

DOI: 10.19666/j.rlfed.202301001

考虑截面形状误差的超临界二氧化碳 微通道换热特性研究

张杰硕¹, 卢明剑², 孙玉伟^{2,3}, 危卫^{1,2}

(1.武汉理工大学交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063;
2.武汉理工大学国家水运安全工程研究中心, 湖北 武汉 430063;
3.武汉理工大学船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063)

[摘要] 针对印刷电路板式换热器由于加工误差以及服役过程中变形导致的实际换热性能与理论存在偏差问题, 利用超景深显微镜技术, 测量获取了实际微通道的形状特点, 对不同通道形状的微通道换热进行了数值模拟, 分析了通道形状对热工性能的影响, 综合考虑物性变化、通道形状变化的影响, 根据数值模拟结果获得了新的传热特性关联式, 可为评估实际服役的超临界二氧化碳印刷电路板式换热器的换热性能提供理论基础。

[关键词] 印刷电路板式换热器; 超临界二氧化碳; 通道形状; 传热关联式

[引用本文格式] 张杰硕, 卢明剑, 孙玉伟, 等. 考虑截面形状误差的超临界二氧化碳微通道换热特性研究[J]. 热力发电, 2023, 52(6): 35-44. ZHANG Jieshuo, LU Mingjian, SUN Yuwei, et al. Heat transfer characteristics of supercritical carbon dioxide microchannels considering the error of channel shape[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(6): 35-44.

Heat transfer characteristics of supercritical carbon dioxide microchannels considering the error of channel shape

ZHANG Jieshuo¹, LU Mingjian², SUN Yuwei^{2,3}, WEI Wei^{1,2}

(1.School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2.National Engineering Research Center for Water Transport Safety (WTs Center, MoST), Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
3.School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: In view of the deviation between the actual heat transfer performance and the theory of printed circuit plate heat exchanger due to processing errors and deformation during service, the shape characteristics of the actual micro-channel were measured and obtained by using ultra-depth of field microscope technology. The micro-channel heat transfer with different channel shapes was numerically simulated, and the influence of channel shape on thermal performance was analyzed. According to the results of numerical simulation, a new heat transfer characteristic correlation formula was obtained, which can provide a theoretical basis for evaluating the heat transfer performance of the actual service of supercritical carbon dioxide printed circuit plate heat exchangers.

Key words: printed circuit plate heat exchanger; supercritical carbon dioxide; channel shape; heat transfer correlation

超临界二氧化碳(S-CO₂)动力循环具有效率高、系统紧凑及灵活性高等优点^[1-3], 在包括核能^[4-5]、地热^[6]、太阳能^[7-8]、燃煤^[9]、沼气发电^[10]、回收余热^[11-13]等方面具有广阔的应用空间, 未来可取代或部分取代水蒸气朗肯循环, 实现高效热功转换。随

着 S-CO₂ 动力循环的研究不断发展, 为了追求更佳的热工水力性能, 各种类型的印刷电路板式换热器(PCHE)相继被提出。常见的通道类型为半圆形截面的直通通道和 Z 通道以及翼型通道。对于不同的通道类型, 学者们已经进行了大量研究来探究 PCHE

收稿日期: 2023-01-08 网络首发日期: 2023-03-01

基金项目: 工信部高技术船舶科研项目(工信部装函[2017]614号)

Supported by: High-Tech Ship Research Project of Ministry of Industry and Information Technology (MIIT[2017]614)

第一作者简介: 张杰硕(1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超临界二氧化碳热质转化, haym1tch@163.com。

通信作者简介: 危卫(1984), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为超临界二氧化碳热质转化, wei_wei@whut.edu.cn。

通道类型对热工水力性能的影响。

由于高耐用性和可制造性，Z形通道是传统型PCHE中使用最频繁的通道，然而Z形通道由于流动分离和弯曲点处的逆流而具有较高的压力损失。为了提高Z形PCHE的性能，Lee等人^[14]提出了一种插入直通道的新型PCHE，并研究了插入的直通道对传热和质量流量压降的影响。结果表明：0.5 mm和1 mm直通道的压降小于之字形通道，与波浪形通道相似；在传热特性方面，0.5 mm和1.0 mm直通道的传热特性与锯齿形通道非常相似，但优于波浪形通道。Kim等人^[15]对传统Z形通道PCHE模型进行了数值分析，并设计了一种新的翼型翅片PCHE，利用流线型翼型翅片来优化PCHE的热工水力性能。仿真结果表明，在翼型翅片PCHE中，单位体积的总传热率与锯齿形通道PCHE几乎相同，压降降低到Z形通道PCHE的1/20。Zhang等人^[16]的研究表明，Z通道PCHE中的逆流增强了场协同作用，减少了传热熵的产生，二次流动会提高锯齿形通道中速度梯度和温度梯度的协同作用，并扩大了壁面附近的熵产生，弯曲角度在110°~130°的锯齿形通道在热力学第一、第二定律方面均表现出最佳综合性能。Zhao等人^[17]进行了与Lee相同的研究，对插入直通道的Z形通道和带弧度的Z形通道进行了数值模拟，比较了其整体传热性能。结果表明，Z形通道的最大压降是带弧度Z形通道最小压降的2倍，而Z形插入4 mm直通道的表面传热系数更高，是Z形通道的1.2倍。Riahi等人^[18]对不同通道类型组合的PCHE进行了大量数值模拟，组合包括圆形、半圆形、圆矩形等通道截面形状，直通道与Z通道等通道类型，评估了各种组合类型的PCHE的热工水力性能。Wang等人^[19]对三维半圆直通道、Z通道PCHE中的流动和传热特性进行了数值模拟，并通过优化结构和操作参数进一步提高了热性能。结果表明，改型通道内产生的速度扰动和双涡二次流，加剧了流体混合，提高了场协同水平，有助于进一步提高整体传热系数。

传热特性关联式常用于换热器设计的计算，但对于不同形式的PCHE，其热工水力性能不尽相同，单一传热关联式并不能匹配。Chen等人^[20]制造了缩小的Z形通道PCHE，对PCHE的压降和传热特性进行了实验研究，基于实验数据开发了当前具有圆形拐角的Z形通道的新压降和传热关联式。Ruan等人^[21]研究了PCHE结构参数和通道形状对热工水力

性能的影响，并开发了计算直线和Z形PCHE中超临界甲烷的努塞特数 Nu 和范宁摩擦因子 f 的新关联式。结果表明：对于直型PCHE，影响最大的几何参数是板中2个相邻通道之间的间距和半圆的直径；对于锯齿形PCHE，倾斜角度对传热系数和压降都有影响，而节距数只影响压降。Chung等人^[22]对直通道和翼型通道PCHE进行了实验，结果表明，热平衡误差在3%以内，翼型PCHE比直型PCHE具有更高的传热性能和压降；同时对于翼型PCHE，开发了努塞特数 Nu 和摩擦因子 f 的新关联式，以预测实验数据，研究发现，热传递的最大误差为2%，压降的最大误差为8%。

尽管对于不同形式的PCHE，都有学者提出对应的传热关联式，但实际不论是加工还是服役过程中的影响，都会对微通道的形状造成一定改变。Yoon等人^[23]指出扩散连接后的PCHE各个通道的形状和尺寸并不均匀，在高温条件下操作期间PCHE的几何形状也有可能发生变形，基于设计参数的热工水力性能分析可能会导致结果不准确。本文考虑微通道形状改变带来的对换热性能影响，利用激光共聚焦显微镜与超景深显微镜技术，测量获取实际微通道的形状特点，对不同通道形状的微通道换热进行数值模拟，分析通道形状对热工性能的影响，综合考虑物性变化、通道形状变化的影响，根据数值模拟结果获得新的传热特性关联式。

1 PCHE刻蚀板通道形貌的测量

实际加工中由于PCHE芯体的刻蚀板由316L合金通过化学刻蚀得到，难免会带来一定的加工误差，导致微通道截面形状的改变以及通道表面存在一定粗糙度，同时在服役过程中微通道的微观形貌以及形状也会发生一定改变，这些因素都会对微通道的换热性能产生一定的影响。但由于化学刻蚀后得到的PCHE刻蚀板会进一步通过扩散焊的方式焊接在一起，难以对实际服役后的PCHE刻蚀板进行测量，因而本文选择以未服役的PCHE刻蚀板作为对象，将刻蚀板切割成窄小试验件进行试验测量。

同样，通过化学刻蚀工艺得到的通道形状与设计形状并不相同，且不同通道存在着不一样的加工误差。图1为由超景深显微镜所得同一刻蚀板不同通道的截面形状。由图1可以观察到，实际加工出来的微通道形状并非半圆形，相比之下在通道两侧的上边缘向通道内部弯曲，因此通道壁面轮廓更加

类似于以椭圆短轴为对称轴的一段椭圆优弧。通过对图像进行处理发现，通道深度与通道截面积几乎相等，而相比之下通道截面周长改变则较大。

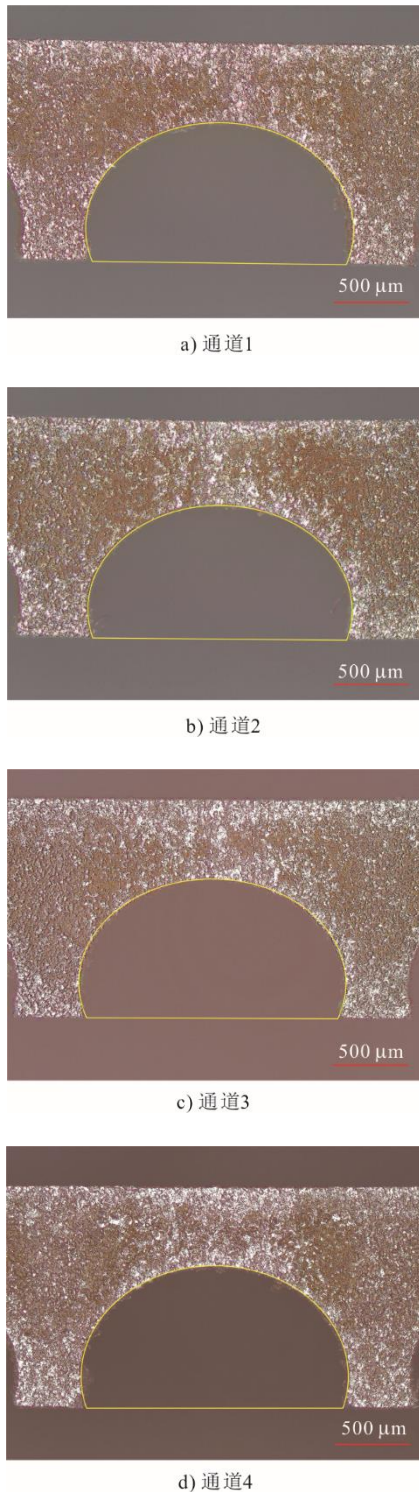


图 1 PCHE 刻蚀板通道截面形状
Fig.1 PCHE plate channel section shape

通过上述对微通道截面形状的分析，发现可将通道形状分为 3 类（图 2）：第 1 类为理论上

设计的标准半圆形通道；第 2 类为通过试验测量得到的大多数微通道截面形状；在此基础上，保持形状特点，也即通道深度与通道截面积不变，增加第 3 类形状，使得通道壁面轮廓为以椭圆长轴为对称轴的一段椭圆劣弧。后续主要对以上 3 种形状的微通道进行数值模拟计算。

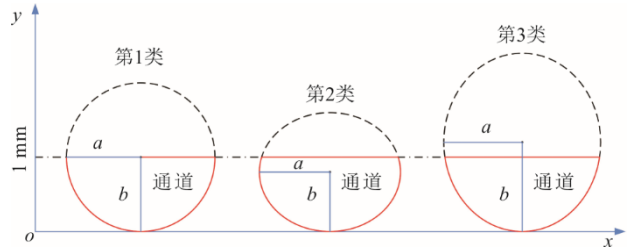


图 2 通道截面形状示意
Fig.2 Schematic diagram of channel section shape

2 数值模型与验证

2.1 几何模型及边界条件

图 3 为 PCHE 数值模拟的几何模型。冷热流体逆流进行换热。为排除冷热通道的进出口效应，在冷热流体的进口与出口段均对流体域有所延长，便于使入口流动充分发展并稳定出口流动。图 3 中同样展示了模型的截面示意以及相关形状尺寸。根据测量所得微通道截面形状的形状特点，通道深度 h 不变，通道上缘宽度 d 由通道截面形状唯一确定。

冷热通道出口设置为压力出口，出口压力大小设置为操作压力，入口设置为恒温连续流量入口。其中冷通道入口流量与温度保持不变，改变热通道入口流量及温度，具体边界条件参数见表 1。

在上述基础上，设计不同的微通道截面形状（表 2）进行数值模拟计算，进一步分析比较微通道截面形状对热工水力性能的影响。各微通道形状如图 4 所示，其中 ψ 为提出的形状因子，其定义为非半圆形通道与等面积半圆形通道的周长之比。

2.2 数值方法

本文计算选用的湍流模型为 SST $k-\omega$ 模型，离散算法为 SIMPLE，压力采用二阶离散格式，动量方程采用二阶迎风格式，湍动能和湍流耗散率采用一阶迎风格式，能量方程采用二阶迎风格式，此数值方法已经由 Liu 等人^[24]验证其正确性。

为保证数值模拟的计算精度，冷热流体域以及固体域均采用六面体网格划分，同时在冷热流体域与固体域的交界面处增加边界层网格。网格第 1 层

厚度为 0.01 mm，增长率为 1.2，得到总体网格正交质量在 0.7 以上，如图 5 所示。调整网格数量进行数值模拟计算，以计算所得总传热量与压降指标来

验证网络的独立性，结果如图 6 所示。由图 6 可见，当网格数量大于 1 587 840 时，微通道总换热量与总压降变化量均已经很小，能够满足计算需要。

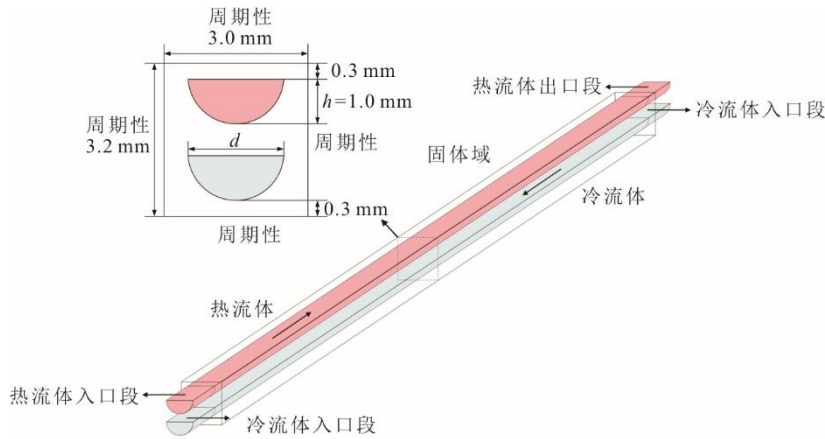


图 3 几何模型示意
Fig.3 Geometric model diagram

表 1 边界条件参数
Tab.1 Boundary condition parameter

项目	数值
操作压力/MPa	8.8
热通道入口 Re	5 000、10 000、15 000、20 000、25 000
冷通道入口流量/($kg \cdot s^{-1}$)	0.000 576 3
热通道入口温度/K	318.7、313.7、318.7、323.7、318.7
冷通道入口温度/K	297.15

表 2 不同的形状参数
Tab.2 Different shape parameters

形状序号	通道截面积 S/mm^2	横轴 a/mm	竖轴 b/mm	周长 L/mm	ψ
1	$\pi/2$	0.934 6	0.7	4.903 2	0.953 6
2		0.950 6	0.8	4.998 1	0.972 1
3		0.973 6	0.9	5.079 4	0.987 9
4		1.000 0	1.0	5.141 6	1.000 0
5		1.027 9	1.1	5.191 0	1.009 6
6		1.056 5	1.2	5.233 3	1.017 8

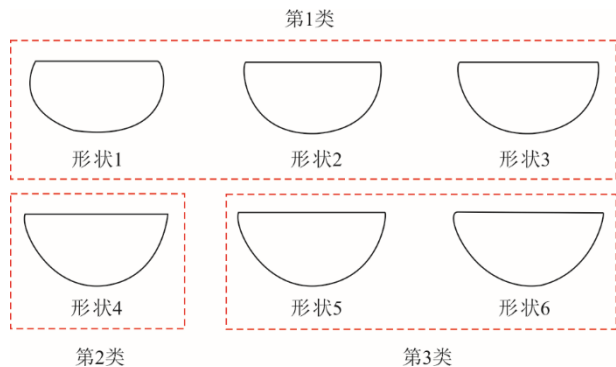


图 4 不同微通道截面形状
Fig.4 Different microchannel cross section shapes

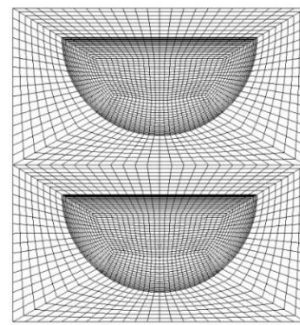


图 5 截面网格示意
Fig.5 Sectional grid diagram

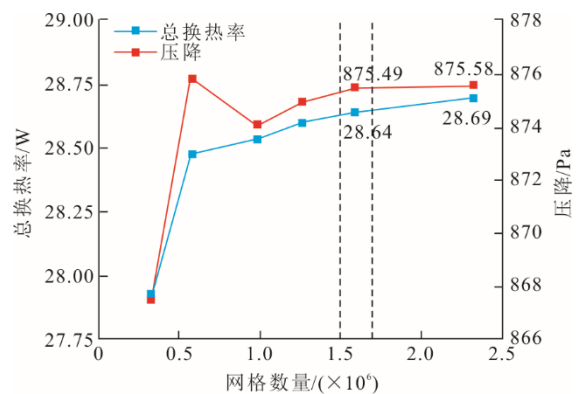


图 6 网格独立性验证
Fig.6 Grid independence verification

2.3 试验验证

搭建 S-CO₂ 换热器热工水力性能的试验平台，进行 PCHE 换热特性试验，采集微通道进出口的温度与压力变化数据，选取入口雷诺数跨度为 4 500 至 15 000 的 5 组实验数据^[25]作为对照，工况见表 3。

表 3 试验工况
Tab.3 Test condition

项目	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
操作压力/MPa	9.50	9.00	8.80	8.95	8.78
热侧入口温度/K	328.70	312.02	318.70	313.72	312.85
冷侧入口温度/K	289.15	298.15	297.15	298.15	297.15
热侧出口温度/K	317.46	307.71	307.88	311.28	307.88
热侧流量/(g·s ⁻¹)	0.463 5	0.238 0	0.307 3	0.321 4	0.361 1
冷侧流量/(g·s ⁻¹)	0.228 2	0.235 2	0.576 3	0.235 9	0.605 3

以试验工况条件进行数值模拟，所得数值模拟结果与实验结果对比如图 7 所示。由图 7 可以观察到：在不同的操作压力、入口温度与入口流量下，数值模拟得到的出口热力学温度与试验测量值能较好吻合，误差在仅 1 K 左右，最大相对误差为 0.37%；即使在热侧进出口温差较小的工况下（工况 4），数值模拟的结果与试验结果也十分接近，可以验证数值模拟的可靠性及稳定性。

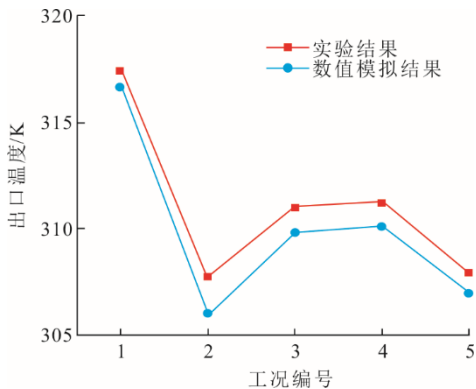


图 7 热侧出口温度验证对比
Fig.7 Hot side outlet temperature validation

3 通道截面形状对换热性能的影响

据表 2 及图 4 所示通道截面形状，分别对不同入口雷诺数与温度下不同截面形状的微通道换热进行数值模拟，以探究通道截面形状对微通道换热性能的影响。

3.1 不同热通道入口雷诺数

3.1.1 局部换热性能

热通量又称热流密度，表示单位时间内通过单位面积的热能，定义为：

$$q = h\Delta t \quad (1)$$

式中： h 为表面传热系数； Δt 为流体与壁面之间的温差。

为探究不同截面形状的微通道壁面热通量分布情况，沿程选取 $x=60、120、180、240$ mm 4 处位置，分别提取热通道上侧、下侧壁面周向热通量分布取

平均值进行比较，周向提取数据示意如图 8 所示。

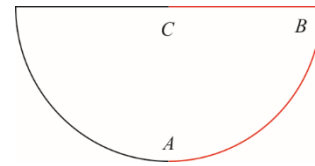


图 8 周向提取数据示意
Fig.8 Diagram of circumferential extraction data

图 9 为热通道入口雷诺数 $Re=5\ 000、15\ 000$ 时的 AB 段热通量分布对比。当雷诺数较小 ($Re=5\ 000$) 时，微通道最低点 A 与上侧边缘点 B 处热通量均较小，不同截面形状的微通道周向热通量最大值均出现在 AB 段中间位置壁面处；在靠近 A 点的位置，截面形状 Ψ 值大的微通道热通量较大，而在远离 A 点的位置，截面形状 Ψ 值小的微通道热通量远大于 Ψ 值大的，特别在最大热通量点处。当雷诺数较大 ($Re=15\ 000$) 时，不同截面形状的微通道沿 AB 段的热通量分布呈现下降的趋势，即微通道最低点 A 处热通量最大， B 处热通量最小；同样的，在靠近 A 点的位置，截面形状 Ψ 值大的微通道热通量较大，而在 B 点以及靠近 B 点的位置，截面形状 Ψ 值小的微通道热通量远大于 Ψ 值大的。

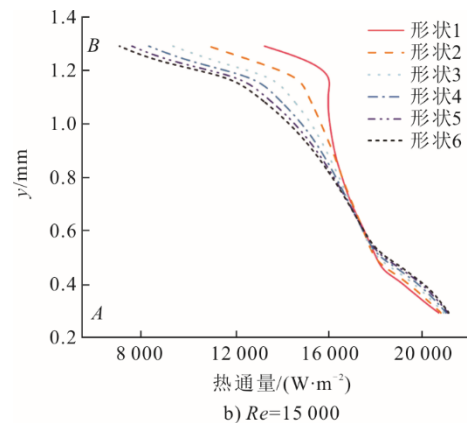
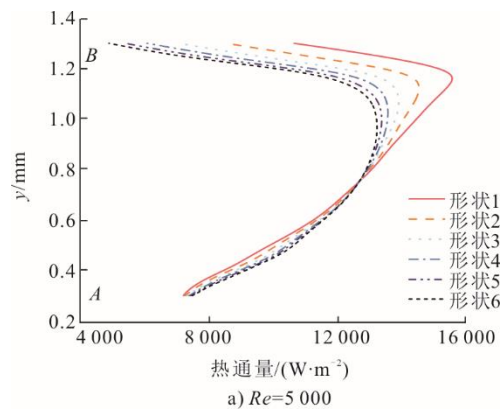


图 9 不同雷诺数下微通道 AB 段周向热通量分布
Fig.9 Circumferential heat flux distribution in AB section of microchannel with different Reynolds numbers

图 10 为热通道入口雷诺数 $Re=5\ 000$ 、 $15\ 000$ 时的 BC 段热通量分布对比。当雷诺数较小 ($Re=5\ 000$) 时, 微通道壁面热通量在靠近壁面边缘 B 点时急剧下降, 截面形状 Ψ 值大的微通道在 C 点处的热通量始终大于 Ψ 值小的, 所有微通道上壁面的热通量最大值均出现在与 C 点距离大致相同的位置。当雷诺数较大 ($Re=15\ 000$) 时, 不同截面形状的微通道 BC 段热通量的分布情况呈相同的趋势, 自 C 点向 B 点热通量逐渐减小, 且在 B 点附近急剧下降, 但总的来说不同形状微通道的热通量差距不大。

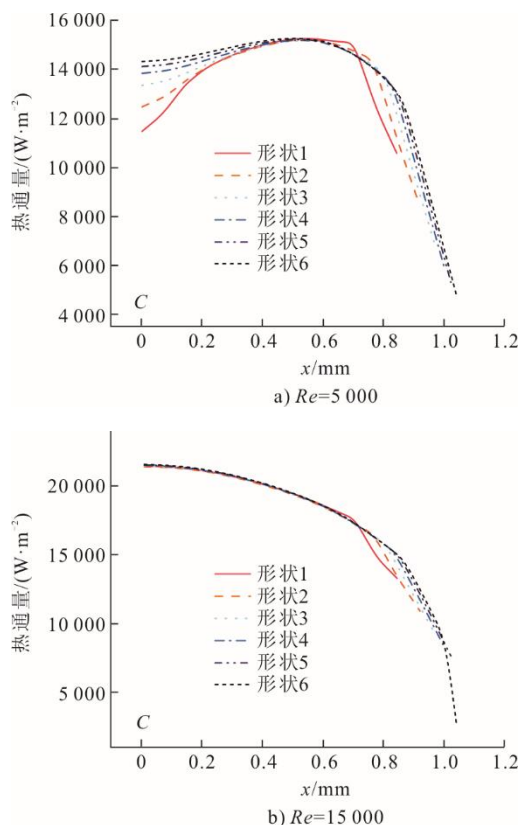


图 10 不同雷诺数下微通道 BC 段周向热通量分布
Fig.10 Circumferential heat flux distribution in BC section of microchannel with different Reynolds numbers

3.1.2 整体换热性能

不同入口雷诺数下不同截面形状的微通道总换热率与总传热系数对比分别如图 11 和图 12 所示。对于不同截面形状, Ψ 值较大的具有较小的水力直径, 因而在相同的入口雷诺数下, Ψ 值较大的微通道质量流量相对较大, 因而在图 11 中不同的入口雷诺数下, 截面形状 Ψ 值较大的微通道总传热率相比之下较大; 但由图 12 可知, 在质量流量相比之下较小的情况下, 截面形状 Ψ 值较小的微通道的总传热系数反而较 Ψ 值较大的更大, 说明了截面形

状 Ψ 值较小的微通道具有较好的传热性能。

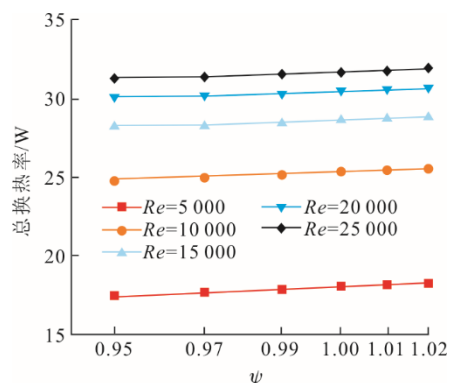


图 11 不同截面形状微通道总传热率对比
Fig.11 Comparison of total heat transfer rates with different section shapes

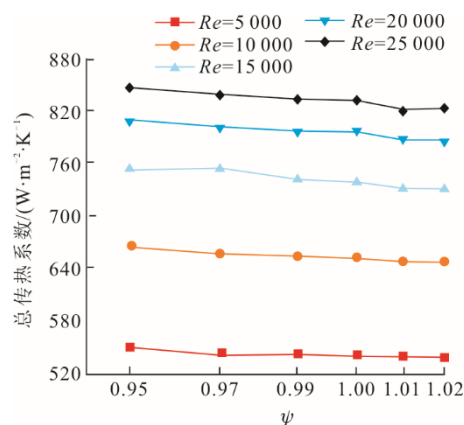


图 12 不同截面形状微通道总传热系数对比
Fig.12 Comparison of overall heat transfer coefficient with different section shapes

G_v 是对换热器内流动与换热的综合评价, 定义见式(2), 以其来进一步评价不同截面形状微通道的总体性能。不同截面形状微通道 G_v 评价标准对比如图 13 所示。

$$G_v = \frac{Nu}{RePr^{1/3} f^{1/3}} \quad (2)$$

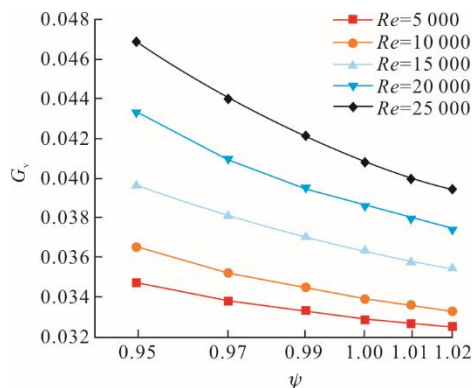


图 13 不同截面形状微通道 G_v 对比
Fig.13 Comparison of G_v with different section shapes

由图 13 可以更加直观地观察到，在不同的入口雷诺数下，截面形状 Ψ 值较小的微通道都普遍具有更好的流动与换热性能，且随着雷诺数的增加，所带来的性能提升越明显。

为方便后续传热特性关联式的拟合，将 Nu 与 f 随形状因子 Ψ 的变化情况分别进行对比，结果如图 14、图 15 所示。由图 14、图 15 可以发现，与 G_v 评价标准类似， Nu 与 f 均随着 Ψ 增加而下降，且随着 Nu 的增加，下降幅度稍有增加，可认为在其他参数相同的条件下， Nu 与 f 与形状因子 Ψ 正相关。

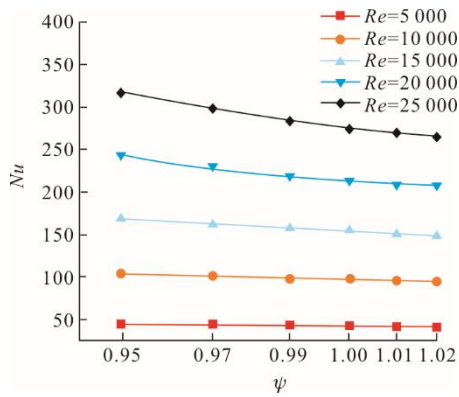


图 14 Nu 随形状因子 Ψ 变化
Fig.14 Nu varies with the shape factor

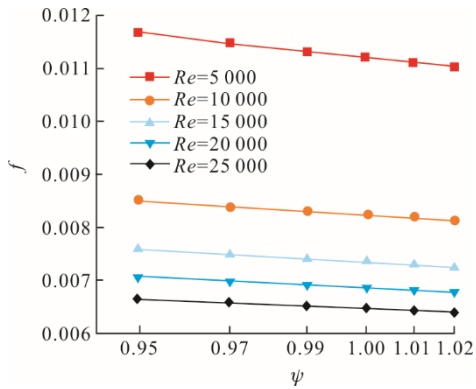


图 15 f 随形状因子 Ψ 变化
Fig.15 f varies with the shape factor

3.2 不同热通道入口温度

3.2.1 局部换热性能

图 16 为不同入口温度下微通道 AB 段周向热通量分布。由图 16 可见：与通道流量不同，改变热通道入口温度对微通道周向热通量分布形式基本没有影响；以 AB 段为例，微通道最低点 A 处热通量最大， B 处热通量最小，在远离 A 点的位置，截面 Ψ 值小的微通道热通量更大。可见，提高热通道入口温度能够有效地增加微通道壁面的热通量。

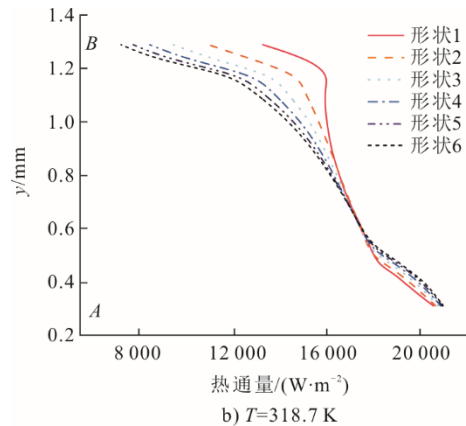
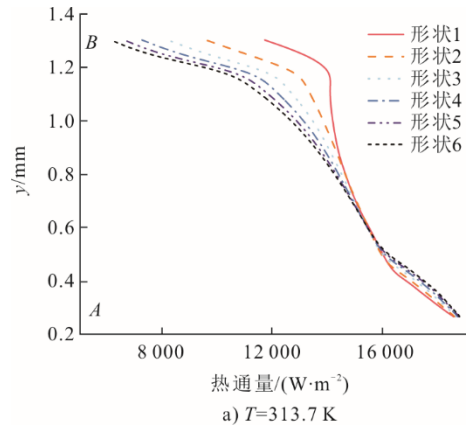


图 16 不同入口温度下微通道 AB 段周向热通量分布
Fig.16 Circumferential heat flux distribution in microchannel AB section with different inlet temperatures

3.2.2 整体换热性能

不同热通道入口温度下不同截面形状的微通道 Nu 与 f 对比分别如图 17、图 18 所示。由图 17、图 18 可见，不同的热通道入口温度下， Ψ 值较小的微通道具有更大的 Nu 与 f ，且不同的温度下 Nu 与 f 随形状因子 Ψ 的变化趋势与幅度一致，但相较之下 Nu 较 f 受形状因子影响较大。

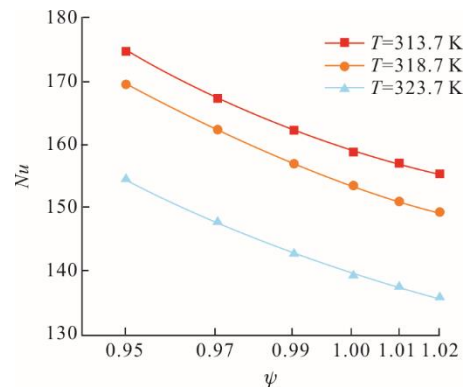


图 17 Nu 随形状因子 Ψ 变化
Fig.17 Nu varies with the shape factor

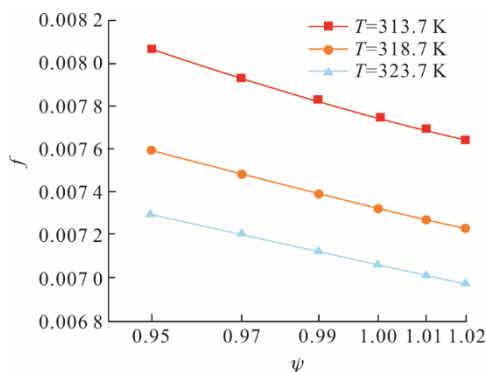


图 18 f 随形状因子 ψ 变化
Fig.18 f varies with the shape factor

4 传热特性关联式的修正

在换热器传热壁面换热特性关联式的计算中,需要用到诸多流体工质的物性参数,如密度、黏度、比热容、导热系数。这些物性通常与流体的温度有密切关系,与压力的关系较小。当流体在换热过程中温度变化不大(流体与固体表面温差较小)时,可将流体视为常物性;而在实际换热的过程中,流体的物性可能会随温度变化(流体与固体表面温差较大)而发生很大变化。这些变化会影响改变传热壁面附近的速度与温度梯度,从而影响到壁面附近的流动传热性能(f 与 j 的值)。此时将流体视为常物性的计算结果会产生明显偏差,因而需要进行修正。同时由于加工精度造成的形状误差与服役过程中的损耗及变形,实际微通道换热性能也会发生一定改变,使用相同传热特性关联式进行计算难免会产生误差,因此需要将通道形状及通道表面粗糙度的影响考虑进传热特性关联式并进行一定修正。

4.1 物性变化影响的修正

对于气体与液体,受温度变化影响较大的物性有所不同:气体的密度、黏度与导热系数随温度发生很大变化;液体与温度密切相关的物性参数则是黏度,且变化程度一般较大。因此大多理论与实验表明,在给定 Re 下气体与液体的物性参数随温度变化影响可分别表述为:主流区平均温度 T_b 与近壁面温度 T_w 之比 T_b/T_w 的幂函数,主流区平均流体黏度 μ_b 与近壁面流体黏度 μ_w 之比 μ_b/μ_w 的幂函数^[26]。

对于超临界状态的二氧化碳,其兼具气体于液体的特性,同时物性变化又与单纯的气体、液体有所不同,其物性随温度变化的影响更加复杂,因而更加需要对传热特性关联式加以修正。二氧化碳的密度与黏度随温度呈现相同的变化形式,而比热容则呈现不同的变化形式,因此如参考气体与液体物性变化影响的修正方法对 $S\text{-CO}_2$ 传热特性关联式进

行修正。根据二氧化碳各物性的变化形式,则可主要分为对密度与黏度、比热容 2 方面。 $S\text{-CO}_2$ 各物性变化的影响可表示为幂函数形式:

$$\frac{Nu}{Nu_{cp}} = \frac{j}{j_{cp}} = \left(\frac{\rho_b}{\rho_w} \right)^m \left(\frac{C_{pb}}{C_{pw}} \right)^n \quad (3)$$

式中:下标 cp 表示恒物性下的特性参数;指数 m 与 n 随不同流动情况取不同的值。

吴强^[25]认为, Nu 与 Re 、 Pr 、主流区密度与近壁区密度之比、主流区比热与近壁区比热之比的关系为多元指数函数,拟合得到 $3000 < Re < 30000$ 范围内 $S\text{-CO}_2$ 的传热特性关联式(式(4)),误差大多在 10% 以内。

$$Nu = 0.0112 Re^{0.9285} Pr^{0.6} \left(\frac{\rho_b}{\rho_w} \right)^{-0.1} \left(\frac{C_{pb}}{C_{pw}} \right)^{0.713} \quad (4)$$

本文提出一种新的物性变化影响的修正方式,考虑到 $PCHE$ 中热通道内压降远小于操作压力,将传热特性关联式中计算 Re 、 Pr 所需 $S\text{-CO}_2$ 物性参数以及 Nu 视为关于局部平均温度的单值函数,则可以进出口平均温度范围内各项数据的积分平均值来代表整体平均水平以消除物性随温度变化而带来的换热性能影响。在实际数值模拟计算中沿通道进口至出口不同位置取多个截面,相邻截面位置之间各数据视为线性变化,进一步求得总体的近似积分平均值(式(5)—式(9))。

$$Nu = \int_{T_{out}}^{T_{in}} Nu(T) dT = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Nu_i + Nu_{i+1}}{T_i - T_{i+1}}}{T_{in} - T_{out}} \quad (5)$$

$$\rho = \int_{T_{out}}^{T_{in}} \rho(T) dT = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\rho_i + \rho_{i+1}}{T_i - T_{i+1}}}{T_{in} - T_{out}} \quad (6)$$

$$\mu = \int_{T_{out}}^{T_{in}} \mu(T) dT = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\mu_i + \mu_{i+1}}{T_i - T_{i+1}}}{T_{in} - T_{out}} \quad (7)$$

$$C_p = \int_{T_{out}}^{T_{in}} C_p(T) dT = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_{pi} + C_{pi+1}}{T_i - T_{i+1}}}{T_{in} - T_{out}} \quad (8)$$

$$\lambda = \int_{T_{out}}^{T_{in}} \lambda(T) dT = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{T_i - T_{i+1}}}{T_{in} - T_{out}} \quad (9)$$

式中: Nu_i 、 ρ_i 、 μ_i 、 C_{pi} 、 λ_i 分别为第 i 个截面处的对应参数平均值,当 $i=1$ 或 n 时分别对应进口与出口。

4.2 通道形状变化影响的修正

参考第一种物性变化影响的修正方式,将传热

通道形状变化对传热性能的影响表示为形状因子的幂函数形式:

$$\frac{Nu}{Nu_{sc}} = \frac{j}{j_{sc}} = \Psi^m \quad (10)$$

$$\frac{f}{f_{sc}} = \Psi^n \quad (11)$$

式中: 下标 sc 表示通道形状为半圆形(semi-circle); m 、 n 随流动情况取不同的值。

4.3 传热关联式拟合

在综合考虑物性变化与通道形状变化的影响下, S-CO₂ 传热特性关联式的基本形式位:

$$Nu = a\Psi^b Re^c Pr^d \quad (12)$$

$$f = a\Psi^b Re^c \quad (13)$$

将式(12)分别左右取对数展开, 并对数值模拟所得各项数据进行多元线性回归拟合, 分别得到 $5\ 000 < Re < 25\ 000$ 范围内 R^2 为 0.999 6 与 0.995 8 的传热关联式 (式(14)、式(15))。

$$Nu = 0.042\ 1\Psi^{-2.12} Re^{0.934} Pr^{-0.44} \quad (14)$$

$$f = 0.113\ 2\Psi^{-0.68} Re^{-0.287} \quad (15)$$

图 19—图 22 为有无通道截面形状修正下拟合所得传热关联式的计算结果与数值模拟结果的对比。

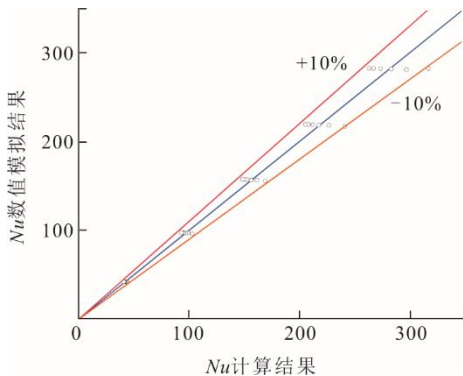


图 19 无修正 Nu 关联式拟合结果
Fig.19 Nu correlation without correction

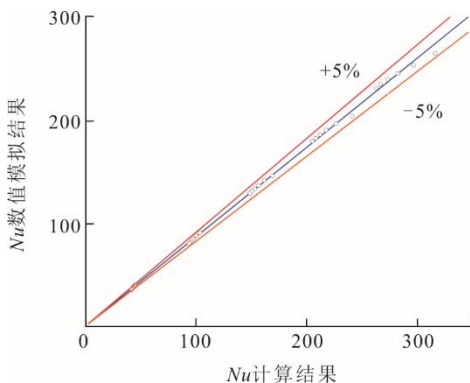


图 20 有修正 Nu 关联式拟合结果
Fig.20 Nu correlation with correction

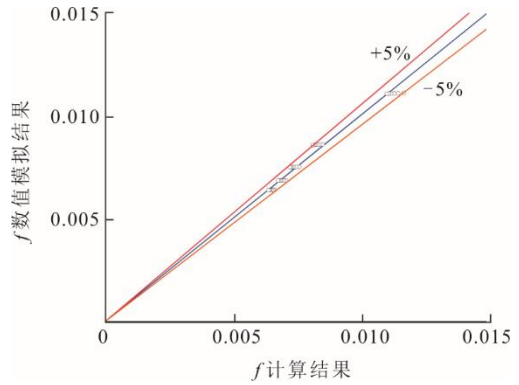


图 21 无修正 f 关联式拟合结果
Fig.21 f correlation without correction

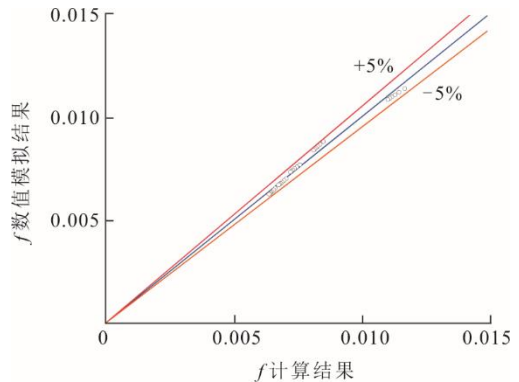


图 22 有修正 f 关联式拟合结果
Fig.22 f correlation with correction

由图 19—图 22 可以看到: 当不考虑通道截面形状影响时, 拟合得到 Nu 关联式与数值模拟结果相对误差基本在 10% 以内; 而当加入形状修正后, 拟合效果有显著提升, 关联式拟合结果与数值模拟结果十分接近, 最大相对误差不超过 5%。相比之下, 无形状修正的 f 关联式要较 Nu 关联式效果更好, 但加入形状修正后拟合效果同样也有所提升。

5 结 论

1) 利用超景深显微镜与激光共聚焦显微镜分别测量了实际加工 PCHE 刻蚀板的微通道截面形状以及通道表面粗糙度, 并根据试验测量结果提取了实际微通道截面形状特点。

2) 根据试验测量得到的微通道截面形状特点, 设计多组不同截面形状的微通道进行数值模拟; 在试验测量通道表面粗糙度的基础上, 设计多组不同粗糙度的工况进行数值模拟, 分别得到了不同热通道入口雷诺数与入口温度下通道截面形状对微通道热工性能的影响。

3) 根据试验测量的微通道截面形状结果提出了形状因子, 并在数值模拟基础上利用形状因子进行修正, 提出了新的关联式, 预测效果有显著提高。

[参考文献]

- [1] 中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[J]. 资源再生, 2021(10): 52-56.
Opinions of the Central Committee of the Communist Party of China and the State Council on the complete, accurate and comprehensive implementation of the new development concept to do a good job in carbon peak and carbon neutrality[J]. Resource Recycling, 2021(10): 52-56.
- [2] 徐进良, 刘超, 孙恩慧, 等. 超临界二氧化碳动力循环研究进展及展望[J]. 热力发电, 2020, 49(10): 1-10.
XU Jinliang, LIU Chao, SUN Enhui, et al. Review and perspective of supercritical carbon dioxide power cycles[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 1-10.
- [3] 乔加飞, 李卓, 廖海燕, 等. 超临界二氧化碳循环混合工质热力学性质研究进展[J]. 热力发电, 2022, 51(9): 1-10.
QIAO Jiafei, LI Zhuo, LIAO Haiyan, et al. Research progress on thermodynamic properties of supercritical carbon dioxide mixture[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(9): 1-10.
- [4] LINARES J I, CANTIZANO A, MORATILLA B Y, et al. Supercritical CO₂ Brayton power cycles for DEMO (demonstration power plant) fusion reactor based on dual coolant lithium lead blanket[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 76: 271-283.
- [5] 黄彦平, 王俊峰. 超临界二氧化碳在核反应堆系统中的应用[J]. 核动力工程, 2012, 33(3): 21-27.
HUANG Yanping, Wang Junfeng. Applications of supercritical carbon dioxide in nuclear reactor system[J]. Nuclear Power Engineering, 2012, 33(3): 21-27.
- [6] CHEN H, GOSWAMI D Y, STEFANAKOS E K. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 3059-3067.
- [7] PADILLA R V, TOO Y C S, BENITO R, et al. Exergetic analysis of supercritical CO₂ Brayton cycles integrated with solar central receivers[J]. Applied Energy, 2015, 148: 348-365.
- [8] 吴毅, 王佳莹, 王明坤, 等. 基于超临界 CO₂ 布雷顿循环的塔式太阳能集热发电系统[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(5): 108-113.
WU Yi, WANG Jiaying, WANG Mingkun, et al. A towered solar thermal power plant based on supercritical CO₂ Brayton cycle[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(5): 108-113.
- [9] MECHERI M, LE MOULLEC Y. Supercritical CO₂ Brayton cycles for coal-fired power plants[J]. Energy, 2016, 103: 758-771.
- [10] KIM M S, AHN Y, KIM B, et al. Study on the supercritical CO₂ power cycles for landfill gas firing gas turbine bottoming cycle[J]. Energy, 2016, 111: 893-909.
- [11] TIMOTHY J. Initial test results of a megawatt-class supercritical CO₂ heat engine[C]. The 4th International Symposium-Supercritical CO₂ Power Cycles, Pennsylvania, USA, 2014.
- [12] 张旭伟, 白文刚, 吴家荣, 等. 采用超临界二氧化碳动力循环回收燃气轮机排气余热的系统优化研究[J]. 热力发电, 2021, 50(5): 43-50.
ZHANG Xuwei, BAI Wengang, WU Jiarong, et al. Optimization of system using supercritical carbon dioxide power cycle to recover waste heat from gas turbine exhaust[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(5): 43-50.
- [13] 孙瑞强, 杨凯旋, 王博, 等. 超临界二氧化碳燃煤发电系统低温余热回收的技术经济性优化[J]. 热力发电, 2020, 49(10): 120-129.
SUN Ruiqiang, YANG Kaixuan, WANG Bo, et al. Economic optimization of low-temperature waste heat recovery in supercritical carbon dioxide coal-fired power system[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 120-129.
- [14] LEE S Y, PARK B G, CHUNG J T. Numerical studies on thermal hydraulic performance of zigzag-type printed circuit heat exchanger with inserted straight channels [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123: 1434-1443.
- [15] KIM D E, KIM M H, CHA J E, et al. Numerical investigation on thermal-hydraulic performance of new printed circuit heat exchanger model[J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238(12): 3269-3276.
- [16] ZHANG H, GUO J, HUAI X, et al. Studies on the thermal-hydraulic performance of zigzag channel with supercritical pressure CO₂[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2019, 148: 104-115.
- [17] ZHAO Z, ZHOU Y, MA X, et al. Effect of different zigzag channel shapes of PCHes on heat transfer performance of supercritical LNG[J]. Energies, 2019, 12(11): 1-15.
- [18] RIAHI S, BELUSKO M, LAU T, et al. Impact of different types of channels on thermo-hydraulic performance of a sodium-sCO₂ printed circuit heat exchanger for supercritical Brayton cycle applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 216: 119098.
- [19] WANG J, MA Y, MA T, et al. Design and thermal-hydraulic analysis of a printed circuit heat exchanger for ADS applications[J]. Energy, 2022, 256: 124598.
- [20] CHEN M, SUN X, CHRISTENSEN R N, et al. Pressure drop and heat transfer characteristics of a high-temperature printed circuit heat exchanger [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108: 1409-1417.
- [21] RUAN B, LIN W, LI W, et al. Numerical simulation on heat transfer and flow of supercritical methane in printed circuit heat exchangers[J]. Cryogenics, 2022, 126: 103541.
- [22] CHUNG S, LEE S W, KIM N, et al. Experimental study of printed-circuit heat exchangers with airfoil and straight channels for optimized recuperators in nitrogen Brayton cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 218: 119348.
- [23] YOON S J, O'BRIEN J, SABHARWALL P, et al. Study on effects of heat loss and channel deformation on thermal-hydraulic performance of semicircular straight channel printed circuit heat exchangers[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2018, 10(4): 1-14.
- [24] LIU B, LU M, SHUI B, et al. Thermal-hydraulic performance analysis of printed circuit heat exchanger precooler in the Brayton cycle for supercritical CO₂ waste heat recovery[J]. Applied Energy, 2022, 305: 117923.
- [25] 吴强. 微通道换热器内 S-CO₂ 换热特性及流量分配规律研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020: 1.
WU Qiang. Study on S-CO₂ heat transfer characteristics and flow distribution law in microchannel heat exchanger[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020: 1.
- [26] 余建祖. 换热器原理与设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 1.
YU Jianzu. Principle and design of heat exchanger[M]. Beijing: Beihang University Press, 2006: 1.

(责任编辑 刘永强)