

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING 中文核心期刊 中国科技核心期刊

仿叶脉均热板的传热性能实验研究

徐增光 彭毅 焦会馨

Experimental study on heat transfer performance of bionic vein vapor chamber

XU Zengguang, PENG Yi, JIAO Huixin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12126/see.2023001

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于叶脉仿生的散热均热板性能研究

The performance of vapor chamber based on leaf-vein-like structure for heat dissipation 航天器环境工程. 2021, 38(2): 138-147 https://doi.org/10.12126/see.2021.02.004

玻璃钢空间碎片防护构型性能的实验研究与仿真分析

Experimental and analytical studies of the performance of FRP protective configuration against space debris 航天器环境工程. 2019, 36(2): 120–125 https://doi.org/10.12126/see.2019.02.003

温度循环试验中试件表面结霜/露现象及舱内水分来源的实验研究

Experimental study of the condensation and identifiation of the moisture source during thermal cycling test 航天器环境工程. 2019, 36(5): 468-474 https://doi.org/10.12126/see.2019.05.010

高能电子辐照下聚合物介质深层放电实验研究

Experimental study of deep dielectric discharging of polymer under energetic electron irradiation 航天器环境工程. 2017, 34(3): 295-300 https://doi.org/10.12126/see.2017.03.012

含冰模拟月壤水资源提取实验研究

Experimental study of water resource extraction from frozen lunar regolith simulants 航天器环境工程. 2020, 37(5): 511–518 https://doi.org/10.12126/see.2020.05.015

卫星充放电效应对典型星载电子设备影响的实验研究

Experimental study of the effects of spacecraft charging and discharging on typical satellite-borne electric instrument 航天器环境工程. 2021, 38(3): 370-374 https://doi.org/10.12126/see.2021.03.019

https://www.seejournal.cn

E-mail: htqhjgc@126.com

Tel: (010)68116407, 68116408, 68116544

仿叶脉均热板的传热性能实验研究

徐增光,彭 毅*, 焦会馨

(贵州大学 机械工程学院,贵阳 550025)

摘要:均热板作为一种高效散热元件已广泛应用于电子器件的热管理,其吸液芯的结构形式是均热 板进行高效散热的关键。文章受自然界植物叶片蒸腾作用的启发,通过粉末烧结形成多孔结构的吸液芯 以模仿植物叶脉及叶肉组织,设计了以多边形的边(VC-B)和以多边形(VC-G)作为均热板内部支撑 两种吸液芯结构进行对比研究,并探究充液率以及冷却水温度对均热板传热性能的影响规律。研究表明: VC-B均热板在充液率为60%左右时具有最优的传热性能,所能承载的最大热流密度为120 W/cm²;VC-G 均热板在冷却水温度为10 ℃时所能承载的最大热流密度为130 W/cm²;在较低的冷却水温度下,均热板 的传热能力较强,但均温性较差。仿叶脉均热板可为大功率、高热流密度电子设备的散热提供有效的解 决途径。

关键词:均热板; 仿叶脉; 铜粉烧结; 传热性能; 实验研究 中图分类号: TK172.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-1379(2023)03-0226-07 DOI: 10.12126/see.2023001

Experimental study on heat transfer performance of bionic vein vapor chamber

XU Zengguang, PENG Yi*, JIAO Huixin

(School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Vapor chamber, as an efficient heat dissipation component, has been widely used in the thermal management of electronic devices. The structure of its liquid absorbing wick is the key to efficient heat dissipation of vapor chamber. In this study, inspired by the transpiration of plant leaves in nature, the porous wick was made by powder sintering to imitate the leaf veins and mesophyll tissues. Two wick structures with polygonal edge (VC-B) and polygonal (VC-G) as internal support of vapor chambers were designed for comparative research to investigate the influence of liquid filling rate and cooling water temperature on the heat transfer performance. The results show that the VC-B vapor chamber has the optimal heat transfer performance with a filling rate of 60%, and a maximum bearable heat flux of 120 W/cm², while that VC-G vapor chamber can bear 130 W/cm² at a cooling water temperature of 10 °C. At lower cooling water temperatures, the heat transfer capacity was strong, but the temperature uniformity was poor. These bionic vein vapor chambers may provide an effective solution for heat dissipation of electronic devices with high power and high heat flux.

Keywords: vapor chamber; bionic vein; copper powder sintering; heat transfer performance; experimental study

收稿日期: 2023-01-02; 修回日期: 2023-05-29 基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 52065011); 贵州省教育厅特色领域项目(编号: 黔教合 KY 字 [2021]058)

引用格式:徐增光, 彭毅, 焦会馨. 仿叶脉均热板的传热性能实验研究[J]. 航天器环境工程, 2023, 40(3): 226-232 XU Z G, PENG Y, JIAO H X. Experimental study on heat transfer performance of bionic vein vapor chamber[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2023, 40(3): 226-232

0 引言

随着电子及信息技术的快速发展以及航天产 品性能要求的不断提高,航天电子设备逐渐朝着高 性能、高集成和微型化的方向发展^[1],导致其单位 面积热流密度急剧增加。而电子设备内部热量聚集 会显著降低其工作性能,严重时甚至会导致器件疲 劳损伤^[2-3]。因此,如何有效降低电子设备工作过程 中的高热流密度至关重要。液-气相变作为一种高 效的传热方式已经被广泛应用于大功率电子元件 的热管理,例如热管就是一种基于相变传热的主动 冷却技术;然而由于接触面积和传热空间的限制, 传统热管往往只能实现一维导热。

基于平面热管的概念,均热板提供了一种极具 应用前景的解决方案。而将均热板应用于高热流密 度传热的关键是不断提高其内部吸液芯的传热性 能。随着对工质和吸液芯结构中毛细流动机理研究 的不断深化,研究人员对吸液芯的结构设计进行了 探索,设计出沟槽吸液芯^[4]、粉末烧结吸液芯^[5]及复 合吸液芯^[6]等。除此之外,仿生结构也在均热板吸 液芯研究中得到关注:李锦峰等^[7] 将蜂巢结构应用 到均热板吸液芯中,采用数值分析方法对仿蜂巢结 构蒸汽通道的蒸发端吸液芯结构进行模拟发现,仿 蜂巢通道为气液相工质提供了多条流动路径,使均 热板具有更优异的温度均匀性和传热性能。彭毅 等^[8-10] 受植物叶片蒸腾作用启发,使用化学刻蚀法 制备了一种仿叶脉分形结构的吸液芯;并通过理论 计算、模拟仿真以及实验分析等方法对均热板传热 性能进行研究,结果表明仿叶脉分形结构均热板具 有优异的传热性能。基于植物叶脉分形仿生的思 路,研究人员陆续进行了大量的研究^[11-13],但是已有 的研究中均热板所能承载的热流密度仍然偏小^[14]。 因此,通过探索植物叶片的传热传质机制,优化吸 液芯结构,改善均热板的结构特征从而提高其所能 承载的热流密度^[15],仍是研究人员亟需解决的难题。

本研究在前期研究的基础上,通过对植物网格 状叶脉进行仿生,将蒸发端的吸液芯设计为仿植物 网状叶脉结构,冷凝端通过烧结粉末形成吸液芯结 构,设计了两种新型的均热板吸液芯结构:一种以 多边形叶脉作为均热板内部支撑以及工质回流通 道,多边形作为蒸汽腔(VC-B);另一种以多边形作 为支撑结构和工质回流通道,多边形叶脉作为蒸汽 腔(VC-G)。然后对这两种结构进行对比研究,并探 究充液率以及冷却水温度对均热板传热性能的影 响规律。

1 实验材料与方法

1.1 均热板的制备

本研究在模拟中对植物叶脉系统进行了简化, 如图 1 所示。为了防止均热板在抽真空后出现变 形,需要用支撑柱在内部对均热板进行支撑。本研 究设计的网状叶脉结构使支撑柱与吸液芯合构为一 体,起到支撑作用的同时为工质回流提供通道,并 可实现气液分离。多边形网络结构通过泰森多边形 随机生成,用来模拟植物网状叶脉,叶脉的宽度为 2 mm,高度为 1 mm;用多边形网状叶脉中间的烧结 粉末来模拟叶肉组织。均热板的冷凝端和蒸发端壳 板均为 1 mm 厚的紫铜板,充液管为外径 3 mm、壁 厚 0.5 mm 的紫铜管,直接焊接在壳体上。均热板整 体尺寸为 74 mm×74 mm×5 mm,内部吸液芯与蒸汽 腔的厚度为 3 mm。



图 1 植物叶片结构简化模型 Fig. 1 Simplified model of plant leaf structure

本研究中均热板的吸液芯采用铜粉烧结形成, 需要在石墨板上加工出吸液芯的烧结模具。考虑到 均热板吸液芯内部流通与毛细力的平衡^[5],选取 200目的纯铜粉(粒径约为75µm)均匀填充到石墨 模具中,再放入真空热压炉进行烧结,烧结温度为 840℃。烧结出的吸液芯样品如图2所示,将它们 组装为基于植物网状叶脉仿生的均热板,结构如图3 所示。



(a) VC-B蒸发端

(b) VC-B冷凝端





1.2 实验装置

实验测试平台如图 4 所示,主要包括加热模 块、冷却模块、数据采集模块和升降模块。加热模 块由加热棒、加热块、保温盒、直流电源及功率仪组 成。加热块材料为纯铜,用于模拟热源;采用隔热材 料制作保温盒,并在保温盒与加热块之间填充保温 棉,以减小热量损失、降低实验误差。为减小接触热 阻,在加热块与均热板之间以及均热板与水冷板之 间涂抹导热系数为 6.0 W/(m·K) 的导热硅脂。冷却 模块采用型号为 DC0530 的智能恒温水浴槽外接水 冷板,恒温水浴槽的温度控制范围为-5~100 ℃,冷 却水流量为 13 L/min。数据采集模块由 K 型热电 偶、数据采集卡及计算机组成。升降模块主要用来 夹紧均热板,以减小测试过程中的接触热阻。



图 4 实验测试平台 Fig. 4 Experimental test platform

为了研究均热板在不同热流密度下的热阻以 及均温性能,测试时首先启动加热模块为均热板加 热,启动功率为10W,并记录均热板各测试点的稳 态数据。其中加热块(尺寸为10mm×10mm)及测 温热电偶的布置如图5所示。按照梯度10W调节 热源功率,直到热源温度达到设定的温度时停止测 试。另外,可通过恒温水浴槽的温度调节,研究均 热板在不同冷却水温度下的传热性能。



(b) 热电偶的布置位置图 5 加热块及热电偶的布置位置Fig. 5 Layout of heating block and thermocouples

当电子元器件温度超过 85 °C 时,其工作性能 就会急剧下降^[16]。因此,本研究中将热源温度设定 为 85 °C。为了评价均热板的传热性能,设定均热 板整体热阻 R_{VC} 、冷凝端表面最大温差 $\Delta T_{c, max}$ 以 及蒸发端与冷凝端平均温差 $\Delta T_{e,c}$ 为评价参数,分 别定义为:

$$R_{\rm VC} = \frac{T_{\rm e,ave} - T_{\rm c,ave}}{Q};$$
 (1)

$$\Delta T_{c,\max} = \max\{T_5, T_6, T_7, T_8, T_9\} - \min\{T_5, T_6, T_7, T_8, T_9\};$$
(2)

$$\Delta T_{\rm e,c} = T_{\rm e,ave} - T_{\rm c,ave} \,\circ \tag{3}$$

式 (1)~(3) 中: *T*_{e, ave} 和 *T*_{c, ave} 分别为均热板蒸发端 和冷凝端测温点的平均温度; *Q* 为输入功率。

2 实验结果与讨论

改变测试条件,记录仿叶脉均热板各测温点的 温度变化,并对均热板热阻、冷凝端表面最大温差 以及蒸发端与冷凝端平均温差进行计算,详细讨论 均热板在不同充液率、热流密度和冷却水温度下的 传热性能。

2.1 结构对传热性能的影响

两种结构均热板的热阻如图 6(a) 所示,在 10℃冷却水温度下,两种均热板均能承载 120 W/cm² 的高热流密度,说明本研究中吸液芯拥有的多孔结 构可以为工质提供大量的汽化核心,强化沸腾传 热,提升均热板的传热性能;但 VC-G 均热板的热 阻整体低于 VC-B 均热板的,且 VC-G 均热板在 10℃的冷却水温度下所能承载的最大热流密度为 125 W/cm²,当热流密度为 120 W/cm²时 VC-G 均 热板的热阻最低仅为 0.118 8 ℃/W。其原因主要为 VC-G 均热板的冷凝端具有流动通道结构以及更密 集的回流通道,当蒸汽在冷凝端释放潜热凝结成液 体时能够更加快速地回到蒸发端,即 VC-G 均热板 的内部工质循环速率更快,更有利于热量的传递, 因此热阻更低。

为对比评价均热板的均温性能,选取两种结构 的均热板样品,并将充液率控制在 60% 左右,比较 它们在 10 ℃ 冷却水温度下的冷凝端表面最大温 差 Δ*T*_{c, max},结果如图 6(b) 所示。



图 6 冷却水温度为 10 ℃ 下两种结构均热板的热阻及冷凝 端表面最大温差对比

Fig. 6 Comparison of thermal resistance and maximum temperature difference on condenser surfaces of two types of vapor chambers with a cooling water temperature of 10 $^\circ\!C$

热负荷启动后, VC-B 和 VC-G 均热板的冷凝 端表面最大温差均随着热流密度的增大而增加, 不 同热流密度下 VC-B 均热板的冷凝端表面最大温 差均低于 VC-G 均热板的, 且前者随着热流密度的 增大而增加的速度低于后者。这是由于 VC-G 均热 板内部蒸汽腔的体积小于 VC-B 均热板的, 导致工 质受热蒸发时产生的蒸汽不能在 VC-G 均热板蒸 汽腔内均匀分布^[16], 造成局部高温。

再对比 40 ℃ 冷却水温度下两种结构均热板的 热阻及冷凝端表面最大温差,结果如图 7 所示,发 现两种结构均热板这两项参数的变化均与 10 ℃ 冷 却水温度下的表现一致。表明两种结构拥有各自的 优势: VC-G 均热板可以承载更大的热流密度,但均 温性较差; VC-B 均热板则与之相反。



- 图 7 冷却水温度为 40 ℃ 下两种结构均热板的热阻及冷凝 端表面最大温差对比
- Fig. 7 Comparison of thermal resistance and maximum temperature difference on condenser surfaces of two types of vapor chambers with a cooling water temperature of 40 $^{\circ}$ C

2.2 充液率对于均热板传热性能的影响

研究表明充液率对均热板的传热性能有很大 影响:低充液率可能导致较低的极限热流密度,而 较高充液率可能会降低均热板的传热效率^[17]。图 8(a) 为 VC-B 均热板在 10 ℃ 冷却水温度、不同充液率 下的热阻,可以看到:充液率 40.11% 的均热板热阻 最大,极限热流密度最低,为100 W/cm²;在热流密 度小于 35 W/cm²时, 充液率为 48.51% 的均热板热 阻最小;而在较高热流密度下,充液率为60.82%的 均热板热阻最小,可低至 0.128 3 ℃/W,此时承载 的最大热流密度为 120 W/cm²。即在实验工况内, VC-B均热板的最佳充液率约为60%,这与文献[17] 给出的结论一致。分析是由于充液率较低时,均热 板在低热流密度下启动更快;而当热流密度继续增 加时,低充液率的均热板会出现蒸干现象,其内部 难以形成完整的汽-液循环,将增大热阻^[18]。而当 充液率高于最佳值时,液体会在蒸发端积聚堵塞吸 液芯孔隙,导致均热板的热阻增大,传热效率降低; 同时,多出的工质会被蒸汽上升携带而影响工质回 流,而且蒸发端工质层较厚,蒸发热阻变大,难以形 成核沸腾,即相变受限。



图 8 冷却水温度为 10 ℃、不同充液率条件下 VC-B 均热 板的热阻及蒸发/冷凝端平均温差随热流密度的变化

Fig. 8 Variation of thermal resistance and average temperature difference of evaporating/condensing end of VC-B vapor chamber with different liquid filling rates versus heat flux with a cooling water temperature of 10 $^{\circ}C$

图 8(b) 为 VC-B 均热板在 10 ℃ 冷却水温度、

不同充液率下的蒸发端与冷凝端平均温差($\Delta T_{e,c}$)。

可以看到,随着热负荷功率的增加, $\Delta T_{e,c}$ 逐渐增大。当热源温度接近 85 °C 时,充液率为 60.82% 的均热板的 $\Delta T_{e,c}$ 的上升速率最小,充液率为 40.11% 的均热板的 $\Delta T_{e,c}$ 的上升速率最大。即低充液率的均热板相比于高充液率的在高热流密度下 $\Delta T_{e,c}$ 的增速更快。分析其原因,可能是充液率较低时,均热板内部汽化的蒸汽满足不了正常在整个腔体内循环传热的最小值,使均热板出现局部过热、局部过冷的温度分布不均衡情况,从而出现热源温度过高,蒸发端与冷凝端温差急剧增大;当充液率增大,热负荷启动初期,多余的工质阻碍了液体和蒸汽在蒸发区的流动,而随着热流密度的增加,更多的工质参与相变进行传热^[19],均热板中蒸汽和液体的流动效率得到增强。

2.3 冷却水温度对于均热板传热性能的影响

为了研究冷却水温度对均热板传热性能的影响,选取充液率为66.47%的VC-G均热板,通过控制智能恒温水浴槽对其在不同冷却水温度下进行测试,结果如图9所示。



- 图 9 不同冷却水温度下 VC-G 均热板(充液率为 66.47%) 的热阻与冷凝端表面最大温差随热流密度的变化
- Fig. 9 Variation of thermal resistance and maximum temperature difference of condenser surface of VC-G vapor chamber with a liquid filling rate of 66.47% versus heat flux at different cooling water temperatures

由图 9 可以看出,冷却水温度为 10 ℃ 时, VC-G 均热板所能承载的最大热流密度为130 W/cm²; 当 冷却水温度逐渐升高时,均热板所能承载的最大热 流密度依次降低。在10℃冷却水温度下,热流密 度为 110 W/cm^2 时, VC-G 均热板的热阻达到最低, 为0.1091℃/W。冷却水温度为20℃和30℃时,均 热板的热阻变化趋势几乎一致,说明在该温度范围 内冷却水温度对均热板的传热性能影响较小。当冷 却水温度为40℃时,均热板的热阻低于冷却水温 度为 20 ℃ 和 30 ℃ 时的,其原因可能是温度升高 使均热板内部工质的黏度降低,提高了工质在均热 板内部的流动性⁶⁰,从而提高了均热板的换热效 率。均热板的均温性能表现(如图 9(b) 所示)可以 给出类似的解释——当冷却水温度升高时,均热板 内部工质黏度降低,更有利于工质均匀分布在蒸发 端;当热负荷启动,蒸发端的工质均匀受热蒸发,冷 凝端表现出更好的温度均匀性。

2.4 与其他研究对比

为全面了解本研究设计的 VC-G 均热板的传 热性能,与其他同类研究进行了比较分析,归纳如 表1所示。为方便叙述,本文以编号1~3 指代其 他研究及其设计的均热板。

表 1 不同均热板传热性能对比 Table 1 Comparison of heat transfer performances of different vapor chambers

均热板代号	尺寸/mm	最大热流密度/ (W·cm ⁻²)	最低热阻/ (℃·W ⁻¹)
VC-G	74×74×5	130	0.109 1
#1 ^[6]	90×90×2.51	180	0.152
#2 ^[20]	100×100×10	133	0.04
#3 ^[17]	70×70×1.5	61	0.328

由表 1 可以看到: 与研究 1 相比较, VC-G 均热 板在 5 mm 的厚度(约为研究 1 中均热板厚度的 2 倍)下仍然可以承载 130 W/cm² 热流密度, 且最低 热阻达到 0.109 1 ℃/W。研究 2 中均热板属于混合 型传热, 冷却水通道嵌入蒸汽腔中, 虽然具有更低 的热阻, 但尺寸较大, 且在最大热流密度时, 热源温 度为 95.25 ℃(高于 VC-G 均热板的 85 ℃); 此外, 研究 2 中均热板需要额外的能量输入, 成本更高。 相较于研究 3, VC-G 均热板所能承载的最大热流 密度和最低热阻等传热性能指标均更优。

3 结论

本文设计了两种均热板结构,对比了它们的传 热性能,并研究了不同充液率以及冷却水温度下均 热板的传热情况,得出以下结论:

1)铜粉烧结式的仿生网状叶脉吸液芯结构拥 有的多孔结构可以为工质提供大量的汽化核心,强 化沸腾传热,同时多边形叶脉作为支撑结构为工质 提供了大量回流通道,且能够实现气液分离,使均 热板表现出良好的传热性能。VC-G相较于 VC-B 结构传热性能表现更为优异。

2)充液率会对均热板传热性能产生较大的影响,过高或过低的充液率都会降低均热板的传热效率。VC-B均热板在充液率 60% 左右时传热性能最优,所能承载的最大热流密度为 120 W/cm²。

3)冷却水温度对均热板传热性能具有重要的 影响,过低的冷却水温度会导致均热板表面均温性 下降,但热阻整体较低。VC-G均热板在10℃冷却 水温度下所能承载的热流密度最大为130 W/cm², 热阻最低为0.1091℃/W。

综上,本研究设计的 VC-G 均热板与其他同类 研究相比,综合传热性能指标展现出优势,具有实 用价值。

参考文献(References)

- [1] 陈恭, 汤勇, 张仕伟, 等. 超薄均热板的研究现状及发展 趋势[J]. 机械工程学报, 2022, 58(12): 197-212
 CHEN G, TANG Y, ZHANG S W, et al. Development status and perspective trend of ultrathin vapor chamber[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(12): 197-212
- [2] ALI H M, ARSHAD A, JABBAL M, et al. Thermal management of electronics devices with PCMs filled pinfin heat sinks: a comparison[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 117: 1199-1204
- [3] SHANG B, MA Y, HU R, et al. Passive thermal management system for downhole electronics in harsh thermal environments[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 118: 593-599
- [4] 范春利, 曲伟, 孙丰瑞, 等. 三种微槽结构的平板热管的 传热性能实验研究[J]. 电子器件, 2003(4): 357-360
 FAN C L, QU W, SUN F R, et al. The experimental study of the performance of flat miniature heat pipes with three kinds of micro grooves[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2003(4): 357-360

- [5] 黄豆, 贾力. 烧结铜粉吸液芯毛细性能研究[J]. 工程热物 理学报, 2021, 42(2): 494-503
 HUANG D, JIA L. Study on the capillary performance of sintered copper powder wick[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(2): 494-503
- [6] LI Y, ZHOU W J, LI Z X, et al. Experimental analysis of thin vapor chamber with composite wick structure under different cooling conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 156: 471-484
- [7] 李锦峰, 遇言, 董健, 等. 仿蜂巢复合吸液芯均热板的热 工水力性能[J]. 节能技术, 2022, 40(3): 195-200
 LI J F, YU Y, DONG J, et al. Thermal-hydraulic performance of bionic honeycomb composite wick vapor chamber[J]. Energy Conservation Technolocy, 2022, 40(3): 195-200
- [8] PENG Y, LIU W Y, LIU B, et al. The performance of the novel vapor chamber based on the leaf vein system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 86: 656-666
- [9] PENG Y, LIU W Y, WANG N, et al. A novel wick structure of vapor chamber based on the fractal architecture of leaf vein[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 63: 120-133
- [10] 彭毅. 基于植物叶片结构的仿生均热板研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015
- [11] 赵雨亭, 王长宏, 黄浩东, 等. 仿生叶脉分形微结构表面 的平板热管传热性能研究[J]. 热科学与技术, 2019, 18(6): 471-475

ZHAO Y T, WANG C H, HUANG H D, et al. Heat transfer performance of flat-plate heat pipe with bionc vein microstructure surface[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2019, 18(6): 471-475

[12] 汪维伟,黄昕之,赵福云,等.基于叶脉仿生的散热均热

板性能研究[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(2): 138-147 WANG W W, HUANG X Z, ZHAO F Y, et al. The performance of vapor chamber based on leaf-vein-like structure for heat dissipation[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(2): 138-147

- [13] LUO Y Q, LIU W Y, HUANG G W. Fabrication and experimental investigation of the bionic vapor chamber[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 168: 114889
- [14] 罗远强. 耐热型网状脉植物叶片多尺度热流结构与仿生 均热板设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2018
- [15] JI X, XU J, LI H, et al. Switchable heat transfer mechanisms of nucleation and convection by wettability match of evaporator and condenser for heat pipes: nanostructured surface effect[J]. Nano Energy, 2017, 38: 313-325
- [16] 黎子曦. 超薄均热板制造工艺及其传热性能分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2016
- [17] LIU T, YAN W, WU W, et al. Thermal performance enhancement of vapor chamber with modified thin screen mesh wick by laser etching[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 28: 101525
- [18] HUANG G, LIU W, LUO Y, et al. A novel ultra-thin vapor chamber for heat dissipation in ultra-thin portable electronic devices[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 167: 114726
- [19] 李志斌. 基于叶片结构的均热板研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021
- [20] WANG H, BAI P, CAI R, et al. A hybrid vapor chamber heat sink incorporating a vapor chamber and liquid cooling channel with outstanding thermal performance and hydraulic characteristics[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 244: 114499

(编辑:张艳艳)