

# 负压式平板型环路热管试验

陈彬彬 刘伟 刘志春 李欢 杨金国

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

**摘要** 为解决高热流密度电子器件的散热问题, 设计了一套负压式铜-甲醇环路热管, 其蒸发器设计成平板型。研究表明, 该平板型环路热管具有较高的散热能力, 能够在无重力姿态和重力姿态下顺利启动。当重力倾角分别为  $0^\circ$ 、 $18^\circ$  和  $30^\circ$ , 热负荷为 160W 时, 蒸发器壁面温度分别达到  $85.8^\circ\text{C}$ 、 $66.3^\circ\text{C}$  和  $64.6^\circ\text{C}$ 。按照环路热管启动状态, 其启动过程可分为 3 个阶段: 加热阶段、预启动阶段和后启动阶段。在低热负荷区域, 环路热管会出现温度波动现象。增大重力倾角, 有利于降低蒸发器壁面温度和热阻。当重力倾角为  $30^\circ$ , 热负荷从 10W 递增到 160W 时, 环路热管的热阻从  $4.97^\circ\text{C}/\text{W}$  降低到  $0.39^\circ\text{C}/\text{W}$ 。

**关键词** 环路热管 平板型 启动 变热负荷 温度波动 蒸发器

DOI: 10.3780/j.issn.1000-758X.2011.06.010

## 1 引言

为解决空间站电子器件微型化带来的高热流散热问题, 一种低功耗、高传热能力的散热装置——环路热管(Loop Heat Pipe, LHP)引起了众多研究者的关注。LHP 是一种利用工质在蒸发器内蒸发和在冷凝器内冷凝, 两相相变来传递热量的新型高效传热装置。与传统传热装置相比, LHP 具有无需外加动力, 传热能力强, 传输距离长, 管路布置灵活方便等优点。为适应热源的安装要求, 蒸发器结构设计成平板型, 这样更有利于与热源的贴合。另外, 从场协同的观点来看, 平板型 LHP 蒸发器内的温度梯度和工质的流动速度夹角较小, 具有较强的传热能力优势<sup>[1]</sup>。

与圆柱型 LHP 相比, 平板型 LHP 安装时不需要底座, 有利于减轻太空热控元件的质量<sup>[2]</sup>。文献 [3-7] 针对平板型 LHP, 完成不同蒸发器设计、毛细芯结构、充灌率以及工质的试验测试, 研究其启动特性、变热负荷运行特性以及控温性能等。由于平板型蒸发器独特的结构, 其侧壁导热和背向导热现象严重, 系统启动困难。本文设计一种铜-甲醇平板型 LHP, 改进蒸发器结构, 降低向蒸发器的漏热, 研究其启动和变热负荷等运行特性。

## 2 试验系统

LHP 由蒸发器、蒸气管道、冷凝器、液体管道和补偿腔共 5 部分组成, 如图 1 所示。工质在蒸发器内吸收热量汽化, 通过蒸气管道流入冷凝器, 释放出热量变成液体。在毛细力、重力和相变力等驱动力的作用下<sup>[8]</sup>, 液态工质通过液体管道回流到补偿腔内, 补给蒸发器汽化所需量, 形成一个循环。蒸发器是整个系统的核心部件, 其结构好坏决定系统传热的优劣<sup>[9]</sup>, 本文设计的蒸发器结

国家自然科学基金 (50876035, 50906026) 资助项目

收稿日期: 2011-02-23。收修改稿日期: 2011-04-11

构如图2所示。为减小侧壁导热效应,蒸发器壁厚都设计成2mm,并采用导热系数较低的黄铜材料制作而成。多孔毛细芯由630目不锈钢丝网线切割加工而成,空隙率可达60.2%。毛细芯厚度为4mm,由于不锈钢较低的导热系数,可有效减弱背向导热效应。冷凝器采用套管式,冷媒冷凝温度最低可达到 $-10^{\circ}\text{C}$ 。试验工质为甲醇,纯度达到99.5%。为减小不凝性气体对环路热管运行的影响,系统在充灌前抽真空,在系统压力降到 $1 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 时进行充灌,充灌后系统内部压力低于环境压力。工质充灌率定义为 $\alpha = V_1/V_{\text{total}}$ , $V_1$ 为充灌量,即充入工质的体积; $V_{\text{total}}$ 为整个LHP的空腔体积,本试验充灌率约为70%。

测量系统采用T型热电偶布置温度测点,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。热电偶 $T_{c1} \sim T_{c4}$ 贴在加热器表面,测量蒸发器壁面温度, $T_{c5} \sim T_{c8}$ 测量补偿腔温度, $T_{c9}$ 测量蒸发器出口温度, $T_{c10}$ 测量冷凝器进口温度,

$T_{c11}$ 测量冷凝器出口温度, $T_{c12}$ 测量蒸发器进口温度。试验中由3根90W的加热棒安装在直径为40mm的紫铜块上作为模拟热源,通过调节电压来改变加热棒的功率,实现不同热负荷的模拟。热源外层包裹10mm厚导热系数为 $0.012\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的纳米绝热材料,外层用锡箔纸包裹,减少热损失。试验测试表明,热损失误差低于0.5%。

本试验通过改变冷凝器与水平地面的夹角 $\theta$ 来实现不同重力高度,如图1所示。重力倾角 $\theta$ 为 $0^{\circ}$ 时,蒸发器与冷凝器在同一水平位置。重力倾角 $\theta$ 为 $18^{\circ}$ 和 $30^{\circ}$ 时,冷凝器比蒸发器高约9cm和15cm。本文在不同的重力高度下,做了不同热负荷 $Q$ 的启动和变负荷运行试验。

### 3 试验结果讨论

#### 3.1 启动特性

LHP的关键特性之一是启动特性,该特性是评定其可靠性和稳定性等性能优劣的重要依据。为保证LHP顺利启动运行,毛细芯必须完全浸润。启动初期,蒸发器内的工质过热,当蒸发器内过热液体闪蒸为蒸气时,气侧压力突然上升。由于平板式LHP尺寸的限制,毛细芯厚度较薄,蒸气容易穿透毛细芯而导致其失效,LHP启动失败。影响LHP启动的因素包括:补偿腔和蒸发器的结构、蒸发器内液体的初始位置和启动时的系统瞬时状态<sup>[10]</sup>。重力姿态影响着蒸发器内液体的初始位置,即系统启动时的状态,对LHP的启动有很大的影响。试验结果表明,当重力倾角为 $0^{\circ}$ 时,本文设计的LHP能够在热负荷 $40 \sim 160\text{W}$ (热流密度 $3.2 \sim 12.7\text{W}/\text{cm}^2$ )范围内顺利启动;当重力倾角为 $18^{\circ}$ 和 $30^{\circ}$ 时,能够在热负荷 $10 \sim 160\text{W}$ (热流密度 $0.8 \sim 12.7\text{W}/\text{cm}^2$ )范围内顺利启动。由于LHP的蒸发器壁面温度不能超过密封圈的耐受温度,故未进行更高热负荷的启动试验。

LHP的启动可分为3个阶段:加热阶段(I),预启动阶段(II),后启动阶段(III),如图3~图5所示。加热阶段是热负荷加载后,蒸发器壁面温度上升。由于侧壁导热和背向导热效应,蒸发器进、出口温度和补偿腔温度随之上升。蒸气槽道内的液体受热后不会马上汽化,当其达到一定的过

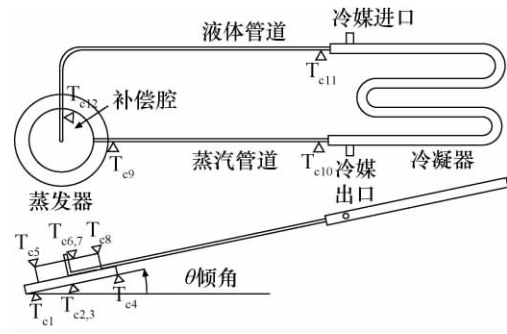


图1 LHP示意图  
Fig. 1 Schematic of the LHP

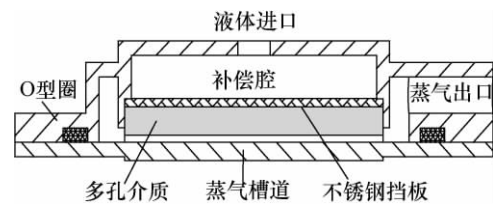


图2 蒸发器示意图  
Fig. 2 Schematic of the evaporator

热度后开始汽化。其蒸发速度很快，蒸发器壁面温度会迅速降低（蒸发器壁面温度测点曲线会出现一个“尖顶”现象），蒸发器出口温度急剧上升，冷凝器进口温度阶跃性上升。预启动阶段是蒸气产生后，在蒸气腔内迅速聚集。当蒸气压力达到 LHP 启动所需压力后<sup>[10]</sup>，蒸气推动蒸气管道内的液体工质进入冷凝器，释放出热量，冷凝为液体。后启动阶段是在毛细力等驱动力的作用下，液体回流到补偿腔内。补偿腔温度在过冷回流液、背向和侧壁导热以及环境换热的共同作用下达达到平衡，蒸发器壁面温度和进、出口温度达到平衡。

预启动阶段是整个 LHP 启动过程中最关键的一个部分。当蒸气进入蒸气管道和冷凝器中，蒸气压力会有所降低，此时蒸气压力不能低于系统的启动压力，否则会引起温度波动，甚至启动失败。而且，由于背向导热和侧壁导热效应，补偿腔内工质会发生汽化。如果补偿腔内液体得不到补充，补偿腔内的气体成分所占比例过大，使得毛细芯内气液界面不稳定。气液界面容易失稳，系统启动失败。

当重力倾角为  $0^\circ$  时，LHP 在热负荷低于 40W 时启动失败。热负荷 20W，重力倾角  $0^\circ$  时，LHP 启动失败的过程如图 3 所示。预启动阶段前期，由于热负荷较低，蒸气在冷凝器内的冷凝速率大于其在蒸发器内的蒸发速率，则蒸气量减少，蒸气压力低于系统启动压力，蒸气退出冷凝器，故冷凝器进口温度上升后迅速降低。在预启动后期，由于背向导热和侧壁导热效应，补偿腔内汽化加剧，气态工质比例增大，毛细芯内的气液界面变得极不稳定，随着蒸气压力的上升，气液界面失稳。此时，蒸气进入到补偿腔内，蒸气压力降低，故蒸发器进口温度突然上升，蒸发器出口温度有所降低，如图所示。在后启动阶段，蒸发器和补偿腔温度不断上升，启动失败。

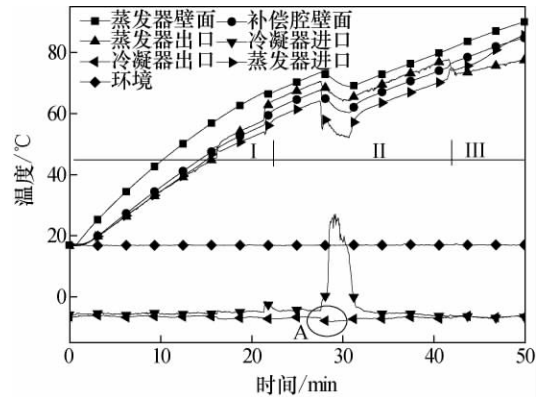


图 3  $Q=20W, \theta=0^\circ$  时，LHP 的启动过程  
Fig. 3 Start-up process of the LHP at  $Q=20W, \theta=0^\circ$

热负荷 100W，重力倾角分别为  $0^\circ$  和  $30^\circ$  时，LHP 的启动过程如图 4、图 5 所示。试验中，当重力倾角为  $18^\circ$  和  $30^\circ$  时，LHP 的启动过程相似，故在此省略倾角  $18^\circ$  时的启动图示。从图示上可以看出，二者启动过程中加热阶段和后启动阶段相同，而预启动阶段略有不同。重力倾角为  $0^\circ$  时，系统启动的动力是毛细力和相变驱动力<sup>[8]</sup>，而重力倾角为  $30^\circ$  时系统启动的动力除了上述力外，还包括重力。预启动阶段初期，蒸气管道内存在一部分液体，此部分液体的重力成为系统启动时的阻

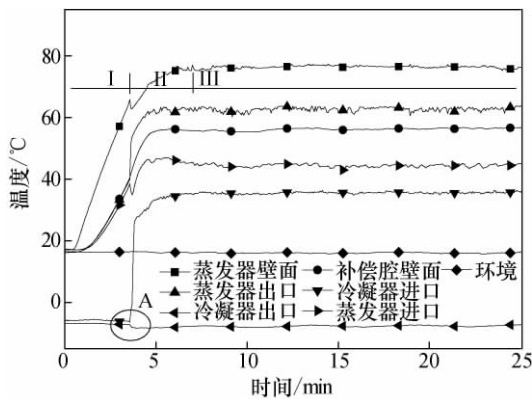


图 4  $Q=100W, \theta=0^\circ$  时，LHP 的启动过程  
Fig. 4 Start-up process of the LHP at  $Q=100W, \theta=0^\circ$

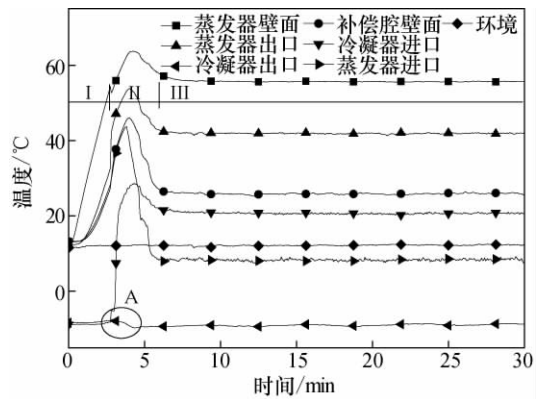


图 5  $Q=100W, \theta=30^\circ$  时，LHP 的启动过程  
Fig. 5 Start-up process of the LHP at  $Q=100W, \theta=30^\circ$

力。当蒸气将液体推入冷凝器后进入液体管道，其重力成为动力，系统阻力压降减小，系统启动所需蒸气压降低。系统自动调节，降低蒸气压力。故蒸发器温度有所降低，然后稳定在某一固定值，启动成功。当液体从冷凝器内流出，冷凝器出口温度会有阶跃性降低，如图中 A 区域所示。

### 3.2 运行特性

重力倾角为  $0^\circ$ 、 $18^\circ$  和  $30^\circ$  时，LHP 各测点温度与热负荷之间的关系如图 6 所示。当重力倾角为  $0^\circ$ 、 $18^\circ$  和  $30^\circ$ ，热负荷为  $160\text{W}$  时，蒸发器壁面温度分别为  $85.8^\circ\text{C}$ 、 $66.3^\circ\text{C}$  和  $64.6^\circ\text{C}$ 。LHP 运行曲线一般存在两个区域——低热负荷区(可变热导区)和高热负荷区(固定热导区)。重力倾角为  $0^\circ$  时，LHP 在热负荷低于  $40\text{W}$  区域无法启动成功，启动过程如图 3 所示。在  $40\sim 160\text{W}$  区间，蒸发器壁面温度随着热负荷的递增而上升，故此段区间是高热负荷区，如图 6(a) 所示。当重力倾角为  $18^\circ$  和  $30^\circ$  时，LHP 运行曲线存在这两个区域。但是，在低热负荷区，蒸发器壁面温度并不是严格随着热负荷的递增而降低，如图 6(b) 和 (c) 所示。当热负荷为  $10\text{W}$  左右时，LHP 在重力条件下运行温度偏低，此时 LHP 启动运行机理不同于其他较高热负荷，其启动如图 7 所示。在预启动阶段，蒸气进入蒸气管道后就开始冷凝，由于蒸气量较少，在冷凝器进口部分甚至全部冷凝为液体。在重力的作用下，液体沿着蒸气管道回流到蒸发器，形成循环。因此，系统循环阻力较小，蒸发器壁面温度较低。由于冷凝器内液体无法回流到补偿腔，冷凝器出口温度不会有阶跃性降低，如图 7 的 A 区域所示。

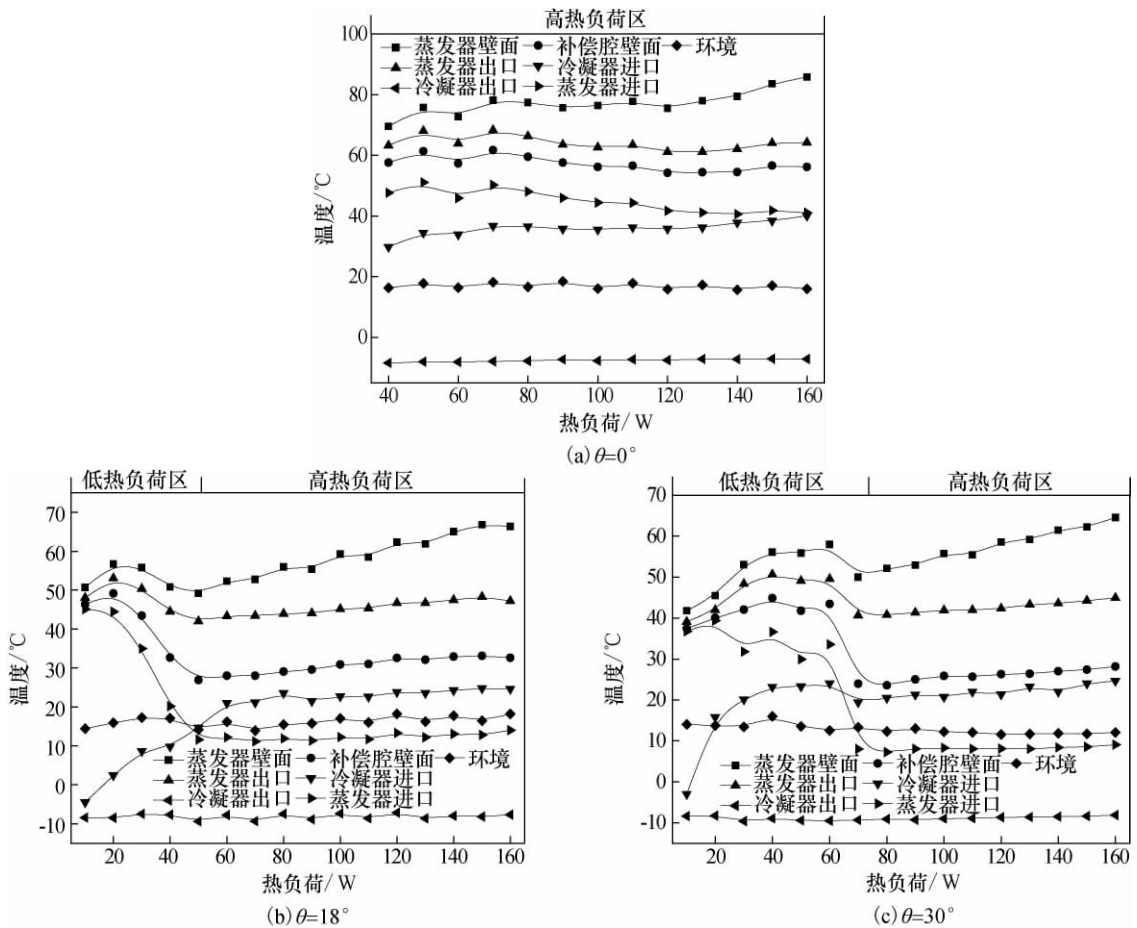


图 6 不同热负荷下 LHP 各测点温度  
 Fig 6 Temperatures of the thermocouples at different heat load

当热负荷在 20~60W 区域时, LHP 会出现温度波动, 如图 8 所示。这主要是在此热负荷区域内, 工质的蒸发速率小于其冷凝速率导致的。当蒸气进入冷凝器时, 冷凝器冷凝温度较低, 蒸气在冷凝器内的冷凝速率大于其在蒸发器内的蒸发速率, 蒸气迅速被冷凝, 蒸气压力降低。若蒸气压力小于系统启动压力时, 蒸气退出冷凝器。由于蒸气的持续产生, 当蒸气压力达到系统启动压力时, 蒸气再次进入到冷凝器, 如此循环。在重力的作用下, 补偿腔和毛细芯内存在足量的液体保证工质的汽化。其表现是 LHP 的运行温度发生锯齿形波动, 如图 8 所示。当增大热负荷, 蒸气的增发速率增大并等于冷凝速率, 就不会出现温度波动现象, 如图 5 所示。在热负荷 20~60W 范围内, 由于环路热管系统出现温度波动, 使得其平均温度较高, 故不完全遵循低热负荷区的规律。

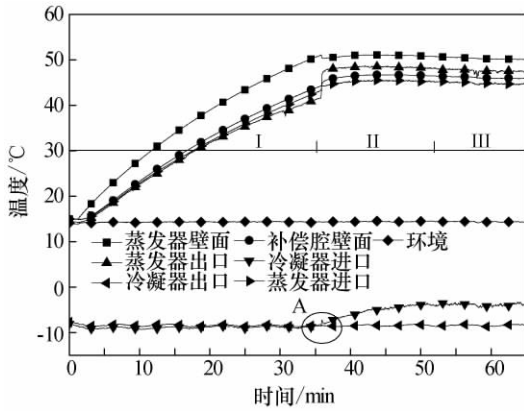


图 7 LHP 的启动过程 ( $Q=10W, \theta=18^\circ$ )  
Fig. 7 Start-up process of the LHP at  $Q=10W, \theta=18^\circ$

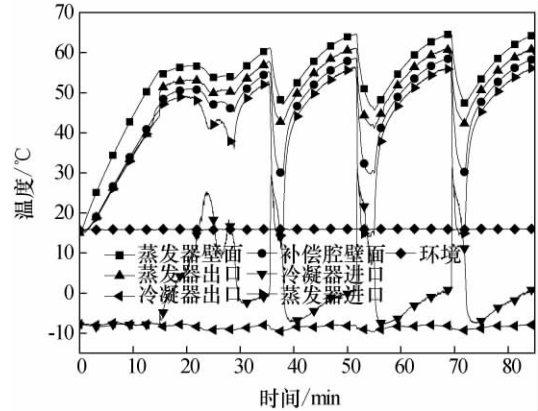


图 8 LHP 的启动过程 ( $Q=20W, \theta=18^\circ$ )  
Fig. 8 Start-up process of the LHP at  $Q=20W, \theta=18^\circ$

### 3.3 变热负荷特性

变热负荷特性是评价 LHP 可靠性和稳定性的另一个重要特性。为模拟实际应用中热负荷经常改变的工况, 本试验以某一热负荷启动, 然后按照递增和递减规律改变热负荷, 分别验证该系统在无重力姿态和重力姿态下变热负荷工况的响应特性。图 9(a)和(b)分别是重力倾角为  $0^\circ$  和  $30^\circ$  时, LHP 变热负荷工况的特性。从图上可以看出, 在 LHP 能够启动的热负荷范围内, 其能够稳定地运行。当热负荷改变时, 蒸发器温度随之迅速改变并很快稳定下来, 具有良好的响应能力。随着热负荷的增加, 工质汽化量增加。系统流动阻力增大, LHP 进行自调节, 提高蒸气压力以克服阻力, 则蒸发器壁面温度随之升高。反之, 随着热负荷的减小, 蒸发器壁面温度降低。试验表明,  $0^\circ$ 重力

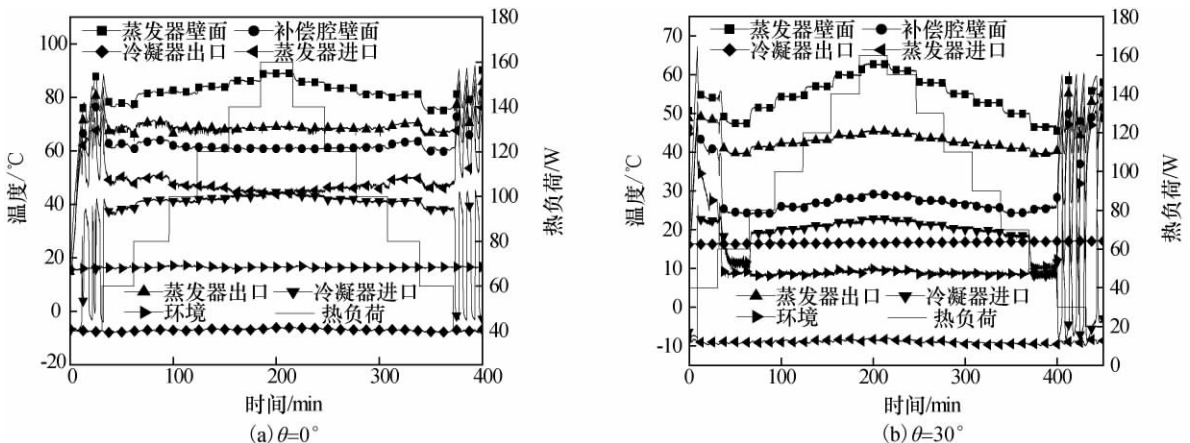


图 9 不同重力倾角下 LHP 的变热负荷运行  
Fig. 9 Variable heat load operation of the LHP at different gravity tilt angles

倾角时, LHP 能在热负荷 40~160 W 内进行变热负荷运行; 30°重力倾角时, LHP 能在热负荷 20~160 W 内进行变热负荷运行。

但是在低热负荷区, LHP 会出现温度波动, 如图 9(a)和(b)所示。系统分别在热负荷 40 W 和 30 W 左右时, 出现大幅度的温度波动, 其原因与启动过程发生的温度波动现象一致。当热负荷超过此热负荷区域时, 系统稳定的运行, 未出现任何温度波动。图 9(a)和图 9(b)中, 前者出现温度波动的最高温度与最低温度之差高达 14°C, 后者最高温度与最低温度之差达到 8°C。对于壁面温度稳定性要求较高的电子器件, LHP 应该避开出现温度波动的热负荷区域, 以避免对电子器件的损坏。

### 3.4 热阻

根据 LHP 的原理, 热阻定义为

$$R_{LHP} = (T_{\text{evap}} - T_{\text{cond}}) / Q \quad (1)$$

式中  $Q$  为热负荷;  $T_{\text{evap}}$  是蒸发器受热壁面的平均温度;  $T_{\text{cond}}$  是冷凝器平均温度, 包括冷凝器的进口温度  $T_{\text{cond-in}}$ , 壁面温度  $T_{\text{cond-wall}}$  和出口温度  $T_{\text{cond-out}}$ 。

重力倾角 0°、18°和 30°时 LHP 的热阻随热负荷的关系如图 10 所示。从图上看, LHP 的热阻随着热负荷的增加而减小, 并且随着重力倾角增大, 重力辅助作用增强, 0°时 LHP 的热阻最大, 30°时 LHP 的热阻最小。重力倾角 30°, 热负荷从 10 W 增加到 160 W 时, LHP 热阻从 4.97°C/W 降低到 0.39°C/W。但在 40~60 W 范围内, 由于环路热管系统出现温度波动, 使得蒸发器壁面平均温度较高。重力倾角 30°的温度波动较重力倾角 18°大, 前者的蒸发器壁面平均温度高于后者, 故重力倾角 18°时 LHP 的热阻略小于重力倾角 30°时的热阻。

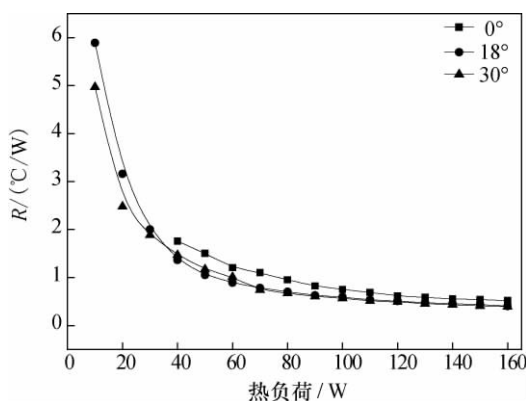


图 10 不同热负荷下 LHP 热阻  
Fig. 10 Thermal resistance of LHP  
at different heat loads

## 4 结束语

本文设计一种负压式平板型环路热管, 工质采用甲醇, 在不同重力倾角和热负荷工况下进行了试验。得出如下结论:

1) 当重力倾角为 0°时, LHP 能够在热负荷 40~160 W (热流密度 3.2~12.7 W/cm<sup>2</sup>) 范围内顺利启动; 当重力倾角为 18°和 30°时, 能够在热负荷 10~160 W (热流密度 0.8~12.7 W/cm<sup>2</sup>) 范围内顺利启动。

2) LHP 启动分为 3 阶段: 加热阶段、预启动阶段和后启动阶段。预启动阶段是整个系统启动过程中最关键的部分。

3) 系统在重力倾角下启动, 重力成为系统启动的一部分动力。增大重力倾角, 有利于降低蒸发器壁面温度。

4) 在低热负荷 20~60 W 区域内, LHP 出现温度波动现象。这主要是工质在蒸发器内的蒸发速率与其在冷凝器中的冷凝速率不匹配导致的。

5) LHP 的热阻随着热负荷的增大而减小, 随着重力倾角增大, LHP 的热阻减小。

6) 0°重力倾角时, LHP 能在热负荷 40~160 W 内进行变热负荷运行; 30°重力倾角时, LHP 能在热负荷 20~160 W 内进行变热负荷运行。

## 参 考 文 献

- [1] LIU Z C, LIU W, 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] MAIDANIK Y F, VERSHININ S V, CHERNYSHEVA M A. Development and tests of miniature loop heat pipe with a flat evaporator [C]//Proceedings of the 30th International Conference on Environmental Systems, SAE Paper 2000-01-2491, Toulouse, France, 2000.
- [3] LI J, WANG D M, PETERSON G P. Experimental studies on a high performance compact loop heat pipe with a square flat evaporator [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30: 741-752.
- [4] 周海迎. 平板式环路热管实验研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2006.  
ZHOU HAIYING. The experimental investigation of LHP with a flat evaporator [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [5] SINGH R, AKBARZADEH A, MOCHIZUKI M. Operational characteristics of a miniature loop heat pipe with flat evaporator [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2008, 47 (11): 1504-1515.
- [6] 盖东兴, 刘伟, 刘志春, 等. 平板型 MLHP 温度波动研究 [J]. 中国空间科学技术, 2009, 29(5): 15-20.  
GAI DONGXING, LIU WEI, LIU ZHICHUN, et al. Investigation of temperature oscillation in miniature loop heat pipe with flat evaporator [J]. Chinese Space Science and Technology, 2009, 29 (5): 15-20.
- [7] 李金旺, 邹勇, 程林. 环路热管毛细芯热物性实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (17): 57-61.  
LI JINWANG, ZOU YONG, CHENG LIN. Experimental study on thermo physical properties of capillary wicks for loop heat pipe [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30 (17): 57-61.
- [8] 刘伟, 刘志春, 杨昆, 等. 毛细芯热管的相变驱动机制与模型 [J]. 科学通报, 2009, 54 (13): 1932-1936.  
LIU WEI, LIU ZHICHUN, YANG KUN, et al. Phase change driving mechanism and modeling for heat pipe with porous wick [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54 (13): 1932-1936.
- [9] MAIDANIK Y F. Loop heat pipes [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25 (5-6): 635-657.
- [10] KU J. Operating characteristics of loop heat pipes [C]. 29th International Conference on Environmental System, SAE Paper 1999-01-2007, Denver, Colorado, 1999.

## 作者简介

陈彬彬 1986年生, 2008年毕业于华中科技大学热能与动力工程专业, 现为华中科技大学工程热物理专业博士研究生。主要从事高热流电子器件散热技术和空间热控技术的研究。

## Experimental Investigation of a Negative-pressure Loop Heat Pipe with a Flat Plate Evaporator

Chen Binbin Liu Wei Liu Zhichun Li Huan Yang Jinguo  
(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University  
of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** A negative-pressure copper-methanol loop heat pipe (LHP) with a flat plate evaporator was designed for solving the heat dissipation problem of electronic devices with high heat flux. The investigation indicates that this LHP has high capacity of heat dissipation, which is able to start up with or without gravity assistance. When head load is 160W, the evaporator wall temperatures, are 85.8 °C, 66.3 °C and 64.6 °C at three gravity tilt angles of 0°, 18° and 30°

respectively. The whole start period of the LHP is divided into three stages, including heat stage, pre-start-up stage and after-start-up stage. At low heat load period, the temperature oscillation phenomenon of the LHP occurs. With the gravity tilt angle increasing, both the evaporator wall temperature and the thermal resistance decrease. At the gravity tilt angle of  $30^\circ$  and heat load in the range from 10W to 160W, the LHP thermal resistance lies between  $4.97^\circ\text{C/W}$  and  $0.39^\circ\text{C/W}$ .

**Key words** Loop heat pipe Flat plate Start-up Variable heat load Temperature fluctuation Evaporator

---

(上接第 64 页)

## Robust Timing and Frequency Synchronization under Multipath Fading Channel for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Systems

Liu Chengzhen Jin Pengjia

(Shanghai Aerospace Electronic Co. Ltd, Shanghai 201821)

Wu Xueying

(China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

**Abstract** A synchronization scheme for orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems based on a novel training sequence was proposed. The training sequence consists of only one centrosymmetric OFDM symbol with two identical parts to achieve reliable timing and frequency accuracy in the time-domain. After coarse timing and fractional frequency synchronization achieved, a successful estimation was declared for both channel path timing and integer frequency offset by IFFT algorithm which can largely reduce the computational load of the algorithm. For fine timing synchronization, a metric called signal-to-interference ratio (SIR) was devised. Based on this metric, a fine timing synchronization method was developed to improve the timing precision. Comparison of the proposed fine adjustment algorithm and conventional synchronization algorithms by using computer simulation illustrates that the method is more robust to multipath and pseudo multipath.

**Key words** Orthogonal frequency division multiplexing Synchronization Multipath channel Satellite communication