

DOI: 10.19666/j.rlfed.202302024

类菱形肋片流道印刷电路板换热器 热工水力特性研究

吴家荣, 李红智, 杨玉, 张一帆, 杨乐
(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 为研究类菱形肋片流道印刷电路板换热器热工水力特性, 采用数值模拟方法, 以冷侧超临界二氧化碳 (S-CO₂) 和热侧气态 CO₂ 为工质, 分析了冷侧进口温度 313.15~353.15 K, 热侧进口温度 553.15~593.15 K, 冷热侧热工水力特性的变化, 比较了 NACA0030 翼型肋片流道和类菱形肋片流道的综合性能。结果表明: S-CO₂ 入口温度增大 40.0 K, 总换热量减小 23.91%, 冷、热侧压降分别增大 29.95%、11.14%; 气态 CO₂ 温度增大 40.0 K, 总换热量增大 16.40%, 冷、热侧压降分别增大 9.42%、7.43%, S-CO₂ 入口温度变化对热工水力特性的影响更明显; 类菱形肋片流道印刷电路板换热器有着更小的流动阻力和较好的综合性能。该研究结果对间断型印刷电路板换热器设计有一定的参考意义。

[关键词] 印刷电路板换热器; S-CO₂; 换热性能; 类菱形肋片流道

[引用本文格式] 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.

Study on the thermal hydraulic characteristics of the printed circuit heat exchanger with rhombic fin channels

WU Jiarong, LI Hongzhi, YANG Yu, ZHANG Yifan, YANG Le
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: To study the thermal hydraulic characteristics of the printed circuit heat exchanger with rhombic fin channels, variations in thermal hydraulic characteristics on the hot and cold sides were analyzed by numerical simulation, with cold side inlet temperature of 313.15~353.15 K and hot side inlet temperature of 553.15~593.15 K. The working medium on the cold side and the hot side were S-CO₂ and gaseous CO₂ respectively. The comprehensive performance was compared between NACA0030 airfoil fin channels and rhombic fin channels. The results show that when the inlet temperature of S-CO₂ increases by 40 K, the total heat transfer decreases by 23.91%, and the pressure drop of hot and cold increases by 29.95% and 11.14% respectively. When the temperature of gaseous CO₂ increases by 40 K, the total heat transfer increases by 16.40%, and the pressure drop of hot and cold increases by 9.42% and 7.43% respectively. The inlet temperature of S-CO₂ has more obvious influences on the thermal hydraulic characteristics. The printed circuit heat exchanger with rhombic fin channels has less flow resistance and better comprehensive performance. The results have a certain reference significance for the design of printed circuit heat exchangers with discontinuous channels.

Key words: printed circuit heat exchangers; S-CO₂; heat transfer characteristics; rhombic fin channels

超临界二氧化碳 (S-CO₂) 布雷顿循环因效率高、系统紧凑、灵活性好、热源适应性广等优点, 近年来受到国内外学术界和工业界的广泛关注。与水蒸气朗肯循环相比, 以 S-CO₂ 布雷顿循环为基础

收稿日期: 2023-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U20B2035); 国家重点研发计划项目 (2018YFB1501004); 陕西省创新能力支撑计划 (2023-CX-TD-18)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (U20B2035); National Key Research and Development Program of China (2018YFB1501004); Innovation Capability Support Program of Shaanxi (2023-CX-TD-18)

第一作者简介: 吴家荣, 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为超临界二氧化碳发电, dearwujr@163.com.

的发电系统具有以下优势：主蒸汽温度高于 550 °C 时，S-CO₂ 循环效率高于水蒸气朗肯循环^[1]；临界参数低，易实现超临界态；超临界参数下化学惰性好，可进一步提高透平入口参数；临界点附近压缩，类似液体压缩，压缩功小；透平排气压力高，膨胀比小，级数少，减小了尺寸；无除氧、除盐、排污、多级抽汽等设备，系统简单，结构紧凑；灵活性好，为解决可再生能源并网提供了新的思路。

美国 S-CO₂ 布雷顿循环于 20 世纪 60 年代由 Feher^[2]提出，由透平、回热器、预冷器、压缩机、热源构成简单循环。Angelino^[3]随后提出 S-CO₂ 预压缩循环、再压缩循环、分级膨胀循环、部分冷却循环，旨在优化循环结构实现更高效率。然而受限于高效紧凑型换热器和叶轮机械制造技术，直到 21 世纪初，该技术才得到迅速发展。

美国桑迪亚实验室建成了 250 kW 级闭式 S-CO₂ 布雷顿循环实验台，完成了涡轮机特性、二氧化碳混合工质和系统动态特性实验。2011 年能源部启动 Sunshot 计划，发展光热 S-CO₂ 布雷顿循环，项目已在 10 MW 级轴流涡轮、50 MW 涡轮和 450 MW 压气机、微通道换热器等方面取得一些研究成果。法国电力公司^[4-5]设计了 S-CO₂ 布雷顿循环燃煤发电系统，给出了锅炉烟气热量全温区吸收的方案。华北电力大学^[6-7]从热力循环构建方面揭示了 S-CO₂ 再压缩循环优于简单回热循环的原因，提出了八分之一减阻原理和锅炉模块化设计方法。西安热工研究院设计了 300、600 MW 燃煤发电系统^[8-11]，已建成的 5 MW S-CO₂ 发电系统^[12]已于 2021 年投运。

紧凑型换热器是上述 S-CO₂ 布雷顿循环发电系统的重要设备。采用了先进扩散焊技术的印刷电路板换热器 (PCHE)，最早由英国 Heatric 公司研制，具有较大的比表面积、耐高温高压，被广泛用作回热器、预冷器和加热器。研发低成本、高强度、结构紧凑、流动阻力小、传热效率高的 PCHE 是未来 S-CO₂ 布雷顿循环商业应用的关键之一^[13]。

PCHE 的热工水力特性很大程度上取决于流道的形状，近年出现了各类强化传热或减小阻力的流道形状，具体如图 1 所示^[14]，这些流道形状可分为连续型和间断型。

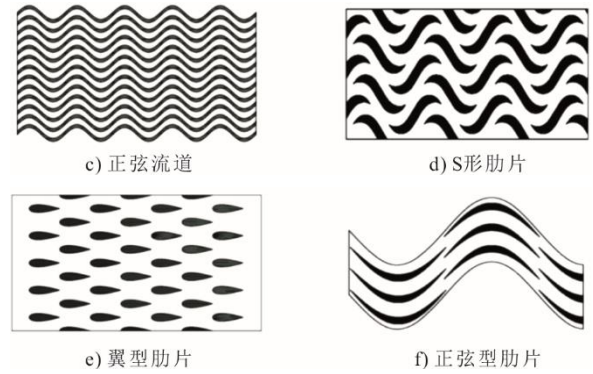


图 1 各类 PCHE 流道
Fig.1 Various structures of PCHE channels

图 1 中直流道、Zigzag 流道、正弦流道属连续型。直流道流动阻力小但传热能力差，Zigzag 流道传热能力强但折角处的回流和漩涡使流动阻力增大，正弦流道比 Zigzag 流道有着更好的传热性能和更小的流动阻力。Tsuzuki 等人^[15]提出一种 S 形肋片流道，实现了与 Zigzag 流道相近的传热性能，压降仅为后者的 1/5。Kim 等人^[16]将 NACA 系列翼型应用于 PCHE 肋片，单位体积换热量相近的前提下，压降减小为 Zigzag 流道的 1/20。Chu 等人^[17]研究了 NACA0025 翼型肋片流道横向和纵向节距对传热和流动阻力的影响，认为肋片交错排布比平行排布的综合性能更好，质量流量越大，效果越明显。Xu 等人^[18]将 NACA0025 翼型肋片优化为剑鱼形状，有效降低了流动阻力，改善了机翼附近速度分布的不均匀性，优化后的流道综合性能更好。Yang 等人^[14]对采用类似肋片样式的 PCHE 开展了实验研究，称之为类菱形肋片。Shi 等人^[19]开展了 S-CO₂ 和熔盐在翼型 PCHE 中流动传热的模拟研究，认为较高的进口温度会降低 S-CO₂ 的传热性能。Zhu 等人^[20]将 NACA 系列对称翼型进一步拓展为非对称翼型，研究了肋片排布、攻角、水平间距、交错间距的影响。

与连续型流道相比，采用翼型肋片的间断型流道不仅具有较好的传热性能和合适的流动阻力，也能改善连续型流道因流量分配不均导致 PCHE 性能下降的问题，因此正受到越来越多地关注。目前，对翼型肋片流道 PCHE 的研究暂时不如连续型流道 PCHE 丰富，尤其是实验研究。对优化前后翼型肋片流道 PCHE 热工水力特性及对比的研究也比较缺乏。因此，本文采用数值模拟的方法对类菱形肋片流道 PCHE 中 S-CO₂ 的流动传热性能开展研究，分析了冷热侧进口温度的影响，对 NACA0030 翼型肋片和类菱形肋片周围的流场进行了比较，最后比较了 2 种流道的综合性能。

1 模型及验证

1.1 几何模型及边界条件

本文所选类菱形肋片变形前的翼型为 NACA0030, 变形前后如图 2 所示, 在不锈钢板片上按图 3 所示排布蚀刻出类菱形肋片流道形成 PCHE 板片 (图 4)。

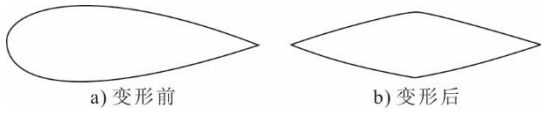


图 2 类菱形肋片变形前后
Fig.2 The formation of a rhombic fin

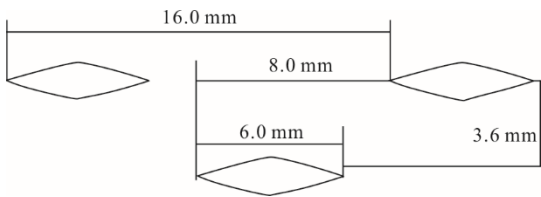


图 3 肋片排布的几何参数
Fig.3 Geometric parameters of the fin arrangement

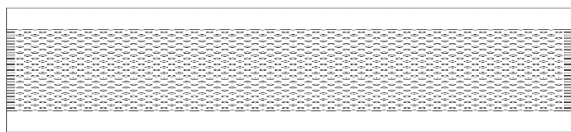


图 4 PCHE 板片
Fig.4 The PCHE plate

采用扩散焊方法将冷热板片依次焊接形成芯体。芯体侧面局部如图 5 所示, 为简化计算模型, 对于 1 层冷板 1 层热板的形式, 取其中 1 个换热单元, 其中蓝色区域为冷流体流道, 红色为热流体流道。几何模型的固体域如图 6 所示, 流体域如图 7 所示。固体域冷热板片通过类菱形肋连接, 上下壁面施加周期性条件, 左右壁面为对称条件。流体域左右侧为对称条件, 与固体域接触的面为耦合面, 进口条件为质量进口, 出口条件为压力出口。模型尺寸如图 8 所示, 沿流动方向长度为 180 mm。

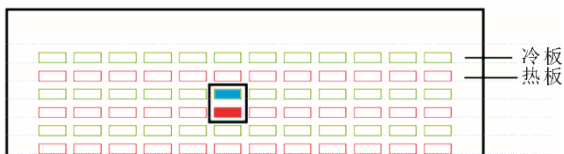


图 5 芯体侧面局部
Fig.5 A partial view of cross section of the core

1.2 网格划分及无关性检验

类菱形肋片流道有较好的对称性, 采用结构化

网格可有效减小网格数量并提高网格质量, 网格划分如图 9 所示。

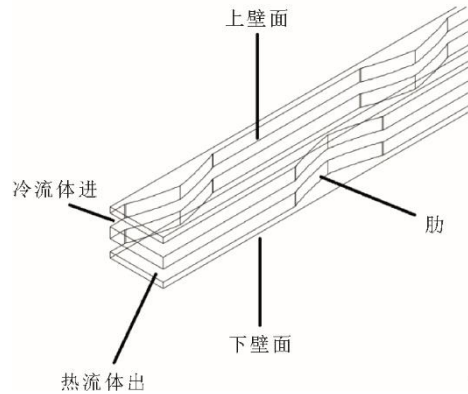


图 6 固体域
Fig.6 Solid domain

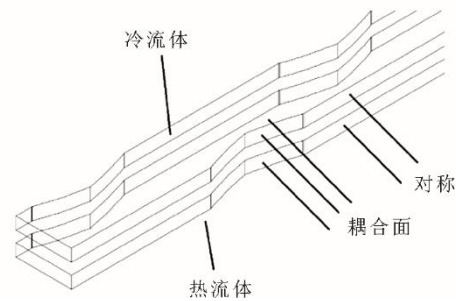


图 7 流体域
Fig.7 Liquid domain

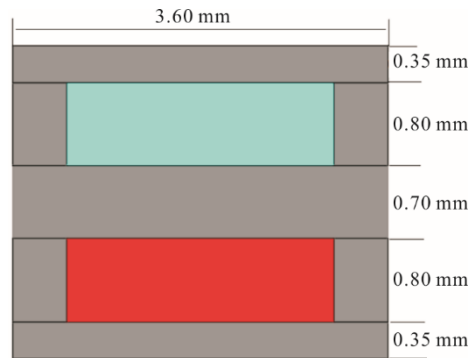


图 8 模型尺寸
Fig.8 Geometric parameters of the simulation model

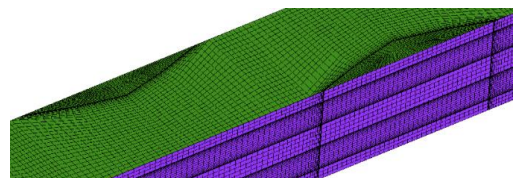


图 9 固体域和流体域网格
Fig.9 Mesh in solid and liquid domains

S-CO₂ 在拟临界区物性变化剧烈, 模拟过程 S-CO₂ 在通道内的最大压降未超过 0.02 MPa, 相较

于出口压力，压降非常小，将物性作为温度的函数通过分段线性的方法导入求解器。对上文几何模型划分 4 套网格，在冷、热侧出口压力分别为 8.28、2.52 MPa，入口温度分别为 381.05、553.05 K 的条

件下进行网格无关性检验。以网格 4 为参考，4 套网格对应冷热侧压降和温差见表 1。由表 1 可见，当网格数量增大至 2 939 720，冷热侧压降和温差的相对误差已经很小，故选取网格 2 进行模拟计算。

表 1 网格无关性检验
Tab.1 Grid independence verification

网格	数量	压降/Pa	相对误差/%	温差/K	相对误差/%	
冷侧	网格 1	1 630 410	856.6	1.68	81.39	2.23
	网格 2	2 939 720	863.2	0.92	82.40	1.02
	网格 3	4 810 370	864.5	0.77	82.55	0.84
	网格 4	6 646 800	871.2	0	83.25	0
热侧	网格 1	1 630 410	2 791.2	3.03	100.92	1.11
	网格 2	2 939 720	2 839.7	1.34	101.70	0.34
	网格 3	4 810 370	2 877.3	0.04	102.15	0.10
	网格 4	6 646 800	2 878.4	0	102.05	0

1.3 数学模型及验证

湍流状态下 S-CO₂ 传热流动的模拟通常使用标准 *k-e*、*SST k- ω* 和 *RNG k-e* 3 种湍流模型。Baik 等人^[21]比较了水和不同状态下 CO₂ 在 PCHE 内的情况，认为标准 *k-e* 模型模拟结果和实验吻合较好。张虎忠^[22]对预冷器内 S-CO₂ 的模拟也选取标准 *k-e* 模型，模拟结果与实验结果吻合良好。*SST k- ω* 模型结合了 *k-e* 模型在湍流核心区的优势，在近壁面区又有一定的精确性，能一定程度上模拟出传热恶化与传热恢复，因此对于 S-CO₂ 在竖直圆管内传热流动的研究，多采用该模型。然而，模型对网格的敏感度较高，应保证第 1 层到壁面无量纲距离 y^+ 小于 1，对于复杂的几何模型，这使得边界层网格数量增大，网格长宽比太大，网格质量下降。*RNG k-e* 模型由标准 *k-e* 模型发展而来，适用于分离流、二次流、旋流等复杂流动，对于流线弯曲较大的区域有较好的精度。Tsuzuki^[15]和 Ngo^[23]等人对间断 S 形肋片流道的研究采用了该模型。Shi 等人^[19]将 3 种模型模拟结果与 Wang 等人^[24]实验结果对比，结合了增强壁面处理的 *RNG k-e* 模型模拟结果与实验的相对误差仅为 1.23%。因此，本文选取 *RNG k-e* 模型与增强壁面处理。采用 SIMPLE 算法耦合速度和压力，梯度离散选择 Least Squares Cell-Based，其他项为二阶迎风，各项残差的收敛标准为软件默认，并监测出口温度和质量流量的变化。

选取 Adebisi 与 Hall^[25]对超临界压力下水平圆管内 CO₂ 传热的实验作为模型的验证。实验条件见

表 2，沿流动方向管壁上下母线内壁温分布如图 10 所示，实验与模拟数据吻合较好，认为该模型有效。

表 2 实验条件
Tab.2 Experimental conditions

质量流量/ (kg·s ⁻¹)	入口温度/K	热流密度/ (kW·m ⁻²)	出口温度/K	测试压力/ MPa
0.148	288.55	15.10	294.45	7.59

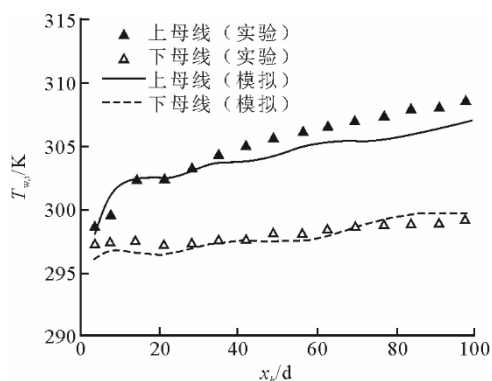


图 10 模拟和实验壁温比较
Fig.10 Comparison of wall temperature distributions predicted by simulation against experimental data

类菱形肋片流道中沿流动方向，截面积周期性变化，参照常规流道水力直径的定义方法，取图 11 中 1 个体积用于定义水力直径，即水力直径等于 4 倍的体积除以湿周面积。

$$V = (LW - S_a)t \tag{1}$$

式中： V 为体积，m³； L 为长度，m； W 为宽度，m； S_a 为肋片的面积，m²； t 为高度，m。

$$S = 2(P_a t / 2) + 2(L - L_c)t + 2(WL - S_a) \quad (2)$$

式中: S 为湿周面积 m^2 ; P_a 为肋片周长, m ; L_c 为肋片弦长, m 。

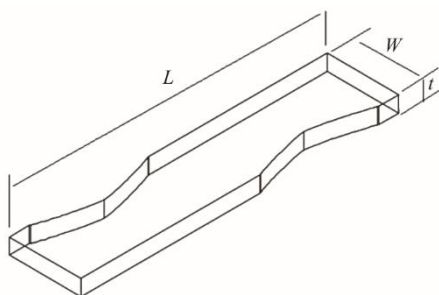


图 11 定义水力直径的体积

Fig.11 Volume to define a hydraulic diameter

$$D_h = 4V / S \quad (3)$$

式中: D_h 为水力直径, m 。

雷诺数 Re 定义如下:

$$Re = \frac{mD_h}{\mu A_c} \quad (4)$$

式中: m 为质量流量, kg/s ; μ 为黏度, $Pa \cdot s$; A_c 为截面积, m^2 。

截面积 A_c 定义如下:

$$A_c = \frac{V}{L} \quad (5)$$

范宁摩擦系数 f 定义如下:

$$f = \frac{\Delta p D_h \rho A_c^2}{2m^2 L_{ch}} \quad (6)$$

式中: Δp 为压降, Pa ; ρ 为密度, kg/m^3 ; L_{ch} 为流体流经的长度, m 。

换热量 Q 定义如下:

$$Q = \frac{m_h(i_{i,h} - i_{o,h}) + m_c(i_{o,c} - i_{i,c})}{2} \quad (7)$$

式中: m_h 、 m_c 分别为热、冷流体的质量流量, kg/s ; $i_{i,h}$ 、 $i_{o,h}$ 、 $i_{o,c}$ 、 $i_{i,c}$ 分别为热流体进口焓、热流体出口焓、冷流体出口焓、冷流体进口焓, J/kg 。

努塞特数 Nu 定义如下:

$$Nu = \frac{hD_h}{\lambda} \quad (8)$$

式中: h 为流体与壁面间的对流传热系数, $W/m^2 \cdot K$; λ 为流体的导热系数, $W/m \cdot K$ 。

对流传热系数定义如下:

$$h = \frac{q}{T_w - T_b} \quad (9)$$

式中: T_w 为壁面温度, K ; T_b 为流体温度, K 。

格拉晓夫数 Gr 的计算公式如下:

$$Gr = \frac{(\rho_w - \rho_b)\rho_b g D_h^3}{\mu_b^2} \quad (10)$$

式中: ρ_b 和 ρ_w 分别为主流区和近壁区流体密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; μ_b 为主流区流体黏度, $Pa \cdot s$ 。

2 结果与讨论

2.1 入口温度的影响

热侧参数为: 出口压力 2.52 MPa, 入口温度 553.15~593.15 K, 质量流量 1.300 5 g/s。冷侧参数为: 出口压力 8.28 MPa, 入口温度 313.15~353.15 K, 质量流量 1.418 4 g/s。类似于超临界流体在水平管内的流动换热, 冷侧通道内的 S-CO₂ 沿流动方向吸热升温, 物性参数在通道径向上的不均匀分布导致浮力效应的产生。Huang 和 Li^[26]研究了近年来各国学者对超临界流体水平流动时浮力效应的计算公式和判别标准, 结果显示有的计算公式相同而判别标准不同, 目前还没有形成统一且广泛适用的判据。Ren 等人^[27]对 S-CO₂ 在半圆截面 PCHE 内的对流换热情况开展了模拟研究, 选取的判据对强制对流和混合对流传热有较好的区分。本节选取 Ren 等人^[27]的计算公式和判别标准, 当 Gr/Re^2 小于 0.01, 浮力对对流传热的影响很小, 属于强制对流传热。

图 12 为冷侧入口温度 $T_{i,c}$ 为 313.15、353.15 K, 沿冷流体流动方向 Gr/Re^2 随主流温度 T_b 的变化。由图 12 可知, 2 种不同入口温度下浮力效应随着主流温度的增大而减小, 入口温度 313.15 K 时, 曲线下降更迅速, 这是因为该温度靠近拟临界温度, 密度随温度变化更剧烈, 径向上密度分布差异更大。但总体上由于通道水力直径很小, Gr/Re^2 均小于 0.01, 下文的计算中浮力效应可忽略。

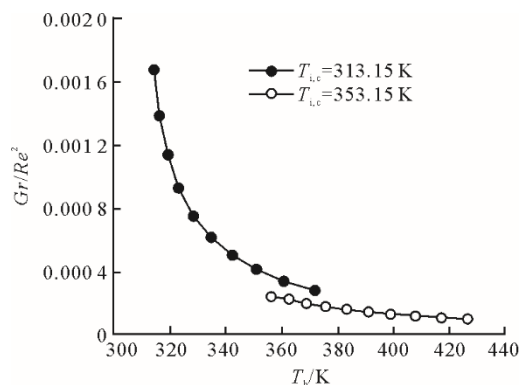
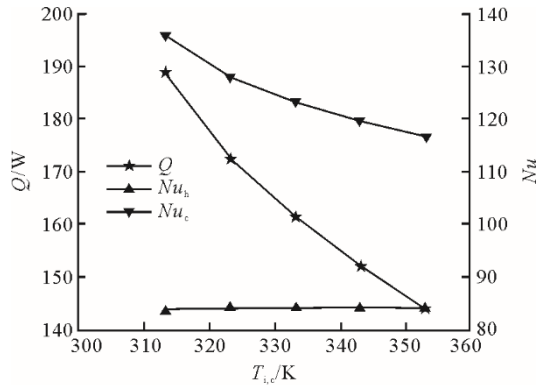


图 12 Gr/Re^2 的变化

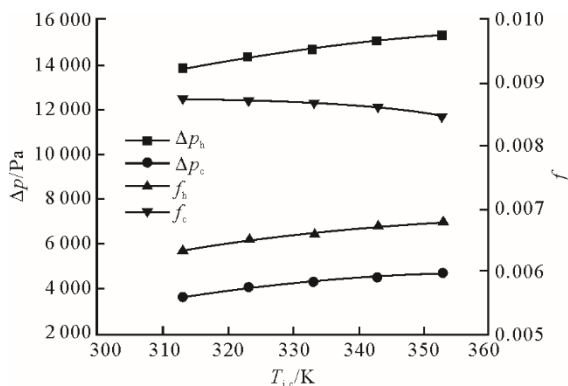
Fig.12 The variation of Gr/Re^2

图 13 为冷侧入口温度逐渐增大, 热侧入口温

度保持 553.15 K 时, 换热量 Q 、努塞特数 Nu 、压降 Δp 和范宁摩擦系数 f 的变化。



a) Q 和 Nu 随 $T_{i,c}$ 的变化



b) Δp 和 f 随 $T_{i,c}$ 的变化

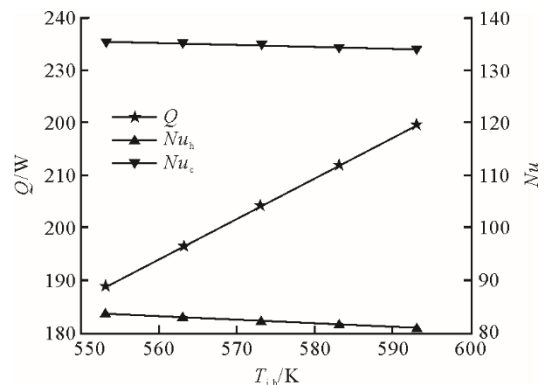
图 13 冷侧入口温度 $T_{i,c}$ 的影响
Fig.13 The effect of $T_{i,c}$

由图 13 可见, 随着冷侧入口温度的增加, Q 和冷侧 Nu 减小, 热侧 Nu 变化很小。冷侧入口温度的增大使得 S-CO₂ 逐渐远离大比热的拟临界区, 入口温度增大 40 K, 平均导热系数增大 1.6%, 但平均比热减小了 24.32%, 导致冷侧换热性能明显下降。对于热侧工质, 整个流动换热过程处于气态, 物性受温度变化的影响很小, 冷侧温度变化对其换热性能的影响不明显。

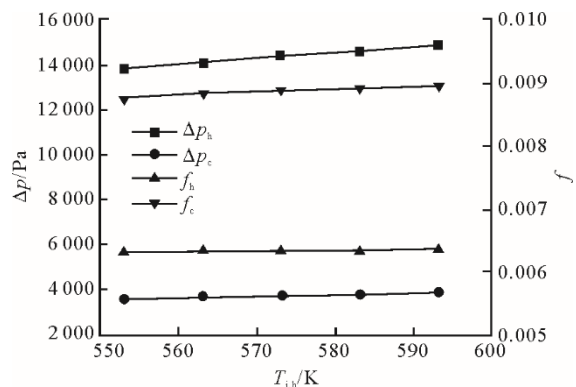
由图 13b)可见, 随着冷侧入口温度的增大, 热侧 CO₂ 和冷侧 S-CO₂ 平均流速增大, 引起压力损失增大。由 f 的计算公式可知, 对于给定几何结构和质量流量, f 受压降和密度共同影响, 冷热侧的压降都增大, 但冷侧平均密度减小 25.38%, 热侧仅减小 3.66%, 表现为冷侧 f 减小而热侧 f 增大。

图 14 为冷侧入口温度保持 313.15 K 不变而热侧入口温度从 553.15 K 增到 593.15 K 时, 换热量 Q 、努塞特数 Nu 、压降 Δp 和范宁摩擦系数 f 的变化。由图 14a)可知, 热侧入口温度增大, 平均换热

温差增大, 总换热量增大, 冷热侧 Nu 略有减小。这是因为热侧平均温度增大后流速略有增大, 尽管对流传热系数增大了 3.58%, 但 Nu 受对流换热和导热的共同影响, 导热系数也增大了 7.25%, 导致热侧 Nu 减小。对于冷侧, 平均温度的增大使得 S-CO₂ 远离拟临界区, 比热减小, Nu 减小。由图 14b)可知, Δp 和 f 随热侧入口温度的变化很小。比较冷热侧入口温度的影响, 超临界态一侧温度增大 40 K, 总换热量减小 23.91%, 冷热侧压降分别增大 29.95%、11.14%; 气态一侧温度增大 40 K, 总换热量增大 16.4%, 冷热侧压降分别增大 9.42%、7.43%, 超临界态一侧工质入口温度变化对换热和流动性能影响更加明显。



a) Q 和 Nu 随 $T_{i,h}$ 的变化



b) Δp 和 f 随 $T_{i,h}$ 的变化

图 14 热侧入口温度 $T_{i,h}$ 的影响
Fig.14 The effect of $T_{i,h}$

2.2 2 类翼型比较

本文所述类菱形肋片由 NACA 系列翼型改进而来。Xu 等人^[18]对 NACA0025 翼型肋片流道内流场分析后, 认为 NACA0025 头部曲率变化太大, 肋片最宽处出现高流速和负压梯度区, 导致流动阻力增大, 于是改进为头部更加平缓的剑鱼结构, 对恒温条件下 2 类翼型肋片流道流动换热情况进行了

比较。本节在两侧流动换热的条件下，继续对2类流道进行比较。模拟时冷、热侧入口温度分别为313.15、553.15 K，出口压力分别为8.28、2.52 MPa，热侧入口质量流量1.300 5 g/s保持不变，冷侧入口质量流量从0.709 2 g/s增至1.772 8 g/s，研究S-CO₂一侧的规律。

图15给出了2类肋片流道内S-CO₂的局部速度分布。由于翼型肋片错列排布且肋片前后薄而中间厚，沿流动方向截面积的变化使得每个截面流速不同。流速关于翼弦轴对称，上游来流撞击前缘的驻点后被分成2部分：一部分沿上翼面流动；一部分沿下翼面流动，并在尾部与上翼面的流体混合再流向下游。与类菱形肋片相比，NACA0030翼型肋片厚度在靠近前缘处增大至最大又逐渐减小，类菱形肋片厚度变化则比较均匀。最大厚度处流动截面积最小，流速最大，因此NACA0030翼型肋片周围最大流速大于类菱形肋片，流速分布更不均匀。Cui等人^[28]将翼型肋片周围的流场分为低流速区、来流撞击区、高流速区和尾部混合区。NACA0030翼型肋片的高流速区面积大于类菱形肋片，而类菱形肋片尾部混合区局部流速接近于零。

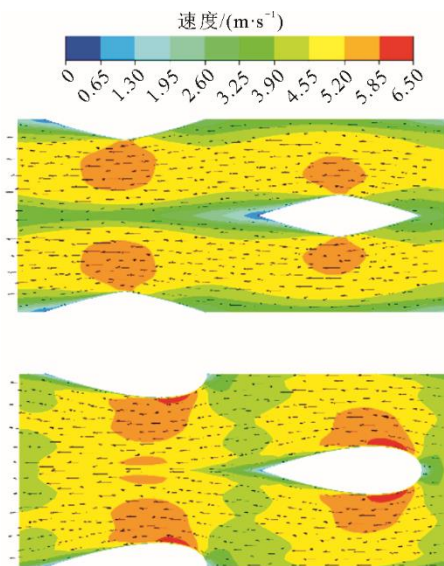


图15 2类肋片流道内S-CO₂局部速度分布

Fig.15 S-CO₂ local velocity distribution in two types of fin channels

从肋片生成过程看，将NACA0030翼型头部变化为前后对称的类菱形结构，肋片的最大厚度由弦长的30%减小为26%，减小了上游来流对肋片前缘的撞击，减小了流动阻力，相当于使用了厚度更小的NACA翼型。Chen等人^[29]比较了NACA0010、

NACA0020、NACA0030、NACA0040 4种翼型肋片流道，厚度最小的NACA0010具有最小的流动阻力和最好的综合性能。

图16给出了不同 Re 下2类翼型 Q 、 Nu 、 Δp 、 f 的变化。随着 Re 增大，换热量都增大， Nu 的变化规律相同； Δp 和 f 的变化表现为类菱形小于NACA0030翼型，且两者差异随 Re 增大有增大的趋势，符合增强换热通常以增大流动阻力为代价的一般规律。

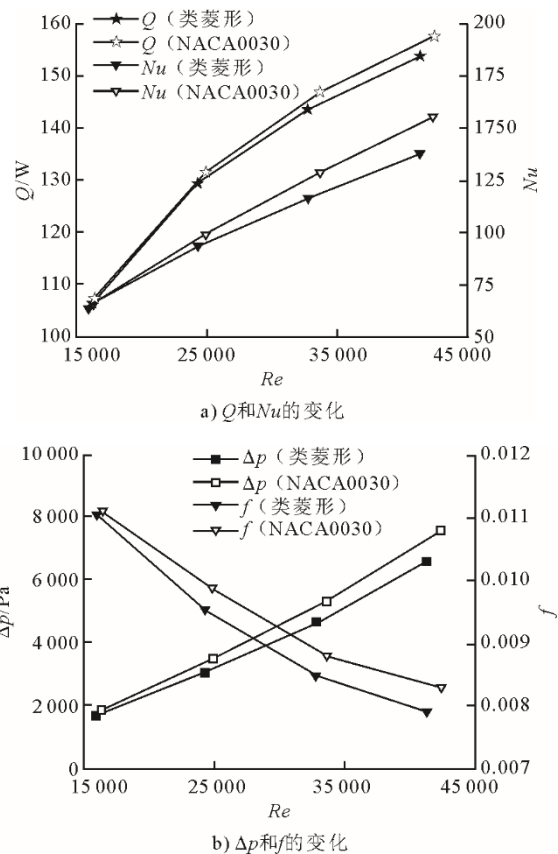


图16 不同 Re 下2类翼型 Q 、 Nu 、 Δp 、 f 的变化

Fig.16 The variation of Q , Nu , Δp , f at different Re numbers

Kim等人^[16]采用单位体积换热量随压降的变化来比较Zigzag流道与NACA翼型流道的综合性能。Xu等人^[18]提出类菱形流道时也采取了类似的评价标准，本文沿用这种评价标准来比较2类流道的综合性能，结果如图17所示。由图17可见，NACA0030翼型肋片综合性能略微小于类菱形肋片流道。Yang等人^[14]的实验研究比较了类菱形肋片流道、直流道、Zigzag流道和S形肋片流道的综合性能，类菱形与Zigzag流道在单位体积换热量相近的前提下，压降仅为后者的1/4。这意味着在4种常见的流道中，采用类菱形肋片流道具有一定优势。

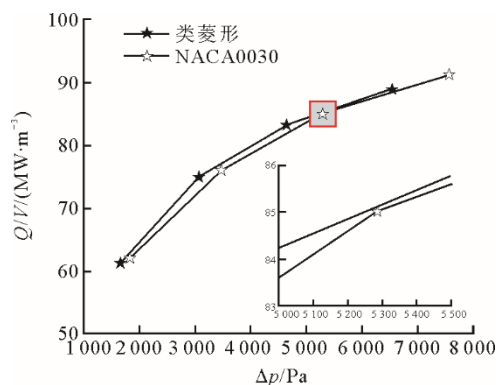


图 17 2 类翼型综合性能

Fig.17 Comprehensive performance of two types of fin channels

3 结 论

本文采用数值模拟方法,对类菱形肋片流道 PCHE 中 S-CO₂ 的流动传热性能开展研究,比较了冷热侧进口温度的影响以及 NACA0030 翼型肋片流道和类菱形肋片流道的综合性能,得到如下结论。

1) 对于冷侧流体为 S-CO₂,热侧流体为气态 CO₂ 的情况,增大 S-CO₂ 入口温度,总换热量减小,冷热侧压降增大;增大气态 CO₂ 入口温度,总换热量增大,冷热侧 *Nu* 略有减小而压降和 *f* 略有增大。S-CO₂ 一侧工质入口温度变化对热工水力特性的影响更明显。

2) 类菱形肋片流道 PCHE 有着更小的流动阻力。以单位体积换热量随压降的变化为评价标准,类菱形肋片流道 PCHE 的综合性能略强于 NACA0030 翼型肋片流道 PCHE。

[参 考 文 献]

- [1] DOSTAL V, HEIZLAR P, DRISCOLL M J. The supercritical carbon dioxide power cycle: comparison to other advanced power cycles[J]. Nuclear Technology, 2017, 154(3): 283-301.
- [2] FEHER E G. The supercritical thermodynamic power cycle [J]. Energy Conversion, 1967, 8(2):85-90.
- [3] ANGELINO G. Carbon dioxide condensation cycles for power production[J]. Journal of Engineering for Power, 1968, 90(3): 287-295.
- [4] MOUNIR M, YANN L M. Supercritical CO₂ Brayton cycles for coal-fired power plants[J]. Energy, 2016, 103: 758-771.
- [5] YANN L M. Conceptual study of a high efficiency coal-fired power plant with CO₂ capture using a supercritical CO₂ Brayton cycle[J]. Energy, 2013, 49: 32-46.
- [6] SUN E H, XU JI L, LI M J, et al. Synergetics: the cooperative phenomenon in multi-compressions S-CO₂ power cycles[J]. Energy Conversion and Management, X 2020, 7: 100042.
- [7] 李航宁, 孙恩慧, 徐进良. 多级回热压缩超临界二氧化碳循环的构建及分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊 1): 211-221.
- [8] LI Hangning, SUN Enhui, XU Jinliang. Construction and analysis of supercritical carbon dioxide cycle with multi-stage regenerative-compression [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(Suppl.1): 211-221.
- [8] 张一帆, 王生鹏, 刘文娟, 等. 超临界二氧化碳再压缩再热火力发电系统关键参数的研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36(10): 827-833.
- [9] ZHANG Yifan, WANG Shengpeng, LIU Wenjuan, et al. Study on key parameters of a supercritical fossil-fired power system with CO₂ recompression and reheat cycles[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(10): 827-833.
- [9] 张一帆, 李红智, 姚明宇, 等. 600 MW 煤基超临界二氧化碳发电系统回热器和预冷器的概念设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7223-7229.
- [10] ZHANG Yifan, LI Hongzhi, YAO Mingyu, et al. Conceptual design of the recuperator and precooler for a 600 MW fossil-based supercritical CO₂ power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7223-7229.
- [10] 张一帆, 王安, 白文刚, 等. 300 MW 超临界二氧化碳锅炉气动力特性及壁温分布[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1700-1706.
- [11] ZHANG Yifan, WANG An, BAI Wengang, et al. Thermal fluid dynamic characteristics and wall temperature distribution of a 300 MW supercritical CO₂ boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (6): 1700-1706.
- [11] YANG Y, BAI W G, WANG Y M, et al. Coupled simulation of the combustion and fluid heating of a 300 MW supercritical CO₂ boiler[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 259-267.
- [12] LI Hongzhi, ZHANG Yifan, YAO Mingyu, et al. Design assessment of a 5 MW fossil-fired supercritical CO₂ power cycle pilot loop[J]. Energy, 2019, 174: 792-804.
- [13] 吴家荣, 李红智, 杨玉, 等. 超临界二氧化碳动力循环中印刷电路板换热器芯体机械应力和热应力耦合分析 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 640-650.
- [14] WU Jiarong, LI Hongzhi, YANG Yu, et al. Coupling analysis of mechanical stress and thermal stress of printed circuit heat exchanger core in supercritical carbon dioxide power cycle[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 640-650.
- [14] YANG Y, LI H Z, XIE B B, et al. Experimental study of the flow and heat transfer performance of a PCHE with rhombic fin channels[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 254: 115137.
- [15] TSUZUKI N, KATO Y, ISHIDUKA T. High performance printed circuit heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(10): 1702-1707.
- [16] 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.
- [17] CHU W X, LI X G, MA T, et al. Study on hydraulic and thermal performance of printed circuit heat transfer surface with distributed airfoil fins[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114: 1309-1318.
- [18] XU X Y, MA T, LI L, et al. Optimization of fin arrangement and channel configuration in an airfoil fin PCHE for supercritical CO₂ cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 70: 867-875.
- [19] SHI H Y, LI M J, WANG W Q, et al. Heat transfer and friction of molten salt and supercritical CO₂ flowing in an

- airfoil channel of a printed circuit heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 150: 119006.
- [20] ZHU C Y, GUO Y, YANG H Q, et al. Investigation of the flow and heat transfer characteristics of helium gas in printed circuit heat exchangers with asymmetrical airfoil fins[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 186: 116478.
- [21] BAIK S, KIM S G, LEE J, et al. Study on CO₂-water printed circuit heat exchanger performance operating under various CO₂ phases for S-CO₂ power cycle application[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 1536-46.
- [22] 张虎忠. 超临界 CO₂ 印刷电路板换热器性能研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020: 8.
ZHANG Huzhong. Study on the thermal-hydraulic performance of printed circuit heat exchanger with supercritical carbon dioxide[D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 2020: 8.
- [23] NGO T L, KATO Y, NIKITIN K, et al. New printed circuit heat exchanger with S-shaped fins for hot water supplier[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2006, 30(8): 811-819.
- [24] WANG W Q, QIU Y, HE Y L, et al. Experimental study on the heat transfer performance of a molten-salt printed circuit heat exchanger with airfoil fins for concentrating solar power[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 837-846.
- [25] ADEBIYI G, HALL W B. Experimental investigation of heat transfer to supercritical pressure carbon dioxide in a horizontal pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1976, 19: 715-720.
- [26] HUANG D, LI W. A brief review on the buoyancy criteria for supercritical fluids[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 131: 977-987.
- [27] REN Z, ZHAO C R, JIANG P X, 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] CUI X Y, GUO J F, HUAI X L, et al. Numerical study on novel airfoil fins for printed circuit heat exchanger using supercritical CO₂[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 121: 354-366.
- [29] CHEN F, ZHANG L S, HUAI X L, et al. Comprehensive performance comparison of airfoil fin PCHEs with NACA 00XX series airfoil[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 315: 42-50.

(责任编辑 杨嘉蕾)