

文章编号: 0253-4339(2009)06-0026-06

DOI编码: 10.3969/j.issn.0253-4339.2009.06.026

平板型mLHP实验研究

盖东兴 刘志春 刘伟 杨金国

(华中科技大学能源与动力工程学院 武汉 430074)

摘要 研制了一套以铜为壳体、不锈钢丝网为毛细芯、丙酮为工质的小型平板型环路热管, 实验研究了其系统倾角为 10° 、 50° 、 90° , 工质充灌量为50%、60%和70%条件下的运行特性。实验显示铜-不锈钢-丙酮平板型mLHP具有良好的启动和变工况特性。mLHP系统在热负荷低于18W和高于42W时均能达到稳定运行, 而在热负荷介于18~42W的某些工况, 系统出现温度波动现象, 且其温度波动的波幅和周期与系统倾角、充灌量及热负荷有着密切的关系。系统在变工况运行时具有很快的响应速度, 一般在2~3min内达到新平衡状态。此外, 在不同工况下系统热阻介于 $0.45\sim 2.8^\circ\text{C}/\text{W}$ 之间。

关键词 工程热物理; 环路热管; 热控

中图分类号: TK121; TB651

文献标识码: A

Experimental Study on Miniature Loop Heat Pipe with Flat Evaporator

Gai Dongxing Liu Zhichun Liu Wei Yang Jinguo

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

Abstract A series of tests were carried out on a miniature loop heat pipe (mLHP) with a flat evaporator and a fin-and-tube type condenser. The loop is made of pure copper with stainless mesh wick and uses acetone as working fluid. The investigation into the start-up reliability of the mLHP was conducted at different heat loads, system tilt angles and charging ratio of working fluid. The test results show that the mLHP would achieve steady state at heat load lower than 18W or higher than 42W, and temperature oscillations were observed when heat load was in the range of 18-42W. The amplitude and period of the temperature oscillation were related to the tilt angle, the charging ratio, and the heat load. The system had quick thermal response to variable condition and the loop would achieve steady state in 2-3min. In addition, the thermal resistance of the mLHP was $0.45\sim 2.8^\circ\text{C}/\text{W}$ under different conditions.

Keywords Engineering thermophysics; Loop heat pipe; Thermal control

环路热管 (Loop Heat Pipe, LHP) 1972年诞生于前苏联, 并已经在空间科学领域得到成功应用^[1]。近年来, 随着电路集成度的进一步提高, 电子器件散热问题已经成为制约电子工业发展的一个瓶颈。热失效是电子设备主要失效形式之一, 且失效随温度成指数关系增长^[2-6]。

LHP是被动式的两相散热装置, 被公认为理想的制冷装置^[7]。随着科技的发展, LHP正在向小型化、平板型和高热流、远距离的方向发展^[8-12]。这里采用500目不锈钢丝网为毛细芯, 以丙酮为工质, 蒸发器加热壁面温度控制在 60°C 以内, 实验研究平板型mLHP在 10° 、 50° 、 90° 三种系统倾角以

及50%、60%和70%三种工质充灌量条件下的启动及变工况运行特性。

1 实验系统简介

实验系统是由小型环路热管 (mLHP) 系统、辅助加热系统、环境温度调节系统、真空机组系统、数据采集系统等组成。图1所示为小型平板式LHP系统的示意图, 该系统由一个含有500目不锈钢丝网 (材质: 316, 共82层) 多孔芯的平板式蒸发器 (结构如图2所示)、蒸汽管路、风冷管翅式冷凝器、液体管路组成, 实验系统中蒸发器、冷凝器以及所有管路均为紫铜制成, 其具体几何参数如表1所示;

基金项目: 国家自然科学基金 (50876035)、中国博士点学科新进教师博士点基金 (20070487093) 资助项目 (The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (50876035) and Doctoral Program Foundation for Young Scholar of Higher Education of China (20070487093).)

作者联系方式: E-mail: gaidongxing@smail.hust.edu.cn

收稿日期: 2009年3月24日

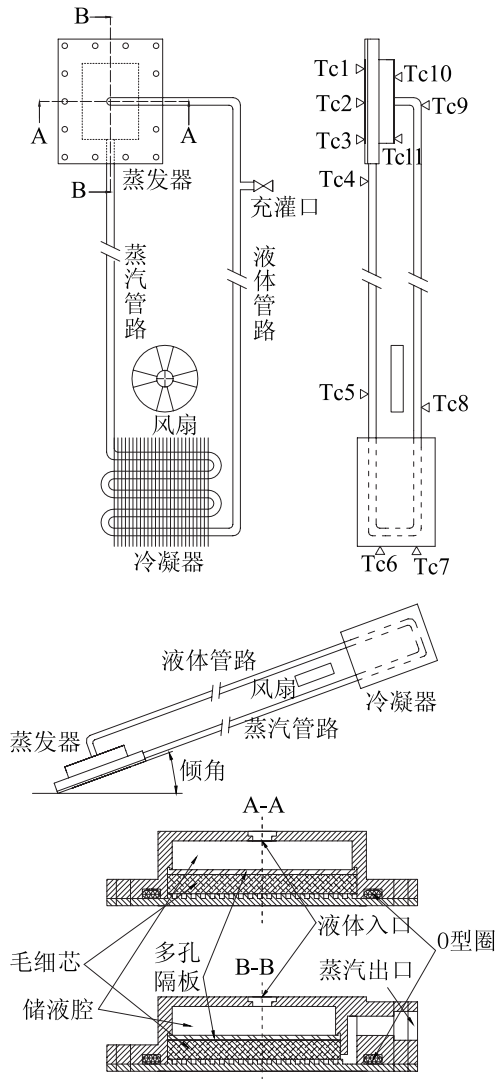


图1 小型平板式LHP实验系统简图及蒸发器结构简图
Fig.1 Schematics of the mLHP and cross section of the evaporator

实验工质为丙酮(纯度99.5%), 充灌前系统通过机械泵和扩散泵两级真空机组将系统真空度抽至 3.0×10^{-4} Pa。温度测量系统采用Keithley-2700数据采集仪, 12个铜-康铜T型热电偶来检测系统各主要区域的温度以及环境温度, 所有热电偶标定后测温误差为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。各温度测点位置如图1表示。实验采用2根加热棒安装在 $40\text{mm} \times 30\text{mm} \times 35\text{mm}$ 的紫铜块内作为模拟热源, 通过调节变压器供给电热棒不同功率。模拟热源以及蒸发器外层包裹厚10mm导热系数为 $0.012\text{W/m}\cdot\text{K}$ 的纳米超效绝热材料。加热系统的热损失: $Q_{\text{ost}} = -\lambda A \Delta T / b$, 其中 λ 为保温材料导热系数; A 为加热器与保温材料的接触面积; b 为保温材料厚度; ΔT 为保温材料内外壁的温差。采集温度时同时采集保温材料内外壁的温度, 从而可以算出在不同热流密度情况下通过保温材料

散失的热量。通过测量结果计算得, 系统在最高热负荷60W时候, 通过纳米保温材料的热量损失为0.16W, 加热系统的相对误差低于0.3%。

2 实验结果讨论

2.1 平板型mLHP热阻比较

根据环路热管的原理, 小型平板式LHP热阻定义为: $R_{\text{mLHP}} = (T_e - T_c) / Q$

其中, T_e 为蒸发器加热壁面平均温度; T_c 为冷凝器壁面平均温度; Q 为加热负荷。

表1 小型平板式LHP实验系统结构参数表

Tab.1 Geometric characteristics of the experimental mLHP

	壁厚/mm	1.5
	凸台尺寸/mm ³	1×1×1
加热壁面	槽宽/mm	1
	凸台数	18×15
	长度/宽度/mm	40/30
蒸发器	边壁 壁厚/mm	1.5
	多孔隔板 壁厚/mm	0.5
	补偿腔 长度/宽度/mm	34.5/30
	高度/mm	6
毛细芯	长度×宽度×厚度/mm ³	36.5×30×4
	材质	316L
	丝网目数×层数	500×82
蒸汽管路	直径(外/内)/mm	6/4
	长度/mm	320
液体管路	直径(外/内)/mm	6/4
	长度/mm	530
冷凝器	直径(外/内)/mm	6/4
	长度/mm	810
	翅片厚度/mm	0.05
	翅片长/宽/mm	100/20
	风扇转速/(r/min)	3000

表2 平板mLHP系统热电偶布点说明

Tab.2 The placement of thermocouples of the experimental mLHP

测试点	位置描述	备注	英文缩写
TC1~TC3	蒸发器加热表面	热电偶布置在加热器表面微槽中	Evap-wall
TC4	蒸发器出口		Evap-out
TC5	冷凝器入口		Cond-in

TC6	冷凝器翅片末端	由于翅片排列紧密, 无法直接检测冷凝器管路, 故检测翅片	Cond-fin
TC7	冷凝器翅片末端		
TC8	冷凝器出口	Cond-out	
TC9	蒸发器入口	Evap-in	
TC10	蒸发器补偿腔壁面	检测蒸发器补偿腔是否因为温度过高而发生相变	CC
TC11	蒸发器补偿腔壁面		
TC12	环境温度	将热电偶贴于固体表面	Air

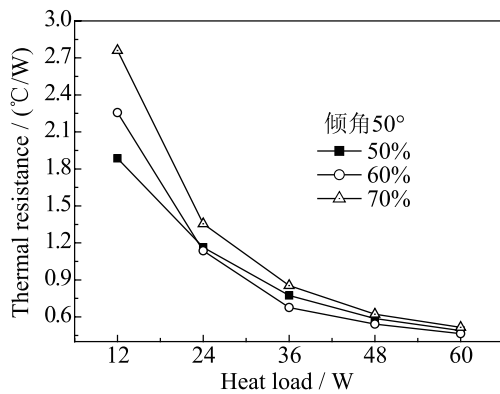


图2 倾角50°不同充灌量的热阻
Fig.2 The R_{mLHP} at different charging ratio

由图2可知, 平板mLHP的系统热阻随着热负荷的增大而减小。在相同系统倾角条件下, 工质充灌量60%系统比70%系统热阻平均小18.72%。其原因是: 1) 系统在大充灌量条件下, 用于相变产生的蒸汽的空间相对较小而增加了蒸汽压力; 2) 由于环路内液体质量增加, 驱动环路运行所需的毛细力相对较大, 从而也增加了蒸汽压力。在相同热负荷条件下, 蒸汽压力提高意味着蒸汽温度以及蒸发器表面温度提高, 但此时冷凝器平均温度基本相同, 所以系统在大充灌量时热阻较大。另外, 系统热阻还与蒸发器储液腔内汽液分布状态有关, 当储液腔内液体量较少时, 将有部分毛细芯直接和储液腔内的汽泡接触, 因为不锈钢丝网具有明显各向异性, 其在轴器温度因部分“烧干”而温度上升。这时切向抽吸力大而在径向抽吸力很小, 所以, 与汽泡相接的毛细芯部分容易发生“烧干”, 此时蒸发50°-50%系统热阻大于50°-60%的原因。以上分析可知, 工质充灌量对系统热阻影响较大, 实验系统最佳工质充灌量在60%左右。实验发现, 系统的热阻随着系统倾角的增大而减小, 比如在充灌量为50%时, 90°倾角的热阻比50°时平均小6.0%。其原因是: 系统在大倾角时可以借助更大重力来驱动

环路运行, 从而降低了蒸汽压力; 另外, 系统在大倾角时蒸发器储液腔内的液体工质较多, 但其分布不如小倾角系统。所以, 系统热阻是受到充灌量, 系统倾角等共同影响。

2.2 平板型mLHP启动实验研究

启动性能是mLHP的重要特征之一。由于平板式蒸发器的结构背向漏热和侧壁导热比较严重, 在系统启动阶段容易在蒸发器储液腔内产生汽泡, 如果汽泡含量过多有可能堵塞液体管路而导致液体无法回流。此外, mLHP启动性能也受到汽液分布的初始状态, 系统倾角, 系统工质充灌量, 以及蒸发器加热热流, 冷凝器冷凝温度等的影响。在三个不同倾角10°、50°、90°以及三种不同工质充灌量50%、60%和70%条件下做了热负荷12W~60W(热流密度1W/cm²~5W/cm²)系统启动实验, 实验表明系统具有良好的启动性能。

2.2.1 不同功率对mLHP的启动特性影响

平板型mLHP系统启动过程分为三部分: 1) 前启动阶段, mLHP系统蒸发器受热在蒸汽槽道毛细芯上部产生蒸汽将蒸发器蒸汽槽道、蒸汽管路中的液体推入蒸发器储液腔内, 此过程以蒸发器入口处温度突然降低为标志; 2) 后启动阶段, 毛细芯产生的毛细力不断增大, 当其大于整个系统运行压降时, 整个环路开始运行, 其以蒸发器入口温度再次降低为标志; 3) 系统稳定运行阶段, 系统最终或者达到一个稳定运行阶段或者达到一个温度波动阶段, 如图3、图4所示。

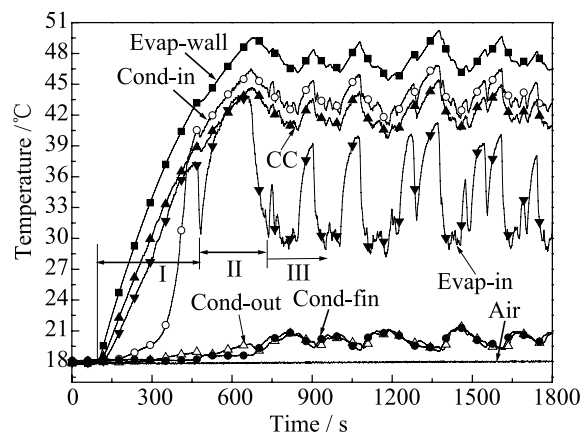


图3 倾角50°, 充灌量60%, 24W启动
Fig.3 Start-up of mLHP at $\theta=50^\circ$, $\alpha=60\%$, $Q=24W$

图3~4是系统在50°倾角60%充灌量条件下, 系统分别在24W和48W的启动特性曲线。实验发现, 随着加入系统热负荷越大, 系统前启动和后启动的时间都会缩短, 从而整个启动时间缩短。其原因是

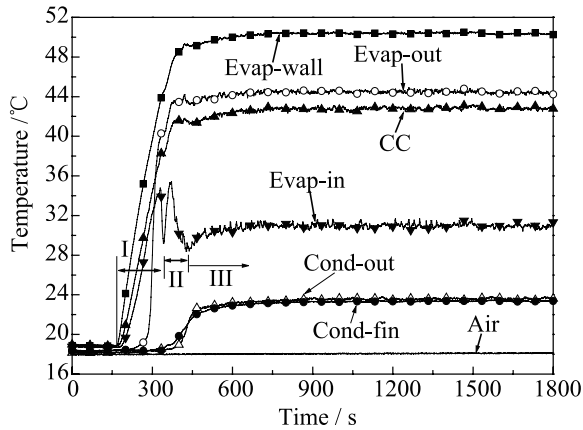


图4 倾角50°，充灌量60%，48W启动
Fig.4 Start-up of mLHP at $\theta=50^\circ$, $\alpha=60\%$, $Q=48W$

蒸汽在热负荷大时产生的更快，同样，毛细芯在热负荷较大时产生驱动环路运行的毛细力所需时间更短。实验发现，系统在较低的热负荷(小于18W)和较高的热负荷(大于42W)系统均能达到稳定运行，而当热负荷介于18~42W的某些工况，系统最终达到温度波动状态。这种温度波动现象产生的机理比较复杂，这里认为温度波动与工质充灌量和储液腔的匹配有关，同时也与蒸发器及冷凝器内汽液两相不稳定性有关。相关实验研究表明，汽液两相流的不稳定性与热载荷、系统压力、质量流速和回流液过冷度等多种因素有关。对于平板mLHP，工质在蒸发器和冷凝器内以汽液两相状态存在，在某些情况下，背向漏热、回流液质量流速及过冷度等的共同作用，使得工质受到扰动不断增强而出现一定频率的温度波动。实验发现，系统在蒸发器入口管路处温度波动最大，其次是蒸发器以及储液腔和蒸汽管路，而冷凝器和液体管路的波动最小。

2.2.2 系统倾角对mLHP启动性能的影响

图3、图5和图6是系统在充灌量60%，热负荷为24W，倾角分别为50°、10°和90°的系统启动特性图。由图可知，系统最终都达到一个温度波动状态，但其温度波动的波幅和周期明显不同。现有的实验结果可以按照波动的波幅和频率差异，将mLHP温度波动分为三类：1)小波幅，高频率的温度波动；2)小波幅，大周期(达几分钟)的温度波动；3)大波幅(有时超过10°C)，大周期(可达十几分钟)的温度波动。随着系统倾角增大，蒸发器储液腔内液体含量增大且其汽液分布发生变化，蒸发器透过毛细芯的背向漏热，侧壁导热，回流液体的质量及过冷度，以及系统向周围环境散失的热量共同作用于储液腔内汽液两相工质而使汽泡生长或者湮灭，汽泡生长和湮灭的速度决定了工质流动状

态，温度波动是系统内部工质流动发生波动的外在表现。

比较图3、图5和图6知，蒸发器壁面温度在10°倾角时候最高，而在90°倾角最低。其原因是：在相同充灌量及热负荷条件下，增大倾角后，系统可以借助更大的重力驱动液体回流导致蒸汽压力降低，蒸汽压力降低意味着蒸汽温度降低。

2.2.3 工质充灌量对mLHP启动性能影响

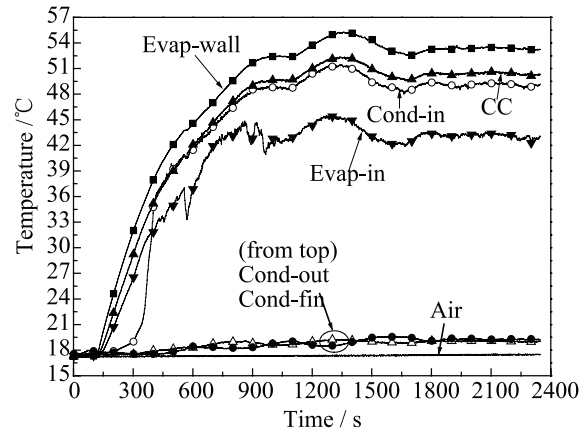


图5 倾角10°，充灌量60%，24W启动
Fig.5 Start-up of mLHP at $\theta=10^\circ$, $\alpha=60\%$, $Q=24W$

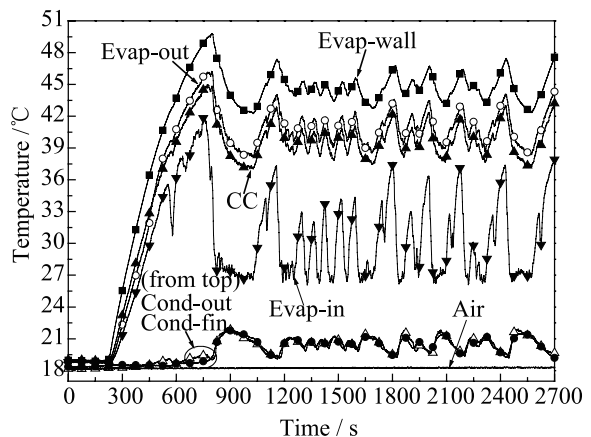


图6 倾角90°，充灌量60%，24W启动
Fig.6 Start-up of mLHP at $\theta=90^\circ$, $\alpha=60\%$, $Q=24W$

工质充灌量定义为： $\alpha=V_l/V_{mLHP}$ ，其中， V_l 为液体体积， V_{mLHP} 为系统总体积。图6、7和8表示在倾角90°，热负荷24W，充灌量分别为60%、50%、70%工况下系统启动特性。比较可知，系统在50%充灌量时能够稳定运行，而在60%和70%充灌量时系统发生了温度波动。其原因是充灌量的不同改变了储液腔内汽液比例，储液腔内汽液分布及其配比决定系统的温度波动特性。此外，系统在相同的倾角及热负荷条件下，系统工质充灌量越大，蒸发器壁面温度越高。究其原因是：充灌量越大，

系统驱动回路运行需要的动力越大, 根据Laplace方程知, 此时系统需要更高蒸汽压力, 蒸汽压力的提高意味着蒸汽温度及蒸发器壁面温度的提高。图6~8所示, 系统启动初始都需一定的过热度, 其原因是系统启动初始, 需要较大蒸汽压力以克服工质的惯性, 驱动回路运行, 当系统正常启动后, 系统所需蒸汽压力降低, 蒸汽温度随之降低。

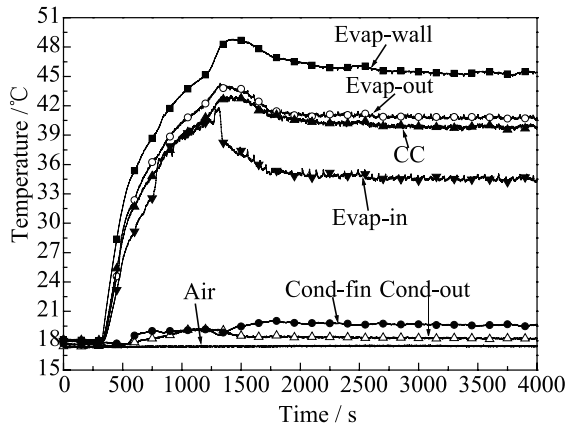


图7 倾角90°, 充灌量50%, 24W启动
Fig.7 Start-up of mLHP at $\theta=90^\circ, \alpha=50\%, Q=24W$

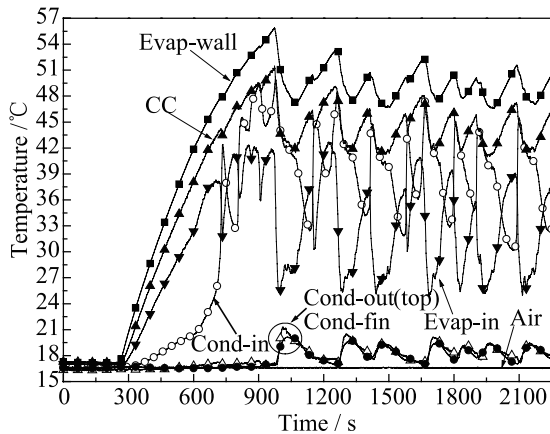


图8 倾角90°, 充灌量70%, 24W启动
Fig.8 Start-up of mLHP at $\theta=90^\circ, \alpha=70\%, Q=24W$

2.3 平板型mLHP变工况运行特性

环路热管是一种被动式散热系统, 其变工况运行特性是平板型mLHP承受热冲击能力的体现。图9是系统在50°倾角, 50%充灌量条件下的变工况运行图。由图可知, 系统运行过程有很小的温度波动现象, 尤其是蒸发器入口温度 $T_{Evap-in}$ 温度波动最大。在热负荷12W时候, $T_{Evap-in}$ 相对较高, 当热负荷增大到24、36W时, $T_{Evap-in}$ 随之降低, 而在热负荷从48W升高到60W时, $T_{Evap-in}$ 又有所升高, 其原因是: 液体回流量及其过冷度和蒸发器向蒸发器入口管路处的导热量的相互作用共同决定了 $T_{Evap-in}$

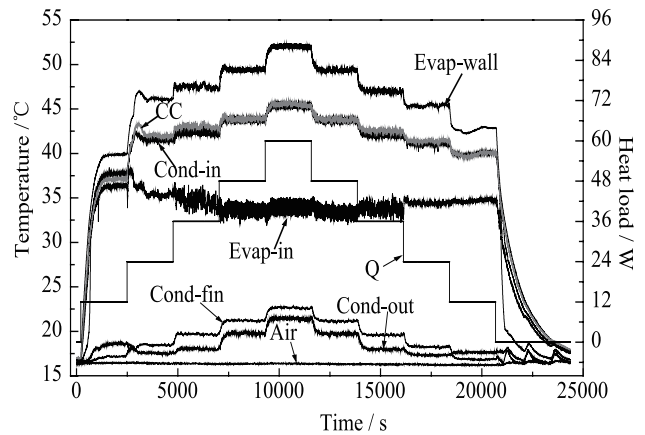


图9 倾角50°, 充灌量50%, 变工况运行
Fig.9 Performance test of the mLHP at power cycle, $\theta=50^\circ, \alpha=50\%$

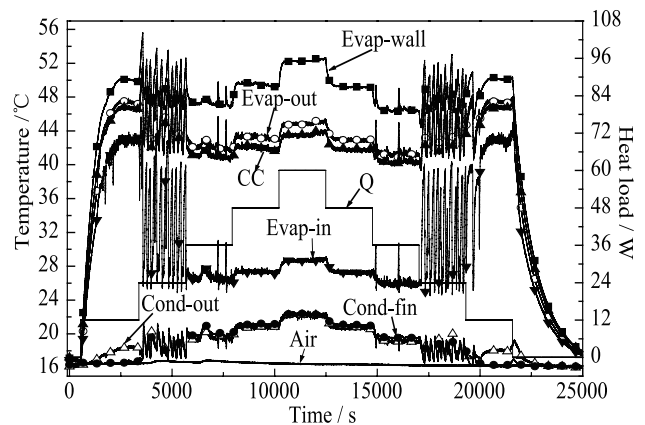


图10 倾角90°, 充灌量70%, 变工况运行
Fig.10 Performance test of the mLHP at power cycle, $\theta=90^\circ, \alpha=70\%$

的变化规律。通常情况下, 在小热负荷条件下, 液体回流量的影响较大, 而在较高热负荷时, 导热影响较大。除了 $T_{Evap-in}$ 之外, 其他各个测点温度都随热负荷的升降而升降。系统在改变热负荷后, 一般在2~3min内重新达到新的平衡。某些工况下系统温度波动可能较大, 如图10所示是系统在倾角为90°、充灌量为70%时的变工况运行图。由图可知, 系统在热负荷24W时系统各区域发生同一频率剧烈的温度波动, 其波幅超过5°C, 在需要精确控温的电子器件散热时, 应该尽量避免mLHP发生温度波动的工况。此外, 由图10可知, 系统各个区域温度并不是随着热负荷增大而升高, 而是在热负荷12→24→36W, 系统各区域温度在降低, 而在36→48→60W时, 系统各区域温度随热负荷增大而升高, 其原因是: 在热负荷较小情况下, 系统产生的蒸汽量比较少, 蒸发器储液腔内产生汽液两相, 在90°倾角情况下, 蒸汽将聚集在储液腔上部, 由于

丝网型毛细芯是各向异性介质，其径向抽吸能力很小，所以蒸发器上部与储液腔内汽泡接触的部分毛细芯容易发生局部“烧干”，从而导致蒸发器各区域温度很高；随着热负荷增大，增加的蒸汽量将需要更多冷凝空间，从而蒸汽推动冷凝器内液体流向补偿腔，回流液体将湮灭储液腔内的汽泡，从而改善了毛细芯供液状况，系统将逐步消除局部“烧干”，蒸发器各区域的温度随之降低。当热负荷达到36W时候，蒸发器储液腔已经基本被液体所占据，毛细芯的供液状况恒定，整个系统的汽液分布状态基本不变，当系统热负荷再增大时，系统各点的温度随着热负荷增大而升高。当热负荷从高降低时，各点温度变化规律与热负荷升高时恰好相反。

3 结论

实验研究了铜-不锈钢-丙酮平板型mLHP的启动及变工况运行特性，得到结论如下：

- 1) 平板型mLHP在不同热负荷下均能顺利启动，系统启动时间随着热负荷增大而缩短。
- 2) 平板型mLHP系统在热负荷低于18W或高于42W时，系统能达到稳定运行；在热负荷介于18W和42W之间时，系统多出现温度波动现象。
- 3) 平板型mLHP系统在相同工质充灌量及加热负荷下，增大系统倾角，达到稳定时蒸发器各区域温度升高。
- 4) 平板型mLHP系统在相同系统倾角及加热负荷下，增加系统充灌量，达到稳定时蒸发器各区域温度升高。
- 5) 平板型mLHP系统的热阻随着热负荷的增大而减小。
- 6) 平板型mLHP系统的热阻随着系统倾角的增大而降低。
- 7) 工质充灌量对平板型mLHP的系统热阻影响较大，其在工质充灌量60%时，系统热阻最小。
- 8) 平板型mLHP系统在改变热负荷时，系统能够很快做出响应，并在2~3分钟内达到新平衡状态。

符号说明

A	面积	m^2	b	厚度	m
Q	热负荷	W	T	温度	$^{\circ}C$
V	体积	m^3	θ	重力倾角	$^{\circ}$
α	工质充灌量		λ	导热系数	$Wm^{-1}K^{-1}$

参考文献

- [1] Yu F Maydanik. Loop heat pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25:635-657.
- [2] Stephane Launay, Valerie Sartre, Jocelyn Bonjour. Parametric analysis of loop heat pipe operation: a literature review[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46:621-636.
- [3] Z C Liu, W Liu, A. Nakayama. 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.
- [4] Lee W H, Park K H, Lee K J. Study on working characteristics of loop heat pipe using a sintered metal wick[C]// 13th IHPC, Shanghai, China, 2004:265-269.
- [5] Boo J H, Chung W B. Thermal performance of a small-scale loop heat pipe with PP wick[C]// 13th IHPC, Shanghai, China, 2004: 259-264.
- [6] Roger R Riehl, Thiago Dutra. Development of an experimental loop heat pipe for application in future space missions[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25:101-112.
- [7] Randeep Singh, Aliakbar Akbarzaedh, Masataka Mochizuki. Operational characteristics of a miniature loop heat pipe with flat evaporator[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2008, 47:1504-1515.
- [8] 张红星,林贵平,丁汀,等. 环路热管启动特性的实验研究[J]. 中国科学E辑, 2005, 35(1):17-30. (Zhang Hongxing, Lin Guiping, Ding Ding, et al. The experimental investigation of start-up of loop heat pipe[J]. Science in China Ser. E, 2005, 35(1):17-30.)
- [9] Yuming Chen, Manfred Groll, Rainer Mertz, et al. Steady-state and transient performance of a miniature loop heat pipe[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 45:1084-1090.
- [10] 刘志春, 刘伟. 平板式CPL蒸发器启动特性研究[J]. 制冷学报, 2006, 27(3):14-17. (Liu Zhichun, Liu wei, Zai Jun, et al. Study on start-up performance of flat-type CPL evaporator[J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(3):14-17.)
- [11] S V Vershinin, Yu F Maydanik. Investigation of pulsations of the operating temperature in a miniature loop heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50:5232-5240.
- [12] J Ku, L Ottenstein, M Kobel, et al. Temperature oscillations in loop heat pipe operation[C]// AIP Conference Proceedings, 2001, 552 (1):255-262.