

QIAO Tong, TANG Kai, GUO Yuandong, HUANG Jinyin, LIU Jinlong, HUANG Yilong, MIAO Jianyin, LIN Guiping. Experimental Study of a Manifold Pin-fin Diamond Heat Sink for High Heat Flux Chips (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(2): 449–457. CSTR:32142.14.cjss.2024-0176. DOI:10.11728/cjss2025.02.2024-0176

基于高热流密度芯片的金刚石歧管针翅散热器传热特性实验研究*

乔 通¹ 汤 凯¹ 郭元东¹ 黄金印² 刘金龙³
黄亦龙⁴ 苗建印² 林贵平^{5,1}

1(北京航空航天大学航空科学与工程学院 人机工效与环境控制重点学科实验室 北京 100191)

2(北京空间飞行器总体设计部 航天器热控全国重点实验室 北京 100094)

3(北京科技大学新材料技术研究院 北京 100083)

4(南京国博电子股份有限公司 南京 211106)

5(杭州市北京航空航天大学国际创新研究院 (北京航空航天大学国际创新学院) 杭州 311115)

摘 要 微通道散热器是解决高热流密度功率器件的散热难题的有效手段之一, 本文设计并制造了一种适用于高热流散热的金刚石歧管针翅微通道散热器. 利用热测试芯片作为模拟热源, 研究了该散热器在基于氨工质的泵驱两相回路中的热工性能. 在 $1510 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的局部热流下, 芯片热源表面温度为 102.5°C , 热阻为 $0.151 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$, 压降为 1.1 kPa . 研究了进口温度、热流密度、质量流量对散热器热阻和压降的影响, 发现在较高的进口温度条件下散热器的热阻最小. 保持各种工作参数一致, 与铜材质的扩缩流道歧管微通道散热器进行对比, 在 $710 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 热流条件下, 金刚石歧管针翅微通道散热器的热阻降低 33.32% , 压降降低 23.88% .

关键词 金刚石, 歧管针翅散热器, 流动沸腾, 氨, 高热流

中图分类号 V443.6

Experimental Study of a Manifold Pin-fin Diamond Heat Sink for High Heat Flux Chips

QIAO Tong¹ TANG Kai¹ GUO Yuandong¹ HUANG Jinyin²
LIU Jinlong³ HUANG Yilong⁴ MIAO Jianyin² LIN Guiping^{5,1}

1(Laboratory of Fundamental Science on Ergonomics and Environmental Control, School of Aeronautical Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

2(National Key Laboratory of Spacecraft Thermal Control, Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094)

* 国家自然科学基金项目 (52472443), 中国科协青年人才托举工程项目 (2023QNRC001) 和航天器热控技术全国重点实验室开放基金项目 (NKLST-JJ-202401007) 共同资助

2024-11-30 收到原稿, 2025-03-10 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

3(Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

4(Guobo Electronics Co., Ltd., Nanjing 211106)

5(Hangzhou International Innovation Institute of Beihang University, Hangzhou 311115)

Abstract A manifold pin-fin microchannel diamond heat sink for high heat flux chips was designed and fabricated. Thermal performance of the heat sink in a pump-driven two-phase ammonia loop was investigated using a thermal test chip as a simulated heat source. Chip surface temperature of 102.5°C with thermal resistance of 0.151 K·W⁻¹ and pressure drop of 1.1 kPa under localized heat flow of 1510 W·cm⁻² were obtained. The effects of inlet temperature, heat flux, and mass flow rate on thermal resistance and pressure drop of the heat sink were investigated, and it was found that the thermal resistance of the heat sink was minimized under higher inlet temperature conditions. Keeping all the other operating parameters consistent, the thermal resistance of the diamond manifold pin-fin microchannel radiator was 33.32% smaller and the pressure drop was 23.88% lower under 710 W·cm⁻² heat flow conditions when compared with the expanded and contracted manifold microchannel radiator made of copper.

Key words Diamond, Manifold pin-fin heatsink, Flow boiling, Ammonia, High heat flux

0 引言

电子器件尺寸的不断缩小和功率密度的不断提高, 导致其在散热方面的问题变得越来越突出^[1]. 为此研究提出了几种应对高热流密度散热的方法, 例如射流冷却、喷雾冷却和微通道冷却等^[2]. 其中, 射流冷却利用高动量的流体射流冲击热基板来强化传热^[3]. 喷雾冷却利用喷嘴将液体雾化成细小液滴, 通过液滴撞击、液膜对流、蒸发和沸腾等过程对加热表面进行冷却^[4]. 微通道利用微尺度的结构使得固液接触面积变大, 从而实现很高的冷却能力^[5]. 各种散热技术的散热系数对比如图 1 所示^[5]. 在微重力环境中, 由于重力被消除或抑制, 表面张力和界面效应等将对系统造成重要的影响, 例如气泡脱离^[6]、大空间气液分离困难、液体回收问题^[7]等. 而微通道冷却中的流体是在闭式、主动循环的环境中流动的, 这使得微通道冷却在合理的结构与流型条件下是重力无关的. Lee 等^[8]认为微通道相比宏观通道可以有效消除重力对流动沸腾的影响, 更适用于空间应用. Huang 等^[9]的研究也表明, 在一定条件下微通道内流动沸腾地面实验的结果和结论在一定工作范围内同样适用于空间微重力环境. 综合对比几种应对高热流密度散热问题, 同时考虑到空间微重力实验的难度与数据范围, 微通道冷却技术可以通过地面试验研究其传热性能, 并推广至微重力下的应用.

在微通道技术的基础上, 研究提出了歧管微通道的概念, 以其较高的传热系数和较低的压力损失而受到学界广泛关注^[10]. 在歧管微通道的研究中, 以几何参数优化和结构优化为主要研究对象^[11], 在这些研究中, Lin 等^[12]通过数值计算比较了 6 种不同歧管设计 (Z 型、C 型、H 型、U 型、ZU 型和 HU 型) 在流量分布和芯片温度均匀性方面的性能. 其中, 具有双管道和垂直接流体出口的 HU 型歧管在单相和两相操作中均表现出色. 近年来关于 HU 型歧管的研究日益增多, 因为其具有高性能的潜力, 而且相对容易制造.

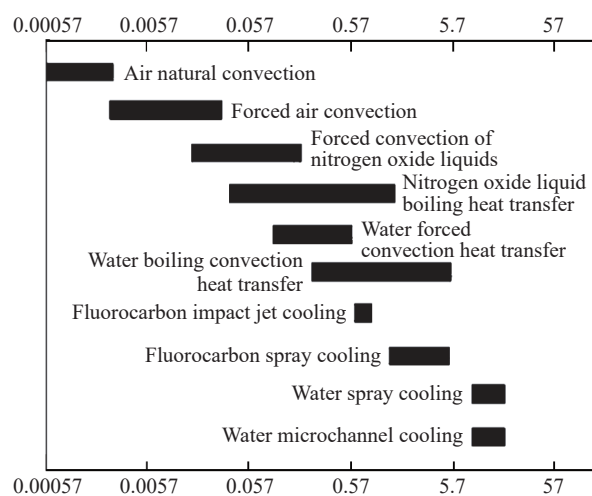


图 1 各类散热技术达到的传热系数对比^[5]

Fig. 1 Comparison of heat transfer coefficients achieved by various heat dissipation techniques^[5]

Wu 等^[13]研究了一种由微通道层和喷射增强型 HU 型歧管层组成的嵌入式单相水冷散热器, 发现在 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的加热区域, 其散热器可以耗散高达 $2000\text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的通量, 且最大温升为 65 K , 压降低于 40 kPa . Jung 等^[14]重点研究了如何优化 HU 型歧管微通道, 在降低泵功率的同时保持良好的传热性能. 其所设计的散热器能够以 $250\text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的通量冷却 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的热源, 同时压降低于 3 kPa . 除了上述的研究方向之外, 导热材料的优化也是科学研究中重要的方向之一, 而歧管微通道在材料优化方面的工作较为欠缺. 因此, 研究高导热材料对歧管微通道性能的影响是有意义的. 金刚石是一种具有极高导热系数的材料, 是一种未来有大量应用前景的新品衬底材料^[15]. 本文研究的重点是利用金刚石材料研制 HU 型歧管针翅散热器, 以热测试芯片为热源, 液氮为工质, 在泵驱回路中研究稳态负荷下的热工性能.

1 实验系统与测试区

1.1 实验系统

设计的散热器在以液氮为工质的泵驱两相流回路中进行了性能测试^[16], 实验系统如图 2 所示^[17]. 系统主要包括机械泵、预热器、流量调节阀、视液镜、冷凝器、水冷机组、储液器等, 同时在实验测试段位置安装红外热像仪对实验件温度进行测量. 实验前, 检查回路气密性并抽真空, 通入液氮进行实验. 实验中, 系统所有管路和部件均采用保温棉进行包裹, 减少与外部环境的热量交换.

实验中, 液态工质从储液器流出, 经由机械泵加压输送至预热器进行预热, 达到特定温度后流经流量调节阀控制回路流量后, 进入实验段进行充分的热交换. 流出实验段的两相流体可以通过视液镜观察气泡大小; 两相工质随后流经冷凝器, 由水冷机组进行冷却降温后, 回到储液器完成整个闭式循环. 实验回路中的温度、压力、流量等参数通过布置在回路中的各个传感器进行测量, 并且通过 Labview 软件进行数据采集. 实验段部分的温度由二极管芯片测温系统进行采集.

1.2 散热器结构及原理

如图 3(a) 所示, 本研究中使用的散热器是通过焊接微针翅板、歧管板、盖板和进出口管件制成的. 核心热交换部件, 即微针翅板和歧管板, 采用激光烧蚀金刚石面板制造而成, 其余部件材料为不锈钢. 图

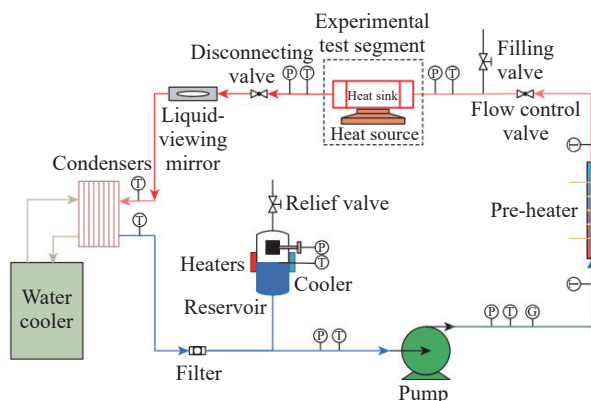


图 2 实验系统原理

Fig. 2 Schematic of the experimental system

3(b) 是散热器内的流动示意, 如蓝色箭头所示, 冷却液通过盖板进入歧管分配室, 随后被导入各个歧管通道. 随后, 冷却液冲击底部微针翅片, 产生强烈的流动换热, 然后逆向向上流动, 在流出散热器之前聚集在出口室中. 从前面的流动描述可知, 设计的散热器采用的是 HU 型歧管结构, 这种结构的压力损失较低, 使得散热器具备优异的流动特性. 同时, 通过将底板设计成微型针翅, 能够进一步扩大流体与固体的接触面积, 并且细小的针翅结构能够为气泡的产生提供一定的附着点, 促进流动沸腾, 提高散热器的换热特性. 图 3(c) 展示了用于模拟热源条件的热测试芯片, 该芯片采用半导体制造方法制作而成, 由 6×6 个 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的加热单元组成. 每个单元都集成了一个感温二极管和多个并联硅电阻条, 有助于近似模拟实际芯片的发热行为和检测内部节点温度. 在本实验中, 图 3(c) 中红框内标出的二极管测量点用于描述芯片节点温度. 图 3(d) 是散热器核心换热部件示意, 其中上图展示的是歧管板部分, 下图展示的是微针翅板. 从整体上来看, 歧管针翅散热器与微通道散热器传热本质相同, 都是利用微尺度的结构使得固液接触面积变大. 简化传热模型如图 4 所示. 对散热器从理论上分析可知, 加热芯片将热量传递给加热壁面, 理论上二者之间存在接触热阻 R_1 , 为了降低 R_1 , 使用金层作为过渡层实现焊接集成. 一方面能够将硅以及印刷电路板 (Printed Circuit Board, PCB) 与散热器相连, 另一方能够用金层优良的导热性降低接触热阻. 热量从加热壁面进入针翅层, 传热机理主要为热传导, 为了降低热传导的热阻 R_2 , 采用高导热的金刚石作为基体材料. 热量到达针翅层后, 通过与液氮的

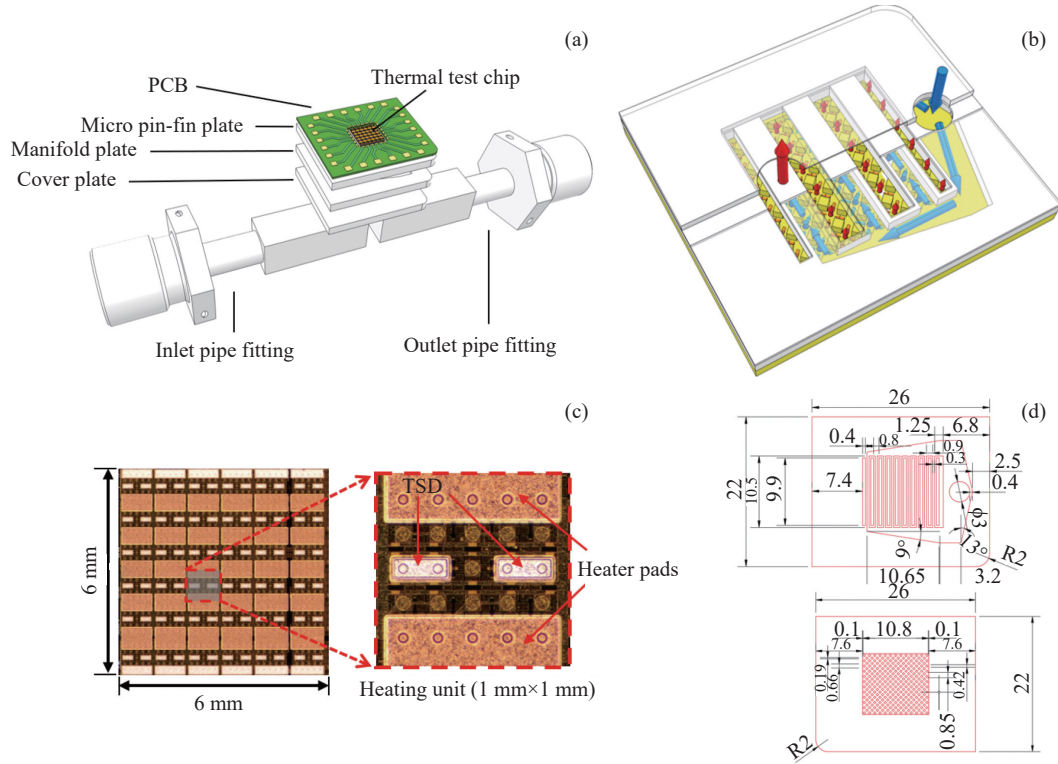


图 3 (a) 测试部分的装配图, (b) 散热器示意 (不按比例), (c) 热测试芯片, (d) 散热器核心换热部件示意

Fig. 3 (a) Assembly drawing of the test section, (b) schematic of the heat sink (not to scale), (c) thermal test chip, (d) schematic of the core heat exchange components of the heat sink

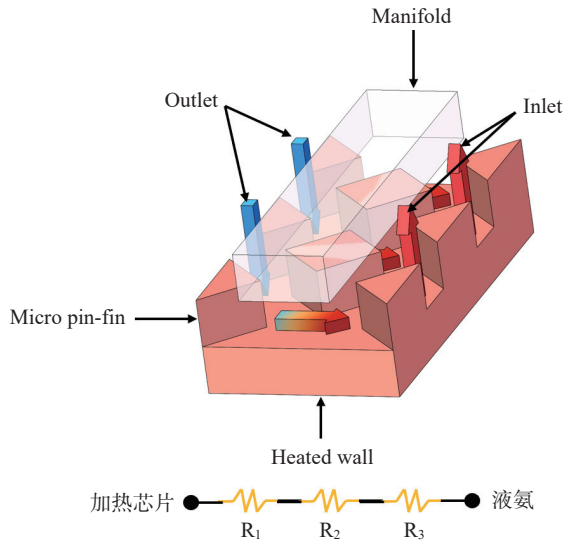


图 4 简化模型及热阻分析

Fig. 4 Simplified model and thermal resistance analysis

对流换热, 将热量带入液氮中, 为降低其中对流换热的热阻 R_3 , 通过微针翅的结构, 极大地扩大流体与固体的接触面积。

1.3 数据处理

回路中的流量、温度、压降数据取稳态时间 $t=240$ s 内的平均值, 有

$$G = \frac{\Sigma g_i}{t/f}, \quad (1)$$

$$T = \frac{\Sigma t_i}{t/f}, \quad (2)$$

$$P = \frac{\Sigma p_i}{t/f}. \quad (3)$$

其中, g_i , t_i , p_i 分别代表从软件中采样的数据; f 代表采样的频率。

热测试芯片的总加热功率通过直流电源的电压 V 和电流 I 计算得出, 即

$$Q_{\text{total}} = V \times I. \quad (4)$$

加热芯片的热通量计算公式为

$$q_{\text{chip}} = \frac{Q_{\text{total}}}{A_{\text{total}}}. \quad (5)$$

式中, A_{total} 表示热测试芯片总的加热面积。考虑到由于存在自然对流和辐射传热, 加热芯片会向周围环境

散失一些热量, 因此加热芯片的有效输入热量计算公式如下:

$$Q_{\text{eff}} = Q_{\text{total}} - Q_{\text{loss}}. \quad (6)$$

其中, Q_{loss} 是在实验前通过校准加热芯片的自然对流条件确定的. 根据与温度相关的热损失的最佳拟合线可得出以下方程:

$$Q_{\text{loss}} = 0.0518 \times (T_{\text{chip}} - T_{\text{envir}}). \quad (7)$$

式中, T_{chip} 表示芯片表面的温度, T_{envir} 表示环境温度. 样件的性能可以用总热阻 R_{total} 描述, 其由流体的热阻、从热源到冷却剂的传导热阻以及通道壁的对流阻力组成, 计算公式为

$$R_{\text{total}} = \frac{(T_{\text{chip}} - T_{\text{in}})}{Q_{\text{eff}}}. \quad (8)$$

其中, T_{in} 表示流体在样件入口的温度.

1.4 重力无关性验证

参考 Huang 等^[9] 关于重力无关的验证方法, 引入 Bond 数 (Bo)、Weber 数 (We)、Froude 数 (Fr):

$$Bo = (\rho_1 - \rho_g) g d_h^2 / \sigma, \quad (9)$$

$$We = G^2 d_h \rho / \sigma, \quad (10)$$

$$Fr = \sqrt{We / Bo}. \quad (11)$$

经计算得到液氮的表面张力 σ 约为 $2.5 \times 10^{-2} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, 液态密度 ρ_l 约为 $729 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 气态密度 ρ_g 为 $0.7708 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 重力加速度 g 取 $9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, 水力直径 d_h 为 0.780 mm , 质量通量 G 选取实验中最小值 $0.735 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 计算得到 $Bo=0.174$, $We=12.287$, $Fr=8.403$. Huang 等^[9] 指出, 当 Bond 数小于 0.31 或者 Froude 数大于 4 时, 则表现为重力无关特点. 显然上述计算得到的三个参数满足条件, 地面实验的数据可用于微重力环境条件下.

2 实验结果与分析

2.1 高热流密度热点实验

为研究高热流密度热点对散热器的影响, 首先对热沉进行热点实验. 针对芯片内 $1 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 区域的 6 个加热单元施加热负荷, 模拟实际应用场景中经常遇到的高热流密度热点问题. 在整个实验过程中, 使用数据采集设备和红外摄像机分别采集和记录芯片结点温度和温度分布.

图 5 给出了实验条件下 (进口温度 20°C , 饱和温度 28°C , 质量流量 $1 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$) 散热器的压降和热阻随热流密度的变化情况. 其中的进口温度通过回路中的预热器进行控制, 饱和温度通过储液器中的制冷器和加热器来维持恒定, 热流密度的变化通过调节加热单元的功率来控制. 从图 5 中可以看到, 随着热流密度的增大, 散热器的热阻降低、压降增大, 并且在中间区域有突然的变化. Kalani 等^[18] 解释说, 对于细小通道来说, 成核后的气泡会经历高度过热的液体环境, 导致其在上游和下游方向上迅速膨胀, 从而导致压降与热阻的突然变化. 结合实验数据可知, 在热流密度为 $550 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 通过回路中的视镜观察到气泡, 但在此时散热器的热阻和压降均未出现明显变化. 同时观察到, 在热流密度为 $1110 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 压降突然增大, 热阻突然减小. 分析此时散热器中的工质达到了完全沸腾的状态. 在最大热流密度 $1510 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 热阻约为 $0.151 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$, 压降约为 1.1 kPa . 图 6 展示了实现稳定运行后芯片表面的温度分布, 可以看出, 高温区主要集中在芯片加热区域. 由于流量分布不均以及加热单元电阻变化等因素, 加热区域内存在一定程度的温度不均匀性, 同时热点温度比芯片结点温度高出约 5.5°C .

2.2 流动沸腾特性实验

为进一步研究不同进口温度和热流密度条件对 HU 型歧管针翅散热器的影响, 开展了变流量和变热流实验. 实验中通过调节加热单元, 使芯片内 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 区域内的所有加热单元均施加热负荷. 通过调节回路中的流量调节阀和机械泵转速来控制

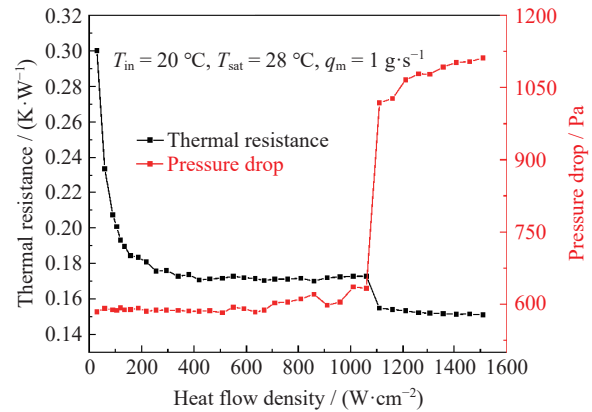


图 5 单列加热热阻压降随热流密度的变化

Fig. 5 Variation of pressure drop with heat flow density for single-row heating thermal resistance

流经散热器的流量大小, 控制与加热单元相连的高频大功率电源来调节加热功率。

图 7 展示了不同进口温度对散热器压降和热阻的影响。实验中主要进行了进口温度分别为 27.8°C (第一组) 与 20°C (第二组) 的两组实验。在本实验中, 使流经散热器的质量流量维持在 $1\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 储液器温度恒定在 28°C , 不断加大加热单元的功率, 提高热源的热流密度, 从 0 逐渐增加到 $710\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。由图线可知, 在小热流密度时观察第一组的压降先下降, 这是因为之前处在过冷沸腾起始点 (ONB) 之前, 温度升高, 导致流体的黏度下降, 流阻中摩擦压降部分降低, 从而使得压降会随着热流密度的增大而减小^[19]。对比热阻数据可知, 在压降最低的位置之后, 热阻有一个突降, 这表明散热器工质开始进入两相状态, 释放了潜热, 强化了换热。之后随着热流密度不断增大, 散热器内

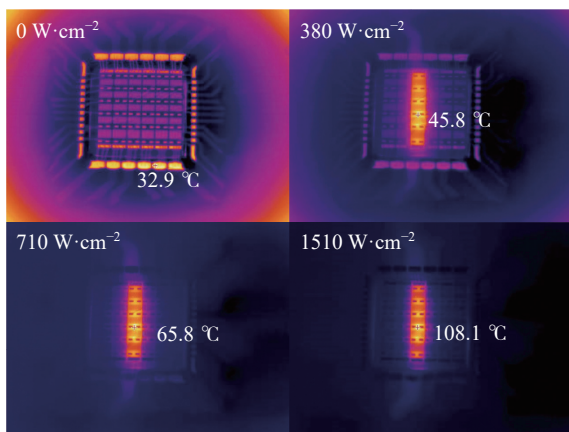


图 6 芯片温度分布

Fig. 6 Chip temperature distribution

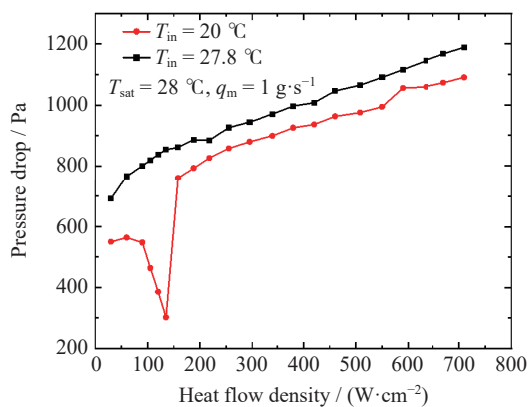


图 7 不同进口温度下热阻、压降随热流密度的变化

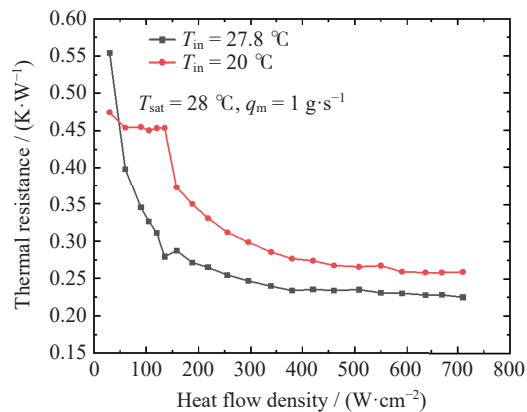
Fig. 7 Variation of thermal resistance and pressure drop with heat flow density at different inlet temperatures

部的沸腾更加剧烈, 压降逐渐增大。这是因为发生沸腾之后, 气液相变产生的加速压降和逐渐上升的两相摩擦压降导致通道内的压降随着逐渐增大的热流而增大^[20]。对比两组数据可知, 进口温度越高, 其热阻越低, 表明工质沸腾更剧烈, 换热能力越强, 因此导致其压力损失也越大。

图 8 展示了在不同热流密度条件下压降和热阻随质量流量的变化情况。实验中主要进行了热流密度分别为 $200\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (第一组) 和 $400\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (第二组) 的两组实验, 控制进口温度为 20°C , 储液器的温度为 28°C 。结合两组实验可以发现, 当热流密度一定时, 在流量较大时散热器的压降会随着质量流量的增大而增大, 这是因为此时散热器中单相对流换热区以摩擦压降为主, 而摩擦压降受到流速的影响较大^[19], 这也导致在大流速位置, 两组实验的压降开始逐渐接近。在小流量区域时, 可以观察到第一组实验的压降随着质量流量的增加存在下降现象, 这是因为在此区域内, 散热器内的工质从两相开始向单相转变, 即处在过冷沸腾起始点之前, 同时通过数据对比发现, 此区域压力传感器的数据波动较大, 而处于两相区流体的压力由于受到气泡的影响, 其测量数值会发生较大的波动。第二组实验未能观察到上述现象可能是因为热流密度较大, 其变化的点在流量更大的区域, 但后续实验的流量间隔更大, 错过了对于该现象的观察。热阻方面, 两组实验都随着质量流量的增大呈现下降的趋势, 并且高热流密度的热阻比低热流密度的热阻更低, 这与前面两组实验的结论一致。

2.3 金刚石与铜制热沉性能测试

为了验证金刚石热沉高效的热工性能, 将其与铜



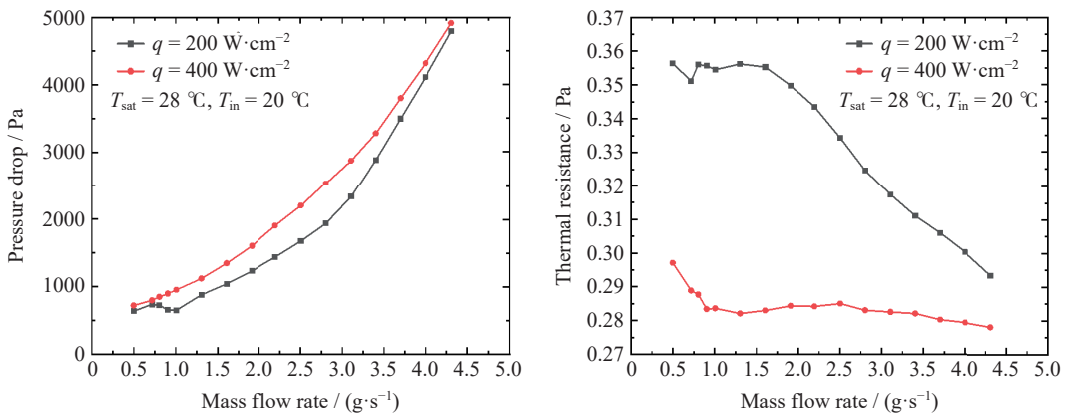


图 8 不同热流密度情况下热阻、压降随质量流量的变化

Fig. 8 Variation of thermal resistance and pressure drop with mass flow rate at different heat flow densities

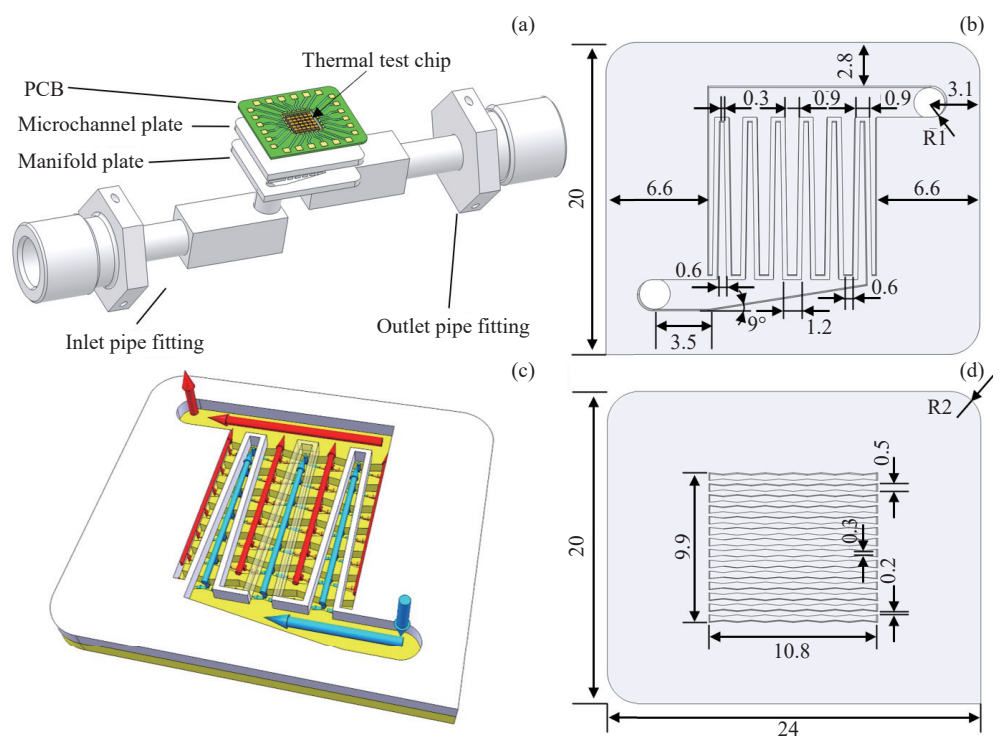


图 9 无氧铜热沉结构及尺寸

Fig. 9 Oxygen-free copper heat sink structure and dimensions

制热沉^[21]的性能测试结果进行对比, 其结构参数如图 9 所示. 二者差异如表 1 所示.

加热方面与金刚石热沉保持一致, 仍为 6 mm×6 mm 的加热单元进行加热. 同时, 使芯片内 6 mm×6 mm 区域内的所有加热单元施加热负荷, 热流密度从 0 逐渐增加至 710 W·cm⁻². 记录并整理得到二者热阻和压降的对比, 如图 10 所示. 从图 10 中可以看出, 在 710 W·cm⁻² 的热流条件下, 金刚石歧管

表 1 金刚石热沉和铜热沉对比
Table 1 Comparison of diamond and copper heat sink

	金刚石热沉	铜热沉
热沉材质	金刚石	无氧铜
歧管布局	HU 三层	Z 双层
通道结构	错排针肋	扩缩通道

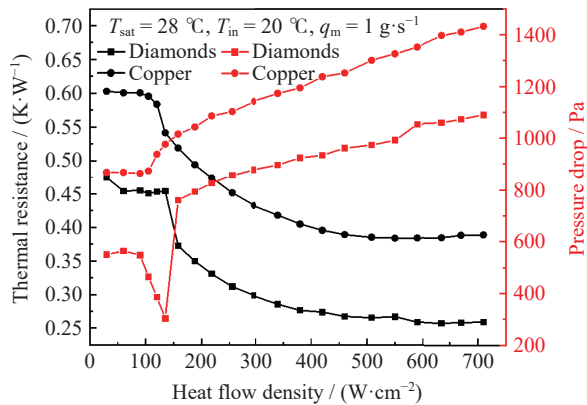


图 10 金刚石和铜散热器热阻、压降随热流密度的变化
Fig. 10 Variation of thermal resistance and pressure drop with heat flow density for diamond and copper heat sinks

针翅散热器的热阻比铜制扩缩通道散热器的热阻降低 33.32%，压降降低 23.88%，并且在整个实验范围，金刚石歧管针翅散热器性能始终更加优异，一定程度上展现了新设计散热器的高性能。

3 结论

本文采用传统的半导体制造方法，模拟实际芯片发热制造出 6 mm×6 mm 热测试芯片。基于金刚石材料，设计了一种歧管针翅散热器，通过理论计算验证了其重力无关性，并研究了该散热器在回路中的热点性能、流动沸腾特性，同时针对铜制热沉展开对比实验。主要结论如下。

(1) 以金刚石歧管针翅散热器为实验对象，采用 1 mm×6 mm 热测试芯片加热方式，维持局部 1510 W·cm⁻² 的热流密度，芯片的结点温度为 102.5℃，压降为 1111 Pa，显示该散热器具有良好的传热性能和压降特性。

(2) 通过研究入口温度和热流密度对散热器的影响，发现较高的入口温度和热流密度能够更好地利用工质的潜热，强化散热器的换热性能，但是更加剧烈的沸腾会提高散热器的压降。

(3) 通过与之前设计的铜制扩缩流道热沉实验结果的对比发现，在 710 W·cm⁻² 热流条件下，金刚石针翅热沉的热阻比铜制扩缩流道热沉的热阻降低 33.32%，压降降低 23.88%，一定程度上展现了所设计金刚石歧管针翅散热器的高性能。

参考文献

- [1] LUO Yang. Numerical and Experimental Investigation of Liquid-Vapor Two-Phase Flow Boiling in Manifold Micro-channel[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021 (骆洋. 歧管式微通道内气液流动沸腾换热的数值模拟与实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021)
- [2] AGOSTINI B, FABBRI M, PARK J E, *et al.* State of the art of high heat flux cooling technologies[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2007, **28**(4): 258-281
- [3] SARKAR S, GUPTA R, ROY T, *et al.* Review of jet impingement cooling of electronic devices: emerging role of surface engineering[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, **206**: 123888
- [4] CHENG W L, ZHANG W W, CHEN H, *et al.* Spray cooling and flash evaporation cooling: the current development and application[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **55**: 614-628
- [5] DU Peng, ZHOU Qingzhong, ZHENG Hanwen, *et al.* Research progress of microchannel cooling technology for high-density microsystems[J]. *Microelectronics & Computer*, 2023, **40**(1): 87-96 (杜鹏, 周庆忠, 郑涵文, 等. 用于高密度集成微系统的微通道散热技术研究进展 [J]. *微电子学与计算机*, 2023, **40**(1): 87-96)
- [6] GAO Xu, WANG Xuehui, LEI Gang, *et al.* Bubble departure mechanism in microgravity flow boiling[J]. *Cryogenics*, 2015(2): 7-11,27 (高旭, 王学会, 雷刚, 等. 微重力流动沸腾气泡脱离机制 [J]. *低温工程*, 2015(2): 7-11,27)
- [7] HONG S H, WANG J X, GAO Z J, *et al.* Review on state-of-the-art research in pool and flow boiling under microgravity[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2023, **144**: 110848
- [8] LEE H, PARK I, MUDAWAR I, *et al.* Micro-channel evaporator for space applications-2. Assessment of predictive tools[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, **77**: 1231-1249
- [9] HUANG Y P, YANG Q, ZHAO J Q, *et al.* Experimental study on flow boiling heat transfer characteristics of ammonia in microchannels[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2020, **32**(3): 477-492
- [10] VAN ERP R, SOLEIMANZADEH R, NELA L, *et al.* Co-designing electronics with microfluidics for more sustainable cooling[J]. *Nature*, 2020, **585**(7824): 211-216
- [11] ZHU Xunyi, CHEN Chaowei, ZHANG Jingzhi, *et al.* Development and prospects of manifold microchannel heat sink research[J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, **44**(4): 15-33 (朱迅仪, 陈超伟, 张井志, 等. 歧管微通道热沉研究进展与展望 [J]. *制冷学报*, 2023, **44**(4): 15-33)
- [12] LIN Y H, LUO Y, LI W, *et al.* Single-phase and two-phase flow and heat transfer in microchannel heat sink with various manifold arrangements[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, **171**: 121118

- [13] WU Z H, XIAO W, SONG B. Efficient thermal management of high-power electronics via jet-enhanced HU-type manifold microchannel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, **221**: 125113
- [14] JUNG K W, KHARANGATE C R, LEE H, *et al.* Embedded cooling with 3D manifold for vehicle power electronics application: single-phase thermal-fluid performance[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, **130**: 1108-1119
- [15] PALKO J W, LEE H, ZHANG C, *et al.* Extreme two-phase cooling from laser-etched diamond and conformal, template-fabricated microporous copper[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, **27**(45): 1703265
- [16] TANG K, LIN G P, GUO Y D, *et al.* Thermal-hydraulic characterization of manifold microchannel heat sink with diverging channels and uniform heating[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, **46**: 102235
- [17] TANG Kai, HUANG Yanpei, GUO Yuandong, *et al.* Experimental study on localized hot spot jet impingement flow boiling[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2024, **45**(6): 1743-1748 (汤凯, 黄岩培, 郭元东, 等. 局部热点射流式微通道流动沸腾实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2024, **45**(6): 1743-1748)
- [18] KALANI A, KANDLIKAR S G. Flow patterns and heat transfer mechanisms during flow boiling over open microchannels in tapered manifold (OMM)[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, **89**: 494-504
- [19] YANG Han. Experimental Study of Flow Boiling Heat Transfer Characteristics and Visualization in Micro-Channels[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022 (杨涵. 微通道流动沸腾传热特性及可视化实验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022)
- [20] HUANG Y P, MIAO J Y, NIU Z T, *et al.* Experimental investigation on heat transfer and pressure drop characteristics of confined jet impingement boiling on hybrid-structured surface[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, **218**: 119320
- [21] TANG K, HUANG Y P, LIN G P, *et al.* Thermal-hydraulic performance of ammonia in manifold microchannel heat sink[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, **232**: 121000

作者简介



乔 通 男, 2001 年 5 月生于湖南省邵阳市. 现就读于北京航空航天大学航空科学与工程学院, 硕士研究生, 主要研究方向为歧管微通道换热、流动沸腾传热实验研究.

E-mail: 1227848608@qq.com



郭元东 (通信作者) 男, 1992 年 6 月出生于河北省邢台市. 现为北京航空航天大学航空科学与工程学院副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为航天器热控、热管、流动沸腾传热、微通道换热技术理论与实验研究.

E-mail: guoyd@buaa.edu.cn