

DOI: 10.19666/j.rlfed.202310165

变截面半圆通道内超临界二氧化碳 热工水力性能研究

彭斌, 孙振豪, 朱兵国, 施佳宝, 张朋成
(兰州理工大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

[摘要] 建立了不同半圆通道的数学和物理模型, 并通过与实验数据的比较, 验证了所建立模型的准确性。研究了超临界二氧化碳(S-CO₂)在等截面半圆通道、渐扩型和渐缩型通道内的热工水力换热性能, 并分析了不同通道和压力对S-CO₂在变截面半圆通道内的热工水力性能的影响。结果表明: 相较于均匀截面半圆通道, 渐扩型通道恶化传热, 渐缩型通道强化传热; 入口和出口半径比为1.0:0.5的渐缩型半圆通道的总体换热系数最大提升了39.93%, 流动传热综合性能评价因子PEC最大为1.346; 当压力越靠近临界压力或热通量较低时, 传热性能越高。最后, 从场协同性和湍动能分布的角度解释了渐缩型变截面通道强化传热的原因。研究结果可为S-CO₂循环系统冷却器的设计与优化提供新的思路 and 理论指导。

[关键词] 超临界二氧化碳; 渐扩型通道; 渐缩型通道; 传热强化; 湍流; 场协同

[引用本文格式] 彭斌, 孙振豪, 朱兵国, 等. 变截面半圆通道内超临界二氧化碳热工水力性能研究[J]. 热力发电, 2024, 53(4): 43-52. PENG Bin, SUN Zhenhao, ZHU Bingguo, et al. Study on thermal hydraulic performance of supercritical carbon dioxide in semi-circular channel with variable cross-section[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(4): 43-52.

Study on thermal hydraulic performance of supercritical carbon dioxide in semi-circular channel with variable cross-section

PENG Bin, SUN Zhenhao, ZHU Bingguo, SHI Jiabao, ZHANG Pengcheng
(School of Mechanical & Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The mathematical and physical models of different semicircular channels are established, and the accuracy of the numerical models is verified by comparing with the experimental data. The thermal and hydraulic heat transfer performance of supercritical carbon dioxide (S-CO₂) in uniform cross-section semicircular tube, diverging tube and converging tube is studied, and the influence of different channels and pressures on the thermal and hydraulic performance of S-CO₂ in a semi-circular tube with variable cross-section is calculated and analyzed. The results show that, compared with the uniform cross-section semicircular tube, the diverging tube deteriorates heat transfer, the converging tube enhances heat transfer. The overall heat transfer coefficient of converging semicircular tube with the inlet and outlet radius ratio of 1.0:0.5 increases by 39.93%, and the maximum evaluation factor PEC of flow heat transfer comprehensive performance is 1.346. When the pressure is closer to the critical pressure or the heat flux is low, the heat transfer performance is higher. Finally, the reason why the converging tube with variable cross-section can enhance heat transfer is explained from the perspective of field coordination and turbulent kinetic energy distribution. The research results can provide new ideas and theoretical guidance for the design and optimization of coolers in S-CO₂ circulation system.

Key words: supercritical carbon dioxide; diverging tube; converging tube; heat transfer enhancement; turbulent flow; field coordination

收稿日期: 2023-10-19 网络首发日期: 2023-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51966009); 甘肃省自然科学基金项目(22JR5RA283); 甘肃省优秀博士项目(22JR5RA235)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51966009); Natural Science Foundation of Gansu Province (22JR5RA283); Excellent Doctoral Program of Gansu Province (22JR5RA235)

第一作者简介: 彭斌(1976), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为现代设计方法、理论及应用、低温余热发电等, pengb2000@163.com.

通信作者简介: 朱兵国(1988), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为超临界流体传热、高效紧凑型换热器开发, zhubg@lut.edu.cn.

二氧化碳 (CO₂) 因无毒、不可燃等稳定化学性质, 且对臭氧层没有破坏潜力 (ODP=0)、引发温室效应的潜力较低 (GWP=1), 而被视为一种新型环保工质。同时, CO₂ 的热力学临界点较低 (临界温度 31.04 °C, 临界压力 7.38 MPa), 易实现跨临界循环。相比于常见的水蒸气朗肯循环, 超临界二氧化碳 (S-CO₂) 布雷顿循环发电技术得到了国际学者的广泛关注, 成为前沿热点研究领域^[1]。目前, S-CO₂ 布雷顿循环在太阳能发电、燃煤发电、核电等多个领域都被广泛应用。作为上述发电系统的循环工质, 大量学者开展了 S-CO₂ 流动传热的研究工作^[2-7]。

印刷电路板式换热器 (printed circuit heat exchanger, PCHE) 因具有结构紧凑、传热效率高、体积小、耐高温高压等优点被公认为是 S-CO₂ 发电系统中最有潜力的换热器^[8]。换热芯体是整个 PCHE 的核心部分, 它是采用扩散焊将多层经过化学刻蚀出微通道的换热板进行焊接而得到的结构。目前, 半圆形截面通道是最常见的流道形状, 1 个热流通道和 1 个冷流通道可视为 1 个换热单元^[9]。每层换热板的通道是主要的换热表面, 因此, PCHE 的通道结构是影响其流动传热性能的最主要因素之一。Wang 等人^[10]采用直接数值模拟研究了混合对流和强制对流条件下 S-CO₂ 在半圆管内的换热过程, 重点讨论了热流、二次流、热加速度、角效应和几何取向对传热的影响。Park 等人^[11]开展了 S-CO₂ 在半圆管内的实验研究, 将实验结果和已有基于圆管开发的超临界流体传热关联式进行了比较, 发现已有关联式对顶母线传热的预测较好, 对底母线传热的预测较差, 基于对边界层的分析, 提出了一个新的传热模型。Zhong 等人^[12]探讨了冷却条件下半圆形和圆形通道中 S-CO₂ 的局部换热特性, 并将其应用于 S-CO₂ 布雷顿循环领域, 结果表明, 无论采用半圆形通道还是圆形通道, S-CO₂ 的局部换热系数沿流动方向均为先增大后减小, 并且由于浮力效应的影响, 水平半圆形通道的换热性能弱于圆形通道。Kruizenga 等人^[13]对 S-CO₂ 在 9 个平行半圆微通道内的传热特性进行了实验研究与数值模拟分析, 发现在拟临界点附近, 传统的单相对流换热计算公式不能预测现有实验数据, 因此基于实验数据拟合得到了一个新的传热关联式。

为了强化 PCHE 的换热性能, 一些研究者提出了 Z 形通道、S 形通道、翼型通道等^[14-16]。由于通道的水力直径尺度约为 1 mm, 相较于传统直线型通道, Z 形结构具有较大的压降。在相同换热条件

下, S 形 PCHE 将压降降低到 Z 形 PCHE 的 1/5。翼形通道 PCHE 则可以将阻力降到更低^[17]。从流动传热和制造角度分析, S 型和翼型虽性能优异, 但制造成本更高^[18-19]。

综上, 目前仍采用扩展传热面、管内插入物、弯曲通道等流动强化传热方法促进 S-CO₂ 在 PCHE 内的交混和扰动, 这些传统方法存在传热性能提升的同时伴随流动阻力大幅增加的问题。最近, Li 等人^[20]研究表明, 在相同换热面积下, 相较于等截面圆管, 变截面圆管可有效提高 S-CO₂ 的传热性能, 但其主要对 S-CO₂ 远临界区 (即物性较为稳定) 的传热性能进行分析且所考虑的模型管径较大。而在单相流动换热和两相流中, 已有研究也表明变截面通道能有效增强传热^[20-21]。受此启发, 本文将针对 S-CO₂ 在变截面半圆通道内的热工水力性能开展研究。首先建立了半圆通道的物理和数学计算模型, 并对模型进行了验证; 其次比较研究了 S-CO₂ 等截面通道、渐扩型和渐缩型通道的热工水力性能; 最后分析了运行压力对 S-CO₂ 热工性能的影响, 并从场协同原理和湍动能分布角度解释了变截面通道强化传热的原因。研究结果可为应用于 S-CO₂ 循环的 PCHE 的设计与优化提供新的思路和理论支撑。

1 物理模型和数值方法

1.1 物理模型及网格划分

为了对 S-CO₂ 在均匀截面半圆通道、渐扩型、渐缩型变截面半圆通道中的综合性能进行比较, 建立如图 1 所示 3 种通道的三维计算模型。3 种通道模型均由 200 mm 的出入口绝热段和长为 L 的冷却段组成, 出入口绝热段主要是用以防止 S-CO₂ 回流和保持入口段的稳定流动。均匀半圆通道冷却段长 L 为 600 mm, 而渐扩型/渐缩型半圆管冷却段长度 L 在保证换热面积相同的情况下, 比均匀半圆管略长, 为 600.145 mm。坐标原点设置在绝热段入口圆心处, 通道轴向设置为 x , 流体流向为 x 轴正方向, 重力方向沿 y 轴负方向。3 种通道入口半径记为 r_i , 出口半径记为 r_o , 本文计算模型中均匀截面通道的半径与现有 PCHE 通道的尺寸相当, 为 0.75 mm。对于变截面通道, 主要包括渐扩型和渐缩型, 在此定义变截面系数 e , 定义式如下:

$$e = \frac{r_i}{r_o} \quad (1)$$

式中: r_i 、 r_o 、 e 的取值如表 1 所示。为了叙述简便, 对不同管型进行符号定义。

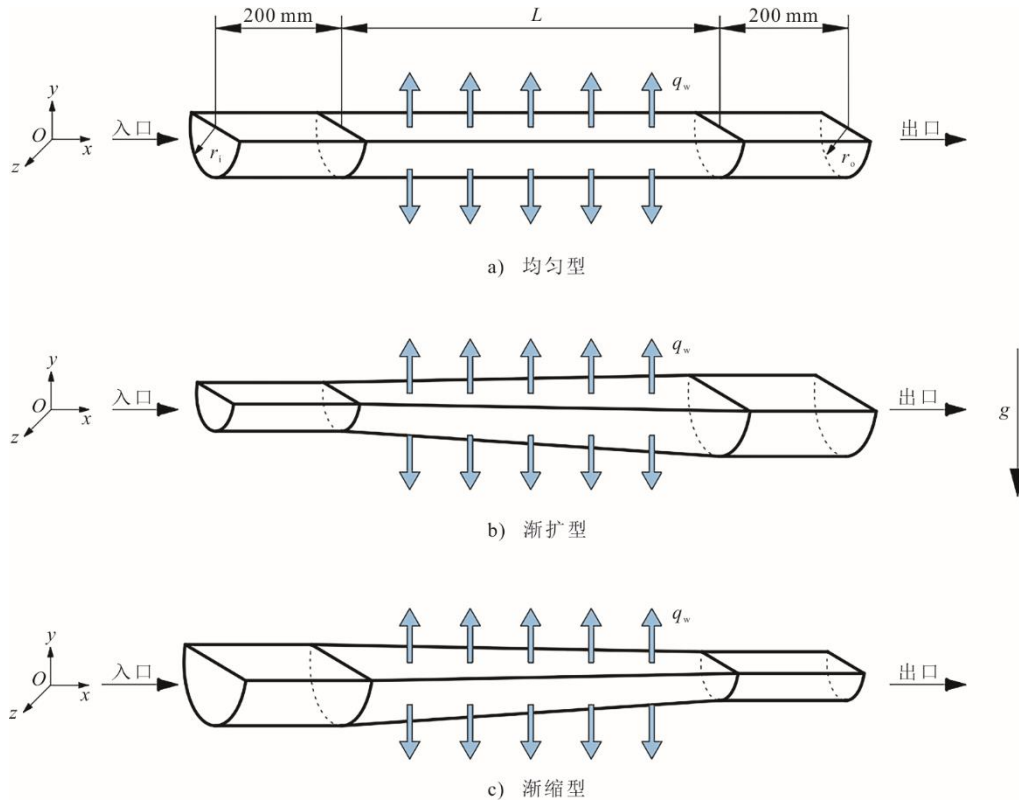


图 1 3 种类型变截面通道的物理模型

Fig.1 Physical models of three types of variable section channels

表 1 通道几何参数

Tab.1 Geometric parameters of the channels

类型	入口半径 r_i /mm	出口半径 r_o /mm	变截面系数 r_i/r_o	符号
均匀型	0.75	0.75	1	U
渐扩型 (Diverging)	0.7	0.8	0.7:0.8	D1
	0.6	0.9	0.6:0.9	D2
	0.5	1.0	0.5:1.0	D3
	0.4	1.1	0.4:1.1	D4
渐缩型 (Converging)	0.8	0.7	0.8:0.7	C1
	0.9	0.6	0.9:0.6	C2
	1.0	0.5	1.0:0.5	C3
	1.1	0.4	1.1:0.4	C4

使用 ANSYS ICEM 软件对计算模型进行六面体结构化网格划分 (图 2)。轴向使用相同长度的均匀网格, 径向使用 O 型剖分。由于 S-CO₂ 在靠近壁面的区域物性变化较剧烈, 在求解精度方面为确保首层网格无量纲高度 y^+ 小于 1, 对边界层网格进行了加密处理。最终所得的网格质量在 0.8 以上。

1.2 控制方程、边界条件及计算方法

采用 Fluent 2020 R2 对 S-CO₂ 在 3 种不同通道中的流动换热特性进行数值计算。假定流体流经管

道时是考虑重力的稳定湍流且不具备内部热源, 忽略与环境的传热。用于流动和传热的控制方程在笛卡尔坐标系下的表达式如下^[22]。

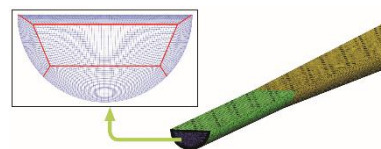


图 2 计算模型网格划分

Fig.2 Mesh generation for the calculation model

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

动量方程:

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

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{1}{Pr} + \frac{\mu_t / \mu}{Pr_t} \right) \frac{\partial i}{\partial x_i} \right] \quad (4)$$

式中: ρ 、 u 、 μ 、 μ_t 、 i 、 g 、 Pr 和 Pr_t 分别对应 S-CO₂ 的密度、速度、黏度系数、湍流动力黏度、比焓、重力加速度 (取 9.8 m/s²)、Prandtl 数 ($Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}$, λ 为导热率, c_p 为定压比热容) 和湍流 Prandtl 数 ($Pr_t = \frac{\mu_t c_p}{\lambda_t}$, λ_t 为涡流导热率)。

Wang 等人^[23]的研究表明湍流模型对超临界流体换热有重要影响, 文献^[24]表明 SST $k-\omega$ 湍流模型相较于其他模型能够获取更准确的计算结果。据此, 本文采用 SST $k-\omega$ 湍流模型进行数值模拟, 其表达式如下^[23]。

湍流动能 k 方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (5)$$

比耗散率 ω 方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (6)$$

式中: G_k 和 G_ω 分别对应湍动能生成项和特定耗散率生成项; Y_k 和 Y_ω 分别对应湍动能和比耗散率 ω 的耗散项; D_ω 为交叉扩散项; S_k 和 S_ω 分别对应湍动能 k 和比耗散率 ω 的自定义源项。

进出口边界条件设定为质量流量入口和压力出口。所有壁面均采用无滑移边界条件, 进出口绝

热段设定为绝热壁面, 冷却段设定为恒热通量壁面。控制方程在计算过程中使用有限体积法和二阶迎风式对其进行离散化处理。采用 SIMPLEC 算法对压力-速度耦合方程进行求解。同时, 利用 Fluent 软件中的 real gas 实际气体模型准确反映 S-CO₂ 强烈热物理性质变化对传热的影响。计算过程中认为能量方程的残差为 10⁻⁷、质量和动量方程的残差为 10⁻⁵ 以及进出口流体的质量流量差小于 10⁻⁵ 时, 计算结果收敛, 并停止计算。

总体换热系数定义如下:

$$h = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n h_x \quad (7)$$

$$h_x = \frac{q_w}{T_b - T_{w,x}} \quad (8)$$

式中: h_x 为对应 x 坐标截面的局部换热系数; n 表示沿程所取界面的总数; $T_{w,x}$ 表示对应 x 坐标截面的平均壁温。

流体温度在方管横截面定义如下:

$$T_b = \frac{\int \rho u c_p T dA}{\int \rho u c_p dA} \quad (9)$$

式中: dA 为方管横截面的单位面积。

1.3 模型验证和网格独立性验证

保证数值计算的准确性, 首先对数值方法进行验证, 以参考文献^[25]中所述的实验条件进行数值计算。模型的几何尺寸和边界条件与实验条件一致。数值计算结果与实验结果对比如图 3a) 所示。从图 3a) 可以看出, 数值模拟结果在各温度区间内均能很好地与实验结果匹配, 且整体结果变化趋势与实验结果吻合较好, 两者平均相对误差为 4.154%, 说明文中所运用的数值计算方法准确可靠。

由于网格数量会对数值计算的结果产生影响, 在计算前也对网格数量对结果的独立性进行了测试, 结果如图 3b) 所示。图 3b) 中横坐标为网格数量, 纵坐标采用双 Y 轴坐标, 其中左侧为传热系数 h , 右侧为压降 ΔP 。

由图 3b) 可知: 当网格数大于 625 435 时, ΔP 几乎不受网格总数影响, 但 h 依旧波动较大; 在网格数大于 851 875 时, h 和 ΔP 均不受网格数量的影响, 几乎不变。因此, 选取网格总数为 851 875 进行计算。

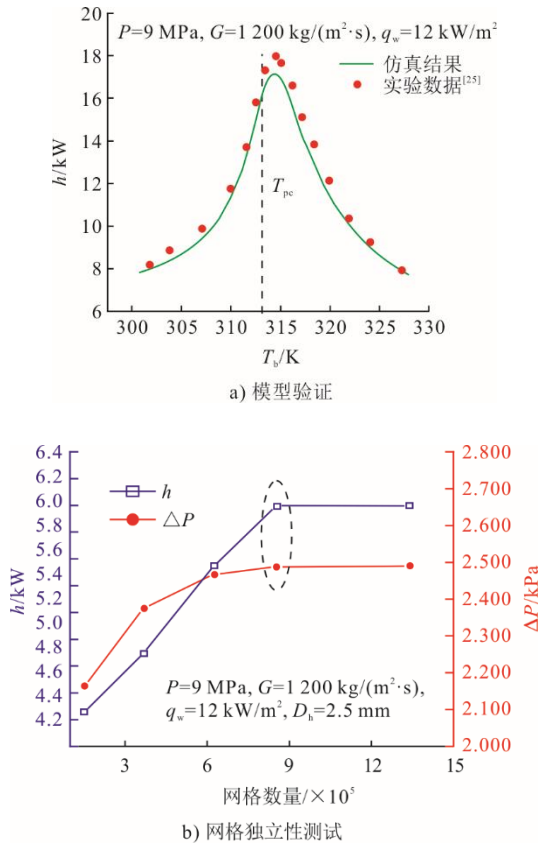


图 3 网格独立性测试及实验验证

Fig.3 Grid independence test and experimental verification

2 结果与讨论

2.1 不同通道内 S-CO₂ 传热性能的比较

对比 S-CO₂ 在 3 种不同类型通道内的传热性能, 在换热面积和运行工况保持相同的情况下, 讨论变截面系数 e 对热工水力性能的影响。对 3 种管型在同一工况下局部换热特性分析的基础上, 从场协同性、湍动能分布以及浮升力 3 个方面进一步讨论不同通道导致不同传热性能的原因。

为了定量地对 3 种类型管内的 S-CO₂ 传热性能进行比较, 定义评价因子为:

$$\eta = \frac{h_{Di/Ci} - h_U}{h_U} \times 100\% \quad (10)$$

$$\varphi = \frac{\Delta P_{Di/Ci} - \Delta P_U}{\Delta P_U} \times 100\% \quad (11)$$

式中: i 为对应通道在该系列中的序号; $h_{Di/Ci}$ 为 D_i 通道或 C_i 通道的总体换热系数; h_U 为通道 U 的总体换热系数; η 为 D_i 管或 C_i 管较 U 管的总体换热系数的相对增长率或减少率; $\Delta P_{Di/Ci}$ 为 D_i 通道或 C_i 通道的总压降; φ 为 D_i 通道或 C_i 通道较通道 U

的总压降的相对增长率或减少率。

图 4 给出了 S-CO₂ 在等截面半圆通道、渐扩型和渐缩型半圆通道内热工水力性能的比较。计算运行工况为 $P=8.1$ MPa, $m=0.000\ 353$ kg/s, $q_w=12$ kW/m², $T_{in}=313.15$ K。

图 4a)为不同通道内局部传热系数沿通道长度方向的分布。由图 4a)可以看出: 在约 $x=450$ mm 之前, 以均匀截面通道为基准, 渐扩型 (D_1 、 D_2 、 D_3 和 D_4) 通道的换热系数随着入口半径由大变小 ($r_1=0.7\sim 0.4$ mm) 逐渐增大, 且局部换热系数大于均匀截面通道, 表明在约 $x=450$ mm 前, 渐扩通道能够增强传热; 而渐缩型 (C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4) 通道的换热系数在约 $x=450$ mm 之前小于均匀截面通道, 且渐缩型通道的变截面系数 e 越大, 传热被削弱得越明显; 在约 $x=450$ mm 后, 除了 C_1 通道, 渐缩型通道局部换热系数均高于等截面通道和渐扩型通道, 且在 $x=580$ mm 附近, 除 C_2 、 C_3 、 C_4 外, 其余管型的局部换热系数均出现峰值, 且随后呈下降趋势。

图 4b)比较了 S-CO₂ 在不同通道内传热性能。图中横坐标为不同类型的通道, 左侧纵坐标为传热系数, 右侧纵坐标为以均匀型为对照, 变截面通道整体换热系数的相对增长率或减少率。由图 4b)可以明显看出: 所有的渐扩型通道总传热性能均弱于均匀截面通道, 其中传热被削弱最为严重的 D_2 通道传热系数较等截面通道减小了 11.54%; 反观渐缩型通道, 虽然 C_1 通道恶化了传热, 但是 C_2 、 C_3 和 C_4 通道均增强了传热, C_3 和 C_4 对应相对增长率达到 33.10% 和 39.93%。这与 Li 等人^[20]的研究结论有所不同, Li 等人的结论是渐扩管有效提高了整体换热性能, 而渐缩管削弱了传热能力。这可能是由于 Li 等人采用的是较大管径的圆管, 其热边界条件为恒壁温加热, 运行工况位于远离拟临界区 (即流体物性变化较小)。

为了综合评价, 引入流动传热综合性能评价因子 PEC^[26-27]:

$$PEC = \frac{h_{Di/Ci/U} / h_U}{\sqrt[3]{\Delta P_{Di/Ci/U} / \Delta P_U}} \quad (12)$$

以 U 管为基准计算 3 个通道的 PEC 值, 即 U 管 PEC 值为 1。当 PEC 的值大于 1 时, 表示在相同泵功耗下, 对应通道提高了传热, 说明该通道的综合性能优于 U 管; 当 PEC 的值小于 1 时, 则表明

对应通道削弱了传热,其某一方面性能或整体综合性能略差于 U 管,但并不意味着此类型通道完全不适用工程实际,在对泵耗功、压降要求不高但换热要求较高的地方根据实际情况也可以运用。

图 4c)为不同通道内 PEC 的比较结果。由图 4c)可以看出,渐扩型通道的 PEC 均小于 1,表明渐扩型通道削弱了流动传热性能。渐缩型通道中 C1 和 C4 的 PEC 小于 1, C2 和 C3 通道的 PEC 均大于 1,且 C3 通道的 PEC 为 1.12,综合性能达到了最佳。

此外,压降大小也是 PCHE 换热器在设计制造

过程中一个需要考虑的重要因素。图 4d)展示了各个通道内的压降和相对增长率。由图 4d)可以看到,8 种变截面通道的压降均高于均匀截面通道, C4 通道的压降增加最大,相较于等截面通道,增长了 208.78%。这与 Li 等人^[20]得出的跨临界加热条件下较大管径圆形渐扩管具有更小压降的结论不同,是因为绘制图 4 所用到的计算模型为小管径半圆管且运行工况及计算结果均未跨过拟临界点,因此两者结果并不相互冲突。

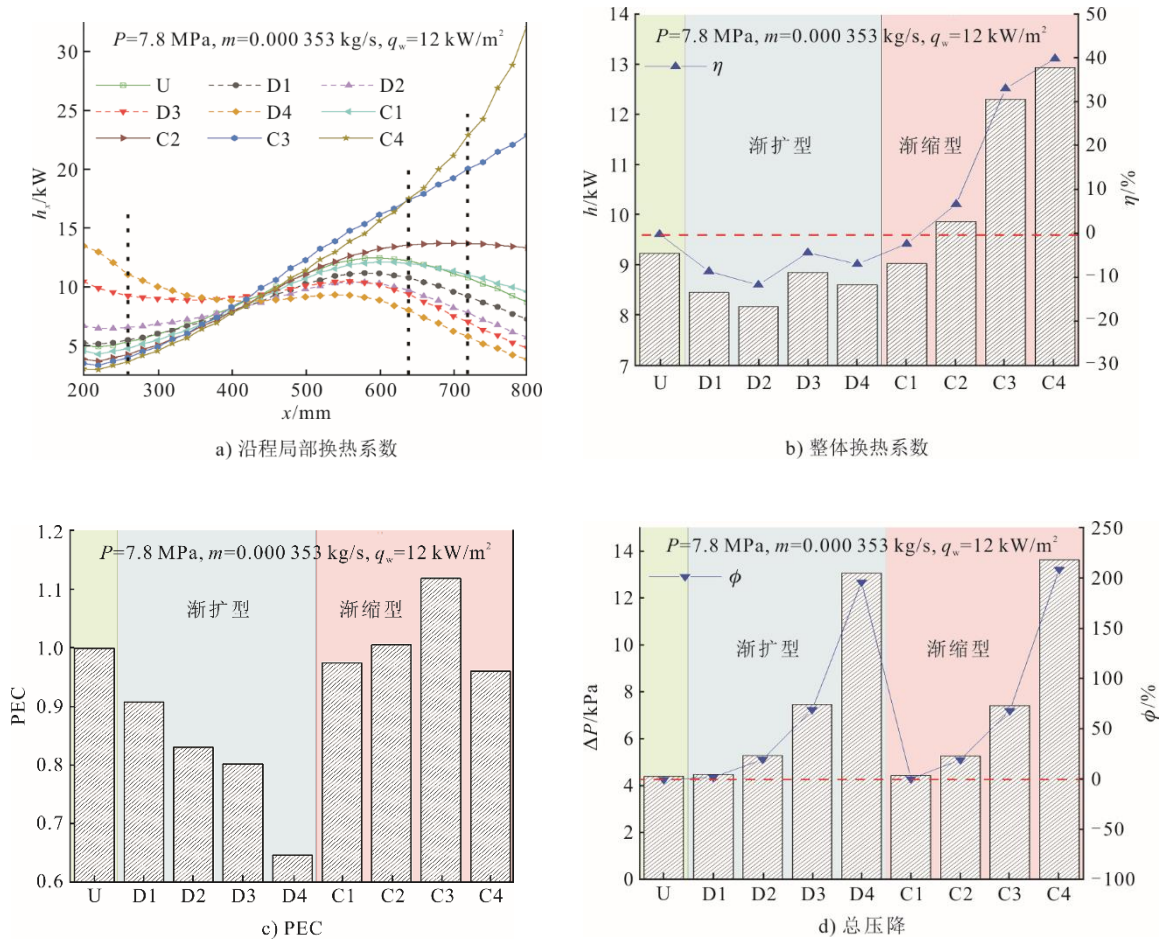


图 4 变截面系数对半圆管传热性能的影响

Fig.4 Effect of variable cross section coefficient on heat transfer performance of semicircle tubes

2.2 压力对 S-CO₂ 传热性能的影响

由前文分析可知,渐缩型 C3 通道($r_i:r_o=1.0:0.5$)的综合性能最优,因此选取 C3 通道进行压力对 S-CO₂ 传热性能影响的分析, C3 对应的渐扩型通道为 D3。图 5 给出了运行工况为 $m=0.000\ 353\ \text{kg/s}$, $q_w=12\ \text{kW/m}^2$, $T_{in}=313.15\ \text{K}$, 压力分别为 8.1、7.8、7.5 MPa 条件下, S-CO₂ 在 3 种半圆通道内的传热性能。

由图 5a)可以明显看出,在 8.1 MPa 压力下,3 种通道对应的换热系数最小,且随着压力的逐渐降低,3 种通道的换热系数均有不同程度提高,而 C3 通道则在靠近拟临界压力时发生了较为强烈的传热强化。从 PEC 角度分析(图 5b)),与换热系数得出的结论相同,随着压力从 $P=8.1\ \text{MPa}$ 变为 $P=7.5\ \text{MPa}$, C3 通道的 PEC 呈上升趋势,且最大值为 1.346。

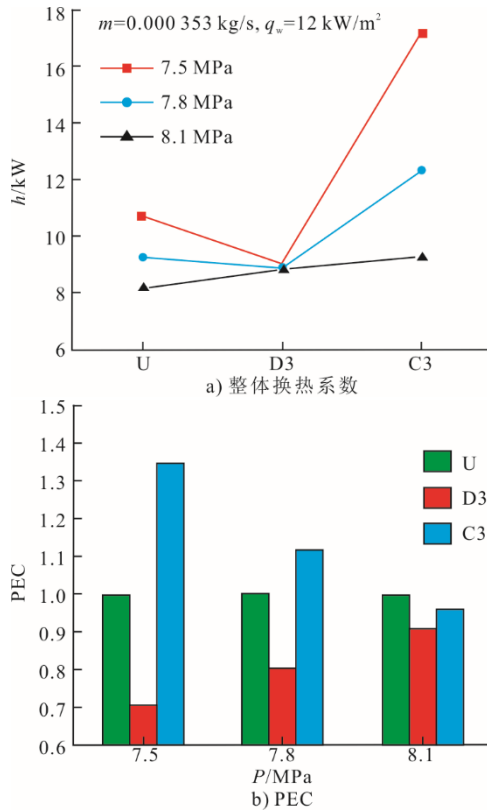


图5 压力对半圆管传热性能的影响
Fig.5 Effect of pressure on heat transfer performance of semicircle tubes

2.3 热通量对 S-CO₂ 传热性能的影响

在恒定质量流量 $m=0.000\ 353\ \text{kg/s}$ 、压力 $P=7.8\ \text{MPa}$ 和入口温度 $T_{in}=313.15\ \text{K}$ 条件下,图6显示了改变热通量对 S-CO₂ 在3种半圆通道内传热性能的影响。在热通量达到 $14\ \text{kW/m}^2$ 和 $16\ \text{kW/m}^2$ 时,传热段出口温度已跨越拟临界点,但与拟临界点非常接近。从图6a)可以明显看出,在 $12\ \text{kW/m}^2$ 热通量下,U和C3通道的换热系数均大于 $q_w=14\ \text{kW/m}^2$ 和 $q_w=16\ \text{kW/m}^2$ 条件,而D3通道相反,随着热通量的增大,其换热系数逐渐增大。从PEC角度分析(图6b)),与换热系数得出的结论相同,随着热通量从 $q_w=16\ \text{kW/m}^2$ 变为 $q_w=12\ \text{kW/m}^2$,C3通道的PEC呈上升趋势,且取得最大值1.119。

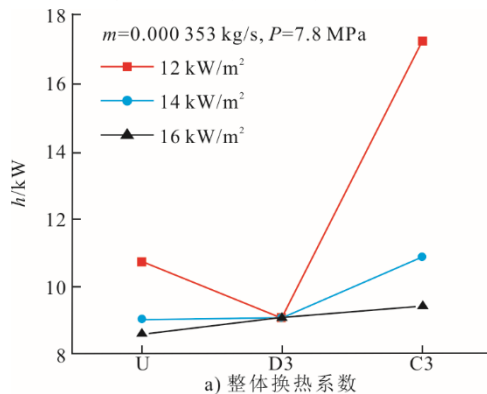


图6 热通量对半圆管传热性能的影响
Fig.6 Effect of heat flux on heat transfer performance of semicircle tubes

2.4 变截面通道引起传热强化或恶化原因的解释

为了进一步解释 S-CO₂ 在不同通道内传热性能的不同,选择图4a)中的3个特征截面 $x=260\ \text{mm}$ 、 $x=640\ \text{mm}$ 和 $x=720\ \text{mm}$ 进行分析。图7和图8给出了不同通道在特征截面处的温度和速度分布云图。

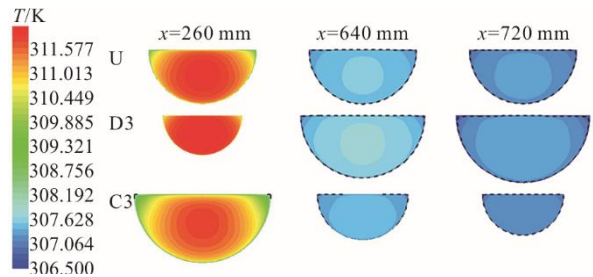


图7 特征截面温度分布
Fig.7 Temperature distribution in characteristic cross-section

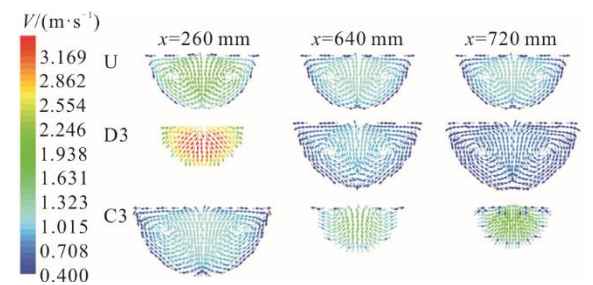


图8 特征截面速度分布
Fig.8 Velocity distribution in characteristic cross-section

从图7、图8可以看出,与等截面通道相比,变截面通道改变了截面处的速度和温度分布。过增元等^[28]提出了流动传热的场协同理论,认为在对流换热中,速度与温度场之间存在1个夹角,称为场协同角 θ ,当 $\theta < 90^\circ$ 时,协同角越小,对应的传热越好。场协同角 θ 定义为:

$$\cos \theta = \frac{\iiint_V \frac{\mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{T}}{|\mathbf{U}| \cdot |\nabla \mathbf{T}|} dV}{V} \quad (13)$$

式中： \mathbf{U} 为速度矢量， $\nabla \mathbf{T}$ 为速度梯度矢量。

场协同原理是解释传热增强机制的有效方法，已被用于分析 S-CO₂ 在微通道的传热性能。图 9 给出了利用 Fluent 求解出的不同通道内的体积平均场协同角 θ 。

图 9 可以看出，3 种通道体积平均场协同角 θ 均小于 90°，其中渐缩型通道 C3 的场协同角 θ 最小，而渐扩通道的最大。根据场协同原理，渐缩通道 C3 的传热性能最好，这与我们前面传热性能结果中得到结论吻合。也就是说，相比于等截面通道，变截面通道确实改变了 S-CO₂ 的场协同性，而渐缩型通道提高了 S-CO₂ 的场协同性，从而增强了传热。相反，渐扩型通道使得其场协同性变差，从而削弱了传热。场协同角的不同是 3 种通道内 S-CO₂ 传热性能差异的可能因素之一。

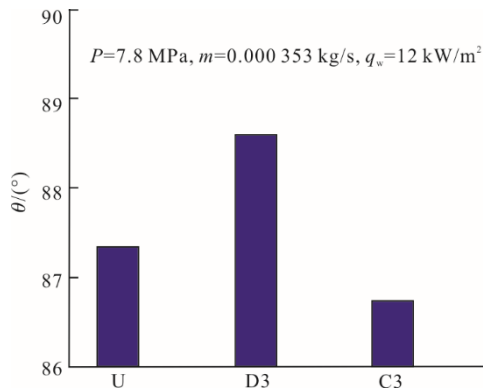


图 9 不同通道的体积平均场协同角
Fig.9 The volume average field coordination angle of different channels

湍动能 k 是表征湍流强度的主要指标之一，它与边界层动量和热量的运输有关，较大的湍动能增强流体的掺混，进而增强传热。图 10 展示了不同通道在所取的 3 个特征截面处湍动能 k 的分布。为了更加清晰看出湍动能的变化，图 10 同时给出了湍动能在径向的变化。由图 10 可以看出：在特征截面 $x=260$ mm 处，D3 的湍动能最大 C3 的湍动能最小，U 的湍动能介于二者之间，这与传热系数的分布对应（图 4a）；在特征截面 $x=640$ mm 处，C3 的湍动能已大于 U 和 D3，其传热系数也大于 U 和 D3；在特征截面 $x=720$ mm 处，C3 的湍动能也大于 U 和 D3。由上述分析可知，湍动能的变化与传热系数是相互对应的，这也是 S-CO₂ 在 C3 通道内

的换热性能优于 U 和 D3 的主要原因。

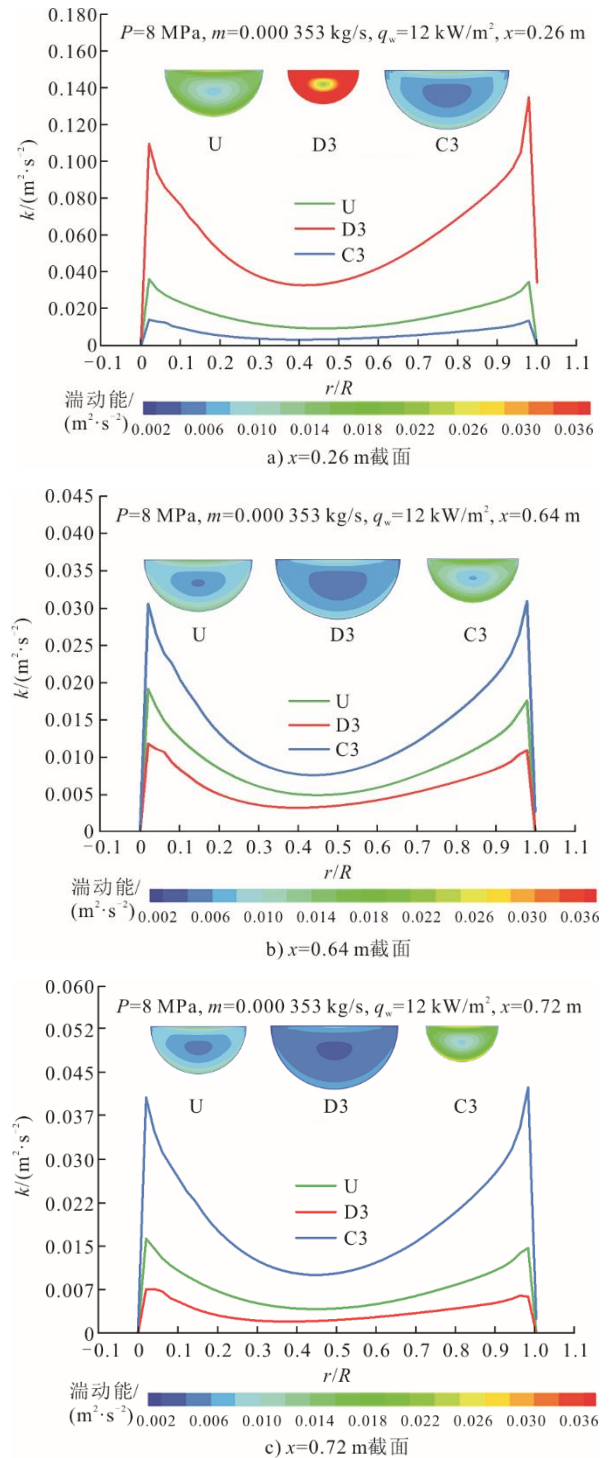


图 10 不同通道在 3 个特征截面处的湍动能分布
Fig.10 Distribution of turbulent kinetic energy in three characteristic cross-sections of different channels

3 结 论

本文通过建立数学和物理模型，研究了 S-CO₂ 在等截面半圆通道和不同变截面半圆通道内的热工水力性能。首先，对数值模型进行了验证，通过

与实验数据比较,数值结果与实验数据的平均相对误差为4.154%,验证了模型的准确性。其次,分析了变截面系数和压力对S-CO₂冷却传热性能的影响。最后,从且场协同原理以及湍动能分布角度对传热强化进行了解释,主要结论如下:

1) 在相同运行工况和换热面积下,相较于均匀截面半圆通道,变截面通道对S-CO₂的传热性能有明显影响,渐缩型通道可以有效地增强传热,而渐扩型通道削弱了传热。其中,渐缩通道C3($r_1:r_0=1.0:0.5$)的总换热系数相较于均匀型通道最大提高39.93%,其综合性能最优,PEC为1.12。

2) 相较于等截面通道,渐扩型和渐缩型变截面通道的压降均增大,C4通道的压降最大增加了208.78%。压力对流动传热性能有影响,压力从8.1 MPa降低到7.5 MPa,C3通道的PEC从0.959增大到1.346;而热通量的改变对传热性能也有影响,热通量从16 kW/m²降至12 kW/m²时,C3通道的PEC从0.934增大到1.119。

3) 在近临界压力和低热通量条件下,相较于等截面和渐扩型通道,渐缩型通道拥有更好的换热特性。

4) 变截面通道改变了速度和温度场的分布,从场协同原理和湍动能的分布角度合理解释了S-CO₂在不同通道内传热性能存在差异的原因。

[参考文献]

- [1] XU J L, LIU C, SUN E H, et al. Perspective of S-CO₂ power cycles[J]. *Energy*, 2019, 186: 115831.
- [2] 吴柯, 鲍中凯, 段伦博, 等. 燃煤 sCO₂ 布雷顿循环及其工质传热特性研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2020, 26(1): 9-21.
WU Ke, BAO Zhongkai, DUAN Lunbo, et al. Research progress on supercritical CO₂ Brayton cycle and its working fluid heat transfer characteristics for coal-fired power generation[J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26(1): 9-21.
- [3] 尹少军, 闫晨帅, 徐进良, 等. 水平管内超临界 CO₂ 冷却传热特性数值分析[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(增刊 1): 247-253.
YIN Shaojun, YAN Chenshuai, XU Jinliang, et al. Numerical analysis on heat transfer characteristics of supercritical CO₂ cooled in a horizontal tube[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(Suppl.1): 247-253.
- [4] 闫晨帅, 徐进良. 超临界压力 CO₂ 在水平圆管内流动传热数值分析[J]. *物理学报*, 2020, 69(4): 136-145.
YAN Chenshuai, XU Jinliang. Numerical analysis on flow and heat transfer of supercritical CO₂ in horizontal tube[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(4): 136-145.
- [5] 崔海亭, 黄夏洁, 张欣悦, 等. 直管套管内超临界二氧化碳热力性能研究[J]. *河北科技大学学报*, 2021, 42(4): 424-430.

- CUI Haiting, HUANG Xiajie, ZHANG Xinyue, et al. Research of thermal performance of supercritical carbon dioxide in straight pipe casing[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2021, 42(4): 424-430.
- [6] 庄晓如, 徐心海, 杨智, 等. 高温吸热管内超临界 CO₂ 传热特性的数值模拟[J]. *物理学报*, 2021, 70(3): 176-188.
ZHUANG Xiaoru, XU Xinhai, YANG Zhi, et al. Numerical investigation on heat transfer of supercritical CO₂ in solar receiver tube in high temperature region[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(3): 176-188.
- [7] 张海松, 朱鑫杰, 朱兵, 等. 浮升力和流动加速对超临界 CO₂ 管内流动传热影响[J]. *物理学报*, 2020, 69(6): 126-135.
ZHANG Haisong, ZHU Xinjie, ZHU Bingguo, et al. Effects of buoyancy and acceleration on heat transfer of supercritical CO₂ flowing in tubes[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(6): 126-135.
- [8] 吴楠楠, 韩楚君, 王佳乐. 印刷电路板式换热器的研究综述及应用[J]. *辽宁化工*, 2023, 52(2): 289-291.
WU Nannan, HAN Chujun, WANG Jiale. Research review and application of printed circuit heat exchanger[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2023, 52(2): 289-291.
- [9] 李洪, 任燕, 章立新, 等. 板式扩散焊矩形微通道换热器中 S-CO₂ 流动与传热特性的数值模拟[J]. *动力工程学报*, 2022, 42(12): 1174-1182.
LI Hong, REN Yan, ZHANG Lixin, et al. Numerical simulation of flow and heat transfer characteristics of S-CO₂ in plate diffusion welded rectangular micro-channel heat exchanger[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2022, 42(12): 1174-1182.
- [10] WANG H, WANG S, ZANG J, et al. Direct numerical simulation of the turbulent flow and heat transfer of supercritical CO₂ in a semicircular pipe[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 168: 120882.
- [11] PARK J H, KWON J G, KIM M H, et al. Experimental investigation of buoyancy effects on local heat transfer of supercritical pressure CO₂ in horizontal semicircular tube[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 164: 120496.
- [12] ZHONG S, REN Y, WU W, et al. Numerical study on the local heat transfer characteristic of supercritical CO₂ in semicircular/circular channel under cooling condition[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 209: 124098.
- [13] KRUIZENGA A, LI H, ANDERSON M, et al. Supercritical carbon dioxide heat transfer in horizontal semicircular channels[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2012, 134: 081802.
- [14] 徐婷婷. S-CO₂ Z 型印刷电路板式换热器的流动和传热性能分析及结构改进研究[D]. 济南: 山东大学, 2023: 1.
XU Tingting. Flow and heat transfer performance analysis and structural improvement of S-CO₂ Z type printed circuit heat exchanger[D]. Jinan: Shandong University, 2023: 1.
- [15] ANEESH A M, SHARMA A, SRIVASTAVA A, et al. Effects of wavy channel configurations on thermal-hydraulic characteristics of printed circuit heat exchanger (PCHE)[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 118: 304-315.

- [16] 刘晓凯, 成克用, 淮秀兰. 翼型通道换热器在燃机系统中流动换热性能的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 7160-7173.
LIU Xiaokai, CHENG Keyong, HUAI Xiulan. Numerical study on flow and heat transfer performance of airfoil channel heat exchanger in gas turbine system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7160-7173.
- [17] 杨光, 邵卫卫. 印刷电路板换热器结构及传热关联式研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(增刊 1): 13-26.
YANG Guang, SHAO Weiwei. Review of optimization and heat transfer correlations of printed circuit heat exchanger[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(Suppl.1): 13-26.
- [18] HUANG C, CAI W, WANG Y, et al. Review on the characteristics of flow and heat transfer in printed circuit heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 153: 190-205.
- [19] LIU G, HUANG Y, WANG J, et al. A review on the thermal-hydraulic performance and optimization of printed circuit heat exchangers for supercritical CO₂ in advanced nuclear power systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 133: 110290.
- [20] LI C, HAO J, WANG X, et al. Dual-effect evaluation of heat transfer deterioration of supercritical carbon dioxide in variable cross-section horizontal tubes under heating conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 183: 122103.
- [21] BAI C, QIU Y, LENG X L, et al. Diverging/converging small channel for condensation heat transfer enhancement under different gravity conditions[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020, 116: 104714.
- [22] KUMAR N, BASU D N. Role of buoyancy on the thermal hydraulic behavior of supercritical carbon dioxide flow through horizontal heated mini channel[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 168: 107051.
- [23] WANG H, LEUNG L K H, WANG W, et al. A review on recent heat transfer studies to supercritical pressure water in channels[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 142: 573-596.
- [24] 闫晨帅, 朱兵国, 张海松, 等. 超临界压力 CO₂ 在倾斜光管内传热特性数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 583-592.
YAN Chenshuai, ZHU Bingguo, ZHANG Haisong, et al. Numerical analysis on heat transfer characteristics of supercritical pressure CO₂ in inclined smooth tube[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 583-592.
- [25] DANG C B, HIHARA E. In-tube cooling heat transfer of supercritical carbon dioxide. Part 1. Experimental measurement[J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(7): 736-747.
- [26] LAU K T, KHAN S A, EZE C, et al. Numerical investigation on deteriorated heat transfer of supercritical water flowing upward in tubes with variable cross-sectional geometries[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 136: 106203.
- [27] WANG W, ZHANG Y, LEE K S, et al. Optimal design of a double pipe heat exchanger based on the outward helically corrugated tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 706-716.
- [28] 过增元. 换热器中的场协同原则及其应用[J]. 机械工程学报, 2003(12): 1-9.
GUO Zengyuan. Principle of field coordination in heat exchangers and its applications[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003(12): 1-9.

(责任编辑 李园)