

DOI: 10.7652/xjtuxb201305007

不同倾角下平板型环路热管的实验研究

龙延, 魏进家, 吕虢

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了解决电子元器件的高效散热问题, 自行设计了一套平板型环路热管, 从减小平板型环路热管背向漏热及改善系统内部流动性能方面, 对蒸发器结构及管线布局进行改善, 重点讨论了 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 倾角时平板型环路热管的启动性能、运行特性及传热特性。结果发现: 与 0° 倾角相比, 有倾角存在时系统有更低的启动功率, 在相同功率范围内, 蒸发器运行温度更低, 运行过程更加稳定, 但对于倾角之间的各种情况, 系统的运行特性差距很小; 在传热性能方面, 系统热阻都随功率的增加而减小, 最后趋于平稳; 在相同功率范围内, 0° 倾角时系统热阻略高于有倾角时的情况, 而对于各倾角之间的情况, 仅在功率很低 (20 W 以内) 时系统热阻差较大, 但随着功率的增大, 系统热阻变化基本一致。

关键词: 平板型环路热管; 启动性能; 运行特性; 传热特性

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)05-0038-06

Experimental Study on Loop Heat Pipe with Flat Evaporator at Different Tilt Angles

LONG Yan, WEI Jinjia, LÜ Xiao

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To realize highly efficient heat dissipation of electronics, a loop heat pipe (LHP) with a flat evaporator was designed to study its operation characteristics at the tilt angles of 0° , 30° , 45° , 60° , 90° with an improved evaporator structure and a well arranged pipes which can reduce heat loss due to back conduction and improve inner flow performance. The results show that the LHP with inclination has a lower power to start up than the horizontal one, and at the same heat load, the operation temperature of the evaporator is much lower and the system is easier to reach a steady state with less temperature oscillations. However, there is slight difference in operating performance for the LHP at different title angles. The thermal resistance decreases with an increase in the heat load and a steady state occurs at last. The thermal resistance is larger for the horizontal case than that for the inclination case at the same heat load. The thermal resistances are very different at different tilt angles at low heat load, but the difference is small at high heat load.

Keywords: loop heat pipe; start up performance; operation characteristics; heat transfer performance

随着电子芯片的小型化、集成化, 电子元器件的热流密度已超过 100 W/cm^2 , 电子元器件热处理问

收稿日期: 2012-12-04。 作者简介: 龙延(1988—), 男, 硕士生; 魏进家(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(51225601)。

网络出版时间: 2013-02-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130225.1723.002.html>

题变得越来越严峻^[1]。环路热管是一种两相传热设备,依靠工质在多孔芯内形成的毛细力来驱动回路的运转^[2-3],具有散热能力强、传输距离远、无需额外附加驱动力、可靠性高等众多优势,可广泛应用于电子元器件的高效散热及空间冷却技术等相关领域。

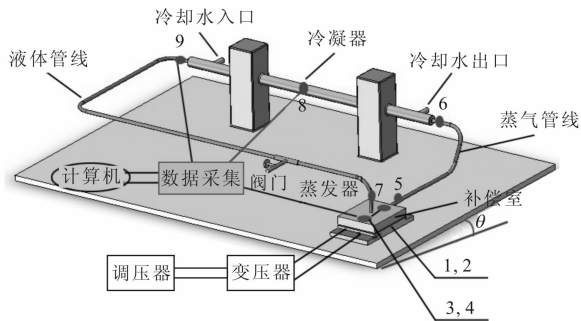
平板型环路热管是在传统圆柱型环路热管的基础上,对蒸发器结构进行了改进,以利于更好地与热源贴合,增加了接触面积,降低了传热热阻。同时,从场协同角度,平板型环路热管有更高的传热效率^[4]。为了进一步了解平板型环路热管的工作特性,许多学者进行了深入广泛的研究。Gai等具体研究了充液率、倾角及不同热载荷对小型平板型环路热启动性能的影响,并对温度波动现象给予了机理上的解释^[5]。Becker等研究了稳态条件下,蒸发器与冷凝器相对位置对椭圆平板型环路热运行特性的影响^[6]。Chen等对两种不同孔隙率的双孔径毛细结构进行了实验研究,并对系统热力及流动性能进行了比较^[7]。本文从减小平板型环路热管背向导热及改善系统内部流动性能方面,对蒸发器的结构、毛细芯的组成及系统管线布局等方面进行了改进,重点对不同倾角下系统的启动性能、运性特性及传热特性进行了实验研究。

1 实验系统简介

实验测试系统见图1,冷凝器及液体回流管线位于同一水平面且高于蒸发器,回流液入口位于补偿室正上方,这样布置对工质在冷凝器和液体管线内的流动以及回流液至补偿室的均布都是有利的。

整个系统由平板型环路(LHP)系统、加热系统、数据采集系统、冷却系统等组成。LHP系统由蒸发器及与之相连的补偿室、冷凝器、蒸气和液体管线组成;加热系统由调压器、变压器及不锈钢加热片组成,用低压交流电加热不锈钢线切割片的方式来模拟热源,不锈钢片与蒸发器底板通过天然云母片间接接触;数据采集系统由NI PXI-130平台对不同温度点进行数据采集,采集点分别为蒸发器底板温度 T_{ew} (测点1、2)、补偿室温度 T_s (测点3、4)、蒸发器出口温度 T_{eo} (测点5)、冷凝器入口温度 T_{ci} (测点6)、蒸发器入口温度 T_{ei} (测点7)、套管换热器壁面温度 T_{cw} (测点8)、冷凝器出口温度 T_{co} (测点9),温度测点布置如图1所示。其中,补偿室温度用两个内置铠装热电偶进行测量,其余测点温度均用壁面温度代替。热电偶采用铜-康铜T型热电偶,测量精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。冷却系统为套管式换热器,冷媒

为 $(18\pm 0.5)^\circ\text{C}$ 的循环水。



1~9:温度测点

图1 实验系统示意图

蒸发器结构如图2所示,上下壳体分别采用黄铜和紫铜。在满足基本密封的基础上,对蒸发器底板外周进行切削,以减小侧壁效应。毛细芯上下部分由300#和500#不锈钢丝网复合而成,这样不仅增大了工质在蒸发器内的渗透性,同时也增加了毛细抽吸力。蒸发器底面有效加热面积为 $50\text{ mm}\times 40\text{ mm}$,上面共有18个 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的蒸气槽道。与蒸发器相连的蒸气管线及液体管线长度分别为320 mm和900 mm,冷凝器管线长度为500 mm,所有管线均为4 mm/6 mm(内径/外径)的紫铜软管。

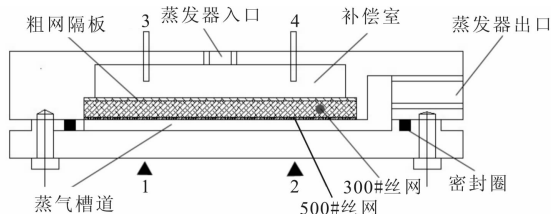


图2 蒸发器结构示意图

实验前先对系统做正压密封测试,通过收集保压前后系统内部气体量来判断密封好坏,再用真空度为 $2\times 10^{-2}\text{ Pa}$ 的真空泵对系统做负压密封测试,通过保压前后真空泵上压力表的变化来判断密封的可靠性。然后,将纯度(质量分数)为99.5%、占系统体积分数55%的无水甲醇倒吸入系统内部,待静置一段时间后,在不同倾角 θ (见图1)下进行实验。

2 实验结果及讨论

2.1 启动性能

环路热管可以自行启动,但并不意味着立即启动,其过程是一个非常复杂的瞬态现象,与蒸发器、补偿室的结构,以及系统内部气液初始条件有关^[2]。正常启动时,蒸气槽道内工质受热达到饱和温度后发生相变,蒸气通过蒸气管线到达冷凝器进行冷凝,

液态工质再沿液体管线回流至补偿室,维持补偿室较低的温度及毛细芯连续供液,使系统正常运行。

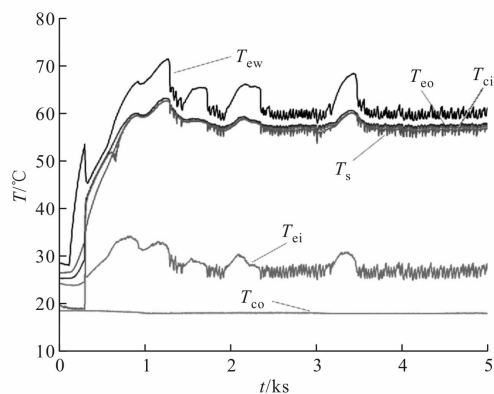
平板型环路热管启动过程分为3个阶段:清除蒸气槽道、蒸气管线及部分冷凝器内的液态工质;毛细芯两侧压差足够大,驱动回路运转;系统达到稳定运行阶段^[7]。在运行过程中,第1个阶段可能会需要较长的时间,蒸发器温度会升高甚至超过器件允许的温度,这在实际应用中都是不利的。因此,优良的启动性能是环路热管正常运行的关键。

2.1.1 功率对启动性能的影响 图3是 0° 倾角时系统在不同功率下的启动性能曲线。由图3a可以看出,系统在最低启动功率(50 W)启动时,启动时间较长,蒸发器壁面温升很高。当毛细芯两侧压差足够大,有回流液体至补偿室时,蒸发器壁面温度迅速降低。再经过很长一段时间,蒸发器壁面温经过几次间歇性振荡后逐渐趋于稳定。随着加热功率增大,系统启动时间缩短,蒸发器壁面温升相对较小,且系统能更快速地达到稳定运行阶段,如图3b~3d所示。这是因为大功率下工质蒸发速率加快,毛细芯两侧能快速形成较大压差,驱动回路运转的毛细力亦增加。

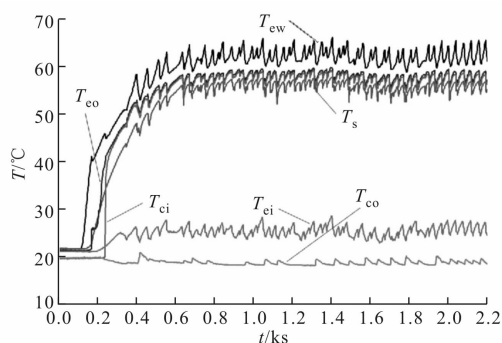
在上述实验过程中,蒸发器、补偿室及冷凝器各处温度都会存在不同程度的波动现象。这种温度波动现象的机理比较复杂,是由蒸发器、补偿室及冷凝器之间热力与水力相互作用引起的,补偿室温度决定了蒸发器的运行温度^[8],因而蒸发器壁面温度波动随补偿室内温度变化较大。

在热载荷从50~200 W每间隔15 W递增的过程中,蒸发器壁面温度波动逐渐增大,补偿室温度波动幅度先增大后减小;蒸发器出口与冷凝器入口温度基本相等,温度波动一致,波动机理与两处的气液界面及压力波动有关;冷凝器出口温度波动现象与冷凝器的激活程度有关,功率较小(80 W以内)时,冷凝器只有部分工作,工质在冷凝器中能够完全冷凝至过冷,因而出口处气液界面较稳定,波动较小,如图3a所示;随着功率增大(80~200 W),冷凝器激活程度增加,蒸气流速及冷凝能力随之变化,此处气液界面变得不太稳定,波动会呈现出先增大后减小的现象,如图3b~3d所示。蒸发器入口温度波动幅度受补偿室内部上方气液状态影响较大,而此处的气液状态又与不同功率下回流工质的过冷量和蒸发器向补偿室漏热的平衡程度有关。

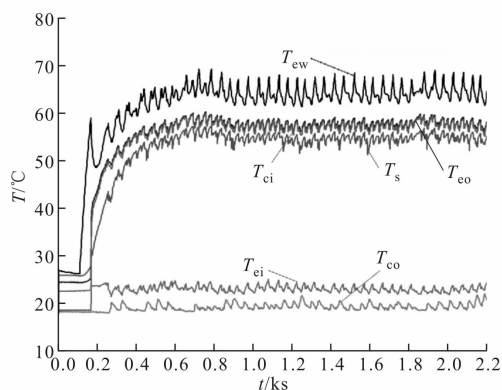
2.1.2 倾角对启动性能的影响 图4是 45° 倾角、最低启动功率(10 W)下的启动性能曲线,与 0° 倾角



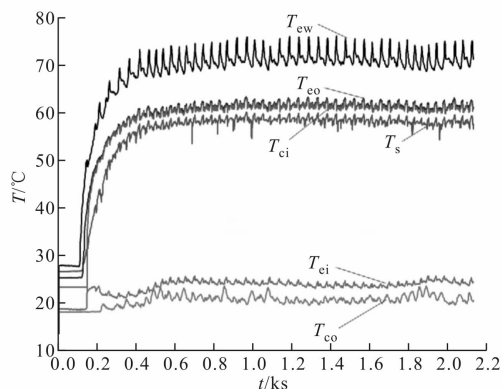
(a)最低启动功率(50 W)下的启动特性曲线



(b)95 W下的启动特性曲线



(c)140 W下的启动特性曲线



(d)200 W下的启动特性曲线

图3 0° 倾角时系统在不同功率下的启动特性曲线

相比,最低启动功率大大减小,且只有冷凝器入口存在较大的温度波动现象。这是因为有倾角存在时,重力辅助做功,工质流动阻力减小,系统所需毛细驱动力亦减小。同时,由于重力作用,工质主要集中在蒸发器及液体管路内,使得蒸发器及补偿室气液状态更加稳定。

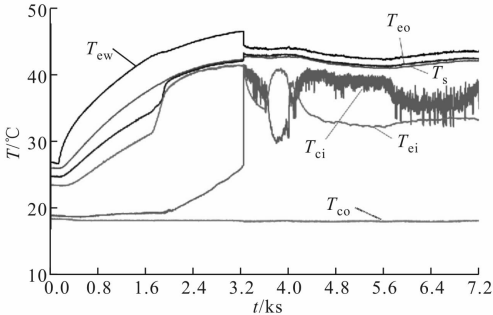


图 4 45°倾角、最低启动功率(10 W)下的启动特性曲线

图 5 是 45°倾角、140 W 下的启动性能曲线。系统顺利启动并运行一段时间后,冷凝器出口和蒸发器入口温度会突然上升而其余温度会突然下降,随后很快就平稳运行。这种现象与系统内部初始气液分布被重新替代再分布有关。

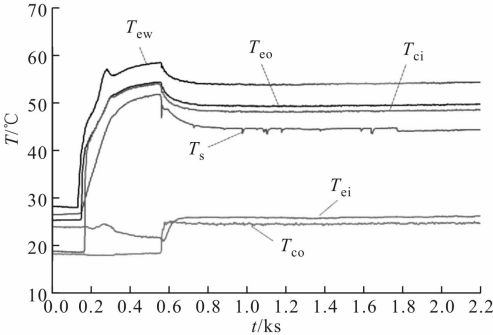


图 5 45°倾角、140 W 下的启动特性曲线

2.2 运行特性

2.2.1 不同功率与倾角下系统各处稳态运行温度

图 6、图 7 为 0°、45°倾角下系统稳态运行时各测点温度随功率变化的曲线。由图可以看出,随着功率的增大,蒸发器壁面温度都会呈现出先增大后减小及再增大 3 个过程。这种现象主要与回流液体的过冷量和背向导热的平衡程度及冷凝器的散热程度有关。在相对较小的功率范围内,回流液体过冷量变化不大,而背向漏热量逐渐增加,补偿室温度随之升高,壁面温度呈上升趋势,如图中的阶段 I 所示;随着功率进一步增大,回流液体过冷量增大,能够平衡更多的漏热,补偿室温度下降,壁面运行温度也随之

降低,如图中的阶段 II 所示;当功率增大至回流工质过冷量不能完全抵消背向漏热,且冷凝器的冷凝能力越来越弱时,补偿室温度又再次不同程度地升高,从而导致蒸发器壁面温度又开始升高,如图中的阶段 III 所示。

与 $\theta=0^\circ$ 相比,有倾角存在时系统各测点温度随功率的增加变化更大,且在相同壁面温度下,传热能力也大大增强。这是因为有倾角存在时,重力辅助做功,系统流动阻力减小,工质回流更加容易的缘故。

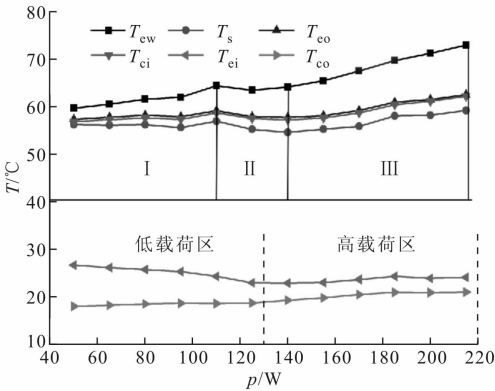


图 6 0°倾角时各测点稳态运行温度随功率的变化

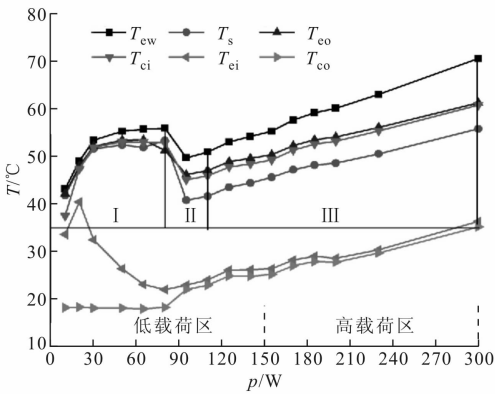


图 7 45°倾角时各测点稳态运行温度随功率的变化

2.2.2 不同倾角下蒸发器壁面温度比较

图 8 为不同倾角下蒸发器稳态壁面温度随功率变化的曲线。由图可以看出,与 0°倾角相比,相同功率范围内,有倾角存在时系统运行温度明显偏低,但对于各倾角之间,除 60°倾角的阶段 II 温度变化有一定偏差外,其余阶段蒸发器稳态运行温度随功率变化的曲线基本一致。这说明倾角的变化根本上反映的是重力做功的程度,对于本系统的设计,在大倾角范围时,蒸发器与冷凝器相对高度变化有限,因而其最终运行温度变化并不明显。

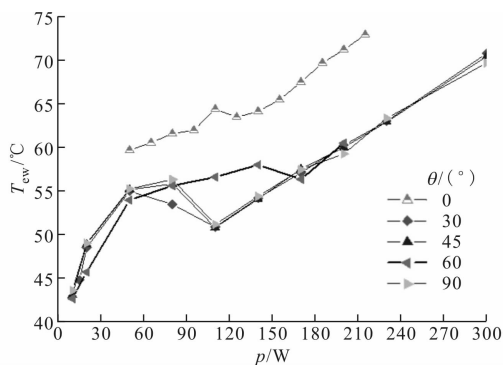


图8 不同倾角下蒸发器稳态壁温随功率的变化

2.2.3 不同倾角下变功率运行曲线 图9、图10分别为0°和45°倾角时系统变功率连续运行曲线。

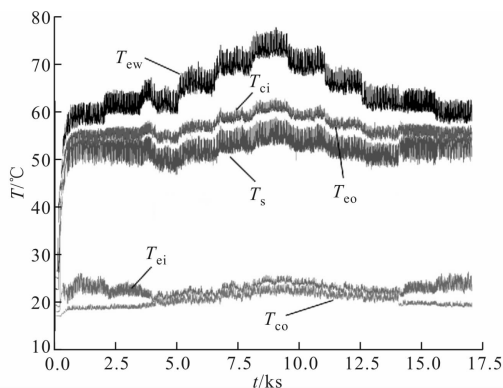


图9 0°倾角时变功率连续运行曲线

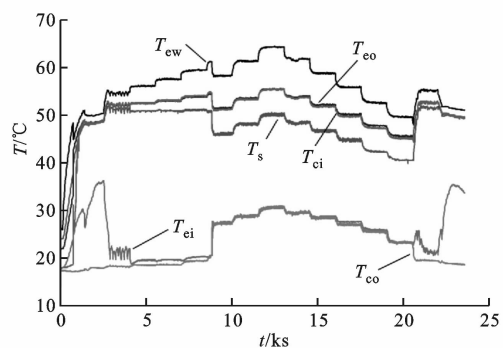


图10 45°倾角时变功率连续运行曲线

可以看出:随着功率的变化,系统都能很快达到新的平衡,说明系统有良好的自适应性;其次, $\theta=0^\circ$ 变功率运行时,系统各处温度始终存在波动现象,且波动幅度明显高于 $\theta=45^\circ$ 时的情况,这与系统内部气液状态及补偿室与蒸发器的匹配程度等诸多因素有关;最后,系统在 $\theta=45^\circ$ 变功率运行时,温度波动仅存在于20~50 W的功率范围,而其他情况下系统都能稳定运行。

2.3 传热特性

将环路热管视为从高温向低温传递热量的元

件,其传热性能可以用热阻表示

$$R_{LHP} = (T_e - T_c) / Q$$

式中: Q 为热载荷; T_e 为蒸发器壁面平均温度; T_c 为冷凝器平均温度,包括冷凝器进出口温度和冷凝器壁面温度(用套管换热器壁温近似修正)。

图11为0°、30°、45°、60°、90°倾角时系统热阻随功率的变化曲线。可以看出,系统热阻都随功率增大逐渐减小,最后趋于平稳。在相同功率范围内,0°时系统热阻略高于有倾角时的情况,但对于其他倾角之间,仅在很低的功率范围(20 W以内)时热阻差异较大,随后在功率的增大过程中,热阻变化基本一致。

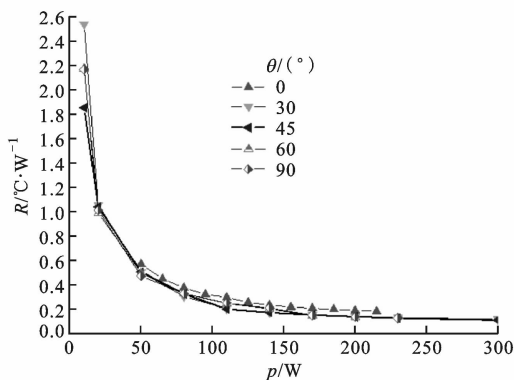


图11 不同倾角下系统热阻随功率的变化

此外,在整个实验过程中,30°倾角时系统有最大热阻2.54 °C/W,相应热载荷为10 W,蒸发器壁面温度为45 °C;45°倾角时有最小热阻0.11 °C/W,相应热载荷为300 W,蒸发器壁面温度为71 °C。

3 总结

本文研究了不同倾角下平板型环路热管的启动性能、运行特性及传热性能,得出以下几点:①随着功率增大系统启动过程更加快速,更容易达到准稳态过程,有倾角存在时,系统启动功率更低;②不同倾角下,随着功率增大,蒸发器稳态运行温度呈现出先增大后减小及再增大3个阶段,0°倾角时壁温随功率变化小于有倾角存在的情况,运行温度也明显偏高;③有倾角存在时,随着倾角的增大,蒸发器稳态运行温度曲线变化基本一致;④系统热阻都随功率增大逐渐减小,最后趋于平稳,且在相同功率范围内,0°倾角时系统热阻略高于有倾角存在时的情况,有倾角存在时,仅在很低功率(20 W以内)下系统热阻差较大,而随着功率的增大,系统热阻变化基本一致。

参考文献:

- [1] MCGLLEN R J, JACHUCK R, LIN Song. Integrated thermal management techniques for high power electronic devices [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(8/9): 1143-1156.
- [2] KU J. Operating characteristics of loop heat pipes [C] // 29th International Conference on Environmental System. Washington, DC, USA: SAE, 1999: 1999-01-2007.
- [3] MAYDANIK Y F. Loop heat pipes [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(5): 635-657.
- [4] 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(12): 1273-1281.
- [5] GAI Dongxing, LIU Zhichun, LIU Wei, et al. Operational characteristics of miniature loop heat pipe with flat evaporator [J]. Heat and Mass Transfer, 2009, 46(2): 267-275.
- [6] BECKER S, VERSHININ S, SARTRE V, et al. Steady state operation of a copper-water LHP with a flat-oval evaporator [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(5): 686-695.
- [7] CHEN B B, LIU Z C, LIU W, et al. Operational characteristics of two biporous wicks used in loop heat pipe with flat evaporator [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(7/8): 2204-2207.
- [8] KU J, OTTENSTEIN L, KOBEL M, et al. Temperature oscillations in loop heat pipe operation [J]. AIP Conference Proceedings, 2001, 52(1): 255-265.

[本刊相关文献链接]

- 韩晓红, 闵旭伟, 李鹏, 等. 一种利用气泡泵效应重力辅助回路热管的实验研究. 2012, 46(3): 9-14.
- 张海清, 郭蓓. 采用分布参数模型的 CO₂ 微通道蒸发器数值模拟. 2012, 46(1): 42-47.
- 郭宪民, 王善云, 汪伟华, 等. 环境参数对空气源热泵蒸发器表面霜层影响研究. 2011, 45(3): 30-34.
- 白涛, 晏刚, 张倩. R41 跨临界单级压缩带回热器热泵系统研究. 2011, 45(3): 35-39.
- 王永涛, 吴裕远, 禹志强, 等. NH₃-H₂O-LiBr 吸收式制冷机吸收和蒸发性能的实验研究. 2011, 45(3): 40-43.
- 黄东, 吴蓓. 风速非均匀分布对蒸发器性能的影响. 2010, 44(9): 6-10.
- 邱晟华, 何永清, 毕勤成. 充灌磁性液体的脉动热管试验研究. 2010, 44(7): 6-8.
- 黄东, 贾杰楠. 室外换热器流路布置对热泵空调器的性能影响分析. 2010, 44(7): 33-37.
- 李权旭, 孙敏超, 黄东. 风速分布对双排管两流路蒸发器性能影响的模拟研究. 2010, 44(5): 50-55.
- 盖东兴, 刘伟, 刘志春, 等. 环路热管系统温度波动的机理研究. 2010, 44(3): 26-31.

(编辑 荆树蓉)

(上接第5页)

- [4] JOEL E, BRAD M, PANNEER S. Testing of high performance concrete as a thermal energy storage medium at high temperatures [C] // Proceedings of the ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability. New York, USA: ASME, 2011: 723-728.
- [5] 朱教群, 李圆圆, 周卫兵, 等. 储热混凝土单元设计与储热模拟 [J]. 节能, 2009(1): 13-15.
- [6] XU Ben, LI P, CHO L C. Extending the validity of lumped capacitance method for large Biot number in thermal storage application [J]. Solar Energy, 2012, 86(6): 1709-1724.
- [7] SHITZER A, LEVY M. Transient behavior of a rock-bed thermal storage system subjected to variable inlet air temperature: analysis and experimentation [J]. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 1983, 105(2): 200-206.

(编辑 荆树蓉)