

泡沫铜/铜网复合梯度均热板的5G散热特性研究

雷子璇, 张文璐, 吴 胜, 张柏文, 洪 明, 陈 岩, 张海丰

(江西铜业技术研究院有限公司, 江西南昌 330096)

摘要: 针对5G通信设备高功率密度散热需求, 创新性地提出了一种基于梯度孔隙率泡沫铜/铜网复合结构的薄型化均热板解决方案。通过双向孔隙梯度设计, 在蒸发端采用热压技术将泡沫铜厚度从1.6 mm压缩至0.15 mm, 形成高密度微孔结构以增强毛细力, 冷凝端则配置150 μm 孔径铜网优化工质回流路径, 显著降低流动阻力。实验结果表明, 该设计在65 W热负荷下可将温度波动幅度从10.3 $^{\circ}\text{C}$ 降至5.2 $^{\circ}\text{C}$ (降幅49%), 热阻(ΔR_{th})低至0.080 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。此外, 梯度结构使启动时间缩短至8 s, 为微型化电子设备散热提供了新思路。本研究为高功率电子器件的微型化散热提供了兼具高效传热与结构可靠的新范式, 其三级流道(蒸发端大孔 $\rightarrow$ 过渡层中孔 $\rightarrow$ 铜网小孔)设计理念可拓展至其他高热量密度应用场景。

关键词: 高功率密度电子器件; 梯度孔隙率泡沫铜; 均热板; 散热; 微孔结构

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.03.004

中图分类号: TK124 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)03-0033-06

随着5G通信向毫米波频段加速演进, 基站有源天线单元(AAU)的集成度逼近物理极限, 由此引发的散热难题成为制约行业发展的关键技术瓶颈。在毫米波频段特有的波束成形技术驱动下, AAU功率密度呈现指数级增长, 其散热需求呈现三大特征: 在空间适配性方面, 散热器需满足AAU内部Z轴安装间隙(典型值3.5 mm), 同时需兼顾结构密封性^[1]; 在热流承载能力方面, 面对高达200 W/cm^2 的局部热流冲击时, 散热材料须具备较大传热截面积以抑制热阻激增^[2]; 在环境适应性方面, 需在 $-40\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温变范围内稳定工作, 还需解决相变工质的热胀冷缩问题^[3-5]。这些严苛条件催生了产业界对新型散热方案的迫切需求: 既能满足毫米波AAU的微型化要求, 又可保障在严苛工况下的长期可靠性。现有研究表明, 当散热器厚度缩减至亚毫米级时, 其热阻特性往往呈现非线性恶化^[6-8]。泡沫铜凭借其独特的三维多孔网络结构, 在均热板吸液芯中展现出显著优势: 其三维互联孔隙结构形成强大的毛细抽吸力, 可大幅提升工质循环效率, 有效抑制亚毫米级散热器的热阻恶化现象; 同时, 泡沫铜骨架结构提供的传热截面积可达超薄结构的10倍, 实现高热流密度下的高效热扩散; 配合较厚的工质储层设计, 可有效缓冲相变工质在 $-40\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 宽温范围

内的热胀冷缩应力, 确保散热系统在严苛工况下的长期可靠性。本研究的核心贡献在于通过0.15 mm梯度配置精密吸液芯与1.85 mm工质层的协同设计, 满足了5G基站对散热与结构的双重需求, 为毫米波AAU提供了可工程化的散热解决方案。

本研究提出的梯度孔隙率泡沫铜/铜网复合结构, 通过多尺度协同设计具备以下特征: 1) 蒸发端采用1.0 mm大孔径泡沫铜构建低阻蒸发通道; 2) 过渡层以0.6 mm泡沫铜形成毛细力梯度; 3) 冷凝端以150 μm 铜网优化回流路径。实验结果表明, 该设计显著改善了热管理性能: 热阻从单层1.6 mm结构的0.117 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 降至0.080 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ (降幅32%), 接触热阻较纯铜片降低24%, 这得益于铜网微结构与泡沫铜的界面润湿性优化^[9-11]。实验数据揭示了梯度结构的协同效应: 1.0 mm蒸发端确保足够的毛细抽吸力, 0.6 mm过渡层维持工质循环平衡, 而1.6 mm总厚度(1.0 mm蒸发端+0.6 mm过渡层)被证明是最佳配置。对比其他双层配置, 1.2 mm结构因蒸发端厚度不足导致毛细回流不充分, 而2.0 mm结构则因蒸发端过厚引发工质滞留。相比之下, 1.6 mm结构实现了热阻与毛细力的较好平衡。本研究通过梯度厚度配置(1.0 mm蒸发端+0.6 mm过渡层+单层铜网)的协同优化, 将泡沫铜均热板热阻降至0.080 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$, 为高功

收稿日期: 2025-09-25; 修订日期: 2026-01-16

基金项目: 赣鄱俊才支持计划-主要学科学术和技术带头人培养项目(20232BCJ22028)

作者简介: 雷子璇(1994—), 女, 安徽安庆人, 博士, 工程师, 研究方向: 高性能铜及铜合金材料, E-mail: zxuanlei@mail.ustc.edu.cn;

通信作者: 张海丰, 工程师, E-mail: 1503997344@qq.com

率电子器件散热提供了实验依据。未来可进一步研究铜网目数与泡沫铜孔隙率的匹配关系,以突破现有毛细力极限。

1 实 验

1.1 实验材料

本研究采用市售高密度泡沫铜作为核心材料,其厚度分为0.6 mm(孔隙率96%±2%)和1.0 mm(孔隙率97%±2%)两种规格,对应的面密度均为135 ppi。这两种规格泡沫铜的孔隙率已达到同厚度产品的较高水平,其三维网状结构特征为后续实验提供了理想的基础材料。扫描电子显微镜(SEM)

观测显示,这些泡沫铜骨架由丝径40 μm的电镀聚氨酯泡沫烧结形成。图1(a)展示了0.6 mm泡沫铜横截面的初始状态,其孔径分布在150~250 μm,而图1(b)中1.0 mm泡沫铜的孔径范围更大,为200~450 μm,这种差异化的孔径分布为梯度设计提供了物理基础。图1(c)展示了0.6 mm和1.0 mm泡沫铜的纵截面,可见孔隙沿厚度方向贯通,形成垂直排列的孔道。均热板的上下板壳均以C5191铜片冲压成型,尺寸均为60 mm×60 mm,支撑系统由4×4阵列的铜粉柱构成,注液管直径精确控制为2 mm。工质选用乙醇和水的混合液(体积比为7:3)。

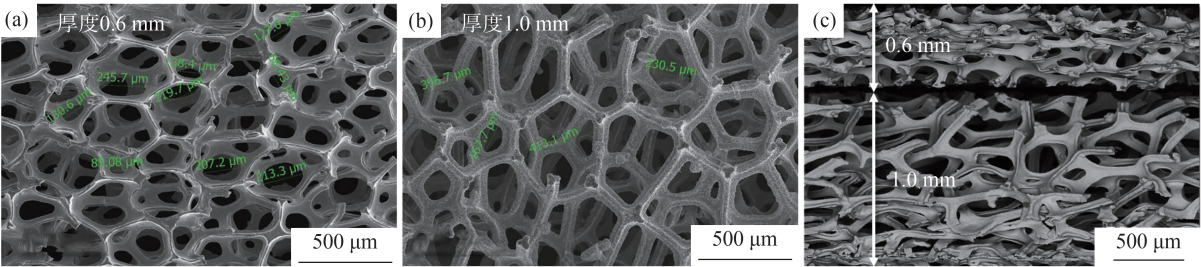


图1 不同厚度泡沫铜SEM图像:(a)0.6 mm泡沫铜横截面;(b)1.0 mm泡沫铜横截面;(c)0.6 mm和1.0 mm泡沫铜纵截面
Fig. 1 SEM images of copper foam with different thicknesses: (a) 0.6 mm copper foam cross-section; (b) 1.0 mm copper foam cross-section; (c) 0.6 mm and 1.0 mm copper foam longitudinal section

1.2 实验步骤

图2为泡沫铜均热板示意图。采用扩散焊工艺将0.6 mm与1.0 mm的泡沫铜叠加焊接于均热板的上板壳,其中1.0 mm厚泡沫铜靠近热源侧,以增强蒸发端毛细力。焊接参数控制为:热压温度700~800 °C,压力30 MPa,持续时间40 min,速率10 °C/min。热压后整体吸液芯厚度压缩至0.15 mm,

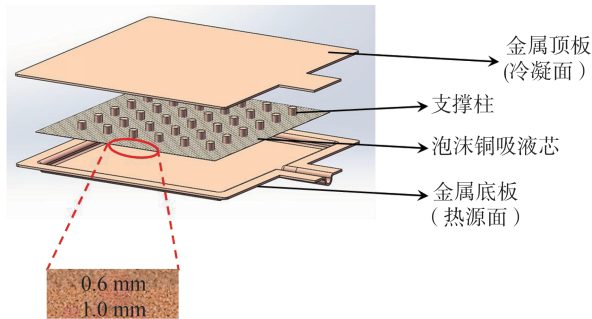


图2 泡沫铜均热板示意图
Fig. 2 Schematic diagram of copper foam vapor chamber

形成高密度微孔结构,显著提升毛细抽吸能力。在冷凝面通过扩散焊固定单层150 μm铜网,其网格结构可优化工质回流路径,随后焊接支撑柱以维持结构稳定。将上下板壳对齐后采用激光焊密封,焊接过程需控制热输入量,以避免热变形。注液管(直径2 mm)采用同步激光焊接工艺,焊接后进行X射线检测,确认焊缝质量,以确保接口密封。随后注入工质,注射前通过真空除气工艺排除内部气泡,确保工质填充均匀。最终封装前进行氦质谱检漏,泄漏率需低于1×10⁻⁸ Pa·m³/s。封装完成后,进行性能测试,以验证梯度结构的散热效能。

1.3 测试方法

热阻测试:参照T/CSMT-KJ 001—2022标准,采用单站VC性能测试机;
工况模拟测试:搭建芯片发热工作平台(67 °C, 1 min),采用FLUKE TI480PRO红外热像仪监测测温变化。

2 结果与讨论

2.1 不同热源面厚度吸液芯的热阻测试

针对电子设备散热需求,本实验系统设计了均热板吸液芯配置(见表1)。其中包含0.6 mm($S_{0.6}$)、1.0 mm($S_{1.0}$)的两种单层结构,以及0.6 mm+0.6 mm($D_{1.2}$)、1.0 mm+0.6 mm($D_{1.6}U_{1.0}$)、0.6 mm+1.0 mm($D_{1.6}U_{0.6}$)和1.0 mm+1.0 mm($D_{2.0}$)的4种双层组合结构。同时,为建立对照基准,额外采购了孔隙率为 $94\% \pm 2\%$ 的单层1.6 mm泡沫铜样品,并统一编号为 $S_{1.6}$ 。本研究系统测试了不同厚度泡沫铜作为吸液芯时的热阻特性,结果见表2。

表1 均热板吸液芯配置

Table 1 Configuration of wicks for vapor chamber

样品编号	结构类型	分层配置/ mm	总厚度/ mm	备注
$S_{0.6}$	单层结构	0.6	0.6	基础对照组
$S_{1.0}$	单层结构	1.0	1.0	基础对照组
$S_{1.6}$	单层结构	1.6	1.6	对照组
$D_{1.2}$	双层组合 结构	0.6+0.6	1.2	对称结构
$D_{1.6}U_{1.0}$	双层组合 结构	1.0+0.6	1.6	非对称结构
$D_{1.6}U_{0.6}$	双层组合 结构	0.6+1.0	1.6	非对称结构
$D_{2.0}$	双层组合 结构	1.0+1.0	2.0	对称结构

表2 热阻性能测试结果

Table 2 Thermal resistance properties

样品编号	65 W 下热阻 值/($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	100 W 下热 阻值/($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	热源面 厚度/mm	热压后吸 液芯厚度/ mm
$S_{0.6}$	0.102	0.117	0.6	0.15
$S_{1.0}$	0.095	0.095	1.0	0.15
$S_{1.6}$	0.117	0.111	1.6	0.15
$D_{1.2}$	0.100	0.097	0.6+0.6	0.15
$D_{1.6}U_{1.0}$	0.080	0.082	1.0+0.6	0.15
$D_{1.6}U_{0.6}$	0.120	0.114	0.6+1.0	0.15
$D_{2.0}$	0.094	0.091	1.0+1.0	0.15

测试在两种变形量工况(压缩至0.30 mm和0.15 mm)和两种功率(65 W和100 W)条件下进行。测试结果表明,泡沫铜在压缩至0.15 mm时,孔隙结构致密化,增大了与热源及相邻层的实际接触面积,

降低了界面热阻。这种变形量设计既保证了足够的接触压力,又避免了过度压缩导致孔隙完全闭合。在 $D_{1.6}U_{1.0}$ 中,压缩后形成的梯度孔隙结构展现出显著优势:其中1.0 mm层提供主要导热通道,利用其较厚层的低热阻特性实现高效传热;0.6 mm层作为辅助散热层,通过薄层结构快速将热量导出至热源边缘。值得注意的是,压缩至0.15 mm的压缩量是泡沫铜的最佳变形区间,过小(如0.30 mm)会导致接触不充分,过大则可能破坏孔隙结构。测试数据显示,在该变形量下,热阻较0.30 mm工况降低约30%(热阻由 $0.114\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 降至 $0.080\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$),这一结果不仅验证了压缩量对热阻的非线性影响,也为电子设备散热设计中吸液芯的优化配置提供了重要实验依据。

2.2 协同效应与实验验证

实验对比了单层1.6 mm泡沫铜($S_{1.6}$)与双层叠加至1.6 mm的泡沫铜($D_{1.6}U_{1.0}$),系统研究了厚度等效条件下双层结构的热阻特性及其摆放顺序的影响。实验结果显示,单层或双层泡沫铜作为均热板的吸液芯时,热阻性能存在显著差异。如图3所示,单层1.6 mm泡沫铜在65 W热负荷下的热阻为 $0.117\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$,而采用梯度孔隙率设计的双层结构($D_{1.6}U_{1.0}$)可使热阻进一步降低至 $0.080\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$,降幅达到32%。这种性能提升主要得益于精心设计的孔隙率梯度:蒸发端采用1.0 mm厚度的泡沫铜,其200~450 μm 的大孔径骨架结构显著降低了工质蒸发阻力;而冷凝端0.6 mm厚度的泡沫铜则通过更密集的骨架结构增强了毛细抽吸力。这种设计形成的毛细压力差有效驱动了冷凝液的定向流动,成

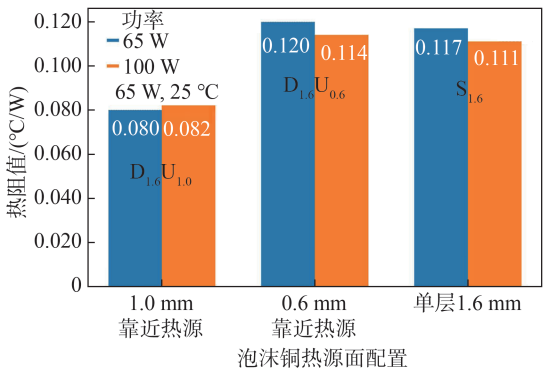


图3 吸液芯厚度均为1.6 mm泡沫铜的热阻对比图
Fig. 3 Thermal resistance comparison for 1.6 mm copper foam wicks

功缓解了薄型化设计导致的局部干涸问题^[12]。而150 μm 铜网通过扩散焊与泡沫铜结合,其微结构比泡沫铜骨架更致密,能有效填充泡沫铜表面的不规则孔隙,降低工质与金属界面的接触角,从而提升润湿性。

为系统研究不同冷凝材料对均热板热阻性能的影响,实验还设置了三种典型材料进行对比测试(图4):纯铜片作为传统基准材料,其热导率高但缺乏毛细结构;单层铜网具有网状孔隙结构,可提供一定毛细力;0.6 mm泡沫铜则采用多孔骨架设计,兼具导热与毛细抽吸能力。在控制热负荷为65 W的条件下,实验测得三种材料的热阻分别为:纯铜片0.150 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$,单层铜网0.120 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$,0.6 mm泡沫铜0.080 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。结果表明,单层铜网结构显著优化了热传导性能,将接触热阻从纯铜片的0.105 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 降低至0.080 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$,降幅达23.8%。相比之下,0.6 mm泡沫铜作为冷凝面时,其对接触热阻的改善效果未达到预期。这说明铜网的规则孔径(150 μm)为冷凝液提供了低阻力通道,与梯度泡沫铜的孔隙形成了“粗—细—粗”三级流道:蒸发端大孔—过渡层中孔(泡沫铜)—铜网小孔。这种结构平衡了毛细力与流动阻力,避免了回流液膜断裂^[13]。

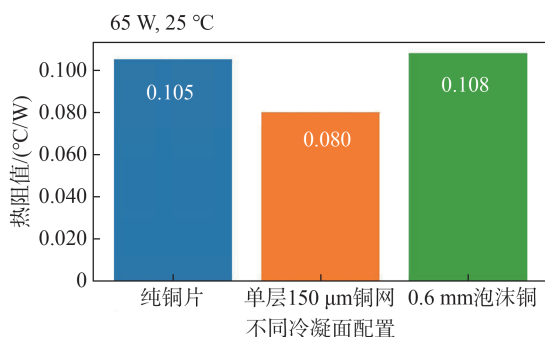


图4 不同冷凝面配置的热阻对比图

Fig. 4 Thermal resistance comparison across condenser surface configurations

从图3可知,当双层泡沫铜结构反向布置(0.6 mm层靠近热源面)时,热阻性能显著退化。在65 W热负荷条件下,热阻从原始设计的0.080 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 上升至0.120 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$,增幅高达50%;而在100 W负荷下,热阻也从0.082 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 升至0.114 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$,增幅达到39%。这种性能下降源于毛细力与热流方向的不匹配:反向布置导致靠近热源的0.6 mm层(孔

径150~250 μm)因孔径较小而增大了蒸发阻力,而1.0 mm层在冷凝侧又无法提供足够的毛细压差,而造成回流液膜断裂。与原始设计相比,这种反向布置会破坏三级流道的协同作用:在65 W负荷下表现为热源面出现局部干涸;而在100 W负荷时则因蒸汽回流不足引发热阻叠加效应。这些实验结果充分验证了原始设计中孔隙率梯度方向与热流方向匹配的关键性,其通过蒸发端大孔→过渡层中孔→铜网小孔的结构设计,成功实现了毛细力与回流效率的最佳平衡。

图5对比了4种吸液芯结构($D_{1.6}U_{1.0}$ 、 $D_{1.6}U_{0.6}$ 、 $S_{1.6}$ 、 $S_{0.6}$)的温差(ΔT)表现,结果表明:双梯度结构($D_{1.6}U_{1.0}$,且1.0 mm层靠近热源面)的温差为5.2 $^{\circ}\text{C}$,显著优于单层结构($S_{1.6}$ 的温差为7.6 $^{\circ}\text{C}$),且 $S_{0.6}$ 的吸液芯的温差高达10.3 $^{\circ}\text{C}$ 。这一差异凸显了梯度设计在优化热传导路径中的关键作用——通过孔隙率与厚度的协同调控,双梯度结构有效降低了热阻,而单层结构因缺乏梯度过渡,导致热量积聚现象加剧。

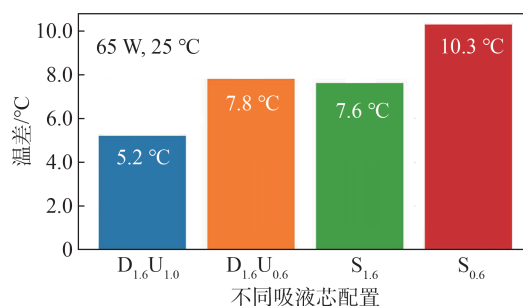
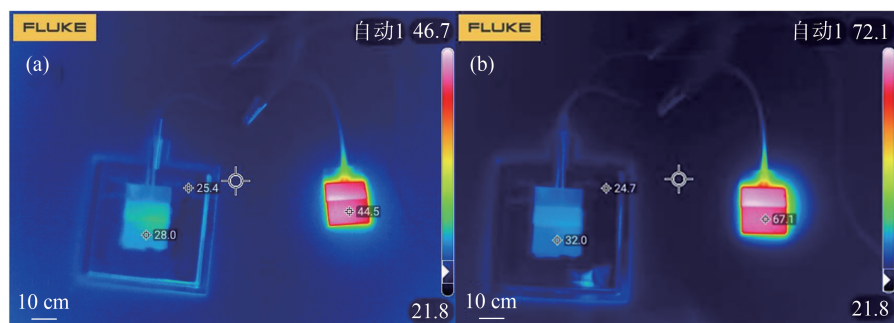


图5 不同热阻温差对比图

Fig. 5 Comparison of temperature differences for samples with different thermal resistances

梯度孔隙率与铜网的组合将整体热阻降至0.080 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。其中,蒸发端高孔隙率加速相变,铜网冷凝面则通过优化界面接触和回流效率,共同减少热阻。如图6(a, b)所示,在模拟10 W/cm^3 和15 W/cm^3 高功率密度芯片发热环境中,该组合结构使AAU模块结温稳定控制在28 $^{\circ}\text{C}$ (环境温度24.5 $^{\circ}\text{C}$)和32 $^{\circ}\text{C}$ (环境温度24.8 $^{\circ}\text{C}$),这验证了梯度结构对高热流工况的适配性。特别值得注意的是,系统启动时间缩短至8 s,这主要归因于蒸发端0.15 mm热压微孔形成的快速润湿通道,该设计可有效满足5G基站频繁启停的工作需求^[14-17]。实验数据表明,这

图6 样品(D_{1.6}U_{1.0})红外热像图Fig. 6 Infrared thermography images of D_{1.6}U_{1.0} sample: (a)24.5 °C; (b)24.8 °C

种多尺度结构设计不仅优化了热传输路径,更通过孔隙率梯度与铜网微结构的协同作用,实现了高效散热与快速响应的双重突破。

2.3 长期可靠性验证

图7展示了D_{1.6}U_{1.0}泡沫铜梯度均热板的多周期热阻测试数据(1、5、10、30、60 d)。测试数据显示,热阻保持零衰减($\Delta R_{th} < 0.005$ °C/W),表明该结构在60 d测试周期内具备优异的界面热传输稳定性。需要说明的是,60 d数据只是初步观察结果,接下来会进一步将测试周期延长至365 d,从而更全面地评估材料性能的变化。这种零衰减特性源于三方面协同作用:首先,扩散焊工艺使单层铜网与泡沫铜界面形成冶金结合,其150 μm 规则孔径有效填充泡沫铜表面孔隙,抑制了工质长期循环导致的界面氧化;其次,梯度孔隙结构(蒸发端大孔→冷凝端中孔)维持的毛细压力差持续驱动冷凝液回流,避免60 d后出现局部干涸;最后,200~450 μm 大孔骨架(蒸发端)与致密中孔结构(过渡层)形成热膨胀缓冲

层,在 $\Delta T=10\sim 80$ °C工况下仍保持流道完整性。对比单层1.6 mm泡沫铜结构(初始热阻0.117 °C/W),梯度设计的热稳定性提升超过32%(温差由7.6 °C降至5.2 °C),且温度波动幅度长期稳定在5.2 °C以内,验证了其适用于高可靠性散热场景。

3 结 论

本研究提出的梯度孔隙率泡沫铜均热板设计方案,通过创新的三级流道结构和孔隙率梯度优化,在5G通信设备散热领域取得显著突破。实验表明,该方案能使AAU模块温度稳定在32 °C,温度波动幅度显著减小,热阻性能达到行业领先水平。其超薄热压层设计和优化的孔隙梯度,在保证高效散热的同时,大幅提升了系统启动速度。该设计不仅能满足当前5G基站的高功率密度散热需求,其普适性结构也为未来高功率电子器件的散热提供了新思路。后续研究可进一步优化材料组合和工艺参数,以拓展其应用场景。

参考文献:

- [1] 何立臣,洪元,杨立明,等.有源相控阵雷达天线冷却技术研究进展[J].航天器环境工程,2022,39(3): 316-325.
- [2] 王硕,邵雪,姜国伟,等.泡沫金属的传热特性及其在暖通行业中的应用探索[J].金属世界,2022(6): 6-11.
- [3] 王迅,肖冲,李月月.甲醇、丙酮及其二元混合工质脉动热管的启动特性[J].化工进展,2016,35(9): 2678-2684.
- [4] 冯亚利,黄胜利,夏文娟,等.不同工质热管均温板散热及环境适应性试验研究[J].电子机械工程,2020,36(6): 16-19.
- [5] 郝剑,朱崧,吴胜,等.均热板的研究现状及应用前

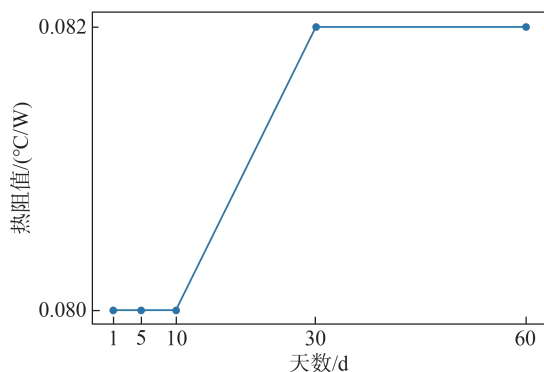
图7 60 d内均热板(吸液芯为D_{1.6}U_{1.0})热阻变化折线图

Fig. 7 Thermal resistance variation over 60 days for vapor chamber with a 1.0 mm+0.6 mm wick

- 景[J].铜业工程, 2023(6): 104-116.
- [6] 黄南, 温志强, 荣智林, 等. VC技术在半导体热管理应用的性能研究[J]. 现代电子技术, 2022, 45(7): 143-147.
- [7] 王亦伟, 张建新, 岑继文, 等. 大功率LED热管散热器的模块化设计与研究[J]. 半导体光电, 2012, 33(4): 494.
- [8] 刘波, 杨云霄, 朱晔, 等. 功率半导体模块的温控散热器设计方法[J]. 电源学报, 2020, 18(1): 61-67.
- [9] 罗佳利, 汪亚桥, 吕树申, 等. 梯度结构修饰铜网的毛细特性[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(6): 1531-1537.
- [10] 刘腾庆, 张尧康, 汪双凤. 强化超薄均热板传热性能的研究进展[J]. 化工进展, 2024, 43(12): 6592-6607.
- [11] 袁甲, 崔晨乙, 齐宝金, 等. 铜基选择浸润性网膜油水分离实验研究[J]. 高校化学工程学报, 2019, 33(1): 63-70.
- [12] 柴铭涵. 梯度多孔吸液芯输运特性实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2023.
- [13] 谭立. 梯度结构表面调控冷凝传热的实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [14] 张建. 有源天线处理单元散热结构优化研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2022.
- [15] 周文杰. 铜质均热板制造工艺及其传热性能分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [16] Sudhakar S, Weibel J A, Garimella S V. A methodology to predict the power dissipation limits of high-heat-flux vapor chambers considering boiling in the evaporator[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 253: 127622.
- [17] Cui P L, Huang Y X, Liu R K, et al. Three-tier hierarchical porous structure with ultrafast capillary transport for flexible electronics cooling[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(7): 11199-11212.

Heat Dissipation Characteristics of Vapor Chambers for 5G Devices with Gradient Wicks Based on Copper Foam/Copper Mesh Composite

Lei Zixuan, Zhang Wenlu, Wu Sheng, Zhang Baiwen, Hong Ming, Chen Yan, Zhang Haifeng

(Jiangxi Copper Technology Institute Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: This paper innovatively proposed thin vapor chambers based on gradient porosity copper foam/copper mesh composite structure to meet heat dissipation requirements of 5G communication equipment with high power density. Through two-way pore gradient design, thickness of copper foam was compressed from 1.6 mm to 0.15 mm by hot pressing technology at the evaporation end, forming a high-density microporous structure to enhance capillary. The condensation end was configured with 150 μm pore copper mesh to optimize the working medium reflux path, significantly reducing flow resistance. Experimental results showed that the design can reduce temperature fluctuation from 10.3 $^{\circ}\text{C}$ to 5.2 $^{\circ}\text{C}$ (a decrease of 49%) under a heat load of 65 W, with a thermal resistance (ΔR_{th}) of only 0.08 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$. In particular, the gradient structure shortened start-up time to 8 s, providing a new idea for heat dissipation of miniaturized electronic devices. This study provided a new paradigm for the miniaturization and heat dissipation of high-power electronic devices, balancing efficient heat transfer and structural reliability. Design concept of the three-stage flow channel (large hole for evaporation end $\rightarrow$ middle hole for transition layer $\rightarrow$ small hole for copper mesh) can be extended to other high heat density application scenarios.

Key words: high-power-density electronics; copper foam with gradient porosity; vapor chamber; thermal management; microporous structure

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.03.004

引文格式: 雷子璇, 张文璐, 吴胜, 张柏文, 洪明, 陈岩, 张海丰. 泡沫铜/铜网复合梯度均热板的5G散热特性研究[J]. 铜业工程, 2026(3): 33-38.

Lei Zixuan, Zhang Wenlu, Wu Sheng, Zhang Baiwen, Hong Ming, Chen Yan, Zhang Haifeng. Heat dissipation characteristics of vapor chambers for 5G devices with gradient wicks based on copper foam/copper mesh composite [J]. Copper Engineering, 2026(3): 33-38.