

# 超临界 CO<sub>2</sub> 印刷电路板换热器热工水力特性研究

明杨<sup>1</sup>, 金旻<sup>2</sup>, 杨雯<sup>3</sup>, 赵富龙<sup>1</sup>, 谭思超<sup>1</sup>, 田瑞峰<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430000; 3. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610041)

**摘要:**对于超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环中的印刷电路板换热器,其复杂结构与工作介质的特殊物理性质将导致集总参数方法出现较大的计算误差。为提升印刷电路板换热器的换热参数的计算精度,本文基于 Modelica 语言,采取分节点建模方法,开发了印刷电路板换热器的热工水力特性计算程序,对其稳态运行时的换热参数进行了分析。结果表明:印刷电路板换热器的通道内超临界 CO<sub>2</sub> 的对流换热系数沿流动方向发生显著变化。与设计值相比,分节点计算程序的最大相对误差小于 3%,计算精度相比于集总参数方法显著提升,因此有必要采取分节点计算方法以提高计算精度。研究结果可为超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环系统中印刷电路板换热器的设计和仿真提供参考。

**关键词:**超临界二氧化碳; 超临界流体; 布雷顿循环; 印刷电路板; 逆流式; 换热器; 分节点法; 换热特性

DOI: 10.11990/jheu.202207039

网络出版地址: <https://link.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20240207.1605.010>

中图分类号: TL328 文献标志码: A 文章编号: 1006-7043(2024)04-0819-06

## Thermal-hydraulic characteristics of a printed circuit board heat exchanger using supercritical carbon dioxide

MING Yang<sup>1</sup>, JIN Yang<sup>2</sup>, YANG Wen<sup>3</sup>, ZHAO Fulong<sup>1</sup>, TAN Sichao<sup>1</sup>, TIAN Ruifeng<sup>1</sup>

(1. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. China Shipbuilding Development and Design Center, Wuhan 430000, China; 3. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** For the printed circuit heat exchanger (PCHE) in supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle, its complex structure and special physical properties of the working medium will lead to large calculation errors in the lumped parameter method. To improve calculation accuracy, the PCHE thermal-hydraulic calculation program is developed on the basis of the Modelica language. The parameters of PCHE during steady-state operation are analyzed using the subnode method. The results show that the convective heat transfer coefficient of sCO<sub>2</sub> in the PCHE channel substantially changes along the flow direction. Compared with the design value, the maximum relative error of the subnode calculation program is less than 3%. The calculation accuracy is also greatly improved compared with that of the lumped parameter method. Therefore, the subnode calculation method should be adopted to improve the calculation accuracy. The results can provide a reference for the design and simulation of PCHE in sCO<sub>2</sub> Brayton cycle systems.

**Keywords:** supercritical carbon dioxide; supercritical flow; Brayton cycle; printed circuit; counterflow; heat exchanger; sub-node calculation method; heat exchange characteristics

随着能源危机问题的日益突出,核能作为一种稳定、清洁的能源,成为未来发展的主要方向之一。研究人员一直致力于开发核电系统,以满足核电系统高效率和小型化的需求<sup>[1]</sup>。近 50 年来,超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环引起了全世界的广泛关注<sup>[2-3]</sup>。超

临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环系统的热效率高、小型化程度好<sup>[4]</sup>,循环能与出口温度为 350~800 °C 的热源较好匹配,适用于诸多第 4 代核反应堆,具有在能源转换技术领域带来革命性突破的潜力<sup>[5]</sup>。基本的超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环由热源、透平、压缩机、换热器等组成,而换热器是超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环的关键设备。理想的换热器应具有紧凑、传热能力强、压降低等特点,而换热器的性能也与系统的热效率和负荷跟踪特性密切相关<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2022-07-18.

网络出版日期: 2024-02-09.

基金项目: 中国科协项目(2021QNRC001).

作者简介: 明杨,男,博士研究生;

田瑞峰,男,教授,博士生导师.

通信作者: 田瑞峰, E-mail: tianruifeng@hrbeu.edu.cn.

印刷电路板式换热器 (printed circuit heat exchanger, PCHE) 被认为是超临界  $\text{CO}_2$  布雷顿循环中换热器的首选<sup>[7]</sup>。PCHE 是一种紧凑型板翅式换热器,通常采用“化学蚀刻”工艺在传热板表面形成直径为 0.5~2 mm 的微通道<sup>[8]</sup>,然后将传热板堆叠焊接,形成换热器主体结构<sup>[9]</sup>。由于 PCHE 的比表面积大于  $2\,500\text{ m}^2/\text{m}^3$ ,在相同的热负荷下,PCHE 的体积约为管壳式换热器的 1/5。换热器的冷热侧温差也远小于一般管壳式换热器。因此,PCHE 可以获得较高的传热效率和较小的设备体积,非常适合于超临界  $\text{CO}_2$  布雷顿循环系统<sup>[10]</sup>。现存的 PCHE 按照流动换热方式为横流、平行流和逆流 3 种;按照流道形状可分为直流道、梯形流道、蛇形流道、正弦流道和锯齿流道 5 种。

在实验方面,PCHE 已被应用于多个小型超临界  $\text{CO}_2$  测试回路,如桑迪亚国家实验室<sup>[11]</sup>、日本东京科学大学<sup>[12]</sup>、中国科学院<sup>[10]</sup>等,学者总结了大量超临界  $\text{CO}_2$  在不同结构流道中流动与传热的经验方程,探讨了入口温度与流速等参数对 PCHE 传热和效率的影响。在三维仿真方面,对 PCHE 精细建模的研究大多基于商业计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 软件<sup>[13-14]</sup>。然而,CFD 软件通常使用成本高、计算耗时长,不适于 PCHE 的瞬态分析和快速设计。因此,简化的一维 PCHE 建模方法<sup>[15-16]</sup>同样受到广泛关注。MA 等<sup>[17]</sup>开发了 PCHE 动态模型,并通过与超临界  $\text{CO}_2$  系统试验设施的实验数据进行对比验证。JIANG 等<sup>[18]</sup>建立了超临界  $\text{CO}_2$  布雷顿循环的一维模型,发现 PCHE 对入口温度和流量变化的瞬态响应速度远快于传统的管壳式换热器。XU 等<sup>[19]</sup>建立了 PCHE 的一维模型,得到了几种不同边界条件下 PCHE 通道的最优数目。诸多研究结果表明,简化的一维建模方法适用于超临界  $\text{CO}_2$  布雷顿循环 PCHE 的快速设计和运行特性分析。

本文开发了适用于小型模块化超临界  $\text{CO}_2$  布雷顿循环反应堆系统的 PCHE 分节点计算程序。采用能量均分法设计 PCHE 的结构参数,然后基于长度均分法计算了稳态条件下的 PCHE 热工水力参数分布,并比较了集总参数法和离散建模法在不同节点数下的计算误差,验证了该方法的可行性。

## 1 印刷电路板换热器的建模与仿真

本文的建模对象为 5 MW 小型模块化超临界  $\text{CO}_2$  布雷顿循环反应堆系统内的 PCHE 回热器,其在系统中的布置方式如图 1 所示<sup>[20]</sup>。PCHE 的热侧入口工质来源于透平,热侧出口连接至冷却器;而冷侧入口工质来源于压缩机,其冷侧出口连接至反应堆。

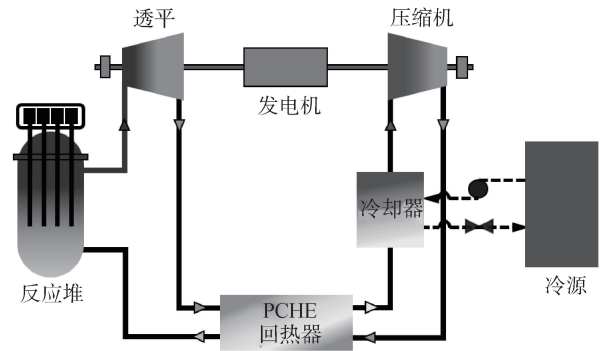


图 1 PCHE 在系统中的布置方式示意

Fig. 1 Schematic diagram of PCHE arrangement in the system

PCHE 的流动布置为逆流,换热通道为半圆形截面的连续直通通道。PCHE 的三维结构与结构参数如图 2 所示。

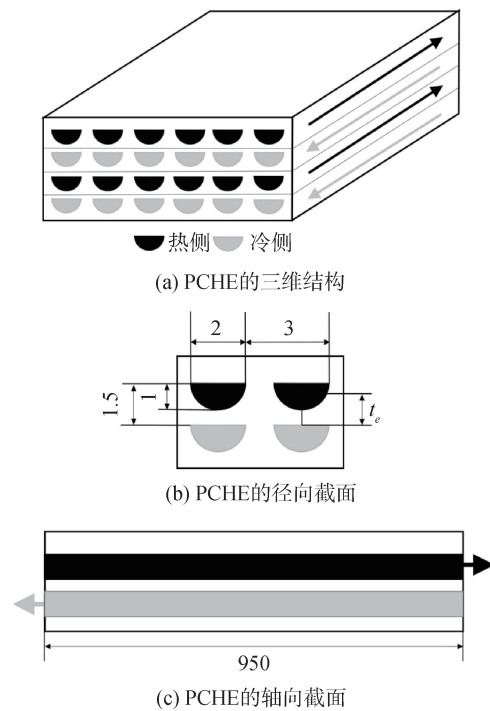


图 2 PCHE 的结构示意

Fig. 2 Structure diagram of PCHE

由于 PCHE 的通道结构较为复杂,其热工水力特性与传统换热器有明显的不同。并且超临界  $\text{CO}_2$  物理性质会在靠近其拟临界区发生剧烈变化,工质在换热通道内流动过程中的热工水力参数变化不可忽视,集总参数法会带来较大的计算误差。因此,本文采用分节点计算方法,并与集总参数法的计算结果进行了比较。根据超临界  $\text{CO}_2$  布雷顿循环系统内回热器的冷热侧进出口温度、压力、流量与换热功率等参数确定边界条件。基于能量均分法,将 PCHE 分为若干具有相同热负荷的换热单元,设计其具体的结构参数,完成换热器的初步设计。采用长度均分法,将 PCHE 分成若干长度相等的换热单

元,建立换热器模型的分节点计算模型,主要数学物理方程如下:

根据能量守恒方程,冷热侧节点内流体的能量守恒方程可表示为:

$$M_{h,n} \frac{dh_{h,n}}{dt} = m_{h,n-1}h_{h,n-1} - m_{h,n}h_{h,n} - q_{h,n} \quad (1)$$

$$M_{c,n} \frac{dh_{c,n}}{dt} = m_{c,n-1}h_{c,n-1} - m_{c,n}h_{c,n} + q_{c,n} \quad (2)$$

式中: $m_{h,n}$ 与 $m_{c,n}$ 分别表示各节点进出口处的流体质量流量; $h_{h,n}$ 与 $h_{c,n}$ 分别表示各节点进出口处流体的比焓; $q_{h,n}$ 与 $q_{c,n}$ 分别表示各节点内由金属壁面传递到冷热侧流体的热量; $n$ 个节点长度之和等于 PCHE 换热通道的总长度。

半圆形流道的水力直径 $d_{eq}$ 及雷诺数 $Re$ 为:

$$d_{eq} = 4\pi d^2 / \left( 8\left( \pi \frac{d}{2} + d \right) \right) \quad (3)$$

$$Re = \rho u d_{eq} / \mu \quad (4)$$

式中: $u$ 为节点中的流体流速; $\rho$ 为流体密度; $\mu$ 为动力粘度。超临界 CO<sub>2</sub> 半圆形直通道型 PCHE 的冷热侧努赛尔数与摩擦阻力系数分别为<sup>[12]</sup>:

热侧:

$$\begin{cases} Nu = 0.051 4Re^{0.76} Pr^{0.55} \\ f = 0.838 5Re^{-0.597 8} + 0.003 31 \end{cases} \quad (5)$$

冷侧:

$$\begin{cases} Nu = 0.071 8Re^{0.71} Pr^{0.55} \\ f = 0.865 7Re^{-0.597 8} + 0.004 05 \end{cases} \quad (6)$$

节点冷热侧通道总传热系数 $U$ 为:

$$U = 1 / \left( \frac{1}{h_h} + \frac{t_e}{k_w} + \frac{1}{h_c} \right) \quad (7)$$

式中: $h_h$ 和 $h_c$ 为热侧和冷侧的对流传热系数; $t_e$ 为板厚; $k_w$ 为 PCHE 的壁面导热系数。

热侧和冷侧的传热系数为:

$$h_h = Nu \cdot k_h / d_{eq}, h_c = Nu \cdot k_c / d_{eq} \quad (8)$$

式中: $k_h$ 和 $k_c$ 分别为冷热侧流体的导热系数; $d_{eq}$ 为通道的水力直径。

考虑到 PCHE 的半圆形流道结构,换热通道等效板厚 $t_e$ 及节点的压降分别为<sup>[21]</sup>:

$$t_e = H_c - \frac{\pi d}{8} \quad (9)$$

$$\Delta p_n = 2f\rho u^2 l_n / d_{eq} \quad (10)$$

式中: $f$ 为达西阻力系数; $u$ 为流体流速; $l_n$ 为每个节点的长度。

根据式(1)与(9)求得通道节点内的焓值与压力后,调用物性数据库计算得到节点内的温度:

$$\begin{cases} P_{h,n} = P_{h,n-1} - \Delta p_{h,n} \\ T_{h,n} = f(h_{h,n}, P_{h,n}) \end{cases} \quad (11)$$

冷热通道节点内换热功率 $q_n$ 为:

$$q_n = (T_{h,n} - T_{c,n}) U_n A_n \quad (12)$$

式中: $U_n$ 为换热通道节点内的总传热系数; $A_n$ 为节点的总换热面积。

单个通道的总换热量 $Q$ 和压降 $\Delta P$ 分别为所有节点内的换热功率 $q_n$ 和压降 $\Delta p_n$ 之和:

$$Q = q_1 + q_2 + \dots + q_{n-1} + q_n \quad (13)$$

$$\Delta P = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \dots + \Delta p_{n-1} + \Delta p_n \quad (14)$$

PCHE 的总换热功率为总传热通道数乘以单通道的换热功率。

## 2 计算结果分析与讨论

根据超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环系统主要设备布置,PCHE 热侧入口与透平出口相连,边界条件为(714.15 K, 8.6 MPa),冷侧入口与压缩机出口相连,边界条件为(352.46 K, 15.5 MPa)。根据能量守恒定理和能量均分法设计的 PCHE 参数如表 1 所示。

表 1 PCHE 稳态设计参数

Table 1 Steady state design parameters of PCHE

参数	数值
板片通道数	100
板片数	188
PCHE 换热通道长度 $L$ /mm	950
通道质量流量 $M$ /(kg/s)	26.3
换热功率 $P_{th}$ /(MW)	10
高温侧入口温度 $T_{h,in}$ /K	714.15
高温侧出口温度 $T_{h,out}$ /K	385.63
低温侧入口温度 $T_{c,in}$ /K	352.46
低温侧出口温度 $T_{c,out}$ /K	615.15
高温侧入口压力 $P_{h,in}$ /MPa	8.6
高温侧出口压力 $P_{h,out}$ /MPa	8.3
低温侧入口压力 $P_{c,in}$ /MPa	15.5
低温侧出口压力 $P_{c,out}$ /MPa	15.4

在获得 PCHE 的设计参数后,根据长度均分法将换热器分成若干节点,然后按照设计参数给出的边界条件进行稳态计算。不同节点数计算结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,随着节点数的增加,计算结果与设计值之间的误差逐渐减小。当节点数为 10 时,PCHE 换热功率 $P_{th}$ 的相对误差为 11.0%。而随着节点数的增加,误差逐渐减小。当节点数大于等于 50 时, $P_{th}$ 的相对误差降低至 3%。对于 PCHE 的出口温度,在给定的高低侧入口温度下,不同节点数的 $T_{h,out}$ 和 $T_{c,out}$ 的相对误差均小于 3.2%。当节点数为 50 时,相对误差减小到 0.5%左右。但 PCHE 的进出口压力对节点数的变化相对不敏感,进出口压力的相对误差几乎保持不变。如表 3 所示,与集总参数法相比,分节点法的计算精度显著提高。

表 2 不同节点数的计算结果与相对误差

Table 2 Calculation results and relative errors of different node numbers

参数	节点数: 10		节点数: 20		节点数: 50		节点数: 100	
	计算值	误差/%	计算值	误差/%	计算值	误差/%	计算值	误差/%
$P_{th}/MW$	11.10	11.00	10.56	5.60	10.27	2.70	10.12	1.20
$T_{h,in}/K$	714.15	—	714.15	—	714.15	—	714.15	—
$T_{h,out}/K$	373.50	3.15	380.30	1.38	383.60	0.53	384.60	0.27
$T_{c,in}/K$	352.46	—	352.46	—	352.46	—	352.46	—
$T_{c,out}/K$	596.46	3.04	607.24	1.29	612.50	0.43	614.10	0.17
$P_{h,in}/MPa$	8.60	—	8.60	—	8.60	—	8.60	—
$P_{h,out}/MPa$	8.31	0.12	8.30	0	8.30	0	8.30	0
$P_{c,in}/MPa$	15.50	—	15.50	—	15.50	—	15.50	—
$P_{c,out}/MPa$	15.38	0.13	15.38	0.13	15.38	0.13	15.38	0.13

表 3 集总参数法与 50 节点数的计算误差比较

Table 3 Comparison of calculation errors between lumped parameter method and sub node calculation method

参数	集总参数法	集总参数法相对误差/%	节点数 50	节点数相对误差/%
$P_{th}$	10.89	8.90	10.27	2.70
$T_{h,in}/K$	714.15	—	714.15	—
$T_{h,out}/K$	379.70	1.38	383.60	0.53
$T_{c,in}/K$	352.46	—	352.46	—
$T_{c,out}/K$	625.10	1.62	612.50	0.43
$P_{h,in}/MPa$	8.60	—	8.60	—
$P_{h,out}/MPa$	8.50	1.20	8.30	0
$P_{c,in}/MPa$	15.50	—	15.50	—
$P_{c,out}/MPa$	15.35	0.32	15.38	0.13

同时,考虑到计算的时间成本,当模拟时间设为 1 000 s 时,10、20、50、100 节点所需的计算时间分别为 103、326、959、2 602 s。当节点数小于 100 时,该计算方法能满足实时仿真的要求(实际计算时间小于等于总仿真时间)。因此,节点数为 50 的一维离散方法能较好兼顾计算精度和计算成本。

图 3 和 4 显示了 PCHE 热侧和冷侧的温度和压力分布,图 5 显示了热侧和冷侧节点的温差和传热功率。最大温差出现在 PCHE 热侧入口段附近,最

大温差为 108.9 K,换热功率沿热侧流体的流动方向逐渐减小。PCHE 换热通道的普朗特数、雷诺数和阻力系数的计算结果如图 6 所示,热侧和冷侧节点的换热系数如图 7 所示。热侧流体的对流换热系数在入口和出口侧较高,在流道中部较低。此外,由于冷侧流体状态更靠近 CO<sub>2</sub> 的拟临界区,其对流换热系数远高于热流体,冷侧流体的对流换热系数沿流动方向由 5 298.2 W/(m<sup>2</sup>·K) 降低至 3 281.5 W/(m<sup>2</sup>·K)。换热通道的总传热系数  $U$  在 1 500 W/(m<sup>2</sup>·K)。PCHE 换热通道整体的热工水力参数与文献[22-23]的计算结果吻合较好。

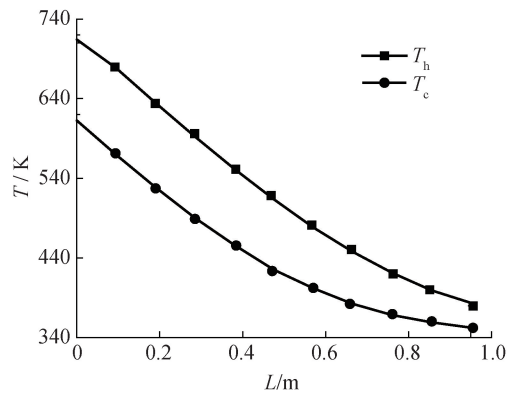
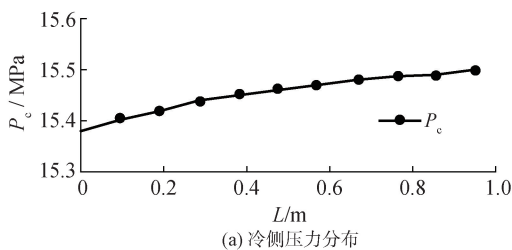
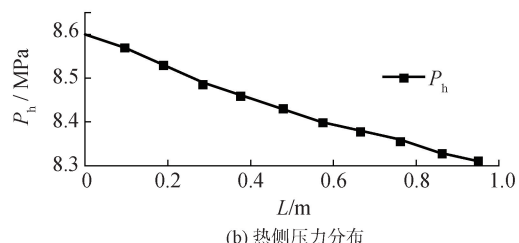


图 3 PCHE 换热通道的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of PCHE



(a) 冷侧压力分布



(b) 热侧压力分布

图 4 PCHE 冷热侧压力分布

Fig. 4 Pressure distribution of PCHE

结果表明,与集总参数法相比,分节点法能更好计算 PCHE 内热工水力参数沿流动方向上的变化,并能清晰展示换热通道节点内温度、压力、换

热功率等主要参数的分布,并且有助于分析换热器内的流动换热过程。此外,由于超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环的反应堆、压缩机、透平等主要设备对工

质温度和压力的变化非常敏感,特别是压缩机的进口参数接近 CO<sub>2</sub> 的临界温度和压力,CO<sub>2</sub> 的密度、比热容、热导率等参数会随着温度和压力的变

化急剧波动,这将影响整个系统的运行特性。因此,有必要采用分节点法提高 PCHE 热工水力参数的计算精度。

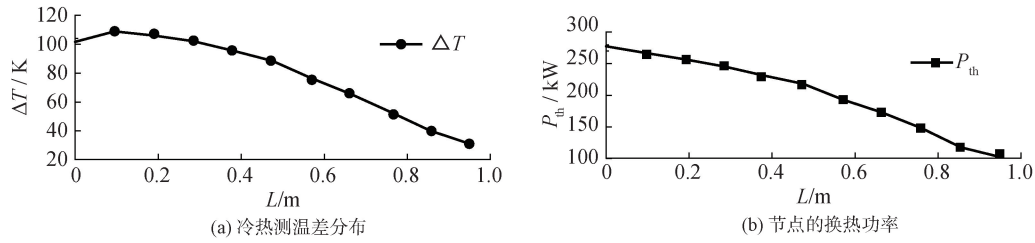
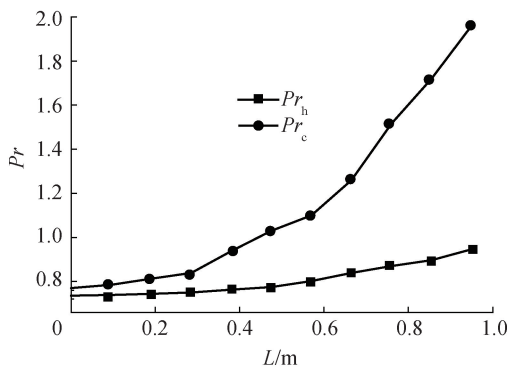
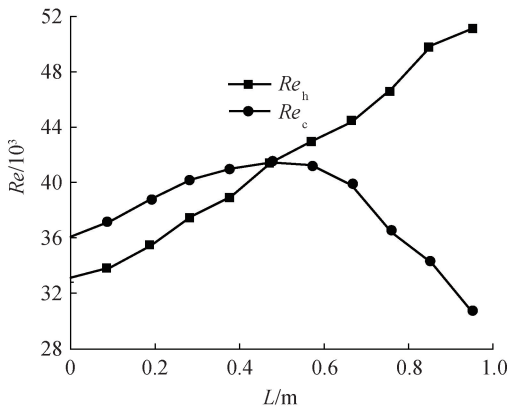


图5 PCHE 的传热功率分布与温差

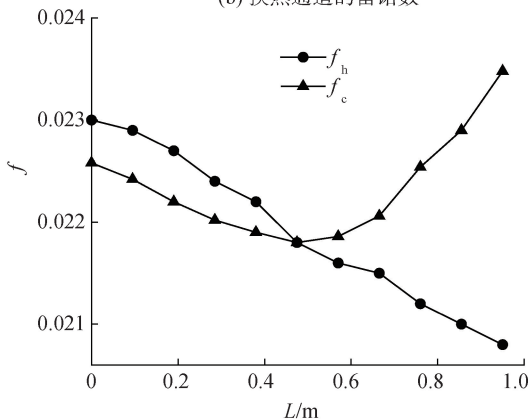
Fig. 5 Heat exchange power distribution and temperature difference of PCHE



(a) 换热通道的普朗特数



(b) 换热通道的雷诺数



(c) 换热通道的阻力系数

图6 PCHE 换热通道内的热工水力参数分布

Fig. 6 Thermal-hydraulic parameter distribution in PCHE heat exchange channel

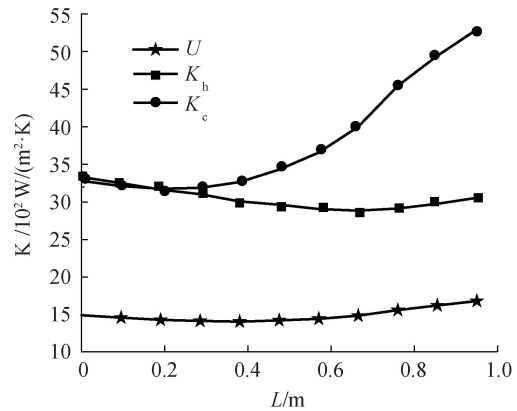


图7 PCHE 的换热系数分布

Fig. 7 Distribution of Heat exchange coefficient of PCHE

### 3 结论

1) 计算结果表明,分节点计算方法能较好地显示流体流动方向上温度、压力的变化以及换热通道内的功率分布。

2) 超临界 CO<sub>2</sub> 在 PCHE 中的物理性质沿流动方向发生显著变化。采用节点法可显著提高程序的计算精度。

3) 考虑到 PCHE 模型的计算精度和计算速度要求,选取 20~50 个节点较为合理。

4) 研究结果验证了 PCHE 分节点计算方法的可行性和高精度,为 SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环系统 PCHE 的运行特性分析提供了参考,该方法同样适用于 PCHE 的快速设计与结构优化。

后续研究将考虑瞬态工况下 PCHE 的动态参数响应特性,并对算法和模型进行进一步优化。根据超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环系统其他主要设备的物理模型,建立完整的系统分析程序,研究 PCHE 与循环中其他主要设备瞬态工况下的耦合影响作用。

### 参考文献:

[1] LOCATELLI G, MANCINI M, TODESCHINI N. Generation IV nuclear reactors: current status and future prospects [J]. Energy policy, 2013, 61: 1503-1520.

- [2] WANG Mingkun, ZHAO Pan, WANG Jiaying, et al. Conceptual design and parametric study of combined carbon dioxide/organic Rankine cycles [J]. *Applied thermal engineering*, 2016, 103: 759–772.
- [3] SARKAR J. Second law analysis of supercritical CO<sub>2</sub> recompression Brayton cycle [J]. *Energy*, 2009, 34(9): 1172–1178.
- [4] LAMBRUSCHINI F, LIESE E, ZITNEY S E, et al. Dynamic model of a 10 MW supercritical CO<sub>2</sub> recompression brayton cycle [C]//*Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, 2016.
- [5] WHITE M T, BIANCHI G, CHAI Lei, et al. Review of supercritical CO<sub>2</sub> technologies and systems for power generation[J]. *Applied thermal engineering*, 2021, 185: 116447.
- [6] LIU Guangxu, HUANG Yanping, WANG Junfeng, et al. A review on the thermal-hydraulic performance and optimization of printed circuit heat exchangers for supercritical CO<sub>2</sub> in advanced nuclear power systems[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2020, 133: 110290.
- [7] GKOUNTAS A A, STAMATELOS A M, KALFAS A I. Recuperators investigation for high temperature supercritical carbon dioxide power generation cycles[J]. *Applied thermal engineering*, 2017, 125: 1094–1102.
- [8] HUANG Changye, CAI Weihua, WANG Yue, et al. Review on the characteristics of flow and heat transfer in printed circuit heat exchangers[J]. *Applied thermal engineering*, 2019, 153: 190–205.
- [9] 史新鑫, 闫栋, 王玮, 等. 印刷电路板式换热器流道结构优化研究[J]. *材料开发与应用*, 2023, 38(2): 53–56.  
SHI Xinxin, YAN Dong, WANG Wei, et al. Optimization of flow path structure of printed circuit plate heat exchanger [J]. *Materials development and application*, 2023, 38(2): 53–56.
- [10] CHENG Keyong, ZHOU Jingzhi, ZHANG Huzhong, et al. Experimental investigation of thermal-hydraulic characteristics of a printed circuit heat exchanger used as a pre-cooler for the supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle [J]. *Applied thermal engineering*, 2020, 171: 115116.
- [11] KRUIZENGA A F D, CARLSON M, ANSTEY M. Supercritical CO<sub>2</sub> heat exchanger fouling. *Proceeding of the 4th international symposium-supercritical CO<sub>2</sub> power cycles*, Pittsburgh [J]. *Applied thermal engineering*, 2014.
- [12] NIKITIN K, KATO Y, NGO L. Printed circuit heat exchanger thermal-hydraulic performance in supercritical CO<sub>2</sub> experimental loop[J]. *International journal of refrigeration*, 2006, 29(5): 807–814.
- [13] MESHAM A, JAISWAL A K, KHIVSARA S D, et al. Modeling and analysis of a printed circuit heat exchanger for supercritical CO<sub>2</sub> power cycle applications [J]. *Applied thermal engineering*, 2016, 109(8): 61–70.
- [14] 刘凯, 彭军, 赵富龙, 等. 直通道 PCHE 内 S-CO<sub>2</sub> 与铅铋合金耦合换热特性数值分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2023, 44(12): 2103–2111.
- LIU Kai, PENG Jun, ZHAO Fulong, et al. A numerical analysis of the S-CO<sub>2</sub> coupled with lead-bismuth eutectic heat transfer characteristics in straight channel PCHE [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(12): 2103–2111.
- [15] GUO Jiangfeng. Design analysis of supercritical carbon dioxide recuperator [J]. *Applied energy*, 2016, 164: 21–27.
- [16] SCHMITT J, AMOS D, KAPAT J. Design and real fluid modelling of micro-channel recuperators for a nominal 100 MW class recuperated recompression brayton cycle using supercritical carbon dioxide [C]//*Proceedings of ASME turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition*, Montreal, 2015.
- [17] CLEMENTONI E M, COX T L, KING M A. Response of a compact recuperator to thermal transients in a supercritical carbon dioxide brayton cycle [C]//*Proceedings of ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, Charlotte, 2017.
- [18] JIANG Yuan, LIESE E, ZITNEY S E, et al. Design and dynamic modeling of printed circuit heat exchangers for supercritical carbon dioxide Brayton power cycles [J]. *Applied energy*, 2018, 231: 1019–1032.
- [19] XU Hong, DUAN Chengjie, DING Hao, et al. The optimization for the straight-channel PCHE size for supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle[J]. *Nuclear engineering and technology*, 2021, 53(6): 1786–1795.
- [20] MING Yang, LIU Kai, ZHAO Fulong, et al. Dynamic modeling and validation of the 5 MW small modular supercritical CO<sub>2</sub> Brayton-Cycle reactor system [J]. *Energy conversion and management*, 2022, 253: 115184.
- [21] 徐哲, 张明辉, 段天应, 等. 超临界二氧化碳在印刷电路板式换热器内的流动换热特性研究[J]. *原子能科学技术*, 2021, 55(5): 849–855.  
XU Zhe, ZHANG Minghui, DUAN Tianying, et al. Flow and heat transfer characteristic study of supercritical CO<sub>2</sub> in printed circuit heat exchanger[J]. *Atomic energy science and technology*, 2021, 55(5): 849–855.
- [22] 刘凯, 明杨, 胡朝营, 等. 印刷电路板换热器中 S-CO<sub>2</sub> 换热特性数值分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2021, 42(12): 1777–1785.
- LIU Kai, MING Yang, HU Chaoying, et al. Numerical analysis of S-CO<sub>2</sub> heat transfer characteristics in a printed circuit heat exchanger[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2021, 42(12): 1777–1785.
- [23] LIU Kai, ZHAO Fulong, JIN Yang, et al. S-CO<sub>2</sub> heat transfer characteristics analysis in PCHE and vertical channel [J]. *Progress in nuclear energy*, 2022, 154: 104472.

#### 本文引用格式:

- 明杨, 金璐, 杨雯, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 印刷电路板换热器热工水力特性研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2024, 45(4): 819–824.  
MING Yang, JIN Yang, YANG Wen, et al. Thermal-hydraulic characteristics of a printed circuit board heat exchanger using supercritical carbon dioxide [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2024, 45(4): 819–824.