

平板型 MLHP 温度波动研究

盖东兴 刘伟 刘志春 杨金国

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘要 环路热管(Loop Heat Pipe, LHP)是一种靠蒸发器的毛细芯产生毛细力驱动回路运行, 利用工质相变来传递热量的高效传热装置。研制了一套平板式蒸发器、风冷式冷凝器的小型环路热管(MLHP), MLHP的毛细芯为500目不锈钢丝网, 工质为丙酮, 蒸发器、冷凝器以及所有管路均由紫铜制成。主要研究了平板型MLHP在不同热负荷条件下的温度波动特性, 并重点研究了倾角以及充灌量等对MLHP系统温度波动的影响, 且给出相应的合理解释。实验结果表明, 平板式MLHP在 $2 \sim 3 \text{ W/cm}^2$ 热流密度区间范围内容易发生温度波动。

关键词 小型环路热管 平板型蒸发器 温度波动 电子器件 散热

符号说明

A ——面积, m^2	λ ——导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	cond-out——冷凝器出口
b ——厚度, m	θ ——倾角, $(^\circ)$	evap-in——蒸发器入口
q ——热流密度, W/cm^2	air——环境空气	evap-out——蒸发器出口
Q ——热负荷, W	cc——蒸发器储液腔	evap-wall——蒸发器加热壁面
T ——温度, $^\circ\text{C}$	cond-fin——冷凝器翅片	
α ——工质充灌量, %	cond-in——冷凝器入口	

1 引言

环路热管(Loop Heat Pipe, LHP)是一种两相的高效传热装置, 能在小温差、长距离情况下传递大量热量。LHP于1972年诞生于俄罗斯, 并已经在航天领域得到实际应用^[1-2]。随着科技的不断发展, LHP正在向小型化、平板型、高热流、远距离的方向发展, 特别在电子器件散热领域有着广阔的应用前景。与传统圆柱型LHP相比, 相同大小的平板型LHP可以增大与发热器件接触面积, 使毛细芯受热更均匀, 从而更好的发挥LHP的传热能力^[3]; 同时, 平板型蒸发器的温度梯度和工质流动的速度梯度夹角较小, 从场协同角度看, 平板型LHP比传统圆柱型LHP更有优势^[3]。

Maydanik等做了大量圆柱形LHP实验研究发现, LHP在某些工况下会出现温度波动现象^[4]。温度波动的机理比较复杂, 其与系统透过毛细芯的背向漏热、通过边壁的侧壁导热、蒸发器储液腔向环境的散热、回流液体过冷度、工质充灌量以及工质物理性质等都有密切关系。平板型蒸发器的独特结构, 决定了其背向漏热和侧壁导热比圆柱形LHP更大, 从而导致其更明显的温度波动^[4-8]。充灌量对LHP运行有着很大影响^[9-10]。此外, 本文实验研究了重力倾角对系统温度波动的影响, 并做出合理的解释。本实验将控制蒸发器加热壁面温度在 55°C 以内, 以确保电子器件能够安全运行。

2 平板型 LHP 实验系统

本实验系统是由 MLHP 系统、辅助加热系统、环境温度控制系统、数据采集系统组成。图 1 所示为平板型 MLHP 系统示意图，该系统由一个含有 500 目不锈钢丝网(共 82 层)多孔芯的平板型蒸发器(具体结构如图 1 所示)、蒸汽管路、风冷管翅式冷凝器、液体管路组成，蒸发器、冷凝器以及所有的管路均为紫铜制成，其具体几何参数如表 1 所示；实验工质为丙酮(纯度 99.5%)。充灌前系统真空度抽至 3×10^{-4} Pa，然后将计算好的工质充入系统。温度测量系统采用 Keithley-2700 数据采集仪，连接 12 个铜-康铜 T 型热电偶来检测系统各主要区域以及环境的温度，所有热电偶标定后测温误差为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ，各测点位置如图 1 表示。辅助加热系统采用 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，通过调节变压器供电电热棒不同功率，其功率用功率表实时测量，模拟热源外层包裹厚 10mm，导热系数为 $0.012\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的纳米超效绝热材料。根据傅里叶导热定律知加热系统的热损失 $Q_{\text{bst}} = -\lambda A \Delta T/b$ ，其中： λ 为保温材料的导热系数； A 为加热器与保温材料接触面积； 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。在最大热负荷 60W 时，通过纳米保温材料的热量损失为 0.18W，因此采用纳米超效绝热材料后，加热时基本不需要相应提高功率予以补偿，加热系统相对误差低于 0.3%。

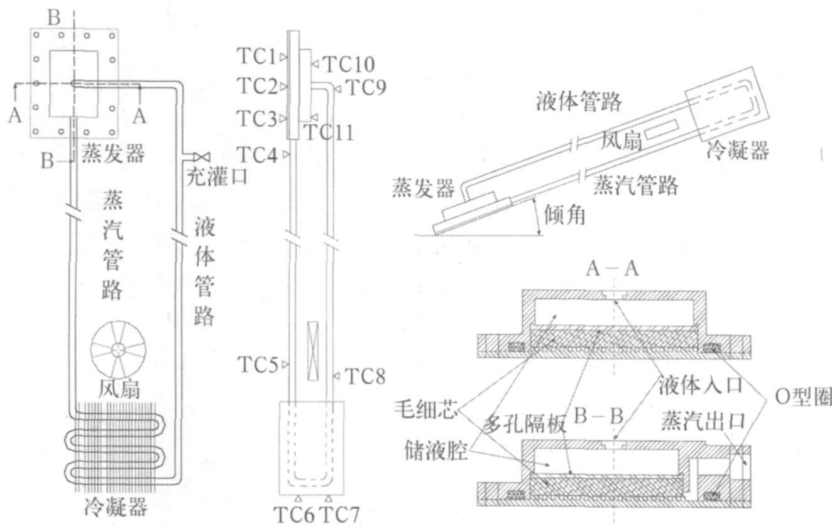


图 1 平板式 MLHP 实验系统简图及蒸发器结构简图

表 1 小型平板式 LHP 实验系统结构参数表

蒸发器	加热壁面		蒸汽管路	液体管路	
	壁厚/mm	1.5		直径(外/内)/mm	6/4
凸台尺寸/(mm×mm×mm)	1×1×1	长度/mm	320		
槽宽/mm	1	直径(外/内)/mm	6/4		
凸台数	18×15	长度/mm	530		
长/宽/mm	40/30	直径(外/内)/mm	6/4		
边壁	壁厚/mm	1.5	长度/mm	810	
多孔隔	壁厚/mm	0.5	翅片厚度/mm	0.05	
储液腔	长/宽/mm	34.5/30	翅片(长/宽)/mm	100/20	
	高/mm	6	风扇转速/(r/min)	3000	
毛细芯	长×宽×厚: 36.5mm×30mm×4mm; 材质: 316L; 丝网目数: 500; 层数: 82		—	—	

3 实验结果及讨论

温度波动现象普遍存在于两相回路系统中, 温度波动是系统内部工质流动发生波动的外在表现。现有的实验结果可以按照波动波幅和频率的差异, 将 MLHP 的温度波动分为以下三类: 1) 小波幅(小于 1°C), 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, 大周期(可达十几分钟)的温度波动^[4]。本文研究的平板 MLHP 在某些工况下也存在温度波动现象, 温度波动的产生是由于蒸发器储液腔内存在汽液两相区, 汽液两相受到蒸发器背向漏热及冷凝回流液的共同影响而加剧了其不稳定性, 汽液两相的不稳定性是系统产生温度波动的根源。除此之外, LHP 系统温度波动还受到工质充灌量以及系统倾角的影响^[4, 11-12]。本文将在系统倾角 θ 为 10° , 50° 和 90° , 系统工质充灌量(工质充灌量定义为 $\alpha = V_1 / V_{\text{total}}$, 其中 V_1 为充入的工质的体积; V_{total} 为 LHP 系统内整个空腔体积, 包括蒸汽槽道、毛细芯空隙、储液腔、蒸汽管路、液体管路和冷凝器) 为 50%, 60% 和 70% 条件下研究 MLHP 系统的温度波动特性。

3.1 加热功率对温度波动的影响

本文研究的平板型 MLHP 系统出现温度波动的热负荷集中在 $24 \sim 36\text{W}$ ($q = 2 \sim 3\text{W}/\text{cm}^2$), 而在更低或者更高的热流密度情况下, 系统未出现温度波动。以倾角为 50° , 充灌量为 60% 的系统为例, 系统在热负荷 12W ($q = 2\text{W}/\text{cm}^2$) 以及热负荷 48W ($q = 3\text{W}/\text{cm}^2$) 情况下, 系统能够稳定运行, 未出现温度波动现象。而当热负荷为 24W 和 36W 时, 系统均出现明显温度波动现象, 如图 2(a)、(b) 所示。实验发现, 系统在发生温度波动时, MLHP 各区域温度波动是同步的, 但不同区域温度波动的波幅(温度波动的波幅、周期和频率均取相邻几个周期内的平均值) 相差较大, 蒸发器入口处的温度波动波幅最大, 其次是蒸发器其他部位的温度波幅, 而冷凝器区域温度波动最小。此外, 系统在不同热流密度下温度波动的周期和波幅相差很大, 由图 2(a)、(b) 可知, 系统在 24W 时温度波动较为剧烈, 而在 36W 热负荷时系统温度波动较小。实验发现, 当其他条件保持不变时, 随着热负荷的增加, 系统温度波动周期和波幅都随之增大, 而在某个热负荷 (Q_A) 时系统温度波动达到最剧烈, 随着热负荷进一步增加系统温度波动随着降低, 直至温度波动消失。出现这种情况的原因是: 当热负荷较小时, 工质蒸发量较小, 同时冷凝器只需要很小一部分便可完全冷却蒸汽, 从而大量的液体储存在冷凝器管路中, 蒸发器透过毛细芯的背向导热以及侧壁导热, 使储液腔内发生汽化现象, 此时蒸发器储液腔内液体含量相对较少, 气泡含量较大, 但是此时储液腔内有足够空间缓冲气泡的生长和湮灭, 整个系统处在稳定的状态; 当热负荷增大时, 蒸发器将产生更多的蒸汽, 蒸汽将冷凝器内的液体压入储液腔, 回流的过冷液体将湮灭储液腔内气泡; 同时, 由于热负荷的增加导致蒸发器向储液腔的背向导热和侧壁导热加大而利于气泡产生, 所以此时气泡处在一个剧烈的生长与湮灭过程, 储液腔内两相区的不稳定性导致整个系统发生温度波动, 当热负荷为 Q_A 时, 两相区的波动达到最剧烈; 随着热负荷进一步增加, 蒸发器储液腔内的气泡将进一步减少, 两相区的波动减弱, 当整个储液腔全被液体占据后, 系统处在相对稳定状态, 而不再会出现温度波动现象。

3.2 倾角对温度波动的影响

倾角变化对系统温度波动也有影响, 图 2(a)、(c) 是系统充灌量为 60%, 加热功率 24W , MLHP 在倾角 50° 和 90° 的启动运行情况。比较可知, 系统在 90° 倾角时, 系统温度波动频率明显增大。其原因是: 随着倾角的增大, 由于重力作用使得蒸发器储液腔内液体质量增加, 但是倾角的增大同时改变了储液腔内液体和气泡分布状况, 汽液分布状态的改变将改变背向漏热和侧壁导热对储液腔的影响。譬如, 倾角为 50° 时, 储液腔内液体能够覆盖整个毛细芯, 所以, 透过毛细芯的背向漏热多由液体吸收,

所以系统的温度波动相对较小；当倾角为 90° ，储液腔内的汽液两相垂直分布，所以有部分蒸汽将直接与毛细芯接触而吸收背向漏热，气泡热容比液体小很多，受热很容易膨胀，从而引起系统更大的温度波动。

3.3 充灌量对温度波动的影响

图 2(c)、(d)表示的是角度为 90° ，加热功率为 24W，充灌量分别为 60%和 70%时系统启动运行情况。在相同倾角以及相同热负荷条件下，随着充灌量的增加，系统的温度波动波幅更大，其原因是：在相同的倾角条件下，随着充灌量的增加，系统需要更高的蒸汽压力来驱动环路运行，运行压力的提高使得蒸发器温度随之升高，也增大了蒸发器背向漏热和侧壁导热效应，从而使得储液腔接受更多的热量，所以在相同的倾角及热负荷条件下，充灌量大的系统温度波动更剧烈。

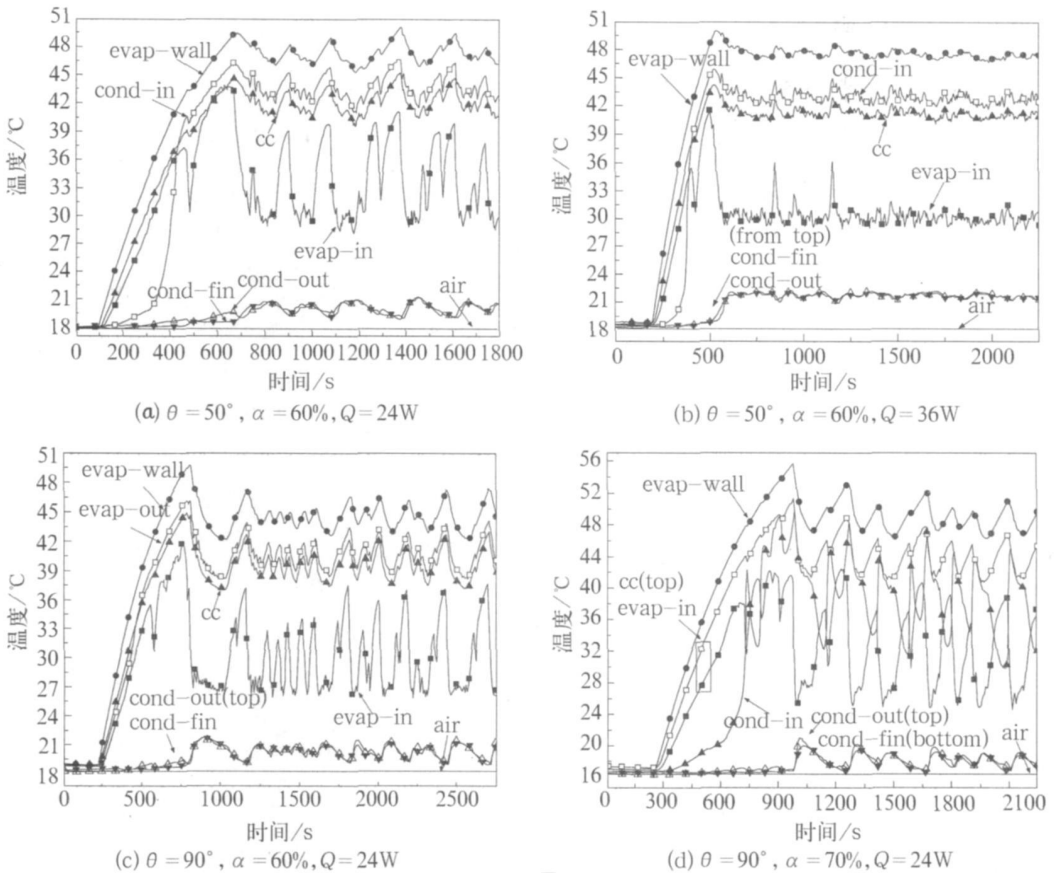


图 2 MLHP 系统启动特性

3.4 变工况运行时温度波动现象研究

由于平板型 MLHP 系统在较低和较高热负荷条件下没有温度波动现象，所以整个变工况过程可以分为：低热流稳定运行区(I 区)，温度波动区(II 区)和高热流稳定运行区(III区)。实验发现，当系统从低热流和高热流不同方向到达温度波动区时，系统在相同热负荷条件下温度波动的波幅和频率并不相同，如图 3 所示。MLHP 系统一旦产生温度波动其自身很难将其消除，系统在某一热负荷条件下的运行状态往往与前一个相邻工况的稳定状态有关，如图 3(a)知，在热负荷 24~36W 时候，系统温度波动较大，而在 48~36W 时，系统的温度较小。在 0~12W 时系统能够稳定运行，而在 24~12W 时系统发生明显的温度波动。由图 3 可知，系统由 24~36W，系统的温度波动随着热负荷的改变很快衰减，而在 24~12W 时，系统温度波动在热负荷改变后衰减较慢。其原因是：系统外加热负荷降低时，液体回流量减少，冷凝器管路内液体质量增多，而蒸发器储液腔内将有气

泡产生,同时蒸发器壁面、毛细芯等将释放部分热容,释放的热容将加速气泡生长以及增加储液腔内气泡含量,使得系统震荡更加剧烈,所以在 $24 \sim 12\text{W}$ 时,系统温度波动衰减慢;而在外加热负荷升高过程中,液体回流量增加,储液腔内将很快充满液体,同时蒸发器壁面以及毛细芯吸收部分热量而增加热容,系统可以很快抑制温度波动。另外,对于充灌量小倾角小的MLHP系统,其从高热负荷和低热负荷不同方向到达相同热负荷时,其温度波动差异大。如图3(b)可知,在热负荷为 12W 时候系统都能稳定运行,而在图3(a)中,系统在 $24 \sim 12\text{W}$ 时,系统在 12W 时无法达到稳定。其原因是:小倾角小充灌量的系统其储液腔内工质较少,更容易受到蒸发器自身释放热容的影响。所以得到如下结论:储液腔内气泡生长或者湮灭的速度决定了系统温度波动的剧烈程度。另外,系统的温度波动一旦发生,MLHP系统很难自行将其消除,所以,虽然蒸发器及毛细芯热容的改变对温度波动的影响是短暂的,但是温度波动一旦发生,其衰减很慢。

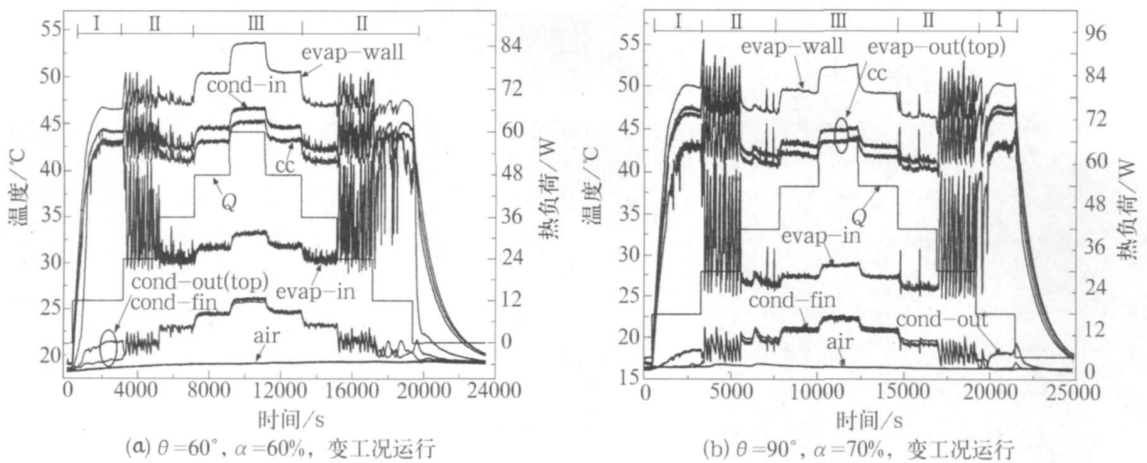


图3 变工况运行温度波动情况

4 结束语

LHP的温度波动比较复杂,其影响因素很多,除了本文提到的热负荷、系统倾角以及工质充灌量以外,MLHP的温度波动还与系统的工质、材料、结构以及系统的尺寸等都有密切相关,所以同一类型的不同环路热管其温度波动具有一定的“个性”。本文研究的以不锈钢丝网为毛细芯的平板型铜-丙酮MLHP温度波动特性如下:

- 1) 平板型MLHP系统发生温度波动的热负荷集中在 $24 \sim 36\text{W}$ ($q = 2 \sim 3\text{W}/\text{cm}^2$)。
- 2) 平板型MLHP系统在发生温度波动时,各区域温度波动是同步的,但不同区域温度波动的波幅相差较大,蒸发器入口处的波幅最大,蒸发器其他部分波幅次之,而冷凝器区域波幅最小。
- 3) 平板型MLHP系统进入温度波动区后,随着热负荷增加,系统温度波动加剧,当达到某一个热负荷 Q_A 时波动达到最剧烈,然后随着热负荷增加,波动逐渐减小,直至消失。
- 4) 在相同倾角及热负荷条件下,MLHP系统在大充灌量工况下温度波动波幅较大。
- 5) 在相同充灌量及热负荷条件下,MLHP系统在较大的倾角时温度波动频率较大。
- 6) 平板型MLHP系统从低热负荷和高热负荷不同方向到达同一热负荷时,其温度波动的波幅和频率并不相同。MLHP系统一旦产生温度波动很难消除,系统在某一热负荷条件下的运行状态与前一个相邻工况的稳定状态有关。
- 7) 平板MLHP储液腔内气泡生长或者湮灭的速度决定了系统温度波动的剧烈程度,温度波动一旦发生,MLHP系统很难自行将其消除。

参 考 文 献

- [1] MAYDANIK Y F. Loop heat pipes [J] . Applied Thermal Engineering, 2005, 25 (6): 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] 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.
- [4] VERSHININ S V, MAYDANIK YU F. 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.
- [5] KU J, OTTENSTEIN L, KOBEL M, et al. Temperature oscillations in loop heat pipe operation [C] // AIP Conference Proceedings, 2001, 552 (1): 255—262.
- [6] SINGH R. Thermal control of high powered desktop and laptop microprocessors using two-phase and single phase loop cooling systems [D] . PhD Dissertation, March, RM IT University, Australia, 2006.
- [7] CHEUNG K H, HOANG T T, KU J, et al. Thermal performance and operational characteristics of loop heat pipe (NRL LHP) [C] // Proceedings of the 28th International Conference on Environmental Systems, Danvers, MA, USA, 1998. SAE Paper No. 981813. 1998.
- [8] RANDEEP SINGH, ALIAKBAR AKBARZADEH, MASATAKA MOCHIZUKI. Operational characteristics of a miniature loop heat pipe with flat evaporator [J] . International Journal of Thermal Sciences, 2008, 47: 1504—1515.
- [9] CHEN YUMING, 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] WUKCHUL JOUNG, TAEU YU, JINHO LEE. Experimental study on the loop heat pipe with a planar bifacial wick structure [J] . International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51: 1573—1581.
- [11] GONCHAROV K A, KOTLYAROV E YU, SMIRNOV F YU. Investigation of temperature fluctuation in loop heat pipes [C] // SEA Paper, No. 941577b, 1994.
- [12] T KAYA, KU J. Thermal operational characteristics of a small loop heat pipe [J] . Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2003, 17 (4): 464—470.

作者简介

盖东兴 1981年生, 2009年获华中科技大学工程热物理专业博士学位。研究方向为高热流密度电子器件散热技术、空间热控技术。

刘伟 1956年生, 1983年获华中科技大学工程热物理硕士学位, 教授, 博士生导师, 主要从事多孔介质传热传质、新型热控技术、节能环保以及新能源方面的研究。

Investigation of Temperature Oscillation in Miniature Loop Heat Pipe with Flat Evaporator

Gai Dongxing Liu Wei Liu Zhichun Yang Jinguo

(School of Energy and Power Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract Loop heat pipes are heat transfer devices based on the evaporation and condensation of a working fluid, and using capillary pumping forces to ensure the fluid circulation. A series of

(下转第32页)

参 考 文 献

- [1] ERNEST R BELL, JR DAVID C OSWALD. Past and Present Extravehicular Mobility Unit (EMU) Operational Requirements Comparison for Future Space Exploration [C] . AIAA 2005— 6723.
- [2] 闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制 [M] . 北京: 科学出版社, 1998.
- [3] 范含林, 文耀普. 航天器热平衡试验技术评述 [J] . 航天器环境工程, 2007, 24 (2): 63— 68.
- [4] 国防科学技术委员会. GJB1033A 航天器热平衡试验方法 [S] . 北京国防科工委军标出版发行部, 2005.

作者简介

范含林 1961年生, 1986年获中国空间技术研究院飞行器设计专业硕士学位, 研究员, 现从事航天器热控制技术和总体技术研究。

Research on Thermal Test Methods for Extravehicular Mobility Unit

Fan Hanlin¹ Sun Meng¹ Li Tanqiu² Wu Zhiqiang² Zhang Kan¹ Pan Wei¹

(1 Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094)

(2 Astronaut Center of China, Beijing 100094)

Abstract Active thermal control technologies were used in extravehicular mobility unit (EMU). The configuration of EMU is complicated and there are many influence factors on reaching heat flux. The thermal test for EMU had the different characters with that of traditional space probe. Different simulation methods of EMU thermal test were presented, based on the characteristics of the thermal design. It's feasible to validate the thermal design by equivalently simulating the space heat flux as the test thermal boundary and measuring the heat leakage of the EMU and heat dissipation ability.

Key words Extravehicular mobility unit Heat dissipation ability Thermal test Manned spacecraft

(上接第 20 页)

tests have been carried out with a miniature loop heat pipe (MLHP) with flat evaporator and a fin-and-tube type condenser. The loop was made of pure copper with stainless mesh wick and acetone was used as the working fluid. At low heat loads, temperature oscillations were observed throughout the loop. The characteristics of temperature oscillation of the flat MLHP at heat fluxes from $2\text{W}/\text{cm}^2$ to $3\text{W}/\text{cm}^2$ were studied. The compensation chamber was considered as the most critical component of the MLHP and its hydrodynamic state dictated the extent and the characteristics of the temperature oscillations for the input heat load. The heat leaks from the evaporator to the compensation chamber, the heat loss to ambient and subcooled liquid temperature dictated the vapor condition inside the compensation chamber, and the rate of vapor growth or dissipation dictated the nature of the temperature oscillation. The effects of different liquid charging ratio and the tilt angle to the temperature oscillations were studied in detail.

Key words Miniature loop heat pipe Flat evaporator Temperature oscillation Electronic device Heat dissipation