

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.003

# 多功能平板热管的传热性能实验研究

董傲,郭策,申京玉,郑威,张镇

(南京航空航天大学,江苏 南京 210016)

**摘要:**为满足高超声速飞行器飞行过程中的热防护及承载需求,设计一种新型热控-承载一体化平板热管结构。通过实验分析结构的传热性能,验证了所设计的平板热管结构具有良好的均温性。在此基础上,进一步分析充液率、重力及工质种类等关键参数对热管传热性能的影响。

**关键词:**飞行器;仿生夹层;平板热管;传热性能;一体化结构

**中图分类号:**V216.4    **文献标志码:**A    **文章编号:**1671-5276(2025)05-0017-04

## Experimental Study of Thermal Performance of Multifunctional Flat Heat

DONG Ao, GUO Ce, SHEN Jingyu, ZHENG Wei, ZHANG Zhen

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To meet thermal protection and carrying requirements of hypersonic vehicle during flight, this paper proposes a novel structure integrated thermal management and carrying. The analysis on thermal performance of the structure by experiment verifies that the flat heat pipe structure has a superior isotherm. In addition, the influence of parameters such as the filling rate, gravity and working fluid on thermal performance is further analyzed through experiment.

**Keywords:** vehicle; bionic sandwich; flat heat pipe; thermal performance; integrated structure

### 0 引言

高超声速飞行器往往指以马赫数 5 以上的速度远程巡航飞行的飞行器<sup>[1]</sup>。其在飞行过程中会面临极其严酷的气动加热及气动载荷,致使表面温度极高并伴随着巨大的热应力<sup>[2]</sup>。随着未来飞行马赫数的进一步增加,如不采取更有效的防护措施,驻点的受载情况还将会变得更加严峻。

热管作为一种高导热、低密度且可以循环使用的元件,被誉为“热超导体”。近年来,学者发现夹芯结构具有优异的比强度和比刚度,是轻量化设计的理想对象,将平板热管与夹芯结构相结合的设计理念也成为了热管研究的一大热点。CHEN 和 LIN 等<sup>[3-4]</sup>将热防护系统与夹芯结构相结合,将隔热防护材料制成高温夹芯结构。QUEHEILLALT 等<sup>[5]</sup>设计制造了夹芯结构为十字型的夹芯平板热管,通过实验证明了十字型夹芯平板热管具有优异的力学性能及均温能力,降低了热应力。DHARMASENA 等<sup>[6]</sup>还通过实验的方式,分析了热输入功率、充液率、工质种类及重力对热管导热性能的影响,描述了热管的启动特性和稳态特性。CARBAJAL 等<sup>[7-8]</sup>在 DHARMASENA

等人的工作基础上,对平板热管的热力学性能进行了三维仿真分析,分析了仿真边界条件及原理,并研究了平板热管的热阻网络、边界条件及热管热阻网络。SOMASUNDARAM 等<sup>[9]</sup>分析了支撑柱对平板热管的热力学性能的影响,并研究了热输入量、充液率、冷却水温度对传热性能的影响。KASEN 和 UAN 等<sup>[10-11]</sup>设计制备了“I”型及“十字”型夹层结构的楔形热管,两试件通过将多层编织网烧结到试件表面,为高超声速飞行器前缘的热防护方式提供了切实可行的方案。张平等<sup>[12]</sup>通过烧结铜粉末的方式制备了平板热管,并经过实验测定了热输入量、工质种类和工质充液率对平板热管的热学性能的影响。

纪献兵等<sup>[13]</sup>使用泡沫金属作为吸液芯,在平板热管的上下底面间放置泡沫金属条,改变实验参数,对其热学性能进行测试分析。结果表明,相比于传统烧结粉末的吸液芯,以泡沫金属作为吸液芯,可以显著减小气液的流动阻力,并提供更大的换热面积。曹杰<sup>[14]</sup>以铝管材作为管体材料,制备了一种延展性好、可弯曲的超薄平板热管。孙健和刘洪鹏<sup>[15-16]</sup>针对高速飞行器翼面的气动热条件,设计制备了可重复使用的疏导式层板热管,

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51875282)

**第一作者简介:**董傲(1999—),男,山东菏泽人,硕士研究生,研究方向为航空航天热防护结构设计,guozc@nuaa.edu.cn。

并通过实验与仿真分析结果证实了该结构的可行性。彭毅和罗远强<sup>[17-18]</sup>以耐热型植物的叶片为仿生对象,设计了一种仿生均热板,并通过实验及仿真的方式,验证了该结构的等温性能比传统均热板更加优异。

## 1 平板热管结构设计

平板热管作为一种特殊形式的热管,可以实现三维立体传热。当热管受到热载荷时,蒸发段毛细芯中的液态工质吸热蒸发转变为气态工质,气体在压力差的驱动下流向冷凝段,并在冷凝段凝结放热,实现热量的传递。研究证明:使用一体化成型技术制备的蜂窝-骨小梁轻质夹芯结构相比于传统的蜂窝结构,具有更高的抗压强度及吸能效率。基于上述设计理念,图1展示了所设计的热控-承载一体化平板热管结构。在材料选择方面,选择去离子水作为热管的工质,采用泡沫金属镍作为毛细芯,6061铝合金作为热管壳体材料。一体化平板热管结构一方面可以实现结构三维的立体传热,改善结构整体的均温性能;另一方面具有优异的力学性能,满足结构的多功能需求。

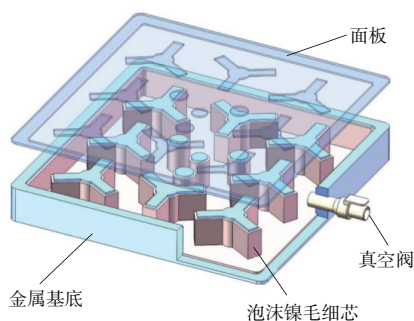


图1 热控-承载一体化平板热管结构示意图

## 2 实验平台及研究方法

为了测试结构的传热性能,制备平板热管结构样件,并搭建热学性能测试平台,实验台如图2所示。平台包括热源、实验件(平板热管)、隔热箱及温度数据采集系统。为减少热源与试验件间的接触热阻,将导热硅脂填充在两者的接触面间。在平板热管的上下表面布置热电偶,用于测量温度分布。选用电木作为隔热材料,使其能够包裹住加热源和试验件的底面与外壁面。

针对夹芯平板热管的热学性能实验分为两部分,1)分别对金属板、平板热管(无工质)、平板热管(饱和工质)进行热学性能测试,以验证平板热管在正常工作状态下的均温性能;2)分别探究工

质种类、充液率及重力因素对平板热管传热性能的影响。

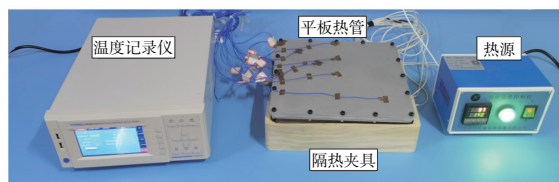


图2 热学性能测试实验台

## 3 实验结果及分析

### 3.1 传热性能的实验研究

分别对金属板、平板热管(无工质)、平板热管(饱和工质)进行热学性能测试,在距离面板中心的不同距离处排列采样点并做出不同时间下蒸发段与冷凝段的温度分布曲线。同时,以10 min以内各采样点温度变化小于0.5℃作为是否达到稳态的判定标准,得出不同实验组样件的稳态时间。

不同加热时间下3组试件的温度分布曲线如图3所示。由图3(a)可知,在不同加热时间下,金属板的热量由加热中心向面板四周扩散,中心处温度最高,且面板内的温差较大。由图3(b)可知,由于未填充工质,热管无法进行相变传热,所以结构主要通过热传导的方式进行传热。同时,夹芯结构的空腔被空气占据,空气作为热的不良导体,使加热端热量无法有效传递到冷却端。因此,加热端中心位置温度较高,整体温差较大,且加热面与冷却面之间温差较大。图3(c)中,当平板热管填充工质后,结构主要通过相变进行传热,传热效率高。因此,相比上述两组对照组,填充工质后的热管蒸发端中心点温度显著降低,并且冷凝端整体温度更低且更加均匀。

### 3.2 影响传热性能的因素分析

#### 1) 充液率影响

实验以水作为工质,放置角度为0°,分别测试不同充液率下热管两段的温度分布状况,如图4所示。由图4(a)和图4(b)可知,当热管充液率分别为30%和150%时,热管仍具有较好的均温性能,不同时间下蒸发段和冷凝段温差较小;但由图4(c)可知,两组的均温性能均不及饱和组。这说明当热管充液率过低时,其内部工质过少,无法充分传递热量,并且当加热功率增大时,热管有发生干涸的风险。而当热管充液率过高时,其内部

工质会在蒸发段处汇集,并形成一层液膜,其会阻碍靠近加热位置处工质的核态沸腾,增加传热热

阻。综上所述,充液率过低或过高都会影响热管的传热性能。

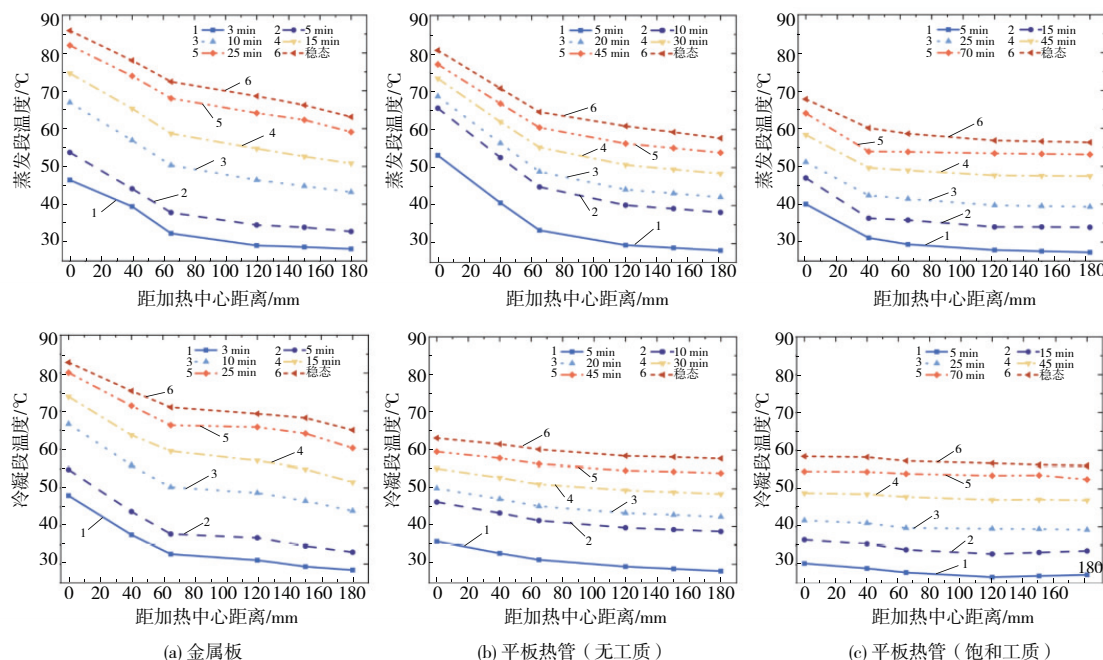


图3 不同时间下3组试验件蒸发段与冷凝段温度变化曲线

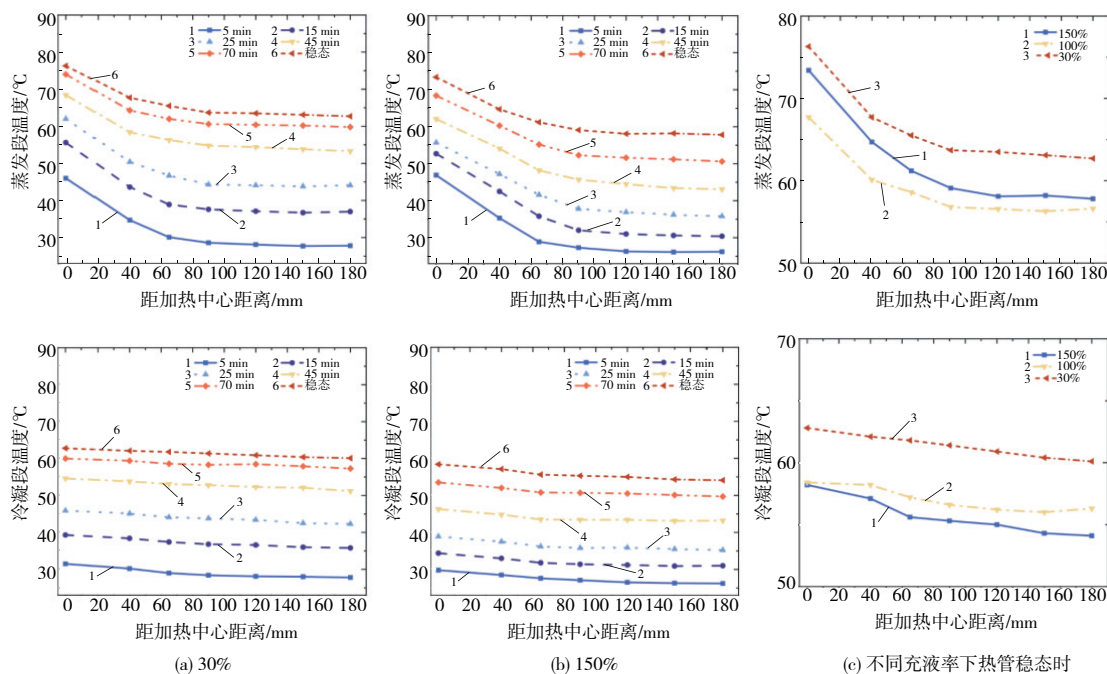


图4 不同时间、不同充液率下热管蒸发段与冷凝段温度分布曲线

## 2) 重力影响

本组实验以去离子水作为工质,充液率选为100%,分别取放置角度为0°、90°、180°,如图5所示。其中0°代表重力方向与液体工质从冷凝段回流至蒸发段方向一致。由图5(a)和图5(b)可知,当角度为180°和90°时,二者在冷凝段温度分

布较为均匀,但蒸发段温差较大。由图5(c)分析可知,当放置角度为0°时,热管蒸发段整体平均温度最低且温差最小。综上,在布置热管时应将热管中液体工质的回流方向调整至与重力方向一致,使工质可以借助重力完成循环过程。

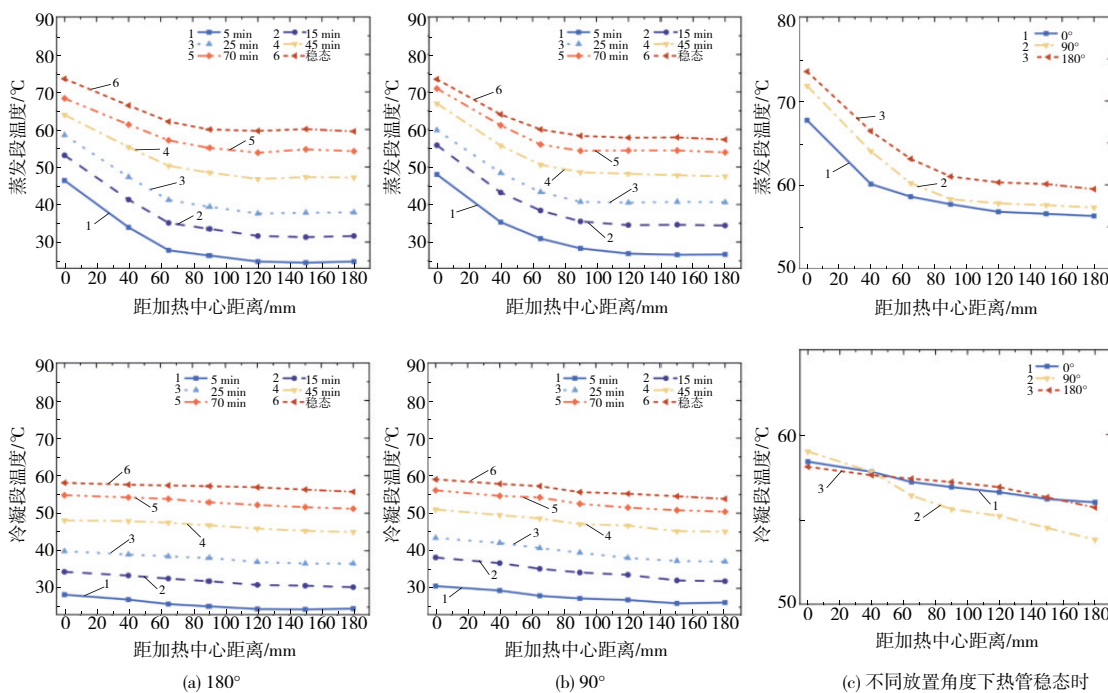


图5 不同时间、不同放置角度下热管蒸发段与冷凝段温度分布曲线

### 3) 工质影响

选择乙醇和去离子水作为热管工质,并且充液率为100%,热管放置角度为0°。如图6所示,乙醇组热管冷凝段温度分布较为均匀,但蒸发段温差较大。由图7可知,在两组达到稳态时,以乙醇作为工质的热管,其蒸发段和冷凝段的温度均高于以去离子水作为工质的热管,并且两段温差也大于去离子水组。原因在于热管内部主要通过相变传热的方式进行热量传递,相比于乙醇,去离子水具有更大的相变潜热及表面张力,这使得去离子水可以以更少的流量传递更多的热量,并且在多孔毛细芯内产生更大的毛细力。

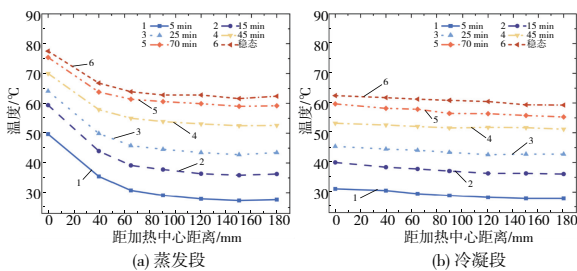


图6 不同时间下,以乙醇为工质的热管温度分布曲线

## 4 结语

1) 设计了一种集承载和热防护于一体的平板热管结构。

2) 使用6061铝合金作为壳体结构,开孔泡沫镍作为毛细芯,去离子水作为热管工质,制备了平

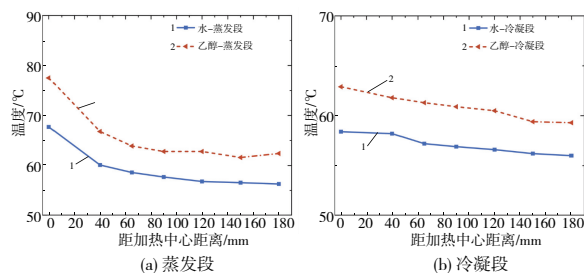


图7 不同工质种类时,热管温度分布曲线

板热管试件,并搭建了热学性能测试平台,以验证设计方案的可行性。

3) 设计两组对照实验,并测量了系统的热响应,实验数据验证了结构散热性能的优越性。

4) 通过对照实验,分析了充液率、工质种类及重力对热管传热性能的影响。结果表明,为实现更好的传热效果,重力方向应与液体工质回流方向一致,并且应选择传输品质因数大的工质及合适的充液率。

## 参考文献:

- [1] ANDERSON J D Jr. Hypersonic and high-temperature gas dynamics, second edition [M]. Reston, VA: AIAA, 2006.
- [2] KASEN S D, WADLEY H N G. Heat pipe thermal management at hypersonic vehicle leading edges: a low-temperature model study[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2019, 11(6): 061001.

(下转第26页)

mS/m 左右时彻底更换工作液。

3)进行了榫槽加工的可行性验证,榫槽中部(10 mm 高度处)的重铸层厚度较顶部和底部重铸层厚度更大,与基础试验数据基本吻合。

### 参考文献:

- [1] SHARMA P, CHAKRADHAR D, NARENDRANATH S. Precision manufacturing of turbine wheel slots by trim-offset approach of WEDM[J]. Precision Engineering, 2021, 71:293-303.
- [2] KLOCKE F, WELLING D, KLINK A, et al. Evaluation of advanced wire-EDM capabilities for the manufacture of fir tree slots in inconel 718[J]. Procedia CIRP, 2014, 14:430-435.
- [3] LI L, GUO Y B, WEI X T, et al. Surface integrity characteristics in wire-EDM of inconel 718 at different discharge energy[J]. Procedia CIRP, 2013, 6:220-225.
- [4] 蒲一民. 涡轮盘榫槽线切割加工工艺研究[J]. 航天制造技术, 2016(2):37-40, 70.
- [5] 于建华, 李勋, 丁志纯. 涡轮盘榫槽加工工艺及变形控制方法研究[J]. 制造技术与机床, 2022(11): 144-149.
- [6] GOHIL V, PURI Y M. Optimization of electrical discharge turning process using taguchi-grey relational approach[J]. Procedia CIRP, 2018, 68:70-75.
- [7] 马长进. ZrB<sub>2</sub>-SiC 陶瓷电火花单脉冲放电蚀除凹坑仿真与加工试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [8] 唐佳静. 基于热-流耦合分析的电火花加工材料蚀除及表面质量研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [9] WANG J, HAN F Z. Simulation model of debris and bubble movement in consecutive-pulse discharge of electrical discharge machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 77:56-65.
- [10] 严东剑, 刘志东, 潘红伟, 等. 基于空载率检测的聚晶金刚石复合片电火花线切割加工研究[J]. 电加工与模具, 2023(2):23-27.
- [11] 刘志东. 高速走丝电火花线切割工作介质性能要求研究[J]. 航空精密制造技术, 2006, 42(6):29-32.

收稿日期:2023-11-14

(上接第 20 页)

- [3] CHEN T F, CHENG S, JIN L Z, et al. Fabrication process and mechanical properties of C/SiC corrugated core sandwich panel[J]. Ceramics International, 2021, 47(3):3634-3642.
- [4] LIN K J, HU K M, GU D D. Metallic integrated thermal protection structures inspired by the Norway spruce stem: design, numerical simulation and selective laser melting fabrication[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 115:9-19.
- [5] QUEHEILLALT D T, CARBAJAL G, PETERSON G P, et al. A multifunctional heat pipe sandwich panel structure[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(1/2):312-326.
- [6] DHARMASENA K P, WADLEY H N G, XUE Z Y, et al. Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(9):1063-1074.
- [7] CARBAJAL G, SOBHAN C B, PETERSON G P, et al. A quasi-3D analysis of the thermal performance of a flat heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(21/22):4286-4296.
- [8] CARBAJAL G, SOBHAN C B, PETERSON G P, et al. Thermal response of a flat heat pipe sandwich structure to a localized heat flux[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(21/22):4070-4081.
- [9] 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.
- [10] KASEN S D, QUEHEILLALT D T, STEEVES C A, et al. A heat plate leading edge for hypersonic vehicles[C]//Volume 1: Advances in Aerospace Technology. Boston, Massachusetts, USA: ASME/EDC, 2008:175-181.
- [11] UAN Y, HONG Y, LI Q. Investigation on transient behaviors of flat plate heat pipes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2004, 28(2):249-255.
- [12] 张平, 宣益民, 李强. 界面接触热阻的研究进展[J]. 化工学报, 2012, 63(2):335-349.
- [13] 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, 14.
- [14] 曹杰. 平板热管制造及其传热性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2019.
- [15] 孙健. 高超声速飞行器前缘疏导式热防护结构的工作机理研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [16] 刘洪鹏. 高速飞行器翼面气动热疏导的层板式热管机理研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- [17] 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.
- [18] 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.

收稿日期:2023-10-31