

毛细芯蒸汽槽道孔径对环路热管(LHP)传热性能影响研究

胡卓焕^{1,2}, 罗婷^{1,2}, 许佳寅^{1,2}, 杨茉^{1,2}

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘要:设计并通过3D打印制备了3种毛细芯结构:无嵌入式槽道(蒸汽槽道)毛细芯、嵌入式槽道毛细芯(同孔径槽道和异孔径组合槽)。通过实验研究了毛细芯蒸汽槽道对环路热管(Loop Heat Pipe, LHP)传热性能的影响。实验结果表明:在低热负荷启动时,3种毛细芯均能成功启动且蒸发器出口(t_{e-out})及冷凝器进口(t_{c-in})由于气液两相流的存在出现周期性温度振荡;嵌入式槽道毛细芯启动响应快(76 s)、温度振荡(t_{c-in})幅度小($\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$),同孔径槽道毛细芯稳定温度低($36.8\text{ }^{\circ}\text{C}$),异孔径组合槽道毛细芯由于大孔径($500\text{ }\mu\text{m}$)不利于低热负荷下的蒸发,启动稳定温度高($38.7\text{ }^{\circ}\text{C}$);在变热负荷运行过程中,嵌入式槽道毛细芯有效蒸汽排出面积更大、蒸汽干度更高,在中、高热负荷,温度振荡(t_{c-in})得到明显改善;异孔径组合槽道设计更有利于内部产生蒸汽高效排出,在高热负荷工况下,异孔径组合槽道毛细芯壁面温度为 $85.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,比无嵌入式槽道毛细芯低了 $8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

关键词:蒸汽槽道结构;3D打印;毛细芯;LHP;相变传热

中图分类号:TK172.4

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.mdlgc.2022.05.012

[引用本文格式]胡卓焕,罗婷,许佳寅,等.毛细芯蒸汽槽道孔径对环路热管(LHP)传热性能影响研究[J].热能动力工程,2022,37(5):86-92. HU Zhuo-huan, LUO Ting, XU Jia-yin, et al. Research on effect of various wick steam groove structures on heat transfer performance of loop heat pipe[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(5): 86-92.

Research on Effect of Various Wick Steam Groove Structures on Heat Transfer Performance of Loop Heat Pipe

HU Zhuo-huan^{1,2}, LUO Ting^{1,2}, XU Jia-yin^{1,2}, YANG Mo^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093;
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: Three types of wick structures were designed and prepared by 3D printing in this paper, including the wick without embedded groove (steam groove) and the wick with embedded groove (same-aperture groove and hetero-aperture combination groove). The effect of the wick steam groove structure on the heat transfer performance of the loop heat pipe (LHP) was studied by experiments. The experimental results show that all three kinds of wicks can be started successfully at start-up of low thermal load, and periodic temperature oscillations appear at the evaporator outlet (t_{e-out}) and the condenser inlet (t_{c-in}) due to the presence of gas-liquid two-phase flow. The wick with embedded groove structure has a fast start-up response (76 s) and a small temperature oscillation (t_{c-in}) range ($\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$). The wick with same-aperture groove has a low stable temperature ($36.8\text{ }^{\circ}\text{C}$). And the wick with hetero-aperture combination groove has a highly stable temperature ($38.7\text{ }^{\circ}\text{C}$) due to the large aperture ($500\text{ }\mu\text{m}$) which was not conducive to evaporation at low thermal load. During the operation at the variable thermal loads, the wick

收稿日期:2021-03-01; 修订日期:2021-04-08

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51736007)

Fund-supported Project: Key Project of the National Natural Science Foundation of China (51736007)

作者简介:胡卓焕(1979-),男,浙江宁波人,上海理工大学副教授.

通讯作者:许佳寅(1986-),男,上海人,上海理工大学讲师.

with embedded groove has a larger effective steam discharge area and a higher steam dryness, and the temperature oscillation (t_{c-in}) is improved obviously at the medium and high thermal loads. The vapor can be easily vented from the wick with the hetero-aperture combination groove. At high thermal load, the wall temperature of the wick with hetero-aperture combination groove is 85.0 ℃, which is 8.0 ℃ lower than that of the wick without embedded groove.

Key words: steam groove structure,3D printing,wick,loop heat pipe(LHP),phase change heat transfer

引 言

航天器热控制主要目的是通过合理组织航天器内部和外部的热交换过程,为航天器仪器设备的正常工作提供良好的温度环境^[1]。电子设备的失效有 55% 是温度超过其本身的规定值所引起的^[2]。因此,温度控制成为航天器研发过程中的关键技术。Gerasimov 等人^[3]于 1971 年提出了环路热管(Loop Heat Pipe,LHP)的概念。LHP 是一种具有超高导热性能的传热元件,可在微重力环境下运行,利用工质相变实现了对热量的快速传导,在航天控制器热控制、地球探测以及深空探测等领域^[4-5]都得到广泛应用。

毛细芯是 LHP 最核心的部分,其提供的毛细压力是维持工质在 LHP 内循环的动力,引导工质流动实现相变过程。毛细芯的结构将影响 LHP 的启动及传热性能。目前,最常见的是金属粉末烧结型毛细芯^[6-7],普遍存在内部孔隙不规则、随机性大、内部通道形状不可控和机械强度低等缺点^[8]。3D 打印毛细芯克服了烧结型毛细芯的缺点,可控制内部孔径和结构,成为毛细芯新的发展方向。Jafari 等人^[9]研究了不同工质下 3D 打印不锈钢毛细芯的传热性能,证实了 3D 打印毛细芯性能的可靠性。Hu 等人^[10]研究了 3D 打印不锈钢毛细芯孔隙直径对 LHP 性能的影响,孔隙直径为 200 μm 时低热负荷下启动时间约为 100 s,在 160 W 的热负荷下最小 LHP 热阻为 0.181 K/W。

此外,蒸汽排出槽结构对 LHP 传热性能也有较大影响。M Ghajar 等人^[11]利用薄膜蒸发原理建立了预测矩形槽道结构毛细芯蒸发传热系数的模型,毛细芯槽道几何尺寸是决定 LHP 性能的关键因素。Hong 等人^[12]通过实验对比 3 种不同蒸发器槽道结构超薄 LHP,合适的槽道结构可以有效地降低蒸发器的运行温度,加速启动过程。

本文利用 3D 打印制备了无嵌入式槽道、同孔径槽道和异孔径组合槽道 3 种毛细芯,利用建立的平板型蒸发器 LHP 进行实验研究,通过分析 LHP 的启动特性、热负荷运行特性、热阻及传热系数等,总结 3D 打印槽道结构毛细芯对 LHP 传热性能的影响。

1 实验系统与方法

1.1 实验系统

实验系统主要由 LHP 系统、抽真空系统、充液系统及数据采集系统组成。如图 1(a)所示,LHP 是实验系统的核心部分,由蒸发器、冷凝器、液体输送管道及蒸汽输送管道组成。

圆盘形蒸发器由蒸发器壳、毛细芯及加热底板组成。将蒸发腔和储液腔制成一体,直径分别为 32 和 26 mm。为了观察蒸发器内部工质的流动,蒸发器壳采用聚碳酸酯(PC)塑料,如图 1(b)所示。加热底板为紫铜圆形平板,有 2 种结构:其一是,圆形平板上开设 6 个宽 2 mm,深 3 mm 的蒸汽排出槽,适用于无嵌入式槽道毛细芯;其二是,圆形平板上未设置蒸汽排出槽道,适用于嵌入式槽道毛细芯。底部安装加热棒作为模拟热源,加热功率由直流电源(0~200 W)控制。

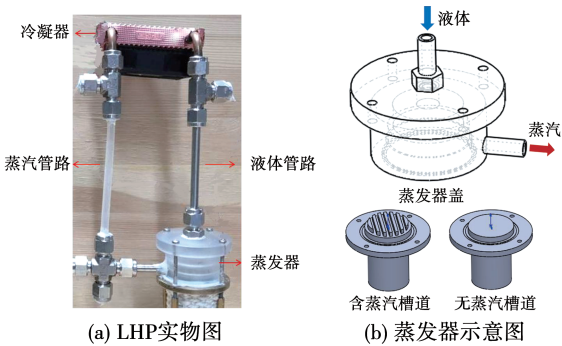


图 1 LHP 实物图及蒸发器示意图
Fig. 1 Picture of LHP system and schematic diagrams of evaporator

采用 T 型热电偶(测量精度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)测温,共 7 个测点,如图 2 所示。其中 3 个为内部测点,分别是蒸发器出口温度(t_{e-out})、冷凝器进口温度(t_{c-in})及冷凝器出口温度(t_{c-out})。其余 4 个点测量蒸发器壁面温度(t_{w1}, t_{w2}, t_{w3} 和 t_{w4}),取平均温度为蒸发器壁面温度 t_{ew} ,如图 2(b)所示。通过数据采集仪器获取温度数据,以电子设备最大允许的温度 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为壁面极限温度。对 LHP 热阻最大不确定度为 4.67%;而在 20 W 的低热负荷下,传热系数的最大不确定性为 5.05%,在 140 W 的高热负荷下为 3.38%。

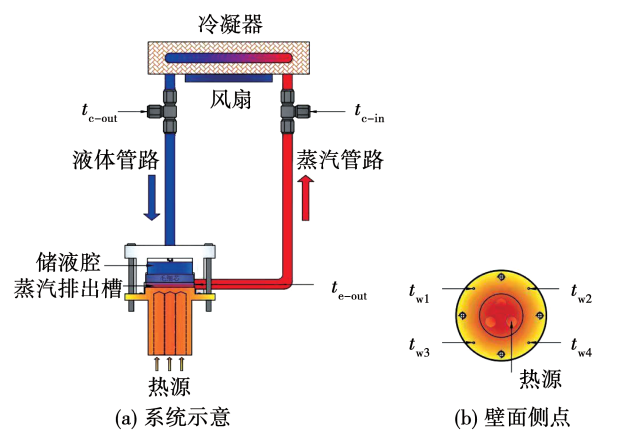


图 2 LHP 温度测点分布

Fig.2 Distribution of temperature measuring points of LHP

1.2 毛细芯的制备

利用选择性激光熔融技术(SLM)制备毛细芯。首先构建物理模型,无嵌入式槽道毛细芯骨架由直径 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的圆柱垂直相交构成,通过控制相邻圆柱骨架间距形成 $200\text{ }\mu\text{m}$ 孔隙(孔隙直径为 $200\text{ }\mu\text{m}$),厚度为 5 mm ,如图 3(a)所示。相应加热底板上铣出宽 2 mm 、高 3 mm 的蒸汽排出槽(图 2(b))。同孔径槽毛细芯采用与无嵌入式槽道毛细芯相同的骨架及孔隙尺寸,增设 3 mm 厚度的 3D 打印嵌入式翅片多孔结构,形成 6 根槽道,结构与加热底板上铣出的槽道完全相同,因此毛细芯总厚度为 8 mm ,如图 3(b)所示。两者的实质区别是加热底板上铣出的槽道仅用于蒸汽的排出,翅片仅用于实现热量的传导,而 3D 打印翅片多孔结构,不仅实现热量传导,还能进行工质输送。故工质蒸发核心更

接近热源,且增加了蒸汽排出有效面积。异孔径组合槽毛细芯与同孔径槽毛细芯最大区别是翅片壁面侧设置孔隙直径为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 的大孔隙,如图 3(c)所示。通过 3D 打印制成 3 种直径均为 30 mm 的不锈钢毛细芯,并计算毛细芯有效蒸汽排出面积 A_v ,详细参数如表 1 所示。

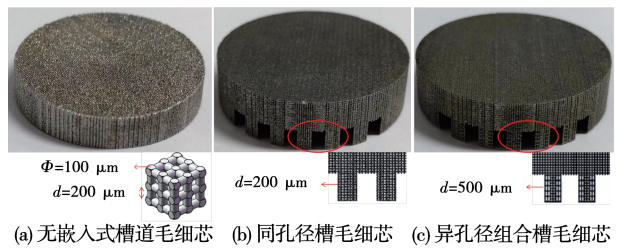


图 3 SLM 打印毛细芯

Fig.3 SLM printed wicks

表 1 毛细芯结构参数

Tab.1 Structure parameters of wicks

毛细芯结构	厚度/ mm	主孔隙尺 寸/ μm	辅孔隙尺 寸/ μm	有效蒸汽排出 面积 A_v/cm^2
无嵌入式槽道	5	200	—	3.08
同孔径槽	8	200	—	9.24
异孔径组合槽	8	200	500	9.24

1.3 实验方法

LHP 实验分两部分进行:启动性能实验和运行性能实验。实验环境温度维持在 $(22.0 \pm 2.0)\text{ }^{\circ}\text{C}$,工质为去离子水,充液率为 50%。

LHP 充液前对系统管路抽真空,并去除工质中不凝性气体。充液完成后,施加启动热负荷 20 W ,进行启动性能实验,观察各测点温度以及蒸发器和蒸汽管道内的现象。成功启动后,则以 20 W 递增热负荷,研究 LHP 运行性能,当蒸发器壁面温度基本保持稳定或出现周期性波动,可认为 LHP 处于稳定运行阶段。

2 数据处理

LHP 的热流密度 q_{thp} :

$$q_{\text{thp}} = \frac{Q}{A_{\text{heat}}}$$

(1)

式中: Q —蒸发器加热功率, W ; A_{heat} —有效加热面

积, m^2 。

LHP 热阻 R_{LHP} :

$$R_{\text{LHP}} = \frac{t_{\text{ew}} - t_{\text{c}}}{Q} = \frac{t_{\text{ew}} - (t_{\text{c-in}} - t_{\text{c-out}})/2}{Q} \quad (2)$$

式中: t_{ew} —蒸发器壁面温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{v} —蒸汽温度, 由于实验采取保温措施且蒸汽管道采用聚四氟乙烯材料, 此时蒸汽温度 t_{v} 即为冷凝器进口温度 $t_{\text{c-in}}$, K ; t_{c} —冷凝器平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

LHP 的有效传热系数 h_{LHP} :

$$h_{\text{LHP}} = \frac{Q}{A_{\text{heat}}(t_{\text{ew}} - t_{\text{v}})} = \frac{Q}{A_{\text{heat}}(t_{\text{ew}} - t_{\text{c-in}})} \quad (3)$$

LHP 稳定运行时能量守恒^[13]:

$$Q = Q_{\text{cc}} + Q_{\text{lv}} \quad (4)$$

$$Q_{\text{cc}} = \lambda A_{\text{w}} \frac{(t_{\text{e-out}} - t_{\text{cc}})}{L_{\text{eff}}} \quad (5)$$

$$Q_{\text{lv}} = m_{\text{f}}\gamma + m_{\text{f}}c_{\text{p}}(t_{\text{c-in}} - t_{\text{c-out}}) \quad (6)$$

式中: Q_{cc} —从蒸发腔到储液腔的热泄漏, W ; Q_{lv} —由工质相变蒸发的热量, W ; m_{f} —工质的质量流量, kg/s ; γ —工质的汽化潜热, J/kg ; c_{p} —工质的比定压热容, $\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$; t_{cc} —储液腔中的饱和温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

3 实验结果与讨论

3.1 启动特性

启动特性是反映 LHP 是否快速响应的一个重要指标。不同槽道结构毛细芯的启动温度分布如图 4 所示, 启动参数如表 2 所示。对 LHP 施加热负荷时, 蒸发器壁面温度 (t_{ew}) 持续增加, 而蒸发器出口温度 ($t_{\text{e-out}}$)、冷凝器进出口温度 ($t_{\text{c-in}}$ 和 $t_{\text{c-out}}$) 保持不变, 当蒸发器内冷却工质达到蒸发过热度时开始产生蒸汽, $t_{\text{c-in}}$ 上升, $t_{\text{c-out}}$ 不变, 此时 t_{ew} 增长速率减缓; 当蒸汽在冷凝器中形成过冷液体回流至补偿腔, $t_{\text{c-out}}$ 上升, 标志着 LHP 内工质循环的建立, 各温度点趋于稳定, LHP 启动成功。

由图 4 可得, 3 种蒸汽槽道毛细芯在启动过程中均出现周期性温度振荡现象, 尤其是 $t_{\text{e-out}}$ 和 $t_{\text{c-in}}$ 波动明显, 无嵌入式槽道毛细芯稳定运行 $t_{\text{e-out}}$ 为 32.0°C , $t_{\text{c-in}}$ 为 30.0°C , 波动范围 $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$; 而嵌入式槽道毛细芯的温度波动范围较小: 同孔径槽毛细芯 $t_{\text{e-out}}$ 和 $t_{\text{c-in}}$ 分别为 32.0 和 30.0°C ; 异孔径组合槽毛细芯 $t_{\text{e-out}}$ 和 $t_{\text{c-in}}$ 分别为 33.0 和 31.0°C , 均在

$\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 波动。周期性温度振荡的存在主要由汽液两相流引起。启动过程中, 毛细芯被工质完全浸没, 无法形成高干度蒸汽, 汽液两相流在蒸发区与储液腔压差作用下循环。

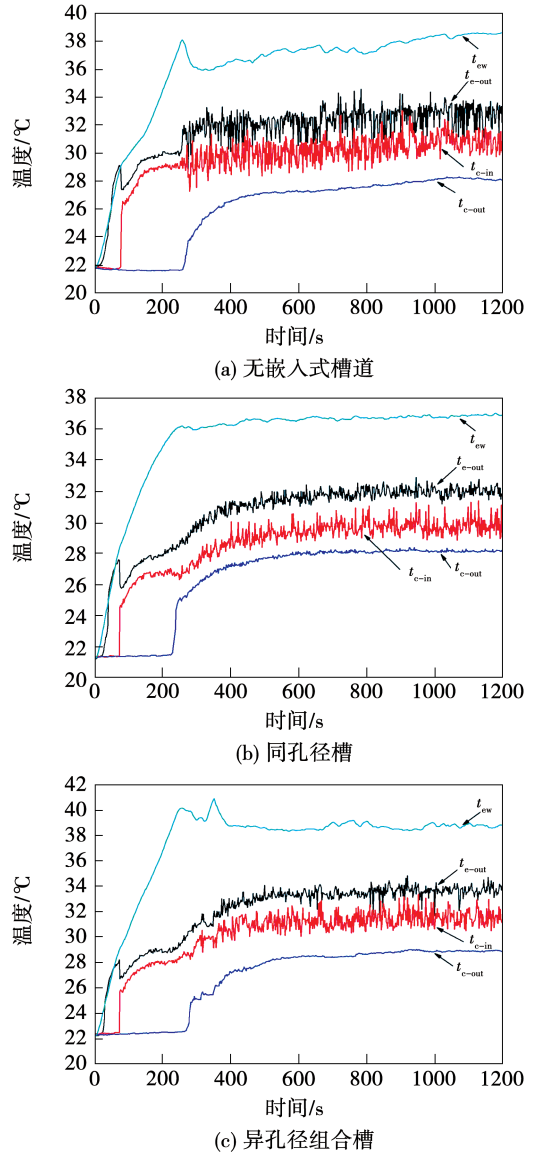


图 4 毛细芯启动特性

Fig. 4 Start-up characteristics of wicks

由表 2 可得, 嵌入式槽道毛细芯 LHP 蒸发产生时间为 76 s , 比无嵌入式槽道快 4 s 。由壁面温度 t_{ew} 可知, 无嵌入式槽道毛细芯 LHP 稳定运行时 t_{ew} 为 37.9°C , 同孔径槽为 36.8°C , 异孔径组合槽为 38.7°C 。稳定运行阶段, 嵌入式槽道毛细芯 $t_{\text{c-in}}$ 温度振荡低于无嵌入式槽道毛细芯, 由于同孔径槽毛细芯中工质更贴近热源, 热阻更小, 且翅片多孔槽道

结构增大了有效蒸汽排出面积,能更快形成热量输入和耗散的平衡。由此可知,在 20 W 低热负荷下,嵌入式槽道的毛细芯启动响应快、温度振荡幅度小;其中,同孔径槽毛细芯 t_{ew} 稳定温度最低,而异孔径组合槽毛细芯 t_{ew} 最高,循环建立慢,说明槽道内壁设计的辅助孔隙(500 μm)在低热负荷下不利于蒸汽的形成,从而导致蒸发效率较低。

表 2 启动参数
Tab.2 Start parameters

毛细芯结构	蒸发产生	循环建立	稳定温	t_{c-in} 温度
	时间/s	时间/s	度/ $^{\circ}\text{C}$	振荡/ $^{\circ}\text{C}$
无嵌入式槽道	80	262	37.9	± 2.0
同孔径槽	76	234	36.8	± 1.0
异孔径组合槽	76	266	38.7	± 1.0

3.2 不同热负荷运行特性

将施加于 LHP 的热负荷分为 3 组:低热负荷(40 和 60 W)、中热负荷(80 和 100 W)以及高热负荷(120 和 140 W)。不同结构毛细芯在功率递增下的温度变化特性曲线如图 5 所示。

由图 5 可得,改变热负荷,3 种毛细芯 LHP 各测点温度均能及时响应并在短时间内达到稳定。在 3 组热负荷下,无嵌入式槽道毛细芯 LHP 的 t_{e-out} 和 t_{c-in} 波动均大于嵌入式槽道毛细芯:低热负荷下温度波动范围内 $\pm 3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,嵌入式槽道为 $\pm 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$;中热负荷下温度波动为 $\pm 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,而嵌入式槽道为 $\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。不同热负荷条件下,无嵌入式槽道毛细芯 LHP 的 t_{ew} 始终高于嵌入式槽道毛细芯:40 W 时,无嵌入式槽道 t_{ew} 为 $47.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,异孔径组合槽 t_{ew} 为 $46.0\text{ }^{\circ}\text{C}$;140 W 时,无嵌入式槽道 t_{ew} 达到 $92.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,异孔径组合槽 t_{ew} 为 $84.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。相比之下,嵌入式槽道毛细芯改善了变热负荷下 t_{e-out} 和 t_{c-in} 温度振荡现象:高热负荷下(140 W),无嵌入式槽道毛细芯中 t_{c-in} 为 $73.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$),而嵌入式槽道毛细芯 t_{c-in} 约为 $74.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度振荡幅度仅为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。随着热负荷的增加,若毛细芯内部蒸汽无法及时排出,易形成蒸汽液膜,降低蒸发效率,导致 t_{ew} 升高,异孔径组合槽毛细芯 t_{e-out} 和 t_{c-in} 波动小于无嵌入式槽

道毛细芯,主要原因是两相流中蒸汽干度更高,说明异孔径组合槽高热负荷下有助于毛细芯内部蒸汽排出,提高蒸发效率。

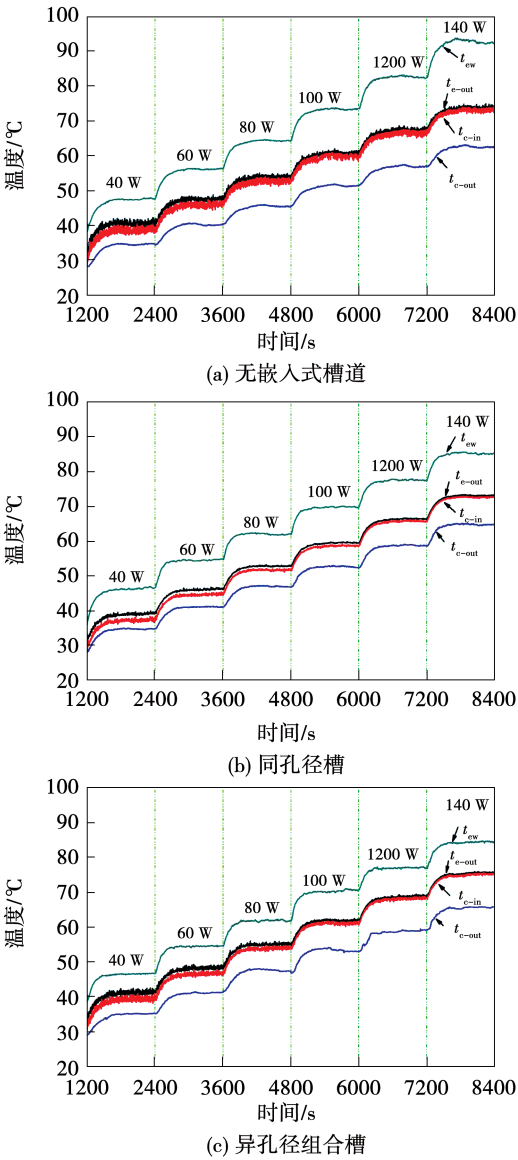


图 5 毛细芯热负荷运行特性

Fig.5 Operating characteristics of thermal load of wicks

3.3 运行温度

3 种毛细芯 LHP 运行时 t_{ew} , t_{c-in} 和 t_{c-out} 如图 6 所示。相同热负荷下,无嵌入式槽道毛细芯的 t_{ew} 始终最高,而 t_{c-out} 却最低。根据公式(6)可以判断:无嵌入式槽道毛细芯产生的蒸汽流量最小,说明装载该毛细芯的 LHP 蒸发效率低从而导致 t_{ew} 较高。嵌入式槽道毛细芯工质在靠近热源的槽道侧壁面处进行蒸发,异孔径组合槽设计更有利于内部产生的蒸

汽及时排出,尤其是在中等及高热负荷下有效避免毛细芯内部蒸汽液膜的形成,形成连续且干度高的蒸汽。

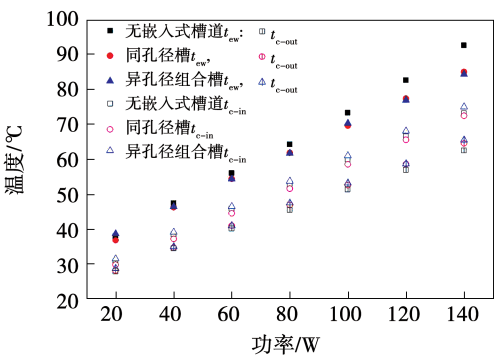


图 6 LHP 测点温度

Fig. 6 Temperature of measuring points of LHP

3.4 LHP 热阻及传热系数

从 LHP 热阻和传热系数角度分析其性能,如图 7 所示。随着热负荷的增大,LHP 热阻逐渐减小,其中无嵌入式槽道毛细芯 LHP 热阻最高,因为该毛细芯在运行过程中的蒸发效率最低。嵌入式槽道毛细芯相比无嵌入式槽道毛细芯,蒸发区工质更接近热源,从而减小了热阻;在高热负荷下无嵌入式槽道毛细芯内部蒸汽堆积形成蒸汽液膜,热阻较大,导致 t_{ew} 最高。而嵌入式槽道毛细芯具有更大的有效蒸汽排出面积,有利于蒸汽排出,减小了蒸汽薄膜的厚度,因此热阻更小。

在 120 W 热负荷下,无嵌入式槽道毛细芯的传热系数最高为 $10\,579\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,此时 LHP 热阻为 0.17 K/W ;当热负荷达到 140 W 时,同孔径槽毛细芯传热系数为 $15\,793\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,LHP 热阻为 0.12 K/W ;而异孔径组合槽毛细芯传热系数则达到 $21\,255\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,LHP 热阻为 0.10 K/W 。根据公式(4)可得,热泄漏受 LHP 的蒸发效率影响,传热系数越大说明蒸发效率越高。若毛细芯具有较高的蒸发效率,可以减轻 LHP 热泄漏问题。图 7(b)中,热负荷达到 100 W 时,多孔槽道结构的毛细芯的传热系数随着热负荷的增加仍在上升,而无嵌入式槽道毛细芯的传热系数逐渐下降,主要原因是工质在多孔槽道处能进行高效蒸发,并且可以及时排出;无嵌入式槽道毛细芯有效蒸汽排出面积更小,内部蒸

汽堆积,热阻较大,导致热量堆积,造成严重的热泄漏,使储液腔内饱和温度上升,导致了较高的壁面温度。因此,异孔径组合槽道结构毛细芯有助于高热负荷下毛细芯内部蒸汽及时排出,有利于工质的高效蒸发,蒸发效率的提升有效的抑制了 LHP 的热泄漏问题。

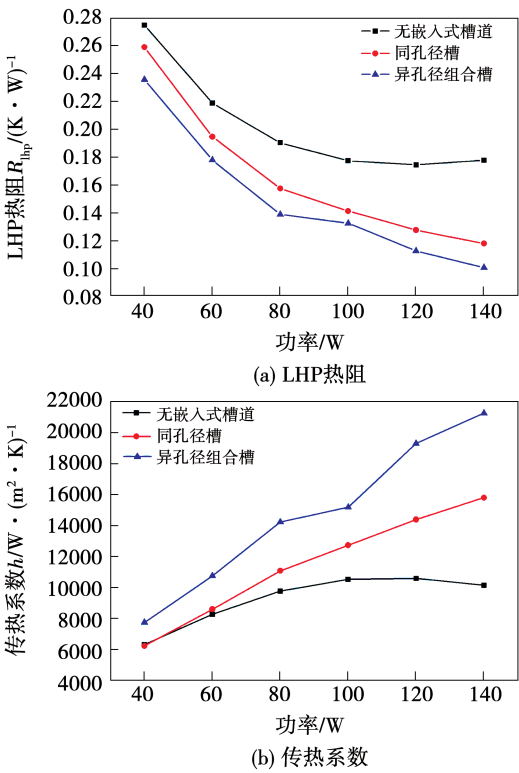


图 7 LHP 热阻及传热系数

Fig. 7 Thermal resistance and heat transfer coefficient of LHP

4 结 论

研究了 3 种毛细芯结构对 LHP 启动及运行性能的影响,结论为:

- (1) 3 种结构毛细芯在 20 W 热负荷启动时 t_{e-out} 和 t_{c-in} 均出现周期性温度振荡现象,主要是由低功率下汽液两相流引起的。嵌入式槽道的设计增大了有效蒸汽排出面积(9.24 cm^2),同孔径槽毛细芯启动响应快(76 s)、温度振荡幅度小($\pm 1.0\text{ }^\circ\text{C}$)及稳定温度低($36.8\text{ }^\circ\text{C}$)。
- (2) 无嵌入式槽道毛细芯 LHP 中,温度振荡现象从启动阶段延续到高热负荷运行阶段,而在嵌入

式槽道毛细芯(同孔径槽及异孔径组合槽)LHP 中,有效蒸汽排出面积更大、蒸汽干度更高,温度振荡也得到明显改善。

(3) 在 140 W 高热负荷下,异孔径组合槽毛细芯壁面温度为 85.0 ℃,LHP 热阻为 0.10 K/W,比无嵌入式槽道毛细芯低了 8.0 ℃,热阻低了 0.08 K/W。异孔径组合槽设计更有利于内部产生蒸汽高效排除,尤其是在中、高热负荷下有效避免毛细芯内部蒸汽液膜的形成,传热系数达到 21 255 W/(m² · K),提高了蒸发效率,抑制了 LHP 热泄漏问题。

参考文献:

[1] WANG G, MISHKINIS D, MACDONALD, et al. Start-up performance of a loop heat pipe with variable heating patterns and periodic cycles[J]. American Institute of Physics, 2005, 746: 106 – 113.

[2] OADGIRI K, NISHIKAWARA M, NAGANO H. Microscale infrared observation of liquid-vapor interface behavior on the surface of porous media for loop heat pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 126: 1083 – 1090.

[3] GERASIMOV Y F, MAIDANIK Y F, SHCHEGOLEV G T, et al. Low-temperature heat pipes with separate channels for vapor and liquid[J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 1975, 28(6): 683 – 685.

[4] 林兵谣, 谢荣建, 陶乐仁. 低温环路热管综述[J]. 热能动力工程, 2020, 35(3): 1 – 12.

LIN Bing-yao, XIE Rong-jian, TAO Le-ren. Review of cryogenic loop heat pipe technology[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 1 – 12.

[5] ZHANG Z, ZHAO R, LIU Z, et al. Application of biporous wick in flat-plate loop heat pipe with long heat transfer distance[J]. Applied Thermal Engineering, 2020: 116283.

[6] 程涛涛, 崔晓钰, 谢荣建, 等. 基于中子成像技术环路热管的可视化试验研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(5): 141 – 146.

CHENG Tao-tao, CUI Xiao-yu, XIE Rong-jian, et al. Visualization experiment of loop heat pipe based on neutron imaging technology [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(5): 141 – 146.

[7] ZHANG Z K, ZHAO R Z, LIU Z C, et al. Application of biporous wick in flat-plate loop heat pipe with long heat transfer distance [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 184: 116283.

[8] JI X B, WANG Y, XU J L, et al. Experimental study of heat transfer and start-up of loop heat pipe with multiscale porous wicks[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 117: 782 – 798.

[9] JAFARI D, WITS W W, GEURTS B J. Metal 3D-printed wick structures for heat pipe application: capillary performance analysis [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 143: 403 – 414.

[10] HU Z H, WANG D C, XU J Y, et al. Development of a loop heat pipe with the 3D printed stainless steel wick in the application of thermal management[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 161: 120258.

[11] GHAJAR M, DARABI J. Evaporative heat transfer analysis of a micro loop heat pipe with rectangular grooves [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 79: 51 – 59.

[12] HONG S, ZHANG X, TANG Y, et al. Experiment research on the effect of the evaporator's configuration design of an innovative ultra-thin looped heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 92: 497 – 506.

[13] QU Z G, CHEN G, ZHOU L, et al. Numerical study on the operating characteristics of cryogenic loop heat pipes based on a one-dimensional heat leak model[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 172: 485 – 496.

(金圣迪 编辑)