

印刷电路板换热器在超临界二氧化碳布雷顿循环系统中的动态特性研究

李占英, 王江峰, 娄聚伟, 郭心如, 赵攀

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了制定有效的系统控制策略, 保证系统安全稳定运行, 针对印刷电路板换热器(PCHE)在核能超临界二氧化碳布雷顿循环中作为回热器的应用进行了研究, 分析了 PCHE 在不同扰动条件下的性能表现。采用分段设计方法, 构建了一维稳态设计模型, 对 PCHE 进行了稳态传热设计及分析。以稳态设计作为初始条件, 利用 Simulink 软件, 建立了 PCHE 的动态仿真模型, 模拟了流体入口温度或流量发生变化时 PCHE 的动态响应。结果表明: 回热器冷侧入口温度发生变化时, 热侧出口温度变化明显, 出现了约 12 K 波动, 且热侧出口温度响应相对较快, 而热侧入口温度变化对热侧出口温度影响微小, 仅波动 1 K 左右; 流量变化对回热器效能影响较大, 冷侧流量减小或热侧流量增加使得回热器效能降低了 6% 左右, 较大的回热器热惯性使得两侧出口温度对流量的响应较慢, 出现了一定的延迟。研究结果可为系统调节与控制提供可靠的指导。

关键词: 印刷电路板换热器; 传热系数; 超临界二氧化碳; 动态响应

中图分类号: TK05 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202412004 **文章编号:** 0253-987X(2024)12-0034-11

Dynamic Characteristic Analysis of Printed Circuit Heat Exchangers in Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle Systems

LI Zhanying, WANG Jiangfeng, LOU Juwei, GUO Xinru, ZHAO Pan

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to develop an effective control strategy for the system and ensure its safe and stable operation, the application of the printed circuit heat exchanger (PCHE) is investigated as a regenerator in the nuclear supercritical carbon dioxide Brayton cycle, with an analysis of the performance of PCHE under different disturbance conditions. A one-dimensional steady-state design model for PCHE is constructed using the segmented design method to analyze the steady-state heat transfer characteristics of PCHE. Using the steady-state design as the initial condition, a dynamic simulation model of PCHE is established using Simulink software to simulate the transient response of PCHE to changes in fluid inlet temperature or flow rate. The results show that when the inlet temperature on the cold side changes, a significant change is observed in the outlet temperature on the hot side, with a fluctuation of about 12 K, and the temperature response of the hot side outlet temperature is relatively fast. Conversely, the inlet temperature of the hot side has a minor effect on the outlet temperature of the hot side, with a fluctuation of only

收稿日期: 2024-03-24。 作者简介: 李占英(1984—), 女, 硕士生; 王江峰(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。

基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(51976147)。

网络出版时间: 2024-05-31

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20240531.1131.006>

about 1 K. Furthermore, variations in flow rate substantially impact the efficiency of the regenerator. A decrease in the cold side flow rate or an increase in the hot side flow rate leads to a reduction in regenerator efficiency by about 6%. Additionally, the larger thermal inertia of the regenerator results in a delayed response of the temperature at both sides of the outlet to the flow rate. These results can offer reliable guidance for system regulation and control.

Keywords: printed circuit heat exchanger; heat transfer coefficient; supercritical carbon dioxide; dynamic response

为降低化石能源消耗、减少碳排放,实现经济社会可持续发展,社会各界正在积极推动清洁能源的发展。研究人员广泛开展了对新型高效动力循环和设备的研究,旨在提升能量转化效率,更好地实现能源的综合利用。超临界二氧化碳(SCO₂)布雷顿循环作为一种高效新型的动力循环,以结构紧凑、占地面积小、循环热效率高、安全环保等优势而备受关注,特别是在 450℃ 以上的温度工况下,其热效率可高达 40% 以上,该技术被普遍视为最具前景的动力循环之一^[1]。热交换设备作为布雷顿循环系统的关键设备,其性能直接关系到系统的安全运行和循环效率的提升。新型高效紧凑式印刷电路板换热器(PCHE)具有换热效率高、结构紧凑、占地空间小、承压高和耐高温能力强等特点,特别适用于 SCO₂ 布雷顿循环发电系统,被认为在太阳能、地热、核能、氢能、工业余热回收等领域具有广泛应用潜力^[2]。

PCHE 最早于 1985 年由 Heatric 公司生产,并广泛应用于气气、气液换热^[3]。近年来,随着太阳能、核电、氢能等清洁能源的不断开发和制造技术的进步,SCO₂ 布雷顿循环系统再次受到了重视,PCHE 也再次引起了人们的广泛关注。PCHE 的主要换热元件为金属板片,采用化学蚀刻加工金属板片形成细小通道(通道直径通常为 1~4 mm^[4]),蚀刻好的板片紧密贴合,并通过扩散焊接的方式使板片接触面的原子相互扩散完成焊接,形成完整的换热芯体。

目前,国内外学者对 PCHE 已展开了大量研究,多数集中于稳态设计及性能分析方面。许多学者研究了不同流道结构型式(直通道、Z 字型通道、S 型流道、翼型)对 PCHE 换热性能的影响^[5-8],还有一部分学者对 PCHE 的结构参数^[9-11]及不同工质特性^[12-13]进行了分析。此外,还有涉及 PCHE 具体应用的研究。例如:Guo 等^[14]利用分段设计法研究了回热器局部性能随换热量累积时的变化规律,分析了轴向导热在 PCHE 中的影响;Ma 等^[15]分析总结

了 PCHE 中 4 种典型通道结构的热工水力性能以及相关的传热和压降经验关联式,并列举了 PCHE 在太阳能热能方面的应用和改进。

近几年,也有少数研究者对 PCHE 在超临界 CO₂ 布雷顿循环中的动态响应规律开展了研究。Clementoni 等^[16]介绍了美国海军核实验室进行的综合系统测试(IST),研究了 100 kW 系统在启动和功率变化过程时回热器的瞬态特性;Jiang 等^[17]使用 Aspen Custom Modeler 软件开发了 10 MW 超临界 CO₂ 再压缩布雷顿循环回热器的动态模型,用于预测 PCHE 的响应特性,发现 PCHE 入口温度和流量变化的时间常数远小于传统的管壳式换热器;Ma 等^[18]利用 CFD 开发了 1 000 MW 燃煤 SCO₂ 布雷顿循环发电系统中的 PCHE 动态响应模型,分析了层流状态下冷热流体的进口参数变化时的动态响应趋势和平衡时间;Chen 等^[19]建立了 10 MW 级塔式聚光太阳能 SCO₂ 布雷顿循环发电系统的 PCHE 回热器动态模型,研究了直射辐射强度在 780 W·m⁻² 和 970 W·m⁻² 之间变化时,PCHE 冷侧出口温度和 SCO₂ 布雷顿循环效率的波动情况;Ding 等^[20]在 Modelica 平台中建立了 PCHE 作为预冷器的动态模型,研究了功率突降的瞬态工况下 PCHE 响应规律。

综上所述可知,当前研究主要集中在通过数值模拟和实验方式研究不同流道结构型式、不同几何参数及不同工质对流动和传热特性的影响,侧重于对换热器自身性能的研究。对 PCHE 瞬态特性的研究仍然相对有限且存在一定局限性,特别是对 PCHE 作为 SCO₂ 回热器结合特定工况的传热特性分析及动态特性温度分布研究较少,该研究对于非稳态运行工况(如启动阶段或者运行状态发生波动)的控制及优化策略具有重要作用。

本文结合核能 SCO₂ 布雷顿循环中回热器的典型应用工况,对 PCHE 进行了详细的设计分析,不仅考虑了工况参数对换热器性能的影响,还深入探

讨了雷诺数、传热系数、压降等关键参数沿长度方向的变化规律,为 PCHE 设计提供了更为精确和实用的理论依据。在 PCHE 稳态设计基础上,基于质量和能量守恒,利用 Simulink 建立了 PCHE 的动态模型,模拟了 PCHE 在湍流状态不同扰动下的瞬态响应,并进一步对动态特性进行了分析。与以往对 PCHE 的动态分析相比,本文采用 Simulink 具有更高的灵活性和适用性,能够综合考虑实际运行工况参数的影响,从而更真实地反映 PCHE 在实际运行中的特性,为系统运行和控制提供指导。

1 模型建立

1.1 几何模型

PCHE 常见的 4 种通道结构型式分别为直通、Z 字型、S 型和翼型结构,其中 S 型和翼型加工制造较复杂,因此目前多数仍选用直通、Z 字型结构,本文主要研究 PCHE 的传热性能及瞬态特性,采用半圆形直通结构,通道直径为 2 mm。PCHE 流道截面结构图如图 1 所示,一个传热单元由热流通道、冷流通道和其周围的固体金属组成,横截面的高度和宽度分别为 2.6 mm 和 3.2 mm。

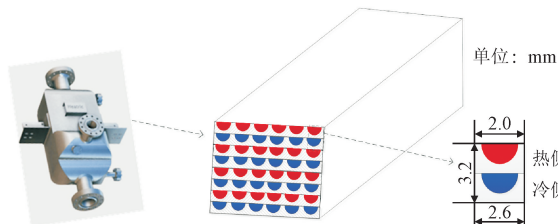


图 1 PCHE 流道截面结构图

Fig. 1 The channel section structure diagram of PCHE

1.2 数学模型

为了分析特定工况下 PCHE 的传热性能及动态特性,本文分别构建了 PCHE 的一维稳态设计和动态仿真模型,并在模型中做如下假设:

- (1) 热交换设备与外界无热量交换,且不考虑污垢热阻;
- (2) 各通道的质量流量均匀分布,且不考虑入口效应;
- (3) 流体温度只沿流道长度方向变化,沿半径方向的温度分布均匀;
- (4) 热交换设备内的工质布置为逆流。

1.2.1 稳态设计模型

超临界二氧化碳即二氧化碳的压力和温度均处

于临界值(7.38 MPa, 31.04 °C)以上,其物性随温度变化较明显,尤其在临界点附近物性变化剧烈,会造成换热过程的不稳定。图 2 给出了 SCO_2 在不同压力(7.5、8.5、10、20 MPa)下比定压热容随温度的变化。可以看出,随着温度的升高,二氧化碳的比定压热容变化较大,尤其是在临界点附近,先急剧升高达到峰值,之后急剧降低。

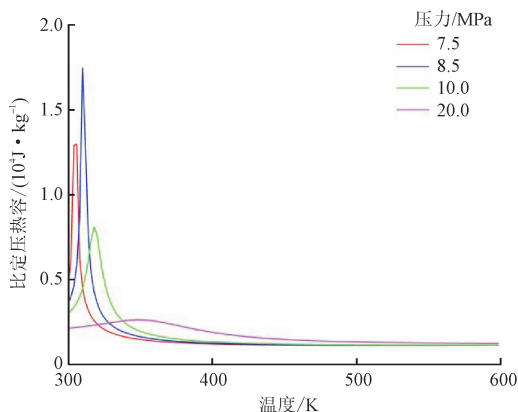


图 2 SCO_2 在不同压力和温度下的比定压热容

Fig. 2 Specific heat capacity of SCO_2 at different pressures and temperatures

本文采用 MATLAB 建立了 PCHE 的一维稳态设计程序,由于物性参数随温度剧烈变化,导致传热系数和阻力损失在换热过程中均不稳定,因此采取了离散化的设计方法,将整个回热器沿流道长度方向按照冷侧温度平均划分成 n 段,每段温差相等。通过平均对数温差的方法,分别计算每一段的传热系数和阻力损失,最终得到换热器面积和结构尺寸。计算过程中冷热侧物性参数通过调用 REFPROP 软件获得,定性温度取每小段进出口的平均值。

图 3 给出了 PCHE 一维稳态设计流程。首先,按每段温差相等将冷侧温度平均分段,通过热平衡方程根据冷侧流量和进出口温度计算热侧每小段的出口温度;然后,假定结构参数初始值,结合工况参数计算出流速和雷诺数并判断流动状态,计算出每一小段的总传热系数、传热面积和长度,累积相加得到换热器的总传热面积和总长度,此时判断总长度是否满足目前加工限制要求(Heatric 公司目前可生产的 PCHE 芯体块的最大板片尺寸为 $600 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}^{[3]}$),若不满足则需返回调整结构尺寸,直到长度小于等于 1.5 m;最后,根据阻力计算公式计算换热器压降,保证压降在允许范围内。

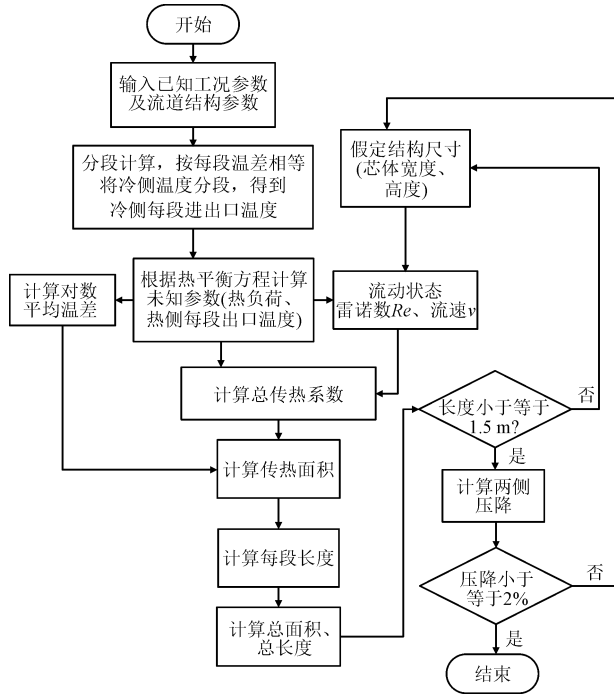


图 3 PCHE 一维稳态设计流程

Fig. 3 Design flow of PCHE about 1D steady state

稳态设计过程中涉及的参数计算公式如下。第 i 段的换热量 Q_i 为

$$Q_i = c_{p,i} m_i \Delta T_i \quad (1)$$

式中: $c_{p,i}$ 为第 i 段平均比定压热容; m_i 为冷侧质量流量; ΔT_i 为第 i 段冷侧进出口温差。第 i 段对数平均温差 ΔT_i 为

$$\Delta T_i = \frac{(\Delta T_L - \Delta T_M)}{\ln(\Delta T_L / \Delta T_M)} \quad (2)$$

式中: ΔT_L 、 ΔT_M 分别为端部温差两者中的大者和小者。第 i 段总传热系数 U_i (忽略污垢) 的计算公式为

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_h} + \frac{\delta_p}{\lambda_p} \quad (3)$$

式中: h_c 为冷侧表面对流换热系数; h_h 为热侧表面对流换热系数; δ_p 为金属壁面的厚度; λ_p 为金属材料的热导率。表面对流换热系数 h 为

$$h = \frac{\lambda_i Nu}{D_h} \quad (4)$$

第 i 段换热面积计算公式

$$A_i = \frac{Q_i}{U_i \Delta T_i} \quad (5)$$

通道水力直径为

$$D_h = \frac{\pi d}{\pi + 2} \quad (6)$$

式中: d 为半圆形通道的直径。雷诺数表达式为

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad (7)$$

式中: ρ 为 SCO_2 密度; u 为通道内平均流速; μ 为动力黏度。采用 Gnielinski 关联式^[21] 求努塞尔数, 表达式如下

$$Nu = \frac{(f_d/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(Pr^{2/3} - 1) \sqrt{f_d/8}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (8)$$

式(8)使用范围为 $2300 < Re < 5 \times 10^6$ 、 $0.5 < Pr < 2000$ 。采用 Flionenko 关联式^[21] 求阻力系数, 表达式为

$$f_d = (1.82 \lg Re - 1.64)^{-2} \quad (9)$$

长度通过换热面积计算得到, 计算式为

$$L = \frac{A}{(0.5\pi d + d)N} \quad (10)$$

式中: N 为通道数; A 为换热器传热面积。压降计算式为

$$\Delta p = \frac{f L G^2}{2 D_h \rho} \quad (11)$$

式中: G 为质量流率。回热器效能 ϵ 定义为

$$\epsilon = \frac{\max((t'_h - t''_h), (t'_c - t'_c))}{t'_h - t'_c} \quad (12)$$

式中: t'_h 、 t''_h 分别为热侧进出口温度, K; t'_c 、 t'_c 分别为冷侧进出口温度, K。

1.2.2 动态数学模型

本文采用换热器有限体积动态模型, 将 PCHE 沿长度分段, 分割成 n 个控制体。假设每个控制体内各参数是统一的, 压力沿流动方向线性分布。采用质量守恒和能量守恒方程描述换热器中的动态特性, 即在每个控制体内求解质量守恒、冷侧能量守恒、壁面能量守恒和热侧能量守恒等方程^[22], 具体计算公式如下。质量守恒方程为

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial z} + \frac{\partial (A_s \rho)}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

式中: $\dot{m}$ 、 A_s 分别为 CO_2 的质量流量、流道横截面积; z 和 t 为流动方向位置和时间。冷侧的能量守恒方程为

$$\rho_c A_c \frac{\partial h_c(z, t)}{\partial t} = -\dot{m}_c \frac{\partial h_c}{\partial z} + A_{c,w} \alpha_{c,w} (T_w - T_c) \quad (14)$$

式中: h_c 、 $\dot{m}_c$ 、 T_c 分别为冷侧 CO_2 的焓值、质量流量和温度; $A_{c,w}$ 、 $\alpha_{c,w}$ 分别为冷侧的换热面积及表面换热系数; T_w 为壁面温度。金属壁面的能量守恒方程为

$$m_w c_{p,w} \frac{\partial T_w(z, t)}{\partial t} = A_{c,w} \alpha_{c,w} (T_c - T_w) + A_{h,w} \alpha_{h,w} (T_h - T_w) \quad (15)$$

式中： m_w 、 $c_{p,w}$ 分别为每个控制体的金属板质量和比定压热容； $A_{h,w}$ 、 $\alpha_{h,w}$ 分别为热侧的换热面积及表面换热系数； T_h 为热侧 CO_2 温度。热侧的能量守恒方程为

$$\rho_h A_h \frac{\partial h_h(z,t)}{\partial t} = \dot{m}_h \frac{\partial h_h}{\partial z} + A_{h,w} \alpha_{h,w} (T_w - T_h) \tag{16}$$

式中： h_h 、 $\dot{m}_h$ 分别为热侧 CO_2 的焓值和质量流量。

在每一个控制体内,对上述方程进行差分,得到如下计算式。质量守恒方程为

$$\dot{m}_{out}(t+\Delta t) - \dot{m}_{in}(t+\Delta t) = \frac{\rho_{out}(t+\Delta t) - \rho_{out}(t)}{\Delta t} V_{node} \tag{17}$$

式中： $\dot{m}_{in}$ 、 $\dot{m}_{out}$ 分别为控制体进出口处 CO_2 的质量流量； ρ_{out} 为出口处 CO_2 密度； V_{node} 为每个控制体的体积； Δt 为差分时间步长。冷侧的能量守恒方程为

$$m_{c,out} \frac{h_{c,out}(t+\Delta t) - h_{c,out}(t)}{\Delta t} = \dot{m}_{c,in}(t) h_{c,in}(t) - \dot{m}_{c,out}(t) h_{c,out}(t) + A_{c,w} \alpha_{c,w} [T_w(t) - T_{c,out}(t)] \tag{18}$$

式中： $m_{c,out}$ 、 $T_{c,out}$ 分别为控制体冷侧出口处 CO_2 质量和温度； $h_{c,in}$ 、 $h_{c,out}$ 、 $\dot{m}_{c,in}$ 、 $\dot{m}_{c,out}$ 分别为冷侧进出口处 CO_2 焓值和质量流量。金属壁的能量守恒方程为

$$\rho_w V_w c_{p,w} \frac{T_w(t+\Delta t) - T_w(t)}{\Delta t} = A_{c,w} \alpha_{c,w} \cdot [T_{c,out}(t) - T_w(t)] + A_{h,w} \alpha_{h,w} [T_{h,out}(t) - T_w(t)] \tag{19}$$

式中： ρ_w 为金属壁材料密度； V_w 为每个控制体金属壁体积； $T_{h,out}$ 为控制体热侧出口处 CO_2 温度。热侧的能量守恒方程为

$$m_{h,out} \frac{h_{h,out}(t+\Delta t) - h_{h,out}(t)}{\Delta t} = \dot{m}_{h,in}(t) h_{h,in}(t) - \dot{m}_{h,out}(t) h_{h,out}(t) + A_{h,w} \alpha_{h,w} [T_w(t) - T_{h,out}(t)] \tag{20}$$

式中： $m_{h,out}$ 为控制体热侧出口处 CO_2 质量； $h_{h,in}$ 、 $h_{h,out}$ 、 $\dot{m}_{h,in}$ 、 $\dot{m}_{h,out}$ 分别为热侧进出口处 CO_2 焓值和质量流量。

2 模型可靠性验证与设计条件

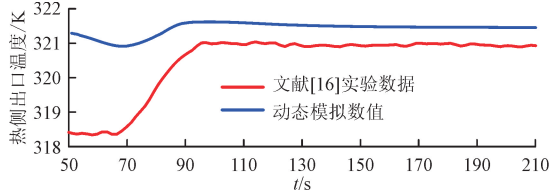
2.1 模型验证

为验证模型正确性,本节采用 1.2.2 小节所建立的动态仿真模型,基于美国海军核实验室的综合系统测试(IST)实验数据^[16],模拟了该系统回热器 5~30 kW 的动态响应特性。冷热侧入口参数按文献^[16]中实验数据设定,如表 1 所示。

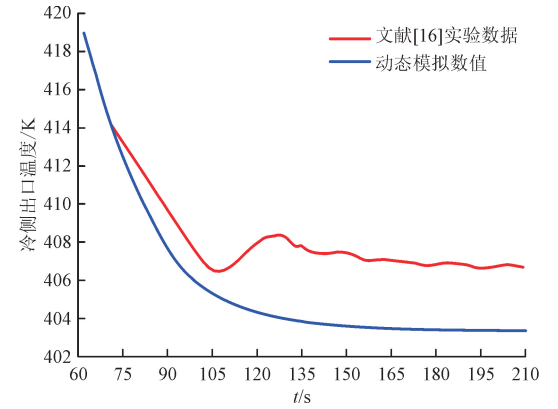
表 1 IST 回热器的入口参数^[16]
Table 1 Inlet parameter of regenerator in the IST^[16]

参数	数值	
	系统功率为 5 kW	系统功率为 30 kW
热侧入口温度/K	476.20	469.15
热侧入口压/MPa	9.25	9.30
热侧质量流量/(kg·s ⁻¹)	2.68	3.53
冷侧入口温度/K	315.15	317.65
冷侧入口压力/MPa	11.85	12.97
冷侧质量流量/(kg·s ⁻¹)	2.79	3.66

仿真模拟得到的冷热侧出口温度与文献^[16]中的实验数据对比结果如图 4 所示。可以看出,由于实验过程中参数会出现波动,尤其两个工况之间冷侧压力波动大,因此冷侧出口温度在 100 s 位置出现明显波动,稳定后热侧出口温度相差约 1 K,误差约 0.3%。冷侧出口温度相差约 4 K,误差约 0.98%。由此说明,本文所建立的动态模型可靠准确。



(a) 热侧出口温度



(b) 冷侧出口温度

图 4 动态模拟数值与文献^[16]实验数据的对比

Fig. 4 Comparison between dynamic simulation data and experimental data in ref. ^[16]

2.2 工况条件

本文设计的 PCHE 为核能 SCO_2 布雷顿循环系统中的回热器,系统流程及计算条件^[23]如图 5 所示。

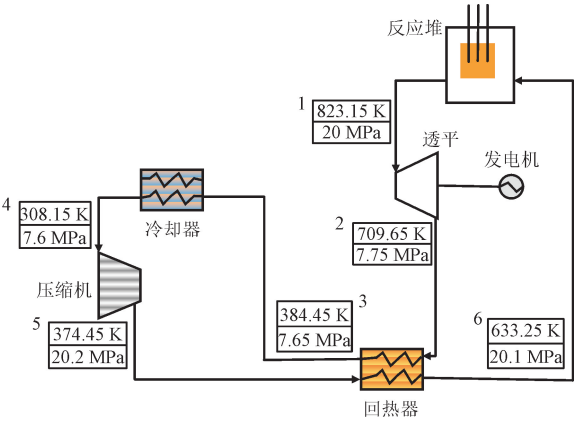


图 5 超临界二氧化碳布雷顿循环系统流程图

Fig.5 Supercritical carbon dioxide Brayton cycle system flow chart

循环系统主要包括透平、压缩机、回热器、冷却器和反应堆等部件,CO₂ 工质进入压缩机升压至高压状态(状态点 4—5),再经回热器预热(状态点 5—6),然后进入热源吸收热量温度升高(状态点 6—1)。高温高压的 CO₂ 进入透平做功(状态点 1—2),透平带动发电机系统进行发电,做功后的乏气进入回热器被冷却(状态点 2—3),再由冷却器冷却至所需的压缩机入口温度(状态点 3—4),进入压缩机形成闭式循环。设定反应堆热源热负荷为 5 MW。根据上述循环系统条件,计算得到回热器设计工况参数,见表 2。

表 2 回热器设计参数

Table 2 Design parameters of regenerator			
位置	温度/K	压力/MPa	质量流量/(kg·s ⁻¹)
热侧进口	709.65	7.75	21.4
热侧出口	384.45	7.65	21.4
冷侧进口	374.45	20.20	21.4
冷侧出口	633.25	20.10	21.4

2.3 模型精度

选择合适的时间步长和空间步长对于准确模拟换热器的动态响应至关重要。本文动态模拟采用 Simulink 提供的自适应步长功能,它可根据系统的动态变化自动调整时间步长,以平衡模拟的速度和精度。求解器选用 ode45,设置的最大时间步长为 0.002 s,容忍度为 0.001。这种自适应步长策略可在保证收敛的同时满足解的精度要求。对于空间步长,总共计算 100 s,对不同分段数(20、30、40)进行了对比,结果如表 3 所示。从中可以看出,30 段与

40 段回热器-冷侧出口温度一致,因此选用 30 段即可以保证仿真精度。

表 3 段数无关性分析

Table 3 Independence of the number of segments		
分段数	耗时/min	冷侧出口温度/K
20	35	606.10
30	52	606.12
40	87	606.12

3 结果及分析

3.1 稳态设计与分析

本小节结合回热器的使用工况特点,根据 1.2.1 小节一维模型和设计流程,对核能 SCO₂ 布雷顿循环中的回热器进行了设计,结果如表 4 所示。之后,分析了回热器的温度分布及换热量、传热系数、阻力损失等参数的变化。

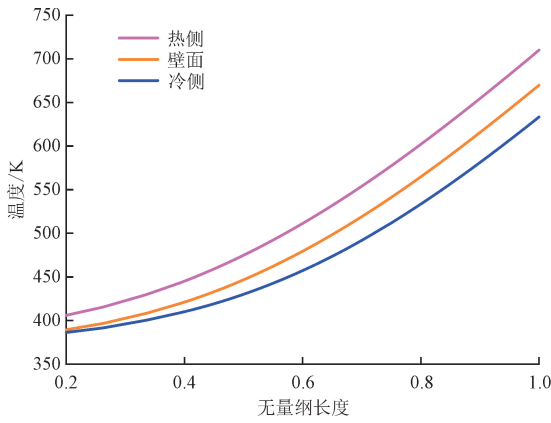
表 4 PCHE 设计结果

Table 4 PCHE design results			
参数	数值	参数	数值
流道直径/mm	2	流道数	1.79×10 ⁴
流道水平间距/mm	2.6	冷侧压降/kPa	28.8
流道纵向间距/mm	1.6	热侧压降/kPa	93.0
热换热面积/m ²	135	回热器效能/%	97
芯体尺寸/(mm×mm×mm)	420×360×1 470		

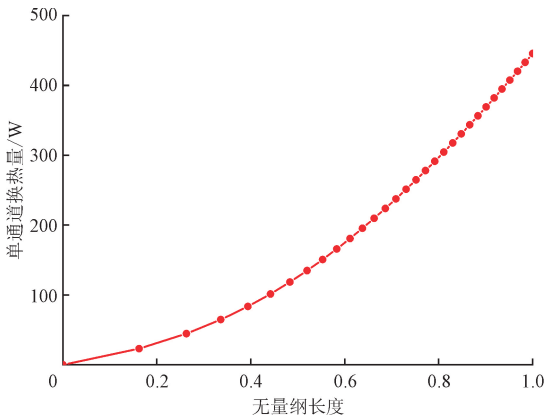
3.1.1 回热器温度及换热量分布

图 6(a)展示了回热器沿流道长度方向的温度分布。可以看出:冷热两侧温度沿长度方向起始升高较缓慢而后上升速度加快,这是由于低温段处于临界点附近,CO₂ 的比热较大,热容率较高,使得在传递相同热量时,温度变化相对较小;同时,由于热侧 CO₂ 的比热容小于冷侧的比热容,因此热侧温度变化快,冷热两侧温差越来越大,由 10 K 增加到 76 K;另外,壁面温度开始时靠近冷侧温度,随着换热的进行,壁面温度逐渐靠近冷热侧中间位置,表明开始时冷侧传热系数高,而后两者接近。

图 6(b)展示了沿流道长度方向换热量的变化。可以看出,换热量增加越来越迅速,换热主要集中在后半段,主要是由于后半段冷热侧温差的增大促使更高的热能传递,使得回热器更加有效地将热量从热侧传递到冷侧。



(a)温度分布



(b)换热量变化

图 6 沿流道长度方向的温度分布及换热量变化

Fig. 6 Temperature distribution and heat transfer changes along the length of the channel

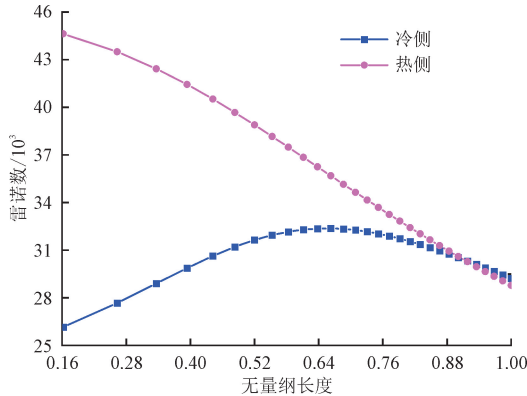
3.1.2 雷诺数、传热系数及压降沿流道长度方向的变化

图 7(a)展示了雷诺数沿流道长度的变化。可以看出,冷侧流体的雷诺数沿长度方向先增加后减小,热侧流体的雷诺数沿长度方向大幅减小,但热侧雷诺数大部分都高于冷侧,且两侧雷诺数均在 25 000 以上,表明两侧 SCO_2 在 PCHE 中的流动均处于湍流状态。

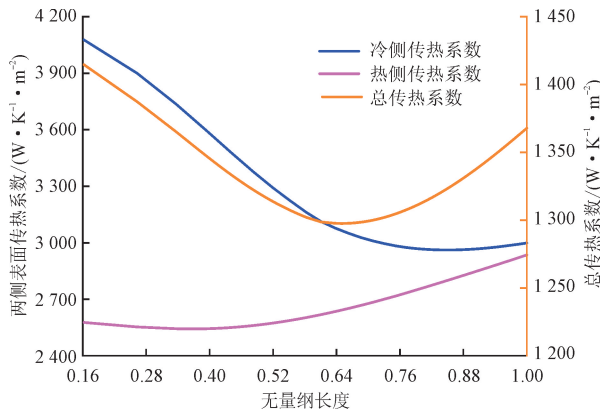
图 7(b)展示了传热系数沿流道长度的变化。可以看出:冷侧表面传热系数沿流道长度方向呈现先降低后逐渐趋于平稳的现象,由 $4\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 降低到 $3\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$,热侧表面传热系数在无量纲 0.4 之前相对稳定而后略有提升;冷侧表面传热系数高于热侧,主要是由于冷侧压力高,导热系数相对较大;总传热系数沿流道长度方向呈现先降低后升高的趋势,由 $1\,400\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 降低到 $1\,300\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$,之后总传热系数又上升至 $1\,360\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

图 7(c)展示了压降沿流道长度的变化。可以

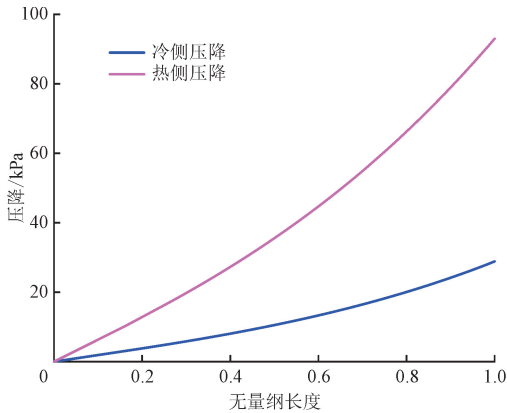
看出,热侧压降沿着流道长度方向增加得更为显著,而且热侧的压降明显大于冷侧压降(约为冷侧的 3 倍)。这主要是由于热侧流体的密度较低、流速较高而引起的。



(a)雷诺数



(b)冷/热侧表面传热系数及总传热系数



(c)压降

图 7 雷诺数、传热系数、压降沿流道长度方向的变化

Fig. 7 Reynolds number, heat transfer coefficient and pressure drop along the length of the flow channel

3.2 动态模拟结果

在核能 SCO_2 循环系统中,回热器是整个循环中热载荷最高的部件,其瞬态响应会影响整个核能系统的动态特性^[24-25]。在换热器运行过程中,考虑

到系统对负荷的跟踪性能,换热器进出口参数通常处于变化状态。因此,研究换热器工况扰动的动态响应特性,可保证换热器及系统的安全稳定运行。

换热器的动态特性分析采用有限体积法,根据 3.1 节中的设计结果,将回热器沿着芯体长度方向分成 30 个等体积的区域。首先,将设计工况下得到的温度分布、密度、流量等作为动态模型的初始条件,即流动的初始瞬态;在此基础上,研究扰动变化的动态特性,如改变流体进口的温度(升高或降低)或流量阶跃变化(增加或减少);最终,使系统达到另一种稳态。在模拟过程中,每一次扰动只引入一个变量,例如:在温度变化模拟时,需要保持两侧 CO₂ 的质量流量不变;在 CO₂ 质量流量变化模拟时,需要保持两侧 CO₂ 的入口温度不变。回热器动态仿真模拟结果如图 8~10 所示,具体分析如下。

(1)冷侧入口温度变化($\pm 10\text{ K}$)。从图 8(a)可以看出:冷侧入口温度降低 10 K 时,冷侧出口温度响应较慢,并由 633.25 K 逐渐降低,最终在 250 s 左右达到稳定值 625.4 K;热侧出口温度响应较快,在 210 s 左右达到稳定,温度由 384.45 K 逐渐降低到 372.95 K,此时回热器效能为 97.5%。从图 8(b)可以看出:冷侧入口温度升高 10 K 时,冷侧出口温度响应较慢,由 633.25 K 逐渐升高,最终在 230 s 左右达到稳定值 639.5 K;热侧出口温度响应较快,在 180 s 左右达到稳定,温度由 384.45 K 逐渐升高到 396.2 K,回热器效能为 96.4%。由此可见,冷侧入口温度发生扰动时,热侧出口温度响应相对较快,且变化幅度较大,表明热侧出口温度对于冷侧入口温度变化较敏感。

(2)热侧入口温度变化($\pm 30\text{ K}$)。从图 8(c)可以看出:热侧入口温度降低 30 K 时,冷侧出口温度响应较快,在 220 s 左右达到稳定,并由 633.25 K 逐渐降低至 601.3 K;热侧出口温度响应较慢,在 300 s 左右达到稳定,但温度变化幅度较小,由 384.45 K 变为 383.1 K,回热器效能为 97.2%。从图 8(d)可以看出:热侧入口温度升高 30 K 时,冷侧出口温度响应较快,并由 633.25 K 逐渐升高,在 220 s 左右达到稳定值 660.3 K;热侧出口温度有一定延迟,在 320 s 左右达到稳定,温度变化幅度也较小,由 384.45 K 逐渐升高到 386 K,回热器效能为 96.8%。由此可见,热侧入口温度变化(升高或降低)对热侧出口温度影响较小,其原因主要是由于热侧出口端靠近冷侧入口,而冷侧入口温度是保持不变的,且热侧温度变化对回热器传热系数影响较小,因此热侧出口温度变化微小。

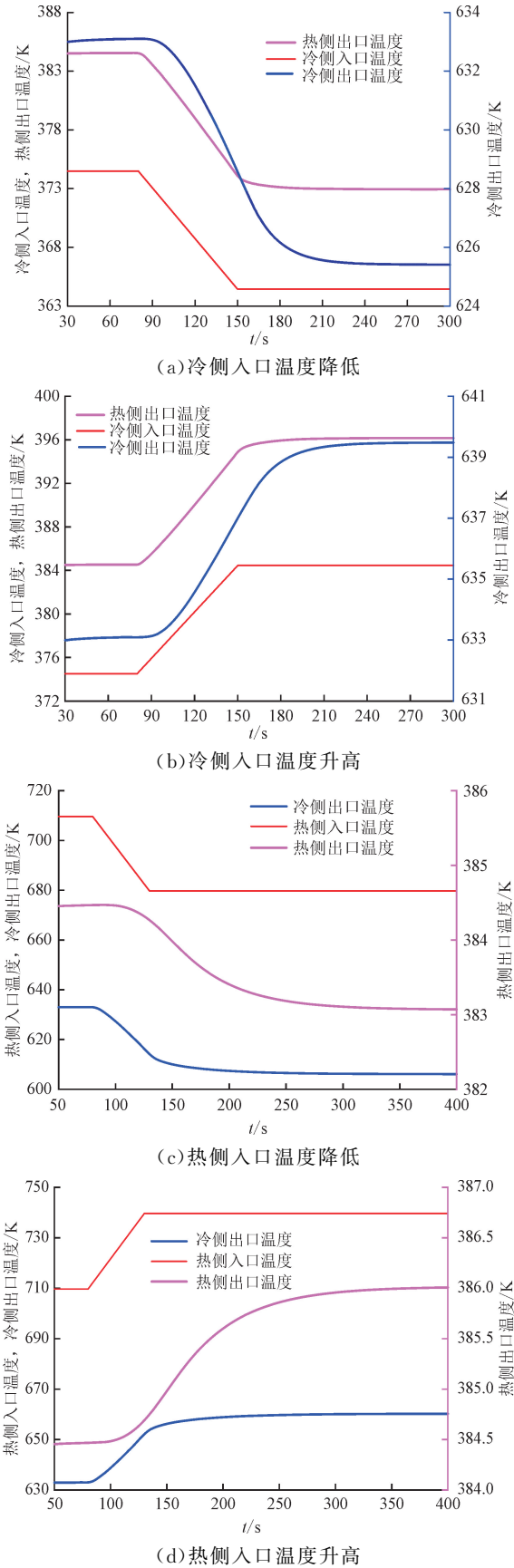
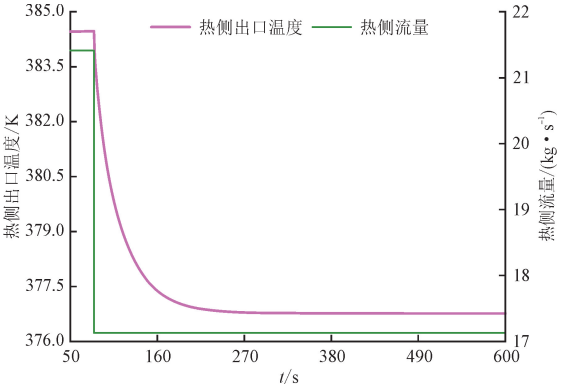


图 8 两侧入口温度发生变化时出口温度的响应

Fig. 8 Response of the outlet temperature when the inlet temperature on both sides change

(3)热侧流量变化($\pm 20\%$)。从图 9(a)、(b)可以看出:热侧流量发生阶跃变化(增加 20%)时,两侧出口温度均升高,冷侧由 633.25 K 升高到 670 K ,热侧由 384.45 K 升高到 403 K ,两侧出口温度响应时间接近,大约在 350 s 时趋于稳定,回热器效能为 91.5% 。从图 9(c)、(d)可以看出:热侧流量减小 20% 时,冷侧温度呈现大幅降低,由 633.4 K 降低到 580 K ,热侧温度略有下降,由 384.45 K 降低到 379 K 。两侧响应时间接近,大约在 250 s 时趋于稳定,回热器效能为 98.6% 。

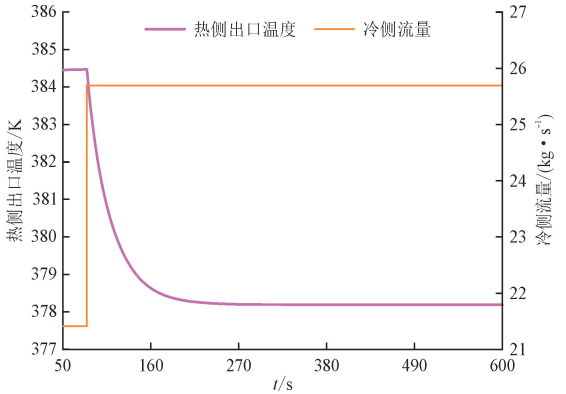


(d)热侧流量减少时热侧出口温度的响应

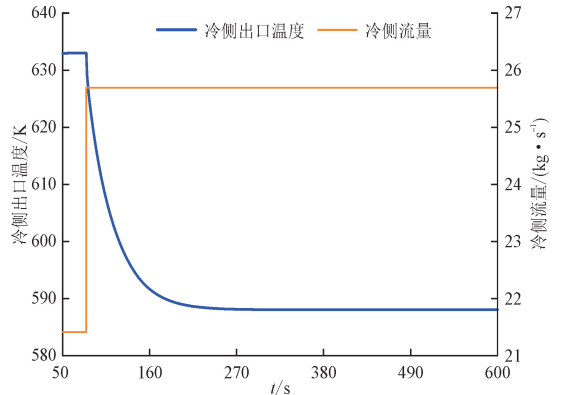
图 9 热侧流量变化时两侧出口温度的响应

Fig. 9 Response of outlet temperature on both sides when the hot side flow rate changes

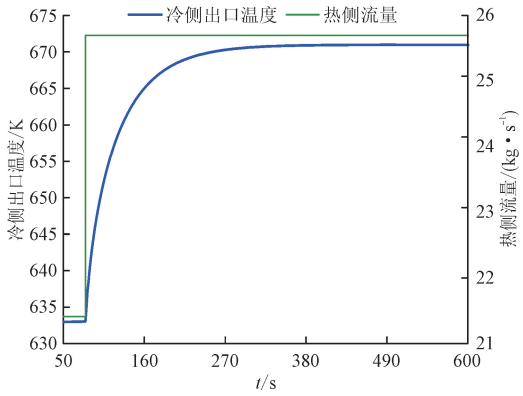
(4)冷侧流量变化($\pm 20\%$)。从图 10(a)、(b)可以看出:冷侧流量发生阶跃变化(增加 20%)时,两侧出口温度响应时间接近,大约在 250 s 时趋于稳定,热侧出口温度由 384.45 K 降到 378 K ,冷侧的出口温度降幅较大,由 633.3 K 降到 589 K ,回热器效能为 98.9% 。从图 10(c)、(d)可以看出:冷侧流量减小 20% 时,两侧出口温度响应时间均比较慢,大约在 400 s 时趋于稳定,热侧出口温度由最初的 384.45 K 增加到 408 K ,冷侧的出口温度变化幅度较大,由 633.25 K 增加到 679 K ,回热器效能为 90.8% 。



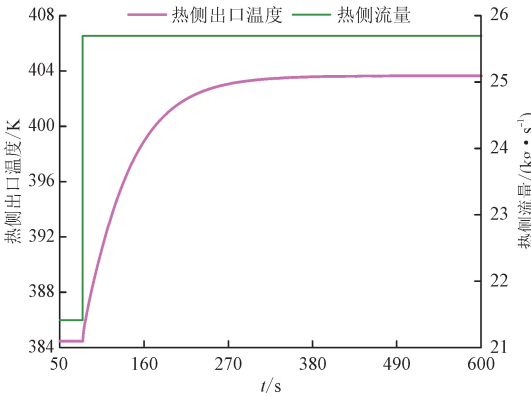
(a)冷侧流量增加时热侧出口的温度响应



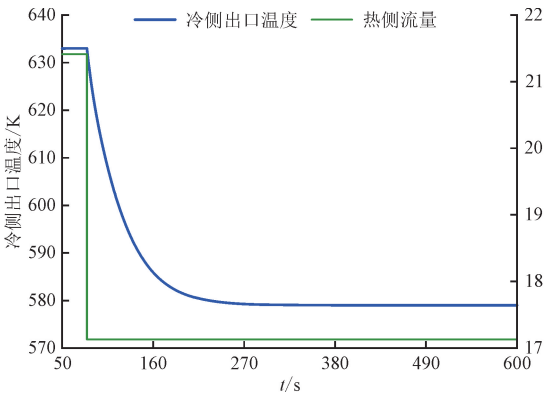
(b)冷侧流量增加时冷侧出口的温度响应



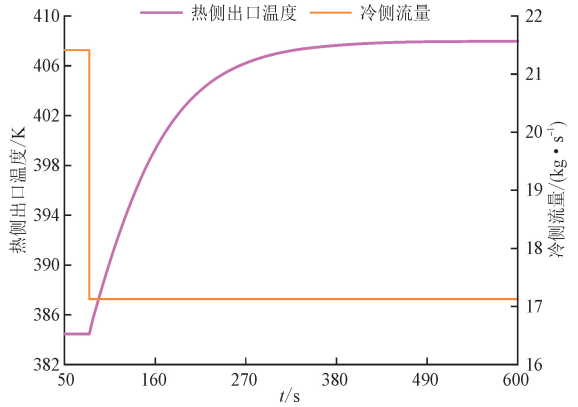
(a)热侧流量增加时冷侧出口温度的响应



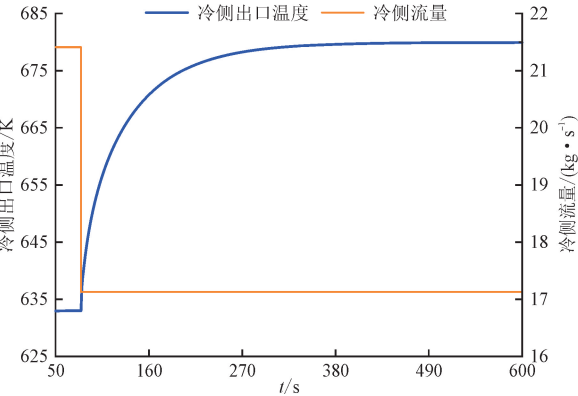
(b)热侧流量增加时热侧出口温度的响应



(c)热侧流量减少时冷侧出口温度的响应



(c)冷侧流量减少时热侧出口响应



(d)冷侧流量减少时冷侧出口响应

图 10 冷侧流量发生变化时两侧出口温度的响应
Fig. 10 Response of outlet temperature on both sides when the cold side flow rate changes

由上所述可知,冷热侧流量变化时,两侧出口温度均发生明显变化,尤其冷侧出口温度变化较显著。这主要是由于流速变化引起传热系数发生变化,使得两侧温度均发生了变化,而冷侧出口又位于高温段,换热量变化明显,因此冷侧出口温度变化更为剧烈。另外,温度变化对回热器效能影响较小,而流量变化对回热器效能影响较大,冷侧流量减小或热侧流量增加使得回热器效能降低约 6%。同时,由于回热器热惯性大,两侧出口温度对于流量发生变化的响应时间也较长。特别是在冷侧流量减少时,热侧出口温度延迟约 250 s 才趋于稳定。

4 结 论

本文建立了 PCHE 一维稳态数学模型,对 PCHE 在核能 SCO₂ 布雷顿循环中的应用进行了设计分析,并采用离散化建模方法构建了 PCHE 作为回热器的动态仿真模型,通过对 PCHE 仿真模拟分析,得到结论如下。

- (1)冷侧的传热系数高于热侧,从传热的角度来看,应强化热侧传热系数以提高 PCHE 总体传热性能;热侧阻力损失较大,对换热面积和整体性能产生影响较大;换热量主要集中在设备后半段。
 - (2)当冷侧入口温度发生扰动时,热侧出口温度响应相对较快,且变化幅度较大,表明热侧出口温度对于冷侧入口温度变化相对较敏感;热侧入口温度变化(升高或降低)对热侧出口温度影响较小。
 - (3)两侧出口温度随热侧流量增加而上升,而随冷侧流量增加而下降,且冷侧温度变化更加显著。另外,温度变化对回热器效能影响较小,而流量变化对回热器效能影响较大,冷侧流量减小或热侧流量增加使得回热器效能明显降低,同时由于回热器热惯性较大,导致两侧出口温度对于流量发生变化的响应时间较长。
- 上述研究结论不仅为构建 SCO₂ 布雷顿循环系统的动态模型提供了基础支撑,同时可为 PCHE 在核能 SCO₂ 布雷顿循环系统中的广泛应用提供可靠指导,为系统的安全稳定运行提供依据。

参考文献:

[1] 叶侠丰,潘卫国,尤运,等. 超临界二氧化碳布雷顿循环在发电领域的应用 [J]. 电力与能源, 2017, 38 (3): 343-347.
YE Xiaofeng, PAN Weiguo, YOU Yun, et al. Application of supercritical carbon dioxide Brayton cycle in power generation fields [J]. Power & Energy, 2017, 38(3): 343-347.

[2] 黄俊杰,韩增孝,郭江峰,等. 超临界 CO₂ 微通道换热器研究进展 [J]. 制冷学报, 2023, 44(4): 1-14.
HUANG Junjie, HAN Zengxiao, GUO Jiangfeng, et al. Research progress in supercritical CO₂ microchannel heat exchangers [J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(4): 1-14.

[3] Heatric. Compact heat exchangers [EB/OL]. (2023-01-01) [2024-02-01]. <https://www.heatric.com/heat-exchangers/benefits-heatricexchangers/compact-heat-exchangers>.

[4] SUNDÉN B, FU Juan. Heat transfer in aerospace applications [M]. London, UK: Academic Press, 2017: 89-115.

[5] MESHARAM A, JAISWAL A K, KHIVSARA S D, et al. Modeling and analysis of a printed circuit heat exchanger for supercritical CO₂ power cycle applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109 (Part B): 861-870.

- [6] BARTEL N, CHEN M, UTGIKAR V P, et al. Comparative analysis of compact heat exchangers for application as the intermediate heat exchanger for advanced nuclear reactors [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 81: 143-149.
- [7] TSUZUKI N, KATO Y, ISHIDUKA T. High performance printed circuit heat exchanger [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(10): 1702-1707.
- [8] SAEED M, BERROUK A S, SALMAN SIDDIQUI M, et al. Effect of printed circuit heat exchanger's different designs on the performance of supercritical carbon dioxide Brayton cycle [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 179: 115758.
- [9] 高毅超, 夏文凯, 龙颖, 等. 管径和转折角对 Z 型 PCHE 换热及压降影响的研究 [J]. *热能动力工程*, 2019, 34(2): 94-100.
GAO Yichao, XIA Wenkai, LONG Ying, et al. Study on the effects of channel width and fin angle on heat transfer and pressure drop of zigzag PCHE [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2019, 34(2): 94-100.
- [10] 徐婷婷, 赵红霞, 韩吉田, 等. 结构和工况参数对印刷电路板式换热器性能的影响 [J]. *热力发电*, 2020, 49(12): 28-35.
XU Tingting, ZHAO Hongxia, HAN Jitian, et al. Influence of structural and operating condition parameters on performance of printed circuit heat exchanger [J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(12): 28-35.
- [11] 纪宇轩. 超临界二氧化碳布雷顿循环印刷电路板式换热器特性的模拟与试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [12] CHU Wenxiao, LI Xionghui, MA Ting, et al. Experimental investigation on SCO_2 -water heat transfer characteristics in a printed circuit heat exchanger with straight channels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 113: 184-194.
- [13] KIMI H, NO H C, LEE J I, et al. Thermal hydraulic performance analysis of the printed circuit heat exchanger using a helium test facility and CFD simulations [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2009, 239(11): 2399-2408.
- [14] GUO Jiangfeng, HUAI Xiulan. Performance analysis of printed circuit heat exchanger for supercritical carbon dioxide [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2017, 139(6): 061801.
- [15] MA Yuan, XIE Gongnan, HOOMAN K. Review of printed circuit heat exchangers and its applications in solar thermal energy [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 155: 111933.
- [16] 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]// *ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. New York, NY, USA: ASME, 2017: V009T38A002.
- [17] 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.
- [18] MA Teng, LI Mingjia, XU Jinliang, et al. Thermodynamic analysis and performance prediction on dynamic response characteristic of PCHE in 1 000 MW S- CO_2 coal fired power plant [J]. *Energy*, 2019, 175: 123-138.
- [19] CHEN Kaiqi, PU Wenhao, ZHANG Qi, et al. Thermal performance analysis on steady-state and dynamic response characteristic in solar tower power plant based on supercritical carbon dioxide Brayton cycle [J/OL]. *Energy Sources: Part A Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. (2020-10-19)[2024-02-01]. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1838001>.
- [20] DING Hao, LI Wenhui, DUAN Chengjie, et al. A thermal-hydraulic analysis model of printed circuit heat exchangers for system simulation using Modelica [J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2021, 58(12): 1296-1307.
- [21] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 4 版. 北京: 北京高等教育出版社, 2006.
- [22] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [23] 吴闯. 中高温超临界二氧化碳循环系统优化及动力部件轴封研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2019.
- [24] 吴攀, 高春天, 单建强. 超临界二氧化碳布雷顿循环在核能领域的应用 [J]. *现代应用物理*, 2019, 10(3): 77-86.
WU Pan, GAO Chuntian, SHAN Jianqiang. Application of supercritical carbon dioxide Brayton cycle in nuclear engineering [J]. *Modern Applied Physics*, 2019, 10(3): 77-86.
- [25] 薛琪, 冯民, 马云铎, 等. 超临界二氧化碳核能系统负荷运行策略研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(5): 136-148.
XUE Qi, FENG Min, MA Yunduo, et al. Study on load operation strategy for supercritical carbon dioxide nuclear power system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(5): 136-148.

(编辑 陶晴)