

# 超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环中换热器夹点判断方法

史香锬, 刘治京, 吴昊, 张淑兴  
(中广核研究院有限公司, 广东深圳 518020)

**摘要:** 为了分析超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环中换热器的夹点情况, 建立了换热器传热单元模型, 提出了一套系统性的夹点判断方法: 夹点的简化判据和分段计算分析方法。结果表明: 夹点简化判据简单易行, 但是实用性较为局限; 分段计算是一套准确有效的夹点分析方法, 能用于换热器夹点存在性、夹点位置和夹点温差的判断分析; 高温回热器内一般不存在夹点, 最小温差出现在换热器冷端; 低温回热器和冷却器中存在夹点的可能性较大。

**关键词:** 超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环; 换热器; 夹点; 判断方法

中图分类号: TK11 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.08.013

[引用本文格式] 史香锬, 刘治京, 吴昊, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环中换热器夹点判断方法[J]. 热能动力工程, 2021, 36(8): 85-91. SHI Xiang-kun, LIU Zhi-jing, WU Hao, et al. The judgment method of pinch point of heat exchanger in supercritical carbon dioxide Brayton cycle[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(8): 85-91.

## The Judgment Method of Pinch Point of Heat Exchanger in Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle

SHI Xiang-kun, LIU Zhi-jing, WU Hao, ZHANG Shu-xing  
(China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen, China, Post Code: 518020)

**Abstract:** In order to analyze the pinch point of the heat exchanger in the supercritical carbon dioxide Brayton cycle, the heat transfer unit model is established, and a systematic pinch point judgment method is proposed, which including a simplified judgment method and a segmented calculation and analysis method. The results show that the simplified judgment method is simple and easy to use, but its practicability is limited. The segment calculation is an accurate and effective pinch point analysis method, which can be used for the judgment and analysis of pinch point existence, pinch point position, and pinch point temperature difference. There is generally no pinch point in the high temperature regenerator, and the minimum temperature difference appears at the cold end of the heat exchanger. However, there is usually a pinch point in the low temperature regenerator or the cooler.

**Key words:** supercritical carbon dioxide Brayton cycle, heat exchanger, pinch point, judgment method

## 引 言

超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿(S - CO<sub>2</sub>) 循环是一种新型的高效能量转换系统, 在中高温热源发电方面具备较高的能量转换效率, 理论上能够比蒸汽朗肯循环

的热效率高出 5%<sup>[1]</sup>。

但是, S - CO<sub>2</sub> 循环也存在一些缺陷, 其中最典型的的就是换热器夹点问题。为了提升循环热效率, S - CO<sub>2</sub> 系统一般将参数设置在尽可能靠近临界点的位置<sup>[2]</sup>。但是越靠近临界点, 超临界 CO<sub>2</sub> 介质的物性变化越剧烈, 换热器两侧的比热容变化也越大,

可能导致换热器两侧的温度变化曲线发生偏折,使得换热器两侧最小温差出现在换热器内部(温差最小的位置即为夹点)。此时极有可能出现换热面积不足、换热效果恶化<sup>[3]</sup>等不利情况,同时增加了换热器设计的复杂程度,这些不利影响称为换热器夹点问题<sup>[4]</sup>。

以往对 S-CO<sub>2</sub> 系统的研究通常是直接给定换热器的冷端温差,并未对换热器内的夹点情况进行判断或验证。但是夹点问题直接影响换热器的传热效果和整体循环性能,因此有必要对 S-CO<sub>2</sub> 循环的换热器夹点情况进行判断分析。本文旨在给出一套 S-CO<sub>2</sub> 循环的换热器夹点的分析判断方法,为 S-CO<sub>2</sub> 系统及设备的研究提供一定参考。

## 1 再压缩 S-CO<sub>2</sub> 循环

S-CO<sub>2</sub> 循环具有多种布置形式,其中效率最高的布置形式是 S-CO<sub>2</sub> 闭式再压缩循环<sup>[1]</sup>,其流程如图 1 所示。

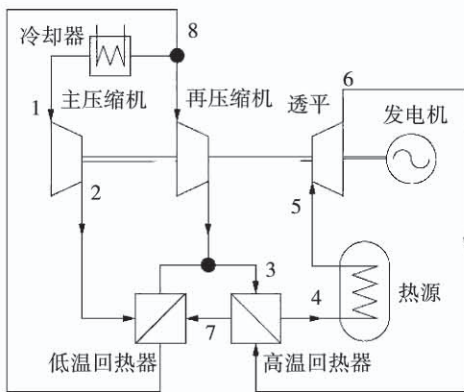


图 1 再压缩 S-CO<sub>2</sub> 循环示意图

Fig. 1 Schematic of S-CO<sub>2</sub> recompression cycle

再压缩 S-CO<sub>2</sub> 循环中的换热器主要包括高温回热器、低温回热器和冷却器。其中冷却器的热通道介质为超临界 CO<sub>2</sub>,冷通道介质为水。

## 2 换热器建模和夹点判断方法

### 2.1 换热器建模

S-CO<sub>2</sub> 循环中的换热器通常采用印刷电路板式(PCHE)换热器,它是一种耐高温高压的高效紧凑型微通道换热器。PCHE 换热器具有直通道、梯形通道、蛇形通道、Sin 曲线通道及 Zig-Zag 通道等

不同的形式<sup>[5]</sup>,其中直通道是最基础的通道结构形式。

直通道 PCHE 由多层冷、热通道交替叠加而成,每层通道包含多个半圆形(直径约为 0.5~2 mm)的直线换热通道,冷、热通道具有相同的几何结构,进行逆流换热。为便于分析计算,抽取某热层通道中的单一热通道与相邻冷层通道中的对应冷通道,组成一个典型的传热单元<sup>[6]</sup>,如图 2 所示,则换热器可视为多个传热单元的集合。

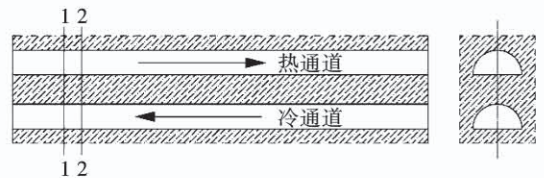


图 2 传热单元示意图<sup>[5]</sup>

Fig. 2 Schematic of the heat transfer unit<sup>[5]</sup>

为简化分析过程,对 S-CO<sub>2</sub> 循环换热器的传热单元做出假设:

- (1) 假设换热器处于稳态换热过程;
- (2) 由于通道内超临界 CO<sub>2</sub> 的压降与运行压力相比很小,因此忽略通道内超临界 CO<sub>2</sub> 的压降,认为压力保持不变;
- (3) 假设传热单元划分为若干个微元段,则当微元段足够小时,可以近似认为每个微元段内的介质比热容为定值;
- (4) 忽略传热单元的散热损失,认为任意微元段内热通道释放的热量等于对应冷通道吸收的热量;
- (5) 对于冷却器,忽略冷通道内水的比热容的变化,认为是一个常数。

基于假设,对于传热单元内的任意微元段,存在关系式:

$$dQ = q_{m,h} c_{p,h} dt_h = q_{m,c} c_{p,c} dt_c \quad (1)$$

式中: $dQ$ —微元段换热量; $q_m$ —质量流量; $c_p$ —比定压热容; $dt$ —微元段进出口温差;下标 h,c—热通道和冷通道。

### 2.2 夹点存在性的简化判据

根据夹点的特性对其存在性进行简化判断。由图 3 可知,如果换热器内存在夹点,则传热单元冷、热通道间的最小温差出现在换热器内部,该温差即

为夹点温差  $t_j$ 。

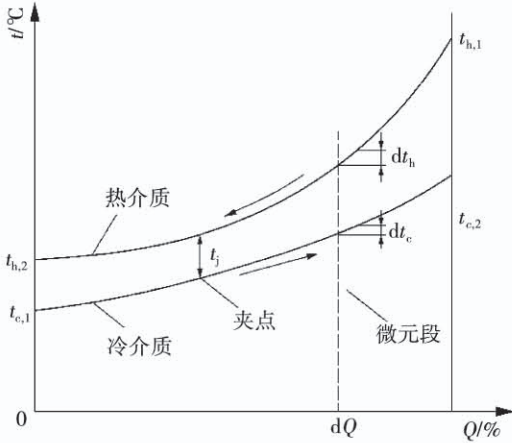


图 3 夹点示意图

Fig. 3 Schematic of the pinch point

在夹点处,必然存在微元段,使得冷、热介质的温差相等,即:

$$dt_h = dt_c \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得:

$$q_{m,h}c_{p,h} = q_{m,c}c_{p,c} \quad (3)$$

对于高温回热器,冷、热介质质量流量相等,即:

$$q_{m,h} = q_{m,c} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)得:

$$c_{p,h} = c_{p,c} \quad (5)$$

对于低温回热器,设流经低温回热器冷通道的介质质量流量与总流量之比为  $\alpha$ ,则低温回热器的冷通道介质流量为:

$$q_{m,c} = \alpha q_{m,h} \quad (6)$$

将式(6)代入式(3)得:

$$c_{p,h} = \alpha c_{p,c} \quad (7)$$

对于冷却器,冷介质为水,由假设(5)可知水的定压比热容  $c_{p,c}$  为常数。对于换热过程,由能量平衡方程可得:

$$\Delta Q = q_{m,h} \Delta H_h = q_{m,c} c_{p,c} \Delta t_c \quad (8)$$

式中: $\Delta Q$ —冷却器的总换热量; $\Delta H_h$ —热通道超临界 CO<sub>2</sub>的进出口焓差; $\Delta t_c$ —冷通道水的进出口温差,  $\Delta t_c = t_{c,2} - t_{c,1}$ 。

将式(8)带入式(3)得:

$$c_{p,h} = \Delta H_h / \Delta t_c \quad (9)$$

由分析可知,如果换热器内存在夹点,则式(5)、式(7)和式(9)成立。推理可得,如果式(5)、

式(7)和式(9)不成立,则对应的换热器内必然不存在夹点。

对于高温回热器,夹点不存在的充分判据为:

$$c_{p,h} \neq c_{p,c} \quad (10)$$

对于低温回热器,夹点不存在的充分判据为:

$$c_{p,h} \neq \alpha c_{p,c} \quad (11)$$

对于冷却器,夹点不存在的充分判据为:

$$c_{p,h} \neq \Delta H_h / \Delta t_c \quad (12)$$

综上,通过对夹点特性的分析可以得出换热器内夹点不存在的简化判据。值得注意的是,式(10)、式(11)和式(12)仅是夹点不存在的充分判据,并非充分必要条件,在使用时存在一定局限性。但是由于该判据简单易行,因此仍具有一定的实用价值,可以进行初步判断。

### 2.3 传热单元分段计算

由于简化判据存在局限性,因此有必要采用更全面的方法对夹点情况进行研究。从夹点的定义出发,如果能够求出冷、热通道的温度变化曲线,则夹点情况随之明确。

求解换热器温度变化曲线的方法主要包括理论分析、实验研究和仿真计算。理论分析是建立简化的理论数学模型,依据流动换热公式进行求解;实验研究是搭建实验平台,通过仪表测量通道中各点的温度,从而拟合出沿程温度变化曲线;仿真计算是建立包含冷、热通道在内的仿真分析模型,采用 CFD 方法计算出通道内的温度变化曲线。相比之下,理论分析方法最为简单易行,不需要搭建复杂的实验平台或仿真模型,因此采用理论分析方法,基于已建立的传热单元模型对换热器夹点情况进行分析。

根据假设(3),将传热单元划分为若干个相连的微元段,每个微元段内的介质比定压热容视为一个定值,实际过程中为求解方便,常取微元段进、出口温度所对应的比定压热容值进行表示。所谓分段计算,就是指将换热器划分为多个微元段,在每个微元段内利用相关流动换热公式进行求解,最终通过逐级求解实现全过程计算。

对于一个确定的 S-CO<sub>2</sub>系统,通过热力系统分析,可以得出回路中各换热器冷、热通道的进、出口温度。将换热器进、出口温度代入传热单元模型作为输入条件,设置合理的微元段步长,即可以对传热单元冷、热通道的温度进行逐级求解,直至完成换热

过程的计算。冷、热通道的进、出口温度共包含4个值,取其中两个温度值作为迭代计算的起始值,则另外两个温度值可以作为计算结果准确度的判断依据。如果计算误差较大,说明微元段步长设置不合理,应该重新设置步长进行计算,直至满足准确度要求。

完成分段计算后,即可得出传热单元冷、热通道的温度变化曲线,进而可以对换热器夹点情况进行直观准确的分析。因此,传热单元分段计算是换热器夹点分析的有效方法。

综合简化判据和分段计算分析方法,可以得出S-CO<sub>2</sub>循环换热器夹点的判断流程,如图4所示。

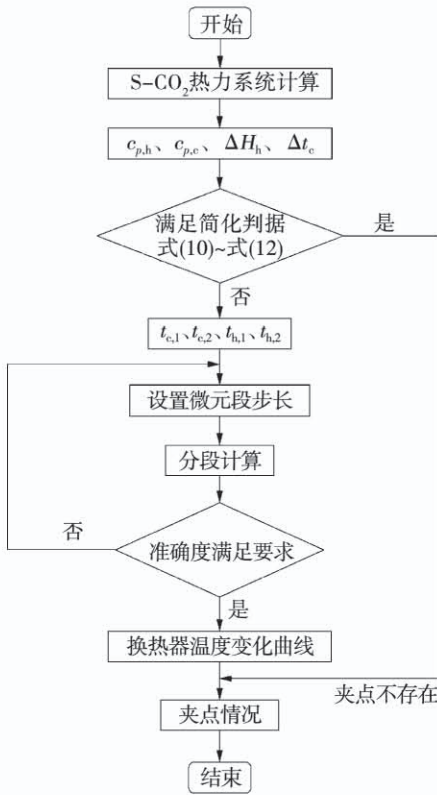


图4 夹点判断流程图

Fig.4 Flow chart of pinch point judgment

### 3 算例分析

结合具体算例对S-CO<sub>2</sub>循环中的换热器夹点情况进行判断分析。对其中冷、热通道压力近似取为进、出口压力的算术平均值。该循环采用的是PCHE换热器,满足传热单元模型的假设要求,因此可以采用简化判据和分段计算方法进行夹点研究。循环进行热力计算,主要计算结果如表1所示。

表1 循环主要参数计算结果

Tab.1 The calculation results of main parameters of cycle

换热器	参数	数值
高温回热器	热通道进口温度/°C	440.3
	热通道出口温度/°C	168.3
	冷通道进口温度/°C	158
	冷通道出口温度/°C	396.5
	热通道压力/MPa	7.86
	冷通道压力/MPa	19.97
低温回热器	热通道进口温度/°C	168.3
	热通道出口温度/°C	69.6
	冷通道进口温度/°C	61.1
	冷通道出口温度/°C	158
	热通道压力/MPa	7.76
	冷通道压力/MPa	19.99
冷却器	热通道进出口焓差/kJ·kg <sup>-1</sup>	171.97
	热通道压力/MPa	7.7

### 3.1 夹点简化判断

采用简化判据对换热器夹点的存在性进行分析。对于高温回热器,其冷、热通道的比定压热容如图5所示。

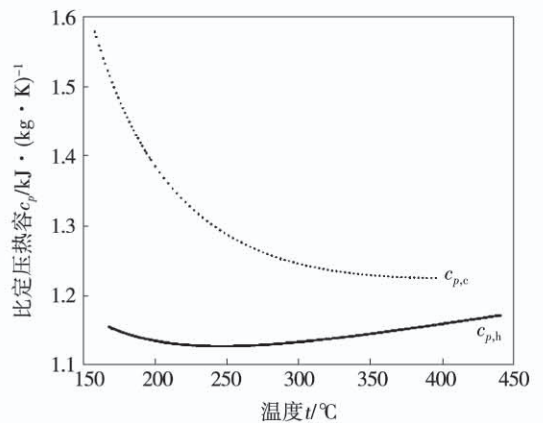


图5 不同温度下高温回热器的比定压热容

Fig.5 Diagram of specific constant pressure heat capacity in high temperature regenerator different temperature

由图可知,高温回热器内冷通道的比定压热容 $c_{p,c}$ 始终大于热通道的比定压热容 $c_{p,h}$ ,因此满足简化判据式(10),所以高温换热器内不存在夹点。并且根据式(1)可知,热通道的温差始终大于冷通道的温差,因此高温回热器冷、热通道间的最小温差必然出现在换热器冷端。

对于低温回热器,其冷、热通道的比定压热容如图 6 所示。由图可知,低温回热器冷、热通道的比定压热容的取值范围存在交集,不满足简化判据式 (11),因此无法判断低温回热器内是否存在夹点。

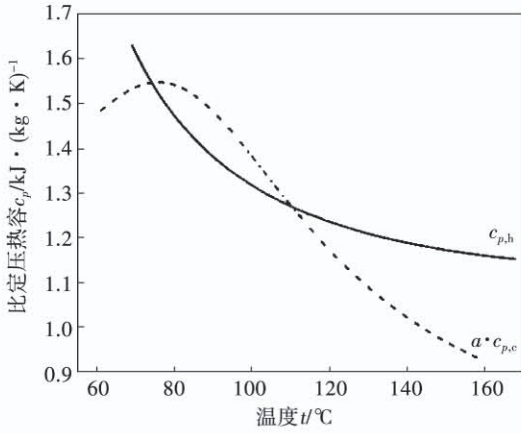


图 6 不同温度下低温回热器的比定压热容

Fig. 6 Diagram of specific constant pressure heat capacity in low temperature regenerator at different temperature

对于冷却器,其热通道的比定压热容如图 7 所示。 $\Delta H_h / \Delta t_c$  的取值范围如图中的阴影部分所示,与热通道的比定压热容取值范围存在交集,不满足简化判据式 (12),因此无法判断冷却器内是否存在夹点。

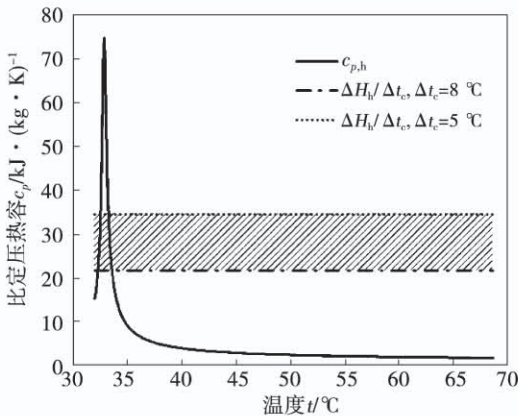


图 7 不同温度下冷却器的比定压热容

Fig. 7 Diagram of specific constant pressure heat capacity in cooler at different temperature

通过上述判断过程可知,简化判据虽然使用简单,但适用性较为局限,仅能明确判断出高温回热器内不存在夹点,最低温差出现在冷端,而对低温回热器和冷却器无法做出准确判断,需要更详细的判断

过程。

### 3.2 分段计算分析

对高温回热器,将传热单元以固定换热量  $dQ$  进行微元分段,主要步骤为:

- (1) 将微元段按换热量划分为 100 等份,即微元段步长为  $dQ = 0.01 \Delta H_c$ ;
- (2) 假设冷通道微元段内的  $c_{p,c}$  为段内起点温度对应的比定压热容;
- (3) 从冷通道进口温度  $t_{c,1} = 158$  °C 开始,根据式  $dt_c = dQ / c_{p,c}$  计算出微元段终点温度,而每个微元段的终点温度即为下一个微元段的起点温度,从而依次进行求解;
- (4) 假设相应的热通道微元段内的  $c_{p,h}$  为段内终点温度对应的比定压热容;
- (5) 从热通道出口温度  $t_{h,2} = 168.4$  °C 开始,根据式  $dt_h = dQ / c_{p,h}$  计算出微元段起点温度,而每个微元段的起点温度即为上一个微元段的终点温度,从而按逆向依次进行求解;
- (6) 完成全部微元段求解后,对冷通道出口温度  $t_{c,2} = 396.5$  °C 和热通道进口温度  $t_{h,1} = 440.3$  °C 进行校核。如果误差较大,则返回修改步长设置,重复上述步骤;如果误差较小,则认为计算结果满足要求,求解完成。

高温回热器的温度随换热量占比变化曲线如图 8 所示。其中,换热量占比表示当前过程换热量与总换热量的比。由图可知,高温回热器内部没有夹点,最小温差出现在换热器冷端。该结果也验证了上述简化判断结果的正确性。

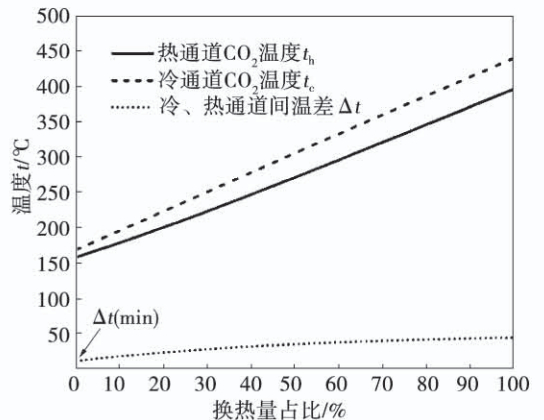


图 8 高温回热器温度随换热量变化曲线

Fig. 8 Temperature change graph with heat exchange in high temperature regenerator

对低温回热器,参考上述步骤进行分段求解,可得低温回热器温度变化曲线如图9所示。由图可知,低温回热器内存在夹点,冷、热通道间的最小温差出现在靠近冷端的第6个微元段内,最小温差为 $8.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,小于冷端温差 $8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和热端温差 $10.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

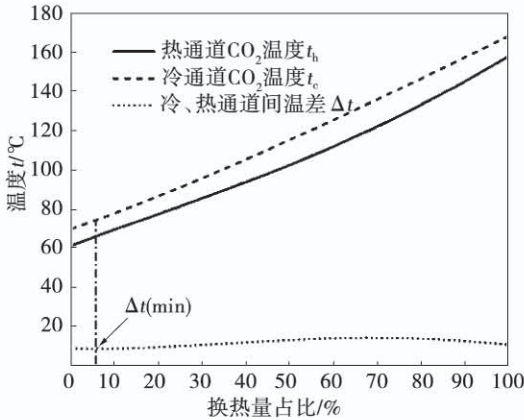


图9 低温回热器温度随换热量变化曲线  
Fig.9 Temperature change graph with heat exchange in low temperature regenerator

对冷却器,取冷却水出口温度为 $t_{c,2} = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,进行分段求解,可得冷却器的温度变化曲线如图10所示。由图可知,冷却器内存在夹点,冷、热通道间的最小温差出现在靠近冷端的第31个微元段内,最小温差为 $4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,小于冷端温差 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和热端温差 $37.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

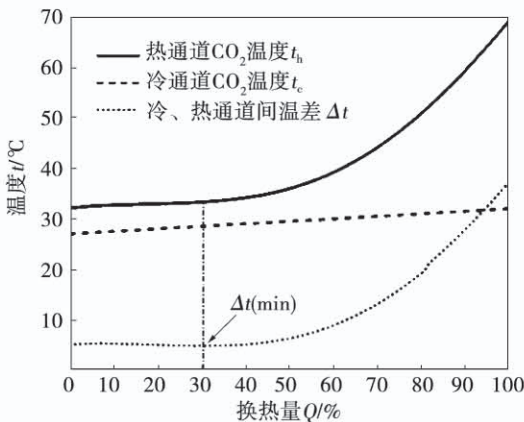


图10 冷却器温度随换热量变化曲线  
Fig.10 Temperature change graph with heat exchange in cooler

是否存在夹点,并且明确夹点的位置和夹点温差,因此该方法是一种准确有效的夹点判断方法。

## 4 结论

换热器夹点问题是 $S - \text{CO}_2$ 循环的主要缺陷之一,对夹点进行准确地判断分析,是防止传热效果恶化和实现换热器设计验证的基础。本文对再压缩 $S - \text{CO}_2$ 循环的换热器夹点情况进行研究,提出了一套系统性的夹点判断方法,并开展了算例分析。结果表明:

- (1) 夹点简化判据简单易行,但适用性较为局限;
- (2) 分段计算方法是一种准确可靠的夹点分析方法,不仅能判断夹点是否存在,还能够明确夹点的位置和夹点温差;
- (3) 高温回热器内基本不存在夹点,最小温差出现在换热器冷端;
- (4) 低温回热器和冷却器内存在夹点的可能性较大,需要对夹点情况进行深入分析验证。

## 参考文献:

- [1] 徐前,陈洪溪. 超临界二氧化碳闭式布雷顿循环特点与应用[J]. 发电设备,2019,33(5): 320-330.  
XU Qian, CHEN Hong-xi. Features and application of a supercritical carbon dioxide closed Brayton cycle[J]. Power Equipment, 2019,33(5): 320-330.
- [2] 廖吉香,刘兴业,郑群,等. 超临界 $\text{CO}_2$ 发电循环特性分析[J]. 热能动力工程,2016,31(5): 40-46.  
LIAO Ji-xiang, LIU Xing-ye, ZHENG Qun, et al. Analysis of power generation cycle characteristics of supercritical carbon dioxide[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2016,31(5): 40-46.
- [3] 曹春辉,李惟毅. 夹点对超临界二氧化碳布雷顿再压缩循环性能的影响[J]. 化工进展,2017,36(11): 3986-3992.  
CAO Chun-hui, LI Wei-yi. Effect of pinch point on thermal and energetic performance of supercritical carbon dioxide Brayton recompression cycle[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017,36(11): 3986-3992.
- [4] 史香锬,杨均勇,钱建华,等. 超临界 $\text{CO}_2$ 布雷顿循环中冷却器的夹点分析[J]. 热能动力工程,2020,35(1): 11-15.

通过采用分段计算方法可以直观判断换热器内

- SHI Xiang-kun, YANG Jun-yong, QIAN Jian-hua, et al. Pinch point analysis of cooler for supercritical carbon dioxide Brayton cycle [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 2020, 35 (1): 11 - 15.
- [5] 于改革,陈永东,李 雪,等. 印刷电路板式换热器传热与流动研究进展[J]. *流体机械*, 2017, 45(12): 73 - 79.
- YU Gai-ge, CHEN Yong-dong, LI Xue, et al. Research progress in heat transfer and fluid flow of print circuit heat exchanger[J]. *Fluid Machinery*, 2017, 45(12): 73 - 79.
- [6] 梁墩煌,张尧立,郭奇勋,等. 核反应堆系统中以超临界二氧化碳为工质的热力循环过程的建模与分析[J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2015, 54(5): 608 - 613.
- LIANG Dun-huang, ZHANG Yao-li, GUO Qi-xun, et al. Modeling and analysis of nuclear reactor system using supercritical-CO<sub>2</sub> Brayton cycle[J]. *Journal of Xiamen university: Natural Science Edition*, 2015, 54(5): 608 - 613.

(丛 敏 编辑)

## (上接第 84 页)

- [11] HASHEMI S M, HASHEMI S A. Flame stability analysis of the premixed methane-air combustion in a two-layer porous media burner by numerical simulation [J]. *Fuel*, 2017, 202 (15): 56 - 65.
- [12] CHEN L, XIA Y F, LI B W, et al. Flame front inclination instability in the porous media combustion with inhomogeneous preheating temperature distribution[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 128: 1520 - 1530.
- [13] YANG S I, HSU D L. Heat-transfer mechanisms of lean premixed CH<sub>4</sub>/air flame in a ceramic granular bed burner[J]. *Combustion & Flame*, 2013, 160(3): 692 - 703.
- [14] YANG J B, GONG Y, GUO Q H, et al. Dilution effects of N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> on flame structure and reaction characteristics in CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> flames[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 108: 16 - 24.
- [15] GAO H B, QU Z G, TAO W Q, et al. Experimental investigation of methane/(Ar, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>)-air mixture combustion in a two-layer packed bed burner[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, 44: 599 - 606.

(丛 敏 编辑)