

研究论文

## 双面蒸发器环路热管的瞬态特性

何松<sup>1</sup>, 刘志春<sup>1</sup>, 汪冬冬<sup>1</sup>, 刘伟<sup>1</sup>, 杨金国<sup>1</sup>, 张晓屿<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074; <sup>2</sup>中国运载火箭研究院, 北京 100076)

**摘要:** 环路热管是一种高效的两相热控装置, 主要应用于航天航空热控和地面高热流电子器件的散热。现有的平板式环路热管只有一个面可以进行散热, 一方面, 不利的背向导热使得环路热管在低热负荷的条件下启动困难, 另外, 蒸发器的另一个面也存在散热的潜能。针对上述不足, 提出了平板型甲醇-铜双面蒸发器环路热管。在重力辅助倾角为 10°, 热沉温度为 0°C 的条件下, 对单面加热和双面加热的启动性能和变工况运行进行了实验研究。实验结果表明: 该新型环路热管在单面加热和双面加热条件下, 均可以成功启动和正常运行, 且双面工况时的启动性能比单面更稳定、迅速; 在加热面的温度不超过 (90±2)°C 的情况下, 单面可以传递的最大热负荷为 210 W, 对应热流为 21.8 W·cm<sup>-2</sup>, 而双面传递的最大热负荷为 240 W; 双面交替运行时, LHP 能够快速从一个面转向另一个面运行, 没有出现运行失败。

**关键词:** 平板式环路热管; 双面蒸发器; 温度波动; 两相传热; 稳定状态

**DOI:** 10.11949/j.issn.0438-1157.20151669

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2016) 05—1778—06

## Transient properties of bifacial evaporator loop heat pipe

HE Song<sup>1</sup>, LIU Zhichun<sup>1</sup>, WANG Dongdong<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, YANG Jinguo<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoyu<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>School of Energy and Engineering Power, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

<sup>2</sup>China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Loop heat pipe (LHP) is an efficient two-phase heat transfer device, mainly applied to spacecrafts and terrestrial electronics with high heat density. The existing flat loop heat pipes (FLHPs) are only used a surface to dissipate heat. Thus, the adverse back-conduction makes it difficult for FLHPs to startup at low heat loads, and also, the another surface of the flat evaporator possesses the potential for heat rejection. Aiming at the disadvantages above, a methanol-copper loop heat pipe with a bifacial evaporator was developed in this paper. Under the conditions of assisted-gravity angle at 10° and heat sink temperature at 0°C, startup performance and variable heat load operation were investigated with one surface heated and two surfaces heated simultaneously. The experimental results indicated that this loop could start up successfully and operate normally when one surface or two surfaces worked, but startup process with two surfaces heated showed faster and more stable. With heat source simulator wall temperature below (90±2)°C, the evaporator with one surface heated could transfer the maximum heat load of 210 W, corresponding to a heat flux of 21.8 W·cm<sup>-2</sup>, while 240 W at the evaporator with two surfaces heated. For operation with alternative heat load, the LHP could quickly shift from one surface to another surface, and operation failure was not observed.

2015-11-06 收到初稿, 2016-01-26 收到修改稿。

联系人: 刘志春。第一作者: 何松 (1989—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50906026, 51276071)。

Received date: 2015-11-06.

Corresponding author: Prof. LIU Zhichun, zcliu@hust.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50906026, 51276071).

**Key words:** flat LHP; bifacial evaporator; temperature instability; two-phase heat transfer; steady state

### 引 言

环路热管(loop heat pipe, LHP)作为一种由毛细芯提供动力的高效两相传热装置,主要由蒸发器、补偿腔、毛细芯、蒸气/液体传输管路、冷凝器部件组成。蒸发器结构是影响环路热管传热性能最重要的因素,根据用途、热源的尺寸和所使用的工质,蒸发器主要分为圆柱型和平板型。平板型环路热管因其具有易于与热源贴合、传热效率高、质量轻等优点而成为高热流热控的研究热点<sup>[1-2]</sup>。

作为完全被动式传热装置,环路内部工质的循环动力主要来自毛细芯提供的毛细抽吸力,双孔径毛细芯的提出极大地改善了毛细芯的热力学特性,文献[3-8]将双孔径毛细芯用于平板型 LHP,得到了较好的实验结果。针对平板型 LHP 的具体应用,莫冬传等<sup>[9-10]</sup>对应用于 LED 灯冷却的平板型 LHP 的启动特性和热漏对平板型环路热管传热特性的影响进行了研究。此外,为了实现多热源散热问题,汪冬冬等<sup>[11]</sup>对两个并联平板型蒸发器回路系统的启动

性能和变工况进行了探究。随着环路热管的发展,研究的热点和手段也在不断地变化<sup>[12]</sup>。

现有的平板式环路热管只有一个面可以进行散热,一方面,不利的背向导热使得环路热管在低热负荷条件下启动困难,另外,蒸发器的另一个面也存在散热的潜能。针对上述不足,提出了平板型双面蒸发器环路热管。为了获得良好的启动和传热性能,选择热物性较优的甲醇为工质,热导率大的铜为蒸发器壳体材料,对双面蒸发器 LHP 进行了实验研究。系统采用镍粉烧结的双孔径毛细芯作为主毛细芯和筛孔孔径为  $2.35 \times 10^{-5} \text{ m}$  的不锈钢丝网制成的二次芯,对单面启动和双面等热负荷启动分别进行了实验研究,并分析了交替热载荷运行的特点。

### 1 实验系统

实验系统为甲醇-铜平板型环路热管,蒸发器内部结构如图 1 所示, LHP 系统的示意图和热电偶位置如图 2 所示,加热面 2 上的热电偶如图 2 左侧视图。工质传输管路外径为  $\phi 4 \text{ mm}$  的铜管,全长为

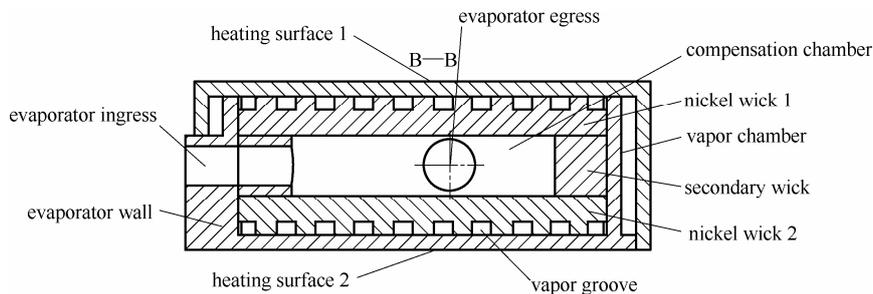


图 1 蒸发器内部结构

Fig. 1 Internal structure of evaporator

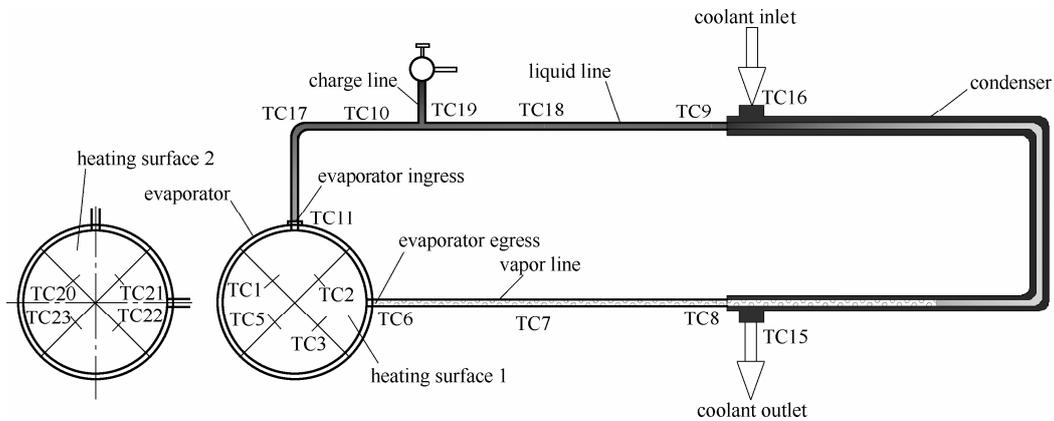


图 2 LHP 系统示意图和温度测点布置位置

Fig.2 Schematic diagram of LHP and locations of thermocouples

1632 mm, 蒸气管路、液体管路分别长 330 mm 和 490 mm。套管式冷凝器与制冷机组相连, 控制着冷凝器的温度, 制冷机组最低可以达到 $-15^{\circ}\text{C}$ 。模拟热源是由 3 根加热棒嵌入到铜棒中制成, 功率由调压器和功率计进行调节和控制大小。实验之前, 先对系统抽真空处理, 本系统的真空度达到了  $4.1 \times 10^{-4}$  Pa, 充灌率为 75%。24 根精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 的 T 型热电偶分别布置在系统不同的位置上用于测试温度, 由 Keithley 2700 采集数据。

## 2 实验结果和分析

启动是 LHP 运行行为最为复杂的现象, 与所加热载荷大小和方式、充灌率、蒸发器和冷凝器的相对位置关系、热沉温度、初始汽液分布等因素有关<sup>[13-16]</sup>。根据热载荷的大小, Huang 等<sup>[17-18]</sup>在启动过程观察到几种特定的启动模式, 本文对单面工况和双面工况的启动过程及变负荷运行进行了探究。双面蒸发器工作原理为: 热负荷加到蒸发器加热面, 部分热量通过蒸发器壁面传递到毛细芯, 液体在毛细芯具有蒸气槽道侧产生蒸发, 产生的蒸气沿着蒸气槽道流向集气腔并积聚, 达到一定压力后, 蒸气通过蒸气管路进入到冷凝器冷凝并释放热量, 冷凝的过冷液在蒸发器中毛细芯的毛细力的作用下通过液体管路回到补偿腔, 为毛细芯的蒸发侧补给工质, 完成这样一个循环后, 就实现了热量从热端向冷端的传递。

### 2.1 单面启动实验

在 10~210 W 之间都可以正常启动, 图 3 给出了 10 W、30 W、40 W、160 W 的启动过程。当小于 30 W 时, LHP 的启动表现为过冲模式和波动模式。随着热负荷的变化, 启动过程在某一热负荷范围内出现温度波动现象, 减弱温度波动对控制蒸发器壁面温度很重要<sup>[19-20]</sup>。图 3(a)为 10 W 启动过程, 热负荷加载后, 产生的蒸气沿着蒸气槽道和蒸气管路流向冷凝器, 此时冷凝器部分被液体工质占据, 冷凝器入口处的蒸气温度没有立刻上升并维持在一个稳定的值。由于背向导热效应和过冷液回流迟滞, 蒸发器壁面温度上升, 蒸气被加热为过热蒸气, 蒸发面和补偿腔之间的温差对应的压差增大。约 20 min 后, 冷凝器入口再一次发生跳跃并维持较高的温度, 表明此时的压差足以保证工质循环。从冷凝器出来的过冷液对补偿腔进行冷却, 因循环量太小, 运行温度稍微下降, 最后以较小的波幅运行。

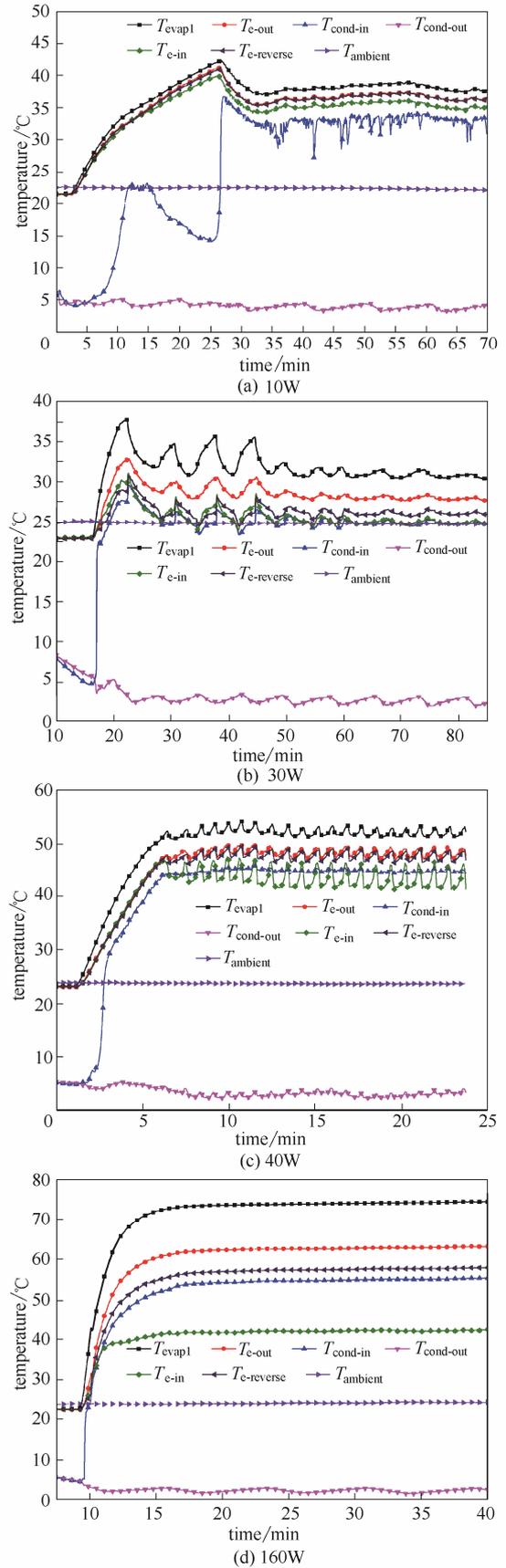


图 3 单面启动过程

Fig.3 Startup process with one surface heated only

图 3(b)为 30 W 启动过程，冷凝器入口处没有温度的大幅下降，而蒸发器进出口、蒸发器背面与冷凝器的进出口随着蒸发器壁面温度的波动而发生温度波动，波幅达 5℃。蒸气连续进入到冷凝器冷凝，过冷液回到补偿腔降低了蒸发器壁面温度，波动幅度随着过程的进行逐渐减小，最终趋于稳定。

热负荷进一步增大到 40 W 时，过冷液快速地回到补偿腔，有效抑制了通过蒸发器侧壁和毛细芯的导热作用，启动过程温度过冲现象消失，如图 3(c) 所示。但是，此时蒸气量仍然相对较小，气液界面不能完全进入到冷凝器内，界面在冷凝器入口处来回移动而引起冷凝器入口处温度波动，导致整个环路出现温度波动。实验结果表明，小于 90 W 时均伴随着不同程度的温度波动，而在小于 30 W 的热负荷启动中还伴随着温度过冲现象。

图 3(d)为 160 W 时的启动过程，蒸发器的温度和冷凝器入口的温度几乎同时上升，蒸气管路全部被蒸气占据，气液界面已经完全进入到冷凝器内部，启动过程快速平稳。

启动过程比较复杂，热负荷是影响启动的主要因素，随着热载荷变化表现为多种模式的结合。

### 2.2 双面启动实验

两个加热面同时加相等的热负荷，观察了热负荷为 10 W-10 W 到 120 W-120 W 系统的启动行为，图 4 给出了 10 W-10 W 与 80 W-80 W 等负荷启动。在给定的热负荷范围内，启动过程中未观察到温度过冲和启动失败现象，两个加热面的启动过程一样，两面温差小于 1℃。

由 LHP 的运行原理知，毛细芯产生的毛细压力是工质循环的动力来源。两个毛细芯同时工作时，需要更多的液体补给到毛细芯的蒸发侧，要求更大的工质循环量，过冷液快速循环可以有效地抵消通过侧壁和毛细芯的导热，降低加热面的温度。

图 4(a)是 10 W-10 W 的启动，两个面同时加热负荷，蒸发器壁面和入口没有出现温度过冲现象，和 10 W 单面启动一样，在冷凝器入口处温度发生两次阶跃。但是两个面同时加热负荷，上下两个毛细芯同时参与蒸发，相当于拓展了蒸发器的面积，使得蒸发更加均匀，产生蒸气的速率更稳定，有利于整个系统的稳定。另一方面，工质循环的动力增大，液体易于回到补偿腔，补偿腔温度越低，毛细芯两侧的温差对应的压差越容易形成，不需要更高的过热度来引起核态沸腾，所以两面同时加热负荷时，未观察到温度过冲现象。图 4(b)是 80 W-80 W

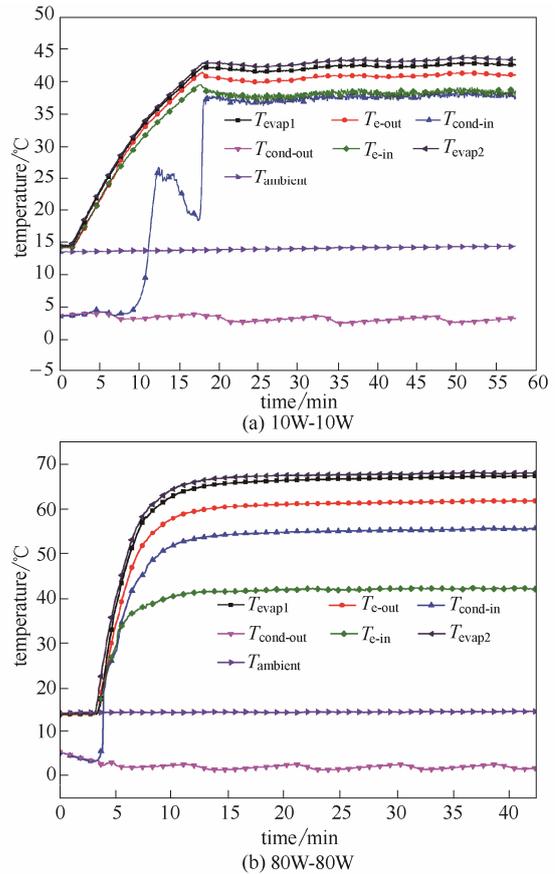


图 4 双面等热负荷的启动过程  
Fig.4 Startup process with two surfaces applied equal heat load

的启动。两个面的启动过程基本一样，上毛细芯 1 并未出现因供液不足而启动失败，与传递总热载荷为 160 W 的单面启动过程相比，稳定运行时运行温度约低 8℃。

### 3 交替热负荷运行

LHP 在运行过程中，热载荷会根据实际情况需要发生变化，Wukchul 等<sup>[21]</sup>研究了正弦变化的热负荷对 LHP 的影响。采用上下两个面交替加载热负荷的方式来模拟实际应用中变化的热负荷，热负荷加载方式如表 1。

图 5 为两个面交替运行曲线。在 10 W-0 W 启动过程中，与单面 10 W 启动过程相比，冷凝器入口处温度波动较为剧烈，表明环路内部初始气液分布对启动过程的影响较大，随着热负荷转换为 0 W-20 W，整个环路又进入到稳定运行阶段。在 30 W-0 W 到 90 W-0 W 之间，可以明显地观察到温度波动，热负荷进一步增大，温度波动现象消失，这与单面启动过程中表现的启动行为相似。两个面交

表 1 热负荷分配

Table 1 Heat load arrangement

Heating surface 1/W	Heating surface 2/W
10	0
0	20
30	0
0	40
50	0
0	60
70	0
0	80
90	0
0	120
140	0
0	160
190	0
0	210
120	120

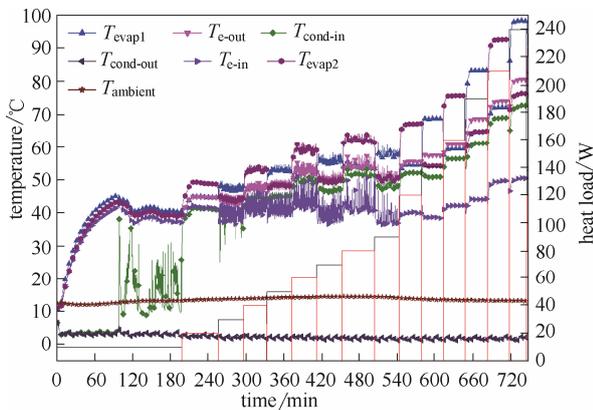


图 5 双面交替热负荷运行

Fig.5 Operation with alternative heat load

替加热负荷，撤掉热负荷的加热面温度要高于单面运行时不工作的那个面的温度，在余热的影 响下，与之对应的毛细芯继续工作，导致环路内工质的循环量随着过程的进行逐渐在改变，故双面交替运行时两个面的相互影响较单面运行时要大。单面启动和热载荷交替运行的实验表明，在 10°重力辅助倾角的运行条件下，随着热负荷的增加，逐渐从温度波动状态向稳定状态转变，意味着气液界面已经从蒸气管路侧移到冷凝器内，运行模式从单一的毛细控制模式转向毛细-重力共同控制模式。

## 4 结 论

本文对甲醇-铜双面加热蒸发器的环路热管的启动以及交替变热负荷运行性能进行了实验研究。通过本文的研究，可以得到如下结论。

(1) 单面加热负荷时，可以在 10~210 W 成功启动，单面传递的最大热流为  $21.8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，启动模式随着热载荷的变化而变化，在小于 30 W 时，表现为温度过冲和温度波动的结合。

(2) 双面同时加热负荷启动时，液体更容易回流，可以更好地对补偿腔进行冷却，在给定的热负荷工况下启动过程未观察到温度过冲现象。

(3) 从单面 10 W 启动和 10 W-0 W 交替热负荷启动发现，初始的气液分布对启动过程影响较大。

(4) 在热负荷交替的变工况情况下，系统能够快速从一个面转向另一面运行。卸掉热负荷后的加热面的余热对系统的运行有较大的影响。

## References

- [1] MAYDANIK Y F. Review: loop heat pipes [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2005, **25**: 635-657.
- [2] MAYDANIK Y F, CHERNYSHEVA M A, PASTUKHOV V G. Review: loop heat pipes with flat evaporators [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2014, **67**:294-307.
- [3] LIU Z C, LI H, CHEN B B, *et al.* Operational characteristics of flat type loop heat pipe with biporous wick [J]. *Int. J. Therm. Sci.*, 2012, **58**: 180-185.
- [4] CHEN B B, LIU W, LIU Z C, *et al.* Experimental investigation of loop heat pipe with flat evaporator using biporous wick [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2012, **48**:34-40.
- [5] LI H, LIU Z C, CHEN B B, *et al.* Development of biporous wicks for flat-plate loop heat pipe [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, **37**: 91-97.
- [6] WANG D D, LIU Z C, HE S, *et al.* Operational characteristics of a loop heat pipe with a flat evaporator and two primary biporous wicks [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2015, **89**: 33-41.
- [7] XU J L, JI X B, YANG W L, *et al.* Modulated porous wick evaporator for loop heat pipes: experiment [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2014, **72**: 163-176.
- [8] YE H C C, CHEN C N, CHEN Y M. Heat transfer analysis of a loop heat pipe with biporous wicks[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2009, **52**: 4426-4434.
- [9] 莫冬传, 丁楠, 吕树申. 平板型环路热管应用于 LED 的启动特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2009, **30**(10) : 1759-1762.
- [10] MO D C, DIGN N, LÜ S S. Start-up characteristics of flatten loop heat pipe using in LED [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, **30**(10): 1759-1762.
- [10] 莫冬传, 丁楠, 吕树申. 热泄漏对平板型环路热管传热特性的影响[J]. *工程热物理学报*, 2010, **31**(9) :1513-1515.
- [10] MO D C, DIGN N, LÜ S S. Heat leak effects on the heat transfer performance of a flat loop heat pipe [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, **31**(9): 1513-1515.
- [11] 汪冬冬, 陈彬彬, 刘志春, 等. 并联蒸发器平板式环路热管的实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2013, **34**(10): 1939-1943.
- [11] WANG D D, CHEN B B, LIU Z C, *et al.* Experimental study on flat type loop heat pipe with parallel evaporator [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, **34**(10): 1939-1943.

- [12] 曲燕. 环路热管技术的研究热点和发展趋势 [J]. *低温技术*, 2008, **37**(2):7-13.  
QU Y. Hot study and development trend of loop heat pipes [J]. *Cryogenics*, 2008, **37**(2):7-13.
- [13] ZHANG H X, LIN G P, DING T, *et al.* Investigation of startup behaviors of a loop heat pipe [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2005, **19**(4):509-518.
- [14] KU J. Operating characteristics of loop heat pipes [C]//29th International Conference on Environmental Systems. Denver, Colorado, 1999: 1-17. DOI: 10.4271/1999-01-2007.
- [15] SINGH R, AKBARZADEH A, MOCHIZUKI M. Operational characteristics of a miniature loop heat pipe with flat evaporator [J]. *Int. J. Therm. Sci.*, 2008, **47**:1504-1515.
- [16] STÉPHANE L, VALÉRIE S, JOCELYN B. Parametric analysis of loop heat pipe operation: a literature review [J]. *Int. J. Therm. Sci.*, 2007, **46**:621-636.
- [17] HUANG B J, HUANG H H, LING T L. System dynamics model and startup behavior of loop heat pipe [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2009, **29**:2999-3005.
- [18] WANG D D, LIU Z C, SHEN J, *et al.* Experimental study of the loop heat pipe with a flat disk-shaped evaporator [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, **57**: 157-164.
- [19] 盖东兴, 刘志春, 刘伟, 等. 平板型小型环路热管的温度波动特性 [J]. *化工学报*, 2009, **60**(6):1390-1397.  
GAI D X, LIU Z C, LIU W, *et al.* Characteristics of temperature oscillation in miniature loop heat pipe with flat evaporator [J]. *CIESC Journal*, 2009, **60**(6): 1390-1397.
- [20] LIU Z C, WANG D D, JIANG C, *et al.* Experimental study on loop heat pipe with two-wick flat evaporator [J]. *Int. J. Therm. Sci.*, 2015, **94**: 9-17.
- [21] WUKCHUL J, KEESOOL G, KWANGMIN P, *et al.* Transient responses of the flat evaporator loop heat pipe [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2013, **57**:131-141.