

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-08
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250730001

基于不同孔隙率 Gyroid 结构的对流传热过程数值模拟研究

罗浩¹ 王云飞^{1,2} 程子维^{1,2} 刘可英¹ 江晨阳³

(1 新乡学院3D打印学院 新乡 453003; 2 南华大学机械工程学院 衡阳 421001;
3 上海交通大学材料科学与工程学院 上海 200030)

摘要 本文通过共轭传热数值模拟,系统研究了4种孔隙率(55%、65%、75%、85%)下 Gyroid 结构的传热性能并阐明了其传热机理。研究表明:Gyroid 结构通过干扰空气流道以增强湍流强度并有效破坏壁面热边界层,从而降低热阻并提升换热效率。随着孔隙率降低,Gyroid 结构对热源的传热效果持续增强,对流传热系数与努塞尔数相应提升;然而摩擦因子也显著增加。通过 j/f 系数对不同孔隙率结构的对流传热性能进行量化对比,研究发现高孔隙率、低雷诺系数的 Gyroid 结构在综合对流传热性能方面更具优势。

关键词 Gyroid 型散热结构;对流传热系数;数值模拟;综合对流传热性能

中图分类号: TB61⁺1; TP391.9

文献标识码: A

Numerical Simulation of Convective Heat Transfer in Gyroid Structures with Varying Porosity

Luo Hao¹ Wang Yunfei^{1,2} Cheng Ziwei^{1,2} Liu Keying¹ Jiang Chenyang³

(1. School of 3D Printing, Xinxiang University, Xinxiang, 453003, China; 2. School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, 421001, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200030, China)

Abstract This study systematically investigated the heat transfer performance of gyroid structures with four different porosities (55%, 65%, 75%, and 85%) using conjugate heat transfer numerical simulations and elucidated the underlying heat transfer mechanisms. This research demonstrates that gyroid structures enhance heat exchange by disrupting airflow channels to intensify turbulence and effectively break down the thermal boundary layer near walls, thereby reducing thermal resistance. As porosity decreased, heat transfer efficiency from the heat source to the gyroid structure continually improved, accompanied by an increase in the convective heat transfer coefficient and Nusselt number. However, the friction factor increased significantly. By employing the j/f factor to quantify and compare the comprehensive convective heat transfer performance across different porosities, this study revealed that gyroid structures with higher porosities and low Reynolds numbers offer superior overall convective heat transfer performance.

Keywords Gyroid-based heat sink; convective heat transfer coefficient; numerical simulation; comprehensive convection heat transfer performance

随着航空航天、芯片等高科技领域逐渐向高功率、微型化方向快速发展,传统的散热技术已逐渐无法满足极端工作条件和紧凑的设计要求。传统散热器多采用翅片、针阵或沟槽结构^[1],其传热效率受限于比表面积有限、传热路径单一等瓶颈。近年来激光选区熔化、电子束选区熔化等金属增材制造技术进步飞速,其在制造复杂三维结构方面展示出极大灵活性和优势^[2-3]。与传统方法制备的散热结构相比,金属增材制造方法可以通过计算机辅助^[4]进行拓

扑优化,定制化改变支柱形状、大小和方向等,在航空航天、医疗器械等领域展现出广阔的应用前景。

自然界中存在许多多孔结构,例如动物骨骼、树木枝干、蜂窝等^[5-6]。近年来,受自然界生物微结构启发,越来越多的学者尝试设计仿生多孔结构,例如在蝴蝶翼^[7]、象鼻虫^[8]等生物中发现了三周期极小曲面(triply periodic minimal surfaces, TPMS)结构。该结构具有无限延展的周期性和平均曲率为0^[9]等几何特性,展现出高比表面积^[10]、低流阻特性^[11]及优异的力

基金项目:国家自然科学基金(52275329)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52275329).)

收稿日期:2025-07-30;修回日期:2025-09-06;录用日期:2025-09-30

学性能。基于 TPMS 结构开发的散热器几何形状复杂,迫使流体在流道内改变轨迹。这些独有的特征有望带来增强热交换领域的突破。TPMS 可以通过隐函数来精确控制^[12]。作为一种具有数学严格性与拓扑多样性的仿生结构,为高性能散热器设计提供了全新范式。

TPMS 可以通过改变隐函数实现不同类型的结构表达,如 Gyroid、Diamond 和 Primitive 等结构。其中 Gyroid 结构由三维交叉的螺旋通道构成,其高比表面积和高渗透率在自然对流散热条件下显著优于 Diamond 和 Primitive 等结构。因此,Gyroid 结构近年来也得到了广泛研究。Qin Kaiwen 等^[13]在 Gyroid 结构基础上引入了控制因子 β ,对改进后的 Gyroid 结构的流动和传热特性进行了研究。结果表明,随着 β 值的增大,Gyroid 结构的峰值温度降低 4.9~7.4 K,对流传热系数增大 4.3%~8.2%,该研究为进一步提高 TPMS 结构的传热性能提供了一种新的途径。Chen Mingyi 等^[14]通过对 Gyroid 结构与传统板翅散热器进行对比发现,Gyroid 结构的努塞尔数比传统板翅散热结构提升 23.7%,表面温升降低 15%~30%。这表明 Gyroid 结构具有良好的传热性能,但与此同时也会带来较高的压力差。

目前的研究主要集中在 TPMS 结构的类型和异质结构等对传热性能的影响,而孔隙率对 Gyroid 结构传热性能的影响尚缺乏系统性研究。因此,为深入探究孔隙率对 Gyroid 结构传热性能的影响机制与对流传热特性,本文选取了 4 种典型孔隙率(55%、65%、75%、85%)开展数值模拟研究。该孔隙率范围既涵盖了工程应用中常见且可制造的区间,也能够有效反映结构从固体导热主导向对流作用增强转变的特征阶段。综合努塞尔数 Nu 、对流传热系数 h 、摩擦因子 f 和雷诺系数 Re 等参数分析,系统阐明孔隙率对 Gyroid 结构传热性能的影响机理。本文有助于进一步理解 TPMS 结构参数设计和传热性能之间的关系,为工程化应用提供理论支撑和设计参考。

1 数值模拟方法

1.1 Gyroid 结构建模

使用 Matlab 软件设计并建立 Gyroid 结构的隐函数,其数学表达式如下:

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

式中: l 为控制 Gyroid 结构单胞的边长,mm; t 为 Gyroid

结构的壁面厚度,mm。Gyroid 结构建模如图 1 所示,通过改变壁厚来调整单胞孔隙率。单胞的大小为 4 mm×4 mm×4 mm,拓扑生成 3×3×3 个单元阵列的结构,其总尺寸为 12 mm×12 mm×12 mm。G55、G65、G75、G85 分别代表孔隙率为 55%、65%、75%、85% 的 Gyroid 结构。不同孔隙率的 Gyroid 结构几何参数如表 1 所示。

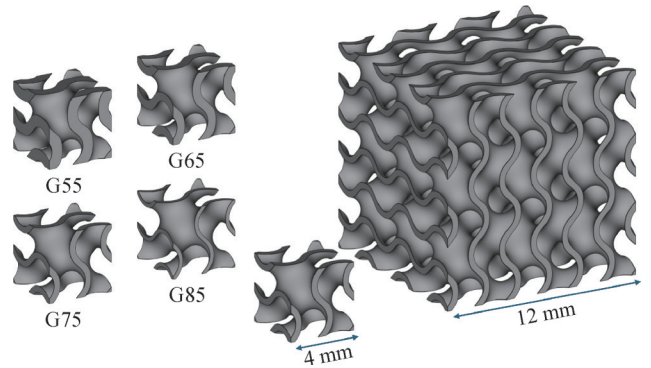


图 1 Gyroid 结构建模

Fig.1 Modeling of Gyroid structures

表 1 Gyroid 结构几何参数

Tab.1 Gyroid structure geometric parameters

参数	G55	G65	G75	G85
D_v/mm	1.499	1.734	1.982	2.198
V_l/mm^3	950	1 123	1 296	1 468
A_l/mm^2	2 533	2 590	2 615	2 671
孔隙率/%	55	65	75	85

1.2 计算域建模

图 2 所示为 Gyroid 结构对流传热示意图。流体力学模型包括流体域、Gyroid 散热结构和热源 3 个部分。固体和流体的初始温度均为 293.15 K,流体域入口的边界条件为充分发展的流动,体积流量为 0.518~1.295 m³/h,并设置出口压力为 0 Pa。为避免边界效应,在入口和出口处延长空气域^[15],总尺寸为 12 mm×12 mm×50 mm。底部热源的恒定热耗率为 5 W,尺寸为 12 mm×12 mm×0.5 mm。散热结构和热源的材料分别为铝合金和硅,流体为空气。在 COMSOL 中,材料的属性被定义为与温度相关的函数,以反映其在实际条件下的变化行为。常温下材料的相关属性如表 2 所示。数值模拟主要包括空气流动和热量传递 2 部分,空气以恒定体积流量从入口进入,同时热源以恒定热耗率持续产生热量,其余通道表面均为热绝缘。通过对流与热传导的方式将热量带走,从而降低热源温度。为了直观地揭示 Gyroid 结构内孔隙率对热传递的影响,从而理解对流

传热机理并最终指导优化设计。在后续部分分析中使用 xoz 和 yoz 截面进行展开描述,如图3所示。

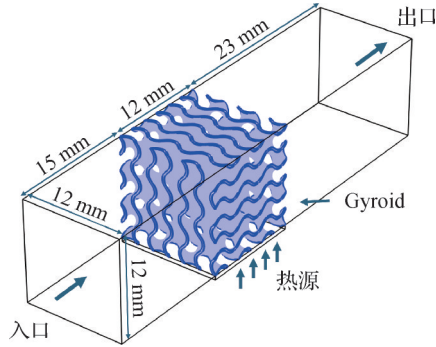


图2 对流传热示意图

Fig.2 Convective heat transfer

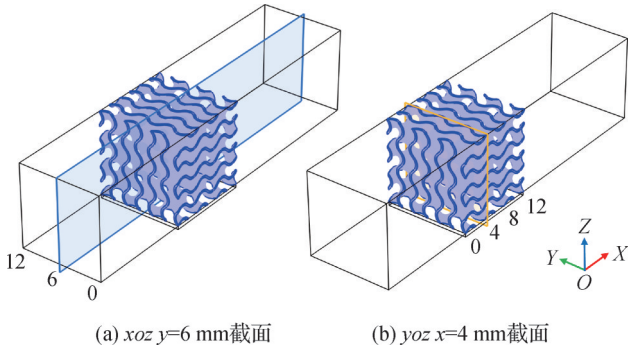


图3 xoz $y=6$ mm和 yoz $x=4$ mm截面

Fig.3 Cross-sections at xoz $y=6$ mm and yoz $x=4$ mm

表2 常温下材料属性

Tab.2 Material properties at room temperature

材料	密度/(kg/m^3)	比热/[$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	导热系数/[$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
铝合金	2 730	893	155
硅	2 329	700	130
空气	1.205	1 025	0.026

1.3 控制方程

在本文中,使用COMSOL用于数值模拟求解质量、动量和能量守恒方程。当流体通过时,由于Gyroid结构的存在,空气沿着通道的流动极易产生二次流、旋涡和流体混合。这意味着流动不再是平滑、有序的层流,而是湍流。目前常用到的湍流模型有: $k-\varepsilon$ 模型和 $k-\omega$ 模型等^[16-17]。本文对应的雷诺数范围为101~370。因此使用的是低雷诺数下的 $k-\varepsilon$ 湍流模型,可以在保证计算效率的同时,获得较为准确的流固耦合传热结果。流体控制方程表示为式(2)~式(5)。

连续性方程:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

动量守恒方程:

$$\rho(u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + b \quad (3)$$

能量方程:

$$\rho c_{p,f}(u \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k_s \nabla T) + Q_f \quad (4)$$

固体中的能量方程:

$$k_s \nabla^2 T = -Q_s \quad (5)$$

式中: u 为速度矢量场, m/s ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; p 为压力, Pa ; μ 为流体的动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; $c_{p,f}$ 为流体的比热容, $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$; T 为温度, K ; k_s 为固体的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; Q_f 和 Q_s 分别为进入流体和固体的热通量, W/m^2 。

雷诺数 Re 定义为:

$$Re = \rho v D_h / \mu \quad (6)$$

$$D_h = 4V_f / A_s \quad (7)$$

式中: D_h 为水力直径, m ; v 为入口速度, m/s ; V_f 为流体域体积, m^3 ; A_s 为表面积, m^2 。

摩擦因子 f 用于表征散热器中流体由于黏性作用产生阻力效果的无量纲数,定义如下:

$$f = \frac{2\Delta p D_h}{\rho v^2 L} \quad (8)$$

式中: Δp 为进出口压力差, Pa ; L 为Gyroid结构长度, m 。

通过评估对流传热系数和努塞尔数来评估Gyroid结构的传热性能。

$$h = \frac{Q}{T_w - T_f} \quad (9)$$

式中: Q 为热源的热通量密度, W/m^2 ; T_w 为热源温度, K ; $T_f = (T_{in} + T_{out})/2$ 是近似值, T_{in} 为进口处空气温度(K), T_{out} 为出口处空气温度(K)。

努塞尔数是量化对流传热相对于纯导热的增强程度的无量纲参数,定义如下:

$$Nu = h D_h / \lambda \quad (10)$$

式中: λ 为空气的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

使用 jf 评估整体热性能,综合评价热工水力性能,更贴近实际应用中平衡传热效率与泵功消耗的需求。其中 j 为Chilton-Colburn因子。

$$j = \frac{Nu}{Re \cdot Pr^{1/3}} \quad (11)$$

式中: Pr 为普朗特数。

1.4 网格独立性验证

网格的数量影响计算的准确性和收敛时间。在本文中,根据网格划分的精细程度改变网格密度,对比 3×10^5 、 6.2×10^5 、 18.9×10^5 、 23.6×10^5 、 34.5×10^5 、 43.2×10^5 和 57.7×10^5 不同网格数的G55结构。评估热源温度 T 和进出口压力差 Δp 之间的不同以确定网格独立性,如图4所示。随着网格数量的增加,计算结果的变化逐渐减少。网格数量达到 23.6×10^5 时,

与更多网格数计算结果的变化差异低于1%。因此,综合计算准确性和时间,选择 23.6×10^5 网格数量进行后续的模拟。

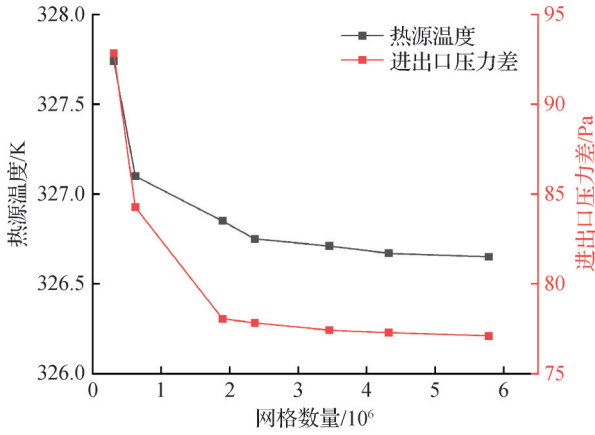


图4 网格独立性验证

Fig.4 Grid independence verification

1.5 模型验证

为验证本文数值模拟方法的可靠性,基于A. Barakat等^[18]的Gyroid结构实验结果进行模拟。通过对比空气通道内的Gyroid散热结构在不同体积流量下摩擦因子的差异,检验模拟精度。采用与本文一致的湍流模型及网格划分方法,计算结果与文献实验结果误差低于3%,表明本文数值模拟方法具备良好的计算精度与可靠性。

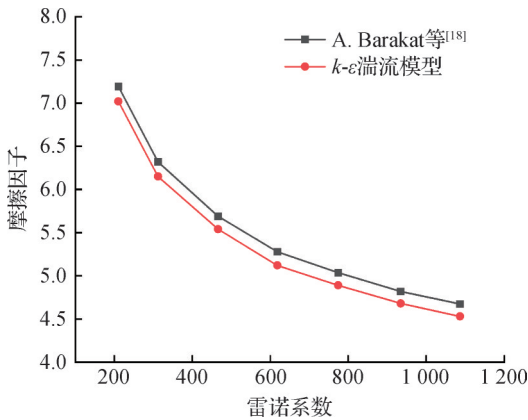


图5 模型验证结果

Fig.5 Model validation results

2 结果与讨论

2.1 传热过程温度变化

体积流量为 $0.518 \text{ m}^3/\text{h}$ 时不同孔隙率Gyroid结构的温度体图如图6所示。值得注意的是,这些散热结构均表现出明显的温度梯度,从而促进了流体和Gyroid结构之间的大量热传递。可以明显观察到

G55、G65、G75、G85热源温度依次升高,表明G55结构的传热效果最好。Gyroid结构的流线云图如图7所示,流线的混乱可以反映流道对流体的干扰强度。流体通过Gyroid结构时,因其独特的几何曲面,流线由直线变为螺旋二次流和分离涡流。这种流道的扰动破坏了Gyroid结构的热边界层、增强了流体之间的混合,将层流转变为了湍流,进而提高热交换性能。显然,G55对流体有最强的干扰,其次是G65、G75和G85。随着流道对流体干扰的增强,流体的传热得到改善,对流传热性能增加。因此,低孔隙率的Gyroid结构传热效果最佳。

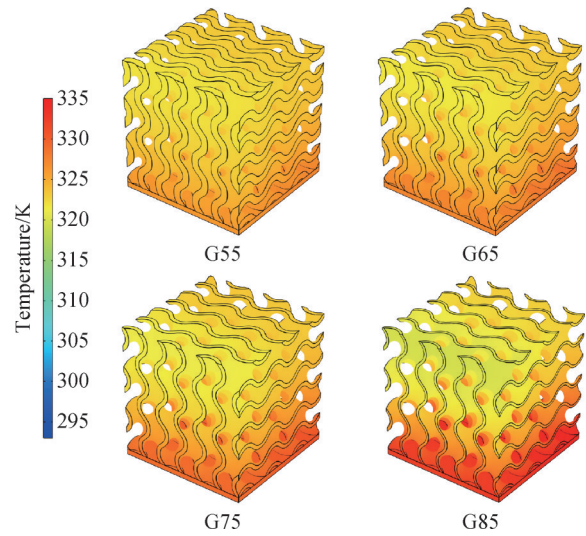


图6 Gyroid结构的温度体图

Fig.6 Temperature distribution for Gyroid structures

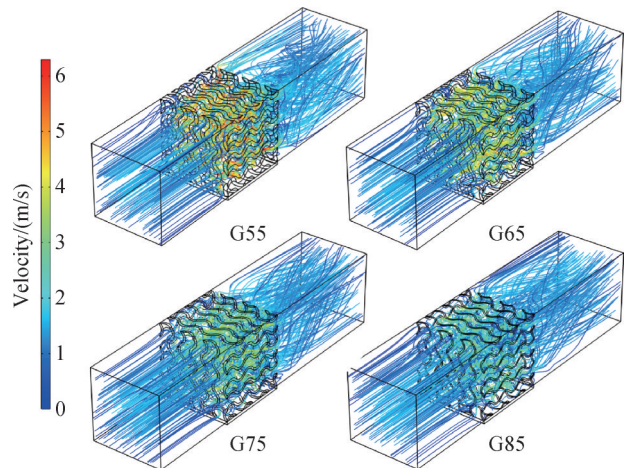


图7 Gyroid结构的流线云图

Fig.7 Streamline-contour plots of flow fields for Gyroid structures

图8所示为 $y=6\text{mm}$ 截面的温度云图和局部放大图。可以明显地看到Gyroid结构中的S形流道可引起流体的周期性热边界层脱离。其核心原理^[15]是破

坏表面的边界层,从而促进冷热流体的混掺。热边界层是紧贴固体表面的薄层空气,其热量传递主要依赖导热而非对流。由于空气的导热系数远低于固体铝合金的导热系数,所以边界层为主要的热阻区。通过剥离边界层,冷空气重新接触固体表面再附着,增强湍流混掺,将传热方式从低效的导热转为高效对流,从而提升整体的热性能。从局部放大图可以看出,热边界层随着孔隙率的提高而逐渐增厚,削弱了流体与固体壁面的热交换效率。由于低孔隙率的Gyroid结构对空气的扰动更剧烈,能够更有效地破坏热边界层,使得受破坏处的热边界层更薄,从而显著提升了流体与固体壁面之间的对流传热效率。

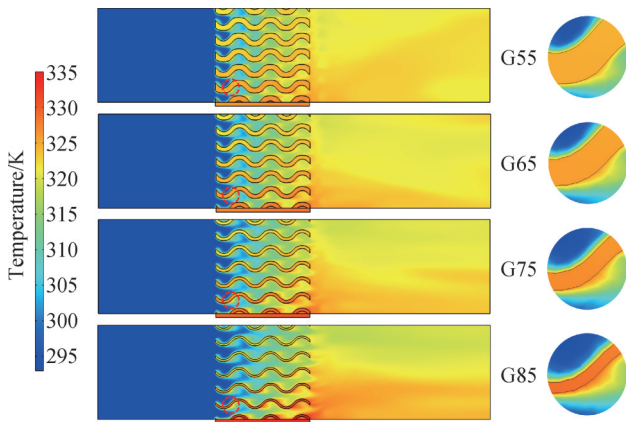


图8 Gyroid结构 $y=6$ mm截面温度云图和局部放大图

Fig.8 Temperature contour plots and partial enlarged views at $y=6$ mm cross-section for Gyroid structures

图9所示为Gyroid结构在 $x=0, 4, 8, 12$ mm截面的温度云图。可以发现随着孔隙率的提高,实体部分的体积减少,空气的占比增加,导致有效热导率降低,即热阻增加传热效果变差。并且随着孔隙率的升高,Gyroid结构底部热源的热量不能及时地被传导,产生了局部热堆积,加剧了上下表面的温度差。这表明孔隙率越高,Gyroid结构的温度分布会变得越不均匀。孔隙率由55%升至85%,热量传递变差,Gyroid结构上下表面的平均温度差由4.14 K升至11.82 K,提高了185%。空气以293.15 K的温度流入,流动过程中与壁面的高温梯度使其参与热对流进行热量交换,温度逐渐升高。由于底部的热堆积,流经此区域的空气会被迅速加热至很高的温度。当这些空气继续流动时,它与壁面之间的温度梯度减小,热驱动力减小,因此后续的传热效果变差。

图10所示为体积流量为 $0.518\sim 1.295$ m³/h时热源温度 T 的变化。随着体积流量的增加,热源温度均呈指数降低的趋势,表明体积流量的增加对传热性能存在显著的非线性强化效应。G55的热源温度始

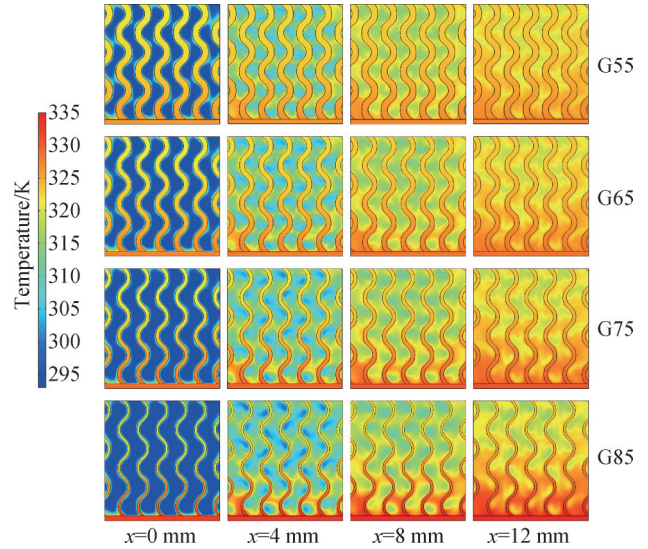


图9 Gyroid结构在 $x=0, 4, 8, 12$ mm截面温度云图

Fig.9 Temperature contour plots at $x=0, 4, 8, 12$ mm cross-sections for Gyroid structures

终最低,分别比G65、G75和G85低1.1~1.2 K、3~3.1 K和6.1~6.5 K。该系统的温度差异明确表明:在相同的体积流量范围内,降低孔隙率可显著提高Gyroid结构的传热效果。

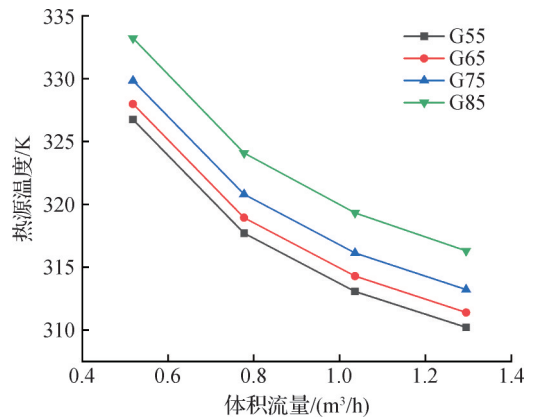


图10 热源温度变化

Fig.10 Variation of heat source temperature

2.2 空气流动特性

图11所示为Gyroid结构在 $y=6$ mm截面的流速云图和流线图。可以看出孔隙率的提高对流体流量特征和流速有显著影响。由于4种Gyroid结构的差异很小,展现出了相似的流动模式。流体在Gyroid结构内的速度分布较为均匀,高流量区域主要集中在通孔处。在相同的体积流量下,孔隙率高的结构拥有更多的可流动区域,流道更宽敞,因此空气在Gyroid结构内整体的流速与孔隙率成反比。当孔隙率提高时,Gyroid结构流道连通性增强,弱化了Gyroid结构对空气的几何扰动,空气流线因此逐渐平

缓,展现出层流化趋势。

湍流的核心优势在于其强烈的掺混效应与动量和热量的横向输运能力。整体速度的下降直接导致了湍流强度的减弱,进而削弱整体的传热性能。此外,在无滑移壁面条件下,黏性作用使得近壁区域形成明显的流动边界层,该区域内空气速度由壁面处的0逐渐增至主流速度,存在较高的速度梯度,反映出较大的剪切应力与流动阻力。随着孔隙率提高,该边界层内的速度梯度普遍降低,同时边界层呈现增厚趋势,进一步影响壁面附近的热量和动量交换。

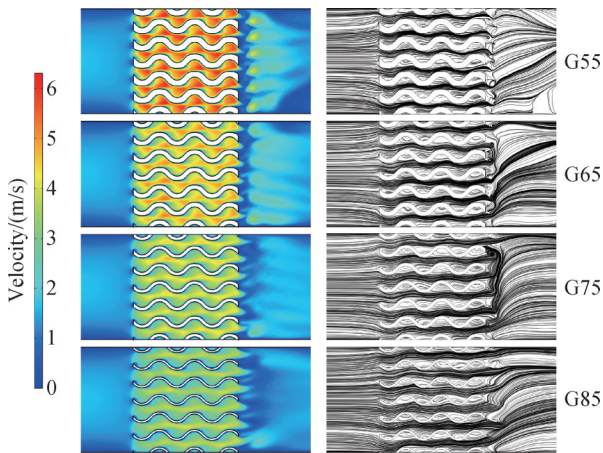


图 11 Gyroid 结构在 $y=6$ mm 截面速度云图和流线图

Fig.11 Velocity contour plots and streamline patterns at $y=6$ mm cross-section for Gyroid structures

图 12 所示为 4 种孔隙率结构在 $x=8$ mm 截面的流速云图和流线图。可以看出随着孔隙率的提高,小尺度涡旋和二次流逐渐减少。这是因为流体更容易形成主流导向的稳定流动形态,流动更易趋于充分发展、流动死区减少。所有这些因素共同作用,削弱了产生和维持小尺度涡旋及二次流的核心驱动力。因此,随着孔隙率的提高,这些复杂的流动模式逐渐减弱甚至消失,流动形态变得更加简单。

2.3 对流传热性能

4 种孔隙率 Gyroid 结构的对流传热系数 h 和努塞尔数 Nu 在体积流量为 $0.518\sim 1.295$ m^3/h 时的对比如图 13 所示,对应的 Re 为 $101\sim 370$ 。在图 13(a)中, h 随着 Re 增加而快速增加, G55 结构展现出了最高的 h 。当 $Re=200$ 时, G55 结构的 h 分别比 G65、G75、G85 高 18.7%、41.2%、75.9%;在图 13(b)中,可以观察到 Nu 随着 Re 的增加而增加。但由于不同 Gyroid 结构之间水力直径的差异, Nu 出现了略微不同的增加趋势。在 $Re=200$ 时, G55 结构的 Nu 分别比 G65、G75、G85 高 2.9%、7.5%、19.8%;但随着 Re 的降低, Nu 差异

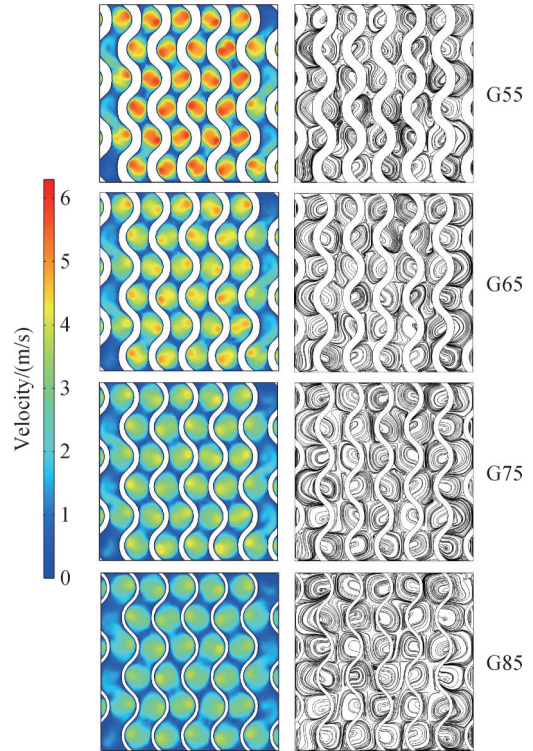


图 12 Gyroid 结构在 $x=8$ mm 截面速度云图和流线图

Fig.12 Velocity contour plots and streamline patterns at $x=8$ mm cross-section for Gyroid structures

减小。

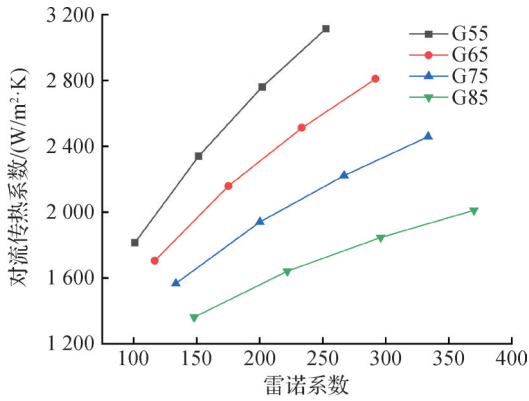
2.4 摩擦阻力

空气的流动阻力在实际应用中直接影响能耗,因此分析不同孔隙率的 Gyroid 结构的摩擦因子 f 十分重要。前期研究发现随着 Re 增加,流体的惯性力也随之增强^[14]。此时,靠近 Gyroid 结构流道壁面的边界层厚度减小,其是黏性阻力的主要来源。其变薄导致壁面速度梯度增大,从而降低壁面摩擦阻力,使得 f 随着 Re 的增加而下降。Gyroid 结构的摩擦因子对比如图 14 所示, $Re=200$ 时, G55 的 f 分别比 G65、G75、G85 高 28.2%、59.3%、96.6%。 f 的增加会导致输送相同体流量的功耗增加进而造成经济性受损,这对于实际应用将产生不利影响。

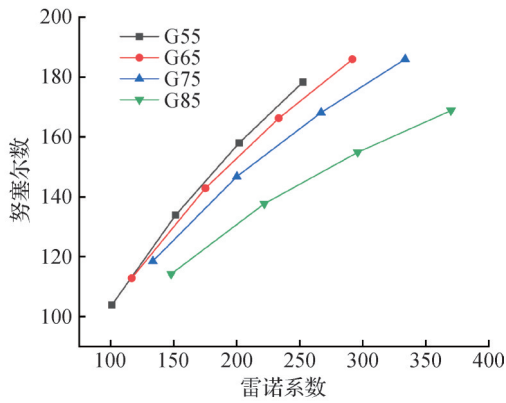
2.5 传热性能的总体评估

在实际应用中往往需要综合考虑传热效率与流动阻力二者之间的平衡关系,因此本节全面评估了 4 种孔隙率 Gyroid 结构的综合传热性能。

图 15 所示为 Gyroid 结构的综合传热性能对比。使用 j/f 来比较综合传热性能,以统一量化散热设备在传热效率与流动阻力之间的平衡关系,高 j/f 意味着相同泵功下传热更高效,直接影响能耗与经济性。在 $Re=200$ 时, G85 的综合传热性能分别比 G75、G65、G55 高 12.6%、32.5%、66.9%。此外,随着 Re 的增



(a) 对流传热系数对比



(b) 努塞尔数对比

图 13 Gyroid 结构的对流传热系数及努塞尔数

Fig.13 Convective heat transfer coefficient and Nusselt number for Gyroid structures

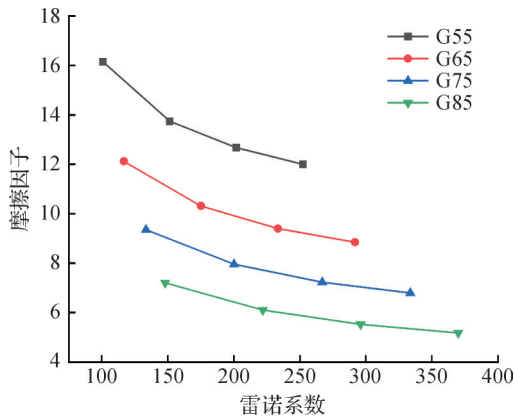


图 14 Gyroid 结构的摩擦因子对比

Fig.14 Comparison of friction factors in Gyroid structures

加,综合传热性能呈线性降低的趋势。强化对流传热往往伴随着流阻的增加,在平衡传热效率和摩擦因子的综合影响后,高孔隙率、低 Re 的Gyroid结构可以达到最佳效果。

3 结论

本文对4种(55%、65%、75%、85%)孔隙率下的Gyroid结构进行了数值模拟与分析,评估了其对流传

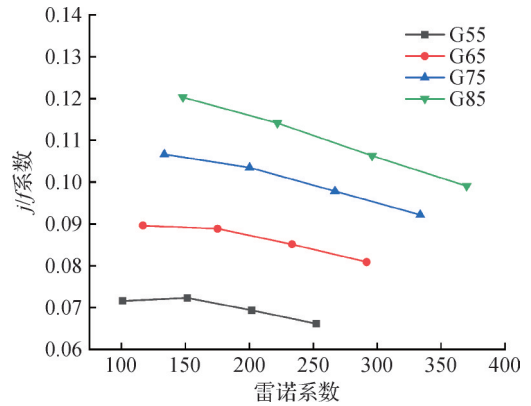


图 15 Gyroid 结构的综合传热性能

Fig.15 Comprehensive thermal performance for Gyroid structures

热机理以及摩擦因子、对流传热系数、努塞尔数及综合传热性能,得到如下结论:

1)Gyroid结构因其独特的几何曲面,通过干扰流道使空气流线从直线变为了螺旋二次流和分离涡流。这种扰动破坏了Gyroid散热结构的热边界层,增强了流体之间的混合,将层流转化为了湍流,进而降低热阻提高热交换性能。

2)低孔隙率可以明显改善Gyroid结构的传热性能。随着孔隙率的降低,实体体积增加进一步降低热阻,传热效率提高。在体积流量为 $0.518\sim 1.295\text{ m}^3/\text{h}$ 时,G55的热源温度分别比G65、G75和G85低 $1.18\sim 1.24\text{ K}$ 、 $3\sim 3.11\text{ K}$ 和 $6.09\sim 6.47\text{ K}$,并且对流传热系数比G65、G75和G85高 $6.4\%\sim 10.8\%$ 、 $15.8\%\sim 26.6\%$ 和 $33.2\%\sim 54.8\%$ 。

3)低孔隙率的Gyroid结构提高传热效果的同时会带来较大的流动阻力, $Re=200$ 时,G55的摩擦因子比G85高 96.6% ,这在实际应用中会显著增加功耗。

4)Gyroid结构的综合传热性能 j/f 随着孔隙率的增加而增加,随着 Re 的增加而降低。选择高孔隙率的Gyroid结构,并保持较低的 Re 可以在保证传热效率的同时,获得最佳的综合对流传热性能。

本文受河南省科技攻关项目(252102220072),河南省高等学校重点科研项目(25A430037)资助。(The project was supported by the Henan Provincial Science and Technology Research Project (No. 252102220072) and Key Scientific Research Projects of Higher Education Institutions in Henan Province (No. 25A430037).)

参考文献

[1] Zhang Zhihui, Gao Tieyu, Zhang Bohan, et al. Conjugate thermo-hydraulic evaluation of triply periodic minimal surfaces and pin fins [J]. Applied Thermal Engineering,

- 2025, 274: 126667.
- [2] Luo Hao, Li Xiaoqiang, Pan Cunliang, et al. Microstructure and oxidation resistance of CoNiCrAlY coating manufactured by laser powder bed fusion [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 427: 127846.
- [3] Kim J, Yoo D J. 3D printed compact heat exchangers with mathematically defined core structures [J]. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2020, 7 (4) : 527–550.
- [4] Min Zheng, Huang Gan, Parbat S N, et al. Experimental investigation on additively manufactured transpiration and film cooling structures [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2019, 141(3): 031009.
- [5] Yang Yang, Song Xuan, Li Xiangjia, et al. Recent progress in biomimetic additive manufacturing technology: from materials to functional structures [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(36): 1706539.
- [6] Yeo S J, Oh M J, Yoo P J. Structurally controlled cellular architectures for high-performance ultra-lightweight materials[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(34): 1803670.
- [7] Michielsen K, Stavenga D G. Gyroid cuticular structures in butterfly wing scales: biological photonic crystals [J]. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2008, 5 (18) : 85–94.
- [8] Galusha J W, Richey L R, Gardner J S, et al. Discovery of a diamond-based photonic crystal structure in beetle scales[J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2008, 77(5): 050904.
- [9] Al-Ketan O, Abu Al-Rub R K. Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21 (10): 1900524.
- [10] Abdelqader O, Abu Al-Rub R K, Hassan Ali M I. Atmospheric air freshwater using TPMS compact heat exchangers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 246: 122979.
- [11] Yang Zhe, Zhang Tao, Li Wenfeng, et al. Experimental and numerical assessments of thermal transport in phase change material embedding additively manufactured triply periodic minimal surfaces: a comparative evaluation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 245: 122850.
- [12] Wang Yi, Li Jialong, Yang Kefeng, et al. Conjugate heat transfer effects of tri-periodic minimal surfaces on cooling performance in turbine internal cooling channels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025, 236: 126331.
- [13] Qin Kaiwen, Zhuang Nailiang, Shao Chong, et al. Gyroid-type TPMS structure optimization based on mathematical function control and its convective heat transfer performance study [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025, 162: 108682.
- [14] Chen Mingyi, Shi Yusheng, Yang Lei, et al. Performance evaluation for additively manufactured heat sinks based on Gyroid-TPMS [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 60: 103499.
- [15] Si Tianyu, Sun Kai, Zhang Han, et al. Lattice-scale topology optimization of TPMS structure for heat transfer [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025, 251: 127288.
- [16] Attarzadeh R, Rovira M, Duwig C. Design analysis of the “Schwartz D” based heat exchanger: a numerical study [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 177: 121415.
- [17] 潘淑丽, 唐景春, 周培, 等. 变基圆渐开线涡旋压缩机型线控制参数优化[J]. *制冷学报*, 2025, 46(2): 82–89. (Pan Shuli, Tang Jingchun, Zhou Pei, et al. Optimization of involute profile parameters with variable base circle for scroll compressors[J]. *Journal of Refrigeration*, 2025, 46 (2): 82–89.)
- [18] Barakat A, Sun Beibei. Enhanced convective heat transfer in new triply periodic minimal surface structures: Numerical and experimental investigation [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 227: 125538.

通信作者简介

罗浩,男,高级工程师,博士,新乡学院3D打印学院,0373-3683993, E-mail: 624879420@qq.com。研究方向:传热传质学,增材制造。

About the corresponding author

Luo Hao, male, senior engineer, Ph. D., School of 3D Printing, Xinxiang University, 86-373-3683993, E-mail: 624879420@qq.com. Research fields: heat and mass transfer, additive manufacturing.

(责任编辑:田甜)