委员会联合主办的“中德制冷空调标准研讨会”在上海双拥大厦召开。来自高校、设计、科研院所和企业的 60 余名代表出席了会议。德国专家介绍介绍了欧洲未来制冷剂的选用和欧洲环保立法和制冷系统与热泵的安全与环境要求等标准的最新修订情况及欧洲制冷压缩机和控制生产商协会 (ASERCOM) 压缩机认证工作,并针对制冷压缩机有关标准进行了比较。