

分体式金刚石/铜微通道散热研究*

冯小明 马祥 张永海

王帅 李彬

(西安交通大学化学工程与技术学院 西安 710049)

(超硬材料磨具国家重点实验室 郑州 450001)

摘要 随着航天器功能部件热流密度激增,相关电子设备的寿命和可靠性面临着严峻的散热问题.将微通道散热技术与高导热金刚石/铜复合材料相结合,为解决航天器的散热难题提供了有效途径.本文设计了一种分体式金刚石/铜微通道散热系统,并与纯铜微通道系统对比.以 HFE-7100 为工质,研究了不同流速、不同肋高下两种微通道系统的传热特性.当流速为 $0.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,随着肋高的增加,临界功率下金刚石/铜比纯铜微通道系统的芯片表面温度低 12, 19, 19.6°C ,传热系数最大提升分别为 27.8%, 30.1%, 28.1%.两种微通道系统的压差在对流段几乎相同,进入核态沸腾后,金刚石/铜微通道系统压差整体略高,最大增加了 11.8%.

关键词 金刚石/铜复合材料,微通道,相变换热

中图分类号 TK124

Research on Heat Dissipation of Split Diamond/Copper Microchannels

FENG Xiaoming MA Xiang ZHANG Yonghai

WANG Shuai LI Bin

(School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(State Key Laboratory Superabrasives, Zhengzhou 450001)

Abstract With the development of aerospace technology, the intelligence level of spacecraft is increasing day by day. The increasing demand for chip computing power leads to a significant increase in its heat flux density, and the life and reliability of related electronic devices are facing severe heat dissipation challenges. The combination of microchannel heat dissipation technology and high thermal conductivity diamond/copper composites provides an effective way to solve the heat dissipation challenges of spacecraft. In view of the poor machinability of diamond/copper composites, a split diamond/copper composite microchannel heat dissipation system is designed in this paper and compared with a pure cop-

* 国家重点研发计划项目 (2022 YFF0503502), 超硬材料磨具国家重点实验室开放课题 (GXNGJSKL-2022-02) 和西安交通大学青年拔尖人才支持计划项目共同资助

2024-12-13 收到原稿, 2025-02-28 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/>)

per microchannel system. The heat transfer characteristics of the two microchannel systems at different flow rates (0.3, 0.5, 0.7 m·s⁻¹) and rib heights (1, 1.5, 2 mm) were investigated using HFE-7100 as the heat transfer medium. When the flow rate is 0.7 m·s⁻¹, the chip surface temperatures of diamond/copper microchannels at the critical power are lower than those of pure copper microchannels by 12°C, 19°C, and 19.6°C, respectively, with the increase of rib height. The heat transfer coefficients were maximally enhanced by 27.8%, 30.1%, and 28.1% at the three rib heights, respectively, showing the heat dissipation advantages of the diamond/copper composite microchannels. The better heat transfer performance of the diamond/copper composite microchannel system is mainly due to its higher thermal conductivity and surface roughness. The pressure drop between the inlet and outlet of the two microchannel systems is basically the same in the single-phase flow section, and the difference gradually becomes apparent when entering nucleate boiling. At critical power, the pressure drop of the diamond/copper microchannel system is slightly higher than that of the pure copper microchannel system, with a maximum increase of 11.8%. The reason for the higher pressure drop in the diamond/copper microchannel system is that the turbulence level of the working fluid is higher in the diamond/copper microchannel system.

Key words Diamond/copper composites, Microchannels, Phase transition heating

0 引言

近年来, 航空航天、人工智能等领域技术的快速发展, 对于芯片算力有了更为庞大的需求, 推动着芯片制造工艺的进一步迭代. 相应地, 芯片功率、热流密度越来越高, 导致芯片的工作温度大大提高. 研究表明, 当工作温度升高 10°C, 芯片的可靠性就会下降 50%^[1]. 对于未来航天器, 现有通过高导热材料、热管等散热的被动散热技术对大功率电子器件冷却已经逐渐难以奏效, 因此, 热控制技术已经成为航天器结构设计的关键因素.

自 1981 年 Tuckman 等^[2]首次提出微通道散热技术以来, 其极高的解热能力与紧凑的结构得到了充分的研究. 微通道通常指水力直径小于 1 mm 的细小通道, 比表面积大、结构紧凑, 液体管路可设计. 这很好地满足了航天器上对于散热器解热能力高、空间占用小、轻量化以及串联各种分散电子器件的要求. 因此, 近年来, 其在航天器上已经越来越被重视, 目前也已有相关研究. 针对航天器上氮化镓芯片的热障碍, Kristen 等^[3]使用微通道冷却和高导热金刚石基板相结合, 旨在降低高温结点到外壳的热阻. Yu 等^[4]设计了一种金刚石微通道蒸发器, 以满足航天器中高功率激光和雷达的散热要求, 该系统稳定运行, 并制造了环结构和相关部件, 之后对其测试, 结果表明其在热流密度为 272 W·cm⁻² 时具有显著的冷却能力. Alam 等^[5]针对空间电子设备浮力受限的情况采用流动沸

腾硅纳米线微通道增强爆炸性沸腾、最小化气泡脱离直径和平滑流态转变来强化两相传热, 结果表明该设计减少了间歇性流态, 改善了再润湿, 并在壁上保持了薄液膜, 有望在未来得以应用.

现有关于微通道的研究主要集中在微通道结构设计上, 包括微通道截面形状^[6-8]、流路形状^[9,10]以及流路结构强化^[11]等方向. 此外, 微通道材料的物性本身(热导率、比热容、热膨胀系数等)对于微通道散热器的设计也极为重要, 尤其是材料的热导率和热膨胀系数. 目前微通道散热器主要是采用一些金属和非金属材料加工而成的, 例如硅^[12]、铝^[13]、铜^[14]等, 其热导率最高不超过 400 W·m⁻¹·K⁻¹, 同时热膨胀系数也与电子器件芯片材料要求的热膨胀系数 (4~8)×10⁻⁶ K⁻¹^[15-17] 不尽相同, 使得在芯片和热沉材料之间需要加入一层过渡层来防止热膨胀系数不同带来的芯片结构破坏, 而这会带来额外的热阻, 对于芯片高功率下的温控是极为不利的, 因而难以满足未来的散热需求. 金刚石拥有极高的热导率, 可达 2000 W·m⁻¹·K⁻¹ 以上, 同时其热膨胀系数很小, 只有 2.3×10⁻⁶ K⁻¹^[18]. 人工合成金刚石的成本已经逐年下降, 完全可以满足工业需求, 但是大尺度金刚石的制备成本依旧比较高, 目前将金刚石和金属制成复合材料更具成本优势, 同时热膨胀系数可以调整, 有望在未来去除其与芯片之间的过渡层, 可以极大地降低导热热阻, 提高传热效率, 最终降低近结点温度, 满足更多的应用场景. 金属铜在金属当中具有很高的热导率, 仅次于银,

同时价格低廉, 因此, 金刚石/铜复合材料是当前研究的热门之一. 铜与金刚石的润湿角较大, 即使高温下有所减小, 其润湿角依然很大 ($T = 1373 \text{ K}$, $\theta = 128^\circ \sim 158^\circ$)^[19], 因此必须对其进行界面改性, 添加一些强碳化合物 (Cr, Ti, W, B 等) 改善界面结合^[20-23], 在不考虑金刚石之间键合的情况下, 其理论热导率仍可达 $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ^[24,25] 以上, 在一些研究中甚至可达 $900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 以上^[26,27]. 因此使用金刚石/铜复合材料制备微通道散热器具有良好的前景, 但其难以通过机加工成型, 一种做法是使用超短脉冲的飞秒激光加工, 但设备要求、加工成本均较高, 极大地增加了应用成本. 本研究通过设计分体式金刚石/铜微通道散热器, 并与铜基微通道散热器对比, 研究其传热性能, 为芯片散热提供参考.

1 实验设计、数据处理及误差分析

1.1 实验设计

微通道换热实验系统如图 1 所示. 实验测试段液体进出口装有测温热电偶与压力传感器, 可将数据传

至电脑, 通过直流电源加热的陶瓷片上的薄膜电阻作为微通道散热器热源. 高温液体流出实验段后, 通过风冷散热器冷却至固定温度后流至储液箱, 储液箱内设有金属铜加热棒可对箱内液体温度进行控制, 再通过齿轮泵传输至微型流量计进行流量精准控制, 最后流入实验段完成整个循环. 分体式微通道结构设计如图 2(a) 所示, 其结构由亚克力盖板、铜肋板、金刚石/铜片、陶瓷加热片、玻纤底板 5 部分组成. 其中芯片测温点 T 已在图中标出, 试验段各功能区如图 2(b)

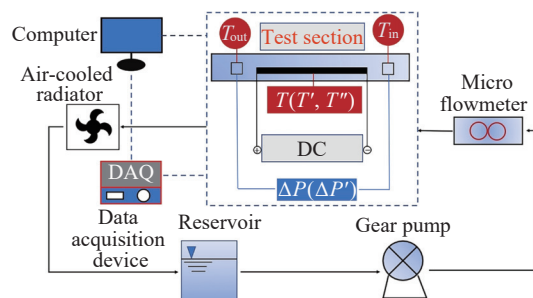


图 1 微通道换热实验系统原理

Fig. 1 Schematic of microchannel heat exchange experimental system

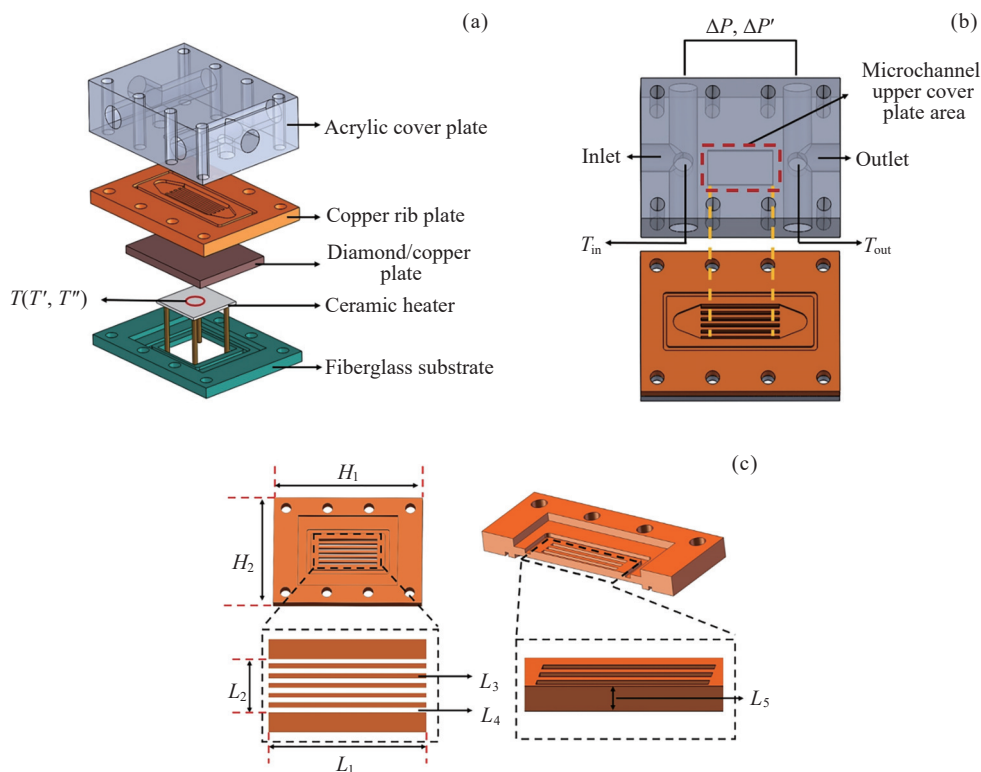


图 2 分体式金刚石/铜微通道三维结构 (a) 以及试验段功能区 (b) 与铜肋板背面结构及主要尺寸代号 (c)

Fig. 2 Three-dimensional view of split diamond/copper microchannel structure (a), schematic diagram of test section profiles and work material flow paths (b), and copper ribbed plate backside structure and its main size code (c)

所示,亚克力盖板上设计有液体进出口和温度、压力测量接口,其中铜肋板背面刻有凹槽,结构如图2(c)所示,可将金刚石/铜片嵌入,构成完整微通道散热底板,陶瓷加热片上使用磁控溅射法溅射了薄膜电阻,连接直流电源向金刚石/铜散热片传递热量,最后通过玻纤紧固底板和螺栓将各部件紧固在一起. 换热核心段铜肋板热导率较高,工质会将热量通过肋板导热扩散到空气当中,本实验在整个换热段外围包覆有隔热泡沫层,同时在其下方热源区域粘贴有多层聚酰亚胺耐高温隔热胶带以减小热量散失. 试验段材料主要尺寸列于表1.

1.2 实验工质、设备与材料

实验使用 HFE-7100 作为换热工质,纯铜作为铜肋板材料,金刚石/铜片作为换热底板. 实验材料主要物性见表2.

实验中采用两根 0.08 mm 超细 T 型热电偶测量芯片表面温度,两根 1 mm T 型热电偶测量工质进出

表 1 试验段材料主要尺寸
Table 1 Main materials dimensions of the test section

名称	代号	尺寸/mm
微通道铜肋板	$H_1 \times H_2$	45×61
微通道尺寸	$L_4 \times L_1 \times L_5$	1×24×(1, 1.5, 2)
肋尺寸	$L_3 \times L_1 \times L_5$	1×24×(1, 1.5, 2)
金刚石/铜散热片	—	30×40×3

表 2 实验使用材料的主要物性
Table 2 Main physical properties of experimental materials

名称	物性名称	物性值
HFE-7100	沸点/℃	61
	密度/(kg·m ⁻³)	1520
	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	1183
	运动学黏度/(mm ² ·s ⁻¹)	0.38
金刚石/铜	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	700
	密度/(kg·m ⁻³)	5850
	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	434.5
	表面粗糙度	Ra1.6
铜	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	400
	密度/(kg·m ⁻³)	8960
	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	390

口温差,压差变送器测量进出口压差,表3为实验中主要使用设备的参数和传热系数影响因素的相对误差.

1.3 实验可行性

实验通过控制入口温度、流速,调整功率,待底板温度达到稳态时,对比不同功率下的金刚石/铜和纯铜微通道下的芯片表面正中心温度. 图3为本实验换热基本原理示,通过直流电源加热微通道底板,热量 Q 通过导热从下方传至上方,流动工质通过对流换热带走热量 Q ,整个实验过程中,工质入口温度恒定 ($25 \pm 1^\circ\text{C}$),根据公式 $Q = q_m C_p \Delta T$,其中 q_m 为工质质量流量, C_p 为工质比定压热容,当流速固定、功率相同、系统稳定时,忽略热损失,两种材料作为底板时,出口工质的温度是近似相同的,即工质具有相近的温度,则与工质接近一侧的固体表面温度亦可

表 3 实验设备主要参数及换热系数影响因素的相对误差
Table 3 Main parameters of the experimental equipment and relative error of factors affecting heat transfer coefficient

名称	测量范围	相对误差/(%)
T1型热电偶 (直径0.08 mm)	-200~200℃	±0.34
T2型热电偶 (直径1 mm)	-200~250℃	±0.42
压差变送器	0~10 kPa	±3.3
直流电源电压	0~300 V	±0.65
直流电源电流	0~5 A	2.2
热效率计算误差	—	11.7
$T-T_{in}$	—	3.6
流道换热面积	—	0.5

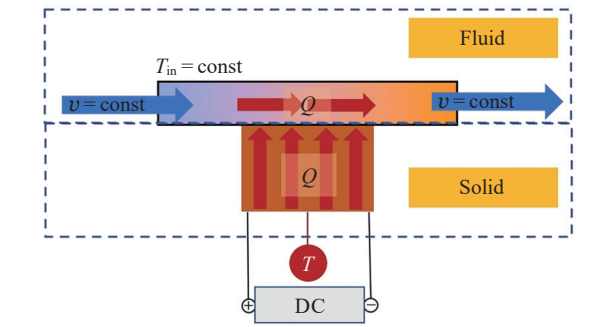


图 3 实验换热原理
Fig. 3 Schematic of experimental heat transfer principle

假定近似一致. 根据傅里叶导热定律, 有

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

A 为微流道换热面积, 当控制功率、换热面积和固体厚度一定时, 固体上下表面温差和热导率成反比, 当热导率更高时, 该固体上下两侧具有更低的传热温差, 由于固体上表面与流动工质接触, 前述其在两种工况下具有相近的温度, 并且其属于固体的低温侧, 因此更低的传热温差会使得固体下表面的温度显著降低, 即高导热材料对于降低底板下表面和芯片温度是具有积极意义的. 同时由于金刚石/铜表面粗糙度比纯铜板高, 在工质沸腾时会有更多的汽化核心, 工质的汽化潜热会得到更多利用, 也会使得金刚石/铜微通道系统下的芯片表面温度更低.

1.4 数据处理

实验的目的是改善高功率下芯片的高结温问题, 采用两个 0.08 mm 直径的 T 型超细热电偶测量, 测量位置为芯片上表面几何中心位置, 当温度稳定后, 分别对最后 10 组结果取均值, 计算公式为

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{10} T_i' + \sum_{i=1}^{10} T_i''}{20}. \quad (2)$$

其中, T , T' 和 T'' 分别为芯片表面中心平均温度、热电偶 1、热电偶 2 稳定采样温度, 热电偶位置在芯片上表面几何中心, 即图 2(a) 中测温点, 进出口压差采用统一方法处理, 计算公式为

$$\Delta P = \frac{\sum_{i=1}^{10} \Delta P_i'}{10}. \quad (3)$$

其中, ΔP 为进出口平均压差, $\Delta P'$ 为进出口稳定采样压差, 实验中传热系数由以下公式求得:

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{q_m C_p (T_{\text{in}} - T_{\text{out}})}{UI}, \quad (4)$$

$$Q_{\text{eff}} = UI \eta_{\text{eff}}, \quad (5)$$

$$h = \frac{Q_{\text{eff}}}{A(T - T_{\text{in}})}. \quad (6)$$

其中, η_{eff} 为传热效率, 实验通过多组单相传热实验确定该值, 通过实验中结果计算得到传热效率为 84.3%, Q_{eff} 为有效输入热量, q_m 为工质质量流量, C_p 为工质比定压热容, U 为电源电压, I 为电源电流, $A = 2 \times 1.1 = 2.2 \text{ cm}^2$, 芯片加热面积为 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$. T_{in}

为工质进口温度, T_{out} 为工质出口温度, 测量位置已在图 2(b) 标出, 温度值同样取十组稳定值的均值.

1.5 测量精度及系统误差分析

系统传热系数反映了系统的综合性能指标, 其不确定性受设备测量误差和系统热效率综合影响, 根据 Moffat^[28] 提出的误差传递函数估算误差, 在本实验中转热系数的误差由下式计算:

$$\frac{\delta h}{h} = \left\{ \left[\frac{\delta(T - T_{\text{in}})}{T - T_{\text{in}}} \right]^2 + \left(\frac{\delta Q_{\text{eff}}}{Q_{\text{eff}}} \right)^2 + \left(\frac{\delta A}{A} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

其中, 有效输入热量 Q_{eff} 同样利用误差传递函数求得, 相对误差为 11.9%, 芯片和工质进口温差 $T - T_{\text{in}}$ 、流道换热面积的相对误差见表 3. 整体而言, 传热系数的相对误差小于 12.5%.

2 结果分析与讨论

2.1 流速、肋高对芯片温差的影响

图 4 为工质流速为 0.3, 0.5, 0.7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和肋高度为 1, 1.5, 2 mm 工况下, 两种散热底板在不同功率下热稳定后的芯片温度对比. 在低功率时 ($Q < 35 \text{ W}$), 工质整体处于单相对流阶段, 整体来看, 金刚石/铜微通道的芯片温度低于纯铜微通道的芯片温度, 当 $Q = 25 \text{ W}$ 时, 9 种工况下, 金刚石/铜微通道的芯片平均温度比纯铜微通道低 1.69°C , 此时温度的下降主要得益于金刚石/铜复合材料的高导热, 这是因为在单相层流状态下, 流体的黏性底层厚度远大于热沉表面粗糙度 (最大约 $1.6Ra$), 流体处于水力光滑区, 壁面粗糙度对换热强化贡献微小. 随着功率增加, 当 $Q > 35 \text{ W}$ 后, 系统逐渐进入两相区, 金刚石/铜微通道的芯片温度领先优势更为明显, 这是因为除金刚石/铜复合材料热导率较高以外, 其表面粗糙度也高于纯铜表面, 壁面粗糙度增加了汽化核心数量, 使得黏性底层减薄, 流体潜热得以利用, 流体平均温度相比其处于单相时增加更小. 因此, 此时芯片表面温度的下降同时受益于复合材料的高导热和其表面较高的壁面粗糙度. 同时, 不同肋高下两种微通道系统的芯片温差随着功率的变化有所不同. 当肋高为 1 mm 时, 随着功率的增加, 芯片温差只有小幅增加; 当肋高为 1.5 mm 和 2 mm 时, 芯片温差会随着功率增加逐渐增大. 原因是肋高为 1 mm 的微通道横截面积更小,

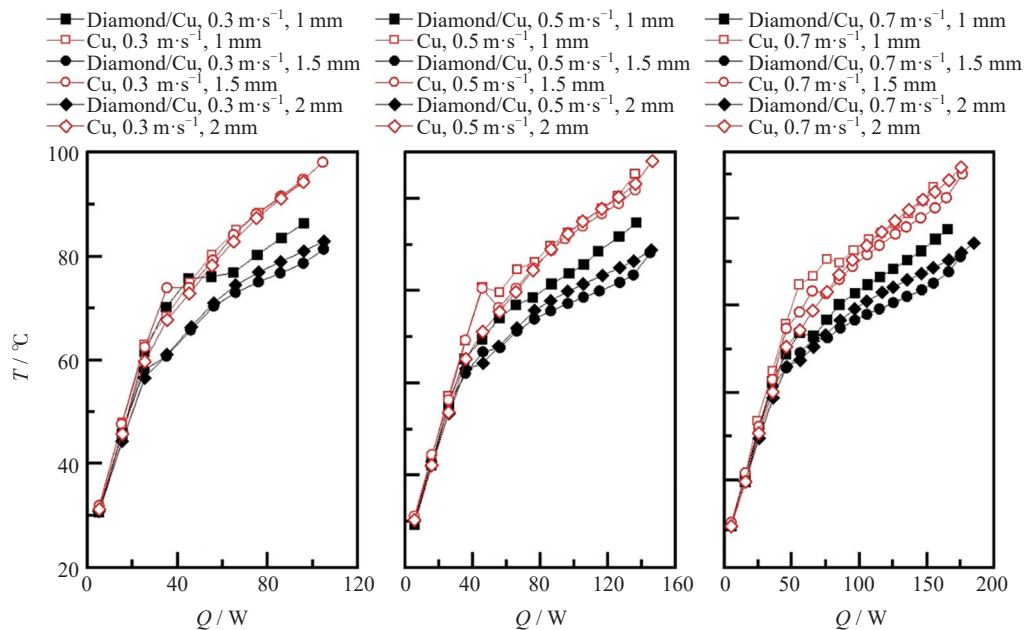


图 4 不同肋高的微通道散热系统的芯片表面温度

Fig. 4 Chip surface temperature of microchannel cooling system with different rib heights

当流速相同时, 工质的质量流量更低, 金刚石/铜表面产生的气泡会占据较大的流道空间, 导致金刚石/铜微通道上表面与工质接触面积减小, 弱化了传热效率. 随着工质流速增大, 微通道系统的对流热阻就越小, 整个系统解热能力越强, 临界热通量会更高, 两种微通道底板材料在极限热流密度下的温差会更大. 不同肋高和流速下两种微通道下芯片表面的最大温差见表 4, 最大温差为 19.6℃, 此时肋高 2 mm, 工质流速 0.7 m·s⁻¹.

2.2 流动压差

图 5 给出本实验 18 种工况、9 组数据之间的压差对比, 每组数据的其他控制条件一致, 只有底板材料种类不同. 图 5 中 A, B 分别代表金刚石/铜微通道、纯铜微通道; 1, 2, 3 代表流速为 0.3, 0.5, 0.7 m·s⁻¹; X, Y, Z 代表肋高为 1, 1.5, 2 mm. 可以看到在该 9 组数据当中, 压差随着加热功率的增加首先保持基本不变, 之后持续上升. 当肋高为 1, 2, 3 mm 时, 其各自对应 6 种工况, 当达到临界时, 临界功率下的平均压差是初始功率平均压差的 2.26, 1.55, 1.25 倍, 这在肋高较小时压降增加尤为显著. 分析其原因可能是相变发生时, 其空间较小, 气泡占据了流道更多的体积, 造成了流道阻塞, 阻力增加较大. 同时可以看到两种材料对应的微通道系统压差在 $Q < 35$ W 时是几乎完全相同的, 这是由于在单相层流状

表 4 9 种工况下的两种微通道芯片表面的最大温差 (单位: °C)

Table 4 Maximum temperature difference between two microchannel chip surfaces under 9 operating conditions (Unit: °C)

肋高/mm	流速/(m·s ⁻¹)		
	0.3	0.5	0.7
1	8.3	10.7	12
1.5	16.8	18.4	19
2	13.4	19.3	19.6

态下, 流体处于水力光滑区, 沿程阻力只与雷诺数有关, 与壁面粗糙度无关. 当相变发生时, 由于金刚石/铜表面有更多的汽化核心, 气泡生成更为容易, 相比单相流动较为稳定的固液接触面, 气泡会发生运动、破裂、合并, 使得流体复杂性和紊乱程度增加, 流动阻力增大. 随着加热功率的增加, 金刚石/铜微通道系统相变更加剧烈, 会产生更多的气泡, 气泡运动速度与流体的流速不同, 会产生较大的动量交换, 带来额外的阻力. 此外, 气泡的流型也会逐渐发生变化, 低流速下表现为分层流, 上部为气相, 下部为液相, 气相的存在使得下部液体与壁面贴合更紧密, 增大了摩擦阻力, 随着气泡速度增加, 会造成气液相界面波动, 流型逐渐转变为波状流, 此时界面的波动引起局部流速和

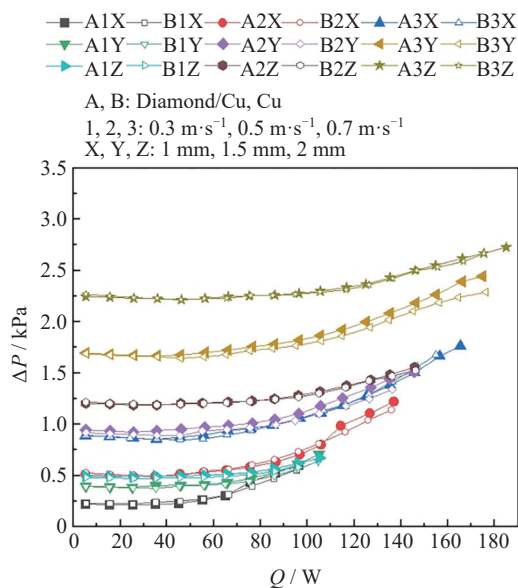


图5 不同工况下的压差变化

Fig. 5 Variation of differential pressure of microchannel system under different operating conditions

压力的波动, 导致能量损失增加, 气泡速度进一步增大, 形成环状流, 此时气相处于流道中心, 并且体积占比较大, 挤占了液相的通流面积, 根据流体力学原理, 在一定流量下, 流道面积减小, 流速增大, 而流速的增加会使得液相与壁面摩擦力增大. 因此由于金刚石/铜微通道相变更为剧烈, 其压差整体更大, 最大相差约 11.8%.

2.3 平均传热系数

平均传热系数反映了系统传热效率的高低, 图6反映了不同工况下, 当功率变化时, 两种材料的微通道平均传热系数. 不同工况下传热系数均会随着功率的增加先小幅震荡 ($Q < 35$ W) 之后迅速升高, 部分工况最后出现换热工况恶化, 传热系数有所减小. 这是由于在单相对流区域, 传热系数与流体的物性和流动状态有关, 但这些因素基本没有显著变化, 因此传热系数变化不大. 而在核态沸腾区, 由于气泡的产生, 工质潜热得以利用, 改变了传热机制, 因而传热系数迅速提高. 同时也发现在单相对流区域和核态沸腾区域内金刚石/铜复合材料微通道的平均换热系数都更高, 综合各工况, 在单相对流区, 金刚石/铜复合微通道相比纯铜微通道传热系数提高了约 4.8%, 在核态沸腾区域传热系数提高约 21.3%. 当肋高为 1.5 mm 时, 该微通道具有最好的传热性能, 这是由于肋高为

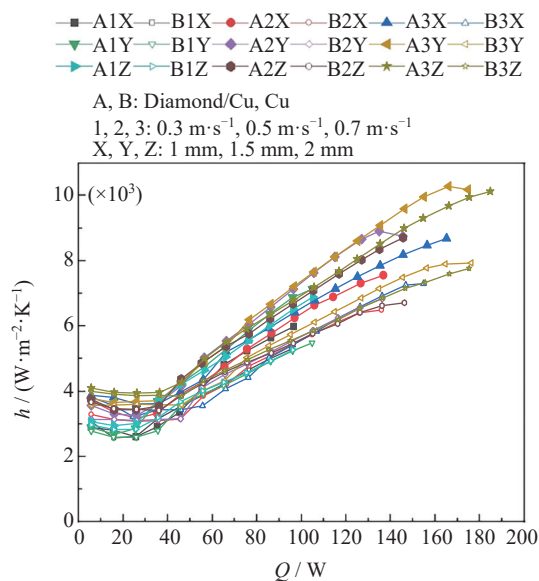


图6 不同工况下的微通道平均传热系数

Fig. 6 Average heat transfer coefficients of microchannels under different operating conditions

1 mm 时, 流道面积较小, 工质沸腾会占用较大的流道空间, 随着功率增加, 气泡数量逐渐增多, 且更难排出, 使得热交换受阻. 当肋高为 2 mm 时, 流道底部黏性底层较厚, 整个系统的导热热阻增大, 同样劣化了传热性能. 在肋高 1.5 mm, 流速为 0.3, 0.5, 0.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 与纯铜微通道相比, 金刚石/铜微通道系统的传热系数在单相区分别提高 6%, 10.1%, 3.6%, 在核态沸腾区域传热系数分别提高 27.6%, 28.1%, 25.6%.

3 结论

使用金刚石/铜复合材料设计出一种分体式微通道系统, 使用 HFE-7100 为工质, 主要研究两种微通道系统的换热差异, 得出结论如下.

(1) 由于金刚石/铜的更高的热导率和表面粗糙度, 在相同的加热功率下, 金刚石/铜微通道系统相比纯铜微通道系统的芯片中心表面温度更低. 当 $Q = 25$ W 时, 综合三种肋高、三种流速的 9 种工况下, 金刚石/铜微通道的芯片平均温度比纯铜微通道低了 1.69℃, 此时处于单向对流区, 温度下降主要得益于复合材料的高导热. 在流速为 0.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 肋高 1, 1.5, 2 mm 时, 临界功率下, 工质处于两相状态, 其温度最大降低 12, 19, 19.6℃, 此时温度下降受益于复合材料

的高导热和其较高的壁面粗糙度.

(2) 两种微通道系统在相同的工况下, 其压差在单相对流区或沸腾起始阶段, 是近似相同的. 当核态沸腾逐渐强烈后, 金刚石/铜微通道系统压差整体略高, 随着功率逐渐增大, 两种微通道系统压差最大相差约 11.8%, 其原因在于相变增加了流体的紊流程度, 气泡与流体之间存在动量交换, 气泡流型转变带来了额外的摩擦阻力并且相界面波动产生了能量耗散.

(3) 在单相对流区域和核态沸腾区域内, 金刚石/铜复合材料微通道的平均换热系数都更高, 综合各工况, 在单相对流区, 金刚石/铜复合微通道相比纯铜微通道传热系数提高约 4.8%, 在核态沸腾区域传热系数提高约 21.3%, 核态沸腾区提升较大的原因是复合材料高导热和较高的壁面粗糙度同时发挥了作用. 当肋高为 1.5 mm 时, 微通道系统传热系数最大, 这得益于其适中的黏性底层厚度和较大的流道空间. 当流速为 $0.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 在三种肋高下, 随着肋高的增加, 金刚石/铜微通道系统相比纯铜微通道的传热系数最大提高约 27.8%, 30.1%, 28.1%.

参考文献

- [1] BELHARDJ S, MIMOUNI S, SAIDANE A, *et al.* Using microchannels to cool microprocessors: a transmission-line-matrix study[J]. *Microelectronics Journal*, 2003, **34**(4): 247-253
- [2] TUCKERMAN D B, PEASE R F W. High-performance heat sinking for VLSI[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1981, **2**(5): 126-129
- [3] BLOSCHOCK K P, BAR-COHEN A. Advanced thermal management technologies for defense electronics[C]//Proceedings of SPIE 8405, Defense Transformation and Net-Centric Systems. Baltimore: SPIE, 2012
- [4] YU X G, XU K, MIAO J Y, *et al.* Design and on-board validation of pumped two-phase fluid loop for high heat flux removal[J]. *Journal of Astronautics*, 2017, **38**(2): 192-197
- [5] ALAM T, LI W M, CHANG W, *et al.* Favourably regulating two-phase flow regime of flow boiling HFE-7100 in microchannels using silicon nanowires[J]. *Scientific Reports*, 2021, **11**(1): 11131
- [6] WANG H T, CHEN Z H, GAO J G. Influence of geometric parameters on flow and heat transfer performance of micro-channel heat sinks[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, **107**: 870-879
- [7] JING D L, HE L. Numerical studies on the hydraulic and thermal performances of microchannels with different cross-sectional shapes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, **143**: 118604
- [8] QU W L, MALA G M, LI D Q. Pressure-driven water flows in trapezoidal silicon microchannels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, **43**(3): 353-364
- [9] HUNG T C, YAN W M, WANG X D, *et al.* Optimal design of geometric parameters of double-layered microchannel heat sinks[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, **55**(11/12): 3262-3272
- [10] BOTELER L, JANKOWSKI N, MCCLUSKEY P, *et al.* Numerical investigation and sensitivity analysis of manifold microchannel coolers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, **55**(25/26): 7698-7708
- [11] DE LOSIER C R, SUBRAMANIAN S, PONYAVIN V, *et al.* The parametric study of an innovative offset strip-fin heat exchanger[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2007, **129**(10): 1453-1458
- [12] LEE P S, GARIMELLA S V. Saturated flow boiling heat transfer and pressure drop in silicon microchannel arrays[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, **51**(3/4): 789-806
- [13] TRAN N, ZHANG C P, DANG T, *et al.* Numerical and experimental studies on pressure drop and performance index of an aluminum microchannel heat sink[C]//Proceedings of the 2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control. Taichung, China: IEEE, 2012
- [14] SINGH R, AKBARZADEH A, MOCHIZUKI M, *et al.* Thermal characterization of copper microchannel heat sink for power electronics cooling[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2009, **23**(2): 371-380
- [15] MOLINA J M, NARCISO J, WEBER L, *et al.* Thermal conductivity of Al-SiC composites with monomodal and bimodal particle size distribution[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, **480**(1/2): 483-488
- [16] ZWEBEN C. Advanced materials for optoelectronic packaging[J]. *Semiconductor International*, 2002, **25**(10): S5-S6,S8
- [17] BAI G Z, ZHANG Y J, DAI J J, *et al.* Tunable coefficient of thermal expansion of Cu-B/diamond composites prepared by gas pressure infiltration[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, **794**: 473-481
- [18] JIA J H, BAI S X, XIONG D G, *et al.* Effect of tungsten based coating characteristics on microstructure and thermal conductivity of diamond/Cu composites prepared by pressureless infiltration[J]. *Ceramics International*, 2019, **45**(8): 10810-10818
- [19] ABYZOV A M, KIDALOV S V, SHAKHOV F M. High thermal conductivity composites consisting of diamond

- filler with tungsten coating and copper (silver) matrix[J]. *Journal of Materials Science*, 2011, **46**(5): 1424-1438
- [20] MAŃKOWSKI P, DOMINIĄK A, DOMAŃSKI R, *et al.* Thermal conductivity enhancement of copper-diamond composites by sintering with chromium additive[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2014, **116**(2): 881-885
- [21] HUANG S H, GUO H, ZHANG Z, *et al.* Comparative study on the properties and microscopic mechanism of Ti coating and W coating diamond-copper composites[J]. *Materials Research Express*, 2020, **7**(7): 076517
- [22] HU H B, KONG J. Improved thermal performance of diamond-copper composites with boron carbide coating[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, **23**(2): 651-657
- [23] LIU R X, LUO G Q, LI Y, *et al.* Microstructure and thermal properties of diamond/copper composites with Mo₂C in-situ nano-coating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, **360**: 376-381
- [24] HASSELMAN D P H, JOHNSON L F. Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance[J]. *Journal of Composite Materials*, 1987, **21**(6): 508-515
- [25] YANG L, SUN L, BAI W W, *et al.* Thermal conductivity of Cu-Ti/diamond composites via spark plasma sintering[J]. *Diamond and Related Materials*, 2019, **94**: 37-42
- [26] WANG L H, LI J W, BAI G Z, *et al.* Interfacial structure evolution and thermal conductivity of Cu-Zr/diamond composites prepared by gas pressure infiltration[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, **781**: 800-809
- [27] SANG J Q, YUAN Y, YANG W L, *et al.* Exploring the underlying causes of optimizing thermal conductivity of copper/diamond composites by interface thickness[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, **891**: 161777
- [28] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1988, **1**(1): 3-17

作者简介



冯小明 男, 1994年6月出生于陕西渭南, 现为西安交通大学化学工程与技术学院硕士研究生, 研究方向为金刚石/铜复合材料及微通道相变散热。
E-mail: 1753352179@qq.com



张永海 (通信作者) 男, 1986年7月出生于内蒙古通辽, 现为西安交通大学化学工程与技术学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为功率器件热管理技术开发与理论研究、航空航天热管理技术开发与理论研究、掺氢天然气安全事故特征和演化规律研究等。
E-mail: zyh002@xjtu.edu.cn