

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.04.09

基于增材的高效紧凑 TPMS 换热器的流动换热研究

黄家坚^{1,3}, 周源^{1*}, 闫晓², 仇子铖², 袁园¹, 李杰¹

1. 四川大学 辐射物理及技术教育部重点实验室, 四川 成都 610065

2. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213

3. 核能增材制造四川省重点实验室, 四川 成都 610213

摘要: 基于布雷顿循环的惰性工质气冷堆是空间大功率核动力系统的潜在技术方案之一, 其工程化应用的关键技术瓶颈在于高效紧凑型换热器的研制。近年来, 增材制造技术的突破为仿生结构换热器的实现提供了新途径, 尤其是涉及三维构型的 TPMS 换热器。采用数值模拟方法, 研究了混合工质在 3 种 TPMS 流道内的流动与传热特性, 并与相同水力直径的印刷电路板式换热器 (PCHE) 进行了对比分析。研究表明: TPMS 结构因具有更高的比表面积及连续曲率流道诱导的湍流强化效应, 其综合传热性能较 PCHE 提升 25%~45%, 热重比约为 PCHE 的 2.44 倍; 与 PCHE 相比, TPMS 在空间中形成曲面, 增加了湍流动能, 表面平均曲率为零, 使表面光滑连续, 与 PCHE 相比没有流动死区。TPMS 具有更高的比表面积和比体积功率。由于其高比传热面积和功率密度, 更符合空间反应堆换热器对轻量化与可靠性的双重需求。本研究为增材紧凑换热器的仿生优化设计提供了理论依据与数据参考。

关键词: 换热器; 三周期极小曲面; 惰性气体工质; 增材制造

中图分类号: TL334 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)04-0075-06

Flow and Heat Transfer Study of Additively Manufactured High-Efficiency Compact TPMS Heat Exchanger

HUANG Jiajian^{1,3}, ZHOU Yuan^{1*}, YAN Xiao², QIU Zicheng², YUAN Yuan¹, LI Jie¹

1. Key Laboratory on Radiation Physics and Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China

2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China

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

Abstract: The inert gas-cooled reactor based on the closed Brayton cycle represents a promising technical pathway for high-power space nuclear systems, with the development of highly efficient and compact heat exchangers being a critical technological bottleneck for its engineering application. Recent breakthroughs in additive manufacturing have provided new opportunities for fabricating bio-inspired heat exchanger structures, particularly those involving complex three-dimensional configurations like triply periodic minimal surface (TPMS) heat exchangers. This paper investigates the flow and heat transfer characteristics of helium-xenon mixture in three types of TPMS channels using numerical simulations, with a comparative analysis against printed circuit heat exchangers (PCHEs) of identical hydraulic diameter. Results demonstrate that TPMS structures enhance overall heat transfer performance by 25%-45% compared to PCHEs, attributed to their higher specific surface area and turbulence enhancement induced by continuously curved flow passages, with a heat-to-weight ratio approximately 2.44 times that of PCHEs. Unlike PCHEs, TPMS structures form curved surfaces in space that increase turbulent kinetic energy while maintaining zero mean curvature, resulting in smooth, continuous surfaces without flow dead zones. TPMS structures exhibit higher specific surface area and volumetric power density. Due to their superior specific heat transfer area and power density, TPMS heat exchangers better satisfy the dual requirements of lightweight design and reliability

收稿日期: 2025-12-12 修回日期: 2026-02-01

基金项目: 先进核能技术全国重点实验室稳定支持科研项目 (STSW-0224-0604-01, STSW-0325-0104-02); 国防科技工业核动力技术创新中心项目 (HDLXZX-2023-HD-015)

作者简介: 黄家坚 (1995—), 男, 博士研究生, 主要从事先进核反应堆热工水力研究。E-mail: 2022322020033@scu.edu.cn。

通讯作者: 周源, E-mail: zhouyuan1911@126.com。

for space reactor applications. This study provides both a theoretical foundation and empirical data to support the bioinspired optimization of additively manufactured compact heat exchangers.

Keywords: heat exchanger; TPMS; helium-xenon mixture; additive manufacturing

引用格式:黄家坚,周源,闫晓,等. 基于增材的高效紧凑 TPMS 换热器的流动换热研究[J]. 电焊机,2026,56(4):75–80.

Citation: HUANG Jiajian, ZHOU Yuan, YAN Xiao, et al. Flow and Heat Transfer Study of Additively Manufactured High-Efficiency Compact TPMS Heat Exchanger[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(4): 75–80.

0 引言

以惰性混合气体为工质的闭式布雷顿循环系统是大功率空间堆热电转换目前最可行的技术方案,其中高性能换热器研制是影响该系统发电效率、系统质量和紧凑性的关键技术。空间核动力技术具有高效高功率密度等特点,对发展航天飞行器,深空探测任务以及建设星际能源站等方面具有重要意义^[1-2]。采用二元惰性混合气体的气冷堆运行压力适中(约 0.5~4 MPa),涡轮机和压缩机等设备的规模小,特别适合小型化领域应用^[3-4]。气冷堆采用简单的布雷顿循环设计,其核心是将涡轮机出口废热回收用于提升堆芯进口温度。因此,回热器对系统发电效率至关重要,同时对系统整体重量和紧凑性有重要影响,但常见的换热器(PCHE、板式、管式等)很难在空间堆运行参数下同时兼顾高效换热、结构紧凑、轻量化等要求。PCHE 采用半圆形通道和之字形流动布置,增加了传热面积和通道混合,在气冷系统中得到了广泛的应用。针对 PCHE 的流动和传热性能已有大量研究^[5-7],PCHE 具有较高的传热表面、耐压和温度稳定性好、紧凑性好等优点。然而,PCHE 的半圆形通道不能很好地利用空间,因此比表面积并不是很大。此外,为达到换热要求,PCHE 可占系统总质量的 1/3。因此,希望获得一种流道结构,其本质上是空间高效的,以提升轻量化性能,并具有较强的交叉混合性能。

先进增材制造技术的发展推动着换热器领域不断革新。近年来美国通用公司、马里兰大学以及橡树岭国家实验室^[8],基于高温金属增材技术设计制造了能够承受 900 °C 和 2.5 MPa 的超临界 CO₂ 高性能仿生结构换热器,提升了换热器效率,并将整个布雷顿循环效率提高 4%。自然界中动物翅、壳等存在的多孔结构常具有质量轻、强度高、渗透性

好等特点,受其启发人类进行了大量尝试来生成性能优异的多孔结构。三周期最小曲面(TPMS),即平均曲率为零的周期隐式表面,已成为一种很有前途的有序多孔结构。TPMS 具有显著的特点,包括高度连接的多孔结构、光滑的表面和数学上可调节的几何函数,这些几何函数可以控制其特性,如孔隙度和体积比表面。因此,TPMS 结构可用于广泛的应用于相变材料^[9]、流体力学^[10]、膜^[11]、消音材料^[12]和生物工程^[13]。此外,由于 TPMS 的高表面积体积比,越来越多的学者将其用于换热设备的研究^[14-16]。TPMS 将空间高效地划分为两个互不相交的区域,尤为适合间壁式换热器的研制。在一些特殊场景的应用极具优势,如高温气冷空间堆换热器。大量的研究一直致力于研究 TPMS 的流动传热性能。许多研究人员^[17-19]研究了 TPMS 结构用作散热器的设计,主要使用空气和水作为工作流体,温度范围为 273~373 K。结果表明,TPMS 结构的散热性能比工业泡沫材料高 105%~207%。

惰性混合气体的流动和换热特性以及换热器的结构设计对布雷顿循环的整体效率和性能有着至关重要的影响。增加换热器的换热能力可以提高布雷顿循环的效率,但增加换热器的阻力会降低布雷顿循环的效率。目前对惰性气体混合工质在复杂通道中的流动的研究有限,对惰性气体的换热器的研究也很缺乏。因此,本研究对惰性气体工质在 TPMS 换热器中的流动和传热性能进行了研究,并与 PCHE 进行比较。采用 CFD 方法计算了相同水力直径和壁厚的两种换热器结构的流动换热性能和紧凑性能。相应的换热器性能评价指标为努塞尔数、阻力系数、比表面积和综合换热性能。综合换热性能是用因子 $Nu/f^{1/3}$ 来量化的。本文的定量计算结果将为后续小型化高温气冷堆换热器的设计和制造提供参考和数据支持。

1 数值计算方法

1.1 几何模型及网格划分

选取用于比较的 TPMS 为 Gyroid、Primitive 和 Diamond 三种结构,用于构建该曲面的数学表达式见式(1)~式(3)。用于对比的 PCHE 结构为 Z 字形流道,流道截面为半圆形。最后选取的 Gyroid 结构和 PCHE 结构几何模型如图 1 所示,具体的几何参数见表 1。为确保对比结果的有效性,计算域设计过程中保证了两种结构等效水力直径相同。由于通道间的壁厚不仅影响了传热效果,也关系到承压能力,最终选择 Gyroid 结构的间壁面厚度与 PCHE

的最薄壁厚相同。水力直径的计算见式(4),计算 TPMS 的等效水力直径时,采用的是流体域的体积和有效的换热面积。

$$f(x, y, z) = \cos(x)\sin(y) + \cos(y)\sin(z) + \cos(z)\sin(x) = 0 \quad (1)$$

$$f(x, y, z) = \cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = 0 \quad (2)$$

$$f(x, y, z) = \cos(x)\cos(y)\cos(z) - \sin(x)\sin(y)\sin(z) = 0 \quad (3)$$

$$D_h = \frac{4A}{C} = \frac{4V}{A_c} \quad (4)$$

式中 A 是流动面积; C 是湿周; V 是流体域的体积; A_c 是有效的换热面积。

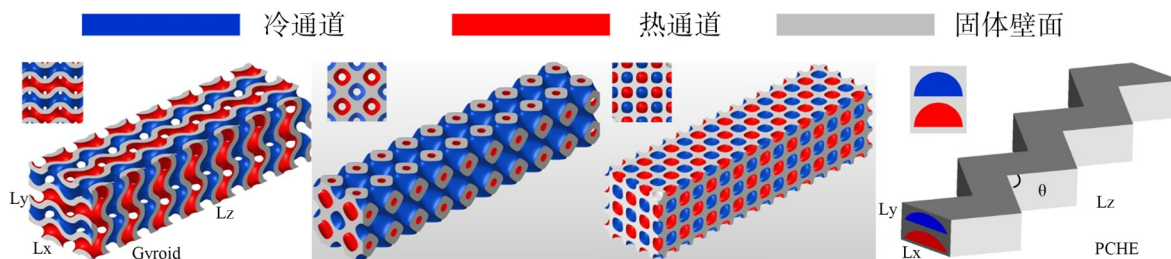


图1 TPMS和PCHE的计算域划分

Fig. 1 The computational domain of TPMS and PCHE

表1 TPMS和PCHE的几何参数

Table 1 The geometrical parameter of TPMS and PCHE

结构	Lx/mm	Ly/mm	Lz/mm	Dh/mm	δ /mm	$\theta/(^\circ)$
Gyroid	9.6	9.6	32.0	2.0	0.7	—
Primitive	8.0	8.0	38.0	2.0	0.7	—
Diamond	12.0	12.0	48.0	2.0	0.7	—
PCHE	9.98	4.68	32.0	2.0	0.7	90

不同结构的网格划分如图 2 所示,其中 PCHE 使用结构化网格进行离散化。相比之下,由许多小表面组成的 TPMS 结构的几何模型在定义几何边界方面存在挑战。因此,TPMS 模型采用非结构化网格方法。经网格敏感性分析,Gyroid、Primitive、Diamond 和 PCHE 的网格数分别为 420 万、380 万、600 万和 255 万。

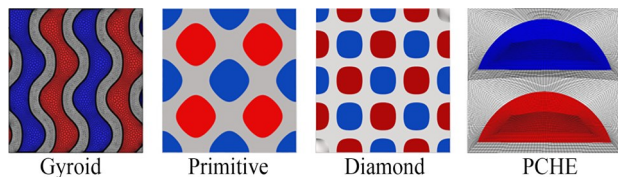


图2 网格划分方案

Fig. 2 Mesh generation

1.2 计算模型和边界条件设置

换热器的计算域包含冷流体域、热流体域和固体域。冷、热流体域的进口均设置为质量流量进口,出口设置为压力出口。固体壁面设置为无滑移边界,耦合传热。选择 SIMPLE 算法求解压力-速度耦合过程,当连续性、动量和能量的残差低于 10^{-5} 时,认为稳态计算过程收敛。同时检测出口的平均温度是否达到稳定状态。工质选择摩尔质量为 40 g/mol 的混合工质。具体的边界条件设置见表 2。

表2 边界条件设置

Table 2 Boundary condition setting

参数	热侧		冷侧	
	进口	出口	进口	出口
T/K	800	—	500	—
p/MPa	—	3.0	—	3.0
Re	4 800~48 000	—	7 000~70 000	—

2 结果与分析

以往对换热器的研究主要集中在两个关键性

能参数上:努塞尔数(Nu)和摩擦因数(f)。在本研究中,努塞尔数是通过计算局部表面传热系数 h_{local} 、水力直径 D_h 和导热系数 λ 计算的。局部表面传热系数 h_{local} 通过式(6)计算,局部努塞尔数和平均努塞尔数通过式(6)计算。

$$h_{local} = \frac{Q/A}{T_{wall} - T_{bulk}} \quad (5)$$

$$Nu = \frac{h_{local} D_h}{\lambda_f}, \bar{Nu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Nu_i \quad (6)$$

式中 Q 是热通量; A 是有效传热面积; T_{wall} 是壁面温度; T_{bulk} 是主流体温度; λ_f 是流体的导热系数。局部阻力系数由平均截面压力与进口压力沿流动方向的差得到。局部阻力系数是通过计算沿流动方向不同截面位置处的平均压力与进口压力的差值得到的,具体通过式(7)计算。

$$f = \frac{(P_{in} - P_k)}{2\rho_k v_k^2} \left(\frac{D_h}{L_k} \right), \bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \quad (7)$$

式中 P_{in} 是进口压力; P_k 是截面位置处的平均压力; ρ_k 是截面位置处的平均密度; v_k 是截面位置处的平均流速; L_k 是截面位置 k 与进口之间的距离。综合性能评价系数(PEC)是综合考虑换热器的流动换热的参数,具体计算见式(8),其中下标“base”比较参照的基底。

$$PEC = \frac{Nu/Nu_{base}}{\sqrt[3]{ff_{base}}} \quad (8)$$

2.1 流动传热性能

图3为 $Re=28\ 300$ 时冷流体通道截面湍动能分布,TPMS和PCHE均表现较大的湍动能,但是TPMS的湍动能更高且分布更均匀。TPMS结构在气流旋转区域观察到较弱的再循环。尽管流体在拐角处经历了一个转弯运动,但PCHE中的湍流动能强度低于TPMS结构,这主要是由于PCHE的通道几何结构不太复杂。TPMS结构中的流道允许三种可选的流动方向,包括正向和横向流动。由图4可知,TPMS局部努塞尔数比PCHE高得多。归因于弯曲的通道几何形状,允许更有效的流动状态。

TPMS的特点是相互连接的通道显著增加了湍流动能。湍动能增加不仅提高了换热性能,而且导致更高的压降。图4为沿流动方向的局部努塞尔数和局部阻力系数。TPMS的局部努塞尔数和局部阻

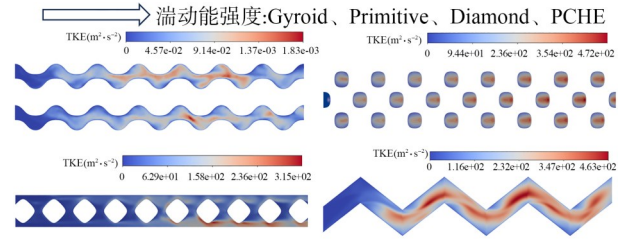


图3 中心截面的湍动能分布

Fig. 3 The distribution of turbulent kinetic energy in the cross-section

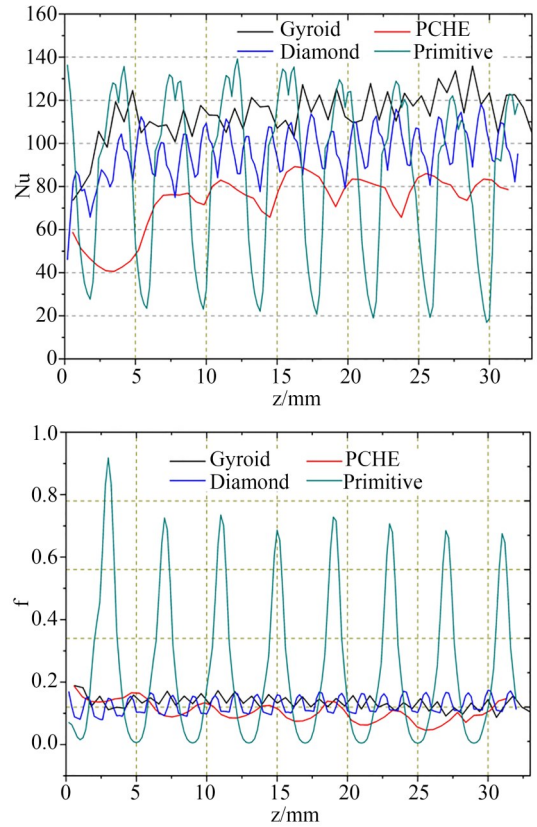


图4 局部努塞尔数和阻力系数分布

Fig. 4 Local Nusselt number and resistance coefficient distribution

力系数整体高于PCHE。从局部Nu数和局部阻力系数可以看出,P结构的流动换热性能会随曲面的改变而剧烈变化,这是由于P结构是直角连接,且流通截面随流动方向变化较大;而G结构是连续的螺旋结构,存在局部高曲率特性,截面积随流动方向变化不大,螺旋二次流增强传热的同时不会产生较大的波动;D结构是分支连通性的,交叉点存在涡流,但是由于空腔与空腔间隔不大,局部曲率适中,因此Nu数和阻力系数随流动方向变化不大。

2.2 综合性能评价

为了更好地比较不同TPMS结构的换热性能,

计算了不同雷诺数进口条件下,不同结构的平均流动换热性能,如图5所示。Nu数最高的是G结构,其次是D结构,最后是P结构,三种TPMS流动的换热性能均比用于比较的PCHE结构高;但是TPMS的阻力系数也相应的高于PCHE,尤其是P结构,约为PCHE结构的两倍,D结构约为1.5倍,G结构约为1.3倍。因此,需要一个准则去评判TPMS结构的整体性能,常见是综合效率PEC,为了更好的表征性能,为后续优化设计服务,提出了综合效率/重量比,主要是针对空间堆轻量化需求提出的。在相同的雷诺数下,与PCHE相比,TPMS的传热性能有显著改善。这种改进归功于TPMS能够产生更高的湍流动能强度,从而有效地增强了传热。然而,湍流动能强度的增加会导致压降的增加。换热设备阻力的显著提高,不利于布雷顿循环效率的提高,需要对换热器的整体性能进行综合评价。从图6可以

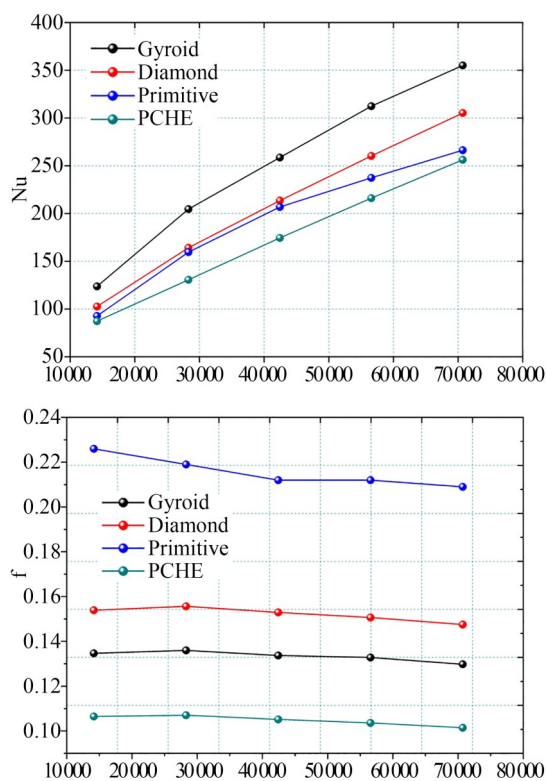


图5 平均努塞尔数分布和平均阻力系数

Fig. 5 Average Nusselt number distribution and comprehensive heat transfer performance

看出,Gyroid的整体性能比PCHE高25%~45%。经计算,在相同的水力直径和壁面厚度下,TPMS的热重比均高于PCHE,其中G结构在计算工况下为

PCHE的2.44倍,具有更高的紧凑性,采用相同的制造材料时,TPMS更具备轻量化性能。

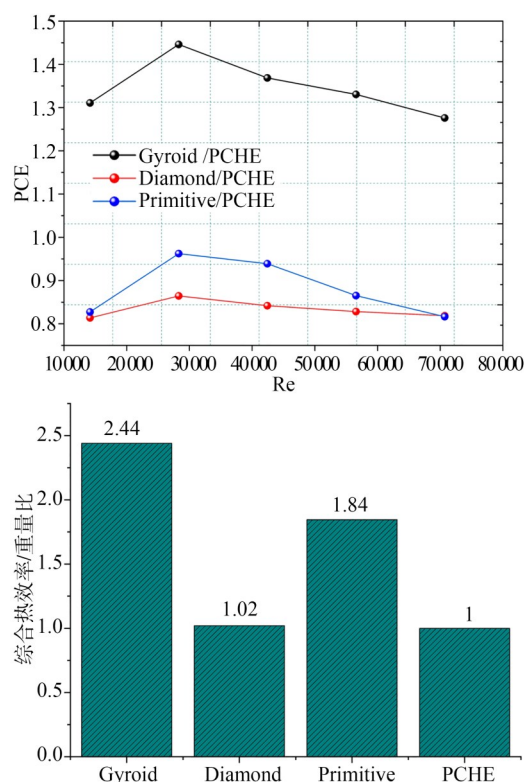


图6 综合评价系数和热重比

Fig. 5 Comprehensive evaluation coefficient and thermogravimetric ratio

3 结论与展望

本文采用CFD方法,计算比较了相同水力直径和壁面厚度的TPMS和PCHE的流动换热性能,换热器的评价指标有努塞尔数、阻力系数、综合换热性能和芯体的比表面积。主要的结论如下:

(1)TPMS的传热性能好,但阻力系数也大,与PCHE相比,Gyroid结构的努塞尔数增加了40%~50%,而阻力系数是PCHE的1.3倍。阻力系数的增加对布雷顿系统的循环效率是不利的。

(2)就综合换热性能而言,TPMS仍然是最有利的,优于PCHE 25%~45%。

(3)虽然TPMS的综合换热性能相比PCHE的提升不高,但是TPMS的比表面积更高,在考虑体积重量时,TPMS更具有优势。

本文的计算结果深入分析了3种不同的TPMS

流动换热特性,也为后续基于增材工艺的高性能换热器的设计和优化提供了数据支撑。对于后续 TPMS 增材制造换热器的发展而言,首先要明确其优化构型以进一步减少压降损失,其次要兼顾增材制造的可行性,并发展增材制造的内流道定向后处理技术。

参考文献:

- [1] Morley N J, El-Genk M S. Neutronics and thermal-hydraulics analyses of the pellet bed reactor for nuclear thermal propulsion [J]. Nuclear technology, 1995, 109 (1):87-107.
- [2] Burdge W D, Levine B L. Space nuclear power plant preconceptual design report; for information [R]. Knolls Atomic Power Laboratory, 2006.
- [3] Dragunov Y G, Smetannikov V P, Gabaraev B A, et al. On calculation of the transport coefficients and thermodynamic properties of a helium-xenon gas mixture [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 22 (1): 21-29.
- [4] Dragunov Y G, Smetannikov V P, Gabaraev B A, et al. On the choice of correlations for calculating the heat transfer coefficient in binary gas mixtures [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 22 (1): 30-42.
- [5] Chu W, Li X, Ma T, et al. Experimental investigation on SCO₂-water heat transfer characteristics in a printed circuit heat exchanger with straight channels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 113: 184-194.
- [6] Li H, Zhang Y, Zhang L, et al. Based modeling on the turbulent convection heat transfer of supercritical CO₂ in the printed circuit heat exchangers for the supercritical CO₂ Brayton cycle [J]. International journal of heat and mass transfer, 2016, 98: 204-218.
- [7] Saeed M, Kim M H. Thermal and hydraulic performance of SCO₂ PCHE with different fin configurations [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127: 975-985.
- [8] El-Genk MS, Tournier J M. Selection of Noble Gas Binary Mixtures for Brayton Space Nuclear Power Systems [C]//4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC), 2006.
- [9] 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.
- [10] Montazerian H, Davoodi E, Asadi-Eydivand M, et al. Porous scaffold internal architecture design based on minimal surfaces: a compromise between permeability and elastic properties [J]. Materials & Design, 2017, 126: 98-114.
- [11] Hesselmann F, Scherenberg N, Bongartz P, et al. Structure dependent gas transfer performance of 3D-membranes for artificial membrane lungs [J]. Journal of membrane science, 2021, 634: 119371.
- [12] Yang W, An J, Chua C K, et al. Acoustic absorptions of multifunctional polymeric cellular structures based on triply periodic minimal surfaces fabricated by stereolithography [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2020, 15 (2): 242-249.
- [13] Ali D. Effect of scaffold architecture on cell seeding efficiency: A discrete phase model CFD analysis [J]. Computers in biology and medicine, 2019, 109: 62-69.
- [14] Kaur I, Singh P. Flow and thermal transport characteristics of Triply-Periodic Minimal Surface (TPMS)-based gyroid and Schwarz-P cellular materials [J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2021, 79 (8): 553-569.
- [15] Al-Ketan O, Ali M, Khalil M, et al. Forced convection computational fluid dynamics analysis of architected and three-dimensional printable heat sinks based on triply periodic minimal surfaces [J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2021, 13 (2): 021010.
- [16] Al-Ketan O, Abu Al-Rub R K. MSLattice: A free software for generating uniform and graded lattices based on triply periodic minimal surfaces [J]. Material Design & Processing Communications, 2021, 3 (6): e205.
- [17] Attarzadeh R, Rovira M, Duwig C. Design analysis of the "Schwarz D" based heat exchanger: A numerical study [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 177: 121415.
- [18] Attarzadeh R, Attarzadeh-Niaki S H, Duwig C. Multi-objective optimization of TPMS-based heat exchangers for low-temperature waste heat recovery [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 212: 118448.
- [19] Wang F, Jiang H, Chen Y, et al. Predicting thermal and mechanical performance of stochastic and architected foams [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 171: 121139.