

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.06.005

3D打印毛细芯与底座间隙对环路热管性能影响

王丹, 胡卓焕, 袁成伟, 许佳寅

(上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要:为抑制环路热管(loop heat pipe, LHP)蒸发器中的热泄漏,课题组通过改变3D打印复合毛细芯与加热底座之间的间隙来解决该问题。毛细芯与加热底座间分别选取0,1和2 mm 3种间隙组合方式组装环路热管,并通过实验研究间隙对环路热管传热性能的影响。结果表明:存在间隙时,启动时长均会因间隙的增大而延长;复合毛细芯蒸发层为200 μm 、吸液层为100 μm 、间隙为2 mm时,热泄漏的抑制最显著。此时,功率为180 W,壁面温度为96.7 $^{\circ}\text{C}$,传热系数为73 681 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;而复合毛细芯蒸发层为100 μm 、吸液层为200 μm 时,间隙的增加对热泄漏的抑制效果不明显。综上,复合毛细芯对环路热管传热性能的影响可通过改变毛细芯与底座间隙距离来控制。

关键词:3D打印;复合毛细芯;环路热管;传热系数;热泄漏

中图分类号:TK172.4;TH145 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)06-0034-08

Effect of Clearances between 3D-Printed Wick and Heating Plate on Thermal Performance for LHP

WANG Dan, HU Zhuohuan, YUAN Chengwei, XU Jiayin

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract:In order to reduce the heat leakage in the evaporator and improve the heat performance of loop heat pipe (LHP), the clearance between the 3D-printed composite wick and the heating plate was changed. LHP was assembled by three combined methods of the wick and the heating plate with no clearance, 1 mm clearance and 2 mm clearance respectively, and their start-up and operating performance were experimentally studied. It was showed that the start-up time of the LHP with clearance will be prolonged due to the increase of the clearance. The suppression of heat leakage was most significant, when the clearance was 2 mm, the composite wick evaporation layer was 200 μm , and transportation layer was 100 μm . At the same time, the power was 180 W, the evaporator wall temperature was 96.7 $^{\circ}\text{C}$, and the heat transfer coefficient was 73 681 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. The increase in clearance had no significant inhibitory effect on heat leakage, while the composite wick evaporation layer of was 200 μm , and the transportation layer of was 100 μm . In conclusion, the influence of composite wick on the heat transfer performance of LHP can be controlled by changing of the clearance between the composite wick and the heating plate.

Keywords:3D-printing; composite wick; LHP (Loop Heat Pipe); heat transfer coefficient; heat leakage

热管作为一种高效的两相传热装置,广泛应用于机械设备的传热与散热装置中,但运行中会出现一些如黏性极限、毛细极限、沸腾极限和夹带极限等问题^[1],这些问题限制了热管传热性能的发挥。1971年,苏联 Gerasimov 等^[2]因传统热管传热性能受距离

和冷热源方位的制约,在热管的基础上改进并提出了环路热管(loop heat pipe, LHP)。环路热管与传统热管相比,将蒸气和液体的流动分离,避免了出现气液夹带现象,并且将毛细芯安装在蒸发器内部,有效降低了工质的流动阻力,使传热能力进一步提升。因此环路

收稿日期:2023-03-10;修回日期:2023-05-08

基金项目:国家自然科学基金(52105465)。

第一作者简介:王丹(1995),女,广西河池人,硕士,主要研究方向为传热传质、电子芯片冷却等。E-mail:15737573192@163.com

热管在空调换热器^[3]、电子器件散热^[4]、LED路灯冷却^[5]以及余热回收^[6]等方面被广泛应用;此外还有利于提高化学产品的质量,例如在催化剂层中放置环路热管可以控制合适的反应温度从而提高除氨转换器的转化效率^[7],更可以改善固气吸附反应的传热^[8]。

为消除或减小平板型蒸发器的热泄漏以及提高环路热管的传热性能,复合毛细芯成为了毛细芯发展的新方向^[9-10]。Li等^[11]对一种多尺度复合毛细芯进行研究,该复合毛细芯由铜粉上分布的纳米结构烧结而成,结果发现:较大的粉体尺寸和不规则的粉体类型有利于液体的输送,粉末表面的纳米结构可以提高工质的输送速度。胡卓焕等^[12]提出了一种可以有效蒸发和有效渗透的双层复合毛细芯,用以消除高功率下毛细芯的热泄漏问题,结果发现:环路热管可在120 s内稳定启动,传热性能也得到了提升。

3D打印技术出现在20世纪90年代中后期,是在光固化立体成型(Stereolithography, STL)的基础上发展起来的一种新型技术^[13]。用于3D打印的材料众多,包括金属材料、非金属材料、高分子材料和复合材料。根据物质状态、结构、用途和来源还可细分为:固体材料、等离子体材料等;晶体材料、纳米材料等;建筑材料、生物材料等^[14];天然材料、再生材料等。实验证明,在环路热管中,毛细芯也可以采用3D打印技术实现,并且3D打印的毛细芯改变了传统烧结毛细芯随机性强、孔径堵塞等结构参数不可控的缺点^[15]。刘杰等^[16]使用3D打印工艺实现复杂结构多孔陶瓷零件的净成型,并且证明使用该工艺制备的陶瓷材料结构完整、表面光洁,该工艺可以作为制备复杂结构多孔部件的工艺。Simchi等^[17]以金属为材料,使用3D打印技术制备了热管,并以氨气为工质进行了实验研究,结果发现这种制备方式可以实现热管的管壁、管道、端盖以及毛细芯等一体化成型。为了评估3D打印过程中的设计和制造问题,Thompson等^[18]使用选择性激光融化(selective laser melting, SLM)技术制造了一种紧凑型的平板脉冲热管(pulsating heat pipe, PHP)并进行实验研究,发现当功率为50 W时,热管的有效导热系数为110 W/(m·K)。Ibrahim等^[19]使用增材制造(additive manufacturing, AM)技术制备了多层平板型脉冲热管,研究不同功率、不同工质和不同流动方向对

环路热管传热性能的影响,结果发现通过AM技术可以使许多高热流密度的热管理设备实现高自由度地嵌入微通道。Davoud等^[20]采用选择性激光融化技术制备了耐高压的不锈钢毛细芯,得出毛细芯在真空条件下的有效导热系数仅为1.8~2.2 W/(m·K)。随后,Davoud等^[21]采用3D打印技术制备了多孔毛细芯,并对其进行了渗透率的测试,发现3D打印的毛细芯可以显著强化热管的传热性能。在环路热管的热泄漏抑制方面,Li等^[22]将毛细芯与蒸气槽道分离,并得出了间隙的存在有利于减小蒸发器中热泄漏的结论。

课题组以不锈钢为材料,采用3D打印技术制备复合毛细芯;安装时将毛细芯与加热底座的槽道分别分离1 mm和2 mm,研究复合毛细芯对环路热管的启动性能和运行性能的影响。

1 平板型环路热管

1.1 实验装置

课题组研究的环路热管为平板型环路热管,主要由蒸发器、蒸气管道、冷凝器和液体管道组成。蒸气管道材料为聚四氟乙烯;冷凝器由翅片和轴向风扇组成,管道材料为铜,管道下方连接小风扇用于强化冷凝;液体管道采用不锈钢材料;蒸发器作为环路热管系统的核心部件,由蒸发器外壳、毛细芯和加热底座构成。加热底座材料为黄铜,上部采用线切割加工出6个横截面为2 mm×3 mm的蒸气槽道,加热面上有4个测温孔,用于测量壁面温度。底部用3根加热棒作为模拟加热源,实验采用去离子水为工质。环路热管系统如图1所示。

安装在蒸发器中的毛细芯是蒸发器中的核心元件,将蒸发器分为上部储液槽和下部蒸发区2个部分,它的主要作用是为环路热管中工质的循环提供毛细力。当通过直流电源给加热底座提供热量时,工质在蒸发器中吸收热量发生相变形成蒸气,蒸气从蒸发器出口排出,流经蒸气管道进入冷凝器冷凝成液体,再通过液体管道回流至储液槽中。最后在毛细力的作用下返回蒸发区受热并再次蒸发,以此往复循环。

1.2 蒸气槽道与复合毛细芯间隙生成方式

蒸气槽道与毛细芯之间的间隙大小可以用不同厚度的垫圈来实现。垫圈采用聚四氟乙烯制成,内径为

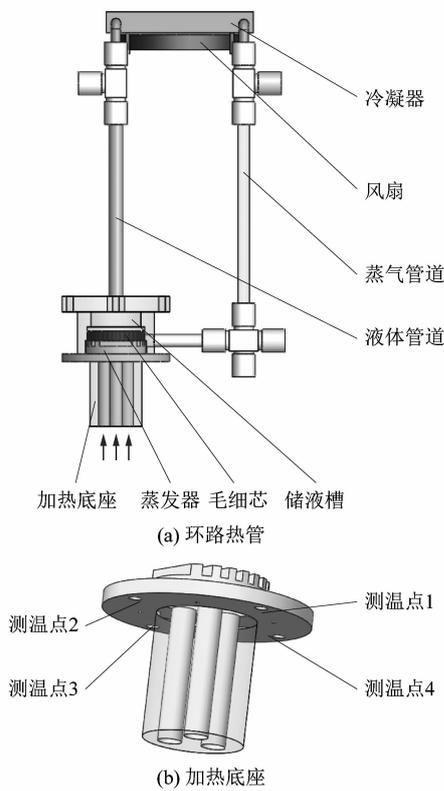


图1 环路热管系统
Figure 1 System of LHP

28 mm, 外径为 30 mm; 耐温范围为 100 ~ 250 °C。图 2 所示为毛细芯与垫圈在蒸发器中的安装方式。

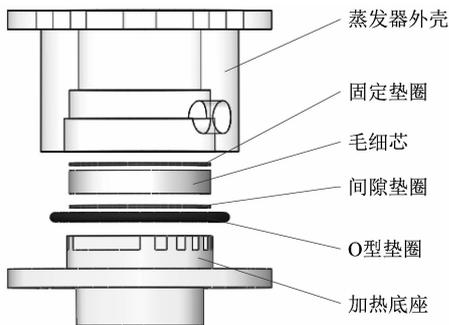


图2 毛细芯与垫圈在蒸发器中的安装方式
Figure 2 Installation method of wick and gasket in evaporator

从图 2 可以看出, 蒸发器中从上至下依次是蒸发器外壳、固定垫圈、毛细芯、间隙垫圈、O 型垫圈和加热底座。按图 3 所示蒸气槽道与毛细芯间隙为 1 mm 和 2 mm 2 种方式安装好毛细芯后, 再将间隙为 0 mm 与间隙为 1 mm 和 2 mm 的蒸发器进行对比, 观察不同

间隙下复合毛细芯对环路热管的启动性能与传热性能的影响。

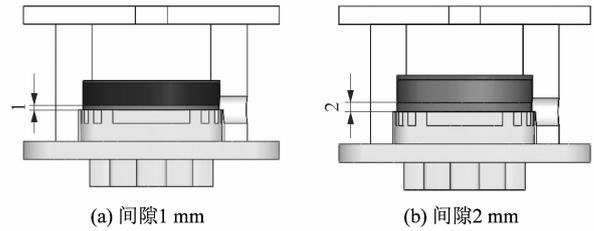


图3 蒸气槽道与毛细芯间隙安装图
Figure 3 Installation diagram of wick and heating plate with clearances

1.3 3D 打印毛细芯结构参数

毛细芯的孔隙率为毛细芯孔穴的总体积与毛细芯表观体积的比值。计算孔隙率通常采用直接测量法, 可由毛细芯的质量和制备毛细芯材料的密度计算得到, 公式如下:

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_w/\rho}{h \cdot \pi r^2} \quad (1)$$

式中: m_w 为毛细芯样品的质量; r 为毛细芯的半径; h 为毛细芯的厚度; ρ 为毛细芯材料(316L 不锈钢)的密度, 取 $\rho = 7.98 \text{ g/cm}^3$ 。

毛细芯输送工质的能力可用渗透率 K 表示, K 可由毛细芯的孔径和孔隙率计算得出:

$$K = \frac{D^2 \varepsilon^3}{X(1 - \varepsilon)^2} \quad (2)$$

式中: D 为毛细芯孔径; ε 为毛细芯孔隙率; X 为常数, 其值通常由实验确定, 对于 3D 打印的多孔结构, X 取 122^{[15]6}。

毛细芯的有效导热系数是一个涉及蒸发效率和热泄漏的重要参数。毛细芯自身的导热能力可用有效导热系数 k_e 表示, k_e 值主要取决于材料的导热系数、冷却介质的导热系数以及毛细芯孔隙率:

$$k_e = k_1 \left(\frac{k_1}{k_w} \right)^{-(1-\varepsilon)\alpha} \quad (3)$$

式中: k_1 为水的导热系数; k_w 为毛细芯材料的导热系数; α 为经验参数, 取 $\alpha = 0.59$ ^{[15]5}。

1.4 复合毛细芯的结构参数

表 1 所示为 2 组复合毛细芯的结构参数。I 组蒸发层孔径为 200 μm , 吸液层孔径为 100 μm ; II 组蒸发

层孔径为 $100\ \mu\text{m}$,吸液层孔径为 $200\ \mu\text{m}$ 。每层毛细芯的孔隙率、渗透率及有效导热系数由式(1)、式(2)与式(3)计算得出。

表1 2组复合毛细芯的结构参数

Table 1 Structural parameters of 2 sets of composite wick

组号	层别	孔径/ μm	孔隙 率/%	渗透 率/ μm^2	有效导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
I	吸液层	100	30.9	5.91	8.6
	蒸发层	200	50.9	213.00	5.4
II	吸液层	200	50.9	213.00	5.4
	蒸发层	100	30.9	5.91	8.6

2 结果与讨论

2.1 间隙对环路热管瞬态启动性能的影响

2.1.1 安装毛细芯 I 时的环路热管性能

表2所示为毛细芯 I 的启动参数,图4所示为毛细芯 I 3种间隙对环路热管启动温度的影响。

表2 毛细芯 I 的启动参数

Table 2 Startup parameters of wick I

间隙/mm	蒸发形成时间/s	环路热管启动时间/s
0	54	94
1	70	104
2	76	132

从表2可以看出,当蒸气槽道与毛细芯 I 的间隙为 0,1 和 2 mm 时,毛细芯 I 都能使环路热管在 100 s 内产生蒸气。但是当间隙为 0 mm 时,环路热管的启动时间最短。当间隙增加到 1 mm 和 2 mm 后,环路热管的蒸发形成时间和启动时间都会延长。这是因为增大蒸气槽道与毛细芯 I 的间隙后蒸发区的容积增大,因此,在相同的功率下启动初期需要消耗更长的时间才能够将液体加热至过热。

由图4(a)可知,间隙为 0 mm 时,毛细芯 I 能使环路热管启动后在短时间内趋于稳定,壁面温度没有明显的波动;图4(b)是间隙为 1 mm 时环路热管的启动过程,在启动后的 300~600 s,壁面温度存在明显的震荡,震荡幅度为 $\pm 2\ ^\circ\text{C}$;图4(c)为间隙为 2 mm 时环路热管的启动过程,在启动后的 550 s 内壁面温度无明显震荡;但在接近 600 s 时壁面温度出现了上升的趋势,同时冷凝器出口温度也出现了下降趋势。总体而

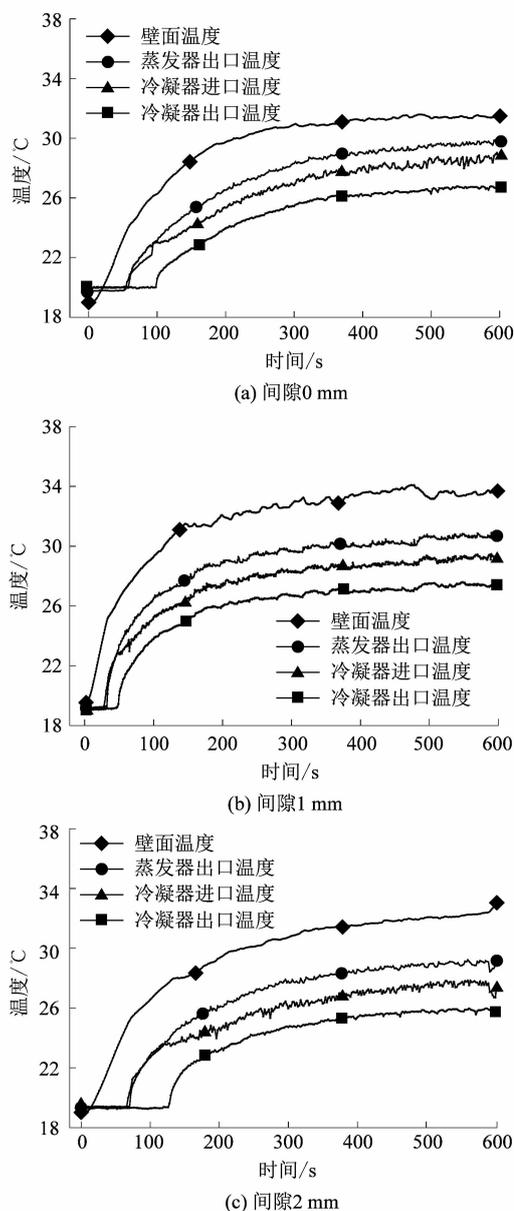


图4 毛细芯 I 对环路热管启动性能的影响

Figure 4 Effect of wick I on startup performance of LHP

言,无论在何种间隙下,环路热管的启动均无明显的波动。这是因为毛细芯的孔径并没有改变,则毛细芯内部的毛细力没有发生变化,这说明影响环路热管启动过程中温度发生震荡关键因素是毛细芯的孔径。由于毛细芯 I 吸液层的孔径($100\ \mu\text{m}$)比较小,而蒸发层的孔径($200\ \mu\text{m}$)比较大,因此在增加间隙后,具有较小吸液层的毛细芯 I 不会因为储液槽补充过多的冷凝液体工质而发生过热度降低的现象。

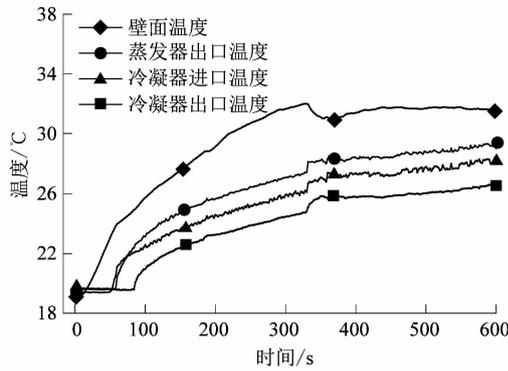
2.1.2 安装毛细芯 II 时的环路热管性能

毛细芯 II 启动参数如表 3 所示。图 5 所示为毛细芯 II 3 种间隙对环路热管启动的影响。

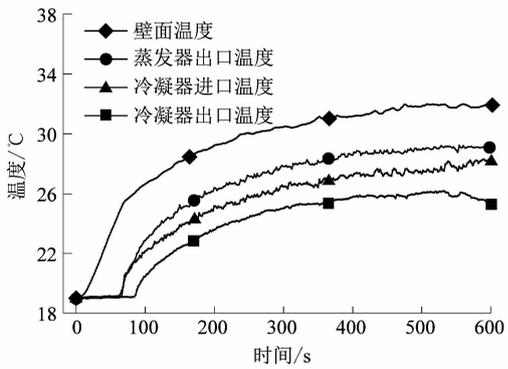
表 3 毛细芯 II 的启动参数

Table 3 Startup parameters of wick II

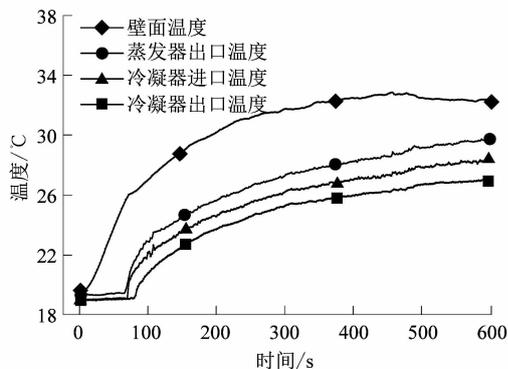
间隙/mm	蒸发形成时间/s	环路热管启动时间/s
0	54	80
1	72	92
2	76	92



(a) 间隙 0 mm



(b) 间隙 1 mm



(c) 间隙 2 mm

图 5 毛细芯 II 对环路热管启动性能的影响

Figure 5 Effect of wick II on startup performance of LHP

从表 3 可以看出,蒸气槽道与毛细芯 II 间隙为 0, 1 和 2 mm 时环路热管的蒸发形成时间分别为 54, 72 和 76 s,环路热管启动时间分别为 80, 92 和 92 s,说明环路热管都能在 100 s 内启动。但是对比毛细芯 I 和 II 可以发现,二者蒸发形成时间没有很大的差别,但环路热管的启动时间有明显差别。毛细芯 II 的环路热管的启动时间比毛细芯 I 短,说明在相同间隙下,吸液层孔径 200 μm、蒸发层孔径 100 μm 的毛细芯 II 更有利于环路热管快速启动。这是因为吸液层孔径大的毛细芯渗透率更大,从吸液层到蒸发层的孔径逐渐减小,孔径内部的流体速度加快。因此在相同的间隙条件下,有更多的冷凝液体工质回流至蒸发区,从而降低蒸发区液体工质的过热度。

从图 5 可以看出,无论毛细芯 II 与蒸气槽道之间间隙无论是 0 mm,还是间隙为 1 mm 和 2 mm,环路热管启动的 4 个测温点在功率 20 W 时的启动过程中壁面温度均无明显的波动,也没有产生温度过冲现象,启动性能良好。

2.2 间隙对环路热管稳态运行性能的影响

2.2.1 安装毛细芯 I 时的环路热管性能

图 6 所示为蒸气槽道与毛细芯 I 在间隙为 0, 1 和 2 mm 情况下环路热管的运行情况。

从图 6 (a) 可知,蒸气槽道与毛细芯 I 间隙为 2 mm 时能使环路热管在整个变功率下的运行温度比其他 2 种间隙的运行温度低。在 40 W 时,间隙为 1 mm 的环路热管壁面温度与间隙 0 mm 相当;但是当功率在 60 ~ 160 W 时,间隙为 1 mm 的环路热管壁面温度均高于间隙 0 mm。表明间隙为 1 mm 时毛细芯 I 并不能强化环路热管的控温能力以及传热能力。相反,间隙为 2 mm 时毛细芯 I 可以强化环路热管的壁面控温能力。当功率为 180 W 时,壁面温度为 96.7 °C。这是因为间隙为 2 mm 时蒸发区气液交界面能够下降更多,液体经过蒸发后的热量只能够传递至复合毛细芯的蒸发层,而不能到达吸液层。且 200 μm 蒸发层具有更低的有效导热系数,所以传递至吸液层(100 μm)的热量要少,可以有效地抑制热泄漏。

从图 6 (b) 中可以看出,在 40 W 时,间隙为 2 mm 的环路热管传热系数与间隙为 1 mm 的毛细芯相当;在 60 ~ 160 W 时,间隙为 2 mm 的环路热管传热系数

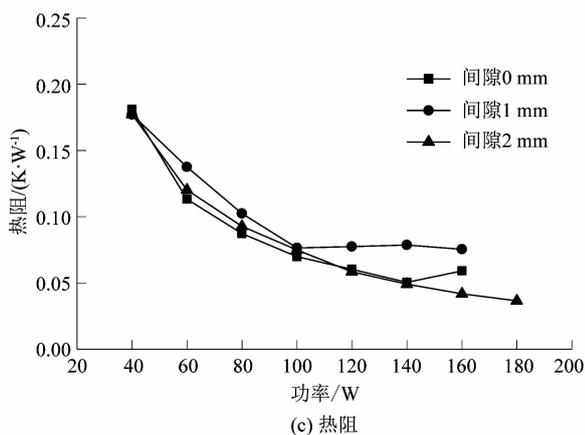
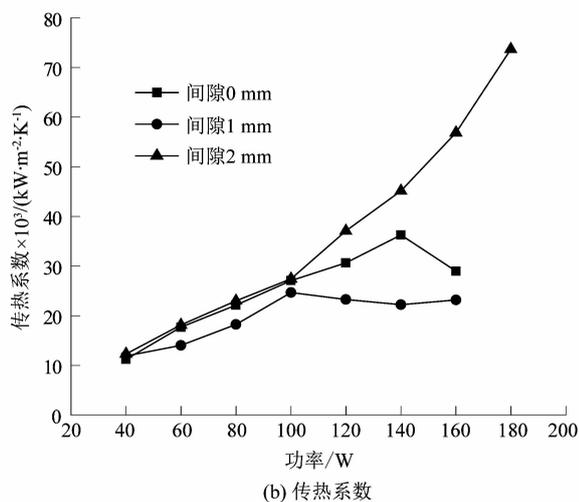
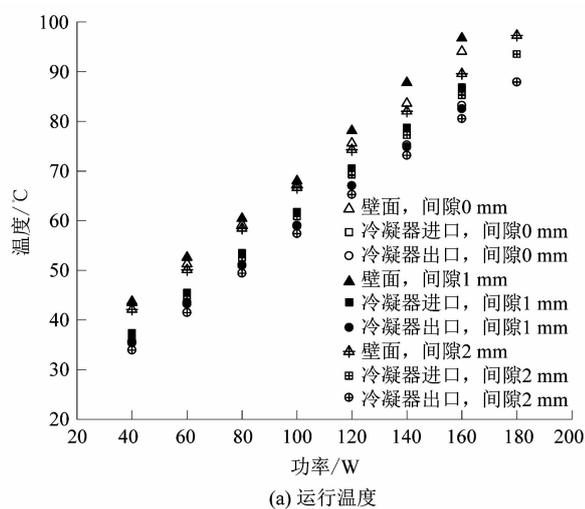


图6 毛细芯 I 对环路热管运行性能的影响
Figure 6 Effect of wick I on operating performance of LHP

随着功率的增加而增加,而间隙 0 mm 与间隙 1 mm 的环路热管传热系数出现先上升后下降的情况,但下降幅度间隙 1 mm 小于间隙 0 mm。这反映出间隙 1 mm

对热泄漏的抑制有一定的作用,但其不理想的控温及传热则是由毛细芯原本的性能决定的。当功率达到 160 W 和 180 W,间隙为 0,1 和 2 mm 时,环路热管传热系数分别为 28 991,23 163 和 73 681 W/(m²·K)。

从图 6(c)可知,间隙为 1 mm 时,环路热管的热阻最大;在功率为 50 ~ 110 W 时,间隙为 0 mm 环路热管热阻最小,功率为 110 W 之后间隙为 2 mm 的环路热管热阻最小。这表明当功率增加到 120 W 时,间隙为 2 mm 的环路热管热阻随着功率的增加而减小。当功率达到最大时,环路热管的热阻分别为 0.059,0.075 和 0.036 K/W。

2.2.2 安装毛细芯 II 时的环路热管性能

图 7 所示为蒸气槽道与毛细芯 II 在间隙为 0,1 与 2 mm 情况下环路热管的运行温度、传热系数及热阻变化。

从图 7(a)可以看出,当功率为 40 ~ 60 W 时,3 种间隙的环路热管壁面控温能力相当。当功率为 80 ~ 120 W 时,间隙 0 mm 的环路热管壁面温度最高,而间隙为 1 mm 与 2 mm 的环路热管壁面温度相差不大。这表明在功率为 80 ~ 120 W 时,蒸气槽道与毛细芯 II 存在间隙时环路热管的壁面控温能力优于间隙 0 mm。当加热功率为 120 ~ 140 W 时,间隙为 1 mm 的环路热管表现出很好的控温能力。这表明功率为 120 ~ 140 W 时,间隙为 1 mm 的环路热管相较于间隙 0 mm 和 2 mm 的环路热管控温能力好。当功率达到 160 W 时,间隙为 0 mm 时,环路热管的壁面控温能力最好。此时,间隙为 1 mm 和 2 mm 的环路热管壁面温度分别为 95.6 °C 和 94.4 °C。

从图 7(b)可以看出,当功率低于 120 W 时,间隙 0 mm 的环路热管传热系数最小,而在功率为 160 W 时环路热管传热系数达到最大;当功率为 40 ~ 60 W 时,间隙 1 mm 的环路热管传热系数高于间隙 2 mm;在功率为 60 ~ 110 W 时间隙为 2 mm 的环路热管传热系数最大。这是因为间隙为 2 mm 的环路热管具有更小的流体阻力。当功率为 110 ~ 150 W 时,间隙 1 mm 的环路热管传热系数高于间隙 2 mm;功率高于 150 W 后又相反。这说明在较低功率(40 ~ 130 W)时,增加间隙可以提高环路热管的传热性能。但是在较高功率(142 ~ 160 W)时,增加间隙对环路热管的传热效果具

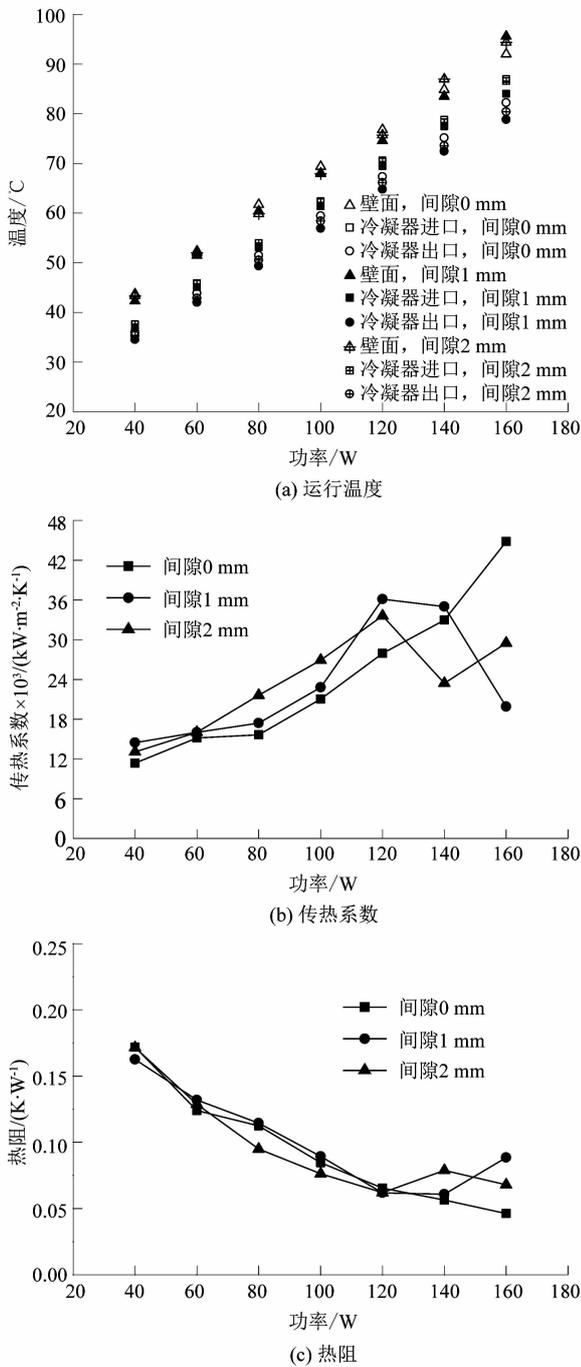


图7 毛细芯II对环路热管运行性能的影响

Figure 7 Effect of wick II on operating performance of LHP

有抑制作用。这是因为当加热功率增大时,蒸发区的压力增大,因此液体工质的饱和温度升高,蒸气槽道与毛细芯存在间隙的环路热管需要更长的时间才能达到工质的沸点。当功率达到160 W,间隙为0,1和2 mm时,环路热管传热系数分别为44 811, 19 900和

29 506 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

从图7(c)中可以看出,当功率为40 W时,间隙为1 mm时,环路热管的热阻最小,而间隙0 mm与2 mm的热阻相差不大;在功率为62~120 W,间隙为2 mm时,环路热管具有更小的热阻;在功率为120~150 W时又出现相反的状态;在150~160 W时,间隙为0 mm的环路热管热阻最低。当功率达到最大时,间隙0,1和2 mm时环路热管的热阻分别为0.046,0.088和0.068 K/W 。

3 结论

为抑制环路热管中蒸发器内小孔径毛细芯易发生热泄漏的现象。课题组对蒸发器内的毛细芯与蒸气槽道的接触方式做了调整,通过实验研究其(毛细芯)对环路热管的启动性能与运行性能的影响。实验结果发现:

1) 对于毛细芯I和II而言,当蒸气槽道与毛细芯间隙增大至1 mm和2 mm后,启动时长均会因为间隙的增大使得蒸发区内的液体工质增多而延长,但增加间隙并不会出现环路热管启动时的温度波动和温度震荡现象。

2) 对于毛细芯I,当毛细芯与蒸气槽道间隙为1 mm时,难以控制环路热管的壁面温度,传热能力也不佳;在功率为160 W时,环路热管的传热系数为23 163 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。当毛细芯与蒸气槽道间隙为2 mm时,环路热管的壁面温度控制能力在所有运行功率下均有所提高,甚至可在180 W的功率下稳定运行;此时,壁面温度为96.7 $^{\circ}\text{C}$,环路热管传热系数为73 681 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。这说明毛细芯I与蒸气槽道间隙为2 mm时,对于热泄漏的抑制情况最好。

3) 对于毛细芯II,无论毛细芯与蒸气槽道间隙为1 mm还是2 mm,在40~140 W的功率下可以有限提高壁面的控温能力和环路热管的传热能力。但在160 W的功率下环路热管的控温能力和传热能力均被削弱。当蒸气槽道与毛细芯间隙为1 mm时,160 W的功率下壁面温度为95.6 $^{\circ}\text{C}$,环路热管的传热系数仅为19 900 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;当蒸气槽道与毛细芯间隙为2 mm时,160 W的功率下壁面温度为94.4 $^{\circ}\text{C}$,环路热管的传热系数为29 506 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。这说明毛细芯II在增加与蒸气槽道间隙后,在160 W的功率下并不

能对热泄漏进行抑制。

参考文献:

- [1] LAUNAY S, SARTRE V, BONJOUR J. Parametric analysis of loop heat pipe operation; a literature review[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2007, 46(7): 621 - 636.
- [2] 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.
- [3] 周智勇, 吴青青, 韦中师, 等. 二次热回收热管式空调系统[J]. *化工学报*, 2017, 68(5): 1823 - 1832.
- [4] DU S, ZHANG Q, HOU P L, et al. Experimental study and steady-state model of a novel plate loop heat pipe without compensation chamber for CPU cooling[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 53: 101894.
- [5] ESARTE J, BLANCO J M, BERNARDINI A, et al. Optimizing the design of a two-phase cooling system loop heat pipe: wick manufacturing with the 3D selective laser melting printing technique and prototype testing[J]. *Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics*, 2017, 111: 407 - 419.
- [6] 董其伍, 王丹, 刘敏珊. 余热回收用热管及热管式换热器的研究[J]. *工业加热*, 2007, 36(4): 37 - 40.
- [7] REAR D A, KEW P A, MCGLEN R J. *Special types of heat pipe [M]//Heat Pipe: Theory, Design and Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2007: 215 - 274.
- [8] WANG D C, XIA Z Z, WU J Y, et al. Study of a novel silica gel-water adsorption chiller; part I design and performance prediction[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2005, 28(7): 1073 - 1083.
- [9] 王野, 纪献兵, 郑晓欢, 等. 多尺度复合毛细芯环路热管的传热特性[J]. *化工学报*, 2015, 66(6): 2055 - 2061.
- [10] XU J Y, WANG D C, HU Z H, et al. Effect of the working fluid transportation in the copper composite wick on the evaporation efficiency of a flat loop heat pipe[J]. *Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics*, 2020, 178: 115515.
- [11] LI H, FU S J, LI G F, et al. Effect of fabrication parameters on capillary pumping performance of multi-scale composite porous wicks for loop heat pipe[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 143: 621 - 629.
- [12] 胡卓煊, 王冬城, 许佳寅, 等. 双层毛细芯对环路热管传热性能的实验分析[J]. *热科学与技术*, 2020, 19(2): 132 - 138.
- [13] 于忠斌, 张中标, 尹婷婷, 等. 金属3D打印技术概述[J]. *机械管理开发*, 2022, 37(1): 266 - 268.
- [14] 刘全景, 刘禹. 增材制造技术在陶瓷制备中的应用[J]. *轻工机械*, 2021, 39(6): 1 - 5.
- [15] 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. 2 - 6.
- [16] 刘杰, 曹澍, 俞经虎. 基于3D打印模具和凝胶注模成型的多孔氧化铝陶瓷成型工艺[J]. *轻工机械*, 2021, 39(4): 10 - 13.
- [17] SIMCHI A. Direct laser sintering of metal powders: mechanism, kinetics and microstructural features[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2006, 428(1/2): 148 - 158.
- [18] THOMPSON S M, ASPI Z S, SHAMSAEI N, et al. Additive manufacturing of heat exchangers: a case study on a multi-layered Ti-6Al-4V oscillating heat pipe[J]. *Additive Manufacturing*, 2015, 8: 163 - 174.
- [19] IBRAHIM O T, MONROE J G, THOMPSON S M, et al. An investigation of a multi-layered oscillating heat pipe additively manufactured from Ti-6Al-4V powder[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 108: 1036 - 1047.
- [20] JAFARI D, WITS W W, GEURTS B J, et al. Metal 3D-printed wick structures for heat pipe application: capillary performance analysis[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 143: 403 - 414.
- [21] JAFARI D, WITS W W, GEURTS B J. An investigation of porous structure characteristics of heat pipes made by additive manufacturing[C]//2017 23rd International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems. Amsterdam: IEEE, 2017: 1 - 7.
- [22] LI X Q, ZHU K, LI H L, et al. Performance comparison regarding loop heat pipes with different evaporator structures[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 136: 86 - 95.