

# 高参数超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环热力系统优化与关键部件匹配特性研究

屈子贺

河南百川畅银环保能源股份有限公司, 河南省郑州市, 450001;

**摘要:** 随着能源需求的不断增长和环境保护意识的提升, 开发高效、清洁的能源转换技术成为全球关注的焦点。高参数超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环因其独特的优势, 如高效率、紧凑的系统结构以及较低的环境影响, 近年来受到学术界和工业界的广泛关注。这一技术在发电、余热回收及可再生能源利用等领域展现出巨大的潜力, 但也面临着诸多技术挑战, 特别是在系统优化与关键部件匹配方面。因此, 深入研究其热力特性和运行规律具有重要的理论意义和实际应用价值。

**关键词:** 高参数超临界 CO<sub>2</sub>; 布雷顿循环热力; 系统优化; 关键部件匹配; 特性研究

**DOI:** 10. 64216/3080-1508. 25. 08. 018

## 引言

随着全球能源结构的转型和可持续发展目标的推进, 传统能源转换技术已难以满足现代社会对高效、低碳的需求。在这一背景下, 高参数超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环技术因其独特的热力学特性和广泛的应用前景, 逐渐成为研究热点。该技术不仅能够显著提升能源利用效率, 还具备结构紧凑、占地面积小等优势, 尤其适用于空间受限的场景。然而, 要实现其在实际工程中的广泛应用, 仍需克服诸多技术难题, 例如工质物性变化对系统稳定性的影响, 以及关键部件在极端条件下的性能瓶颈。这些问题的存在使得系统优化与部件匹配的研究显得尤为重要。

## 1 高参数超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环的优势

### 1.1 热力学效率显著提升

高参数超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环的热力学效率优势源于超临界 CO<sub>2</sub> 的物性特征与高参数环境的协同作用。从热力学理论来看, 循环效率与工质的平均吸热温度及放热温度密切相关, 高参数(高温、高压)可大幅提高循环的平均吸热温度, 逼近卡诺循环效率极限。同时, 超临界 CO<sub>2</sub> 在近临界区至高温区的比热容呈现出“平台型”分布, 在换热器中能够实现近似等温吸热过程, 减少不可逆传热损失; 其低黏度特性(仅为常规蒸汽的 1/10-1/5)可降低流体在管道及部件内的流动阻力损失, 减少压气机耗功。相较于传统蒸汽朗肯循环, 在相同热源温度下, 高参数超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环的净效率可提升 5%-10%, 尤其在高温热源(如 600℃ 以上)场景中, 效率优势更为突出, 这一特性使其在高品位能源转化领

域具备核心竞争力。

### 1.2 系统结构紧凑性大幅优化

系统紧凑性是高参数超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环的另一核心优势, 其本质是超临界 CO<sub>2</sub> 高密度特性对部件尺寸的缩减作用。在超临界状态下, CO<sub>2</sub> 的密度可达 200-800kg/m<sup>3</sup>, 接近液态工质密度, 远高于常规蒸汽(约 1-10kg/m<sup>3</sup>)。根据流体输送与换热理论, 部件尺寸(如管道直径、换热器体积、涡轮机叶轮直径)与工质密度呈负相关——高密度工质可在相同流量需求下减小流速, 进而缩小管道内径; 在换热器设计中, 高密度工质可提升单位体积的换热系数, 减少换热面积需求。以换热器为例, 相同换热功率下, 超临界 CO<sub>2</sub> 换热器的体积仅为常规蒸汽换热器的 1/3-1/5; 对于涡轮机与压缩机, 高密度工质可降低叶轮的转速与直径, 减少设备重量与占地面积。这种紧凑性优势不仅降低了系统的基建成本与空间需求, 还提升了系统的机动性, 使其适用于舰船动力、移动能源站等空间受限场景。

### 1.3 环境与经济性双重利好

从环境友好性角度看, CO<sub>2</sub> 作为循环工质具有无毒、不可燃、化学稳定性强的特点, 且其全球变暖潜能值(GWP)远低于传统制冷剂(如氟利昂), 臭氧破坏潜能值(ODP)为 0, 不会对生态环境造成负面影响; 同时, CO<sub>2</sub> 在自然界中储量丰富、获取成本低, 可实现工质的循环利用, 避免工质泄漏带来的环境风险与资源浪费。从经济性角度分析, 高参数超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环的经济性优势体现在两个方面: 一是系统紧凑性降低了设备制造、运输及安装成本, 据理论测算, 相同功率下该系

统的初始投资成本比常规蒸汽系统低 15%-25%；二是高热力学效率提升了燃料利用率，减少了能源消耗成本，尤其在长期运行中，可显著降低系统的运维成本。此外，该循环对热源的适应性强，可兼容化石能源、核能、可再生能源等多种热源，为跨能源领域的应用提供了经济性基础，有助于推动能源利用的多元化与低成本化。

## 2 高参数超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环面临的问题

### 2.1 工质物性突变引发的系统稳定性难题

高参数环境下，超临界 CO<sub>2</sub> 物性（密度、比热容、导热系数）在近临界区（温度 31.1-100℃、压力 7.38-10MPa）及跨临界区呈剧烈非线性变化，形成“物性急变带”。从热力学平衡看，这种物性突变会打破系统能量与质量平衡。在换热器中，工质温度微小波动（如 ±5℃）可能使密度变化率超 20%，引发流场不均、局部流速骤升或压力脉动，产生流动噪声与振动；在压缩机中，物性突变会使压缩过程多变指数不稳定，导致压缩机出口参数（温度、压力）偏离设计值，引发喘振风险。此外，物性突变还会影响系统控制精度，传统线性控制策略难以适应物性非线性变化，使系统参数波动幅度增大，长期运行易引发部件疲劳损伤，降低系统稳定性与寿命。

### 2.2 关键部件耐高温高压性能瓶颈

高参数超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环运行环境（温度 550-700℃、压力 20-30MPa）对关键部件（换热器、涡轮机、压缩机、密封件）的材料性能与结构设计要求严苛。从材料科学角度而言，现有金属材料（如 316 不锈钢、镍基合金）在高温高压下存在晶间腐蚀、蠕变变形等问题，例如换热器换热管连接部位易应力腐蚀开裂，涡轮机叶片高温下强度与韧性下降，压缩机转子与缸体高压下密封困难，传统密封易失效导致工质泄漏。从结构设计角度来看，部件结构强度与热应力协调成为难题，高温高压下部件不同部位温度与压力梯度大，易导致热应力与机械应力叠加，使结构变形或开裂，比如换热器流道设计需兼顾换热效率与抗应力能力，复杂流道加剧应力集中，简单流道难以满足换热需求，形成设计矛盾。

### 2.3 系统参数耦合矛盾制约优化空间

高参数超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环的核心参数（循环压力比、透平入口温度、工质流量）存在强耦合关系，此耦合源于热力学循环规律与部件性能的相互影响。从循环理论讲，提高透平入口温度能提升循环效率，却会使

透平出口温度升高、冷却系统负荷增加，还要求换热器与透平材料有更高耐高温性能；提高循环压力比可减少压缩机耗功，但会增大系统承压需求、增加部件制造难度与成本，且过高压力比可能使工质进入近临界区引发物性突变；增加工质流量能提升系统功率，但会加大泵或压缩机能耗、增加换热器换热负荷，使换热面积需求增大。参数间相互制约，单一参数优化难以实现系统全局最优，如仅追求高循环效率会使部件成本飙升，仅关注低成本会牺牲系统性能，形成“效率-成本-稳定性”多目标优化矛盾，制约系统优化空间。

## 3 高参数超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环热力系统优化与关键部件匹配特性策略

### 3.1 基于物性分区的循环参数优化

针对工质物性突变引发的稳定性问题，可采用基于物性分区的循环参数优化策略，其核心是根据超临界 CO<sub>2</sub> 的物性变化规律，将循环参数区间划分为“稳定区”“过渡区”“急变区”，并针对不同分区制定差异化的优化目标与方法。从物性分析角度，通过热力学软件（如 NISTREFPROP）构建超临界 CO<sub>2</sub> 的物性数据库，识别物性变化平缓的“稳定区”（通常为温度 >200℃、压力 >15MPa），将该区域作为循环的主要运行区间，减少物性突变对系统的影响；对于“过渡区”（温度 100-200℃、压力 10-15MPa），采用多目标优化算法（如 NSGA-II），协调效率与稳定性目标，通过调整压力比与温度差，降低物性变化对系统的干扰；对于“急变区”，尽量避免循环参数落入该区间，或通过设置缓冲段（如在换热器入口增加节流装置），减缓物性变化速率。同时，结合循环的热力学模型，建立参数优化的目标函数（如净效率最大化、熵产最小化），引入约束条件（如部件温度、压力限值），实现循环参数的全局优化，兼顾效率与稳定性。

### 3.2 耐高温高压材料与结构协同设计

解决部件耐高温高压性能瓶颈的关键在于材料选择与结构设计的协同优化。从材料层面，根据部件的工作环境选择适配的耐高温高压材料：换热器可选用陶瓷基复合材料（CMC），其在 700-1000℃ 下仍具备优异的强度与耐腐蚀性能，且导热系数高，可提升换热效率；涡轮机叶片可采用单晶镍基高温合金（如 CMSX-4），通过合金元素的调控（如添加铪、钨），增强材料的蠕变抗力与高温强度；密封件可采用金属-石墨复合密封材料，利用金属的高强度与石墨的自润滑性，实现高温高

压下的可靠密封。从结构设计层面,采用有限元分析(FEA)与计算流体力学(CFD)耦合的方法,优化部件结构:换热器采用螺旋板式或微通道结构,在提升换热效率的同时,通过流道的弧形设计分散应力,减少应力集中;涡轮机叶片采用空心冷却结构,通过内部冷却通道设计,降低叶片表面温度,同时采用气动优化的叶片型线,减少气流损失;压缩机采用分体式缸体结构,通过法兰连接的柔性设计,适应高温高压下的热胀冷缩,避免结构变形。

### 3.3 基于耦合度的系统参数解耦方法

为破解参数耦合矛盾,需建立基于耦合度的系统参数解耦方法,核心是识别关键耦合变量,通过数学建模与控制策略实现参数的独立优化与全局协调。首先,构建系统参数耦合矩阵,通过灵敏度分析(如Sobol分析法)计算各参数对系统性能(效率、成本、稳定性)的影响权重,识别出耦合度高的关键参数(如透平入口温度与循环压力比、工质流量与换热器面积);其次,采用解耦控制理论,将多变量优化问题分解为多个单变量子问题:对于强耦合参数,引入中间变量(如“等效温度”“等效压力”),建立参数间的解耦模型,例如,通过调整冷却系统的冷却水量,间接控制透平出口温度,减少其与透平入口温度的耦合;对于弱耦合参数,采用分层优化策略,上层优化全局目标(如系统效率),下层优化局部参数(如压缩机转速),通过迭代计算实现全局最优。此外,引入智能算法(如粒子群优化算法),对解耦后的参数进行协同优化,确保各参数在独立调整的同时,满足系统全局性能要求。

### 3.4 变工况下部件匹配的自适应调控

针对变工况下部件匹配适应性不足问题,构建基于模型预测控制(MPC)的自适应调控策略实现部件性能动态匹配。首先,建立各部件变工况数学模型,压缩机模型考虑转速、压力比对流量与效率的影响,涡轮机模型引入导叶角度、入口参数对输出功率的修正系数,换热器模型用 $\epsilon$ -NTU法描述换热特性;其次,基于上述模型构建系统整体预测模型,实时采集热源参数与负荷需求,预测系统未来运行状态;然后,以系统效率最大化、参数波动最小化为目标制定调控策略,热源温度升高时,MPC控制器提高透平导叶角度增加输出功率,调整压缩机转速维持循环压力比稳定;负荷需求降低时,减少工质流量,调整换热器流量分配确保换热效率;最后,引

入反馈修正机制,以实际与预测参数偏差为反馈信号实时调整策略,提高调控精度。此外,在关键部件设保护阈值,运行参数接近喘振或阻塞边界时触发紧急调控,确保系统安全稳定运行。

### 3.5 基于热力网络的系统集成优化

从系统集成角度,可将高参数超临界CO<sub>2</sub>布雷顿循环视为由多个热力单元(压缩机、涡轮机、换热器、回热器)组成的热力网络,通过优化网络拓扑与能量流分配,提升系统整体性能。首先,构建热力网络的节点-边模型,将各部件作为节点,工质流与能量流作为边,建立节点的能量平衡与质量平衡方程;其次,识别网络中的能量损失节点(如换热器的传热损失、管道的散热损失),通过拓扑优化减少无效能量传递:例如,增加回热器的级数,利用涡轮机出口的高温工质预热压缩机入口工质,减少换热器的热负荷;优化管道布局,缩短高参数工质的输送距离,降低散热损失;然后,对网络中的能量流进行分配优化,采用pinch技术分析系统的夹点温度,确保各换热单元的温度差合理,避免不可逆损失;最后,引入多准则决策方法(如层次分析法),综合考虑效率、成本、稳定性等目标,对不同的热力网络方案进行评估,选择最优的系统集成方案。这种集成优化策略可打破单一部件优化的局限,实现系统能量的梯级利用与高效转化。

## 4 结语

高参数超临界CO<sub>2</sub>布雷顿循环热力系统优化与关键部件匹配特性研究为能源技术创新提供重要参考。分析其优势、问题及优化策略发现,该技术在提升效率、优化结构和实现环境经济性上潜力显著,但工质物性突变、部件耐高温高压性能瓶颈及系统参数耦合矛盾等制约其发展。未来,需加强实验验证与工程应用研究以推动成果转化。随着新材料、智能控制技术和先进制造工艺发展,该循环有望在多能源领域广泛应用,助力全球能源转型与可持续发展。

### 参考文献

- [1]徐峰.高参数超临界CO<sub>2</sub>布雷顿循环热力系统优化研究[J].热能动力工程,2023,39(2):42-43.
- [2]赵鹏.基于耦合度解耦的热力系统参数优化方法[J].动力工程学报,2021,41(8):67-68.
- [3]孙浩.变工况下超临界CO<sub>2</sub>循环自适应调控策略研究[J].控制工程,2023,30(4):45-52.