

一种微小型平板式热管的传热性能分析

寇志海, 吕洪涛, 赵国昌, 李广超, 毛晓东, 张 魏

(沈阳航空航天大学 航空航天工程学部(院), 沈阳 110136)

摘 要: 对一种微小型平板式热管的传热特性在自然对流和强制对流冷却条件下进行了试验研究. 并与同尺寸实心铝板的传热性能进行了试验对比. 分析了加热功率、冷却强度的变化对平板热管传热性能的影响规律. 结果表明:该微小型平板式热管具有良好的启动特性和均温特性. 该平板热管的当量导热系数可达到其管壳材料导热系数的12.7倍, 强化传热能力的效果相当明显, 又克服了传统平板热管抗压能力较差、无法加工较大散热面积的弱点, 在电子设备的散热冷却领域具有良好的应用前景.

关 键 词: 微小型平板式热管; 传热性能; 启动特性; 均温特性; 强化传热

中图分类号: V231.1; TK124

文献标志码: A

Analysis on heat transfer performance of a micro-miniature flat heat pipe

KOU Zhi-hai, LÜ Hong-tao, ZHAO Guo-chang, LI Guang-chao,
MAO Xiao-dong, ZHANG Wei

(Faculty of Aerospace Engineering,

Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: An experimental investigation was conducted for heat transfer performance of a micro-miniature flat heat pipe under natural and forced convection cooling. Effects of heating power and cooling intensity on the heat transfer performance of the heat pipe were analyzed. Heat transfer performance of an aluminum plate with the same dimensions was also investigated experimentally and compared. Result shows that, the flat heat pipe has good startup characteristics and uniform temperature distribution. The equivalent heat conductivity coefficient of the flat heat pipe can be 12.7 times higher than that of the aluminum plate. The flat heat pipe is convenient for large area machining with high mechanical strength, and thus has good application prospect in heat dissipation for electronic equipment.

Key words: micro-miniature flat heat pipe; heat transfer performance; startup characteristics; temperature uniformity characteristics; heat transfer enhancement

随着航天器向微小型化、轻量化、紧凑化、高效化方向发展, 满足高传热能力、高可靠性的热管

理系统已经成为制约航天器集成化器件进一步发展的瓶颈. 微小型轴向槽道热管除了具有普通热

收稿日期: 2015-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(51206115); 航空基金(2014ZC54013); 辽宁省自然科学基金(2014024013); 辽宁教育厅科研一般项目(L2014058)

作者简介: 寇志海(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事航空航天电子设备散热、航空发动机热端部件冷却研究.

引用格式: 寇志海, 吕洪涛, 赵国昌, 等. 一种微小型平板式热管的传热性能分析[J]. 航空动力学报, 2017, 32(2): 275-279. KOU Zhi-hai, LÜ Hongtao, ZHAO Guochang, et al. Analysis on heat transfer performance of a micro-miniature flat heat pipe[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(2): 275-279.

管的高传热能力、良好的均温特性外,还具有制造工艺简单,流动阻力小、可靠性高等优点,是迄今为止在航天器热管理领域应用最广泛的一种热管^[1-2].

Cotter^[3] 在 1984 年提出了微型热管的概念,并较为完整的给出了微小型热管理论,为微小型热管的研究与工程应用奠定了坚实的理论基础. Hopkins 等^[4] 的试验结果表明,较深、较窄的槽道以及较厚的热管壁厚可以得到更良好的传热能力. Revellin 等^[5] 对于多热源、多热沉的槽道式热管的流动和传热过程进行了三维数值模拟. Lips 等^[6] 指出当蒸汽空间的厚度减薄时,槽道平板式热管的热阻减小,但同时会降低槽道吸液芯的最大毛细力. Wong 和 Chen^[7] 比较了水、甲醇、丙酮作为工质对槽道热管传热特性的影响. 水作为工质时热管可获得最大传热能力和最小热阻. 纳米流体作为一种新型高效的传热工质,也被用来强化槽道热管的传热性能^[8-13]. HU 等^[14] 对热管的槽道表面进行不同的化学氧化处理. 合适的化学表面处理可提高槽道热管的传热能力. BAI 等^[15] 给出一种 V 型槽道通过窄缝相连接与环形通道的混合型轴向槽道结构. 结果表明,该混合槽道结构可使热管的液膜厚度减薄,蒸发传热面积增加. 最近, Bertoldo 等^[16] 提出了动态测试法,能够更精确地实时监测轴向槽道热管达到毛细极限的干涸点.

本文对一种铝-丙酮微小型平板式热管分别在自然对流和强迫对流冷却条件下的传热特性进行试验研究. 并与同尺寸实心铝板的传热性能进行了对比试验. 测试了该平板式热管的启动特性、均温特性以及传热量、冷却强度等因素对其传热性能的影响规律.

1 试验过程

如图 1 所示,本文研究的微小型平板式热管采用铝挤成型工艺制成,沿平板热管轴向加工出多个同时形成的、彼此独立的微细热管组合在一起,且在每个微细热管的内表面都加工出精密的微槽群结构. 利用真空泵对热管进行抽真空处理,并向热管内部充注丙酮作为传热工质. 由此制成了该微小型平板式热管. 当热管的蒸发段受热时,丙酮工质迅速蒸发带走热量,丙酮蒸汽在冷凝段凝结成液体放出热量,由此实现了热量从热管的蒸发段传递到冷凝段. 冷凝液在微槽群提供的毛细力驱动下流回蒸发段.

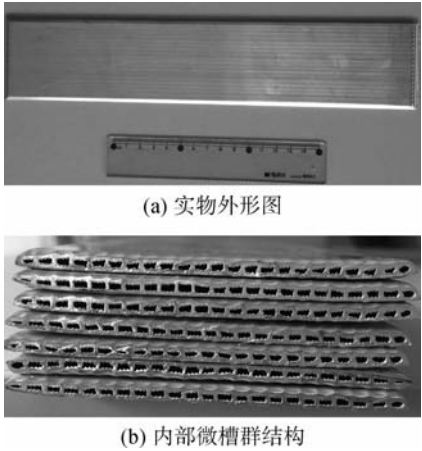


图 1 微小型平板式热管实物图
Fig. 1 Picture of micro-miniature flat heat pipe

相比于传统的微细热管阵列,具有以下特点:
①在每个微细热管内部加工出微槽群结构,可以为冷凝液从冷凝段回流到蒸发段提供额外的毛细驱动力,从而提高热管的毛细极限. 另外微槽群结构的流动阻力小,具有良好的二次加工性能,可增大相变换热面积. ②利用相邻微槽道的间壁作为平板热管的支撑结构,支撑结构与热管整体成型,具有足够的机械强度和刚度,可有效解决平板热管因内外受力不均而引起变形的问题,极大增强了平板热管的承压能力. 另外根据实际需要,可比较容易加工较大的面积. ③各个微细热管通道并排排列,彼此独立. 即使某个微细热管损坏失效,其他独立的微细热管仍能正常工作,具有很高的可靠性. ④外表面平整光滑,可以与电子元器件的热端直接接触,可有效降低接触热阻.

搭建试验测试系统如图 2 所示,测量该平板热管在自然对流和强制对流冷却条件下的换热特性,并对同样外型尺寸的实心铝板进行传热特性

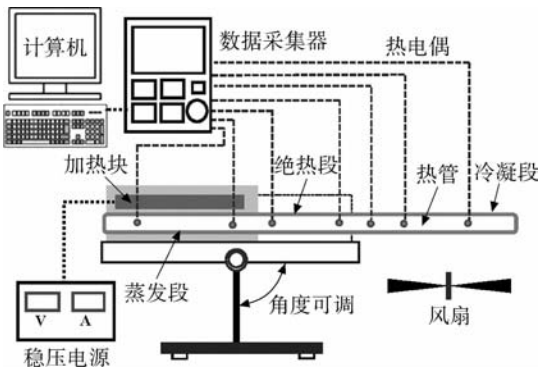


图 2 热管传热性能试验系统
Fig. 2 Experiment system for heat transfer performance of heat pipes

对比试验。在铜块内嵌入电加热管制成电加热器，利用兆信 BXN-605D 稳压电源给电热管供电加热，通过改变输入电流给热管施加不同的热负荷。在热管外壁面与电加热器之间均匀涂有导热硅脂，以降低接触热阻。利用虎钳将电加热器与热管蒸发段外壁面紧密贴实，以确保热管蒸发段被均匀加热。使用绝热保温材料对电加热块的外部以及热管绝热段进行绝热处理。利用风扇来实现对热管冷凝段的强迫对流冷却，利用德图 405-V1 热线风速仪来测量风速。

该平板热管的长、宽、高分别为 300, 60, 3 mm，蒸发段、绝热段和冷凝段的长度分别为 100, 50 mm 和 150 mm。每个微槽道的槽宽为 0.3 mm，槽深为 0.5 mm，槽间距为 0.7 mm。在热管蒸发段、绝热段和冷凝段分别布置了 4 对、4 对和 6 对 Omega 高精度 T 型热电偶，这 14 对热电偶分居两排，每两对对应于热管的同一轴向位置、不同横向位置，取同一轴向位置的两对热电偶读数的平均值作为热管在该轴向位置的外壁温。热电偶距离蒸发段起点的轴向距离分别为 20, 80, 115, 135, 190, 230, 280 mm。本试验中热管运行的环境温度保持在 16 ℃。将热电偶连接到安捷伦 34972A 数据采集器上，数据采集器的接口与计算机相连，实时监测和读取各个热电偶的测温值。

2 结果与分析

在热管水平放置时，改变不同的加热功率、风速等工况，对该平板热管的启动特性、均温特性、热阻等传热性能进行了试验研究。

不同加热功率和不同冷却强度下热管冷凝段最远端面温度 t_c 随时间的变化规律如图 3 所示。在初始时刻，将热管从环境温度(16 ℃)开始加热。随着热量不断地向热管蒸发段输入，热管的外壁温开始迅速增加。在热管启动后，当热管的输入热量和导出热量之间达到平衡时，热管的温度将会保持在一个稳定的水平上，并在很小的温度范围内上下波动，此时认为热管已达到了稳定运行状态。随着输入热量的提高，热管的启动时间呈现缩短趋势。在自然对流冷却条件下，加热功率为 12 W 时，热管的启动时间约为 26 min。而加热功率为 18 W 时，启动时间约为 23 min。这是因为随着传递热量的增加，蒸发段的液态丙酮在短时间

内吸收的热量也越多，丙酮蒸汽量增加，流速加快，这样热管内部气-液循环达到稳定所需的时间也就越短。

另外，由图 3 可见热管启动所需的时间随冷却强度的增大而明显缩短。当加热功率为 18 W 时，自然对流冷却条件下热管大约需要 23 min 达到稳定运行状态。而在强制风冷条件下，大约需要 6 min 热管就可达到稳定运行状态。可见该平板热管具有良好的启动特性。热管从初始状态达到稳定状态所需时间的长短，取决于其自身的热容量以及表面换热条件。强制风冷相比于自然对流冷却条件，热管冷凝段与外部环境之间的对流换热热阻更小，热量传递速率更快，可以将热量更迅速的从热管冷凝段导出，从而热管可以与环境间更快的达到热平衡状态。

在不同加热功率下，热管轴向外壁温 t_a 的变化规律如图 4 所示，图中横坐标 x 表示轴向位置。并与同尺寸、同工况下实心铝板的外壁温变化情况进行了对比。随着加热功率的增加，热管的外壁

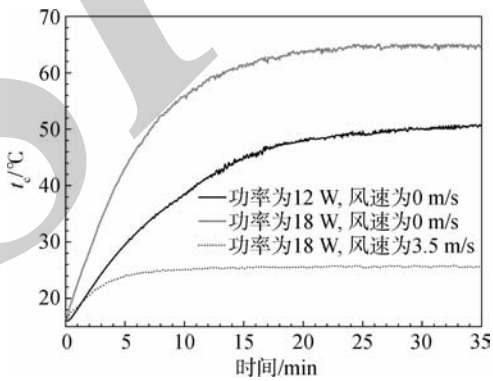


图 3 热管的启动特性

Fig. 3 Startup characteristics of the heat pipe

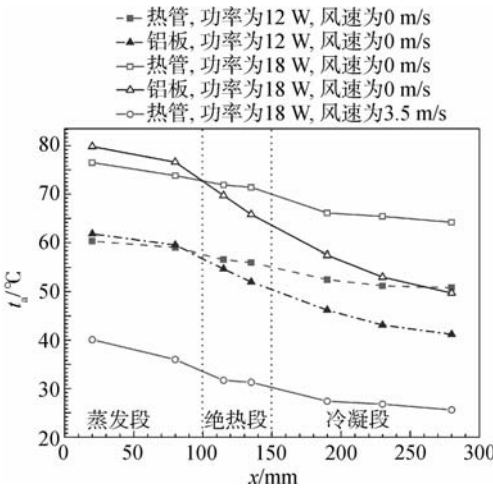


图 4 热管轴向外壁温变化规律

Fig. 4 Variation rule of axial wall temperature of the heat pipe

温随之升高,轴向温差相应增大以使热管能传递更高的热量,工作温度也随之增大. 在加热功率为 18 W,自然对流冷却时,该平板热管的最大温差为 10.2℃,而同工况下,实心铝板的最大温差则高达 29.6℃. 该平板热管的最大温差比同工况下实心铝板的最大温差低很多,这说明相比于实心铝板,该平板热管的传热热阻更小,传热能力更强. 在不同加热功率下,热管冷凝段的最大温差为 2.5℃,这显示出该平板热管具有良好的均温特性. 另外,在加热功率为 18 W,强制风冷下热管的外壁温,明显低于同工况下自然对流冷却时的热管外壁温. 这是由于强制风冷时热管与环境之间的对流换热热阻,远低于自然对流冷却时热管与环境间的对流换热热阻. 在传热量和环境温度相同的情况下,强制风冷下从热管蒸发段到环境的总温差更小,从而热管的外壁温也更低.

热管整体传热能力的大小通常用当量导热系数来评价,即

$$k_{\text{eff}} = \frac{q_{\text{in}} l_{\text{eff}}}{A(\Delta t_e - \Delta t_c)} \tag{1}$$

式中 q_{in} 为热管的加热量, Δt_e 为热管蒸发段的平均温度,在本文中为蒸发段 4 对热电偶温度的平均值, Δt_c 为热管冷凝段的平均温度,在本文中为冷凝段 6 对热电偶温度的平均值, A 为热管的横截面积, l_{eff} 为热管的有效传热长度. 当蒸发段和冷凝段都为均匀的热量输入和输出时,有

$$l_{\text{eff}} = l_e/2 + l_a + l_c/2 \tag{2}$$

式中 l_e, l_a, l_c 分别为该热管蒸发段、绝热段和冷凝段的长度.

在自然对流冷却条件下,加热功率的变化对热管传热特性的影响规律如图 5 所示. 当加热功率从 10 W 增加到 18 W 时,热管的当量导热系数从

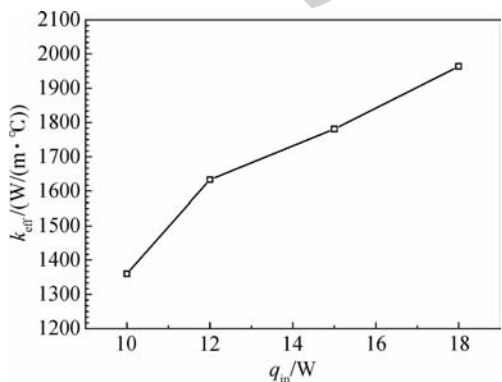


图 5 加热功率对热管传热性能的影响

Fig. 5 Effect of heating power on heat transfer performance of the heat pipe

1360.2 W/(m·℃)增大到 1963.6 W/(m·℃). 当热管的蒸发段受热时,微槽群内的液态丙酮工质迅速蒸发,产生丙酮蒸汽带走热量,丙酮蒸汽在冷凝段放出热量后变成饱和液体,在微槽群提供的毛细驱动力作用下流回蒸发段. 随着热管承受热负荷的增加,蒸发段产生更多量的丙酮蒸汽以带走更多的热量. 丙酮蒸汽量越大,会使热管内部蒸汽的分布更加均匀合理,这使得热管的传热热阻更小,轴向传热能力也就更强.

该平板热管的管壳材料为 3003Al,导热系数为 155 W/(m·℃). 当加热功率为 18 W 时,该平板热管的当量导热系数可达到其管壳材料导热系数的 12.7 倍. 可见,该平板热管强化传热能力的效果相当明显. 本文所研究的平板热管除了保持传统平板热管强化传热能力强的特点外,又克服了传统平板热管抗压能力差、无法加工较大散热面积的弱点,在电子设备的散热冷却领域具有良好的应用前景.

当加热功率为 18 W 时,冷却强度的变化对热管传热特性的影响规律如图 6 所示. 随着冷却风速 v 从 0 m/s(自然对流)增大到 3.5 m/s,热管的当量导热系数从 1963.6 W/(m·℃)降低到 1545.5 W/(m·℃). 随着热管冷却风速的增加,热管冷凝段的冷却强度增大,热管与环境之间的对流换热热阻减小,热量可以更快的传递到环境中,从而使热管的工作温度降低如图 4 所示. 热管是依靠蒸发段的弯月面薄液膜的蒸发相变来强化传热的. 随着工作温度的升高,热管蒸发段弯月面蒸发薄液膜的传热能力增强^[17],浸满工质的微槽群吸液芯的径向传热热阻降低,从而使热管的内部总热阻降低,传热能力增强.

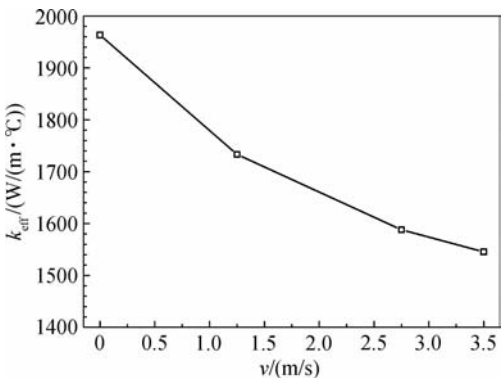


图 6 冷却强度对热管传热性能的影响

Fig. 6 Effect of cooling intensity on heat transfer performance of the heat pipe

3 结 论

本文对一种铝-丙酮微小型平板式热管分别在自然对流和强迫对流冷却条件下的传热特性进行了试验研究. 试验结果表明

该平板热管具有良好的均温特性. 与同尺寸的实心铝板相比, 该平板热管的轴向传热温差更小, 具有更良好的均温特性和轴向传热能力.

该平板热管的当量导热系数可达到铝板导热系数的 12.7 倍, 强化传热的效果相当明显. 该平板热管既克服了传统平板热管抗压能力较差、无法加工较大散热面积的弱点, 又保证了具有足够的传热能力, 在电子设备的散热冷却领域具有良好的应用前景.

参考文献:

[1] 邵兴国, 范含林, 苗建印, 等. 热管技术在航天领域应用和
发展前景[R]. 贵阳: 第十届全国热管会议, 2006.

[2] Solomon A B, Arun N J, Shukla K N, et al. Steady state
performance of a rotating heat pipe[R]. Reno, NV: The
46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit,
2008.

[3] Cotter T P. Principles and prospects for micro heat pipes
[R]. Tsukuba, Japan: The 5th International Heat Pipe
Conference, 1984.

[4] Hopkins R, Faghri A, Krustalev D. Flat miniature heat
pipes with micro capillary grooves[J]. Journal of Heat
Transfer, 1999, 121(1): 102-109.

[5] Revellin R, Rulliere R, Lefevre F. Experimental validation
of an analytical model for predicting the thermal and hy-
drodynamic capabilities of flat micro heat pipes[J]. Ap-
plied Thermal Engineering, 2009, 29(5): 1114-1122.

[6] Lips S, Lefevre F, Bonjour J. Combined effects of the filling
ratio and the vapour space thickness on the performance of
a flat plate heat pipe[J]. International Journal of Heat and
Mass Transfer, 2010, 53(4): 694-702.

[7] Wong S C, Chen C W. 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(6): 396-403.

[8] 鲍然, 刘振华. 倾斜微槽道热管中纳米流体的应用[J]. 航
空动力学报, 2010, 25(6): 1271-1276.

BAO Ran, LIU Zhenhua. Application of nanofluids in an
inclined axial miniature grooved heat pipe[J]. Journal of
Aerospace Power, 2010, 25(6): 1271-1276. (in Chinese)

[9] Tooraj Y, Mehdi H. Thermal performance enhancement of
L-shaped microgrooved heat pipe containing water-based
Al₂O₃ nanofluids[J]. Heat Transfer Engineering, 2015, 36
(5): 462-470.

[10] Meamer E N, Wael A, Abdelsalam A S. Effect of carbon
nanotube additive on the thermal performance of a hori-
zontal V-grooved heat pipe[J]. Journal of Nano Research,
2014, 26(1): 83-88.

[11] Do K H, Jang S P. Effect of nanofluids on the thermal per-
formance of a flat micro heat pipe with arectangular
grooved wick[J]. International Journal of Heat and Mass
Transfer, 2010, 53(9): 2183-2192.

[12] Kang S W, Wei W C, Tsai S H, et al. Experimental investi-
gation of silver nano-fluid on heat pipe thermal perform-
ance[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26 (17):
2377-2382.

[13] Ghanbarpour M, Khodabandeh R. Entropy generation a-
nalysis of cylindrical heat pipe using nanofluid[J]. Ther-
mochimica Acta, 2015, 610(6): 37-46.

[14] HU Yanxin, CHENG Jiang, ZHANG Wei, et al. Thermal
performance enhancement of grooved heat pipes with inner
surface treatment[J]. International Journal of Heat and
Mass Transfer, 2013, 67(6): 416-419.

[15] BAI Lizhan, LIN Guiping, Peterson G P. Evaporative heat
transfer analysis of a heat pipe with hybrid axial groove
[J]. Journal of Heat Transfer, 2013, 135 (3): 031503. 1-
031503. 9.

[16] Bertoldo J J, Vlassov V V, Genaro G, et al. Dynamic test
method to determine the capillary limit of axially grooved
heat pipes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,
2015, 60(1): 290-298.

[17] Sait H H, Demsky S M, Ma H B. Thermal conductivity and
operating temperature effect on the interline region in a
micro miniature heat pipe [R]. Tainan: ASME Micro/
Nanoscale Heat Transfer International Conference, 2008.

(编辑: 王碧珺)