

三周期极小曲面通道内流动换热特性实验研究

王婧晗, 孙凯, 杨志新, 程志龙, 曾敏, 王秋旺

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为揭示三周期极小曲面通道内的流动换热特性,基于瞬态单吹法原理搭建实验装置,系统测量并分析了空气在 I-WP 和 Primitive 通道中的流动与换热性能,探讨了胞元类型、孔隙率(ϵ)及雷诺数(Re_h)对流动换热性能的影响。结果表明:Primitive 通道的阻力系数随孔隙率增加而降低,且孔隙率对阻力的影响随 Re_h 增大而减弱,当孔隙率由 0.30 增加至 0.40 时,在 $Re_h=80$ 和 $Re_h=450$ 下阻力系数分别降低约 37% 和 15%。相比之下,I-WP 通道的阻力系数随孔隙率增加而升高,且由于孔隙率变化对流动扰动的影响有限,其换热性能变化较小。以 Colburn 换热因子与摩擦阻力系数比值作为流动换热综合性能评价指标,随着孔隙率增加,Primitive 通道的综合性能小幅提升,I-WP 通道则明显下降。当 $\epsilon \leq 0.35$ 时,I-WP 通道综合性能优于 Primitive 通道;当 $\epsilon=0.40$ 时,两者综合性能接近。

关键词: 三周期极小曲面;孔隙率;阻力系数;换热性能

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202511012 **文章编号:** 0253-987X(2025)11-0125-08

Experimental Study on Flow and Heat Transfer Characteristics in Triply Periodic Minimal Surface Channels

WANG Jinghan, SUN Kai, YANG Zhixin, CHENG Zhilong, ZENG Min, WANG Qiuwang

(MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To reveal the flow and heat transfer characteristics in triply periodic minimal surface channels, this study constructs an experimental setup based on the transient single-blow method. The flow and heat transfer performance of air in I-WP and Primitive channels are systematically measured and analyzed, and the effects of cell type, porosity (ϵ), and Reynolds number (Re_h) on the flow and heat transfer performance are investigated. The results show that the friction factor of the Primitive channel decreases with increasing porosity, and the influence of porosity on flow resistance weakens as Re_h increases. When the porosity increases from 0.30 to 0.40, the friction factor decreases by approximately 37% at $Re_h=80$ and by 15% at $Re_h=450$. In contrast, the friction factor of the I-WP channel increases with porosity, while its heat transfer performance exhibits only minor variations due to the limited impact of porosity changes on flow disturbances. Using the ratio of the Colburn heat transfer factor to the friction factor as a comprehensive performance evaluation metric, the Primitive channel shows a slight improvement in overall performance with increasing porosity, whereas the I-WP channel exhibits a significant decline.

When $\epsilon \leq 0.35$, the I-WP channel outperforms the Primitive channel in comprehensive performance; however, when $\epsilon = 0.40$, their performance becomes comparable.

Keywords: triply periodic minimal surface; porosity; friction factor; heat transfer performance

三周期极小曲面(TPMS)是一类在三维空间中周期性分布且任意点处平均曲率为 0 的曲面,可通过数学函数精确描述和控制^[1-2]。TPMS 结构具有比表面积大、连通性高和力学性能优越等优点,在能源、生物医学和材料科学等领域受到广泛关注^[3]。在流体传热领域,其复杂的曲面几何形态有助于增强流体扰动并强化换热效果^[4]。近年来,增材制造技术的快速发展显著提升了 TPMS 结构在工程应用中的可行性^[5],使其有潜力成为新一代高效换热设备的核心元件^[6-7]。

目前,许多学者针对 TPMS 结构的流动换热性能开展了相关研究。清华大学姜培学教授团队^[8]通过形态和数值分析,发现 I-WP 和 Gyroid 结构会引起流体流向的连续变化及周期性混合,从而有效强化传热。Prussack 等^[9]将 TPMS 结构用作核反应堆堆芯中的高效换热结构,发现其努塞尔数比传统棒束结构高 8~10 倍。Tang 等^[10]针对 TPMS 结构的强化换热机理开展数值研究,并表明 TPMS 结构的对流换热性能较传统翅片结构提高了 5.8%~196%。本研究团队^[11]数值分析了 TPMS 结构的流动传热特性,提出了不同 TPMS 结构在湍流条件下的传热阻力关联式。Li 等^[12]指出在相同泵功率下,TPMS 换热器的传热效率较印刷电路板式换热器提高了 15%~100%。Gado 等^[13]采用 TPMS 结构优化吸附式制冷系统性能,发现采用 Primitive 结构相比传统翅片结构的日制冷量提升了 51.6%。Iyer 等^[14]指出在相同换热量下,传统管式换热器的体积约为 Schwarz-D 型换热器的 3~10 倍。现有关于 TPMS 结构流动换热的研究大多基于理论分析和数值方法,可能与实际情况存在偏差。因此,开展相关实验研究对于揭示 TPMS 结构的流动换热特性及验证补充数值结果具有重要意义。

对流换热系数的实验测量方法主要分为稳态法与瞬态法^[15-16]。稳态法要求系统达到热平衡后进行测量,边界条件通常采用恒定热流或恒定温度。瞬态法则依赖于热输入的时间变化,通常采用脉冲加热、阶跃加热或周期性加热,通过测量温度随时间的变化计算换热系数。华北电力大学魏高升教授团队^[17]采用稳态直接法针对颗粒与不同板型壁面间的换热特性开展实验研究,在换热段铜板背面均匀

布置加热片,以提供均匀热流。上海理工大学方奕栋副教授团队^[18]采用稳态法对 R134a 制冷剂在竖直波纹板片内的流动沸腾换热特性进行实验研究,通过在实验段底板布置加热块和电加热棒提供稳定热流。文献[19]采用稳态法研究泡沫铜的吸气过程对流动沸腾换热的影响,在实验段底部布置紫铜块和加热器提供稳定热流。Jo 等^[20]采用瞬态单吹法对石墨烯气凝胶内部的强制对流开展实验研究,探讨了气凝胶微观结构对传热特性的影响。文献[21-22]采用瞬态单吹法对碳化硅陶瓷泡沫进行瞬态换热测试,并利用反演法求解多孔介质的平均体积换热系数,分析了孔隙率、表观流速和样品厚度等参数对体积换热系数的影响。清华大学姜培学教授团队^[23-24]采用瞬态单吹法对烧结微细多孔介质的对流换热进行研究,并基于局部体积平均法和集总参数法两种数据处理方法计算对流换热系数,结果显示,两种方法所得结果偏差在 10%以内。总体而言,稳态法通常通过电加热片或加热丝等提供稳定的热流密度,更适用于表面平整、结构规则的试件。对于几何复杂、表面不规则、稳态难以建立或边界条件难以精确控制的试件,如多孔介质、复杂换热器和微流道结构等,瞬态法则更具适用性。

为了弥补现有数值模拟的局限性,亟需基于可靠的实验数据,深入揭示 TPMS 通道内的流动换热特性。然而,对于复杂的 TPMS 通道,准确测量固体与流体之间的温差存在较大困难。因此,本研究基于瞬态单吹法原理搭建实验装置,并对 TPMS 通道内的流动换热性能进行系统测量与分析。重点探讨 TPMS 胞元类型(I-WP 和 Primitive)、孔隙率及雷诺数对流动换热的影响机制。研究结果可为 TPMS 结构在高效换热设备中的优化设计与工程应用提供实验依据和理论支持。

1 实验系统及实验方法

1.1 实验系统

TPMS 通道内的流动换热实验系统如图 1 所示,整个实验系统由流体供应与控制系统、加热系统、温度测量系统、压力测量系统、实验段及数据采集系统组成。主要仪器包括质量流量控制器、转子流量计、加热器、微压计、热电偶及数据采集器等。

实验段由实验通道和 TPMS 试件组成,如图 2 所示,包括俯视图(左)和侧视图(右),其内部尺寸为 $24\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$,外部包覆保温材料。实验段前后设有稳定通道,其内部尺寸为 $75\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 。在流动阻力实验中,通过质量流量控制器调节空气流量,利用数据采集系统记录进出口压力损失。在对流换热实验中,调节空气流量,使其通过气体加热通道,经电加热器加热后进入实验段,将 TPMS 试件加热至 415 K 。随后切换至冷却通道,通入常温空气冷却 TPMS 试件至 300 K 。

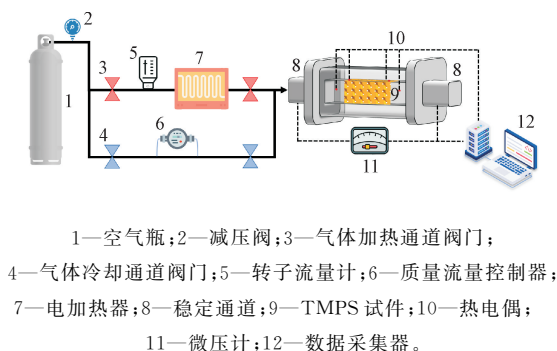


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

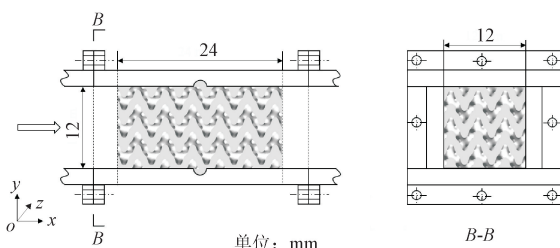


图 2 实验段结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the test section structure

本文采用选择性激光熔化 (SLM) 技术,以 AlSi10Mg 铝合金为原料,共制备了 6 个 TPMS 试件,包括 I-WP 和 Primitive 两种胞元类型以及 0.30、0.35 和 0.40 这 3 种孔隙率。

I-WP 表面的数学表达式为

$$2(\cos x \cos y + \cos y \cos z + \cos z \cos x) - (\cos 2x + \cos 2y + \cos 2z) = c \quad (1)$$

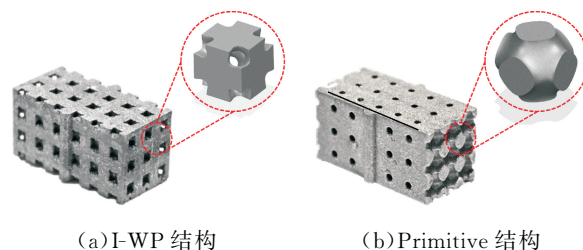
Primitive 表面的数学表达式为

$$\cos x + \cos y + \cos z = c \quad (2)$$

式中: c 为可调参数。

在 TPMS 换热器应用中,该孔隙率范围内流体域对应的壁面厚度通常满足设计要求,能够在保证较高比表面积的同时,兼顾结构强度与制造可行性。试件表面粗糙度约为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。两种结构试件的实物

图如图 3 所示。

图 3 TPMS 试件实物图($\epsilon=0.4$)Fig. 3 Photographs of TPMS specimens ($\epsilon=0.4$)

1.2 数据处理方法

实验测量的主要物理量包括空气流量、实验段压降、空气进出口温度及 TPMS 试件温度。其中,采用质量流量控制器 (Seven Star, CS200A, 量程为 $0 \sim 30\text{ L/min}$) 控制空气流量 (Q_v)。采用微压计 (3051CD1, 量程为 $0 \sim 6.22\text{ kPa}$) 测量实验段压降 (Δp_{exp}),具体方法是,在距实验段进口和出口 10 mm 处的稳定通道壁面开设小孔,引导气体进入微压计进行压降测量。采用 T 型热电偶测量空气进口和出口温度 ($T_{f,\text{in}}$ 和 $T_{f,\text{out}}$),具体方法是,在距实验段进口和出口 3 mm 处的实验段壁面开设小孔,并在该截面上各布置 3 支热电偶,测量 3 个点温度求平均值。采用 T 型热电偶测量 TPMS 试件靠近进口和出口处的温度 ($T_{s,\text{in}}$ 和 $T_{s,\text{out}}$)。

雷诺数 Re_h 及摩擦阻力系数 f 的计算方法如下

$$Re_h = \frac{\rho_f u d_h}{\mu_f} \quad (3)$$

$$f = \frac{2(\Delta p_{\text{exp}}/L)}{\rho_f (u/\epsilon)^2/d_h} \quad (4)$$

$$u = \frac{Q_v}{S} \quad (5)$$

$$d_h = \frac{4V_f}{A} \quad (6)$$

式中: ρ_f 为流体密度; u 为表观流速; S 为实验段横截面积; μ_f 为流体黏度; Δp_{exp} 为实验段压降; L 为 TPMS 试件长度; ϵ 为孔隙率; d_h 为水力直径; V_f 为流体流动区域的体积; A 为流体与 TPMS 试件之间的接触面积,即流体在流动过程中润湿的固体界面面积。

TPMS 结构固体与流体之间的对流换热系数采用集总参数法计算。该方法基于如下假设:当固体内部的导热热阻远小于其表面换热热阻(即毕渥数 $Bi < 0.1$)时,可认为固体在任意时刻均处于热力学平衡状态,即温度分布均匀。实验过程中,流体与多孔骨架发生瞬态换热,记录测试结构进出口处的流体温度-时间响应数据。基于均匀温

度分布假设,结合能量守恒原理与测试结构的温度-时间响应数据,计算其对流换热系数。由于 TPMS 试件尺寸较小,且其材料 AlSi10Mg 的导热系数约为 $130 \sim 150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,所有试件均可满足 $Bi < 0.1$ 的条件。此外,实验温度数据表明,相比于流体温度的变化,TPMS 试件内部的温度梯度可忽略不计。这进一步验证了固体内部导热热阻较小的假设,从而将该非稳态导热问题视为整体温度均匀变化的过程,并采用集总参数法确定 TPMS 通道内流体与固体之间的对流换热系数。

基于集总参数法的基本假设,TPMS 结构在测试过程中的热平衡关系为

$$\rho_s c_p V_s \frac{dT_s}{dt} = -h_{sf} A (T_s - T_f) \quad (7)$$

固体与流体间对流换热系数 h_{sf} 、努塞尔数 Nu 及 Colburn j 因子为

$$h_{sf} = -\frac{\rho_s c_p V_s}{A(T_s - T_f)} \frac{dT_s}{dt} \quad (8)$$

$$Nu = \frac{h_{sf} d_h}{\lambda_f} \quad (9)$$

$$j = \frac{Nu}{Re_h Pr^{1/3}} \quad (10)$$

$$T_s = \frac{T_{s,in} + T_{s,out}}{2} \quad (11)$$

$$T_f = \frac{T_{f,in} + T_{f,out}}{2} \quad (12)$$

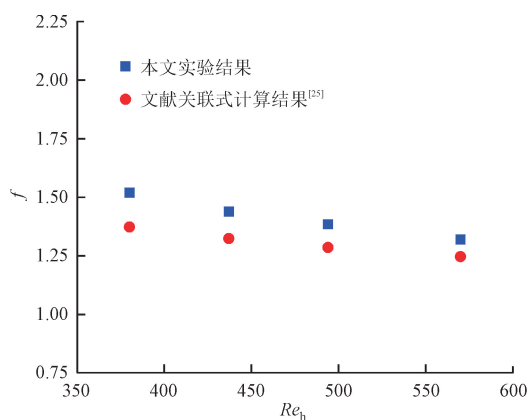
式中: ρ_s 为固体密度; c_p 为固体比定压热容; V_s 为 TPMS 试件体积; h_{sf} 为对流换热系数; T_f 和 T_s 分别为流体和固体温度; t 为时间; Nu 为努塞尔数; λ_f 为流体导热系数; Pr 为普朗特数。式(7)、(8)中的 T_s 采用固体的进出口平均温度, T_f 取流体的进出口平均温度。

质量流量控制器测量空气流量的不确定度为 $\pm 0.35\%$; 微压计测量压差的不确定度为 $\pm 0.075\%$; 空气进出口温度的相对误差为 $\pm 0.4\%$; TPMS 试件温度的相对误差为 $\pm 0.4\%$ 。最终,计算得到摩擦阻力系数的不确定度为 $\pm 1.93\%$,努塞尔数的不确定度为 $\pm 12.10\%$ 。

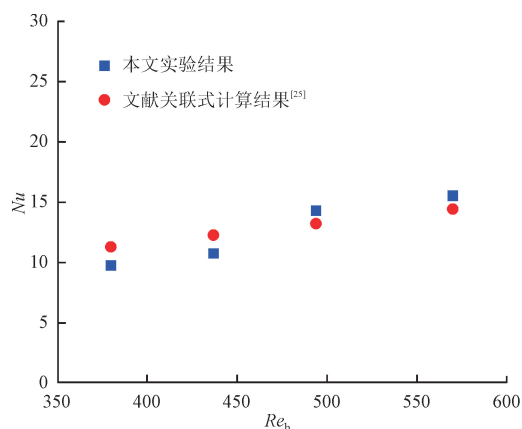
1.3 实验方法验证

为验证实验方法的可靠性,采用上述方法对文献[25]中的颗粒堆积结构进行了摩擦阻力系数与努塞尔数的实验测量,并将实验结果与文献中的传热阻力关联式计算结果进行对比(见图 4)。结果表明,该实验系统测得颗粒堆积结构的摩擦阻力系数与文献[25]数据的相对误差小于 9.6% ,努塞尔数的相对误差小于 13.7% ,验证了实验系统和测量方

法的可靠性。此外,在相同工况下对 TPMS 试件进行了 3 次独立重复测试,结果表明,摩擦因子的最大偏差小于 0.8% ,努塞尔数的最大偏差小于 2.2% ,验证了实验方法的可重复性。



(a) 摩擦阻力系数实验结果与文献计算结果的对比



(b) 努塞尔数实验结果与文献计算结果的对比

图 4 实验方法验证

Fig. 4 Verification of experimental method

2 结果与讨论

2.1 孔隙率对 TPMS 通道内流动特性的影响

常温条件下, I-WP 和 Primitive 两种 TPMS 通道在不同孔隙率 ($\epsilon = 0.30, 0.35, 0.40$) 下 f 随 Re_h 的变化规律见图 5。随着 Re_h 的增加, I-WP 和 Primitive 通道的 f 均呈现下降趋势, 这符合流体流动的基本规律, 即流动惯性效应的增强使得阻力相对减小。在相同 Re_h 条件下, I-WP 通道在较高孔隙率下具有较高的阻力系数。当孔隙率由 0.30 增加至 0.40 时, f 在 $Re_h = 60$ 和 $Re_h = 300$ 条件下分别升高了约 17% 和 25% , 表明孔隙率对阻力性能的影响随 Re_h 增大而增强。基于 I-WP 通道的结构特性分析, 这一现象主要归因于其具有较强的交错几何特征。在较低孔隙率条件下, I-WP 通道内的流动

分支狭窄,局部区域形成较小的涡旋^[11];在较高孔隙率条件下,虽然流体流动空间增大,但更易诱发强烈的湍流和增加的局部涡流,从而导致阻力系数升高。Primitive 通道在较高孔隙率时具有较低阻力系数。当孔隙率由 0.30 增加至 0.40 时,在 $Re_h = 80$ 和 $Re_h = 450$ 条件下, f 分别降低约 37% 和 15%,表明孔隙率对阻力性能的影响随 Re_h 增大而明显减弱。这是因为 Primitive 结构曲面平滑,在高孔隙率条件下,主流方向变化更小,有助于减少流动分离和局部加速现象^[11]。此外,孔隙率增加主要降低剪切阻力,当惯性效应增强后其影响减弱。相比于 I-WP 通道,Primitive 通道的流动阻力对孔隙率变化的依赖性较强。

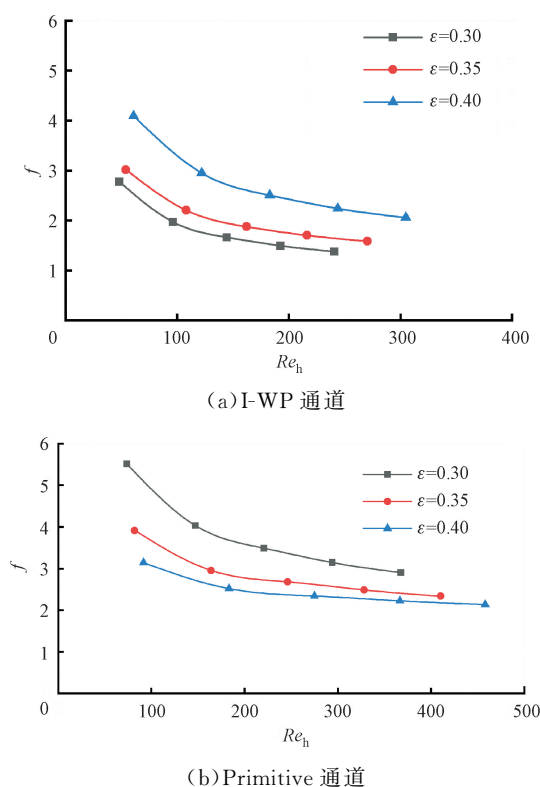


图 5 TPMS 通道在不同孔隙率下的阻力系数
Fig. 5 Friction factor of TPMS with different porosities

2.2 孔隙率对 TPMS 通道内换热特性的影响

图 6 展示了 TPMS 通道在不同孔隙率下 Nu 与 Re_h 之间的关系。整体来看,随着 Re_h 的增加, Nu 呈单调递增趋势,表明流动强化对 TPMS 通道内的换热强化具有显著作用。在相同 Re_h 条件下, I-WP 通道的 Nu 随孔隙率的增加而升高,但不同孔隙率下曲线几乎重合,表明增加孔隙率有助于强化换热,但影响较小。这一趋势可由前述 I-WP 通道的结构特性解释,其在较高孔隙率下更易诱发较强湍流,从而强化传热。此外,由于 I-WP 结构拓扑复杂度高,换热主要依

赖流动扰动,孔隙率变化对通道内流动扰动的影响有限,因此其换热能力受孔隙率影响较小。Primitive 通道的 Nu 随孔隙率的增加而降低,且孔隙率对换热性能的影响较大。这是因为孔隙率降低导致流动通道收缩,孔隙流速增加,增加了流体与壁面之间的剪切作用,有利于强化换热。另一方面,Primitive 结构表面平滑且壁面分布均匀,在较高孔隙率下流动更稳定,边界层难以破坏,导致换热能力下降。

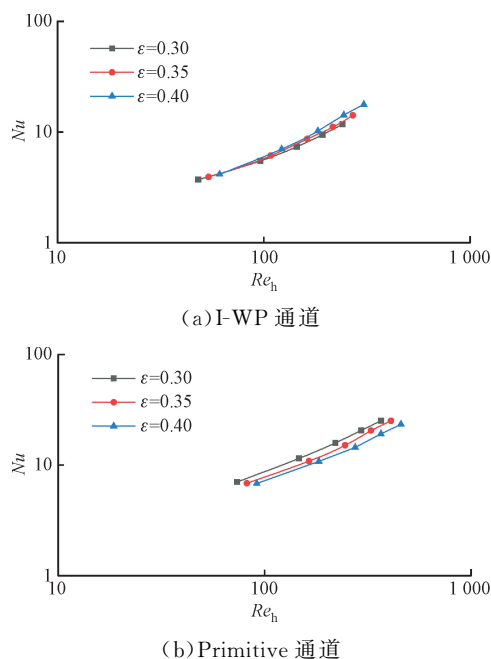


图 6 TPMS 通道在不同孔隙率下的努塞尔数

Fig. 6 Nusselt number of TPMS with different porosities

2.3 胞元类型对 TPMS 通道内流动换热性能的影响

图 7 展示了在相同表观流速($u = 1.5$ m/s)时,不同孔隙率下 TPMS 胞元类型对流动及换热性能的影响,包括单位长度压降 $\Delta p/L$ 、 f 、 Nu 及流动换热综合性能指标 j/f 。从 $\Delta p/L$ 来看,在较低孔隙率($\epsilon = 0.30$)下, Primitive 通道的压降最高,达到 23.5 kPa/m,约为 I-WP 通道的 1.4 倍,这是由 Primitive 通道内的流动特性引起的。在 Primitive 通道中,流体主要以较大速度穿过中心流动区域,且在中心区域内主流方向和速度变化较小,同时在流动分支处形成局部低速涡旋^[11]。当孔隙率降低时,中心流动区域收缩,导致主流速度急剧上升。根据流体力学原理,压降与流速的平方成正比,因此压降显著升高。随着孔隙率增加, Primitive 通道压降迅速下降, I-WP 通道压降缓慢下降。当 $\epsilon \geq 0.35$ 时, Primitive 通道的压降低于 I-WP 通道。在阻力系数方面, Primitive 通道

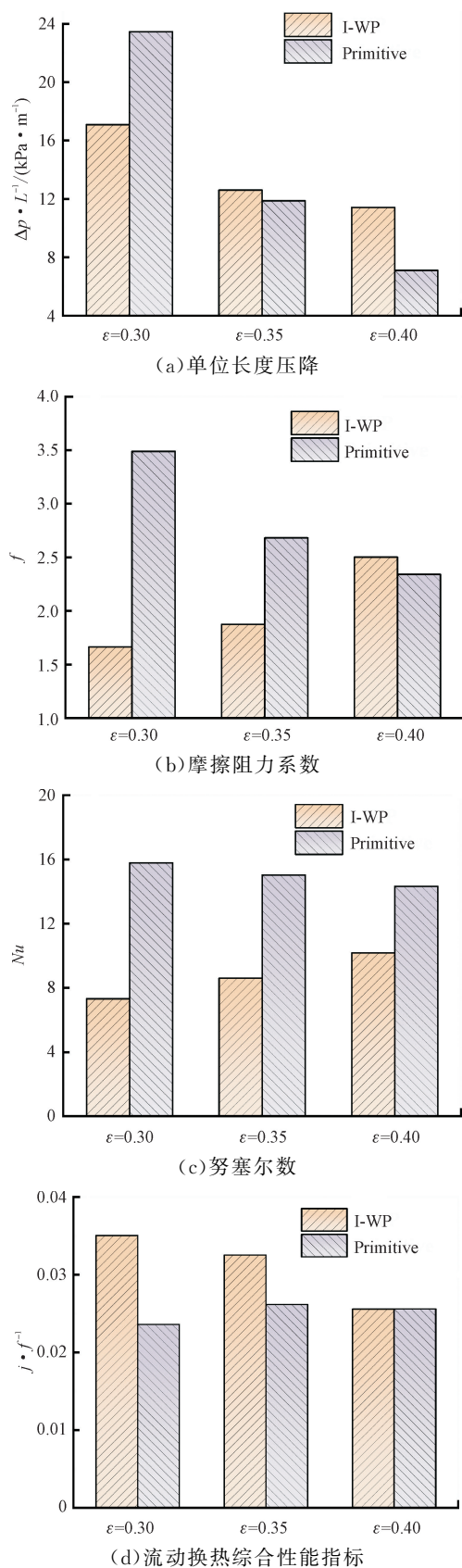


图7 不同孔隙率下 TPMS 胞元类型对流动及换热性能的影响

Fig. 7 Effect of TPMS type on flow and heat transfer performance with different porosities

在 $\epsilon \leq 0.35$ 时的 f 明显高于 I-WP 通道, 约为其 1.4~2.1 倍。随着孔隙率增加, Primitive 通道流动空间扩展, 局部流速降低, f 下降; I-WP 通道由于复杂几何特征导致湍流增强, f 上升。当 $\epsilon = 0.40$ 时, Primitive 通道的阻力系数低于 I-WP 通道。

在传热性能方面, Primitive 通道在各孔隙率下的 Nu 始终高于 I-WP 通道, 尤其在低孔隙率 ($\epsilon = 0.30$) 时, 这是因为 Primitive 通道通过局部高速流动和壁面剪切强化了换热。随着孔隙率增加, Primitive 通道内流动趋于稳定, 边界层发展充分, 换热能力下降, 两种 TPMS 通道换热性能的差距逐渐减小。以 Colburn 换热因子与摩擦阻力系数的比值 (j/f) 作为流动换热综合性能的评价指标。当 $\epsilon = 0.30$ 时, Primitive 通道的 f 和 Nu 均约为 I-WP 通道的 2 倍, 导致其综合性能较差。随着孔隙率增加, Primitive 通道的流动阻力显著下降, 同时保持了良好的换热性能, 因此综合性能小幅提升。相比之下, I-WP 通道在 $\epsilon = 0.30$ 时以较低压降为主要优势, 但换热能力弱, 更适用于对压降有严格限制且对换热强化需求较低的工况。随着孔隙率增加, I-WP 通道的综合性能明显下降。当 $\epsilon \leq 0.35$ 时, I-WP 通道的综合性能优于 Primitive 通道; 当 $\epsilon = 0.40$ 时, 两种 TPMS 通道的综合性能相当。

3 结 论

本研究基于瞬态单吹法原理搭建实验装置, 并采用集总参数法数据处理方法, 对 TPMS 通道内的流动与换热特性进行系统测量与分析。探讨了胞元类型、孔隙率及雷诺数对流动换热的影响, 主要获得以下结论。

(1) 在相同雷诺数下, Primitive 通道在较高孔隙率条件下具有更低的流动阻力, 且孔隙率对阻力的影响随 Re_h 增大而减弱; I-WP 通道在较低孔隙率下具有更低的流动阻力, 且孔隙率对阻力的影响随 Re_h 增大而增强。相比于 I-WP 通道, Primitive 通道的流动阻力受孔隙率变化的影响更大。

(2) 增加 I-WP 通道的孔隙率有助于强化换热, 但由于孔隙率变化对通道内流动扰动的影响有限, 其换热性能受孔隙率的影响较小; 在 Primitive 通道中, 降低孔隙率可增强流体与壁面之间的剪切作用, 从而有效提升整体换热能力。

(3) 以 Colburn 换热因子与摩擦阻力系数比值 (j/f) 作为流动换热综合性能评价指标。随着孔隙率增加, Primitive 通道综合性能小幅提升, I-WP 通

道综合性能明显下降。当 $\epsilon \leq 0.35$ 时, I-WP 通道的综合性能优于 Primitive 通道; 当 $\epsilon = 0.40$ 时, 两者综合性能相当。

参考文献:

- [1] FENG Jiawei, FU Jianzhong, YAO Xinhua, et al. Triply periodic minimal surface (TPMS) porous structures: from multi-scale design, precise additive manufacturing to multidisciplinary applications [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2022, 4(2): 022001.
- [2] WANG Jinghan, SUN Kai, ZENG Min, et al. Investigation on uneven flow distribution in triply periodic minimal surface heat exchangers [J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 314: 118713.
- [3] LI Zhou, LI Junhao, TIAN Jiahao, et al. Performance-based inverse structural design of complex gradient triply periodic minimal surface structures based on a deep learning approach [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 40: 109424.
- [4] ALTENEIJI M, ALI M I H, KHAN K A, et al. Heat transfer effectiveness characteristics maps for additively manufactured TPMS compact heat exchangers [J]. *Energy Storage and Saving*, 2022, 1(3): 153-161.
- [5] DHARMALINGAM L, O'MALLEY B, TANCABEL J, et al. Design, optimization, and validation of a triply periodic minimal surface based heat exchanger for extreme temperature applications [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025, 242: 126797.
- [6] SONG Nanxin, PU Wenhao, QIAO Long, et al. Numerical simulation study on the heat transfer and flow characteristics of fuel/lubricating oil heat exchanger based on triply periodic minimal surface (TPMS) [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 257(Part C): 124437.
- [7] WANG Jinghan, CHEN Kai, ZENG Min, et al. Assessment of flow and heat transfer of triply periodic minimal surface based heat exchangers [J]. *Energy*, 2023, 282: 128806.
- [8] CHENG Zhilong, XU Ruina, JIANG Peixue. Morphology, flow and heat transfer in triply periodic minimal surface based porous structures [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 170: 120902.
- [9] PRUSSACK B, JENTZ I, MOREIRA T A, et al. Thermal and hydraulic performance of volumetrically heated triply periodic minimal surface heaters [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 248(Part B): 123291.
- [10] TANG Wei, ZHOU Hua, ZENG Yun, 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]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 201(Part 1): 123642.
- [11] WANG Jinghan, CHEN Kai, ZENG Min, et al. Investigation on flow and heat transfer in various channels based on triply periodic minimal surfaces (TPMS) [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 283: 116955.
- [12] LI Weihong, YU Guopeng, YU Zhibin. Bioinspired heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces for supercritical CO₂ cycles [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 179: 115686.
- [13] GADO M G, OOKAWARA S, HASSAN H. Utilization of triply periodic minimal surfaces for performance enhancement of adsorption cooling systems: computational fluid dynamics analysis [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 277: 116657.
- [14] IYER J, MOORE T, NGUYEN D, et al. Heat transfer and pressure drop characteristics of heat exchangers based on triply periodic minimal and periodic nodal surfaces [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 209: 118192.
- [15] 王岩, 陈俊杰. 对流换热系数测量及计算方法 [J]. *液压与气动*, 2016(4): 14-20.
WANG Yan, CHEN Junjie. Measurement and computation methods of convective heat transfer coefficient [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2016(4): 14-20.
- [16] WU Zhiyong, XU Siqu, YANG Lixin, et al. Numerical investigation of single-blow transient testing technique [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, 120: 105023.
- [17] 潘飞龙, 魏高升, 黄平瑞, 等. 板间颗粒流动换热特性实验与数值分析研究 [J]. *工程热物理学报*, 2024, 45(8): 2446-2452.
PAN Longfei, WEI Gaosheng, HUANG Pingrui, et al. Experimental and numerical analysis of particle flow and heat transfer characteristics between flat plates [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2024, 45(8): 2446-2452.
- [18] 陈庆虎, 方奕栋, 劳伟超, 等. 竖直多波纹板式换热器内 R134a 的流动沸腾实验研究 [J]. *化学工程*, 2024, 52(8): 55-59.
CHEN Qinghu, FANG Yidong, LAO Weichao, et al. Experimental investigation of flow boiling of R134a in a vertical multi-corrugated plate heat exchanger [J]. *Chemical Engineering*, 2024, 52(8): 55-59.
- [19] 关朝阳, 黄国庆, 张一喃, 等. 泡沫铜导离气泡强化

- 流动沸腾换热实验研究 [J]. 化工学报, 2024, 75(5): 1765-1776.
- GUAN Zhaoyang, HUANG Guoqing, ZHANG Yinan, et al. Experimental study on enhancement of flow boiling through degassing with copper foam [J]. CIESC Journal, 2024, 75(5): 1765-1776.
- [20] JO H, KIM D. Forced convection heat transfer inside graphene aerogel [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2023, 149: 107110.
- [21] 卢红言. 泡沫陶瓷多孔材料流-固耦合换热特性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [22] 许思奇. 碳化硅泡沫多孔材料内流动及换热特性实验和数值模拟研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [23] 胥蕊娜, 姜培学, 宫伟. 微细多孔介质中对流换热实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2006, 27(5): 823-825.
- XU Ruina, JIANG Peixue, GONG Wei. Experimental investigation of internal heat transfer in mini-porous media [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(5): 823-825.
- [24] 胥蕊娜, 姜培学. 流体在微多孔介质内对流换热实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2008, 29(8): 1377-1379.
- XU Ruina, JIANG Peixue. Experimental investigations of convection heat transfer in microporous media [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(8): 1377-1379.
- [25] YANG Jian, WANG Jing, BU Shanshan, et al. Experimental analysis of forced convective heat transfer in novel structured packed beds of particles [J]. Chemical Engineering Science, 2012, 71: 126-137.
- (编辑 杜秀杰)