

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.03.15

# 基于 Gyroid 结构的宏观-微观耦合式散热器设计与性能研究

杨妍<sup>1,2</sup>, 李华桥<sup>1</sup>, 张子浩<sup>1</sup>, 唐金焱<sup>1</sup>, 赵阳<sup>1</sup>, 王东伟<sup>1</sup>

1. 中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术重点实验室, 四川 成都 610213

2. 核能增材制造四川省重点实验室, 四川 成都 610213

**摘要:** 针对国产高功率芯片在有限空间内面临的热流密度剧增、局部过热严重的散热瓶颈问题, 提出了一种基于增材制造的宏观-微观耦合式散热解决方案。研究以三重周期极小曲面(TPMS)中的 Gyroid 构型为核心, 将其填充于传统翅片通道以构建复合散热结构。通过拓扑优化与有限元分析, 设计并制备了三种不同结构参数的 AlSi10Mg 合金散热器样件(孔隙率/比表面积分别为 64%/3.8、71%/3.1、80%/2.2)。环境试验结果表明: 在自然对流条件下, 最优 Gyroid 结构散热器(64%孔隙率, 3.8比表面积)相比传统翅片散热器最高温度降低 16.2%; 在强制对流条件下, 最高温度降低 9.7%。同时, 该结构显著改善了温度均匀性。本研究阐明了关键结构参数对散热性能的协同作用机理, 为基于增材制造的国产芯片高性能散热器设计提供了理论与实验依据。

**关键词:** 增材制造; 三重周期极小曲面; Gyroid 结构; 芯片散热; 拓扑优化

中图分类号: TH16 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)03-0111-08

## Design and Thermal Performance Study of a Macro-Micro Coupled Heat Sink based on Gyroid Structures

YANG Yan<sup>1,2</sup>, LI Huaqiao<sup>1</sup>, ZHANG Zihao<sup>1</sup>, TANG Jinyao<sup>1</sup>, ZHAO Yang<sup>1</sup>, WANG Dongwei<sup>1</sup>

1. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China

2. Nuclear Power Additive Manufacturing Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610213, China

**Abstract:** This work addresses the critical thermal management challenge of dramatically increasing heat flux and severe localized overheating in domestically produced high-power chips within confined spaces. A macro-micro coupled cooling solution based on additive manufacturing is proposed. The work employs the Gyroid configuration, a type of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) structure, as the core element, integrating it into the channels of traditional fins to construct a composite heat dissipation architecture. Through topology optimization and finite element analysis, three AlSi10Mg alloy heat sink prototypes with different structural parameters (with porosity/specific surface area of 64%/3.8, 71%/3.1, and 80%/2.2, respectively) were designed and fabricated. Environmental test results demonstrate that under natural convection conditions, the optimal Gyroid structure heat sink (64% porosity, 3.8 specific surface area) achieved a 16.2% reduction in maximum temperature compared to a conventional finned heat sink. Under forced convection conditions, a reduction of 9.7% was observed. Furthermore, this structure significantly improved temperature uniformity. This work elucidates the synergistic mechanism of key structural parameters on thermal performance, providing both theoretical and experimental foundations for the design of high-performance heat sinks for domestic chips based on additive manufacturing.

**Keywords:** additive manufacturing; TPMS; Gyroid structure; chip thermal management; topology optimization

**引用格式:** 杨妍, 李华桥, 张子浩, 等. 基于 Gyroid 结构的宏观-微观耦合式散热器设计与性能研究[J]. 电焊机, 2026, 56(3): 111-118.

**Citation:** YANG Yan, LI Huaqiao, ZHANG Zihao, et al. Design and Thermal Performance Study of a Macro-Micro Coupled Heat Sink based on Gyroid Structures[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(3): 111-118.

收稿日期: 2025-12-14 修回日期: 2026-01-18

作者简介: 杨妍(2000—), 女, 硕士, 主要从事机械系统动力学、仪器仪表与控制研究。E-mail: yangyxjt@163.com。

## 0 引言

散热器等热管理设备是保障航空航天、汽车动力及电子等领域高功率装置可靠运行的关键组件<sup>[1]</sup>。在电子设备持续向高集成度、高性能方向发展的背景下,如何高效耗散其产生的热量、避免因过热引发的元器件失效,成为亟待解决的核心技术挑战。因此,开展具备优异散热性能与良好可制造性的新一代散热器创新设计具有重要的理论与工程意义<sup>[2-4]</sup>。

传统散热结构多采用板翅、针翅和百叶翅等几何形态相对简单的形式,其优化手段主要集中于尺寸与形状参数的调整<sup>[5-6]</sup>。由于设计自由度有限,难以充分满足现代高功率密度电子设备的散热需求。为此,拓扑优化技术因其高度的几何构型自由度而展现出显著优势。该技术最初由 Bendsøe 等人<sup>[7]</sup>提出,应用于结构静力学领域以寻求材料最优分布,近年来已逐步扩展至传热学领域,并在热管理结构设计中取得一系列成果<sup>[8-9]</sup>。

随着增材制造技术的快速发展,各类点阵结构作为新型翅片方案受到广泛关注<sup>[10-11]</sup>。这类结构由周期性排列的杆件或晶胞构成,兼具轻量化、高比强度、刚度以及良好的能量吸收特性。相较于传统翅片,点阵结构具有更高的比表面积,且其三维拓扑有助于诱导复杂的流场结构,从而提升传热系数<sup>[12-13]</sup>。在增材制造与计算机辅助设计技术推动下,基于极小曲面的周期点阵结构进一步展现出应用潜力。相比传统杆类点阵结构,这类结构具有建模简便、数据量小与可调性强等特点,可通过构造光滑连通的三维孔道,在实现轻量化的同时优化热流路径,增强传热过程中的热耗散<sup>[14]</sup>。

近年来,三重周期极小曲面(Triply Periodic Minimal Surface, TPMS)结构在强化传热领域取得重要进展。研究表明,TPMS 结构相比传统结构具有明显优势。例如,Li 等人<sup>[15]</sup>通过数值模拟对比了印刷电路板换热器与 TPMS 换热器的流动与传热特性,发现 TPMS 结构能显著增强流体湍流动能,使整体热性能提升 15% 以上。Qureshi 等人<sup>[16]</sup>通过实验证实,在相变材料系统中 TPMS 泡沫的传热性能优于传统金属泡沫,其中 Primitive 和 Gyroid 结构在自

然对流条件下表现最佳。

在结构参数对散热性能的影响方面,Cheng 等人<sup>[17-18]</sup>系统揭示了孔隙率、孔径及孔密度等几何参数与流动阻力、传热系数及力学性能之间的关联,为拓扑结构的定制化设计提供了快速方法。Wang 等人<sup>[19]</sup>提出一种基于 TPMS 的多孔结构高效优化方法,实现了壁厚与周期连续变化的散热性能提升。Modrek 等人<sup>[20]</sup>通过拓扑优化将复杂构型转化为 TPMS 点阵结构。Suzuki 等人<sup>[21]</sup>结合机器学习方法,量化了晶格结构特征与传热性能之间的映射关系。杨晓军等人<sup>[22]</sup>研究了 TPMS 结构在空气-燃油换热器中的应用,重点分析了 Gyroid 型结构的参数对传热性能的影响规律。此外,材料选择也对 TPMS 结构的散热与隔热性能具有关键作用。Jafari 等人<sup>[23]</sup>开发的复合材料两相散热器显著提升了散热效率。通过分析多层复合材料的热响应特性,优化材料分布可有效调控热流路径,实现对热能传导的精确控制,可以为发展新一代高性能热管理器件提供了新思路<sup>[24-25]</sup>。

综上所述,TPMS 结构在提升散热器性能方面已展现出较大潜力,然而面向国产高功率芯片在紧凑空间内热流密度剧增、局部过热严重的特定工程瓶颈,仍存在以下不足:(1)针对芯片散热场景,对孔隙率与比表面积等关键结构参数的协同影响机制缺乏系统研究,未能明确其与散热性能之间的定量关系;(2)缺乏一套融合拓扑优化、性能仿真与增材制造工艺约束的完整设计方法,难以直接指导面向工程应用的高性能散热器设计与制备。为此,本文聚焦于国产芯片的紧迫散热需求,提出一种基于 Gyroid 结构的宏观-微观耦合式散热器设计方案。通过参数化设计、有限元仿真与自然/强制对流环境试验,阐明孔隙率与比表面积的协同作用机理,量化其对散热性能的影响规律,验证点阵结构对芯片散热性能的增强效果,为国产化芯片的高效热管理提供新的解决方案。

## 1 散热器点阵结构设计及数值仿真

### 1.1 点阵结构及散热器结构设计

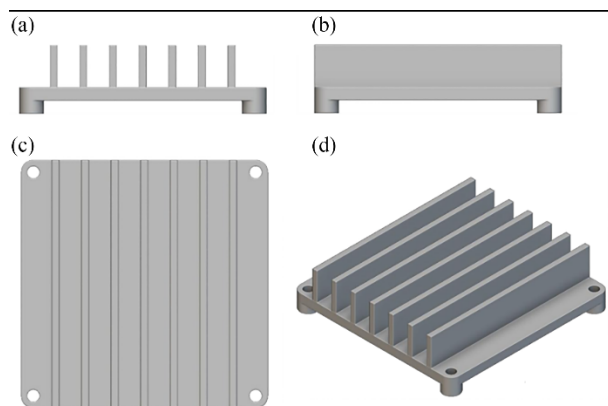
TPMS 作为一类具有零平均曲率特征的周期性

隐式曲面,其中 Gyroid 结构作为在自然界中发现的典型代表,展现出独特的几何特性与力学性能。其数学表达式可表述为<sup>[22]</sup>:

$$C = \sin\left(\frac{2\pi}{L}y\right)\cos\left(\frac{2\pi}{L}x\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{L}z\right)\cos\left(\frac{2\pi}{L}y\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{L}x\right)\cos\left(\frac{2\pi}{L}z\right) \quad (1)$$

式中  $C$  为偏移参数,  $L$  为周期长度。

本文针对半导体电子元器件散热需求,以 Gyroid 结构为基础分析孔隙率与比表面积两个关键结构参数对传热性能的影响,并与图 1 所示的基本翅片型散热器进行对比。



(a) 主视图; (b) 侧视图; (c) 俯视图; (d) 三维结构图

图1 基本型散热器

Fig. 1 Basic type heat sink

### 1.1.1 孔隙率的影响机制

孔隙率通过调控流体通道与固体导热路径的占比来影响散热性能。高孔隙率有利于流体流动、强化对流换热,但会减少固体材料,削弱导热能力;低孔隙率可以增强导热,但阻碍流动、限制对流效率。将孔隙率控制在 60%~85% 内,有利于在维持有效导热网络的同时,为对流换热提供充足空间。

### 1.1.2 比表面积的影响机制

晶格结构在散热应用中的优势很大程度上源于其高比表面积特性。比表面积的增加能显著扩展散热面积,从而增强对流与辐射换热能力,有助于降低局部热流密度、缓解热点问题。在高温或近真空环境中,根据斯特藩-玻尔兹曼定律,辐射换热量与表面积成正比,表示为:

$$Q = \sigma \cdot A \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (2)$$

式中  $\sigma$  是斯特藩常数;  $A$  是表面积;  $\varepsilon$  是发射率;  $T$

是温度。

因此,高比表面积结构在辐射散热方面具有天然优势,借助增材制造技术,可制备具有微尺度表面特征的复杂晶格,进一步强化换热。

### 1.1.3 点阵散热器的协同设计

比表面积与孔隙率需协同设计以共同提升散热性能。高比表面积配合适当孔隙率可同时强化对流与导热。然而,孔隙率过高常导致比表面积下降和结构刚度削弱;比表面积过高在极高孔隙率下也可能引起结构失稳。实际设计中,对非承重或轻载部件,可采用高孔隙率、高比表面积设计以追求极致散热;对需要承受机械载荷的部件,则宜采用中低孔隙率配合较高比表面积的方案,以兼顾散热与结构完整性。

根据上述分析,本文设计了三种不同孔隙率与比表面积的 Gyroid 散热结构。采用 nTopology 软件进行三维建模与结构设计。将基础散热器几何模型通过 Implicit Body 模块转换为隐式表达形式。选用 Lattice Body 或 Surface Lattice 节点生成体积或表面形式的晶格结构。通过定义晶格单元类型、特征尺寸及空间分布参数,并结合外力载荷与材料属性,对晶格进行拓扑优化。所设计的三种晶格结构如图 2 所示, Gyroid 三周期极小曲面 1 型晶格结构为孔隙率 64%,比表面积 3.9; 2 型为孔隙率 70%,比表面积 3.5; 3 型为孔隙率 74%,比表面积 3.0。

通过布尔运算将上述基础晶格与散热器基体融合,形成复合散热结构,如图 3 所示。三种 Gyroid 晶格与翅片交叉分布,旨在协同增强热传递。各散热器的关键结构参数如表 1 所示。

## 1.2 散热器点阵结构有限元仿真及性能分析

为评估不同点阵结构对散热器热传输效率的影响,采用有限元分析软件对散热器样件进行稳态热仿真。首先,在 nTopology 软件中使用 Mesh from Implicit Body 对隐式体格式的散热器模型进行网格划分。为确保模型及激光成形精度,网格尺寸设置为 300  $\mu\text{m}$ ,在保证几何特征准确捕捉的同时,避免因网格过大导致的模型失真问题。进一步地,将生成的网格模型导入 ANSYS 软件,进行实体网格填充。所有散热器均采用 AlSi10Mg 合金材料,其导热系数设置为 140 W/(m·K)。仿真中设定芯片热

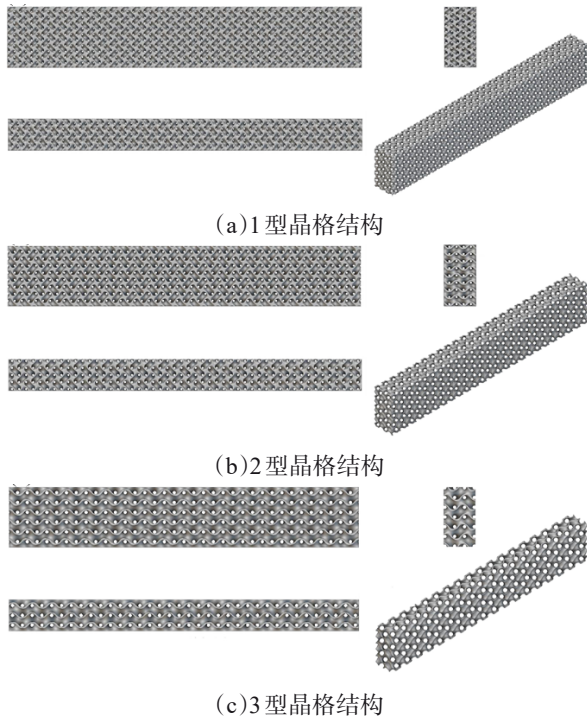


图2 三种 Gyroid 晶格结构

Fig. 2 Three types of Gyroid lattice structures

源温度为 125 °C,并在晶格结构表面施加强制对流边界条件,对流换热系数为 350 W/(m<sup>2</sup>·K),表面辐射率设定为 0.05。

散热器的体积加权平均温度的计算公式为:

$$T_{avg} = \frac{\sum(T_i \cdot V_i)}{\sum V_i} \quad (3)$$

式中  $T_i$  为单元温度;  $V_i$  为单元体积。

基本型散热器的仿真结果如图 4 所示,其平均温度为 105.65 °C,底部最高温度为 121.04 °C,翅片温度分布在 91.54 °C至 104.82 °C之间。

三种 Gyroid 结构散热器的温度场分布如图 5~图 7 所示,具体仿真数据见表 2。Gyroid 结构 1 型散热器的平均温度最低,为 75.68 °C,底部最高温度为 118.29 °C,翅片区域温度均匀下降至约 77.40 °C。Gyroid 结构 2 型散热器的平均温度为 78.35 °C,底部最高温度为 118.25 °C。Gyroid 结构 3 型散热器的平均温度升至 84.80 °C,底部最高温度为 119.73 °C。

仿真结果表明,Gyroid 点阵结构能显著提升散热器的热性能。其中 Gyroid 结构 1 型散热器表现出最优的散热效能,其平均温度较基本型散热器降低约 28.4%。对比三种 Gyroid 结构散热器可发现,随

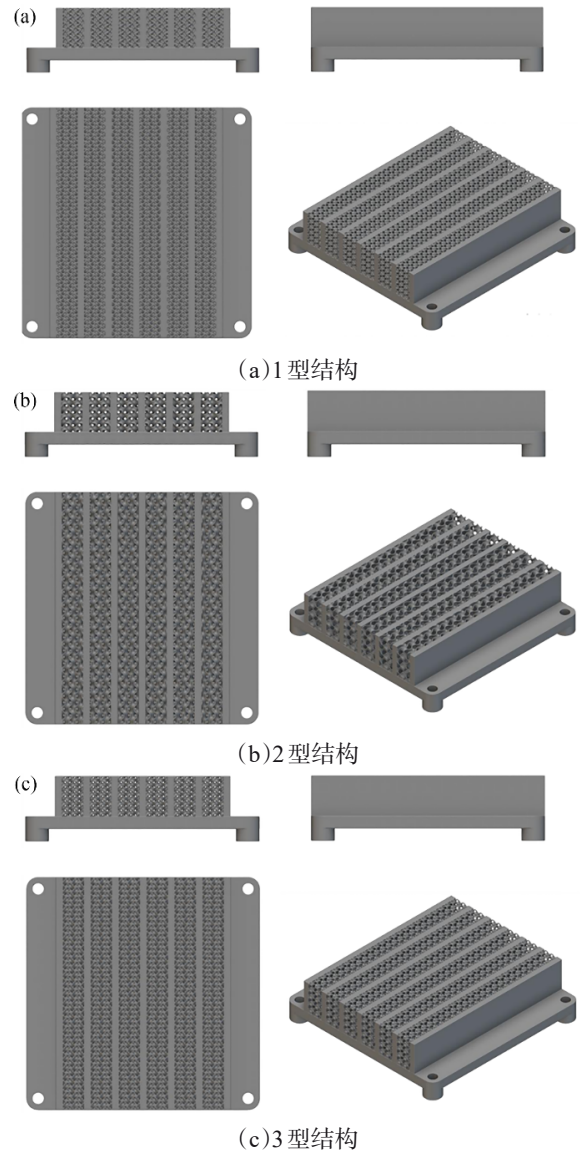


图3 Gyroid 结构散热器

Fig. 3 Gyroid-structured heat sinks

表1 散热器类型及其比表面积和孔隙率

Table 1 Heat sink types with specific surface area and porosity

散热器类型	孔隙率/%	比表面积/(表面积/体积)
Gyroid 结构 1 型	64	3.8
Gyroid 结构 2 型	71	3.1
Gyroid 结构 3 型	80	2.2

着孔隙率增大、比表面积减小,散热器的平均温度呈现上升趋势。这说明在本文的研究参数范围内,较低的孔隙率与较高的比表面积组合更有利于提升整体散热效率。仿真结果从传热机理上验证了通过协同优化孔隙率与比表面积可实现散热器性能的显著提升。

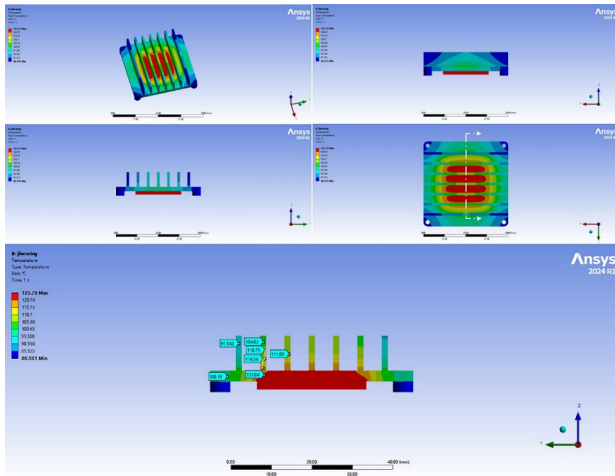


图4 基本型散热器仿真结果

Fig. 4 Simulation results of the basic-type heat sink

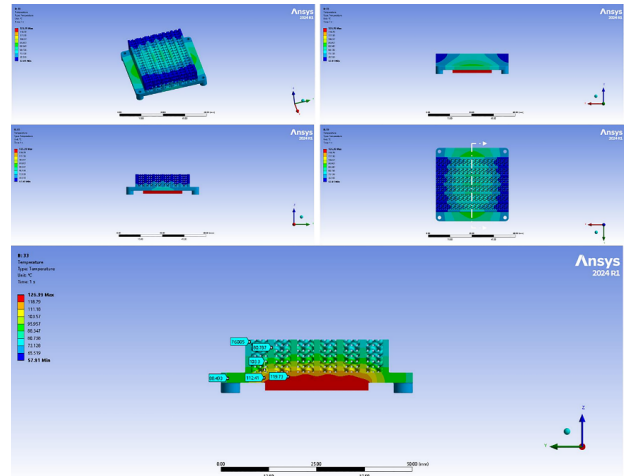


图7 Gyroid 结构3型散热器仿真结果

Fig. 7 Simulation results of Gyroid structure heat sink Type 3

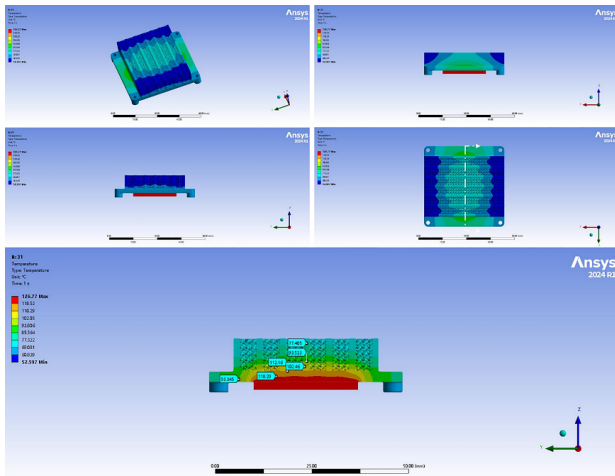


图5 Gyroid 结构1型散热器仿真结果

Fig. 5 Simulation results of Gyroid structure heat sink Type 1

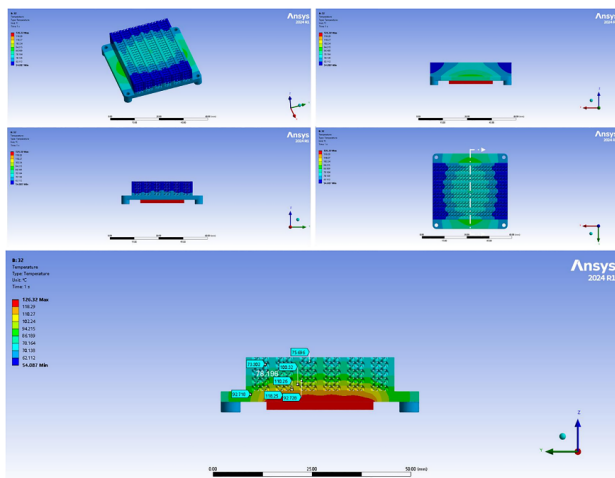


图6 Gyroid 结构2型散热器仿真结果

Fig. 6 Simulation results of Gyroid structure heat sink Type 2

表2 仿真模拟得到的散热器平均温度

Table 2 Average temperature of heat sinks obtained from simulation

散热器类型	散热器平均温度/°C	散热器整体最低温度/°C	散热器整体最高温度/°C
基本型散热器	105.65	80.50	125.79
Gyroid 结构1型	75.68	52.60	126.77
Gyroid 结构2型	78.36	54.09	126.32
Gyroid 结构3型	84.80	57.91	126.39

## 2 散热器点阵结构环境试验验证

### 2.1 自然对流试验

为验证各类散热器在恒定高热负载工况下的实际散热性能与可靠性,开展热环境试验。采用增材制造工艺制备了不同结构类型的AlSi10Mg合金散热器样件,并对其进行了对比性热性能测试。基本型散热器见图8a,Gyroid结构散热器见图8b。

试验模拟极端热环境,采用红外热像仪对散热器表面温度场进行测量,以评估其工作稳定性。测试时,在散热器底部加载加热片并维持120 °C恒温,待加热2 h系统达到热稳态后,使用红外热像仪采集散热器表面温度分布,测试装置及过程见图9。选取测温区域内的最高温度作为性能对比指标。

图10为AlSi10Mg合金基本型散热器与Gyroid结构散热器在预试验中的典型热分布对比。基本型散热器可见明显的局部热聚集现象,而具有Gyroid晶格结构的散热器则表现出更均匀的温度分

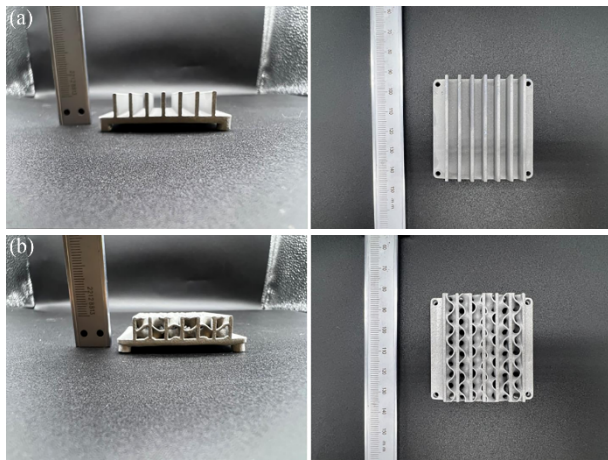


图8 AlSi10Mg基本型与Gyroid结构散热器实物

Fig. 8 Physical specimen of the basic type and Gyroid structure AlSi10Mg heat sink

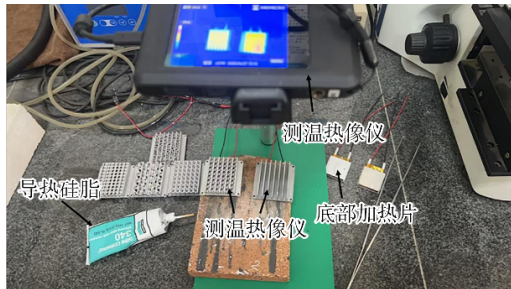


图9 热成像仪装置及测温过程

Fig. 9 Thermal imaging measurement setup and temperature acquisition process

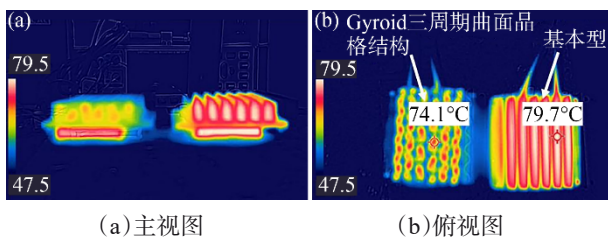


图10 AlSi10Mg合金基本型散热器和Gyroid结构散热器的热分布情况

Fig. 10 Thermal distribution of AlSi10Mg basic-type and Gyroid structure heat sink

布。表3为预试验测得的散热器最高温度。结果表明,在相同测试条件下,Gyroid结构散热器的整体温度显著低于基本型散热器,初步证明了其更优的散热能力。尽管基本型散热器的测试数据受到环境温度、湿度及自然对流波动的影响,但在同批次、同环境中获得的对比数据仍具有参考价值。该预试验为后续更严格的上机测试奠定了基础。

基于上述预试验结果,为进一步量化散热器在

表3 预实验获得的散热器最高温度

Table 3 Maximum temperatures of heat sinks obtained from pre-experimental bench tests

散热器类型	材料	散热器温度/°C
基本型散热器	AlSi10Mg	79.4
Gyroid结构1型散热器	AlSi10Mg	74.1

模拟真实工作场景下的性能,依据GB/T 2423.2—2008《电工电子产品环境试验 第2部分:试验方法》进行上机试验。将恒温箱环境温度设定为55°C,分别将基本型与Gyroid结构散热器安装于电路板的芯片上,替换原装散热器,测试平台如图11所示。采用接触式热电偶持续监测芯片结温,测试总时长达10 800 s(3 h),记录完整的升温及稳态过程。



图11 定温烘箱和测温装置实物及芯片电路板

Fig. 11 Physical setup of constant-temperature oven, temperature measurement device, and chip circuit board

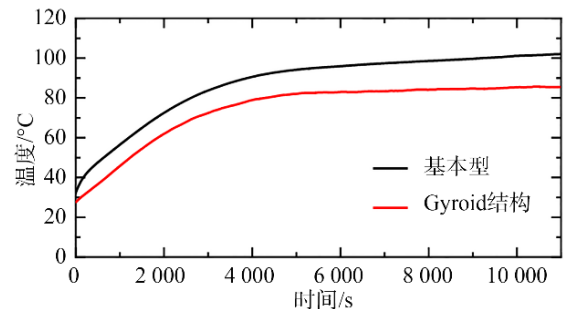


图12 自然对流条件下AlSi10Mg基本型和Gyroid结构散热器温度变化情况

Fig. 12 Temperature variation comparison between AlSi10Mg basic type and Gyroid heat sinks obtained under natural convection conditions

表4 自然对流条件下上机获得的散热器最高温度

Table 4 Maximum temperatures of heat sinks obtained under natural convection conditions

散热器类型	材料	初始温度/°C	最高温度/°C	结束温度/°C
基本型散热器	AlSi10Mg	32.2	101.9	102.1
Gyroid结构1型	AlSi10Mg	27.6	85.4	85.5

图12为AlSi10Mg基本型与Gyroid结构散热器在测试周期内的温度变化曲线。具体温度数据见

表4。试验数据显示,Gyroid结构1型散热器的最高温度为85.4℃,且在长达3h的测试中表现出优异的温度稳定性。相比之下,基本型散热器仅3205s即攀升至相近温度水平,其温升速率明显更快,最终稳态温度高达101.9℃。

## 2.2 强制对流试验

在自然对流测试的基础上,选取性能最优的Gyroid结构1型散热器与基本型散热器,进行了强制对流条件下的对比试验。在相同环境基础上增加风扇提供强制风冷,其温度变化曲线如图13所示,数据如表5所示。

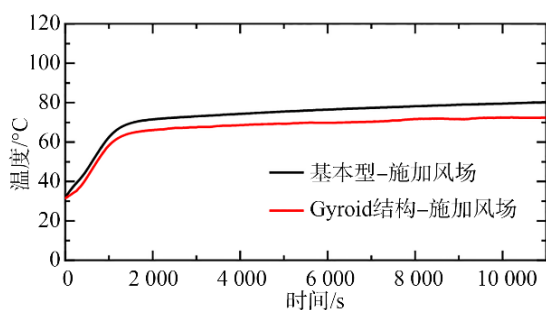


图13 施加风场条件下AlSi10Mg基本型和Gyroid结构散热器温度变化情况

Fig. 13 Temperature variation comparison between AlSi10Mg basic type and Gyroid heat sinks obtained under forced convection conditions

表5 施加风场条件下上机获得的散热器最高温度

Table 5 Maximum temperatures of heat sinks obtained under forced convection conditions

散热器类型	材料	初始温度/°C	最高温度/°C	结束温度/°C
基本型散热器	AlSi10Mg	31.8	80.1	80.2
Gyroid结构1型散热器	AlSi10Mg	31.4	72.3	72.4

施加风场后,两种散热器的散热性能均得到提升,但Gyroid结构散热器依然保持显著优势。其最高温度仅为72.3℃,且温升过程平缓,热管理能力良好。基本型散热器在强制对流下的最高温度为80.1℃,且其温升速率依然较快,在2444s内达到Gyroid结构的稳态温度水平。这一对比凸显了两种结构在散热机理上的本质差异:基本型结构易导致热量积聚,而Gyroid的多孔贯通结构能有效促进热量扩散与交换。

综合两种对流条件可知,无论自然对流还是强制对流,Gyroid晶格结构散热器均表现出更优异的散热性能。这主要归因于其独特的设计:(1)极高

的比表面积显著增加了与冷却空气的接触面积,强化了对流与辐射换热;(2)贯通的多孔拓扑有效引导气流,形成复杂的微尺度流动,提升了换热系数;(3)均匀的热传导路径避免了局部热点,实现了热量的快速均布与耗散。

## 3 结论

本研究针对国产高功率芯片的散热瓶颈,探索了基于增材制造技术的散热器创新设计方法,并通过仿真与试验系统验证其有效性。主要结论如下:

(1)提出了一种基于Gyroid晶格结构的复合散热器架构。通过多目标优化,确定了在本研究参数范围内的最佳结构参数为孔隙率64%、比表面积3.8。该结构凭借其巨大的有效比表面积,显著强化了与冷却介质的热交换。

(2)环境试验验证表明,在自然对流条件下,最优Gyroid结构散热器相较于传统翅片结构,其最高工作温度降低了16.2%;在强制对流条件下,最高温度降幅亦达到9.7%,散热性能提升显著。

(3)研究通过数值仿真与实验验证相结合的系统方法,证明了所提设计方案的可行性,为提升国产化芯片散热器性能提供了关键数据支持与设计框架,推动了基于增材制造的热管理系统自主可控技术发展。

## 参考文献:

- [1] 丁一,吴威涛,封锋,等. 三维点阵结构拓扑开发研究进展及其对流传热性能对比[J]. 应用数学和力学, 2024,45(8):1001-1023.  
DING Y, WU W T, FENG F, et al. Topology Review and Convective Heat Transfer Comparison of 3D Lattice Structures [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2024, 45(8):1001-1023.
- [2] Lee W, Kim J. A comprehensive review of research on organic-based phase-change thermal interface materials for thermal management of electric devices: Methods, performance, and applications [J]. Polymer Testing, 2025, 142: 108677.
- [3] Nair V, Baby A, Murali M, et al. A comprehensive review of air-cooled heat sinks for thermal management of electronic devices [J]. International Communications

- in Heat and Mass Transfer, 2024, 159: 108055.
- [4] Nafis B M, Whitt R, Iradukunda A C, et al. Additive manufacturing for enhancing thermal dissipation in heat sink implementation; a review[J]. Heat Transfer Engineering, 2021, 42(12): 967–984.
- [5] Ho J Y, Wong K K, Leong K C, et al. Convective heat transfer performance of airfoil heat sinks fabricated by selective laser melting[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 114: 213–228.
- [6] Wong K K, Ho J Y, Leong K C, et al. Fabrication of heat sinks by selective laser melting for convective heat transfer applications[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2016, 11(3): 159–165.
- [7] Bendsøe M P, Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1988, 71(2): 197–224.
- [8] Zhou J, Li Q, Chen X. Micro pin fins with topologically optimized configurations enhance flow boiling heat transfer in manifold microchannel heat sinks[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 206: 123956.
- [9] Luo J W, Chen L, Wang Z H, et al. Topology optimization of thermal cloak using the adjoint lattice Boltzmann method and the level-set method[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 216: 119103.
- [10] Das A, Ghosh D, Lau S F, et al. A critical review of process monitoring for laser-based additive manufacturing[J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 62: 102932.
- [11] Quan Z, Wu A, Keefe M, et al. Additive manufacturing of multi-directional preforms for composites: opportunities and challenges[J]. Materials Today, 2015, 18(9): 503–512.
- [12] Yan H, Wu W T, Zhao Z, et al. Review and comparison of turbulent convective heat transfer in state-of-the-art 3D truss periodic cellular structures[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 235: 121450.
- [13] Yan H, Zhang Q, Chen W, et al. An X-lattice cored rectangular honeycomb with enhanced convective heat transfer performance[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 166: 114687.
- [14] Lord E A, Mackay A L. Periodic minimal surfaces of cubic symmetry[J]. Current Science, 2003: 346–362.
- [15] Li W, Yu G, Yu Z. Bioinspired heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces for supercritical CO<sub>2</sub> cycles[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179: 115686.
- [16] Qureshi Z A, Elnajjar E, Al-Ketan O, et al. Heat transfer performance of a finned metal foam–phase change material (FMF–PCM) system incorporating triply periodic minimal surfaces (TPMS)[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 170: 121001.
- [17] Cheng Z, Xu R, Jiang P X. Morphology, flow and heat transfer in triply periodic minimal surface based porous structures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 170: 120902.
- [18] Cheng Z, Li X, Xu R, et al. Investigations on porous media customized by triply periodic minimal surface: Heat transfer correlations and strength performance[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 129: 105713.
- [19] Wang S, Jiang Y, Hu J, et al. Efficient representation and optimization of TPMS-based porous structures for 3D heat dissipation[J]. Computer-Aided Design, 2022, 142: 103123.
- [20] Modrek M, Viswanath A, Khan K A, et al. An optimization case study to design additively manufacturable porous heat sinks based on triply periodic minimal surface (TPMS) lattices[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 36: 102161.
- [21] Suzuki A, Nakatani H, Kobashi M. Machine learning surrogate modeling toward the design of lattice-structured heat sinks fabricated by additive manufacturing[J]. Materials & Design, 2023, 230: 111969.
- [22] 杨晓军, 张雪丽, 李沛燃. 基于结构参数分析的 Gyroid 换热器性能[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(04): 1195–1204.  
YANG X J, ZHANG X L, LI P R. Performance of Gyroid heat exchanger based on structural parameters analysis[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(4): 1195–1204.
- [23] Jafari D, Wits W W. The utilization of selective laser melting technology on heat transfer devices for thermal energy conversion applications: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 91: 420–442.
- [24] Vemuri K P, Canbazoglu F M, Bandaru P R. Guiding conductive heat flux through thermal metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105: 193904.
- [25] Vemuri K P, Bandaru P R. Anomalous refraction of heat flux in thermal metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104: 083901.