

科技研究

超临界 CO₂ 布雷顿循环系统中 PCHE 的热力性能优化与系统集成研究

王波

中国核动力研究设计院

DOI : 10. 32629/j pm. v7i 5. 8915

[摘要] 超临界 CO₂ (S-CO₂) 工质在近临界区的物理非线性特性, 使其面临热流阻不平衡、工况适应性差、冷热参数不匹配等热力学瓶颈问题, 严重限制了布雷顿循环系统的高效运行。鉴于此, 本文深入剖析热交换性能退化机理及系统耦合作用机理, 并提出多维优化设计方案, 以期解决不可逆损失问题, 大幅提升换热区域热力性能和循环效率。

[关键词] 超临界 CO₂; 布雷顿循环系统; PCHE; 热力性能优化; 系统集成

Research on Thermal Performance Optimization and System Integration of PCHE in Supercritical CO₂ Brontton Cycle Systems

Wang Bo

China Nuclear Power Research and Design Institute

[Abstract] The physical nonlinear characteristics of supercritical CO₂ (S-CO₂) working fluid in the near-critical region lead to thermodynamic bottlenecks such as imbalance in thermal flow resistance, poor operational adaptability, and mismatch between cooling and heating parameters, severely limiting the efficient operation of Brontton cycle systems. In light of this, this paper thoroughly analyzes the mechanisms of heat exchange performance degradation and system coupling effects, and proposes a multidimensional optimization design approach aimed at addressing irreversible losses and significantly enhancing the thermal performance and cycle efficiency of the heat exchange section.

[Key words] supercritical CO₂; Brontton cycle system; PCHE; thermal performance optimization; system integration

S-CO₂ 布雷顿循环因其高效、低碳、紧凑等优点成为新一代动力循环的研究热点, 而印制板式换热器则是决定循环热效率和系统稳定性的核心设备。目前, 换热器的适配性不高, 已成为制约其工业化应用的瓶颈^[1]。开展换热性能优化及系统集成研究, 对于突破装备性能瓶颈, 提高能源系统效率, 促进新型热力循环技术的推广具有重要意义。

一、超临界 CO₂ 布雷顿循环 PCHE 热力性能瓶颈及机理分析

(一) S-CO₂ 工质特殊换热特性对 PCHE 的约束机理

S-CO₂ 工质处于临界点附近时, 其热物性参数呈现强非线性瞬态特性, 其密度、定压比热容、热导率和黏度等随温度和压力的小幅波动而发生剧烈变化, 与传统气体传热工质有很大不同。传统的以常物性参数为基础的微流道传热设计理论不再适用, 微尺度流道内易出现局部热阻急剧增加和传热流量分布扭曲等问题^[2]。工质物性区域差异导致其内部存在局部传热弱化和流动滞止区, 产生大量不可逆熵产, 限制了其整体热力性能稳定输出。

(二) 传统 PCHE 核心热力性能瓶颈

1. 换热-流阻耦合矛盾突出

常规微流道在 8.0MPa 和 400℃ 工况下传热系数仅维持在 2800-3200W/(m²·K)，强化传热能力不足。褶皱流道强化传热系数达到 4000W/(m²·K) 以上的同时，装置单位长度压降也随之升高至 35-40kPa/m/m，导致压缩机能耗大幅增加。固定几何构型不能与 S-CO₂ 微尺度流动传热特性相匹配，其传热增益总是被流阻损失所抵消，形成不可自洽的性能制衡关系，制约了装备热力性能的提升。

2. 变工况热力适配性差

传统的液冷式换热器仅适用于额定值 8.0MPa, 450℃ 的工况，当系统负荷变化到 60%-70%，工作压力下降到 7.4MPa 附近时，设备传热均匀性降低超过 30%，局部区域传热恶化。当热源温度发生微小的变化时，流场的紊流结构会发生扰动，近壁

区会扩大，系统的熵产也会随之增加。由于缺乏自适应调节和结构自适应能力，装备在宽工况下的热力稳定性非常差，难以适应循环动态运行特性^[3]。

3. 高低温侧参数失配

传统的对称流道 PCHE 冷、热侧流比为 1:1，不能适应 S-CO₂ 高、低温区物理性质的差异。在高温 400-500℃ 范围内，工质对换热的要求很低，存在大面积的热交换冗余；在近临界温度范围内，材料物性发生剧烈变化，传热能力严重不足，设备的有效换热面积利用率不高，冷热侧终端换热温差可高达 15-20℃，造成巨大的不可逆热损失，极大地降低了系统的回热深度和循环的热力效率。

为充分展示具体的瓶颈参数，可参考表 1：

表 1 传统 PCHE 核心热力瓶颈参数

瓶颈类型	核心参数特征	热力影响
换热-流阻耦合矛盾	强化流道压降达 35 - 40kPa/m	抵消换热增益，增加压缩耗功
变工况适配性差	低负荷换热均匀性下降 30%+	熵产激增，工况稳定性劣化
高低温参数失配	换热利用率 < 70%，温差 15 - 20℃	回热不足，循环效率受限

(三) PCHE 性能对 S-CO₂ 循环系统的耦合影响

PCHE 作为 S-CO₂ 布雷顿循环核心换热装置，其传热效率、流动阻力特性与工况适应性及各机组之间存在较强的热-力耦合关系。PCHE 所产生的流动阻力和传热损失并不局限于设备本身，而是直接传递到压缩机、涡轮和预冷器等核心部件，改变了系统的压力比、温度比和流量匹配关系。PCHE 热物性的衰减将导致系统回热量不足，循环功增加，直接导致循环净功和热力效率下降，并加剧设备运行工况偏差，削弱系统宽工况稳定运行。

二、超临界 CO₂ 布雷顿循环系统中 PCHE 的热力性能优化与系统集成措施

(一) 基于工质物性适配的 PCHE 微通道结构参数多目标优化

S-CO₂ 在近临界区具有非线性突变特性，传统恒量结构参数下的 PCHE 微通道难以匹配工质动态传热规律，易引起局部热阻突变和流动匹配不平衡。在此基础上，开展基于材料分区特征的微通道多目标优化设计，突破微通道传热能力和流阻之间的内在耦合矛盾^[4]。通过建立物性参数与流道几何参数之间的映射关系，可实现微流道结构与热交换区域内工质特性的精准匹配，从结构层次上消除近临界换热恶化现象，为高效热力运行奠定基础。

在具体实施中，可依托基于 S-CO₂ 热物性性质数据库，对热交换区进行精确分区，并根据工质温度、压力等临界阈值，将热交换腔划分为近临界换热区、高温超临界换热区和低温预热区，并根据不同区域物理特性的差异，对微流道结构参数进行定制。对于近临界换热区，可采用矩形渐变微流道结构，使

流道水力直径从 0.8mm 渐变到 1.2mm，流道长宽比定在 3:1，以适应该区内工质密度和比热剧烈波动的特点，避免边界层增厚过快的问题。而对于高温超临界区域而言，则应布置等径弧形微流道，设计水力直径 1.0mm，弧角 15°，借助弧形流道弱化高速工质流动分离效应。在此基础上，构建以流道间距、流道壁厚和流道截面尺寸为核心变量的多目标优化模型，对耦合工质黏度以及导热系数等动态参数进行迭代计算。以再压 S-CO₂ 循环高温回热器 PCHE 的优化为例（如图 1 所示），在优化过程中，可设置冷、热侧错层布置间距为 0.5mm，壁厚控制在 0.3mm，精确匹配 8.0MPa 运行压力工况，以实现结构参数与工质物性参数逐点适配，有效提高全域传热均匀性，避免固定结构引起的局部热损失。

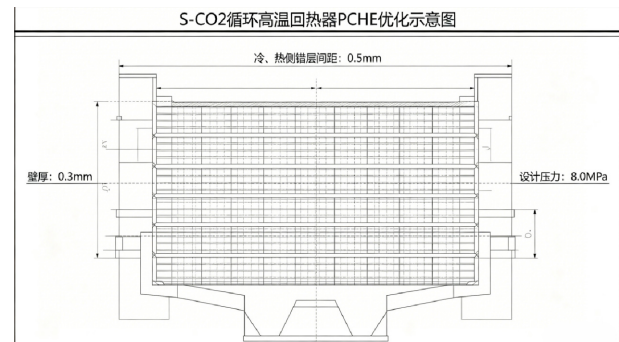


图 1 S-CO₂ 循环高温回热器 PCHE 优化示意图

(二) 湍流强化与边界层调控的流场热力特性优化技术

S-CO₂ 微尺度流动中，高层流比例和不断加厚的流动边界层是导致传热效率不高、流场分布不均匀的核心流场诱因。在此基础上，结合主动湍流强化和被动边界层精细调控技术，对

流动主流结构进行扰动,可打破稳态边界层增长规律,强化冷热流体动热交换^[5]。这一可技术在不改变整体流道布置的前提下,实现流场热力特性的精细化优化,解决传统流道传热不充分和近壁传热停滞等技术难点问题。

在具体实施中,可采用被动流场调控和分区边界层调控相结合的技术方案,实现全区域热力特性的优化,且不增加系统整体流阻负荷。在 PCHE 微通道内壁布置周期性微扰流结构,取代传统的平滑流道,实现对附面层生长的精确干预。比如,在优化过程中,可在平直微流道的内壁上加工一系列的梯形凸形扰流结构,使其高度 0.15mm、凸台间距 1.0mm、梯形顶角 60°,实现低雷诺数来流条件下对近壁区流动的持续扰动,打破层流边界层的稳定结构,强化壁面换热。针对高流速区间的流道,可在流道内增加 0.2mm 深度和 2.0mm 轴向间距的不连续分流槽道结构,以实现对主流核心流体的分流,抑制流体轴向速度梯度的过度集中,防止局部流动停滞。在此基础上,结合流场分区调控逻辑,在稳流段采用平滑流道设计,减小局部涡流损失;在核心传热段布置扰流复合结构,实现紊流强度分区精准调控。这些措施的实施,可以精确解决 S-CO₂ 微尺度流动附面层加厚的难题,同时提高流场均匀性和传热强度,避免单一湍流强化引起的全域流动阻力激增问题。

(三) 全工况匹配的 PCHE 运行参数协同调控策略

布雷顿循环实际运行中,热源温度、系统负荷和压力呈现动态波动特征,基于额定工况的固定操作参数难以覆盖全工况运行需求,易导致传热失配和热力损失加剧。基于多参量协同调控策略,可建立运行参数与系统运行状态之间的动态映射机理,实现变载、变温、变压工况下热力性能的适应性匹配,有效拓宽设备高效运行区间,提升系统全域稳定运行水平^[6]。

在具体实施过程中,需要建立压力-流量-温度多参量联动的全工况协同调控系统,并依托系统实时运行参数实现工况动态自适应。首先,确定 S-CO₂ 循环的全工况运行范围,以系统工作压力 7.0-10.0MPa,热源温度 300-550℃,负荷范围为 50%-100%为调控边界,构建多维参数调控数据库。针对近临界负荷工况,调节工质流量比至 1:1.2,稳定运行压力 7.4MPa,精准规避工质性质突变区间,抑制传热恶化。针对高温高负荷工况,同步调节进出口工质温差梯度,实现热端入口温度差 8℃/m/m,与高速工质换热需求相匹配。例如,在光热型 S-CO₂ 布雷顿循环系统中,可通过实时感知模块,采集 PCHE 进、出口的热力参数,将前端热源调节单元和后压调节单元进行联动,使当日热源温度波动达到 50℃时,同步调节工质循环流量和系统反压,实现热交换负荷与系统输入功率动态匹配,保证设备在全工况下的热力性能稳定输出。

(四) 多单元耦合的 PCHE 系统集成与热力匹配优化

作为 S-CO₂ 布雷顿循环核心传热单元,PCHE 与压缩机、涡轮、预冷器等核心设备之间存在着强耦合关系,单一设备优化

难以解决系统级参数不匹配的问题。从系统热力平衡角度出发,统筹考虑设备运行特性和参数匹配关系,可打通设备之间热力损失传导路径,实现蓄热器与循环系统的整体热力匹配,提高系统运行效率。

在具体实施中,需要建立 PCHE 与系统多核单元参数的耦合匹配系统,通过分层集成和梯度匹配实现系统集成优化。对于再压 S-CO₂ 循环结构而言,可采用高、低温 PCHE 分级一体化布置方式,将高温回热式 PCHE 与透平机排气出口单元对接,低温回热式 PCHE 与预冷器出口低温工质单元对接,实现不同温域换热装置的精确对位。如在双回热循环系统的一体化中,可将高温 PCHE 与 480℃ 排气相匹配,低温 PCHE 与 35℃ 低温工质相匹配,实现对不同温区工质的分层匹配,避免高、低温传热参数之间的相互影响。同时,建立压降与压缩机升压参数耦合匹配机理,实现压降梯度小于 0.03MPa/m,并与压缩机额定升压参数 8.5MPa 匹配,消除因设备间阻抗失配引起的功率损耗。在此基础上,耦合预冷温控单元,使进入蓄热器的低温工质入口温度稳定在 32℃,避免近临界温变引起的系统热力不平衡,实现多单元参数的精确耦合,实现对全系统工况的高适应性。

结束语

综上所述,S-CO₂ 布雷顿循环系统中 PCHE 的热力性能优化与系统集成,可有效破解 S-CO₂ 换热系统热力平衡难题,提升系统参数匹配特性,为其高效宽工况运行提供技术支持。未来,可通过多工况模拟和实验验证,实现结构调控参数的优化,深化多设备耦合匹配机理,促进该类型换热器和 S-CO₂ 布雷顿循环系统的工程化迭代应用。

[参考文献]

- [1]赵斌,高璇,陈嘉祥,等.基于超临界 CO₂布雷顿-有机朗肯循环的塔式光热发电系统热性能仿真[J].发电技术,2026,47(2):431-442.
- [2]牛晓娟,付亚楠,雷有哲,等.低温环境下 S-CO₂混合工质布雷顿循环系统热力学性能分析[J].工程热物理学报,2025,46(8):2471-2480.
- [3]余廷芳,张良离,周嘉鹏,等.超临界 CO₂布雷顿循环耦合有机闪蒸循环的性能分析及优化[J].浙江大学学报(工学版),2025,59(1):130-140.
- [4]陈磊,赵高曼,杨思远,等.超临界二氧化碳闭式布雷顿循环系统热力学评价研究[J].新能源科技,2025,6(2):38-45.
- [5]余廷芳,宋凌.超临界 CO₂布雷顿循环余热回收系统性能分析与优化[J].浙江大学学报(工学版),2023,57(2):404-414.
- [6]朱涛,梁彬,项鸣,等.超临界 CO₂布雷顿循环中温回热器结构模拟优化[J].节能技术,2025,43(3):241-248.