

# 增材制造核聚变多孔氦增殖剂的传热传质行为

郑尧午<sup>1,2</sup>, 周俊逸<sup>1</sup>, 刘子怡<sup>1</sup>, 蔡基利<sup>1</sup>, 蔡 超<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学材料科学与工程学, 材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074;

2. 中国地质大学机械与电子信息学院, 武汉 430074)

**摘 要:** 氦增殖剂是核聚变堆增殖包层实现“氦自持”的关键功能材料。传统球床结构氦增殖剂受限于填充率上限、应力集中易破碎、气体流动阻力大等问题, 难以兼顾高效传热传质, 进而制约了产氦性能的提升。本工作提出以三周期极小曲面(TPMS)多孔结构氦增殖剂替代传统球床结构的设计思路。选取典型 Gyroid 型与 I-WP 型的 TPMS 结构为研究对象, 建立服役工况下流-热耦合数值模型, 系统对比分析了 2 种 TPMS 结构与传统球床结构的吹扫气体流动行为与传热特性。结果表明, 2 种 TPMS 结构在热工水力性能方面均显著优于球床结构, 其中 Gyroid 结构表现出更为优异的综合性能。在入口流速为 0.1~0.2 m/s 范围内, 在 0.15 m/s 入口流速下, Gyroid 结构的平均流速较球床结构提高约 56%, 压降降低约 50%, 等效导热系数提高约 13.7%。基于此, 采用增材制造技术制备了 Gyroid 多孔结构氦增殖剂样品, 并开展了热工水力性能实验验证, 初步证实该结构在工程应用中的可行性。本研究可为新一代增殖包层的设计与工程化应用提供理论依据与技术支撑。

**关键词:** 核聚变堆; 增材制造; 多孔氦增殖剂; 流动行为; 传热特性

中图分类号: TB33 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)09-2989-11

网络出版时间: 2026-08-18



核聚变能被认为是能够彻底解决世界能源问题的终极方案之一, 具有清洁、高效、无碳排放等显著优势<sup>[1, 2]</sup>。其中, 以氘(D)-氚(T)为燃料的聚变反应因其反应截面大、点火条件相对成熟, 被认为最有可能率先实现工程化应用, 是当前国内外核聚变能研究的重点方向<sup>[3]</sup>。氦在自然界中储量丰富, 而氚在自然界中几乎不存在, 必须依赖核聚变堆在运行过程中实现“氦自持”, 是制约 D-T 聚变堆发展的关键技术难题之一。

目前, 主要解决思路是在聚变堆中设置增殖包层, 利用高能聚变中子轰击含锂材料以实现产氦<sup>[4]</sup>。其中, 锂陶瓷氦增殖剂是发生产氦反应并承担热量传递的关键功能材料<sup>[5-7]</sup>。中子学分析表明, 当氦增殖剂填充率超过约 80%时, 氦增殖比(TBR)才会达到 1.2, 从而满足氦自持要求(TBR $\geq$ 1.2)<sup>[8, 9]</sup>。然而, 受随机堆积几何特性的限制, 球床结构在工程条件下的填充率通常低于 65%, 导致氦增殖比(TBR)低于 1.2, 难以稳定满足氦自持要求。此外, 球床结构

还存在颗粒接触点应力集中、易破碎、气体流动阻力较大以及导热性能有限等固有缺陷, 难以同时实现高效传热与传质, 进而制约了整体产氦与热工性能的协同提升<sup>[10-12]</sup>。

为克服上述局限, 近年来, 研究者提出采用多孔结构替代随机堆积球床结构。这类构型可通过拓扑优化精准调控孔隙形态、流道布局与比表面积, 从根本上消除点接触带来的应力集中和低导热问题。其中, 三周期极小曲面(TPMS)结构因其零平均曲率、连续光滑流道及可调结构参数, 展现出优异的热工水力特性<sup>[13, 14]</sup>。这种由隐函数方程精确控制的多孔框架, 突破了传统多孔材料形态调控的随机性限制, 可通过参数化建模对孔道拓扑进行精准设计。Tang 等<sup>[15]</sup>和苏烯元等<sup>[16]</sup>将 TPMS 结构应用于换热器设计, 显著提升了传热性能。杨晓军等设计了 TPMS 结构换热器, 相比传统换热器热工水力性能更突出<sup>[17]</sup>。Coimbra 等<sup>[18]</sup>也证实 TPMS 光滑流道可有效降低流动压降。TPMS 结构在强化传热、降低

收稿日期: 2026-01-23。 修订日期: 2026-03-04。

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项(2022YFE03210400)。

第一作者: 郑尧午(2004—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 蔡 超(1989—), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2026-01-23. Revised date: 2026-03-04.

First author: ZHENG Yaowu (2004—), male, Master candidate.

E-mail: 3217166942@qq.com

Correspondent author: CAI Chao (1989—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: chaocai@hust.edu.cn

流动阻力及提高结构填充率方面具有良好潜力,为构建高性能氦增殖剂提供了新思路。

随着陶瓷增材制造技术的快速发展,复杂 TPMS 结构的精密制备已成为可能。以数字光投影技术(DLP)为代表的成型技术已能实现具有精细流道的陶瓷构件制备,Su 等<sup>[19]</sup>便利用该技术成功制备了结构高度可控的 TPMS 生物陶瓷支架,为高性能 TPMS 基氦增殖剂的制备奠定了工艺基础。然而,基于 TPMS 结构的多孔陶瓷氦增殖剂研究仍处于起步阶段,该结构在核聚变氦增殖背景下的工程适配性仍需系统性验证。

为此,本工作依靠中国磁约束核聚变能发展研究专项支持,选取具有代表性的 Gyroid 型与 I-WP 型三周期极小曲面(TPMS)拓扑结构,并与传统球床结构开展对比研究。基于流-热耦合数值模型,系统分析了 3 种氦增殖剂构型在氦气吹扫条件下的流动行为与传热特性。通过对流场分布、压降特性及等效导热系数的对比,综合评估不同结构在热工水力性能方面的差异。同时,结合光固化增材制造技术制备了 Gyroid 多孔结构氦增殖剂样品,并开展热工水力性能实验,以验证数值模拟结果的可靠性。研究表明,相较于传统球床结构,TPMS 氦增殖剂整体性能显著提升,其中,Gyroid 结构在流场均匀性、

流动阻力控制及传热强化方面更具优势。该研究为核聚变堆氦增殖包层的构型优化提供了新的设计思路,并为高性能多孔氦增殖剂的工程化应用奠定了理论基础与数据支撑。

## 1 模型与计算方法

### 1.1 几何模型建立

传统球床结构随机堆积的几何特征限制了其填充率的提升(通常低于 65%),难以满足聚变堆的氦自持需求。基于这一中子学约束,本工作选取 80%填充率的 TPMS 结构以实现氦自持的设计目标,并在满足氦自持前提下对不同结构的热工性能进行对比分析。球床结构的几何模型采用离散元法(DEM)建立<sup>[9]</sup>,整体尺寸为 8 mm×8 mm×8 mm。通过随机生成 846 个球形颗粒,颗粒直径分布在 0.6~1.2 mm 范围内,形成填充率约为 65%的球床构型,如图 1a 所示。Gyroid 与 I-WP 结构的几何模型基于三周期极小曲面(TPMS)的隐式三角函数参数化表达式构建<sup>[20–21]</sup>。在 MATLAB 中分别设计了单胞尺寸为 2 mm、填充率为 80%的 Gyroid 与 I-WP 单元结构。通过在 3 个正交笛卡尔方向上的周期性阵列复制,对单胞结构进行空间扩展,最终构建了与球床模型尺寸一致的整体几何模型,如图 1b 和图 1c 所示。

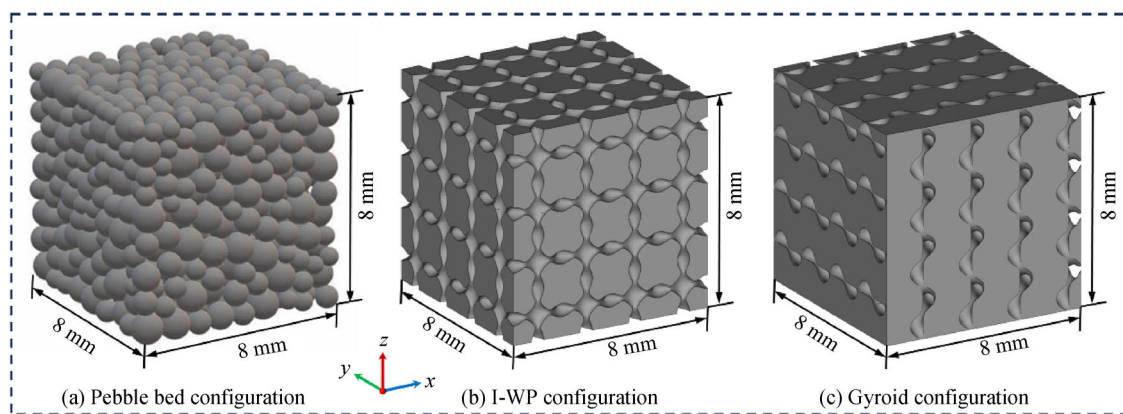


图 1 几何模型

Fig. 1 Geometric models

### 1.2 流-热耦合数值模型

根据中国氦冷固态实验包层模块(HCCB-TBM)的设计参数,氦增殖剂球床的氦气入口流速设定在 0.1~0.2 m·s<sup>-1</sup> 之间。在此流速范围内,流动雷诺数处于层流区间( $Re < 100$ ),适用于层流模型进行模拟<sup>[22]</sup>。为准确表征低雷诺数条件下的流动与传热行为,本工作采用 Ansys Fluent 中的雷诺平均方程(RANS)

对低雷诺数条件下的流动特性进行数值求解,相应的连续性方程、动量方程和能量方程如式(1)、式(2)和式(3)。由于多孔结构几何形态复杂,局部区域出现复杂的流动特征。考虑到球床结构与 Gyroid 块体结构所构成通道内存在的混沌流动特性,本工作选用剪切应力输运(SST)  $k-\omega$  湍流模型描述流场中湍流能量的产生、输运与耗散过程。湍动能  $k$  和

比耗散率  $\omega$  的控制方程见式(4)和式(5)。

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\vec{u} (\rho E + P)) = \nabla \cdot (\lambda_f \nabla T) \quad (3)$$

式中:  $P$  为静压;  $\vec{u}$  为流体的动力黏度;  $E$  为总能量;  $\lambda_f$  为流体的热导率。f 代表流体域。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (5)$$

式中:  $\mu$  为湍流黏度;  $\sigma_k$  和  $\sigma_\omega$  分别为  $k$  和  $\omega$  的湍流普朗特数;  $G_k$  为平均速度梯度引起的湍动能生成项;  $G_\omega$  为  $\omega$  的生成项;  $Y_k$  和  $Y_\omega$  分别为湍流引起的  $k$  和  $\omega$  的耗散项;  $D_\omega$  为交叉扩散项。

### 1.3 网格划分与边界条件

针对 TPMS 结构几何复杂、流-热多物理场耦合对网格要求高的问题, 本工作采用分区域网格划分与几何光滑处理相结合的策略, 构建了以六面体网格为主、复杂区域辅以多面体网格的高质量计算网格, 并在流固交界面实现共节点划分。边界层采用平滑过渡方式进行处理, 近壁区域设置 5 层边界层网格, 过渡比为 0.272, 增长率为 1.2。为平衡计算效率与结果精度, 本工作选取 0.12 作为网格划分标准, 并分别对球床、Gyroid 和 I-WP 氦增殖剂进行网格无关性验证, 如图 2 所示。当网格数量分别增加至  $4.66 \times 10^5$ 、 $19.51 \times 10^5$  和  $12.48 \times 10^5$  时, 单位长度压降( $\Delta P/L$ )与等效导热系数( $k_{\text{eff}}$ )变化幅度低于 2%, 表明计算结果对网格划分具有良好的独立性。图 3 为最终球床、Gyroid 和 I-WP 多孔氦增殖剂的网格划分示意图。

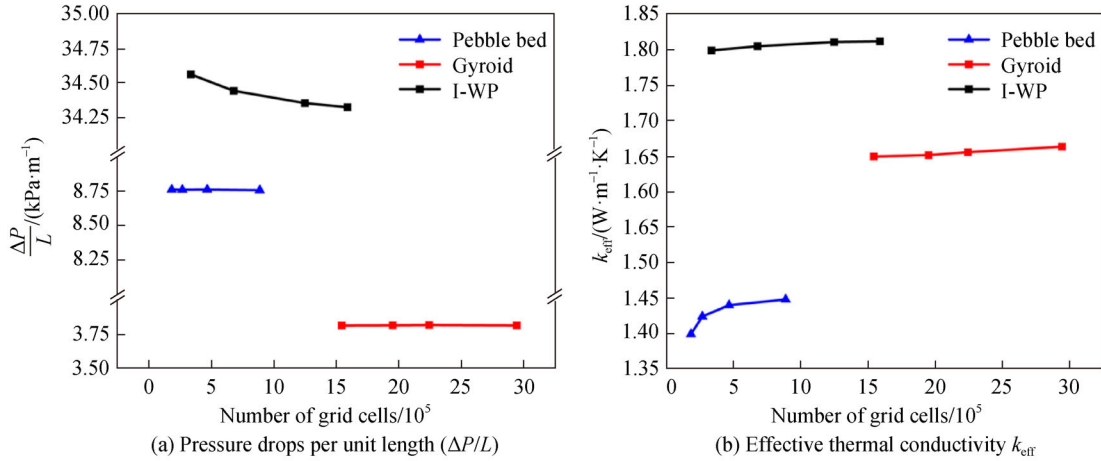


图 2 网格无关性验证

Fig. 2 Mesh independence verification

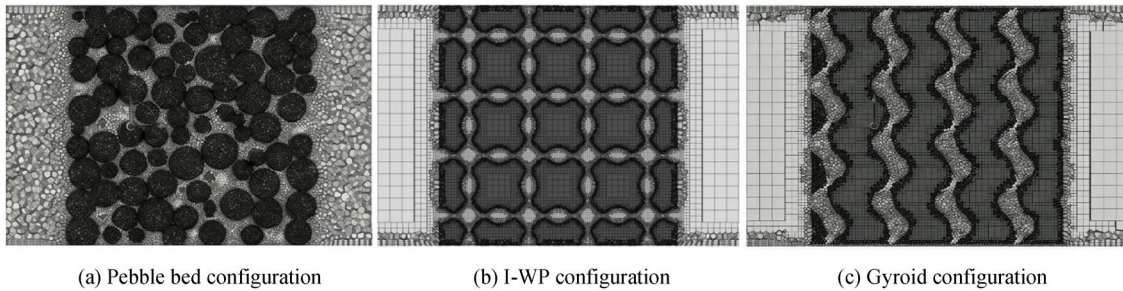


图 3 网格划分示意图

Fig. 3 Schematic of mesh generation

球床、I-WP 和 Gyroid 氦增殖剂的计算域构型如图 4 所示。计算模型以 8 mm 立方体增殖单元为核心, 将其置于立方体流场域中, 入口与出口分别设有 4 mm 与 8 mm 延长段, 用于稳定流动并抑制回流干扰。氦气吹扫气体以 0.1~0.2 m/s 的

速度从入口进入, 穿透增殖结构后从压力出口流出。增殖单元顶部设置恒定温度热源, 温度范围为 773~1173 K。入口设置为速度进口, 初始温度为 298 K, 出口设置为表压为零的压力出口。所有模型中固体与流体交界面均采用共节点网格与

耦合传热边界条件, 确保热量传递精确模拟。本工作选用偏钛酸锂( $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ )陶瓷作为氚增殖剂材料, 氦气作为吹扫气体, 二者与温度相关的物

性参数设置如表 1 所示。模型采用压力耦合方程组的半隐式法(SIMPLE)实现速度和压力的耦合计算。

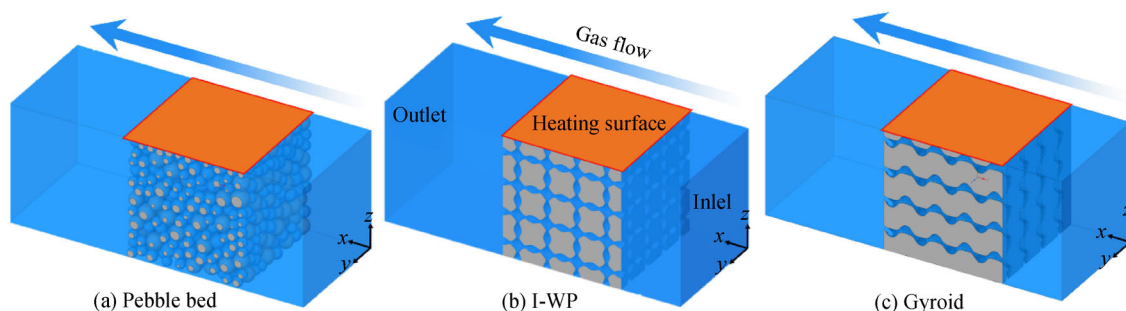


图 4 计算域示意图

Fig. 4 Schematic of the computational domains

表 1  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  陶瓷和氦气的材料属性<sup>[23]</sup>

Table 1 Physical properties of  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  ceramic and Helium<sup>[23]</sup>

| Material                  | Property               | Equation                                                                                                                                            |
|---------------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ | Thermal conductivity   | $\lambda = (1 - \varphi)^{2.9} (5.35 - 4.78 \times 10^{-3} T - 8 \times 10^{-6} T^2)$ $0.14 \leq \varphi \leq 0.25, 400 \leq T \leq 1400 \text{ K}$ |
|                           | Specific heat capacity | $c_p = (355(T - 100)^{1.1}) / (1 + 0.37^{1.05})$ $300 \text{ K} \leq T \leq 1400 \text{ K}$                                                         |
|                           | Density                | $\rho = 3430 \text{ kg / m}^3$                                                                                                                      |
| He                        | Thermal conductivity   | $\lambda = 0.1448(T / 273)^{0.68} [1 + 2.5 \times 10^{-3} \times P^{1.17} (T / 273)^{-1.85}]$                                                       |
|                           | Specific heat capacity | $c_p = 5196.56$                                                                                                                                     |
|                           | Density                | $\rho = 480.19 P / T$                                                                                                                               |

## 2 结果与讨论

### 2.1 吹扫气体流动行为

**2.1.1 流场与速度分布** 通过追踪从中心面上流出气体的吹扫气体轨迹, 可评估吹扫气体在不同结构中的有效路径, 进而评估氚提取潜力<sup>[24,25]</sup>。图 5 为中心截面吹扫气体流场分布。由图 5 可见, 球床结构中气体沿微球外表面流动, 在无序孔道内形成扩散流场, 不规则堆积增加了氚滞留风险。TPMS 结构则具有连续连通的孔道网络和更均匀的流场分布, 有助于减少氚滞留并提高氚释放效率。其中, I-WP 结构则呈现类直通通道, 其相邻通道间夹角接近  $90^\circ$ , 限制了气体向相邻通道扩散, 有效吹扫路径较为单一。Gyroid 结构因其连续曲面拓扑及约  $45^\circ$  的通道夹角设计, 引导气体在多个周期内充分扩展至单元边缘, 增强了横向扩散能力与流场均匀性, 有利于提升氚提取与输运效率。

速度分布是氚增殖剂产氚能力的一个重要影响因素, 在较小的气体流速下, 吹扫气体的载氚量会随着吹扫气体流速的增加而增加, 进而导致吹扫气体区域的氚滞留和氚分压降低, 渗透进入结构材料和冷却剂的氚减少, 有利于提升氚提取效率<sup>[24,26]</sup>。图 6 为不同氚增殖剂的吹扫气体速度分布。球床因微球随机堆积形成宽窄不一的流道, 在宽隙处流速可达入口速度的 20 倍( $2.1 \sim 4.2 \text{ m/s}$ ), 其窄隙区域存在明显的气体停滞区, 易导致氚滞留。I-WP 结构在流道收缩处流速极高(可达  $11.9 \text{ m/s}$ ), 但轴线附近持续存在低速带( $< 0.1 \text{ m/s}$ ), 气体停滞问题依然突出。相比之下, Gyroid 结构流速呈周期性变化, 其最大流速( $1.8 \sim 3.6 \text{ m/s}$ )虽低于前两者, 但其最低流速稳定在  $0.4 \sim 0.8 \text{ m/s}$ , 较球床和 I-WP 氚增殖剂提升 8~15 倍。在  $0.15 \text{ m/s}$  入口流速下, 球床和 Gyroid 结构流体域的体积加权平均流速可暂取为  $0.48 \text{ m/s}$  和  $0.75 \text{ m/s}$ , 此时 Gyroid 结构的平均流速较球床提高约 56.3%。这表明, Gyroid 结构在维持流动均匀

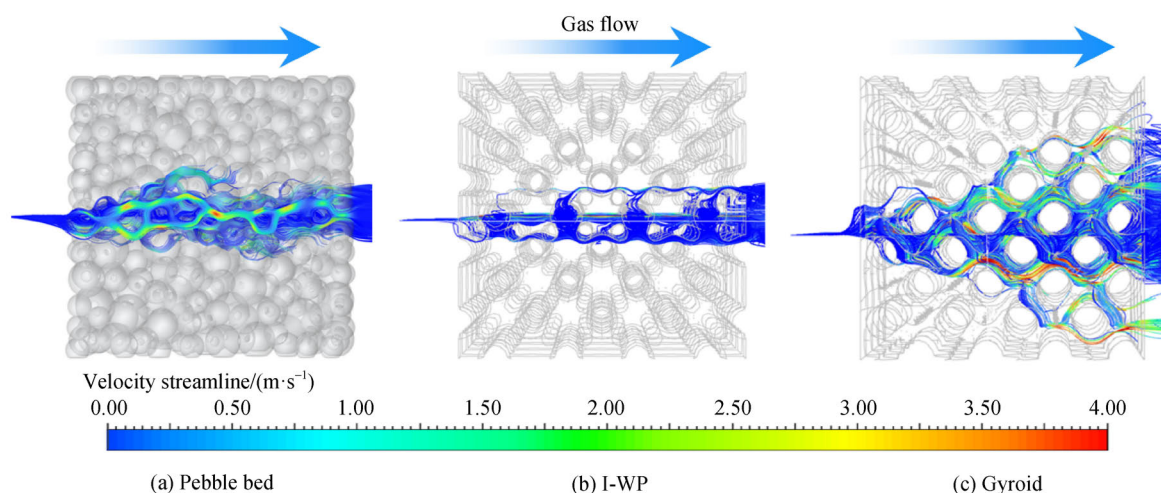


图 5 中心截面吹扫气体流场分布

Fig. 5 Sweep gas flow field distribution on the central cross section

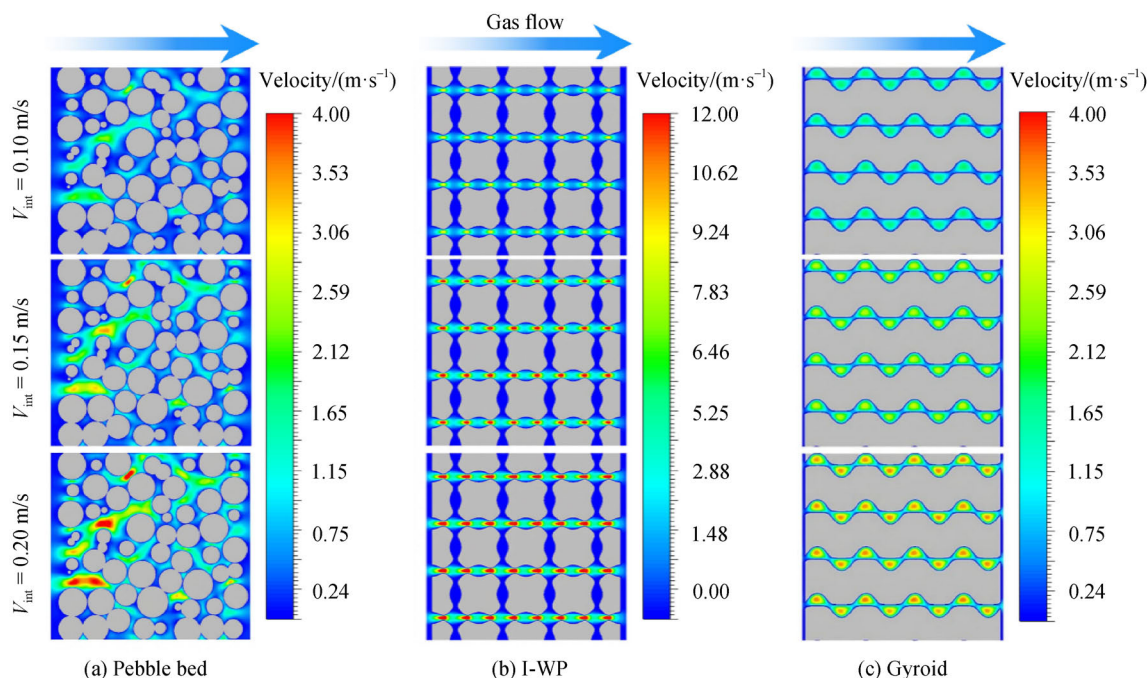


图 6 二维速度分布云图

Fig. 6 Two-dimensional velocity contour plots

性、抑制氦滞留方面具有显著优势, 更有利于氦的高效稳定输运。

**2.1.2 压力分布与压降** 图 7 为不同氦增殖剂的截面平均压力与流动距离的关系, 氦增殖剂的结构形状对气体流动阻力具有决定性影响。由图 7 可见, 3 种结构在 0.1~0.2 m/s 入口速度下均呈现入口压力最高、出口降至大气压的整体趋势, 但压力沿流动方向的分布特征差异显著。球床结构因壁面效应, 在近入口与出口区域出现压力变化平台, 中心区域压力随距离线性下降, 最大压力为 44.7~90.4 Pa。I-WP 结构因流道急剧收缩, 入口压

力高达 176~383 Pa, 且压力沿程呈阶梯式下降, 反映其周期性狭窄流道带来的高流动阻力。相比之下, Gyroid 结构压力分布沿程保持良好线性关系, 最大压力仅为 20~41 Pa, 约为球床结构的 45.4%和 I-WP 结构的 10.7%。单位长度压降根据不同入口速度下归一化距离的截面压力分布计算得出。随入口速度从 0.1 m/s 增至 0.2 m/s, 球床压降由 5.59 kPa/m 升至 11.30 kPa/m, I-WP 结构压降由 22 kPa/m 增至 47.8 kPa/m, 而 Gyroid 结构压降仅为 2.58~5.19 kPa/m, 分别约为球床结构的 45.9%~46.2%和 I-WP 结构的 10.9%~11.7%。在 0.15 m/s 入

口速度下, 球床和 Gyroid 结构的压降分别约为 8.45 kPa/m 和 3.89 kPa/m, Gyroid 结构较球床降低约 54.0%。Gyroid 结构在实现 80% 高填充率的同时,

具备远低于球床和 I-WP 的流动阻力, 展现出显著的结构优势, 为高产氦性能包层设计提供了新的可行路径。

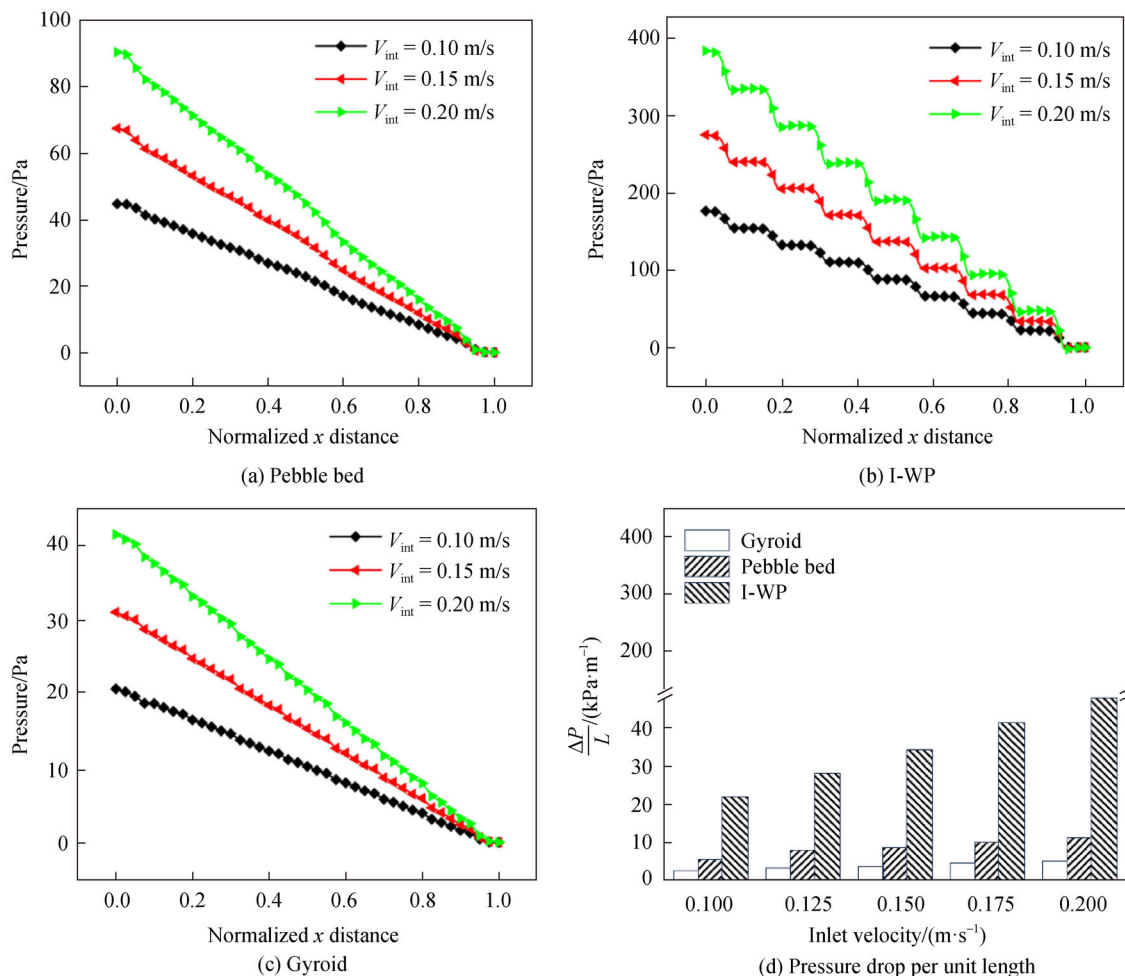


图7 压力分布与压降特性

Fig. 7 Pressure distribution and pressure drop characteristics

## 2.2 传热特性

**2.2.1 流-热耦合温度分布** 在氦气吹扫条件下, 通过对模型入口( $L_0$ )、中心( $L_1$ )和出口( $L_2$ )位置进行切片处理, 得到截面温度分布(图 8)。由于入口效应的影响, 固体与吹扫气体在  $L_0$  处进行了强烈的热交换, 导致 3 种氦增殖剂的上下表面温度差均较大。在球床结构中, 同一层的颗粒温度分布不均匀, 这是由于球床与吹扫气体接触面积较大, 热对流能力增强, 直到出口  $L_2$  位置, 温度场才达到均匀状态。在 I-WP 氦增殖剂的  $L_0$  位置, 十字形流道里的气体温度低于固体区域, 随着气体流动到  $L_1$  位置时, 流固交界面温度区域一致, 系统基本达到热稳定。在 Gyroid 氦增殖剂中, 入口  $L_0$  处的温度分布随流道形状呈波浪形, 在  $L_1$  位置处流固交界面的热交换未完全达到稳定, 直到出

口  $L_2$  处温度场才完全稳定, 达到均匀状态。以上分析表明, I-WP 氦增殖剂比球床和 Gyroid 氦增殖剂更能抵抗入口效应的干扰, 具有更优异的热传导性能。

**2.2.2 等效导热系数** 综合传导与对流贡献, 得到整体等效导热系数( $k_{eff}$ )如图 9 所示。在服役工况 (0.15 m/s) 下,  $k_{eff}$  随温度升高而增加。在 500~900 °C 范围内, 球床  $k_{eff}$  由 1.352 W/(m·K) 增至 1.581 W/(m·K), Gyroid 由 1.593 W/(m·K) 增至 1.799 W/(m·K), I-WP 由 1.745 W/(m·K) 增至 1.964 W/(m·K)。在相同温度下, Gyroid 结构的  $k_{eff}$  较球床提高约 13.8%~17.8%, 较 I-WP 结构低约 8.4%~8.7%。2 种 TPMS 结构具有较高的填充率, 均展现出优于传统球床的导热性能, 其中, I-WP 在纯导热方面表现突出, 而 Gyroid 在综合传热特性上更为均衡。

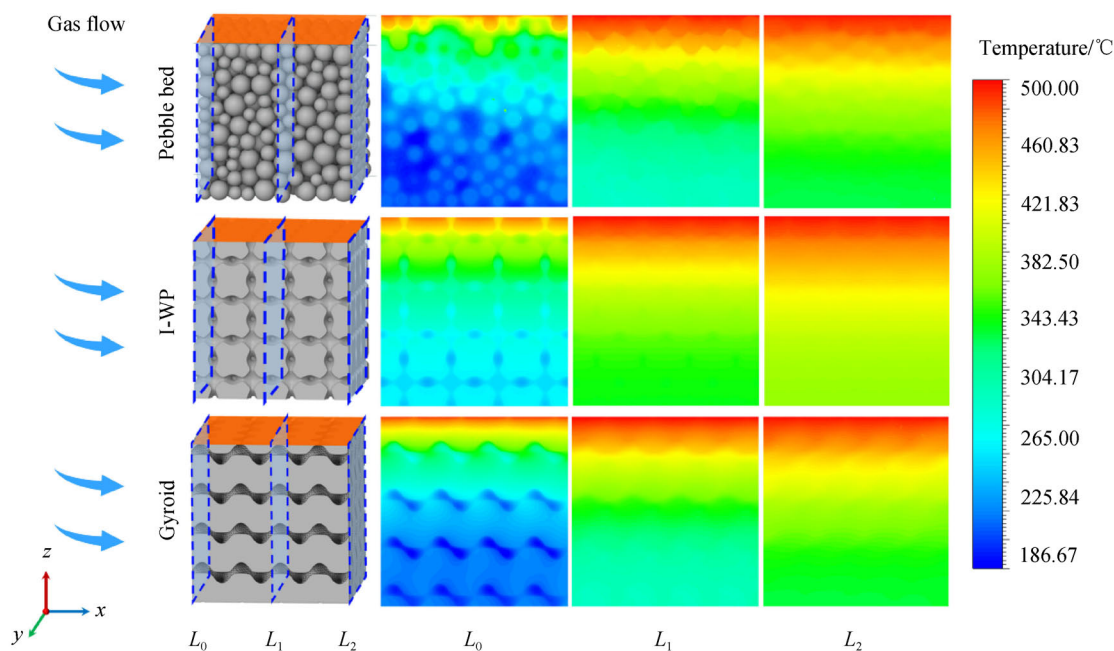
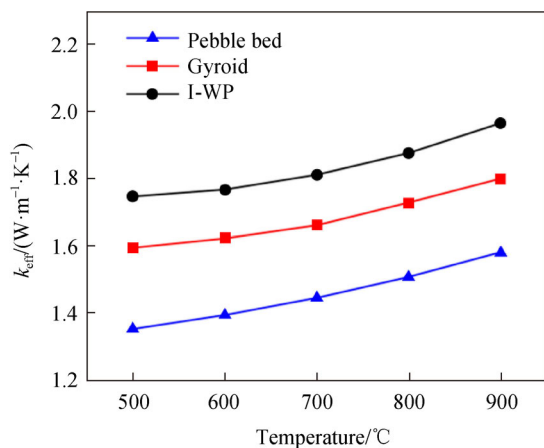


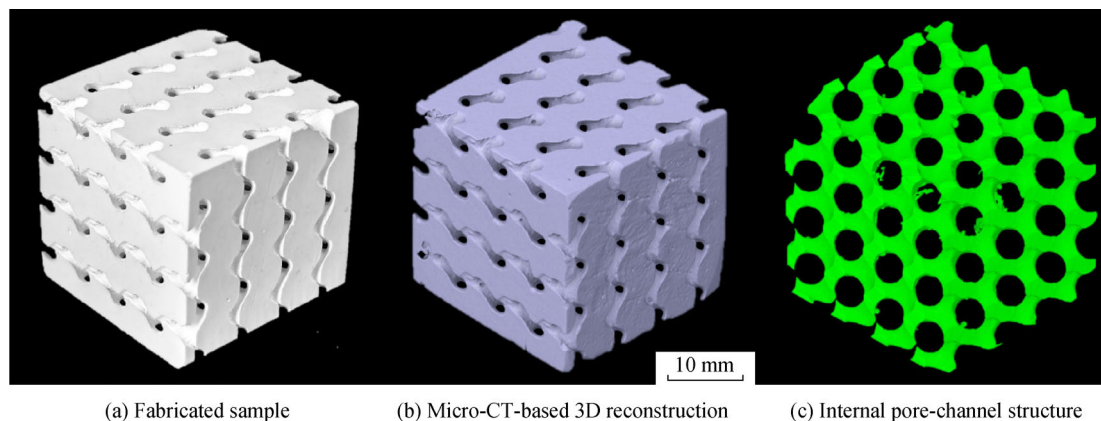
图 8 截面温度分布

Fig. 8 Cross-sectional temperature distribution

图 9 不同氚增殖剂的等效导热系数  $k_{eff}$ Fig. 9 Equivalent thermal conductivity of different tritium breeder  $k_{eff}$ 

### 3 多孔氚增殖剂制备与性能验证

基于上述模拟结果, Gyroid 结构在流场均匀性、流动阻力控制及传热效率方面表现出更为优越的综合性能, 因此, 被选用于实验验证。实验采用平均粒径  $3.48 \mu\text{m}$ 、纯度大于 99% 的  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  陶瓷粉末配制浆料。利用光固化技术打印高精度树脂牺牲模具, 将陶瓷浆料注入模具后经凝胶固化定型, 最终经冷冻干燥和烧结获得 Gyroid 多孔氚增殖剂样品。具体工艺流程已在前期工作中进行了报道<sup>[21]</sup>, 图 10a 为所制备样品的实物图。利用微计算机断层扫描(micro-CT)技术对样品进行三维结构重建(图 10b), 结果显示其内部通道的体积分数约为 20%, 对应内部填充率约为 80%。图



(a) Fabricated sample

(b) Micro-CT-based 3D reconstruction

(c) Internal pore-channel structure

图 10 增材制造 Gyroid 多孔氚增殖剂

Fig. 10 Additively manufactured Gyroid block tritium breeder

10c 显示样品内部形成了结构清晰且连通性良好的三维孔道网络。

为评价 Gyroid 氚增殖剂相较传统球床的流动阻力优势, 选取 Wang 等<sup>[27]</sup>报道的粒径为 1 mm 的球床压降实验数据作为对比基准, 并对填充率为 80% 的 Gyroid 氚增殖剂开展压降实测分析, 如图 11a 所示。在 0.04~0.30 m/s 的入口流速范围内, 80% 填充率 Gyroid 氚增殖剂的压降由 0.305 kPa/m 增加至 2.108 kPa/m, 仅为球床结构的 28.0%~30.9%, 表明

在显著提高填充率的同时, 其流动阻力仍明显低于传统球床。数值结果与实验数据在入口流速低于 0.20 m/s 时具有较好一致性, 误差控制在可接受范围内, 而在更高流速下误差有所增大, 主要与数值模型未考虑实际螺旋通道中可能出现的局部湍动效应以及样品内部孔道表面粗糙度有关。所建立的数值模型能够在 0~0.20 m/s 流速范围内精准地预测 Gyroid 氚增殖剂的气体流动特性, 满足水冷陶瓷增殖剂包层(WCCB)中吹扫气体流速的需要<sup>[28]</sup>。

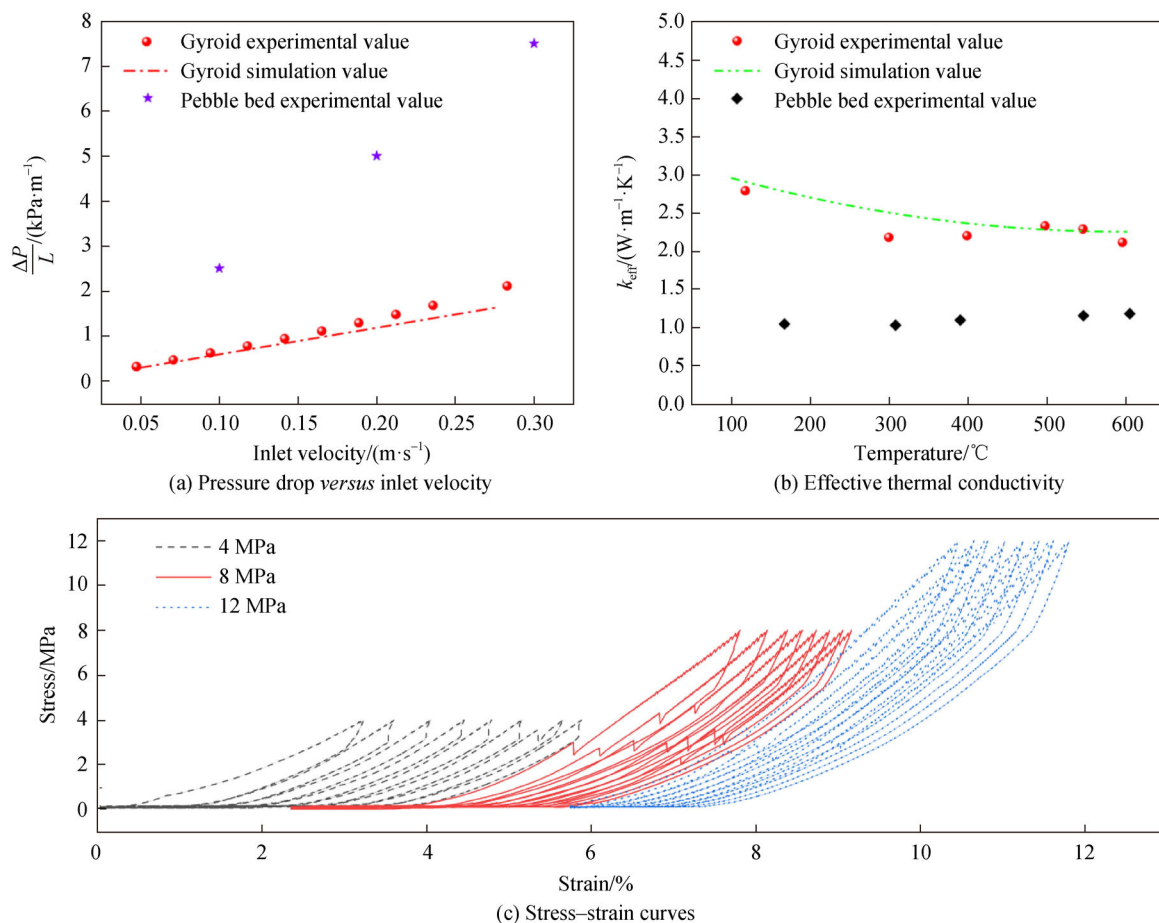


图 11 Gyroid 氚增殖剂性能测试

Fig. 11 Performance tests of the Gyroid tritium breeder

图 11b 为氢气气氛下实测得到的 80% 填充率 Gyroid 氚增殖剂的等效导热系数。随着温度由 100 °C 升高至 600 °C, 其等效导热系数呈非线性下降趋势, 由 2.790 W/(m·K) 降至 2.114 W/(m·K), 与 Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> 陶瓷本征导热系数随温度升高而降低的变化规律一致。与 Abou-Sena 等<sup>[29]</sup>报道的填充率约 63% 的 Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> 球床实验结果相比, Gyroid 氚增殖剂的等效导热系数提高了约 112%~168%。这主要归因于更高的填充率, 以及一体化拓扑结构将热传导路径由传统的“固-点-固”模式转变为连续的“固-固”

导热形式。模拟值与实验值的全局最大误差为 14.8%, 出现在约 300 °C, 表明所建立的流-热耦合数值模型能够较为合理地预测 Gyroid 氚增殖单元的导热性能。误差主要来源于实验样品与理想模型之间的差异, 数值模型基于理想化几何结构与均匀材料参数建立, 而实际样品在打印与烧结过程中不可避免地存在尺寸偏差、表面粗糙度及局部收缩不均等因素, 从而对流动与传热性能产生影响。

为评估 Gyroid 氚增殖剂的机械可靠性, 在 4、8 MPa 和 12 MPa 循环机械载荷条件下开展了单轴压

缩实验(图 11c)。在 12 MPa 循环载荷作用下, 样品的最大应变仅为 1.3%且无任何失效破碎, 表现出高结构刚度与稳定性。相比之下, 传统球床结构氚增殖剂在 6 MPa 载荷下应变已达到 5.0%, 且破碎率高达 8%<sup>[30]</sup>。Gyroid 氚增殖剂力学性能的提升源于其具有平滑连续的三维骨架, 能够将传统颗粒床中的点接触受力模式转变为更均匀的面分布承载形式, 从而有效降低局部应力集中并提高整体结构稳定性。实验数据表明, Gyroid 氚增殖剂具有很高的机械强度与抗疲劳性能力, 为其在包层模块中的结构完整性与长期服役可靠性提供了有力支撑。

## 4 结论

本工作面向核聚变堆增殖包层应用, 提出并验证了一种基于三周期极小曲面(TPMS)的高性能多孔陶瓷氚增殖剂设计方案。通过数值模拟与实验相结合的研究方法, 成功制备并表征了 Gyroid 型多孔陶瓷氚增殖剂, 系统评估了其吹扫气体流动行为与传热特性, 结果表明该结构在服役工况下具备良好的热工水力性能与应用潜力。

1) 相较于传统球床结构, Gyroid 型与 I-WP 型两种 TPMS 结构氚增殖剂均能够显著降低流动阻力并改善吹扫气体的流场分布, 从而实现整体热工水力性能的明显提升。

2) 在 2 种 TPMS 构型中, Gyroid 结构表现出更优的综合性能, 其平均流速较球床结构提高约 56.3%, 压降降低约 54.0%, 等效导热系数提高约 13.8%, 在流动与传热协同优化方面展现出明显优势。

3) 数值模拟与实验测试结果的变化趋势保持良好一致性, 验证了所建立数值模型的可靠性, 并初步证实了 Gyroid 结构多孔陶瓷氚增殖剂的工程可行性, 为新一代增殖包层结构设计提供了新的思路与技术支持。

随着陶瓷光固化增材制造技术的发展, 大尺寸复杂陶瓷构件已实现高精度制备。本工作实验样品仍处于毫米尺度, 但在实际氚增殖包层应用中, 可通过光固化结合凝胶注模直接制备大尺度整体结构, 或采用模块化单元阵列组合实现尺度扩展与工程适配。

### 参考文献:

- [1] XU K, QI C, WANG B. Recent progress in research of solid tritium breeder materials  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ : A review[J]. *Coatings*, 2022, 12(8): 1053.
- [2] MOHAMED M, ZAKUAN N D, TENGKU HASSAN T N A, et al. Global development and readiness of nuclear fusion technology as the alternative source for clean energy supply[J]. *Sustainability*, 2024,

- 16(10): 4089.
- [3] WAS G S, PETTI D, UKAI S, et al. Materials for future nuclear energy systems[J]. *J Nucl Mater*, 2019, 527: 151837.
- [4] WU W H, WANG H X, FU X W, et al. Experiment study on tritium release behavior of  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  ceramic breeder irradiated by 14 MeV fusion neutron[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2024, 68: 1393–1397.
- [5] TAN G F, OYA Y, ZHANG Y C, et al. Tritium release performance of centrifugally granulated  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  pebbles[J]. *J Nucl Mater*, 2026, 618: 156213.
- [6] SU F, LI Y Z, XING H H, et al. Additive manufacturing of high-quality tritium breeding pebbles using ceramic precursors[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2024, 44(7): 4719–4730.
- [7] ZHANG S F, LU W, JIANG Y F, et al. Modified Freeze-granulation method for fabricating  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  ceramic tritium breeding pebbles[J]. *Ann Nucl Energy*, 2023, 183: 109649.
- [8] LI J, ZHANG J, QIU Y, et al. Study on the TBR variation induced by breeding material ratio of water-cooled blanket for CFETR[J]. *Fusion Sci Technol*, 2020, 76(1): 70–77.
- [9] FENG Y J, GONG B P, CHENG H, et al. Effects of bed dimension, friction coefficient and pebble size distribution on the packing structures of the pebble bed for solid tritium breeder blanket[J]. *Fusion Eng Des*, 2021, 163: 112156.
- [10] 盛倩, 吴姝琴, 王晓宇, 等. 中国氦冷固态增殖剂实验包层模块材料研究进展[J]. *原子能科学技术*, 2022, 56(7): 1402–1412.
- SHENG Qian, WU Shuqin, WANG Xiaoyu, et al. *At Energy Sci Technol*, 2022, 56(7): 1402–1412.
- [11] ABOU-SENA A, YING A, ABDOL M. Effective thermal conductivity of lithium ceramic pebble beds for fusion blankets: A review[J]. *Fusion Sci Technol*, 2005, 47(4): 1094–1100.
- [12] CHENG H, GONG B P, ZHOU B, et al. Experimental investigation on pressure drops of purge gas helium in packed pebble beds for nuclear fusion blanket[J]. *Energies*, 2024, 17(6): 1309.
- [13] 梁朋, 张东旭. 三周期极小曲面结构对流传热关系式研究进展[J]. *信息系统工程*, 2025(8): 73–76.
- LIANG Peng, ZHANG Dongxu. *China CIO News*, 2025(8): 73–76.
- [14] 余天昊, 牛军, 袁化成, 等. 基于 TPMS 变形结构的流动换热特性研究[J]. *内燃机与配件*, 2025(8): 13–15.
- YU Tianhao, NIU Jun, YUAN Huacheng, et al. *Intern Combust Engine Parts*, 2025(8): 13–15.
- [15] TANG W, ZHOU H, ZENG Y, et al. Analysis on the convective heat transfer process and performance evaluation of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) based on Diamond, Gyroid and Iwp[J]. *Int J Heat Mass Transf*, 2023, 201: 123642.
- [16] 苏烯元, 张月亮, 饶宇, 等. 增材制造三周期极小曲面换热器流动传热特性实验[J]. *推进技术*, 2025, 46(9): 197–205.
- SU Xiyuan, ZHANG Yueliang, RAO Yu, et al. *J Propuls Technol*, 2025, 46(9): 197–205.
- [17] 杨晓军, 张雪丽, 李国良. 基于 TPMS 的空气-燃油换热器流动和传热特性研究[J]. *热能动力工程*, 2024, 39(5): 123–133.
- YANG Xiaojun, ZHANG Xueli, LI Guoliang. *J Eng Therm Energy Power*, 2024, 39(5): 123–133.
- [18] COIMBRA J C, MARTINS M A, OLIVEIRA P S, et al. The potential use of a gyroid structure to represent monolithic matrices for bioseparation purposes: Fluid dynamics and mass transfer analysis via CFD[J]. *Sep Purif Technol*, 2021, 254: 117594.
- [19] SU J, HUA S B, CHEN A N, et al. Three-dimensional printing of gyroid-structured composite bioceramic scaffolds with tuneable degradability[J]. *Biomater Adv*, 2022, 133: 112595.

- [20] KARAKOÇ A. RegionTPMS: Region based triply periodic minimal surfaces (TPMS) for 3-D printed multiphase bone scaffolds with exact porosity values[J]. *SoftwareX*, 2021, 16: 100835.
- [21] CHEN H Y, ZHOU J Y, CAO Y D, et al. Stereolithography and gelcasting of  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  block breeders with a Gyroid structure: Slurry optimization and performance evaluation[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2024, 44(10): 5978–5988.
- [22] 程昊, 范丽, 周冰, 等. 氦增殖剂球床内氦气流动特性的数值模拟[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2021, 41(4): 610–616.  
CHENG Hao, FAN Li, ZHOU Bing, et al. *Nucl Fusion Plasma Phys*, 2021, 41(4): 610–616.
- [23] LIU S L, PU Y, CHENG X M, et al. Conceptual design of a water cooled breeder blanket for CFETR[J]. *Fusion Eng Des*, 2014, 89(7/8): 1380–1385.
- [24] GONG B P, CHENG H, ZHOU B, et al. Investigation of wall effect on packing structures and purge gas flow characteristics in pebble beds for fusion blanket by combining discrete element method and computational fluid dynamics simulation[J]. *Appl Sci*, 2024, 14(6): 2289.
- [25] 宋娟, 郭海兵, 黄洪文. 增殖剂球床载气流动特性[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(1): 229–233.  
SONG Juan, GUO Haibing, HUANG Hongwen. *High Power Laser Part Beams*, 2015, 27(1): 229–233.
- [26] LEI M Z, LIU S M, WU Q G, et al. Research on purge gas flow characteristics in different pebble bed structures for fusion blanket[J]. *Prog Nucl Energy*, 2023, 155: 104488.
- [27] WANG M J, LIU D, XIANG Y, et al. Experimental study of the helium flow characteristics in pebble-bed under the condition of CFETR's blanket module[J]. *Prog Nucl Energy*, 2017, 100: 283–291.
- [28] 凌启鑫, 马学斌, 刘松林. CFETR 水冷包层模块热工水力学分析与优化[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2022, 42(3): 301–307.  
LING Qixin, MA Xuebin, LIU Songlin. *Nucl Fusion Plasma Phys*, 2022, 42(3): 301–307.
- [29] ABOU-SENA A, YING A, ABDOU M. Experimental measurements of the interface thermal conductance of a lithium metatitanate pebble bed[J]. *Fusion Sci Technol*, 2009, 56(1): 206–210.
- [30] HE C Y, WANG C, LIU Y, et al. Experimental study on mechanical characteristics of  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  pebble beds under cyclic loading[J]. *Fusion Sci Technol*, 2023, 79(6): 723–733.

#### 作者贡献声明:

郑尧午: 实验测试、设计论文框架、撰写论文  
周俊逸: 绘制图表、参与数据分析与论文撰写  
刘子怡: 实验测试、参与数据分析  
蔡基利: 完善论文框架, 修订论文  
蔡超: 提出研究方向、提供项目支持

## Heat and Mass Transfer Behavior of Additively Manufactured Porous Tritium Breeders for Nuclear Fusion

ZHENG Yaowu<sup>1,2</sup>, ZHOU Junyi<sup>1</sup>, LIU Ziyi<sup>1</sup>, CAI Jili<sup>1</sup>, CAI Chao<sup>1</sup>

(1. State key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

### Extended Abstract

**Introduction** Tritium breeders are key functional materials for achieving tritium self-sufficiency in the breeding blanket of nuclear fusion reactors. Conventional pebble bed tritium breeders are limited due to an upper bound of packing factor, stress concentration-induced fragmentation, and high gas flow resistance, making them difficult to simultaneously achieve efficient heat and mass transfer, thus restricting the enhancement of tritium production performance. In this study, a design concept employing porous tritium breeders based on triply periodic minimal surfaces (TPMS) was proposed as an alternative to the conventional pebble bed configuration. Typical Gyroid and I-WP structures were selected as research objects, and a flow-solid coupled numerical model under reactor-relevant operating conditions was proposed to systematically compare the sweep gas flow behavior and heat transfer characteristics of the two TPMS structures with those of the conventional pebble bed.

**Methods** The geometric model of the pebble bed was constructed by discrete element method (DEM), while the Gyroid and I-WP structures were generated based on implicit trigonometric parametric representations. Numerical simulations were performed by a software named Ansys Fluent with the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations coupled with the shear stress transport (SST) model to investigate the flow and heat transfer characteristics of helium within porous microchannels. Gyroid-type porous tritium breeder samples were fabricated by a stereolithography system, and their internal three-dimensional architectures were reconstructed via micro-computed tomography (micro-CT). The pressure drop and effective thermal conductivity of the samples were measured using a helium flow resistance pressure-drop measurement setup and a Hot Disk TPS 2500S thermal conductivity analyzer, respectively.

**Results and discussion** Compared with the conventional pebble bed configuration, TPMS-based tritium breeders exhibit significant advantages in thermo-hydraulic performance. The Gyroid and I-WP structures both effectively reduce flow resistance and improve flow field uniformity, which is beneficial for sweep gas transport and heat removal. Among the two TPMS configurations, the Gyroid structure demonstrates superior performance. Within the inlet velocity range of 0.1–0.2 m/s, the average flow velocity is increased by

approximately 56%, the pressure drop is reduced by 50%, and the effective thermal conductivity is enhanced by 13.7%, compared with the pebble bed. These improvements are mainly attributed to the continuous integrated solid skeleton and the highly interconnected pore network of the TPMS structures. In addition, the Gyroid porous tritium breeder samples are fabricated *via* additive manufacturing, and the thermo-hydraulic experiments are conducted under representative operating conditions. The experimental results show good agreement with the numerical data, confirming the reliability of the numerical model.

**Conclusions** This study targeted breeding blanket applications in nuclear fusion reactors and proposed a TPMS-based porous ceramic tritium breeder design. The thermo-hydraulic characteristics of Gyroid and I-WP tritium breeder structures were systematically evaluated and compared with those of a conventional pebble bed *via* combining numerical simulations with experimental investigations. The results demonstrated that both TPMS configurations could exhibit significantly lower flow resistance and superior thermo-hydraulic performance relative to the pebble bed, with the Gyroid structure showing the best overall performance. The numerical predictions were in reasonable agreement with the experimental results, confirming the reliability of the developed model and preliminarily demonstrating the engineering feasibility of the Gyroid porous ceramic tritium breeder.

**Keywords** fusion reactor; additive manufacturing; porous tritium breeder; flow behavior; heat transfer characteristics