

DOI: 10.19666/j.rlfed.202502047

渐缩-渐扩流道印刷电路板式换热器结构参数对传热特性的影响数值研究

辛嘉俊, 张任平

(景德镇陶瓷大学材料科学与工程学院, 江西 景德镇 333403)

[摘要] 超临界二氧化碳(S-CO₂)印刷电路板式换热器(PCHE)在布雷顿循环发电系统中被广泛应用,但PCHE在不同工况下却面临着传热不均、综合性能差等问题。为提高PCHE在布雷顿循环中的综合性能,采用数值模拟方法,以S-CO₂作为流体的工质,通过改变渐缩渐扩节距周期 T 、渐缩渐扩截面比 β 和渐缩长度与渐扩长度之比 γ ,研究了不同参数PCHE中冷侧和热侧S-CO₂的综合性能。结果表明:当 β 和 γ 为定值时,冷侧节距周期大小与综合性能呈反比,热侧节距周期最优值为15~25 mm;应用了渐缩渐扩节距周期PCHE的综合性能值均大于1,即该结构性能优于传统直流道,相对于热侧8.5 MPa的工作压力,在冷侧22 MPa的工作压力下PCHE的综合性能较高;渐缩渐扩截面比大于1时,综合性能值均大于1,流体与壁面之间的对流换热更剧烈,综合性能得到强化;当其他条件一定,渐缩长度与渐扩长度之比 γ 为3/7时,系统的综合性能较好。研究结果为渐变截面流道PCHE综合性能的优化提供了参考依据。

[关键词] 印刷电路板式换热器; 渐缩渐扩流道; 超临界二氧化碳; 布雷顿循环; 数值模拟

[引用本文格式] 辛嘉俊, 张任平. 渐缩-渐扩流道印刷电路板式换热器结构参数对传热特性的影响数值研究[J]. 热力发电, 2025, 54(12): 46-55. XIN Jiajun, ZHANG Renping. Numerical study on effect of structural parameters on heat transfer performance of printed circuit heat exchanger with converging-diverging flow channels[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(12): 46-55.

Numerical study on effect of structural parameters on heat transfer performance of printed circuit heat exchanger with converging-diverging flow channels

XIN Jiajun, ZHANG Renping

(School of Materials Science and Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, China)

Abstract: Supercritical carbon dioxide (S-CO₂) printed circuit heat exchangers (PCHEs) are widely used in Brayton cycle power generation system, but PCHE faces problems such as uneven heat transfer and poor comprehensive performance under different working conditions. To improve the overall performance of PCHE in the Brayton cycle, the comprehensive performance (PEC) of S-CO₂ on both the cold and hot sides of PCHE under different parameters was numerically investigated, by using S-CO₂ as the working fluid, and varying the convergent-divergent pitch period (T), cross-sectional area ratio (β), and the ratio of convergent length to divergent length (γ). The results show that when β and γ are fixed, the pitch period on the cold side is inversely proportional to the overall performance, while the optimal pitch period on the hot side ranges from 15 mm to 25 mm. The PEC values of PCHE with convergent-divergent pitch periods are consistently greater than 1, indicating superior performance compared

收稿日期: 2025-02-25 网络首发日期: 2025-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52466004); 景德镇市科技计划项目(2023GY001-10, 20202GYZD013-21); 景德镇陶瓷大学研究生创新专项资金项目(JYC202436)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52466004); Jingdezhen Science and Technology Planning Project (2023GY001-10, 20202GYZD013-21); Graduate Innovation Special Fund Project of Jingdezhen Ceramic University (JYC202436)

第一作者简介: 辛嘉俊(2000), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为印刷电路板式换热器传热特性及其在超临界二氧化碳布雷顿循环中的应用, 1050691158@qq.com。

通信作者简介: 张任平(1979), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为相变储能、相变传热界面调控, rpzhang@126.com。

to the conventional straight-channel designs. Under a cold-side operating pressure of 22 MPa, the PCHE shows a relatively high comprehensive performance compared to the hot-side operating pressure of 8.5 MPa. When the cross-sectional area ratio β exceeds 1, all PEC values are greater than 1, and the intensified convective heat transfer between the fluid and the wall enhances the overall performance. With other conditions held constant, the system achieves better comprehensive performance when the ratio of convergent to divergent length γ is 3/7. The results provide a reference basis for optimizing the comprehensive performance of PCHE with gradually varying cross-section flow channels.

Key words: printed circuit board heat exchangers; convergent-divergent flow channel; supercritical carbon dioxide; Brayton cycle; numerical simulation

超临界二氧化碳(S-CO₂)布雷顿循环发电系统具有循环效率高、结构紧凑、灵活性强、环保无污染等优点^[1-2]。在特定条件下,布雷顿循环热效率高干传统蒸汽朗肯循环^[3-4],可达到 50%^[5-6]。S-CO₂布雷顿循环在未来发展中具有巨大潜力^[7],可应用于存在大量余热、热源丰富的场所^[8-10]。印刷电路板式换热器(PCHE)是 S-CO₂布雷顿循环发电系统的关键组件之一,对其结构进行优化并分析 S-CO₂在其中的流动特性能够提升 S-CO₂布雷顿循环发电系统的整体性能。

当前,国内、外学者针对 S-CO₂布雷顿循环发电系统中的 PCHE 结构优化进行了大量研究。Yuan 等人^[11]在直线型 PCHE 的基础上,设计了一种多循环涡流翅片车削 PCHE,使其传热能力提高了 53.6%,经济效率提高了 34.7%。唐凌虹等^[12]的研究表明,在雷诺数较小时轴向导热对锯齿型(Z型)PCHE 的换热性能影响较大,但是随着雷诺数增大,其影响逐渐减小,在高雷诺数时其影响可以忽略。Meshram 等人^[13]研究了 Z 型通道对 S-CO₂总体换热和压降的影响,结果表明 Z 型通道的传热系数高于直线型通道,Z 型通道较大的弯曲角和较小的线性节距相比于较小的弯曲角和较大的线性节距组合效果更好。Lv 等人^[14]分析了直线型通道 PCHE 和波浪型(S型)通道 PCHE 的换热特性,发现波浪形截面的局部换热系数比直线型截面平均增大了 1.56 kW/(m²·K)。Wen 等人^[15]研究了不同质量流量条件下振幅和波长参数对波浪型 PCHE 性能的影响,综合评价结果表明,在幅值为 3 mm、波长为 50 或 75 mm 时 PCHE 的性能最佳。李德波等^[16]的研究表明,当翼型翅片的通道高度与横向节距之比为 0.24 时 PCHE 的综合性能最佳。Han 等人^[17]对比了特斯拉阀型通道 PCHE 和普通平壁微通道 PCHE 的性能,发现特斯拉阀型通道 PCHE 对流换热效果显著增强。Majmader 等人^[18]对具有三角形、矩形收

缩通道结构并以 S-CO₂为工作流体的 PCHE 进行了综合分析,发现在低质量流量条件下,三角形收缩通道的热工性能比直线型通道提高了 1.5 倍。朱兵国等^[19]对比了圆形等截面通道、圆形渐缩截面通道、圆形渐扩截面通道的换热性能,发现变截面通道综合性能优于等截面通道。Ponnore 等人^[20]对热端和冷端采用不同的收敛和发散通道组合进行了研究分析,结果表明收敛、发散通道能够对压力损失进行调节,总体性能也显著提升。

目前,对于 PCHE 的研究大多聚焦于直线型^[11]、Z 型^[12]、S 型^[14]、翼型^[21]、特斯拉阀型^[22]等流道结构,国内、外学者相关研究^[18-20]表明渐变型流道 PCHE 在传热效率提高、压力损失调节、总体性能改善方面优势显著,但是当前大多研究集中于单周期渐变流道,对于渐缩渐扩多周期型流道 S-CO₂ PCHE 的研究仍较为缺乏。对此,本文通过数值模拟的方法,对采用渐缩渐扩型流道 PCHE 的传热性能进行研究:在定渐缩渐扩截面比($\beta=R_1/R_2$)、定渐缩长度与渐扩长度之比($\gamma=L_s/L_k$)的条件下,分析流道节距周期(T)对 PCHE 性能的影响;在固定 T 和 γ 的条件下,研究 β 值变化对 PCHE 性能的影响;在固定 T 和 β 的条件下,探讨 γ 值变化对 PCHE 性能的影响。

1 物理模型和数值方法

1.1 几何模型和边界条件

本文数值模拟模型如图 1 所示,其中图 1b)为单个换热单元模型图。文中后续计算仅针对单个换热单元。换热单元单个节距周期尺寸示意图 1c),各模型入口端和出口端均设有 10 mm 平直节距,以消除入口端和出口端效应。本文所涉及不同参数渐缩渐扩 PCHE 计算模型的具体工况参数见表 1。

模拟计算时,固体区域材料选择 316L 不锈钢。假设固体区域材料物性参数为定值不随温度变化,密度为 8 360 kg/m³、定压比热容为 417 J/(kg·K)、导

热系数为 $21 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。模型的进、出口端面均设为绝热壁面，模型的上、下表面和左、右侧表面选用周期壁面边界条件。冷、热流体工作压力分别为

22.0 、 8.5 MPa ，流体域入口均为质量流入口，质量流率为 $0.3 \sim 0.7 \text{ g/s}$ ，流体域热、冷侧入口温度分别为 610 、 360 K ，出口均为压力出口。

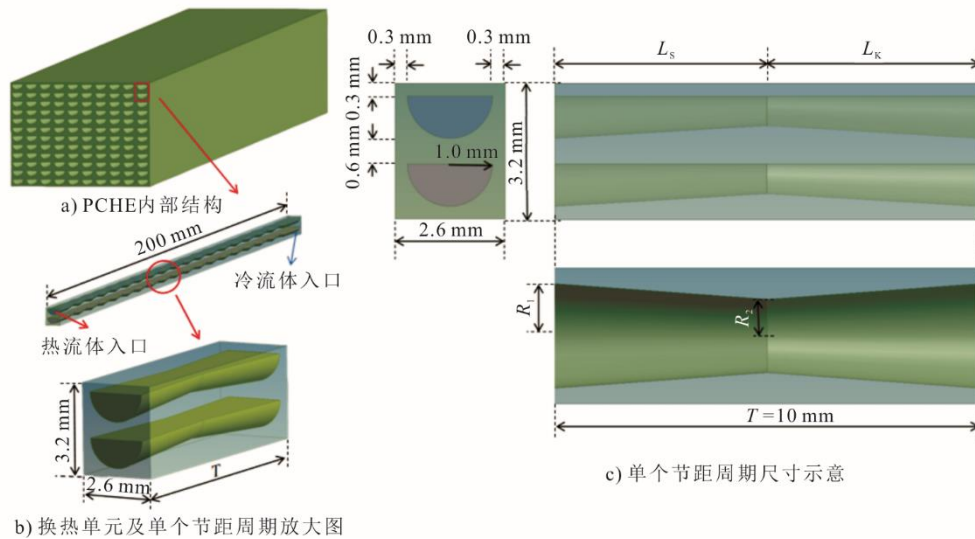


图 1 数值模拟模型示意

Fig.1 Schematic diagram of the simulation model

表 1 工况参数

Tab.1 Parameters of different cases

模型	节距 T/mm	截面比 β	渐缩长度与渐扩长度之比 γ
A1	7.5	1/0.7	1/1
A2	15.0	1/0.7	1/1
A3	20.0	1/0.7	1/1
A4	30.0	1/0.7	1/1
A5	45.0	1/0.7	1/1
B1	10.0	1/0.7	1/1
B2	10.0	1/0.8	1/1
B3	10.0	1/0.9	1/1
B4	10.0	1/1.1	1/1
B5	10.0	1/1.2	1/1
C1	10.0	1/0.7	1/9
C2	10.0	1/0.7	3/7
C3	10.0	1/0.7	7/3
C4	10.0	1/0.7	9/1

1.2 基本控制方程

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \rho g_i \quad (2)$$

流体区域能量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i c_p T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_f \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

固体区域能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (4)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; u 为流体流速, m/s ; μ 为动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; λ_f 、 λ_s 分别为流体、固体导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; c_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; μ_t 为湍流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; p 为压力, Pa ; g 为重力加速度, m/s^2 。

1.3 S-CO₂ 的热物性性质

S-CO₂ 的热物性参数会随着温度和压力变化, 由于 PCHE 进口 S-CO₂ 压力高, 进、出口压差和进口压力的比值较小, 故近似认为冷、热流体域中 S-CO₂ 的热物性参数仅随温度变化^[23]。S-CO₂ 的热物性参数可通过 REFPROP 软件获得, 8.5 MPa 工况下 S-CO₂ 热物性参数随温度变化曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出, 各项热物性参数在拟临界态温度 (304 K) 附近时发生剧烈变化, 选用拟临界态附近的 S-CO₂ 为工质进行模拟计算将影响结果的收敛性^[24], 考虑到以 S-CO₂ 为工质的 PCHE 的相关实验冷流体温度大多为 350~400 K, 为贴合实际, 模拟中冷流体温度定为 360 K, 此时热物性参数较为稳定。

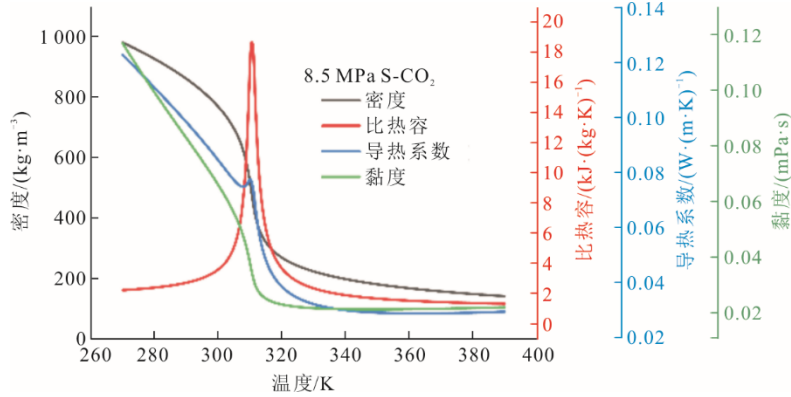


图 2 8.5 MPa 时 S-CO₂ 热物性参数随温度变化曲线

Fig.2 Variation curves of thermal physical property parameters of S-CO₂ with temperature at 8.5 MPa

为方便后续在 Fluent 软件中使用这些热物性参数, 将输出的数据表导入 MATLAB 软件中进行拟合, 最终得到各项热物性参数关联式拟合值 R^2 均在

0.990 0~0.999 9 之间, 符合计算要求。8.5 MPa 工况下 S-CO₂ 热物性参数拟合曲线和 REFPROP 数据对比如图 3 所示。

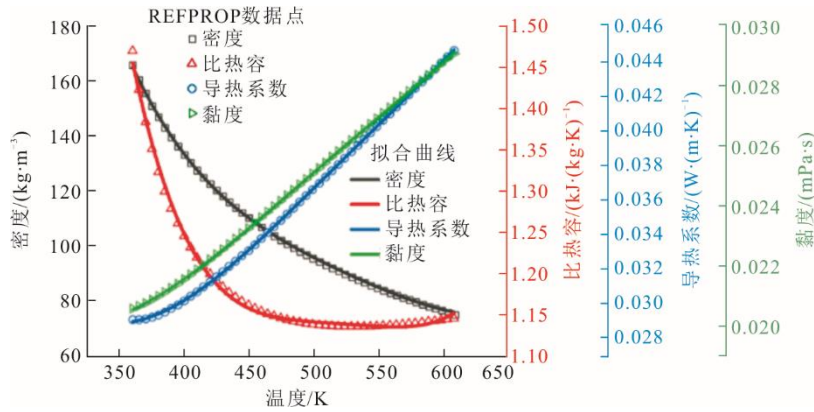


图 3 8.5MPa 下 S-CO₂ 拟合曲线和 REFPROP 数据对比图

Fig.3 Comparison between the fitted curves and REFPROP data for S-CO₂ at 8.5 MPa

拟合所得的热侧 (下标 h 表示) 和冷侧 (下标 c 表示) S-CO₂ 各项热物性参数关联式如下。

密度 ρ :

$$\rho_h = 3.0737 \times 10^{-8} t^4 - 6.5572 \times 10^{-5} t^3 + 0.0529 t^2 - 19.3127 t + 2807.2 \quad (5)$$

$$\rho_c = 2.0408 \times 10^{-7} t^4 - 4.3733 \times 10^{-4} t^3 + 0.353 t^2 - 127.836 t + 17851 \quad (6)$$

比热容 c :

$$c_{p_h} = 4.4329 \times 10^{-7} t^4 - 9.2835 \times 10^{-4} t^3 + 0.7291 t^2 - 254.593 t + 34507 \quad (7)$$

$$c_{p_c} = 2.7055 \times 10^{-8} t^4 - 1.897 \times 10^{-4} t^3 + 0.2683 t^2 - 141.5899 t + 27094 \quad (8)$$

导热系数 λ :

$$\lambda_h = 2.9703 \times 10^{-12} t^4 - 6.3284 \times 10^{-9} t^3 + 5.0521 \times 10^{-6} t^2 - 0.0017 t + 0.238 \quad (9)$$

$$\lambda_c = 2.2753 \times 10^{-11} t^4 - 4.9247 \times 10^{-8} t^3 + 4.0025 \times 10^{-5} t^2 - 0.0144 t + 1.9895 \quad (10)$$

动力黏度 μ :

$$\mu_h = 1.0516 \times 10^{-15} t^4 - 2.2181 \times 10^{-12} t^3 + 1.7453 \times 10^{-9} t^2 - 5.7025 \times 10^{-7} t + 8.5408 \times 10^{-5} \quad (11)$$

$$\mu_c = 2.5232 \times 10^{-14} t^4 - 5.2863 \times 10^{-11} t^3 + 4.1499 \times 10^{-8} t^2 - 1.4459 \times 10^{-5} t + 0.0019 \quad (12)$$

式中: t 为温度, K。

1.4 数值方法和模型验证

通过 ANSYS Fluent 对模型在稳态条件下进行数值计算, 流体流动状态为湍流, 选用 SST $k-\omega$ 湍流模型^[25-26]。采用有限体积法离散控制方程, 离散方案采用二阶迎风格式, 采用 SIMPLE 算法^[27-28]求解压力-速度耦合方程。

文中所涉及模型已进行网格独立性验证和模

型可靠性验证。划分网格时对流体区域网格进行了加密处理,还为流体区域设置了 10 层边界层网格,热、冷流体边界层网格第 1 层厚度分别为 0.001 8、0.002 3 mm,边界层增长率均为 1.2,保证了 y^+ 值小于 1,满足 Fluent 中壁面函数 SST $k-\omega$ 的使用要求,局部网格划分结果如图 4 所示。

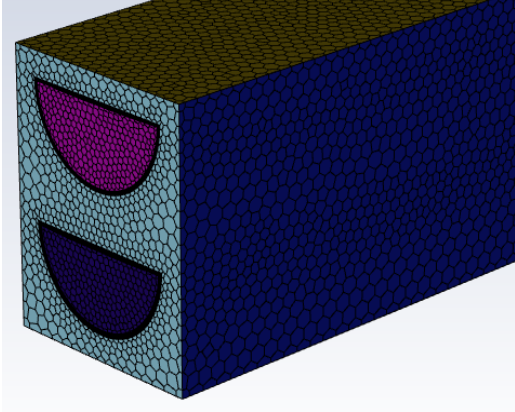


图 4 局部网格
Fig.4 Local grid

网格模型的独立性验证结果如图 5 所示。当网格数量达到 556 万时,参数变化趋于平缓;当网格数量由 556 万上升到 677 万时,热侧 S-CO₂ 出口温度变化仅有 0.06%,热侧 S-CO₂ 进、出口压差变化仅有 0.65%。兼顾计算资源的影响,后续模拟计算采用 556 万网格数量。

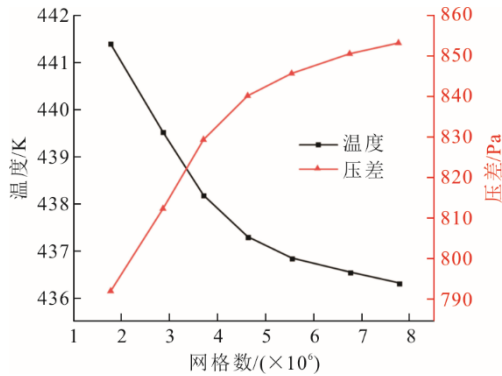


图 5 网格无关性验证
Fig.5 Grid independence verification

考虑到数值计算方法的准确性,将本文所用数值计算方法与文献[29]中 Zhou 等人的结果进行对比,如图 6 所示。对比参数为热侧 S-CO₂ 分段式截面的面平均温度和热流体各分段式截面的压差,面平均温度最大相对误差为 0.52%,各分段式截面的压差最大相对误差为 6.8%,数值模拟结果与论文参考数据吻合度较高,表明该计算模型可靠。

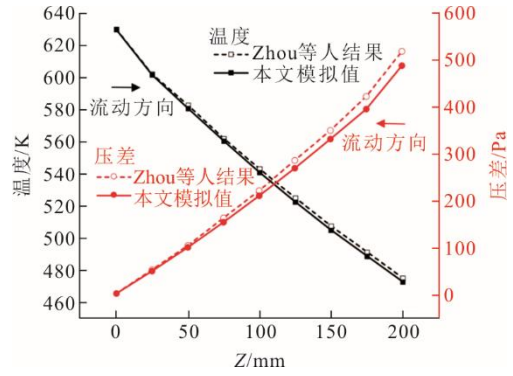


图 6 模型可靠性验证
Fig.6 Verification of the model reliability

1.5 数据处理

流体通道的水力直径 D_h :

$$D_h = \frac{4V}{S} \quad (13)$$

式中: V 为流体通道换热总体积, m^3 ; S 为流体通道换热总面积, m^2 。

范宁摩擦因子 f :

$$f = \frac{\Delta p D_h}{2L\rho u^2} \quad (14)$$

式中: Δp 为流体进、出口压降, Pa; L 通道长度, m。

对流换热系数 h :

$$h = \frac{q}{(T_w - T_b)} \quad (15)$$

式中: q 为面平均热流密度, W/m^2 ; T_w 为换热壁面平均温度, K; T_b 为流体平均温度, K。

努塞特数 Nu :

$$Nu = \frac{hD_h}{\lambda} \quad (16)$$

式中: λ 为导热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

综合评价因子 δ_{PEC} :

$$\delta_{PEC} = \frac{Nu / Nu_0}{(f / f_0)^{1/3}} \quad (17)$$

式中: Nu_0 和 f_0 表示参比通道, 本文选取直流通模型为参比通道。

2 结果分析与讨论

2.1 渐缩渐扩的节距周期 T 对换热性能的影响

在定渐缩渐扩截面比 ($\beta=R_1/R_2$) 为 1/0.7、定渐缩长度与渐扩长度之比 ($\gamma=L_S/L_K$) 为 1/1 的条件下,在质量流率为 0.3~0.7 g/s 时,对表 1 中模型 A1—A5 进行分析。

图 7 为 Nu 随节距周期 T 变化曲线。由图 7 可见, 热侧和冷侧的 Nu 均与 T 的大小成反比: 当 T 由 7.5 mm 增大到 15.0 mm 时, Nu 的减小幅度较大, 特别是当质量流率为 0.6、0.7 g/s 时, 减幅达到了 17.81%、17.37%; 当 T 大于 15.0 mm 之后, 直至 T 为 45.0 mm, Nu 的减小幅度都较为平缓, 特别是当 T 由 30.0 mm 增大到 45.0 mm 时热流体侧 Nu 减幅仅为 1.76%。由此可知: T 越小, 对管道内流体的扰动越大, 湍流强度越高, 能够增强换热; 反之, 当 T 增大到一定程度时对流体的扰动作用将逐渐减小, 流体流动湍流程度下降, 将削弱换热。

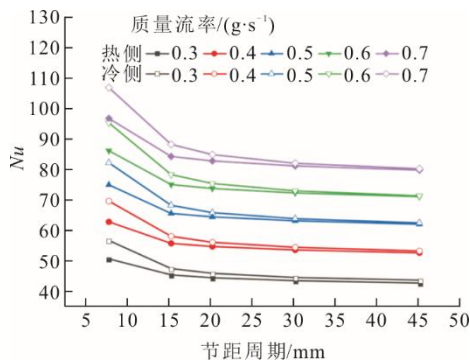
图 7 Nu 随节距周期变化Fig.7 Variations of Nu with pitch period

图 8 为范宁摩擦因子 f 随节距周期、质量流率变化曲线。 f 主要受压降、密度和流体速度影响, 在相同质量流率下, 冷流体密度高于热流体, 热、冷流体平均流速分别为 2.56、0.61 m/s。由图 8 计算结果可知, 冷流体侧的摩擦阻力损失整体大于热流体侧, 热侧和冷侧的摩擦阻力损失均随着节距周期的增大而减小, 且与质量流率的大小成反比。

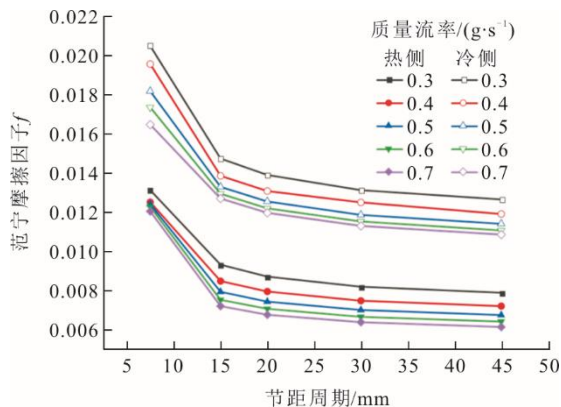
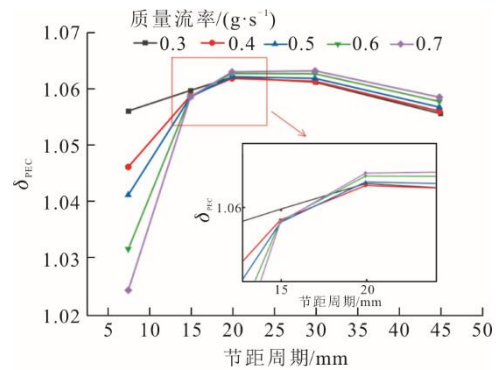
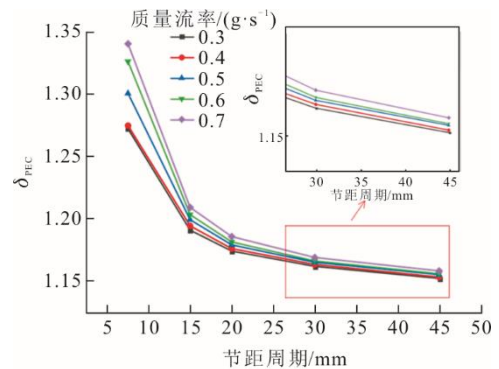
图 8 范宁摩擦因子 f 随节距周期变化Fig.8 Variations of Fanning friction factor f with pitch period

图 9 为热流体和冷流体的综合性能评价指标 (δ_{PEC}) 随节距周期和质量流率的变化曲线。由图 9

可知, 无论是热流体侧还是冷流体侧, δ_{PEC} 均超过 1, 表明采用渐缩渐扩节距周期的 PCHE 模型综合性能优于传统的直流道模型。由于热流体侧的 S-CO₂ 工作压力低于冷流体侧, 热侧的 S-CO₂ 密度、导热系数、黏度、比热容、传热系数均低于冷侧; 冷侧高密度流体惯性力比热侧强, 在渐缩渐扩流道的流动分离较弱, 而热侧低工作压力、低密度流体易受几何扰动, 惯性力较弱, 虽然湍流能够得到增强, 但是热侧压降大于冷侧, 沿程损失较大, 降低了传热效率。以上因素影响了 S-CO₂ 在流道中的流动和传热性能, 使冷侧的 δ_{PEC} 普遍高于热侧。



a) 热侧



b) 冷侧

图 9 δ_{PEC} 随节距周期变化Fig.9 Variations of δ_{PEC} with pitch period

由于工作压力的差异, 热侧和冷侧 S-CO₂ 的 δ_{PEC} 随节距周期 T 和质量流率变化的规律也不同。热侧 δ_{PEC} 在 T 为 15.0~25.0 mm 时出现剧烈变化, T 为 7.5、45.0 mm 时热流体速度仅相差 0.69%。由此可见, 在 T 变化的过程中流体速度变化不大, 但是在 T 增大的过程中压降、 f 、 Nu 却逐渐减小, 且 Nu 的降幅大于 f 的降幅, δ_{PEC} 的大小与 f 、 Nu 直接相关, 当 Nu 减小到一定值时, δ_{PEC} 将出现降低趋势。如图 9a) 所示: 在节距周期小于 15.0 mm 时, 热侧 δ_{PEC} 值与质量流率呈反比关系; 当节距周期超过 25.0 mm 时, 热侧 δ_{PEC} 则与质量流率呈正比关系;

热流体侧节距周期的最优值为 15.0~25.0 mm。相比之下，冷侧 δ_{PEC} 随节距周期的变化较为规律，变化趋势相同，冷侧 δ_{PEC} 值始终与节距周期的大小呈反比，与质量流率的大小呈正比。由此可知，提高 S-CO₂ 流体的工作压力能够提高 PCHE 通道内的综合性能。

2.2 渐缩渐扩截面比 ($\beta=R_1/R_2$) 对换热性能的影响

在定渐缩渐扩节距周期为 10 mm、定渐缩长度与渐扩长度之比为 1/1 的条件下，在质量流率为 0.3~0.7 g/s 时，对表 1 中模型 B1—B5 进行分析。

图 10 为 Nu 随截面比变化情况。由图 10 可以看出：当渐缩渐扩截面比 β 由 1/0.7 变化到 1/1.1 时，热、冷流体侧 Nu 均呈下降趋势；当 β 由 1/1.1 变化到 1/1.2 时， Nu 呈上升趋势。在计算的几种工况中， β 为 1/1.1 时是变化趋势的转折点，但两侧的 Nu 并非以 β 为 1/1.1 对称变化。 β 越大， R_2 截面就越小，流体在渐缩渐扩结构中流经 R_2 截面时速度就越高，流体与壁面之间的对流换热将增强，对流换热系数越高，换热效果越好；当截面比和其他条件一定时， Nu 随着质量流率的增大而增大，质量流率的增大使流体速度增加，对流换热能力增强，流体与壁面的热量交换增强。

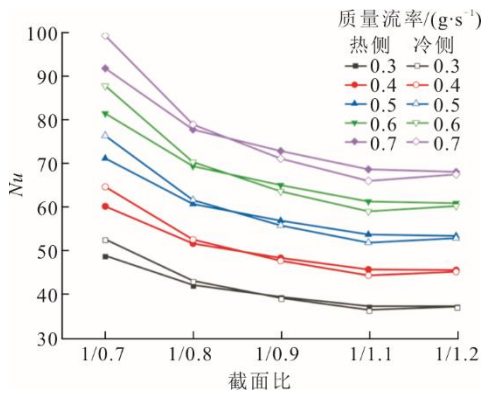


图 10 Nu 随截面比变化

Fig.10 Variations of Nu with cross-sectional ratio

图 11 为范宁摩擦因子 f 随截面比、质量流率变化的曲线图。由图 11 可知： β 为 1/0.9 是 f 变化趋势的转折点：当 β 由 1/0.7 变化到 1/0.9 时，热流体

侧和冷流体侧的 f 皆呈下降趋势；当 β 由 1/0.9 变化到 1/1.2 时，热流体侧和冷流体侧的 f 皆呈上升趋势。说明在流体与壁面换热增强的同时，流体在通道内的摩擦阻力损失也相应增加。

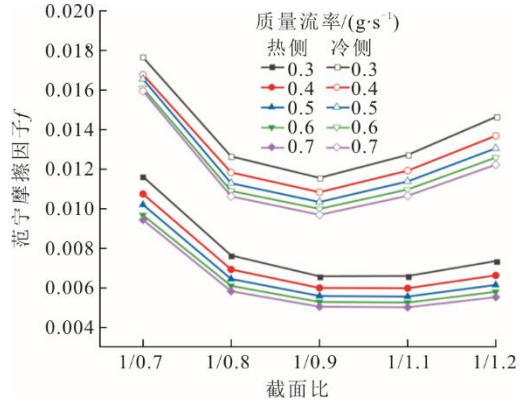


图 11 范宁摩擦因子 f 随截面比变化

Fig.11 Variations of Fanning friction factor f with cross-sectional ratio

图 12 给出了在不同质量流率下，热流体和冷流体在变截面比通道内 δ_{PEC} 的变化情况。可以看出：对于 B1、B2、B3 模型， β 值均大于 1，热、冷流体的 δ_{PEC} 均在 1 以上，说明这 3 种结构的综合性能均优于直道模型；而对于 B4、B5 模型， β 值均小于 1，热、冷流体通道的 δ_{PEC} 均在 1 以下，说明这 2 种结构的综合性能比直道模型差。

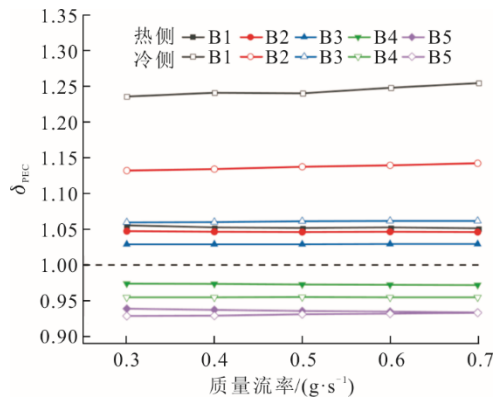


图 12 δ_{PEC} 随截面比变化

Fig.12 Changes of δ_{PEC} with cross-sectional ratio

图 13 为不同 β 下流道内流体速度分布云图对比，分别对应 B1、B5 2 种情况。

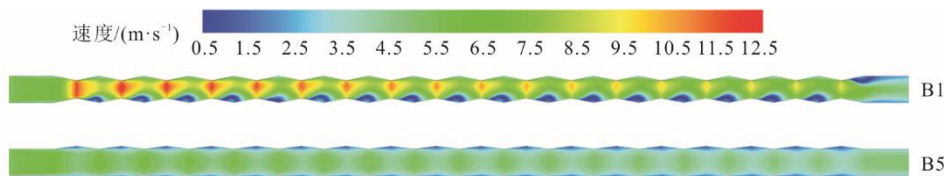


图 13 不同 β 下流道内流体速度分布云图对比

Fig.13 Contour maps of fluid velocity distribution in the flow channels with different β values

由图 13 可以看出：当 β 值大于 1，流体在流经入口段的平直流道后，流体通道截面先逐渐减小后逐渐增大，此时通道内流体的速度先增大后减小，流体在截面缩小段的扰动增加，之后在流经截面扩大段时，会产生类似射流冲击的效果，流体湍流程度增加，使流体与壁面的接触更加充分，同时在扩大段还会形成涡旋，涡旋冲刷壁面破坏了边界层的发展，增强了流体和壁面之间的传热；若 β 值小于 1，流体通道截面则先增大后减小，此时通道内流体的速度先减小后增大，这种结构会减小流体的整体速度，降低流体湍流程度，从而降低整个系统的换热性能。

2.3 改变渐缩长度与渐扩长度之比 ($\gamma=L_s/L_k$) 对换热性能的影响

在定渐缩渐扩节距周期为 10 mm、定渐缩渐扩截面比为 1/0.7 的条件下，在质量流率为 0.3~0.7 g/s 时，对表 1 中模型 C1—C4 进行分析，C1—C4 分别对应 γ 为 1/9、3/7、7/3、9/1 的情况。图 14 为 Nu 随 γ 的变化情况。

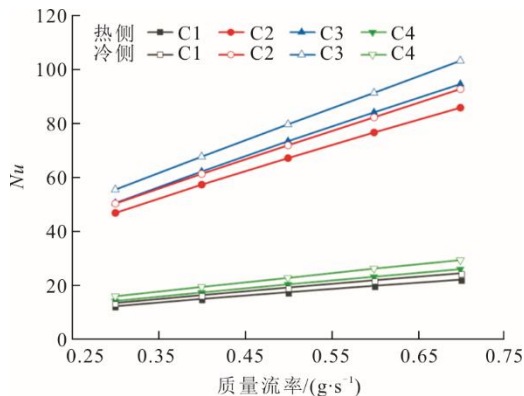


图 14 Nu 随 γ 变化
Fig.14 Variations of Nu with γ

如图 14 所示：热、冷侧 Nu 均与质量流率的大小成正比，且同一工况下冷侧 Nu 始终大于热侧 Nu ；在定质量流率条件下，几种工况 Nu 由大到小依次为 C3、C2、C4、C1；当质量流率为 0.7 g/s 时，以模型 C1 和 C3 为例，模型 C1 中热、冷流体的平均流速分别为 6.123、1.382 m/s，而模型 C3 中热、冷流体的平均流速分别为 6.285、1.433 m/s，模型 C3 中流体流速高于模型 C1 中流体流速；此外，模型 C3 中热、冷流体对流换热系数均大于模型 C1。因此，模型 C3 的 Nu 大于模型 C1 的 Nu 。

图 15 为范宁摩擦因子 f 随 γ 、质量流率变化图。可以看出， γ 不变时，范宁摩擦因子 f 随质量流率增

大而减小。以模型 C3 为例，质量流率由 0.6 g/s 增至 0.7 g/s 时，流体速度增加，速度平方增加，入口处到出口处的压降损失也增加：热、冷侧流体 u^2 分别增加了 37.9% 和 34.5%，而热、冷侧压降分别增加了 33.81% 和 34.17%。流体压降增加幅度小于 u^2 的增加幅度，导致 f 减小。在定质量流率条件下，几种工况 f 由大到小依次为 C3、C2、C4、C1。

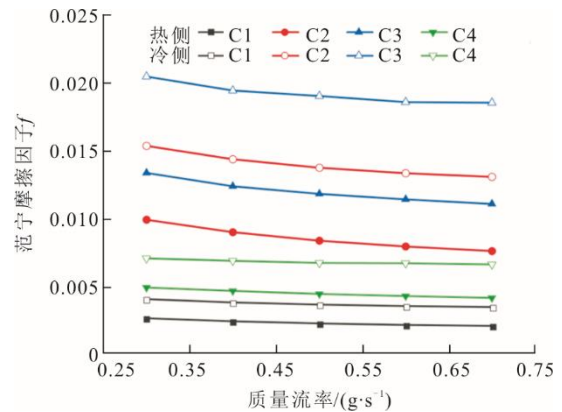


图 15 范宁摩擦因子 f 随 γ 变化
Fig.15 Variations of Fanning friction factor f with γ

图 16 为热侧和冷侧综合性能评价指标 δ_{PEC} 随 γ 变化的曲线图。在 4 种工况中，模型 C2、C3 的热、冷侧 δ_{PEC} 值均大于 1，即 C2、C3 模型的综合性能优于直流道模型；模型 C1、C4 的热、冷侧 δ_{PEC} 值均小于 1，说明 C1、C4 模型综合性能低于直流道模型。从图 16 还能看出，随着质量流率的增大，模型 C2 的 δ_{PEC} 值略高于模型 C3 的 δ_{PEC} 值，说明在计算的几种工况中，模型 C2 的综合性能最好。

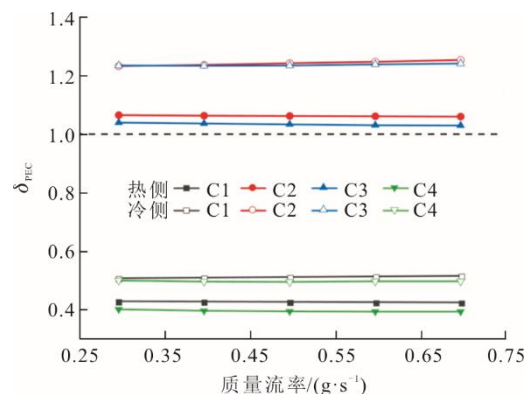


图 16 热侧和冷侧的综合性能评价指标 δ_{PEC} 随 γ 变化曲线
Fig.16 Variations of the comprehensive performance evaluation index δ_{PEC} of the hot side and cold side with γ

图 17 为 4 种 γ 下流道内流体速度分布云图对比。由图 17 可以看出：流体均在渐缩段加速，此过

程动能增加,不会产生流动分离;流体在流经渐扩段时,由于速度减小压力增大,易因逆压梯度发生流动分离而产生不同大小的涡流;模型 C1、C2 渐缩段长度大于渐扩段,模型 C3、C4 渐缩段长度小于渐扩段,模型 C3、C4 形成的涡流比模型 C1、C2

更大,模型 C3、C4 的沿程压降损失也更大。综合各工况下的 δ_{PEC} 可得出结论,在定周期条件下,兼顾换热性能及沿程压降损失,对渐变结构进行设计时,应控制渐缩段长度小于渐扩段长度,最佳渐缩长度与渐扩长度之比应在 3/7 附近。

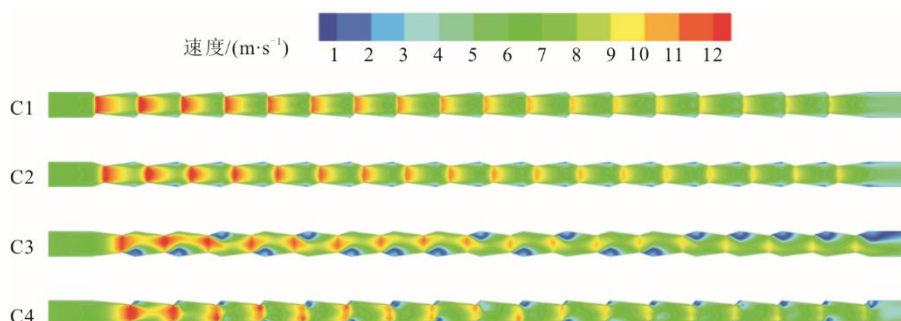


图 17 不同 γ 下流道内流体速度分布云图对比

Fig.17 Contour maps of fluid velocity distribution in the flow channels with different γ values

3 结 论

为探究渐缩渐扩型流道对 PCHE 综合性能的影响,采用数值模拟的方法,以 S-CO₂ 为流体质,对不同工况参数的渐缩渐扩型流道 PCHE 进行了模拟计算,比较了不同工况参数 PCHE 的 Nu 、 f 、 δ_{PEC} ,得出如下结论。

1) 节距周期 T 的影响。对于定渐缩渐扩截面比 β 为 1/0.7、定渐缩长度与渐扩长度之比 β 为 1:1 的情况,渐缩渐扩节距周期 T 增大, Nu 和 f 均减小,冷流体侧和热流体侧综合性能 δ_{PEC} 均大于 1,且冷流体侧 δ_{PEC} 略高于热流体侧。

2) 渐缩渐扩截面比 β 的影响。对于定渐缩渐扩节距周期 T 为 10 mm、定渐缩长度与渐扩长度之比 γ 为 1:1 的情况,当渐缩渐扩截面比 β 大于 1 时,综合性能 δ_{PEC} 大于 1,综合换热性能和截面比 β 为正相关;当渐缩渐扩截面比 β 小于 1 时, δ_{PEC} 小于 1,综合换热性能被削弱。

3) 渐缩长度与渐扩长度之比 γ 的影响:对于定渐缩渐扩节距周期 T 为 10 mm、定渐缩渐扩截面比 β 为 1/0.7 的情况,在计算的几种工况中,渐缩长度与渐扩长度之比 β 为 3/7 和 7/3 时,综合性能 δ_{PEC} 大于 1,综合换热性能得到强化。

[参 考 文 献]

[1] 郭瑞阳,杨红义,庄毅,等.超临界二氧化碳布雷顿循环系统关键参数对循环效率的影响研究[J].核科学与工程,2024,44(5):1018-1029.
GUO Ruiyang, YANG Hongyi, ZHUANG Yi, et al. Study on influence of key parameters of supercritical carbon

dioxide Brayton cycle system on cycle efficiency[J]. Nuclear Science and Engineering, 2024, 44(5): 1018-1029.
[2] LI Y, FU Y, ZHANG J, et al. Investigation of heat transfer performance and enhancement mechanisms of supercritical carbon dioxide in PCHE with fractal airfoil fins[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 60: 104802.
[3] LIN M, GUO C, LI Z, et al. Impact of pipe resistance on performance of supercritical carbon dioxide Brayton cycle system[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 60: 104711.
[4] 李显文.印刷电路板式换热器中液态铅铋与超临界二氧化碳流动换热特性研究[D].兰州:中国科学院近代物理研究所,2024:1.
LI Xianwen. Research on flow and heat transfer characteristics of liquid lead-bismuth eutectic and supercritical carbon dioxide in printed circuit heat exchanger[D]. Lanzhou: University of Chinese Academy of Sciences, 2024: 1.
[5] 纪宇轩,邢凯翔,岑可法,等.超临界二氧化碳布雷顿循环研究进展[J].动力工程学报,2022,42(1):1-9.
JI Yuxuan, XING Kaixiang, CEN Kefa, et al. A review on supercritical carbon dioxide Brayton cycle[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(1): 1-9.
[6] CHEN J, TAN S, E J, et al. Dynamic performance and control analysis of supercritical CO₂ Brayton cycle for solid oxide fuel cell waste heat recovery[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 250: 123556.
[7] ZAHARIL A H, YANG H. Thermodynamic analysis of a parabolic trough power plant integrating supercritical carbon dioxide Brayton cycle and direct contact membrane distillation[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 252: 123637.
[8] 钟鸣,占园根,孙健,等.阵列式多孔微射流热沉结构优化及传热特性研究[J].陶瓷学报,2023,44(3):581-589.
ZHONG Ming, ZHAN Yuangen, SUN Jian, et al. Structure optimization and heat transfer characteristics of holes array microjet heat sink[J]. Journal of Ceramics, 2023, 44(3): 581-589.

- [9] 张任平, 周祖祥, 黄菊, 等. 辊道窑尾部热交换器传热特性及涡流强化[J]. 陶瓷学报, 2024, 45(4): 812-820.
ZHANG Renping, ZHOU Zuxiang, HUANG Ju, et al. Heat transfer characteristics and eddy current enhancement of heat exchange at the end of roller kiln[J]. Journal of Ceramics, 2024, 45(4): 812-820.
- [10] XIN F, MA T, CHEN Y, et al. Study on chemical spray etching of stainless steel for printed circuit heat exchanger channels[J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 341: 91-99.
- [11] YUAN P, TIAN H, WANG X, et al. A print circuit heat exchanger design method based on vortex field optimization of disturbance generator[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 208: 109498.
- [12] 唐凌虹, 杨博皓, 李文军. 轴向导热对印刷电路板式换热器换热性能影响[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(4): 1055-1062.
TANG Linghong, YANG Bohao, LI Wenjun. Effect of axial heat conduction on thermal performance in a printed circuit heat exchange[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(4): 1055-1062.
- [13] MESHARAM A, JAISWAL K A, KHIVSARA D S, et al. Modeling and analysis of a printed circuit heat exchanger for supercritical CO₂ power cycle applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109: 861-870.
- [14] LV Y G, WEN Z X, LI Q, et al. Numerical investigation on thermal hydraulic performance of hybrid wavy channels in a supercritical CO₂ precooler[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 181: 121891.
- [15] WEN Z, LV Y, LI Q, et al. Numerical study on heat transfer behavior of wavy channel supercritical CO₂ printed circuit heat exchangers with different amplitude and wavelength parameters[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 147: 118922.
- [16] 李德波, 靳万龙, 陈兆立, 等. 通道高度对翼型翅片印刷电路板换热器流动传热性能的影响[J]. 动力工程学报, 2024, 44(6): 837-843.
LI Debo, JIN Wanlong, CHEN Zhaoli, et al. Effects of channel height on the thermal-hydraulic performance of airfoil fin printed circuit heat exchanger[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(6): 837-843.
- [17] HAN Q, LAI W H, LIU Z X, et al. A comparative study of enhanced thermal performance in Tesla-type microchannels[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 239: 122157.
- [18] MAJMADER B F, HASAN J M. Heat transfer and fluid flow characteristics of a periodically constricted microchannel heat sink with supercritical carbon-di-oxide (sCO₂) as a coolant near its critical point[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 210: 109609.
- [19] 朱兵国, 何吉祥. 变截面耦合通道 PCHE 内超临界 CO₂ 热工水力性能研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(6): 1749-1756.
ZHU Bingguo, HE Jixiang. Study on thermal and hydraulic performance of supercritical CO₂ in coupled channel PCHE with variable cross-section[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(6): 1749-1756.
- [20] PONNORE J J, ALDAWI F. Enhanced printed-circuit heat exchanger for supercritical CO₂ Brayton cycle pre-coolers with innovative convergent-divergent mini-channel design[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 214: 109857.
- [21] 吴家荣, 李红智, 杨玉, 等. 类菱形肋片流道印刷电路板换热器热工水力特性研究[J]. 热力发电, 2023, 52(11): 20-28.
WU Jiarong, LI Hongzhi, YANG Yu, et al. Study on the thermal hydraulic characteristics of the printed circuit heat exchanger with rhombic fin channels[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(11): 20-28.
- [22] 卢京龙. 具有特斯拉阀通道结构的印刷电路板换热器流动与换热特性及参数优化[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022: 1.
LU Jinglong. Flow and heat transfer characteristics and parameter optimization of a printed circuit board heat exchange with a tesla value channel structure[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2022: 1.
- [23] 沈佳飞, 王波, 周秋平, 等. 转折角对 Z 形通道印刷电路板式换热器中二氧化碳流动与换热特性的影响[J]. 上海理工大学学报, 2023, 45(4): 352-363.
SHEN Jiafei, WANG Bo, ZHOU Qiuping, et al. Effect of turning angle on flow and heat transfer characteristics of carbon dioxide in zigzag printed circuit heat exchanges[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2023, 45(4): 352-363.
- [24] 曾豪. Z 型 PCHE 内超临界二氧化碳流动传热数值研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021: 1.
ZENG Hao. Numerical investigation on the flow and heat transfer characteristics of supercritical carbon dioxide in Zigzag-channel PCHE[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021: 1.
- [25] 杨彦春, 鹿院卫, 吴玉庭, 等. 印刷电路板换热器内翅片布置方式的场协同分析与讨论[J]. 北京工业大学学报, 2024, 50(5): 610-619.
YANG Yanchun, LU Yuanwei WU Yuting, et al. Analysis and discussion of field synergy principle of fin arrangement in printed circuit heat exchange[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2024, 50(5): 610-619.
- [26] LIU K, ZHAO F, MING Y, et al. S-CO₂ and LBE coupled heat transfer characteristics analysis in new layout PCHE[J]. Nuclear Engineering and Design, 2024, 424: 113318.
- [27] REN Z, ZHAO C, JIANG P, et al. Investigation on local convection heat transfer of supercritical CO₂ during cooling in horizontal semicircular channels of printed circuit heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 157: 113697.
- [28] 吴新汶. 超临界二氧化碳循环 PCHE 预冷器流动传热特性研究与设计优化[D]. 南京: 东南大学, 2023: 1.
WU Xinwen. Supercritical carbon dioxide cycle PCHE pre-cooler[D]. Nanjing: Southeast University, 2023: 1.
- [29] ZHOU Y L, YIN D D, GUO X T, et al. Numerical analysis of the thermal and hydraulic characteristics of CO₂/propane mixtures in printed circuit heat exchangers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 185: 122434.

(责任编辑 李园)