

工质对平板型 LHP 运行特性影响的实验研究

刘志春 盖东兴 刘伟 杨金国

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 本文研制了一套以不锈钢丝网为毛细芯的平板式蒸发器、风冷管翅式冷凝器的环路热管, 并着重研究其以甲醇和丙酮为工质时运行特性的差异。实验结果表明, 小型平板式 LHP 具有良好的启动特性和适应变热负荷能力, 在相同的工况条件下, 以丙酮为工质的 LHP 温度波动较小, 系统启动较快且蒸发器壁面温度较低, 但其极限热负荷能力低于甲醇。

关键词 环路热管 (LHP); 工质; 温度波动; 实验研究

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2010)03-0487-04

EXPERIMENTAL STUDY OF EFFECTS OF OPERATING CHARACTERISTICS FOR A FLAT-TYPE LOOP HEAT PIPE WITH DIFFERENT WORKING FLUID

LIU Zhi-Chun GAI Dong-Xing LIU Wei YANG Jin-Guo

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

Abstract This paper developed a set of loop heat pipe, which is made up of evaporator with stainless steel porous wick, and fin-tube condenser, and the effects of working fluid of methanol and acetone to the LHP operation characteristics are studied. Experimental results present that the small LHP shows excellent startup reliability and work capability, under the same working condition, the LHP with acetone as working fluid show a lower temperature oscillation amplitude and quicker startup timer and lower evaporator wall temperature, but the heat load limits is smaller than LHP with methanol as working fluid.

Key words loop heat pipe (LHP); working fluid; temperature oscillation; experimental investigation

0 引言

环路热管 (Loop Heat Pipe, 简称 LHP) 是一种两相的高效传热装置, 它利用蒸发器内的毛细芯产生毛细抽力驱动回路运行, 利用工质相变来传递热量, 因此能在小温差、长距离情况下传递大量的热量。传统圆柱型 LHP 已经在航天领域成功应用。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, 特别是在民用电子器件散热领域有着广阔应用前景^[1~3]。

由于平板型 LHP 透过毛细芯的背向漏热较严重, 系统容易出现温度波动, 而采用不同的工质时, LHP 系统的启动以及变工况运行状况均差异较大, 同时工质对系统温度波动的范围和剧烈程度也有着重要的影响。R Singh 实验研究发现系统的充灌量低于 50% 时, 毛细芯易出现缺液而“烧干”; 充灌量超过 80% 系统因缺少相变空间而难于运行^[4]。

1 平板型 LHP 实验系统

本实验系统是由 LHP 系统、加热系统、环境温度调节系统、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, 其中蒸发器、冷凝器以及所有管路均为紫铜制成, 其具体参数如表 1 所示。工质甲醇和丙酮的纯度为 99.5%; 充灌前系统通过真空机组将真空度抽至 3.0×10^{-4} Pa。温度测量采用 Keithley-2700 数据采集仪, 12 个 T 型热电偶来检测系统的温度, 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。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, 通过变压器调节功率。热源以及蒸发器包裹厚 10 mm、导热系数为 $0.012\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的保温材料, 通过测量结果计算得到其引起的热量

收稿日期: 2009-12-25; 修订日期: 2010-02-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.50876035; No.50906025); 中国博士点基金新教师项目 (No.20070487093)

作者简介: 刘志春 (1976-), 男, 新疆沙湾人, 讲师, 博士, 主要从事毛细泵相变回路以及电子器件冷却的研究。

损失误差低于 0.3%。

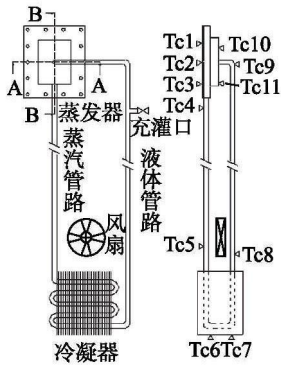


图 1 小型平板式 LHP 实验系统简图
Fig. 1 Experimental Schematic of the small flat plate type LHP

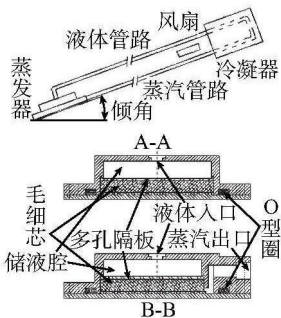


图 2 蒸发器结构简图
Fig. 2 Schematic of the evaporator

表 1 小型平板式 LHP 实验系统结构参数表
Table 1 Structure parameter of the small flat plate type LHP

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

2 实验结果讨论

2.1 热阻分析

根据环路热管的原理，小型平板式 LHP 热阻定

义^[6]为：

$$R_{LHP} = (T_e - T_c)/Q \quad (1)$$

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。

工质充灌量定义：

$$\alpha = V_l/V_{total} \quad (2)$$

其中， V_l 为充入的工质在 20°C 情况下的体积； V_{total} 为 LHP 系统包含的整个空腔体积，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。

由图 3 知，平板型 LHP 系统热阻随着热负荷增加而减小，在相同的条件下，以丙酮为工质的系统热阻较小，这是因为丙酮常压下沸点 (56.6°C) 低于甲醇 (64.7°C)，在较低的温度条件下即可发生相变，从而蒸发器温度较低。以 50°C-60% 工况为例，在热负荷 12~60 W 时， R_{LHP} -甲醇比 R_{LHP} -丙酮平均大 28.77%。从热阻的角度来看，以丙酮为工质的 LHP 系统 (以 LHP-丙酮表示) 在 60% 充灌量时系统的热阻最小；而以甲醇为工质的 LHP 系统 (以 LHP-甲醇表示) 在 50% 充灌量时系统的热阻最小。

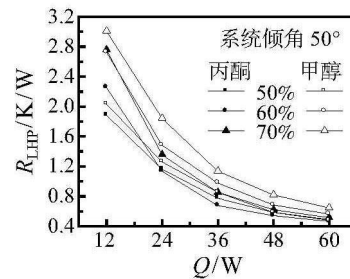


图 3 倾角 50° 不同充灌量系统热阻比较
Fig. 3 Thermal resistance with different charging quantities under tilt angle 50°

2.2 启动性能

平板型 LHP 结构特点决定了其透过毛细芯的背向导热比较严重，而能否顺利启动是 LHP 关键特性之一^[7~12]。本文以丙酮和甲醇为工质在不同倾角 10°、50°、90° 以及不同充灌量 50%、60% 和 70% 条件下做了热负荷 12~60 W 的系统启动实验，表明平板 LHP 具有良好的启动性能。

由图 4~7 可知，在相同工况条件下，不同工质的启动规律基本相同。比较可知：(1) 随着热负荷的增大，LHP 系统启动时间缩短，达到稳定时蒸发器温度随之升高；(2) LHP-丙酮系统启动所需要的时间较短，达到稳定状态后，蒸发器壁面也较低；(3) 在启动过程中，蒸发器的入口区的温度均有一定的波动，究其原因是蒸发器的入口区受到蒸发器背向导热以及回流过冷工质的共同影响，以图 7 为例：

在 I 区前半部分, 蒸发器开始受热还没有蒸汽产生时, $T_{\text{evap-in}}$ 在蒸发器背向导热影响下温度升高, 在 I 区后半部分, 蒸发器内产生的蒸汽将蒸汽槽道, 蒸汽管路以及部分冷凝器管路中的液体排入补偿腔, 此时, $T_{\text{evap-in}}$ 在过冷工质的影响下温度急剧降低; 在 II 区前半部分, 毛细芯的上表面温度不断升高, 逐渐形成汽液凹面, 但此时还没有足够的抽力驱动回路运行, 进而 $T_{\text{evap-in}}$ 在蒸发器背向导热的影响下温度再次升高, 在 II 区后半部分, 毛细芯驱动回路运行, $T_{\text{evap-in}}$ 在回流过冷工质的影响下温度再次降低; III 区为系统完成最终的启动状态; (4) 在较低的热负荷条件下, 以丙酮为工质的平板型 LHP 启动更快, 蒸发器温度也更低, 但由于丙酮汽化潜热不到甲醇一半, 所以在相同热负荷下, 丙酮质量流量约为甲醇的两倍多, 系统阻力大大增加, 而二者表面张力相差不大, 所以 LHP-丙酮系统传热极限要小的多。实验发现, 在相同工况下, LHP-丙酮系统最高可达 72 W, 而 LHP-甲醇系统可达 120 W。

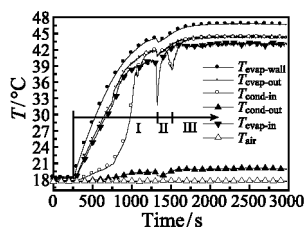


图 4 10°C-60%-12 W(丙酮)
Fig. 4 10°C-60%-12 W
(acetone)

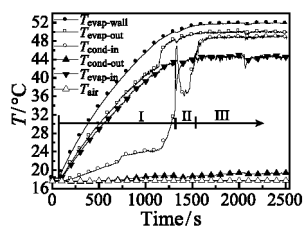


图 5 10°C-60%-12 W(甲醇)
Fig. 5 10°C-60%-12 W
(methanol)

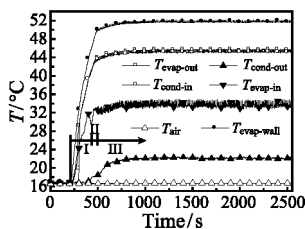


图 6 50°C-50%-60 W(丙酮)
Fig. 6 50°C-50%-60 W
(acetone)

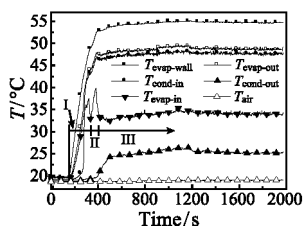


图 7 50°C-50%-60 W(甲醇)
Fig. 7 50°C-50%-60 W
(methanol)

2.3 温度波动

实验发现, 本文研究的平板型 mLHP 在不同倾角和充灌量的某些工况下会出现温度波动现象, 统计如表 2~3。现有实验结果可以按照波动波幅(曲线中相邻几个周期内最大值和最小值之差的平均值)和周期(曲线中相邻几个周期的平均值)的差异, 将平板型 mLHP 的温度波动分为三类: (1) 小波幅(小于 1°C)、高频率; (2) 小波幅(小于 2°C)、大周期(达几分钟)的波动; (3) 大波幅(有时候会超过 10°C)、大

周期(可达十几分钟)。

温度波动对于平板型 LHP 应用有不利影响。在以甲醇为工质, 10°C-70%-24 W 工况下, 系统的温度波幅达 12.5°C, 虽然热负荷较低, 但蒸发器壁面温度最高已达 75°C, 因此, 用于控温精度要求较高的器件散热时, 应该尽量避开发生温度波动较大的热负荷范围。

图 8~9 分别表示以丙酮和甲醇为工质, 系统在 90° 倾角, 充灌量为 70% 体积分数, 热负荷为 24 W 时的启动情况。由图可知, LHP 系统各区域温度分别在做不同波幅, 同一频率的波动, 蒸发器入口区和冷凝器入口区域的温度波动最大, 蒸发器壁面和蒸汽管路次之, 冷凝器壁面及液体管路温度波动最小, 究其原因是在储液腔及冷凝器入口段存在汽液两相区, 其不稳定性导致了整个 LHP 系统温度波动, 而蒸发器和冷凝器入口区由于离汽液界面较近而波动尤为明显。LHP 系统温度波动较复杂, 有时系统的温度波动具有一定的无序性, 如图 8 所示, 这与汽液两相的复杂性有关。

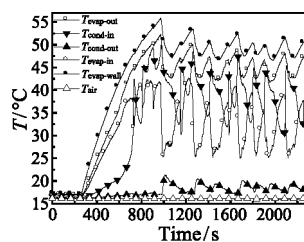


图 8 90°C-70%-24 W(丙酮)
Fig. 8 90°C-70%-24 W
(acetone)

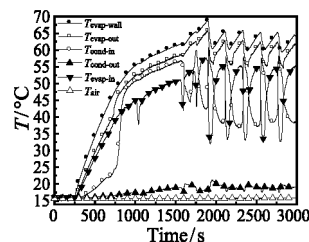


图 9 90°C-70%-24 W(甲醇)
Fig. 9 90°C-70%-24 W
(methanol)

对比表 2 和表 3 可知: 平板型 LHP-丙酮系统发生温度波动的热负荷主要集中在 24 W 和 36 W, 而 LHP-甲醇系统发生温度波动的热负荷在 12~60 W 均有出现。从整体上看, 平板型 LHP-丙酮系统的温度波动波幅基本都在 4°C 以内, 最大为 5.23°C; 而以甲醇为工质的平板型 LHP, 不少工况温度波动波幅超过 7°C, 最大达 12.54°C。可见 LHP-甲醇的温度波动要比 LHP-丙酮温度波动剧烈得多。此外, LHP-甲醇系统温度波动周期较长, 最长达 540 s; 而 LHP-丙酮系统温度波动周期多在 120 s 以内。综上所述, 与 LHP-丙酮系统相比, LHP-甲醇系统发生温度波动的范围广, 且温度波动更剧烈。

实验发现, LHP-丙酮和 LHP-甲醇系统在 50% 充灌量时温度波动较小, 尤其在 50°C-50% 和 90°C-50% 条件下, 都没有明显的温度波动, 而在充灌量为 70% 时, 系统的温度波动都比较大, 最大温度波动多出现在 10°C-70%。可见, 不同的工质能够影响系统发

表 2 平板型 LHP 系统 $T_{\text{evap-wall}}$ 温度波动的波幅与周期统计表 (甲醇)

Table 2 Amplitude and periodic of the temperature oscillation for the flat plate LHP(methanol)

工况	波幅/ $^{\circ}\text{C}$	周期/s	工况	波幅/ $^{\circ}\text{C}$	周期/s
10°-50%体积分数	36 W	1.8	10°-60%体积分数	24 W	7.3
	48 W	2.4		36 W	8.5
	60 W	1.3		无明显波动	
10°-70%体积分数	12W	1.07	50°-50%体积分数	24 W	3.7
	24 W	12.5		36 W	5.5
	50°-60%体积分数	52		24 W	4.8
50°-70%体积分数	12 W	7.8	90°-60%体积分数	24 W	1.3
	24 W	8.3		36 W	6.3
	36 W	11.1		24 W	7.7
90°-50%体积分数	无明显波动		36 W	7.7	162

表 3 平板型 LHP 系统 $T_{\text{evap-wall}}$ 温度波动的波幅与周期统计表 (丙酮)

Table 3 Amplitude and periodic of the temperature oscillation for the flat plate LHP(acetone)

工况	波幅/ $^{\circ}\text{C}$	周期/s	工况	波幅/ $^{\circ}\text{C}$	周期/s
10°-50% 体积分数	24 W	0.75	10°-60% 体积分数	36 W	1.7
10°-70%体积分数	24 W	3.27	50°-50%体积分数	无明显波动	
	36 W	5.23	90°-50%体积分数	无明显波动	
50°-60%体积分数	24 W	2.92	50°-70%体积分数	24 W	4.2
	36 W	0.3	36 W	1.0	38
90°-60%体积分数	24 W	2.5	90°-70%体积分数	24 W	4.0
	36 W	0.7	36 W	0.2	23

生温度波动的热负荷的范围以及温度波动的剧烈程度,但无法从本质上消除温度波动现象。LHP 系统的温度波动与系统工质充灌量,系统倾角,系统工质物性,系统的结构及材料都有密切的关系。

3 结 论

本文实验研究了以甲醇和丙酮为工质的平板型 LHP 的运行特性,得到如下结论:

(1) 与 LHP-甲醇系统相比, LHP-丙酮系统启动所需时间较短,达到稳定状态后,蒸发器壁面也较低。

(2) 从热阻的角度看,在相同工况下, LHP-丙酮比 LHP-甲醇系统热阻小。

(3) 在相同工况下, LHP-丙酮系统传热极限远低于 LHP-甲醇系统。

(4) 与 LHP-丙酮系统相比, LHP-甲醇系统发生温度波动的范围广,且温度波动更剧烈。

参 考 文 献

- [1] Maydanik Yu F. Loop Heat Pipes [J]. Appl. Therm. Eng., 2005, 25(5/6): 635-657
- [2] Launay S, Sartre V and Bonjour J. Parametric Analysis of Loop Heat Pipe Operation: a Literature Review [J]. Int. J. Therm. Sci, 2007, 46(7): 621-636
- [3] LIU Zhichun, LIU Wei, Nakayama A. Flow and Heat Transfer Analysis in Porous Wick of CPL Evaporator Based on Field Synergy Principle [J]. Heat Mass Transfer, 2007, 43(12): 1273-1281
- [4] Randeep S, Aliakbar A and Masataka M. Operational Characteristics of a Miniature Loop Heat Pipe with Flat Evaporator [J]. Int. J. Therm. Sci., 2008, 47(11): 1504-1515
- [5] Boo J H, Chung W B. Thermal Performance of a Small-Scale Loop Heat Pipe with PP Wick [C]//13th IHPC. Shanghai, 2004: 259-264
- [6] Roger R Riehl, Thiago Dutra. Development of an Experimental Loop Heat Pipe for Application in Future Space Missions [J]. Appl. Therm. Eng., 2005, 25(1): 101-112
- [7] 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, 2004: 265-269
- [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
- [9] ZHANG Hongxing, LIN Guiping, DING Ding, et al. Experimental Investigation for Loop Heat Pipe Startup [J]. Sci. in China, Ser E, 2005, 35(1): 17-30
- [10] Chen Y M, Groll M, Mertz R. Steady-State and Transient Performance of a Miniature Loop Heat Pipe [J]. Int. J. Therm. Sci., 2006, 45(11): 1084-1090
- [11] 柏立战, 林贵平, 张红星. 重力辅助环路热管稳态运行特性的实验研究 [J]. 航空学报, 2008, 29(5): 1112-1117
- [12] BAI Lizhan, LIN Guiping, ZHANG Hongxing. Experimental Investigation of Steady Operation for a Gravity-Assisted Loop Heat Pipe [J]. J. of Aerospace, 2008, 29(5): 1112-1117
- [13] Vershinin S V, Maydanik Yu F. Investigation of Pulsations of the Operating Temperature in a Miniature Loop Heat Pipe [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2007, 50(25/26): 5232-5240
- [14] Ku J, Ottenstein L, Kobel M, et al. Temperature Oscillations in Loop Heat Pipe Operation [C]//AIP Conference Proceedings, 2001. 552(1): 255-262