

平板式 mLHP 实验的稳定性分析

陈彬彬 刘志春 刘伟 杨金国 李欢

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 本文在充灌率、冷凝温度和初始状态三方面对 mLHP 系统的稳定性进行分析。研究发现, 选择合适的充灌率有利于保证系统稳定运行。较少的充灌量时毛细芯容易缺液而导致系统启动失败, 较多的充灌量时系统在低热负荷区易发生波动。过低的冷凝温度对系统稳定性有负面影响, 系统容易出现温度波动甚至失稳。而毛细芯内气泡的存在, 易导致了 mLHP 系统出现温度迟滞现象。

关键词 平板式蒸发器; 充灌率; 冷凝温度; 温度迟滞

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2011)04-0675-04

Analysis on Stability of Miniature Loop Heat Pipe with Flat Evaporator

CHEN Bin-Bin LIU Zhi-Chun LIU Wei YANG Jin-Guo LI Huan

(School of Energy & Power Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract This paper analyses the stability of miniature loop heat pipe (mLHP) at the aspects of liquid charge ratio and heat sink temperature and initial conditions. The study indicates that appropriate liquid charge ratio can keep mLHP working smoothly and stably. Due to insufficient fluid inventory, which leads to the lack of liquid in the capillary wick, the mLHP fails to start up. But when fluid inventory is excessive, the temperature oscillation occurs at low heat loads. Low heat sink temperature has negative influence on the stability of mLHP that it could cause temperature oscillation even instability. Since vapor bubbles might be trapped in the capillary wick, temperature hysteresis phenomena were observed.

Key words flat evaporator; liquid charge ratio; heat sink temperature; temperature hysteresis

0 引言

环路热管 (Loop Heat Pipe, LHP) 是一种利用工质在蒸发器内蒸发而在冷凝器内冷凝两相循环来传递热量的新型高效传热装置, 广泛应用于航天器热控以及高热流电子元件冷却领域, 应用前景极为广泛。平板式小型环路热管 (miniature Loop Heat Pipe, mLHP) 的蒸发器设计成平板式, 有利于与发热元件贴合, 增大有效接触面积, 降低 LHP 的传热热阻。同时, 平板式 LHP 蒸发器内的温度梯度和工质的流动速度夹角较小, 场协同性好^[1]。

随着现代航空器件和高科技电子产品的发展, 散热部件需要具有很高的均温性和稳定性。过大的温度波动或者失稳都将导致器件失效, 如何控制温度波动和避免系统失稳是 mLHP 研究者研究的重点之一。文献 [2], [3] 对环路热管中的波动、倒流以及温度迟滞现象进行了研究。本文在学者以前研究的基础上, 对环路热管实验中观测到系统不稳定的现象进行分析和研究。

1 实验设计

平板式 mLHP 系统由蒸发器、补偿腔、冷凝器、蒸汽管道和液体管道五部分组成, 如图 1 所示。本实验蒸发器壁厚为 2 mm, 采用黄铜材料制成。冷凝器为可调水冷式换热器, 冷凝温度范围 15~ -15°C。本装置通过抬高冷凝器来实现重力辅助, 整个系统与水平面倾角为 θ 。毛细芯由 630 目不锈钢丝网线切割加工而成, 空隙率可达 60.2%, 实验工质为甲醇

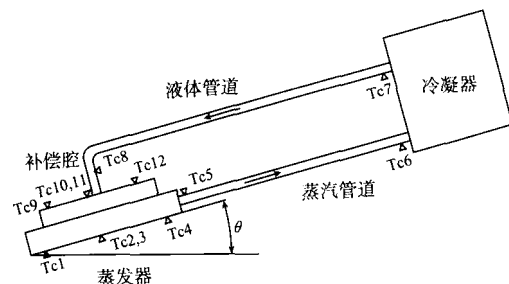


图 1 mLHP 示意简图

Fig. 1 The schematic of mLHP

收稿日期: 2011-01-13; 修订日期: 2011-03-23

基金项目: 国家自然科学基金 (No.50876035; No.50906026); 中国博士点学科新进教师博士点基金 (No.200704870487093)

作者简介: 陈彬彬 (1986-), 男, 湖北当阳人, 博士研究生, 主要从事航空电子器件散热和热控研究。

(纯度 99.5%)。测量系统采用 T 型热电偶, 热电偶标定后的误差为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。各测点布置位置如图 1 所示, 测量 mLHP 系统的蒸发器壁面和进出口温度、冷凝器进出口温度以及补偿腔温度, 所有测点温度均由数据采集仪采集到计算机上进行处理。实验中由 3 根 90 W 的加热棒安装在直径为 40 mm 的紫铜块上作为模拟热源, 热源外层包裹 10 mm 厚导热系数为 $0.012 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 的纳米绝热材料, 最后整个热源用锡箔纸包裹, 减少辐射散热损失。

2 影响 mLHP 稳定性的因素

2.1 充灌率的影响

工质充灌率定义为 $\alpha = V_l/V_{\text{total}}$, V_l 为充灌量, 即充入工质的体积, V_{total} 为整个 LHP 系统的空腔体积, 包括蒸发器体积 V_{evap} 、补偿腔体积 V_{comp} 、毛细芯空隙体积 V_{wick} 、蒸汽管道体积 $V_{\text{vap-line}}$ 、冷凝器体积 V_{cond} 和液体管道体积 $V_{\text{liq-line}}$ 。当 mLHP 系统正常工作时, 充灌量必须满足以下关系

$$\rho_l V_l = \rho_l [V_{\text{liq-line}} + (1 - \varepsilon)V_{\text{wick}} + (1 - \beta)V_{\text{comp}} + (1 - \gamma)V_{\text{cond}}] + \rho_v [V_{\text{vap-line}} + \varepsilon V_{\text{wick}} + \beta V_{\text{comp}} + \gamma V_{\text{cond}} + V_{\text{evap}}] \quad (1)$$

式中, ρ_l, ρ_v 分别是液态工质和气态工质的密度; $\varepsilon, \beta, \gamma$ 分别是气态工质占毛细芯空隙, 补偿腔和冷凝器的百分比。 ε, β 与热负荷和实际充灌量有关, 而 γ 与热负荷和冷凝器冷凝能力有关。当 $\rho_v \ll \rho_l$ 时,

$$V_l = V_{\text{liq-line}} + (1 - \varepsilon)V_{\text{wick}} + (1 - \beta)V_{\text{comp}} + (1 - \gamma)V_{\text{cond}} \quad (2)$$

平板式 mLHP 实验中, 必须保证一定充灌量使毛细芯浸润, 在毛细芯内形成汽液界面, 提供足够的毛细力驱使系统启动和运行。过低和过高的充灌率都将不利于系统的顺利启动。

较少的充灌量时, 蒸发器内液体工质不足, 毛细芯很容易蒸干, 导致系统启动失败, 如图 2 所示。热负荷加载后, 当蒸发器内温度达到系统压力所对应的汽化温度时, 工质开始汽化。由于蒸发器内初始工质较少, 汽化蒸汽不足以启动, 冷凝器和液体管道内的液体工质无法回流到补偿腔。毛细芯中液体工质蒸干, 毛细芯失效。继而蒸发器和补偿腔温度不断升高, 系统启动失败。

充灌率较低时, 系统运行也容易失稳, 如图 3 所示。系统运行时, 实际充灌量必须满足等式 (2)。较少的充灌量时, 为保持等式成立, ε, β 较大。而 γ 与冷凝器冷凝能力有关, 基本保持不变。这样, 气态工质在毛细芯和补偿腔内所占比例增大, 毛细芯内气

液界面不稳定性加剧。当受到来自系统内部或外部的扰动时, 气液界面就会很容易失稳, mLHP 运行失败。

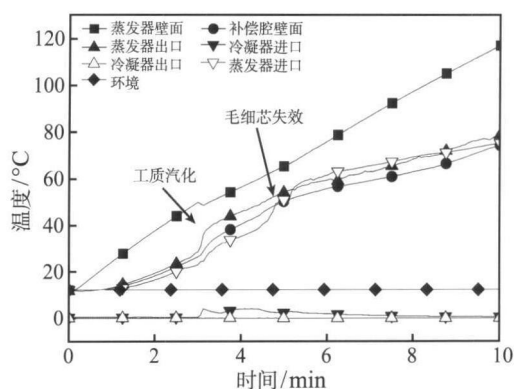


图 2 $\alpha=50\%$, $Q=40 \text{ W}$, $\theta=18^\circ$ 时, mLHP 启动失败
Fig. 2 Startup failure of the mLHP at $\alpha=50\%$, $Q=40 \text{ W}$, $\theta=18^\circ$

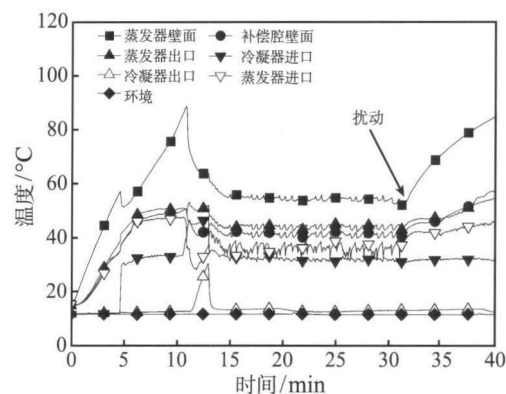


图 3 $\alpha=50\%$, $Q=60 \text{ W}$, $\theta=18^\circ$ 时, mLHP 运行失稳
Fig. 3 Instability of the mLHP at $\alpha=50\%$, $Q=60 \text{ W}$, $\theta=18^\circ$

较多的充灌量时, 补偿腔内有足够的液体提供给毛细芯, 避免蒸干失效。但是高充灌量会使工质汽化空间减小, 在低热负荷下启动过程中会出现温度波动现象, 如图 4 所示。

随着充灌量增加, 相变空间减小, 相变产生较少的蒸汽量就可以达到系统启动的压力。蒸汽将蒸汽管道内液体工质推入到冷凝器, 并在冷凝器内冷凝为液体。在相变驱动力和毛细压力的作用下^[4], 液体管道内的液体工质回流到补偿腔, 补充毛细芯内工质汽化的所需量。若热负荷较低, 工质在冷凝器内冷凝的速率大于在蒸发器内蒸发的速率, 系统内蒸汽量减少, 蒸汽压降低, 蒸汽不再进入到冷凝器。而具有一定过冷度的液体工质回流到蒸发器内更加剧了这种影响, 当蒸发器内产生的蒸汽再一次达到启动压力时, 蒸汽再次开始进入到冷凝器, 如此循环。其表现就是蒸发器温度 (包括壁面和进出口温度) 和冷凝器进口温度不断发生锯齿形波动, 如图 4 所示。

究其原因是在工质在冷凝器内的冷凝速率和在蒸发器内的蒸发速率不一致。较大的充灌率时蒸发空间更小, 更容易产生这种现象。增大热负荷可以增加蒸发器内工质的蒸发速率, 抑制这种温度波动现象的产生, 这在实验中得到了证实, 如图 5 所示。

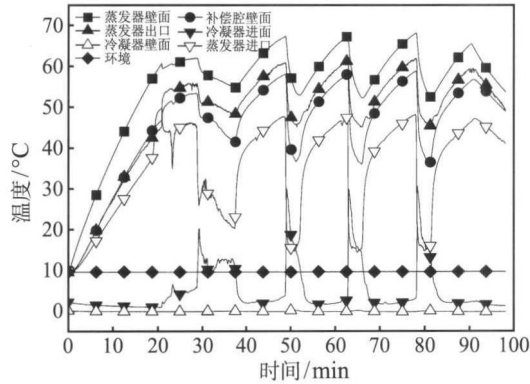


图 4 $\alpha=70\%$, $Q=20\text{ W}$, $\theta=18^\circ$ 时, mLHP 出现温度波动
Fig. 4 The oscillation phenomenon of operating mLHP at $\alpha=70\%$, $Q=20\text{ W}$, $\theta=18^\circ$

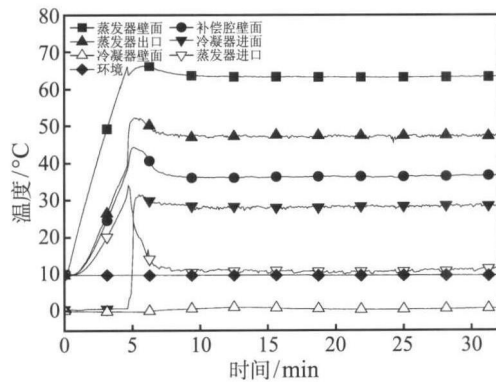


图 5 $\alpha=70\%$, $Q=80\text{ W}$, $\theta=18^\circ$ 时, mLHP 稳定运行
Fig. 5 The mLHP operates stably at $\alpha=70\%$, $Q=80\text{ W}$, $\theta=18^\circ$

2.2 冷凝温度的影响

在 mLHP 系统中, 冷凝器也是影响稳定的一个重要部件。两相冷凝的不稳定特性, 冷凝器的结构以及冷凝能力都会对整个系统的运行稳定性产生一定的影响。图 6 是相同热负荷两种不同冷凝温度时 LHP 系统的运行图示。图 6(a) 所示冷凝器冷凝温度为 -8°C , LHP 系统出现温度波动, 波动幅度 18.2°C 左右。图 6(b) 所示冷凝器冷凝温度为 13°C , LHP 系统运行稳定, 温度没有出现任何波动。图 7 是热负荷一定, 不断降低冷凝温度的条件下 LHP 系统的运行图示。热负荷为 100 W , 冷凝器温度从 13°C 每隔 20 min 下降 4°C 左右, 一直降低到 -11°C 。当冷凝温度在 13°C 和 -8°C 之间时 LHP 系统运行稳定。当冷凝温度进一步降低时, 蒸发器温度突然上升, LHP 系统失稳。

从图 7 可以看出, 冷凝温度对 LHP 系统的稳定性有很大的影响。式 (2) 中, 气态工质占冷凝器的百分比 γ 与冷凝器冷凝能力有关。冷凝温度降低导致 γ 减小, 而充灌量一定时为保证等式成立, 则 ε , β 增大。若实际 LHP 系统的充灌量并不高, 则气态工质在补偿腔和毛细芯内的所占比例不断增大很容易使毛细芯“烧干”, 进而导致系统失稳。

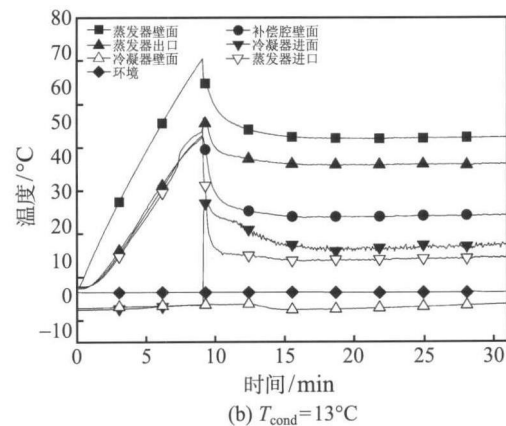
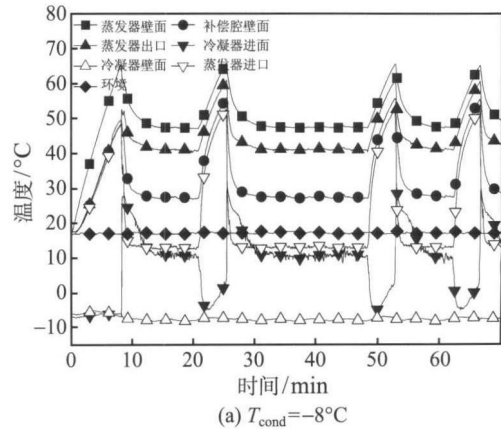


图 6 $\alpha=70\%$, $Q=40\text{ W}$, $\theta=18^\circ$, mLHP 在两种冷凝温度下的启动

Fig. 6 Startup of the mLHP at two different heat sink temperatures, $\alpha=70\%$, $Q=40\text{ W}$, $\theta=18^\circ$

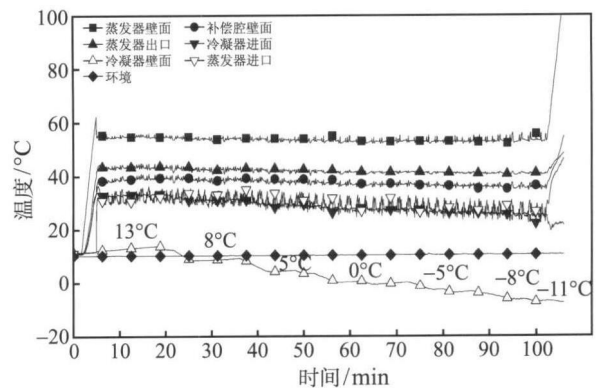


图 7 $\alpha=50\%$, $Q=100\text{ W}$, $\theta=18^\circ$, 冷凝温度从 13°C 降到 -11°C

Fig. 7 The heat sink temperature drops from 13°C to -11°C at $\alpha=50\%$, $Q=100\text{ W}$, $\theta=18^\circ$

提高冷凝温度可以使 LHP 系统运行稳定,如图 6 所示。一方面,冷凝温度升高,冷凝器不会迅速将来流蒸汽冷凝, γ 增大。则式 (2) 中 ε, β 减少以满足等式成立,毛细芯内液体工质比例增加,避免毛细芯因缺液而导致失效。另一方面,冷凝温度升高导致回流液过冷度降低,蒸发器进口温度升高。忽略蒸发器与环境之间的换热量,则工质质量流量为

$$m = \frac{Q}{h_{\text{sat}} + C_p(T_{\text{sat}} - T_{\text{evap-in}})} \quad (3)$$

式中, m 是工质质量流量, Q 是热负荷, h_{sat} 是工质汽化焓, C_p 是液态工质比热容, T_{sat} 和 $T_{\text{evap-in}}$ 分别是工质饱和汽化温度和蒸发器进口温度。由等式 (3) 知,蒸发器进口温度升高则工质汽化速率增大,保证工质汽化速率等于冷凝速率, LHP 蒸汽压力稳定,有利于系统的稳定运行。

2.3 初始状态的影响

在实验的过程中发现,即使热负荷、环境温度、冷凝温度都保持不变,在不同的测试中 LHP 工作温度也会有所不同,即出现温度迟滞现象。在 LHP 实验中都会出现这种现象,文献 [5] 和文献 [6] 对温度迟滞进行了介绍和解释。图 8 是 LHP 系统在运行过程中,蒸发器壁面温度突然降低的两种情况。

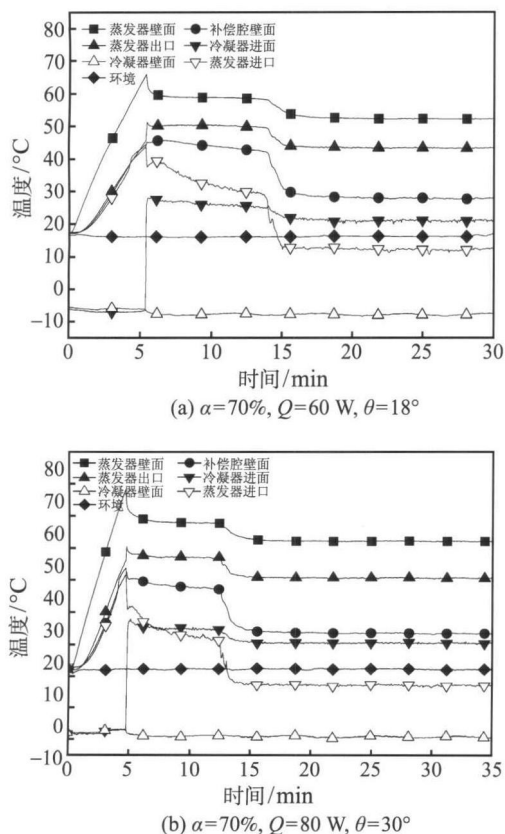


图 8 mLHP 温度迟滞现象

Fig. 8 The temperature hysteresis phenomena of the mLHP

从图示上可以看出,系统启动后运行稳定。当受到某一扰动后,蒸发器和补偿腔温度都有所降低。在 LHP 实验过程中,每一次冷却后系统中的液体分布都不一样,这会对下一次实验有一定的影响。若蒸发器进口或者毛细芯内留有气泡,会增加系统的阻力压降,工质汽化温度较高。当系统运行时受到扰动后气泡湮灭,系统阻力压降减小,系统内压降重新达到平衡,工质汽化温度降低。如何克服液体初始分布和气泡对 LHP 系统的影响,也是系统稳定性研究的重点之一。

3 结 论

分析 LHP 系统的稳定性对环路热管研究有很重要的意义,本文从充灌率、冷凝温度和初始状态三方面进行分析,得出结论如下:

(1) 选择恰当的充灌率以保证系统的顺利启动。较低的充灌率易使系统缺液启动失败,较高的充灌率易导致系统在低热负荷条件下出现温度波动。

(2) 过低的冷凝温度易导致 LHP 系统失稳,冷凝器与蒸发器匹配时应保证工质冷凝速率等于汽化速率,有利于系统的稳定运行。

(3) 系统内气泡的存在易使 LHP 运行出现迟滞现象。

参 考 文 献

- [1] LIU Zhichun, LIU Wei, Nakayama A. Flow and Heat Transfer Analysis in Porous Wick of CPL Evaporator Based on Field Synergy Principle [J]. Heat and Mass Transfer, 2007, 43: 1273-1281
- [2] 张红星, 林贵平, 丁汀, 等. 环路热管温度波动现象的实验分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(2): 116-120
ZHANG Hongxing, LIN Guiping, DING Ting, et al. Experimental Investigation on Temperature Oscillation of Loop Heat Pipes [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(2): 116-120
- [3] FENG Jianting, LIN Guiping, BAI LiZhan. Experimental Investigation on Operating Instability of a Dual Compensation Chamber Loop Heat Pipe [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(8) 2316-2322
- [4] LIU Wei, LIU Zhichun, YANG Kun, et al. Phase Change Driving Mechanism and Modelling for Heat Pipe with Porous Wick [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(21): 4000-4004
- [5] Vershinin S V, Maydanik Y F. Hysteresis Phenomena in Loop Heat Pipes [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27: 962-968
- [6] Ku J. Operating Characteristics of Loop Heat Pipes [C]//29th International Conference on Environmental System, Denver, Colorado, USA, 1999, SAE Paper No.1999-01-2007