

# 反蛋白石吸液芯均热板传热特性实验研究

李亚楠<sup>1</sup>, 王春玲<sup>1</sup>, 石亚雯<sup>2</sup>, 齐润生<sup>1</sup>, 李增耀<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安;  
2. 西安交通大学环境与疾病相关基因教育部重点实验室, 710061, 西安)

**摘要:** 针对传统均热板孔径单一及孔道不规则的吸液芯难以兼顾毛细压力和渗透率,从而导致高热流密度下蒸发段液体供应能力不足,进而限制均热板传热极限的问题,将有序微纳面心立方多孔结构引入热管散热领域,制备了一种以超亲水铜反蛋白石多孔结构为吸液芯的均热板。首先,以自组装蛋白石结构为模板,采用电化学沉积法制备有序面心立方反蛋白石,并将其独特的大连通孔及小烧结颈相耦合,得到高毛细压力和高渗透率的多孔结构;然后,采用超疏水微纳铜作为冷凝段表面,实现了高传热系数珠状凝结和跳滴回液;最后,封装蒸发段、冷凝段并抽真空、充液,制备得到均热板。采用自主搭建的测试系统对所制备均热板的传热特性开展实验研究,结果表明:该均热板在以去离子水为工质、充液率 50% 的条件下,散热能力大于  $244 \text{ W/cm}^2$ ,最低总热阻为  $0.145 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ,最低均温热阻为  $0.026 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ,相较于传统均热板,传热极限更高。该研究揭示了有序多孔结构在提升均热板传热极限中的关键作用,为更高热流密度的电子器件散热提供了极具潜力的解决方案。

**关键词:** 均热板;反蛋白石吸液芯;传热极限;热阻

**中图分类号:** TK172 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202604017 **文章编号:** 0253-987X(2026)04-0210-08

## Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Vapor Chambers with Inverse Opal Wick Structures

LI Yanan<sup>1</sup>, WANG Chunling<sup>1</sup>, SHI Yawen<sup>2</sup>, QI Runsheng<sup>1</sup>, LI Zengyao<sup>1</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;  
2. MOE Key Laboratory of Environment and Genes Related to Diseases, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** To address the issue of insufficient liquid supply in the evaporation section under high heat flux in traditional vapor chambers, caused by the difficulty in simultaneously achieving high capillary pressure and high permeability due to the single pore size and irregular channels of conventional wicks, an ordered micro/nano face-centered cubic porous structure is introduced into the field of heat pipe cooling. A vapor chamber utilizing a superhydrophilic copper inverse opal porous structure as the wick was fabricated. Firstly, an ordered face-centered cubic inverse opal structure was prepared via electrochemical deposition using a self-assembled opal template. The coupling of its large interconnected pores and small sintered necks resulted in a porous structure with high capillary pressure and high permeability. Subsequently, superhydrophobic micro/nano-

structured copper was employed as the condenser surface to achieve dropwise condensation with high heat transfer coefficients and jumping-droplet liquid return. Finally, the vapor chamber was assembled by sealing the evaporator and condenser sections, followed by evacuation and liquid filling. Experimental studies on the heat transfer characteristics of the fabricated vapor chamber were conducted using a custom-built testing system. The results indicate that, with deionized water as the working fluid at a 50% filling ratio, the vapor chamber exhibits a heat dissipation capacity greater than  $244 \text{ W/cm}^2$ , a minimum total thermal resistance of  $0.145 \text{ }^\circ\text{C/W}$ , and a minimum thermal uniformity resistance of  $0.026 \text{ }^\circ\text{C/W}$ , demonstrating a higher heat transfer limit compared to conventional vapor chambers. This study reveals the critical role of ordered porous structures in enhancing the heat transfer limit of vapor chambers, providing a promising solution for thermal management of electronic devices with higher heat flux.

**Keywords:** vapor chamber; inverse opal capillary wick; heat transfer limit; thermal resistance

近年来,随着电子器件向高集成化、高性能、小尺寸发展,局部“热点”最大热流密度可达  $200 \text{ W/cm}^2$ , 散热和温控已成为亟待解决的瓶颈问题<sup>[1-2]</sup>。两相换热系统利用工质相变潜热实现高效换热,已成为解决电子设备散热、提升元器件寿命和工作可靠性的核心技术手段<sup>[3-5]</sup>。

与传统热管的一维传热相比,均热板具有更强的热扩散能力和更优良的温度均匀性<sup>[6]</sup>。传热热阻、均温性能和传热极限是评价均热板传热性能的关键指标,吸液芯是决定均热板传热性能的关键因素。如图1所示,作为一种多孔结构,吸液芯能够产生毛细压力,驱动冷凝液体回流到蒸发段,同时有效地将液体扩散到蒸发段的各个蒸发/沸腾位点<sup>[7-8]</sup>。当吸液芯产生的毛细压力无法驱动足够的冷凝液回流时,就会导致蒸发段吸液芯的局部蒸干及更进一步的全部蒸干,此时均热板内相变停止,冷却和均温功能失效。为实现较高的传热极限,吸液芯应具有高的毛细压力和高渗透率。传统的吸液芯结构包含烧结粉末型吸液芯、沟槽型吸液芯、丝网型吸液芯等。烧结粉末吸液芯一般具有较高的毛细力,但其渗透率较低;沟槽吸液芯的渗透率较高,但毛细力很小;丝网型吸液芯的渗透率和毛细力则介于上述两者之间<sup>[9-12]</sup>。在特定的吸液芯结构中,渗透率和毛

细压力存在相互竞争关系。一般来说,毛细压力随着多孔吸液芯孔隙率的降低和有效孔径的减小而增加,但此时渗透率降低<sup>[7]</sup>。

随着微纳加工和表面改性技术不断取得新进展,构建并定量调控微纳尺度多孔结构吸液芯以实现高效相变传热已逐渐成为强化均热板传热性能的又一重要方向。Cai等<sup>[13]</sup>通过在硅均热板的蒸发段表面加工直径为  $10 \text{ }\mu\text{m}$  圆微柱阵列来产生较高的毛细压力,在冷凝段表面采用边长为  $200 \text{ }\mu\text{m}$  的方微柱阵列吸液芯来提供较高的渗透率,并结合微沟槽作为支撑结构和提供额外的毛细压力。其研究表明,当采用乙醇作为工作流体、散热量为  $10 \text{ W}$  时,等效热导率最高,可达  $2500 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。Nam等<sup>[14]</sup>通过毛细率上升实验探究了超亲水铜微柱阵列的毛细能力,结果表明:在几乎不影响渗透率的情况下,表面改性纳米结构显著提高了微柱阵列的芯吸性能。Yang等<sup>[15]</sup>通过微机电技术,制备了微针肋和微针肋阵列来强化直角微沟槽的毛细性能,结果表明:该均热板具有良好的传热性能,且含有微针肋阵列的均热板能够在反重力情况下正常运行。Zeng等<sup>[16-17]</sup>在V型微沟槽内加工中心空腔,提升了吸液芯的毛细压力,同时提供了更多的沸腾核化点,从而在低热流密度条件下即可诱导核态沸腾,提高了均热板的传热效率和极限。Luo等<sup>[18]</sup>设计了一种具有仿生铜森林吸液芯的超薄均热板,通过简单的一步电沉积法,制备了具有 $\Omega$ 形微通道森林状的吸液芯。与烧结吸液芯相比,该新型吸液芯具有良好的芯吸性能,使得该均热板具有优良的等效热导率和温度均匀性。Sun等<sup>[19]</sup>测试了一种以超疏水表面代替有芯表面作为冷凝段的均热板,蒸汽可在超疏水表面珠状冷凝并回流。与铜板和传统均热板相

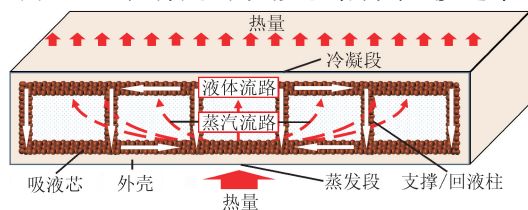


图1 典型的均热板结构和工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of typical vapor chamber structure and working principle

比,该均热板具有更低的总热阻及更优异的均温性。

上述研究表明,微纳尺度多孔结构具有更小的孔径,能够产生更高的毛细压力;而规则排列的孔道结构有助于降低迂曲度,提高渗透率。因此,微纳尺度规则多孔结构有望进一步强化均热板的传热性能。反蛋白石结构作为一种孔洞周期排列的多孔材料,兼具微纳尺度和高度结构规整的特性,其有序的面心立方多孔结构有望打破传统吸液芯毛细性能在渗透率和毛细力之间的权衡限制,从而提高均热板的传热极限。Zhang 等<sup>[20]</sup>将铜反蛋白石吸液芯应用于强化毛细驱动沸腾,通过调控相邻孔颈尺寸,使得  $2.00\text{ mm} \times 0.27\text{ mm}$  加热区域上的热流密度高达  $1\,100\text{ W/cm}^2$ 。Fan 等<sup>[21]</sup>在随机多孔铜表面覆盖反蛋白石结构作为均热板吸液芯,经亲水处理后可实现高达  $208\text{ W/cm}^2$  的热流密度热管理能力。

为进一步探究反蛋白石结构作为吸液芯的均热板传热特性,本文采用超亲水铜反蛋白石结构作为吸液芯,以强化蒸发及液体回流,并将超疏水微纳铜作为冷凝表面,实现了高效的珠状凝结和自发的跳滴回液。研究表明,所制备的均热板具有优异的传热和均温性能。

## 1 均热板制备过程

### 1.1 蒸发段表面改性反蛋白石结构

通过在粒径为  $5\text{ }\mu\text{m}$  的聚苯乙烯(PS)微球组成的模板孔隙中电沉积铜,制备反蛋白石吸液芯。吸液芯制备流程分为微球沉积、模板烧结、铜质电镀、模板溶解 4 个步骤,如图 2 所示。

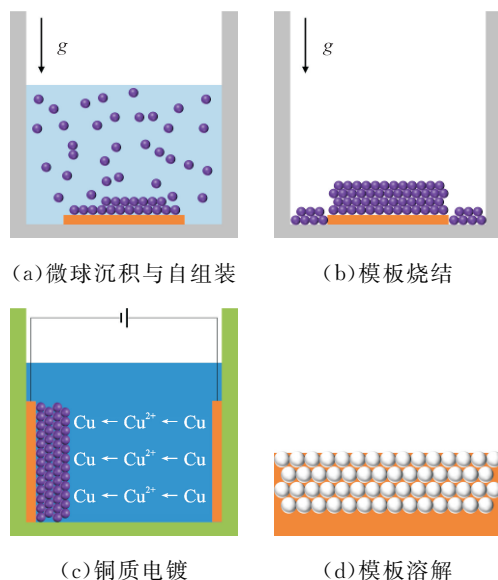


图2 反蛋白石结构制备流程

Fig. 2 Fabrication process of inverse opal structure

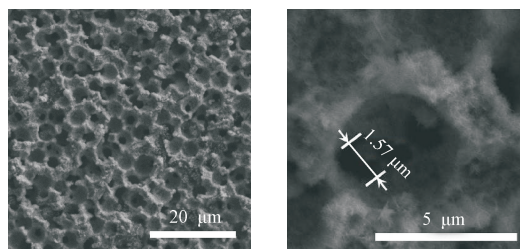
**步骤1** 微球的沉积与自组装。制备聚苯乙烯微球/水悬浊液并进行超声乳化,使得微球均匀分散。移取悬浊液滴覆到蒸发段铜板表面,在鼓风干燥箱内干燥,使得悬浊液内的水分蒸发。在此过程中,微球在毛细力、布朗力、重力( $g$ )和浮力的共同作用下,自组装为面心立方结构即蛋白石结构。

**步骤2** 模板烧结。待水分全部蒸发后,将含有蛋白石结构的铜板取出,放入真空干燥箱内进行烧结。保温  $90\text{ min}$  后关闭加热,对样件进行退火处理即随箱冷却至室温。

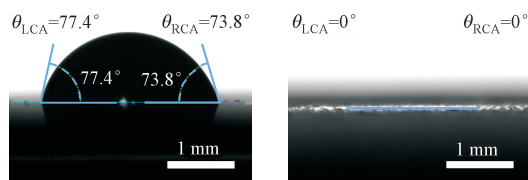
**步骤3** 铜质电镀。将硫酸铜( $\text{CuSO}_4$ )和硫酸( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )混合溶液作为电镀液,程控直流电源作为电镀电源,待镀的样件连接电源负极作为阴极,粗铜连接电源正极作为阳极,铂电极分别作为工作电极和对电极。电镀过程持续  $120\text{ min}$ ,形成厚度为  $100\text{ }\mu\text{m}$  的镀层。

**步骤4** 模板溶解。将样件置入丙酮中放置  $48\text{ h}$  以溶解聚苯乙烯(PS)模板,待溶解完全后,分别采用丙酮、乙醇和去离子水浸泡  $30\text{ min}$ ,得到铜反蛋白石结构。

由于水在光滑铜表面的接触角约为  $90^\circ$ ,为提高铜反蛋白石结构对水的润湿性,需对其进行表面改性处理。将样件置入氢氧化钠( $\text{NaOH}$ )和过硫酸铵( $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ )溶液中,在水浴加热条件下反应  $30\text{ min}$ ,待反应完成后,在结构表面覆盖薄层氧化铜( $\text{CuO}$ )纳米结构。图 3(a)~3(b)给出了所制备表面改性铜反蛋白石结构的微观形貌。很明显,该结构是一种相对有序的多孔铜结构,由于是微球模板的负模,因此具有双孔径的特点,即大孔为微球的粒径,为  $5.00\text{ }\mu\text{m}$ ,小孔为烧结颈的尺寸,约为  $1.57\text{ }\mu\text{m}$ 。同时,刻蚀过程在反蛋白石结构表面形成了纳米草结构,能够有效增加结构表面粗糙度,提高了亲水表面的润湿性能。为表征其润湿性,采用座滴法测量左侧接触角  $\theta_{\text{LCA}}$  和右侧接触角  $\theta_{\text{RCA}}$ ,测量过程中液滴的体积为  $2\text{ }\mu\text{L}$ 。铜反蛋白石结构改性前,液滴钉扎在表面无扩散,改性后液滴迅速被吸收并扩散成薄膜,如图 3(c)~3(d)所示。



(a) 反蛋白石表面形貌 (b) 双孔径及纳米草结构



(c)未改性接触角

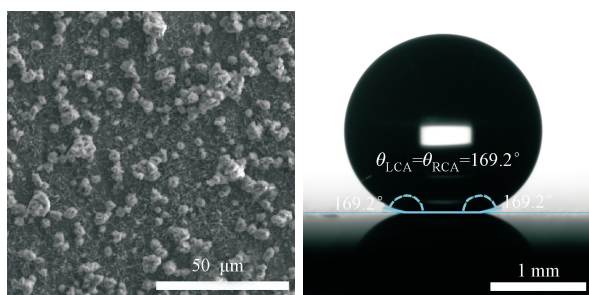
(d)改性接触角

图3 表面改性反蛋白石的结构形貌及润湿特征

Fig. 3 Structural morphology and wettability characteristics of surface modified inverse opal

### 1.2 冷凝段表面超疏水改性

为了实现蒸汽在超疏水表面的珠状凝结和自发射离<sup>[22]</sup>,通过化学刻蚀及表面改性制备超疏水表面。首先,将清洗后的铜板放置于 NaOH 和  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$  混合溶液中,在水浴加热条件下刻蚀 8 min,取出后用去离子水冲洗刻蚀液体。然后,将铜板在鼓风干燥箱中继续氧化 1 h,冷却后放入 1-十二烷基硫醇/乙醇溶液中浸泡 15 min。最后,将铜板在真空干燥箱中干燥 120 min,即可得到所需的超疏水表面。如图 4(a)所示,刻蚀在光滑铜表面形成了微米花和纳米草结构。由于超疏水表面的超低黏附性,采用体积为  $4\text{ }\mu\text{L}$  的液滴进行接触角测量,如图 4(b)所示。测量结果表明,液滴在超疏水表面形成的接触角为  $169.2^\circ$ 。



(a)表面形貌

(b)表面接触角

图4 超疏水表面的结构形貌和润湿特征

Fig. 4 Structural morphology and wettability characteristics of superhydrophobic surfaces

### 1.3 均热板制备

为保证均热板具有良好稳定的结构强度,同时为方便加工抽真空充液系统,采用两块厚度为 3 mm、有效吸液芯截面尺寸为  $45\text{ mm}\times 80\text{ mm}$  的铜板作为壳体,将超亲水反蛋白石结构及超疏水微纳表面加工到铜板内表面,分别作为蒸发段和冷凝段,如图 5 所示。将上述两块铜板与厚度为 1 mm 的铜框通过螺栓连接形成三明治结构,并用 Torr Seal 真空密封胶实现良好密封,形成均热板腔体。冷凝段两端引

出外直径为 3 mm、内直径为 2 mm 的不锈钢管,分别与卡套阀门连接,其中三头球阀的一端连接注射器和真空泵,两头球阀的一端连接压力计,以实现注液、抽真空和封装。在去离子水为工质、充液率为 50% 的工况下开展传热性能研究,其中充液率定义为充液体积与均热板空腔总体积之比。

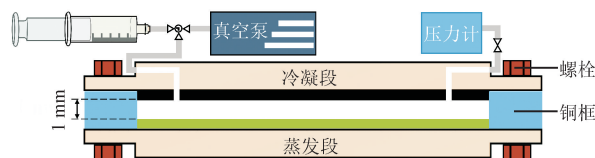


图5 均热板制备装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of vapor chamber manufacturing device

## 2 实验测试系统与方法

### 2.1 实验测试系统

如图 6 所示,将均热板固定在加热器和水冷板之间,采用装有 4 只筒式电阻加热器的加热段将热量传导至蒸发段底面中心,加热段横截面是直径为 10 mm 的圆。均热板冷凝段上表面与铝制水冷块连接,并通过螺栓压紧。为了减小接触热阻,层间涂有导热系数为  $6.500\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  的导热硅脂。上述设备均采用导热系数为  $0.240\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  的聚四氟乙烯 (PTFE) 和  $0.044\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  的硅酸铝进行包覆,以减小漏热损失。经数值模拟评估,通过加热段的热量有超过 99% 传给了均热板,并进一步通过水冷块循环冷却水带走,仅有不到 1% 的热量散给外部环境,证实了该测试系统的可靠性。

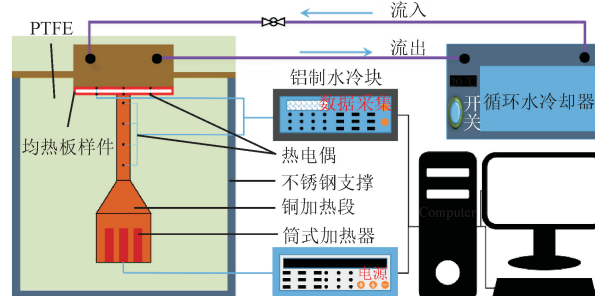


图6 均热板测试实验系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of vapor chamber experimental system

为准确采集实验过程中的温度数据,采用 21 根直径为 0.13 mm 的 K 型热电偶组成温度测量系统,如图 7 所示。通过傅里叶导热定律计算热流密度和

热流量, 3 支热电偶 TC1~TC3 被固定在加热段圆柱的中心, 每支间隔为 5 mm。将计算得到的热流量与程控电源的输出功率进行比较, 发现偏差约为 13.3% 且几乎保持不变。TC4~TC12 和 TC13~TC21 分别布置在蒸发段和冷凝段。为准确定位热电偶, 在蒸发段和冷凝段对应位置加工微小孔, 将热电偶插入孔内并通过胶水固定后, 采用导热硅脂填充孔隙。之后, 将组装好的样件夹持在加热柱与水冷块之间, 开启电阻加热器和循环水冷系统进行实验。

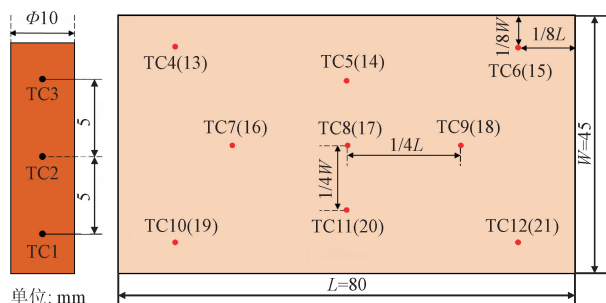


Fig. 7 Schematic diagram of temperature measurement system and thermocouple array

## 2.2 数据处理与误差分析

均热板的热阻分为传热热阻  $R$  和均温热阻  $R_{\text{TU}}$ , 传热热阻又包括扩散热阻  $R_{\text{ES}}$ 、一维热阻  $R_{1\text{D}}$  和总热阻  $R_{\text{VC}}$ , 计算式分别如下

$$R_{\text{ES}} = \frac{T_{\text{E-max}} - T_{\text{E-avg}}}{Q} \quad (1)$$

$$R_{1D} = \frac{T_{E\_avg} - T_{C\_avg}}{Q} \quad (2)$$

$$R_{\text{vc}} = \frac{T_{\text{E\_max}} - T_{\text{C\_avg}}}{Q} \quad (3)$$

$$R_{\text{TU}} = \frac{T_{\text{C\_max}} - T_{\text{C\_min}}}{Q} \quad (4)$$

$$Q = -\lambda A_h \frac{T_{c1} - T_{c3}}{2l} \quad (5)$$

式中:  $T_{E\max}$ 、 $T_{E\text{avg}}$  分别为蒸发段最高温度和平均温度;  $T_{C\max}$ 、 $T_{C\min}$ 、 $T_{C\text{avg}}$  分别为冷凝段表面最高温度、最低温度和平均温度;  $Q$  为根据傅里叶导热定律计算得到的热流量;  $l$  为加热段相邻热电偶的间距;  $A_h$  为加热段的横截面积;  $\lambda$  为铜的导热系数;  $T_{C1}$ 、 $T_{C3}$  分别为加热段 TC1 和 TC3 热电偶测量得到的温度。

实验误差主要来源于热电偶测温误差。本文所采用 K 型热电偶的测量精度为  $\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据误差传递公式,假设任意一个因变量  $f$  可写为自变量  $x, y, z, \dots$  的函数,即  $f = f(x, y, z, \dots)$ ,则  $f$  的不确定度  $u_f$  可通过每个自变量测量值的不确定度计算

得到, 即

$$u_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 u_x + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 u_y + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 u_z + \dots} \quad (6)$$

式中： $u_x$ 、 $u_y$ 、 $u_z$  分别为自变量  $x$ 、 $y$ 、 $z$  的不确定度。

根据式(6),计算得到本文中各关键物理量的不确定度,如表1所示。

Table 1 Uncertainty of key physical quantities

| 物理量             | 不确定度/% |
|-----------------|--------|
| $Q$             | 0.310  |
| $R_{\text{TU}}$ | 11.500 |
| $R_{\text{ES}}$ | 3.350  |
| $R_{\text{ID}}$ | 0.770  |
| $R_{\text{VC}}$ | 2.860  |

### 3 结果与讨论

整个测试过程中,水冷系统的循环冷却水温度均为  $20.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,流量均为  $13.4\text{ L/min}$ 。热流密度从  $20\text{ W/cm}^2$  阶梯上升,直到监测温度达到测试系统最大耐温,或均热板达到临界热流密度。当电源最大功率为  $220\text{ W}$  时,聚四氟乙烯达到最大耐热温度  $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,此时停止加热。

### 3.1 综合性能评估

表 2 和图 8 分别展示了本文制备的均热板与其他结构均热板<sup>[19,23-27]</sup>的结构和性能对比。可以看出,本文制备的以超亲水反蛋白石结构作为蒸发段吸液芯、以超疏水微纳结构作为冷凝段表面的均热板,在中、高热流密度区间均展现出较低的热阻水平,尤其是在高热流密度工况下,仍能保持稳定的传热性能,相较于其他传统均热板,传热极限更高。

Table 2 Structural comparison of the vapor chamber prepared in this paper with other thermal spreaders

| 均热板    | 蒸发段结构     | 冷凝段结构     |
|--------|-----------|-----------|
| 本文     | 超亲水铜反蛋白石  | 超疏水铜      |
| 文献[23] | 烧结铜粉      | 烧结铜粉      |
| 文献[19] | 双粒径烧结铜粉   | 超疏水铜      |
| 文献[25] | 泡沫铜       | 泡沫铜       |
| 文献[26] | 烧结铜粉复合吸液芯 | 烧结铜粉复合吸液芯 |
| 文献[27] | 沟槽丝网复合吸液芯 | 沟槽丝网复合吸液芯 |
| 文献[24] | 压缩泡沫铜     | 泡沫铜       |

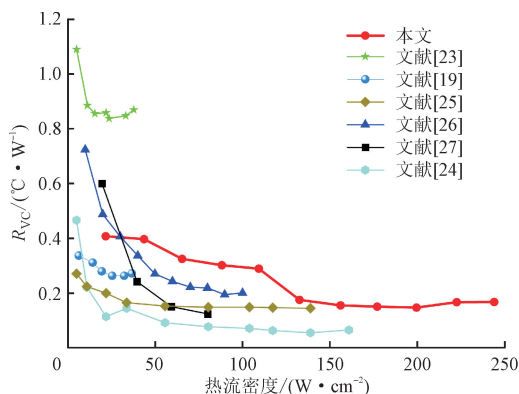
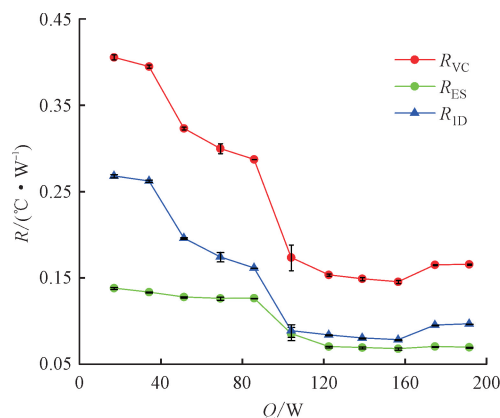


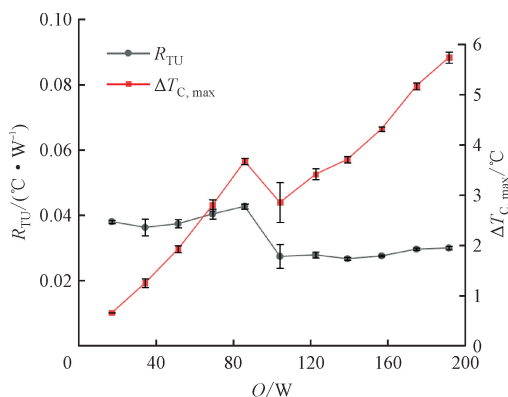
图8 本文制备的均热板与其他均热板传热性能的对比  
Fig. 8 Comparison of heat transfer performance of the vapor chamber prepared in this paper with other thermal spreaders

### 3.2 传热特性及热阻分析

图9给出了均热板热阻和冷凝面最大温差 $\Delta T_{C,\max}$ 随热流量的变化规律。



(a) 传热热阻



(b) 均温热阻和冷凝面最大温差

图9 均热板热阻和冷凝面最大温差随热流量的变化  
Fig. 9 Variation of vapor chamber thermal resistance and maximum condenser temperature difference with heat flow

由图9(a)可见,扩散热阻、一维热阻和总热阻随着热流量的增加而下降,均在热流量为157 W时

达到最小值,分别为0.067 3、0.077 7、0.145 0  $^\circ\text{C}/\text{W}$ ,在热流量为104 W时呈现阶跃下降。由图9(b)可见,均温热阻在热流量为104 W时呈现阶跃下降,在低于104 W时随着热流量的增加而稍微增加,在高于104 W时几乎保持不变。

均热板传热性能的变化,主要受其内部相变方式在不同热流密度下发生转变的影响。根据热源面最高温度随热流密度的变化规律,可将均热板内工质相变分为蒸发主导阶段、蒸发-沸腾共存阶段和核态沸腾主导3个阶段,如图10所示。其中,纵轴为TC8热电偶测量所得温度 $T_{TC8}$ , $q_{ONB}$ 为从蒸发主导阶段向蒸发-沸腾共存阶段转折的热流密度, $q_B$ 为蒸发-沸腾共存阶段向核态沸腾主导阶段转折的热流密度。

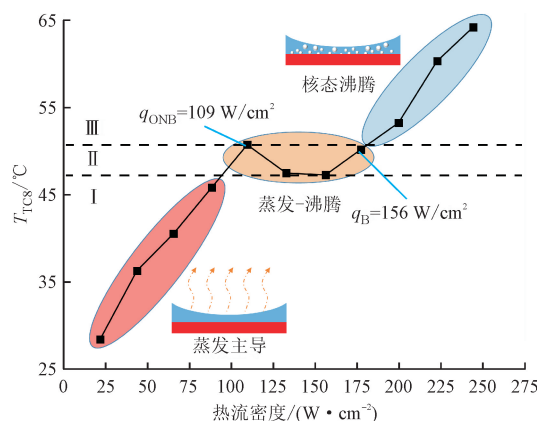


图10 均热板热源面最高温度随热流密度的变化  
Fig. 10 Variation of evaporator peak temperature with heat load

当热流密度小于109  $\text{W}/\text{cm}^2$ ,即图10中I区域,此时均热板腔体内工质相变处于蒸发主导阶段,蒸发热阻较高,均热板传热热阻相对较高。随着热流密度增大,更多的工质参与相变,液膜厚度降低,液膜导热热阻降低,导致均热板传热热阻降低;工质相变的质量流量增加,蒸汽在腔体内的运动速度及压降增加,饱和状态下蒸汽温度下降更多,导致均温热阻缓慢增加。在蒸发主导阶段,铜反蛋白石吸液芯凭借高比表面积和有序三维互联孔道,既能将热量有效地从固体基板传到工质,促进液体相变为蒸汽,又能通过毛细作用促进冷凝液体回流到蒸发段,从而抑制其局部干涸。在这一阶段,热源中心温度随热流密度增大而明显增大。

当热流密度位于109~156  $\text{W}/\text{cm}^2$ 之间,即图10中II区域,由于反蛋白石多孔结构提供大量汽化核心,因此随着热流密度增大,蒸发段温度不断

增大,并在热流密度为  $109 \text{ W/cm}^2$  时达到起沸点,均热板内工质开始核态沸腾,相变模式处于蒸发和沸腾的共存阶段。开始核态沸腾后,沸腾的传热系数远大于蒸发的传热系数,均热板传热热阻显著降低,同时均温热阻降低,这可能是气泡破裂带来动能或者是更广泛的蒸发/沸腾使蒸汽运动距离变短而导致压降降低。此时,热源中心温度随着热流密度的增大不增反降,表明沸腾导致均热板传热系数大幅提高。

当热流密度大于  $156 \text{ W/cm}^2$ ,即图 10 中Ⅲ区域,此时反蛋白石结构的微孔提供了充足的汽化核心,均热板内部沸腾剧烈,相变处于核态沸腾主导地位。随着热流密度增大,被激活的汽化核心数不断增加,沸腾传热系数不断增大,导致均热板传热热阻缓慢减小,均温热阻几乎不再发生变化。

值得指出的是,在本文研究的热流密度范围内,并没有发生吸液芯的局部蒸干或膜态沸腾现象。这表明均热板的传热极限大于  $244 \text{ W/cm}^2$ ,散热能力大于  $191 \text{ W}$ 。

图 11 展示了均热板作为冷却系统时,其温度分布随热流密度的变化规律,其中  $T_{E,\min}$  为蒸发段最低温度。由图可见,在整个测试过程中,蒸发段最高温度  $T_{\max} = 64.10^\circ\text{C}$ ,低于芯片失效温度  $T_{\text{fail}} = 85.00^\circ\text{C}$ 。随着热流密度增大,冷凝段表面最大温差  $\Delta T_{C,\max} = 5.73^\circ\text{C}$ ,相较于蒸发段最大温差  $\Delta T_{E,\max} = 25.50^\circ\text{C}$ ,降低了 77.5%,表明该均热板能够有效地将热量扩散到冷凝段。

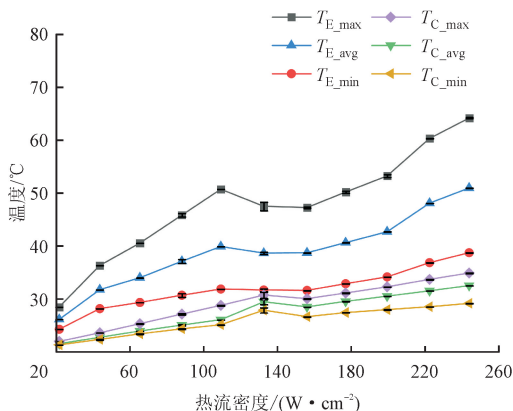


图 11 均热板温度分布随热流密度的变化

Fig. 11 Variation of temperature distribution with heat flux

## 4 结 论

本文设计制备了一种以超亲水铜反蛋白石结构作为蒸发段吸液芯、耦合超疏水铜作为冷凝段表面

的均热板,并对其传热性能开展实验研究,得到如下主要结论。

(1)该均热板在以去离子水为工质、充液率为 50% 的工况下,热流密度超过  $244 \text{ W/cm}^2$ ,最低总热阻为  $0.145^\circ\text{C/W}$ ,散热能力得到增强。与传统采用烧结粉末、铜网或泡沫铜吸液芯的均热板相比,其在保持低热阻的同时显著提升了传热极限。

(2)均热板内部工质相变分为蒸发主导、蒸发-沸腾共存和核态沸腾主导 3 个阶段。随着热流密度增加,反蛋白石结构提供的高比表面积和丰富的气泡成核位点显著促进了沸腾传热,能够保证持续高效的相变传热过程。

(3)该均热板能够有效降低冷凝段温差并抑制蒸发段温升,其冷凝段表面温差较蒸发段降低了 77.5%,在高热流密度工况下仍能将蒸发段最高温度控制在  $64.10^\circ\text{C}$  以内。

## 参考文献:

- [1] 郝俊娇,潘日,周刚,等. 高热流密度电子元件中热管散热技术的进展 [J]. 化工进展, 2015, 34(5): 1220-1224.
- [2] 李聪. 基于不同热负荷的超薄均热板传热传质特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [3] CHEN Gong, TANG Yong, DUAN Longhua, et al. Thermal performance enhancement of micro-grooved aluminum flat plate heat pipes applied in solar collectors [J]. Renewable Energy, 2020, 146: 2234-2242.
- [4] KOUKORAVAS T P, DAMOULAKIS G, MEGARIDIS C M. Experimental investigation of a vapor chamber featuring wettability-patterned surfaces [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 178: 115522.
- [5] HUANG Jiale, ZHOU Wei, XIANG Jianhua, et al. Development of novel flexible heat pipe with multistage design inspired by structure of human spine [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 175: 115392.
- [6] 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.
- [7] EGBO M. A review of the thermal performance of vapor chambers and heat sinks: critical heat flux, thermal resistances, and surface temperatures [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 183(Part B): 122108.

- [8] ZOHURI B. Heat pipe design and technology: modern applications for practical thermal management [M]. 2nd ed. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- [9] XIE Dongdong, SUN Yunna, WANG Guilian, et al. Significant factors affecting heat transfer performance of vapor chamber and strategies to promote it: a critical review [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 175: 121132.
- [10] BULUT M, KANDLIKAR S G, SOZBIR N. A review of vapor chambers [J]. Heat Transfer Engineering, 2019, 40(19): 1551-1573.
- [11] 万意, 闫珂, 董顺, 等. 微型平板热管技术研究综述 [J]. 电子机械工程, 2015, 31(5): 5-10.  
WAN Yi, YAN Ke, DONG Shun, et al. Review on flat micro-heat pipe technology [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2015, 31(5): 5-10.
- [12] 陈恭. 气液共面结构超薄均热板设计制造及其性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [13] CAI Qingjun, CHEN Bingchung, TSAI C. Design, development and tests of high-performance silicon vapor chamber [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22(3): 035009.
- [14] NAM Y, SHARRATT S, BYON C, et al. Fabrication and characterization of the capillary performance of superhydrophilic Cu micropost arrays [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2010, 19(3): 581-588.
- [15] YANG K S, LIN Chenchuan, SHYU J C, et al. Performance and two-phase flow pattern for micro flat heat pipes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 77: 1115-1123.
- [16] ZENG Jian, LIN Lang, TANG Yong, et al. Fabrication and capillary characterization of micro-grooved wicks with reentrant cavity array [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 104: 918-929.
- [17] ZENG Jian, ZHANG Shiwei, CHEN Gong, et al. Experimental investigation on thermal performance of aluminum vapor chamber using micro-grooved wick with reentrant cavity array [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 185-194.
- [18] LUO Jiali, MO Dongchuan, WANG Yaqiao, et al. Biomimetic copper forest wick enables high thermal conductivity ultrathin heat pipe [J]. ACS Nano, 2021, 15(4): 6614-6621.
- [19] SUN Zhen, CHEN Xiaodan, QIU Huihe. Experimental investigation of a novel asymmetric heat spreader with nanostructure surfaces [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 52: 197-204.
- [20] ZHANG Chi, PALKO J W, BARAKO M T, et al. Enhanced capillary-fed boiling in copper inverse opals via template sintering [J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(41): 1803689.
- [21] FAN Desong, FANG Jun, TONG Wenyi, et al. An inverse opal complex wick for high-performance ultrathin heat pipes [J]. Cell Reports Physical Science, 2024, 5(9): 102156.
- [22] BOREYKO J B, CHEN Chuanhua. Self-propelled dropwise condensate on superhydrophobic surfaces [J]. Physical Review Letters, 2009, 103(18): 184501.
- [23] TSAI M C, KANG S W, VIEIRA DE PAIVA K. Experimental studies of thermal resistance in a vapor chamber heat spreader [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 56(1/2): 38-44.
- [24] JI Xianbing, LI Hongchuan, XU Jinliang, et al. Integrated flat heat pipe with a porous network wick for high-heat-flux electronic devices [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 85: 119-131.
- [25] JI Xianbing, XU Jinliang, ABANDA A M. Copper foam based vapor chamber for high heat flux dissipation [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 40: 93-102.
- [26] LI Ji, LV Lucang. Experimental studies on a novel thin flat heat pipe heat spreader [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 139-146.
- [27] HSIEH J C, HUANG H J, SHEN S C. Experimental study of microrectangular groove structure covered with multi mesh layers on performance of flat plate heat pipe for LED lighting module [J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52(6): 1071-1079.

(编辑 李慧敏)