

文章编号:1000-5862(2019)06-0559-06

不同结构吸液芯的超薄平板热管传热性能研究

廖小南, 简弃非*, 祖帅飞

(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要:吸液芯结构对超薄平板热管的传热性能有很大影响. 为对比不同结构吸液芯的超薄平板热管传热性能, 研制了4种吸液芯的超薄平板热管并进行传热性能实验. 结果发现:120~200目烧结芯超薄平板热管的热阻最低, 在稳定工作时蒸发端温度最低, 启动时间最短; 在相近孔隙率下, 烧结芯热管比丝网芯热管的传热性能好, 粉末烧结结构比网状结构更利于改善毛细力和强化沸腾.

关键词:超薄平板热管; 吸液芯结构; 传热性能; 启动特性

中图分类号:TG 115.21 文献标志码:A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2019.06.02

0 引言

热管作为相变传热装置, 由于其体积小、传热效率高和稳定性强的优点, 成为解决微电子设备散热的一种优选方案^[1]. 电子产品轻薄化的进一步发展, 也使得热管朝着超薄化方向发展. 高密度排列的电子元器件产生较大的热量, 散热情况直接影响产品的可靠性、工作性能和使用寿命. 现有电子产品不仅对工作温度有限制, 对温度的均匀性也有更高的要求^[2-3]. 相比于传统热管, 平板热管具有更均匀的温度分布, 从而能扩展更大的导热面积, 提高其热传导能力^[4]. 吸液芯作为热管核心部件对热管性能有着主要影响. 此外, 热管内的工质、充液率以及工作倾角等也都会影响热管的传热性能.

近年来, 国内外学者对超薄平板热管的传热性能优化进行了一定的理论和实验研究. S. A. Lurie等^[5]提出一种烧结芯平板热管最优几何分布的拓扑优化方法, 通过模拟得到了芯柱和沟槽的最优分布, 使得其传热能力达到同尺寸平板热管的2倍. Li Yong等^[6]研究并提出了一种新型的烧结芯结构来改善超薄平板热管的传热性能. 文献[7]通过改变吸液芯结构探究了平板微热管的传热性能, 并开发出一种沟槽聚合微通道阵列以提高平板微热管的毛细管力. Fei Xin等^[8]通过建立微型平板热管在轴向上的流动与传热模型对蒸气与液体的压力和流速进行

研究, 得出在一定的尺寸结构下, 蒸气腔厚度越大则微型平板热管的热阻越小. 寇志海等^[9]对一种微槽平板式热管散热器的传热特性进行实验和数值模拟, 得出利用传热效率高、均温性好的平板热管作为基底制成的散热器, 可使散热器总热阻降低约20.6%. 文献[10]探究了热输入、冷却水流量和内部结构填充比对平板热管的影响, 发现添加芯柱会提高平板热管的换热系数, 提高填充率会增大平板热管的热阻. Lü Lucang等^[11]研究了腔体厚度为0.55 mm的超薄平板热管在自然空气对流和强制水冷2种不同冷却方式下的传热性能. Wong Shwin-Chung等^[12]通过实验研究了沟槽型平板热管在充注水、甲醇和丙酮3种不同工质时的蒸发特性. Yu Fawen等^[13]对轴向开槽热管进行了可视化实验, 发现在小倾角不同韦伯数下能观察到不同的蒸发现象. Wang Gang等^[14]通过实验发现微通道平板热管的最佳充液率为20%, 使用甲醇为工质时热管换热性能比使用丙酮和R141b为工质时更好. 于程等^[15]研究了平板热管的启动方式, 发现平板热管存在突然启动和渐进式启动2种方式, 即在高充液率时突然启动, 在低充液率时渐进式启动. 还有其它很多研究开发了新型结构的吸液芯^[16-18].

综合上述文献来看, 对于超薄平板热管的研究多为结构上的优化以及各种因素对传热性能的影响, 大多仅使用一种吸液芯作为研究对象进行分析, 未能对使用不同结构吸液芯的热管进行对比. 为此, 本文研制了80~120目烧结芯、120~200目烧结

收稿日期:2019-06-13

基金项目:国家自然科学基金(21776095)和广州市科技计划(201804020048)资助项目.

通信作者:简弃非(1963-), 男, 湖南邵阳人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事传热节能与新能源装备研究. E-mail: tejf@scut.edu.cn

芯、单层丝网芯和 3 层丝网芯 4 种吸液芯的超薄平板热管,并通过实验对比其传热性能。

1 实验设备

1.1 实验使用的吸液芯

在超薄平板热管中,吸液芯提供工质流回蒸发

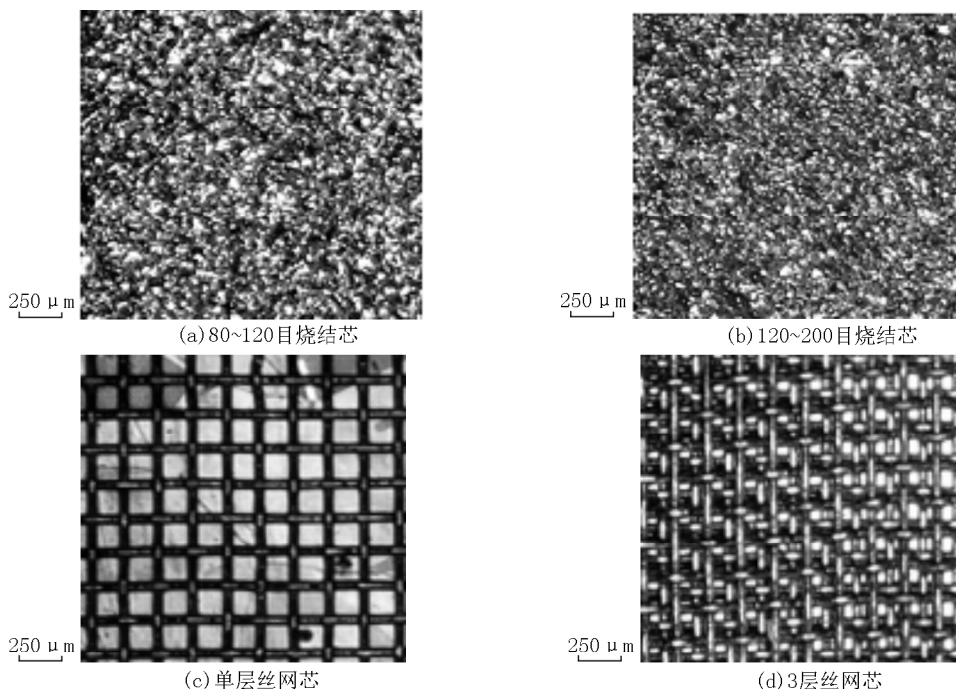


图 1 吸液芯结构图

实验中使用的吸液芯相关参数见表 1。烧结芯颗粒直径较小,120~200 目烧结芯的孔隙率远小于 80~120 目烧结芯。单层丝网芯和 3 层丝网芯使用相同网孔尺寸丝网,3 层丝网经编制后,孔隙率比单层丝网小。从热管的工作原理来看,热管传热性能的好坏,与蒸气的产生速率和冷凝端的冷凝速率以及冷凝工质的回流速率密切相关。毛细力和渗透率是影响工质回流速率的重要因素,有效孔径越小,毛细力越大,但是流动阻力也越大,即渗透率越低;蒸发端蒸气的产生速率与吸液芯对沸腾的强化作用相关。吸液芯的结构和孔隙率都是影响毛细力、渗透率以及沸腾强化作用的重要因素。

表 1 吸液芯的相关参数

吸液芯	吸液芯 厚度/mm	颗粒直径 网孔尺寸	吸液芯 体积/mm ³	孔隙率 $\varepsilon/\%$
120~200 目	0.5	75~125 μm	868.0	29
80~120 目	0.5	125~175 μm	868.0	44
单层丝网	0.1	166.7 $\mu\text{m} \times$ 166.7 μm	173.6	37
3 层丝网	0.3	166.7 $\mu\text{m} \times$ 166.7 μm	520.8	30

端的毛细力,并兼顾强化沸腾,所以吸液芯的结构对超薄平板热管的启动和传热性能起着决定性的作用。本文使用 80~120 目烧结芯、120~200 目烧结芯、单层丝网芯和 3 层丝网芯 4 种吸液芯作比较,图 1 为用工业相机拍摄的吸液芯结构图。

实验所用超薄平板热管是由带有吸液芯的铜底板和与之相合的石英玻璃组装而成的,其结构图如图 2 所示。底板为带有吸液芯结构的铜板,上盖为石英玻璃制成的端盖,中间为橡胶垫,安装完成后再辅以螺丝固定压紧。橡胶垫起着调整热管内空腔厚度和防止漏气的作用。石英材质的玻璃盖板用于观察工质流动以及气泡产生情况。安装完成后,热管内空腔厚度约为 1 mm。

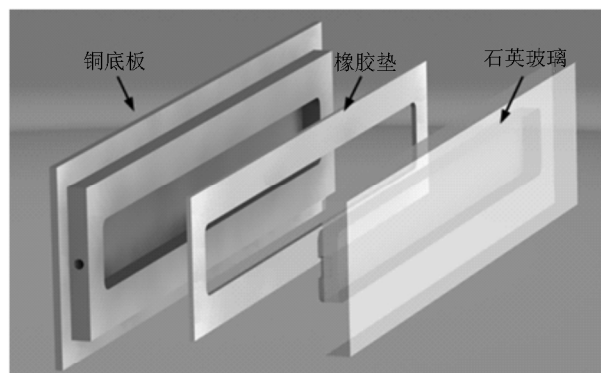
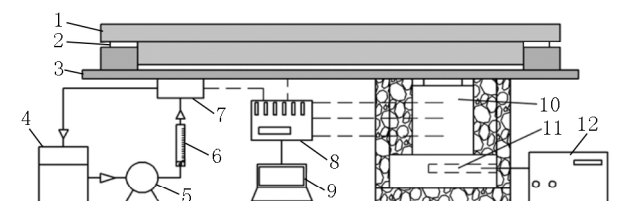


图 2 实验用平板热管结构图

1.2 实验测试系统

图 3 为实验测试系统示意图,主要包括冷却装

置、实验段、加热装置和数据采集系统。实验采用强制水冷的方法对热管冷凝端进行冷却。将平板热管与冷却装置、加热装置安装连接好后,利用水平仪调整热管位置使得热管水平放置。实验通过对电阻棒加载恒定功率电流的方法来提供热量,热量经由导热铜块到达平板热管,目的是使导热铜块上表面温度均匀,更接近实际热管使用情况。导热铜块导热系数较高,从而减少了散热损失,并且在导热铜块上加装了尺寸为 $1.5\text{ mm} \times 4.5\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的小铜块,以调整接触面积减少接触面间的空隙。为了使热管底板与加热装置有更好地接触,在接触面上涂有导热系数为 $3\text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 的导热硅脂。导热硅脂的存在使得铜底板和加热装置之间的接触空隙减少,从而减少接触热阻。导热硅脂的导热系数相比铜的导热系数小很多,将其涂在铜块与空气接触的面上,可减少由导热铜块向空气中散热而产生的热损失。加热模块外侧包有隔热棉以减少热损失。冷却装置与铜底板之间也涂有相同的导热硅脂,使冷却装置保持良好的冷却效果。在水冷模块、热管绝热段以及加热铜块上布置有热电偶,数据由Fluke数据采集器采集,精度为 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。



1. 石英玻璃盖板; 2. 橡胶密封垫圈; 3. 铜底板; 4. 冷却水箱; 5. 水泵; 6. 流量计; 7. 水冷冷却模块; 8. 数据采集器; 9. 电脑 (收集数据); 10. 导热铜块; 11. 电阻加热棒; 12. 恒压恒流可调直流稳压电源。

图3 实验测试系统示意图

2 实验方法与分析

2.1 实验条件设定

为测试4种吸液芯的传热性能,充注29%和49% 2种充液率来进行实验。工质使用体积分数75%酒精和体积分数100%酒精。实验通过真空泵将超薄平板热管腔体真空度抽为 0.0925 MPa ,在此真空度下酒精的饱和温度约为 $23\text{ }^\circ\text{C}$ 。实验连续进行,在每次重新配置热管前,将热管充分冷却后再进行充液,避免余温对实验的影响。实验使用恒压恒流可调直流稳压电源加热电阻棒来提供热量,电压设置为 29 V ,电流设置为 0.8 A ,即对热管加热模块输入 23.2 W 的热负荷。冷却模块的水流量设置为

$60\text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,以保证良好的冷却效果。

2.2 超薄平板热管整体热阻的计算

加热铜块的导热系数是未知的,需要通过实验测试得到。由于铜块四周包裹了隔热保温棉,热量沿导热铜块方向即竖直方向的传递速率远大于热量向空气的耗散速率,可以认为热量只按竖直方向传递,由傅里叶导热定律可得导热铜块的导热系数:

$$\lambda = P\delta / (A\Delta T), \quad (1)$$

其中 P 为热源输入功率(23.2 W),使用加热电阻提供热量的方法功率损失较小,可认为热输入功率就是电输出功率; δ 为铜块温度测点间距(5 mm); A 为铜块垂直于导热方向的面积($15\text{ mm} \times 25\text{ mm}$); ΔT 为导热铜块相邻测点之间的温差($^\circ\text{C}$)。将实验所得温度数据带入(1)式中,可以得到加热铜块的导热系数为 $264\text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

导热铜块与加装的小铜块结构如图4所示, T_0 为小铜块上表面与平板热管接触的表面温度点, T_i 为导热铜块上表面温度。小铜块的上下表面均涂抹有导热硅脂,使用游标卡尺测量导热铜块、小铜块和热管铜底板的厚度,总厚度减去导热铜块、小铜块和热管铜底板的厚度可估算得到涂抹的导热硅脂总厚度,约为 0.06 mm 。 T_1 、 T_2 、 T_3 分别为沿竖直方向上3个测点的温度采集值,且测点之间的距离 δ_1 、 δ_2 均为 5 mm ,第3个测点与加热铜块上表面测点的距离 δ_3 也为 5 mm 。

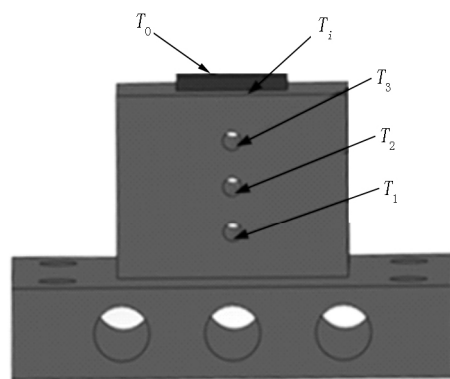


图4 导热铜块与加装的小铜块

热量在竖直方向各个截面上的热流密度均相同,且相邻测温点间距 $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3$,则

$$T_i = T_2 - (T_1 - T_3),$$

平板热管铜底板上的热通量与导热铜块截面上的热通量相等,有

$$Q_{in} = \lambda A (T_i - T_3) / \delta_3 = (T_i - T_0) / (\delta_{si} / (\lambda_{si} A_{si-H}) + \delta_H / (\lambda_{cu} A_{si-H})), \quad (2)$$

其中 δ_{si} 和 δ_H 分别为导热硅脂和小铜块的厚度,其值分别为 0.06 mm 和 1.50 mm ; λ_{si} 和 λ_{cu} 分别为导热

硅脂和小铜块的导热系数,这里导热硅脂的导热系数为 $3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,小铜块与导热铜块材料相同,导热系数为 $264 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; A_{si-H} 为小铜块的底面积 ($4.5 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$). 由 (2) 式可得 T_0 为

$$T_0 = T_i - \lambda A (T_2 - T_3) (\delta_{si} / (\lambda_{si} A_{si-H}) + \delta_H / (\lambda_{cu} A_{si-H})) / \delta_3,$$

可认为 T_0 即是热管蒸发端的温度,从而可得超薄平板热管热阻(单位: $^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$) 为

$$R = (T_0 - T_c) / Q_{in},$$

其中 T_c 为热管冷凝端的冷却温度,使用采集所得的水冷模块温度的算术平均值.

3 实验结果分析

3.1 不同结构吸液芯的超薄平板热管热阻对比

为对比不同吸液芯对超薄平板热管传热性能的影响,将在 29% 和 49% 2 种充液率情况下的数据进行对比分析. 图 5 和图 6 分别是使用工质为体积分数 75% 酒精和体积分数 100% 酒精的实验结果. 从图 5、图 6 中均可以看出,120 ~ 200 目烧结芯热管的热阻远小于其它 3 种吸液芯热管的热阻,在使用体积分数 100% 酒精时,充液率为 49% 的 120 ~ 200 目烧结芯超薄平板热管的热阻为 $1.67 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$,比同一工质体积分数、充液率下的单层丝网芯超薄平板热管的热阻低 21% 左右. 由此可见,在 4 种吸液芯制成的热管中,120 ~ 200 目烧结吸液芯热管的导热能力最好.

对比 120 ~ 200 目烧结芯热管和 80 ~ 120 目烧结芯热管,可以看出:在粉末烧结结构的吸液芯中其孔隙率大的热管热阻大;对比单层丝网芯热管和 3 层丝网芯热管,得出在丝网结构吸液芯中也是其孔隙率大的热管热阻大.

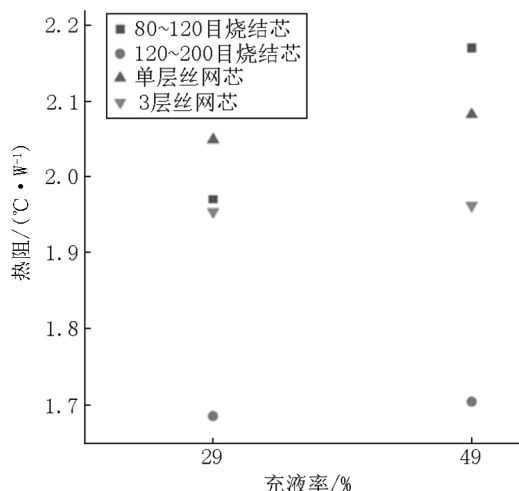


图 5 不同吸液芯热阻对比图(酒精体积分数为 75%)

对比孔隙率相近的毛细芯 120 ~ 200 目烧结芯 (29%) 和 3 层丝网芯 (30%), 可以看出: 120 ~ 200 目烧结芯热管的热阻比 3 层丝网芯热管有显著降低. 从结构上看, 丝网结构的工质流道较粉末烧结结构的更为规则, 可以认为丝网结构吸液芯比粉末烧结结构吸液芯的流动阻力更小. 故该现象出现的原因是粉末烧结结构吸液芯产生的毛细力较大. 这表明相近孔隙率下, 粉末烧结结构吸液芯比丝网结构吸液芯更有利于改善毛细力.

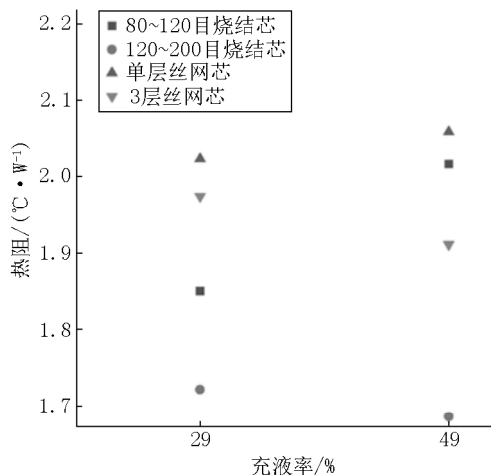


图 6 不同吸液芯的热阻对比图(酒精体积分数为 100%)

对比不同工质体积分数的实验结果, 热管充注酒精体积分数为 100% 相比充注酒精体积分数为 75%, 热阻均有下降. 80 ~ 120 目烧结芯热管的热阻下降最明显, 在 49% 充液率下, 热阻由 $2.17 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 下降到 $2.02 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$, 下降 $0.15 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$. 其它 3 种吸液芯的热管热阻下降均为 $0.50 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 左右. 实验结果说明: 酒精体积分数的增大有利于热管热阻的减少, 吸液芯孔隙率越大, 这种下降的趋势越明显. 分析认为: 高体积分数酒精更易沸腾致使蒸发端由于回流工质液体不足而发生局部干涸, 快速的工质回流补充使得热管热阻下降, 即孔隙率增大, 有利于降低工质的回流阻力.

3.2 不同结构吸液芯的超薄平板热管启动特性对比

从上一节可知, 在充液率为 49% 时 4 种结构吸液芯的超薄平板热管间热阻差距最大, 故选择该充液率下的数据进行热管的启动特性分析. 图 7 为不同结构吸液芯的热管蒸发端与加热块接触的底板温度值 T_0 随时间的变化曲线. 实验所用数据采集器每间隔 8.65 s 采集一个数据, 图 7 中横坐标的时间单位为 8.65 s , 75% 和 100% 表示使用工质为体积分数 75% 酒精和体积分数 100% 酒精, 49% 表示充液率. 由图 7 可以看出, 不同结构吸液芯的超薄平板热管

在到达稳定工作时的蒸发端接触温度有所差异,考虑到温度采集的精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,可以认为工质体积分数对超薄平板热管在稳定工作时的蒸发端温度的影响较小。120~200目烧结芯超薄平板热管在稳定工作时的蒸发端温度为 $66.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,比其它结构吸液芯的超薄平板热管低 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

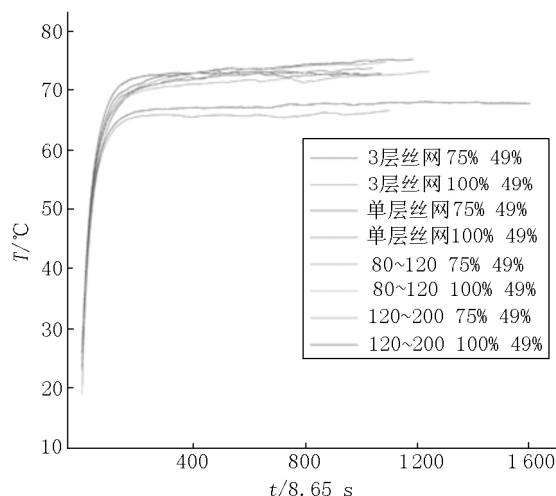


图7 温度随时间的变化图

从图7能看出4种结构吸液芯的超薄平板热管到达稳定工作的时间有所差异。将从开始加热到蒸发端温度值达到稳定工作温度的95%时所用的时间认为是热管的启动时间,得到不同吸液芯热管的启动时间(见图8)。

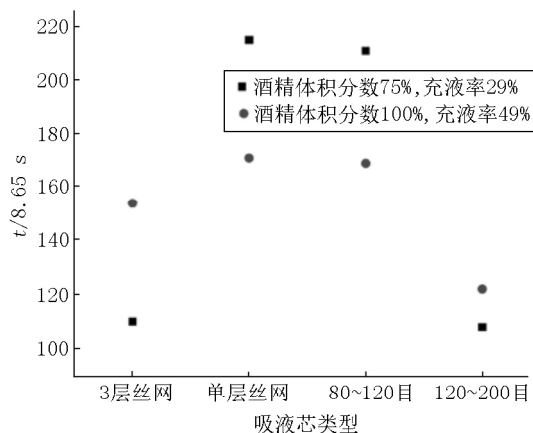


图8 不同结构吸液芯热管的启动时间

从图8可看出:120~200目烧结芯超薄平板热管的启动时间最短。当充液率为49%时,使用工质为体积分数75%酒精的120~200目烧结芯超薄平板热管的启动时间为925.0 s,它是单层丝网芯的超薄平板热管启动时间的50%左右。当热管稳定工作时,蒸发端产生稳定的沸腾,可以认为热管的启动时间反映了吸液芯对沸腾的强化作用。对比120~200目烧结芯热管和80~120目烧结芯热管的启动时间,可以看出:吸液芯的小孔隙率有利于减少启动时间,

即在粉末烧结结构的吸液芯中小孔隙率更有利于强化沸腾。对比相近孔隙率的吸液芯,在充液率为49%时,120~200目烧结芯热管比3层丝网芯热管的启动时间少389.8 s,这表明在相近孔隙率下,丝网结构的沸腾强化效果比粉末烧结结构更差。

结合图7和图8还能发现,3层丝网芯热管虽然启动时间比80~120目烧结芯丝网更少,但最终稳定工作时的温度却更高。推测其原因是:3层丝网对气泡的运动阻力较大,过热的气泡与丝网接触时间延长,导致壁面温度增高,而烧结芯对气泡的逃逸阻力较小,因而在壁面的过热度不高时便能进入稳定工作。从实验结果来看,当使用丝网芯时,考虑稳定工作时的温度,层数并不是越多越好。

4 结论

本文通过实验对比了80~120目数粉末铜烧结芯、120~200目数粉末铜烧结芯、单层丝网芯和3层丝网芯的超薄平板热管的传热性能,得到了如下结论:

1) 从实验结果来看,120~200目烧结芯热管的热阻最小,稳定工作温度最低,启动时间最短,120~200目烧结芯热管是4种结构吸液芯热管中传热性能最好的;

2) 对比120~200目烧结芯和80~120目烧结芯,大孔隙率的80~120目烧结芯的热管热阻较大。工质体积分数的变化对80~120目烧结芯热管的热阻影响更为明显,大孔隙率有利于减少冷凝工质回流至蒸发端的阻力。小孔隙率有利于减少热管启动时间,即更利于强化沸腾;

3) 对比相近孔隙率的120~200目烧结芯热管和3层丝网芯热管,实验结果表明:粉末烧结结构吸液芯更有利于改善毛细力和提高沸腾强化作用,进而降低热管热阻,减少热管启动时间;且3层丝网芯的超薄平板热管由于对气泡的逃逸阻力较大,导致稳定工作时温度较高,故而使用丝网芯时层数不是越多越好。

5 参考文献

- [1] Weibel J A, Garimella S V. Recent advance in vapor chamber transport characterization for high-heat-flux applications [J]. Advances in Heat Transfer, 2013, 45: 209-301.
- [2] Lü Lucang, Li Ji. Micro flat heat pipes for microelectronics

- cooling: review [J]. Recent Patents on Mechanical Engineering 2013 6(3): 169-184.
- [3] Tavakkoli F, Ebrahimi S, Wang Shujuan, et al. Analysis of critical thermal issues in 3D integrated circuits [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2016 97: 337-352.
- [4] 寇志海, 刘晨曦, 李广超, 等. 一种平板热管散热器传热特性的实验研究 [J]. 科学技术与工程 2018 18(14): 136-140.
- [5] Lurie S A, Rabinskiy L N, Solyaev Y O. Topology optimization of the wick geometry in a flat plate heat pipe [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2019 128: 239-247.
- [6] Li Yong, He Jiabin, He Hengfei, et al. Investigation of ultra-thin flattened heat pipes with sintered wick structure [J]. Applied Thermal Engineering 2015 86: 106-118.
- [7] Gyoko Nagayama, Shunya Gytoku, Takaharu Tsuruta. Thermal performance of flat micro heat pipe with converging microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2018 122: 375-382.
- [8] Xin Fei, Ma Ting, Wang Qiuwang. Thermal performance analysis of flat heat pipe with graded mini-grooves wick [J]. Applied Energy 2018 228: 2129-2139.
- [9] 寇志海, 王艳东, 刘晨曦, 等. 微槽平板式热管散热器散热性能的实验和数值模拟 [J]. 制冷技术 2018 46(12): 44-48.
- [10] Somasundaram D, Mani A, Kamaraj M. Experimental investigation of thermal performance of metal foam wicked flat heat pipe [J]. Experimental Thermal and Fluid Science 2017 82: 482-492.
- [11] Lü Lucang, Li Ji. Managing high heat flux up to $500 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ through an ultra-thin flat heat pipe with superhydrophilic wick [J]. Applied Thermal Engineering 2017 122: 593-600.
- [12] Wong Shwin Chung, Chen Chung Wei. Visualization experiments for groove-wicked flat-plate heat pipes with various working fluids and powder-groove evaporator [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2013 66: 396-403.
- [13] Yu Fawen, Yu Cheng, Cao Jianguang, et al. Experimental analysis of the evaporation regimes of an axially grooved heat pipe at small tilt angles [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2018 126: 334-341.
- [14] Wang Gang, Quan Zhenhua, Zhao Yaohua, et al. Performance of a flat-plate micro heat pipe at different filling ratios and working fluids [J]. Applied Thermal Engineering 2019 146: 459-468.
- [15] 于程, 刘向东, 张孟臣, 等. 平板热管内气液两相流动与传热的可视化实验研究 [J]. 化工学报 2017 38(4): 807-810.
- [16] Lu Minhua, Mok L, Bezama R J. A graphite foams based vapor chamber for chip heat spreading [J]. Journal of Electronic Packaging 2006 128(4): 427-431.
- [17] 纪献兵, 徐进良, Abanda A M, 等. 超轻多孔泡沫金属平板热管的传热性能研究 [J]. 中国电机工程学报 2013 33(2): 72-78.
- [18] Cai Qingjun, Bhunia A. High heat flux phase change on porous carbon nanotube structures [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2012 55(21/22): 5544-5551.

The Study on Heat Transfer Performance of Ultra-Thin Flat Heat Pipe with Different Structure Wick

LIAO Xiaonan, JIAN Qifei*, ZU Shuaifei

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: The structure of wick has great influence on the heat transfer performance of ultra-thin flat heat pipe. In order to compare the heat transfer performance of ultra-thin flat heat pipe with different wick structure, four kinds of commonly used wick are fabricated and the experiment of heat transfer performance is carried out. The results show that the ultra-thin flat heat pipe with the 120 ~ 200 powder sintered wick has the lowest thermal resistance, the lowest evaporation end temperature at stable work and the shortest start-up time. The heat transfer performance of sintered heat pipe is better than that of wire mesh heat pipe under the condition of similar porosity, powder sintering structure is more conducive to improving capillary force and strengthening boiling than mesh structure.

Key words: ultra-thin flat heat pipe; wick structure; heat transfer performance; start-up characteristic

(责任编辑:王金莲)