

超临界二氧化碳混合工质布雷顿循环研究进展

王天堃¹, 刘天野^{2,3}, 乔加飞⁴, 王兵兵⁴, 杨震^{2,3}, 段远源^{2,3*}

1. 国电电力发展股份有限公司, 北京市朝阳区 100101;
2. 热科学与动力工程教育部重点实验室(清华大学), 北京市海淀区 100084;
3. 二氧化碳资源化利用与减排技术北京市重点实验室(清华大学), 北京市海淀区 100084;
4. 国能国华(北京)电力研究院有限公司, 北京市昌平区 102200)

Research Progress on Supercritical CO₂-Based Mixture Brayton Cycle

WANG Tiankun¹, LIU Tianye^{2,3}, QIAO Jiafei⁴, WANG Bingbing⁴, YANG Zhen^{2,3}, DUAN Yuanyuan^{2,3*}

1. Guodian Power Development Co., Ltd., Chaoyang District, Beijing 100101, China; 2. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education (Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China; 3. Beijing Key Laboratory for CO₂ Utilization and Reduction Technology (Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China; 4. Guoneng Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102200, China)

摘要:【目的】超临界CO₂布雷顿循环具有效率高、结构紧凑、发电潜力大、可扩展性强等优点。采用CO₂基混合物作为循环工质,可调节临界参数、提升循环性能,是近年来关注的热点,综述其研究进展对于基础理论研究及工程应用具有重要意义。【方法】对应用超临界CO₂基混合物布雷顿循环研究进展进行综述,总结了CO₂基常用的混合工质种类,在循环部件及结构层面开展了讨论,并分析了常用循环性能指标及研究工况等。【结论】应用混合工质可提升或降低CO₂的临界温度,但目前物性参数预测范围有限且实验数据欠缺。最常被探究的循环形式是再压缩循环结构,普遍关注的是循环的热力学性能和设计工况研究。建议加强和深化混合工质热物理性质的理论和实验研究,合理检验部件材料兼容性,针对混合工质的热力学特性提出新型循环结构,并应进一步探究分析循环的综合性能和动态特性。

关键词: 超临界; 布雷顿循环; 二氧化碳; 混合工质; 热力学性质; 循环结构; 循环性能

ABSTRACT: [Objectives] The supercritical CO₂ Brayton cycle has the advantages of high efficiency, compact structure, enormous power generation potential, and strong scalability. CO₂-based mixtures as working fluids can change the critical point and improve cycle performance, which has been the

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB4102503); 国家能源集团2030重大项目先导项目(GJNY2030XDXM-19-10.1)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China (2023YFB4102503); 2030 Major Pilot Project of CHN Energy (GJNY2030XDXM-19-10.1).

focus in recent years. It is of great significance to review its research progress for basic theoretical research and engineering application. [Methods] A review is conducted on the research progress on the application of CO₂-based mixtures in the supercritical Brayton cycle. The types of commonly explored mixed working fluids are summarized. The research on cycle components and structure layout is discussed, and the commonly used cycle performance and operating conditions are analyzed. [Conclusions] The application of CO₂-based mixtures can increase or decrease the critical temperature of CO₂, but the predicted physical properties range is limited, and experimental data is lacking. The recompression Brayton cycle is a commonly investigated cycle layout, and thermodynamic performance and design conditions are widely focused. It is recommended to strengthen and deepen the theoretical and experimental research on the thermodynamic properties of mixed working fluids, conduct reasonable verification on the compatibility of component materials, and propose the novel cycle structure layout for the different thermodynamic properties of mixed working fluids. Further exploration is needed for the analysis of comprehensive performance and dynamic characteristics of the CO₂ mixtures supercritical Brayton cycle.

KEY WORDS: supercritical; Brayton cycle; carbon dioxide; mixed fluids; thermodynamic property; cycle structure; cycle performance

0 引言

随着社会经济的快速发展,全球变暖和气候

变化严重影响着生态安全和人类生存。减少环境污染、降低温室气体排放、提高能源利用率是解决能源问题和环境问题的重要手段。二氧化碳化学性质稳定、密度高、无毒、制备成本低、压缩系数低，可作为动力循环的工质^[1-2]。以CO₂为工质的循环，根据循环过程中工质所处的状态，可划分为跨临界循环和超临界循环。超临界循环又可分为半闭式循环和闭式循环，其中半闭式循环采用直接燃烧加热方式^[1]。美国NET Power公司提出的Allam循环是典型的半闭式循环之一^[3]。

超临界CO₂布雷顿循环为典型的闭式循环，在1950年由Sulzer^[4]提出，而后由Angelino^[5]和Feher^[6]开展理论研究并改进循环形式，在近年来引起了国内外学者的广泛关注。与其他循环形式相比，超临界CO₂布雷顿循环具有如下优势^[7-11]：透平机械和换热器设备体积小、结构紧凑；在近临界区工质被压缩，压缩功耗小；工质腐蚀性小，与部件材料的兼容性强；可采用空冷冷却方式，适用于干旱地区。此外，相比于传统蒸汽朗肯循环，当透平入口温度高于600℃时，超临界CO₂布雷顿循环热功转换效率更高。超临界CO₂布雷顿循环应用热源场景广泛，如太阳能、地热、化石燃料、核电站、废热回收等场景^[12]。2021年，西安热工研究院有限公司建成了国际首座5 MW超临界CO₂闭式循环火力发电机组^[13]，该机组属于世界参数最高、容量最大的同类试验机组，性能指标达到国际领先水平，其成功投运验证了该技术在工业运行的可行性。王林^[14]研究了5 MW超临界CO₂机组锅炉闭式循环吹管工艺。郑开云^[1]研究了超临界CO₂循环在不同应用场景下的优势与潜在的社会和经济效益，还开展了超临界CO₂循环冷端温度优化研究^[15]。唐鑫等^[16]对超临界CO₂布雷顿循环的控制策略研究进行了综述，总结了循环的变负荷控制策略及变负荷过程中用于辅助控制的措施。因此，超临界CO₂布雷顿循环是当前研究的热点和前沿，其综合性能是学者和工业界关注的重点。

动力循环的应用场景、部件、工质、结构布局等决定着循环的综合性能。对于超临界布雷顿循环中，工质临界状态是循环最低温度的限制，而CO₂工质的临界温度为31℃，临界压力为

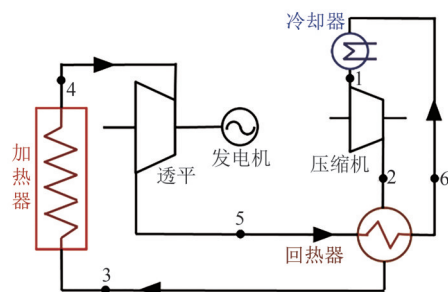
7.4 MPa，因此，压缩机入口温度必须高于临界状态。需要注意的是，在临界点附近，热物理性质对压力和温度的变化高度敏感，此外，工质的高密度、低黏度、低可压缩性等特性，使得压缩机功耗小，有利于获得更高的热效率。

临界温度决定着压缩机进口温度，临界压力决定着循环的最大压比，因此，临界参数对循环效率影响重大。将其他组元工质混入CO₂工质中，可调整其临界参数，因此，合理选择添加工质的种类与混合比例，可改进循环性能。近年来，采用超临界CO₂基混合工质的布雷顿循环已被越来越多的学者所探究。以超临界布雷顿循环(supercritical Brayton cycle)和CO₂混合物(CO₂ mixture)为关键词在Web of Science数据库进行搜索，发现发表文章数量逐年增加。因此，对于当前应用CO₂基混合工质的超临界布雷顿循环的研究进展仍需进一步分析。

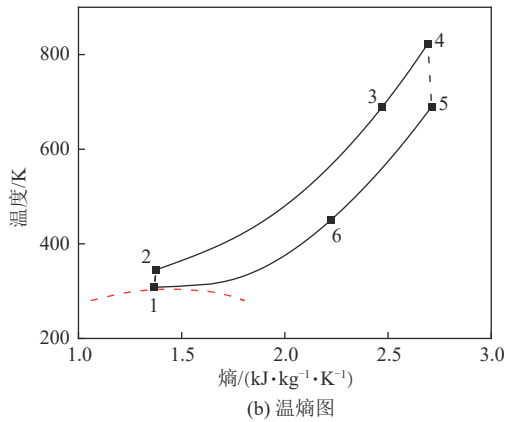
本文首先综述了超临界CO₂混合工质布雷顿循环的研究情况，讨论了使CO₂临界温度升高或降低的常见添加工质，揭示了混合工质对循环性能的影响；其次，对当前应用混合工质的循环部件及构型研究展开分析；最后，讨论了获得重点关注的循环性能指标及工况探究。本文的研究结果可为超临界布雷顿循环采用CO₂基混合工质的理论研究及实际工程应用提供参考。

1 混合工质性能

超临界CO₂布雷顿循环在运行过程中，工质处于超临界状态。图1为简单回热超临界CO₂布雷顿循环^[17]的结构示意图及温熵图，该系统主要包括加热器、透平、回热器、冷却器、压缩机等部



(a) 结构示意图



1—压缩机进口；2—回热器低温高压工质进口；3—加热器进口；4—透平进口；5—回热器高温低压工质进口；6—冷却器进口。

图1 简单回热循环结构及温熵图

Fig. 1 Configuration and temperature-entropy diagram of simple recuperative cycle

件。循环工质的临界状态影响着压缩机进口的温度和压力。

通过在 CO₂ 工质中适当添加其他工质组分，可改变循环工质的临界参数，进而改变循环性能。被添加的工质应化学性质稳定、低毒、不易自燃，

表1 使临界温度升高的常见添加工质物性

Tab. 1 Thermodynamic properties of common additives with ascending critical temperature

| 工质 | 临界温度/K | 临界压力/MPa | 可燃性 | 腐蚀性 | 毒性 | 已有研究 |
|------------------|--------|----------|-----|-----|----|-------------------|
| 丙烷 | 369.89 | 4.251 | 是 | 无 | 无毒 | 文献[18-23] |
| 新戊烷 | 433.74 | 3.196 | 是 | 无 | 低毒 | 文献[24] |
| 正丁烷 | 425.13 | 3.796 | 是 | 无 | 低毒 | 文献[20, 22, 25-27] |
| 异丁烷 | 407.81 | 3.629 | 是 | 无 | 低毒 | 文献[22] |
| 环己烷 | 553.60 | 4.081 | 是 | 无 | 无毒 | 文献[22, 25, 28] |
| H ₂ S | 373.10 | 9.000 | 是 | 是 | 有毒 | 文献[20, 22, 28-33] |
| NH ₃ | 405.56 | 11.363 | 是 | 是 | 有毒 | 文献[31] |
| SO ₂ | 430.64 | 7.887 | 否 | 是 | 有毒 | 文献[31, 34] |

通过循环的冷却过程可将工质从超临界状态冷凝到亚临界状态，如在 CO₂ 工质中添加 N₂O₄^[35] 和 TiCl₄^[36-37]。Binotti 等^[35]将纯 CO₂、纯 N₂O₄、CO₂-N₂O₄ 混合物作为循环工质应用于塔式发电厂中，发现即使在温度较高的沙漠地区也能采用冷凝过程。

2) 添加临界温度低于 CO₂ 纯工质的组分。在寒冷地区，环境温度低，在纯 CO₂ 中添加临界参数较低的其他组元，降低循环工质的临界参数，可扩大循环的工作温度范围，实现循环过程与环境的更好匹配。此外，更低的压缩机进口温度具有更大的提高循环热效率的潜力。相比于纯 CO₂，

在高温高压条件下不与 CO₂ 发生化学反应，与材料有较好的相容性。现有研究受到关注的 CO₂ 基混合工质可大致分为 2 类：

1) 添加临界温度高于 CO₂ 纯工质的组分。考虑到炎热干旱地区的环境温度较高，如果采用空冷式冷却器，环境温度即为冷却器冷流进口温度，而在冷却器部分可能无法将从回热器流出工质的温度冷却到预设的最佳冷却温度，使得压缩机进口温度偏高，导致压缩过程远离临界点，从而使压缩功耗小的优势下降。如采用更大换热面积的冷却器或加大冷流工质的流量，可减弱上述劣势，但相应的循环成本会增大。当在 CO₂ 工质中添加临界参数较高的工质时，可提高循环工质的临界参数，与冷却器较高出口温度更匹配，使得压缩过程更贴近工质的临界状态，避免了压缩功耗过大，提升了循环效率，而缩小的循环工作温度范围的劣势可通过压缩过程靠近临界温度附近的优势来补偿。相比于纯 CO₂，使得临界温度升高的常见添加工质物性如表 1 所示。

使得临界温度降低的常见添加工质物性如表 2 所示。

一些学者比较了应用不同混合工质对循环性能的影响。Hu 等^[25]根据临界温度的分布趋势，探究了相比于纯 CO₂ 临界温度较高或较低的混合工质对超临界布雷顿循环性能的影响，提出 CO₂-丁烷、CO₂-环己烷可应用于干旱地区或更高的散热温度下，CO₂-He 和 CO₂-Kr 可应用于北极地区或较低的散热温度下。Jeong 等^[28]探究了在钠冷快堆背景下采用不同临界状态混合工质的超临界布雷顿循环性能，发现：采用临界温度较低的 Xe 和 Kr 添加工质可提高循环热效率，但是对于添加 Ar、

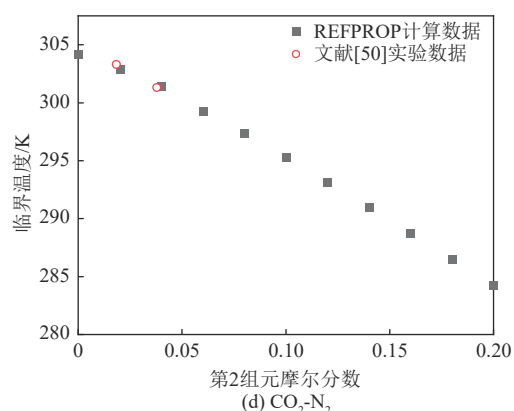
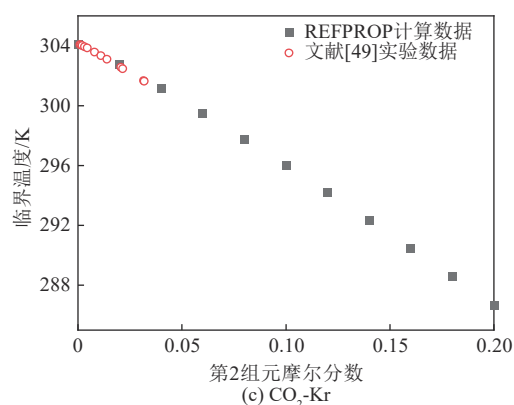
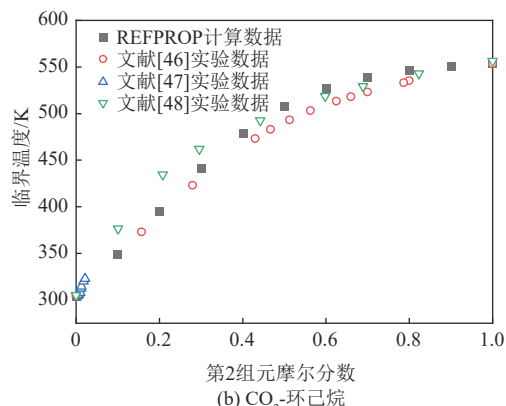
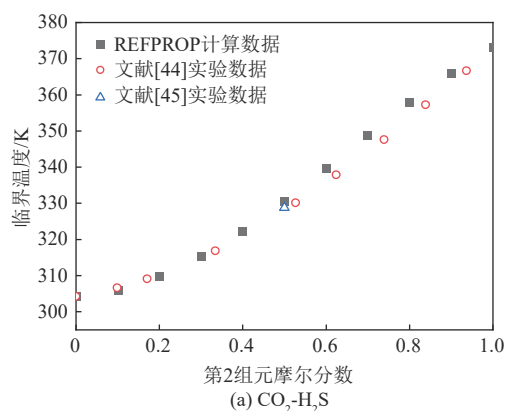
表2 使临界温度降低的常见添加工质物性

Tab. 2 Thermodynamic properties of common additives with descending critical temperature

| 工质 | 临界温度/K | 临界压力/MPa | 腐蚀性 | 毒性 | 已有研究 |
|-----------------|--------|----------|-----|----|---------------------------|
| Ne | 44.40 | 2.662 | 无 | 无毒 | 文献[38-39] |
| O ₂ | 154.58 | 5.043 | 无 | 无毒 | 文献[25, 29, 34, 39-40] |
| He | 5.20 | 0.228 | 无 | 无毒 | 文献[25, 29, 33, 39-40] |
| Ar | 150.69 | 4.863 | 无 | 无毒 | 文献[25, 29, 39-40] |
| Kr | 209.48 | 5.525 | 无 | 无毒 | 文献[25, 28, 33-34, 39, 41] |
| Xe | 289.73 | 5.842 | 无 | 无毒 | 文献[26-28, 39, 41] |
| N ₂ | 126.19 | 3.396 | 无 | 无毒 | 文献[39-40] |
| CO | 132.86 | 3.494 | 无 | 有毒 | 文献[34] |
| CH ₄ | 190.56 | 4.599 | 无 | 无毒 | 文献[34] |

N₂、O₂的混合工质，由于临界压力的增加，最佳循环压比降低，导致循环性能恶化；相比于纯CO₂工质，采用临界温度较高的H₂S和环己烷的混合工质再压缩循环具有更高的热效率。

在大多数研究中，混合工质的物性参数是通过REFPROP软件^[42]获得的，但仍存在很多预测且未得到证实的数据。乔加飞等^[43]综述了应用于半闭式超临界循环的CO₂混合工质热力学性质的研究进展，总结了CO₂-O₂、CO₂-N₂等临界参数的实验数据。Conboy等^[38]指出对于REFPROP软件预测的一些混合物热力学性质还未得到证实。图2展示了部分混合工质的临界温度随摩尔分数的变

图2 CO₂基混合工质临界温度的理论与实验数据Fig. 2 Theoretical and experimental data on the critical temperature of CO₂-based mixture

化情况，对比了REFPROP软件理论计算数据和实验数据的差别。对于H₂S与CO₂组成的混合工质^[44-45]以及环己烷与CO₂组成的混合工质^[46-48]，现有实验数据基本覆盖了全部的摩尔分数范围；而对于Kr与CO₂组成的混合工质^[49]以及N₂与CO₂组成的混合工质^[50]，CO₂摩尔分数小于95%的临界温度实验数据目前未见报道。因此，本文建议加强CO₂基混合工质相关热物性实验与理论研究，以满足超临界循环的应用需求。

2 循环部件及构型

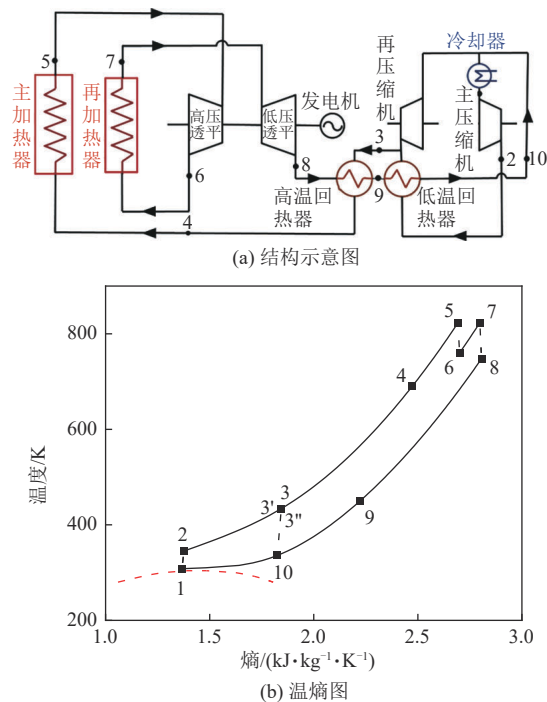
2.1 部件层面

应用混合物作为循环工质会影响部件的性能,如运行过程靠近临界状态的压缩机和冷却器等。Vesely 等^[29]探究了应用混合工质对循环效率及各部件的影响,比较了再压缩循环、预压缩循环、分体膨胀式循环,并研究了对循环压缩机和冷却器的影响。美国桑迪亚国家实验室^[38, 51]研究了应用 CO₂基混合物的超临界循环,包括 CO₂-丁烷、CO₂-Ne、CO₂-SF₆ 工质等,开展了实验测试,测试项目包括测试材料兼容性、评估压缩机性能、预测混合工质的临界参数,并通过测量压比及质量流量数据绘制压缩机性能图。Zhou 等^[18]探究了 CO₂-丙烷混合物在印刷电路板式换热器(printed circuit heat exchanger, PCHE)中的热力特性和水力特性,提出用 Nusselt 数和摩擦系数的相关性来预测不同混合比下 CO₂-丙烷混合物的传热和流动特性。Yin 等^[19]开展了 CO₂-丙烷混合工质在波纹式 PCHE 的数值分析,结果表明丙烷的加入有利于改善波纹式 PCHE 的流动和传热性能。此外, Xia 等^[52]对 CO₂基混合工质跨临界朗肯循环的向心透平开展热设计,并进行计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)分析,采用 CO₂与 R32 混合工质作为循环工质,得出 CO₂基混合工质的透平结构紧凑、体积小。Kravanja 等^[53]研发了一种双管换热器,探究并测试了在超临界状态下 CO₂-乙烷混合物在不同工况(温度、压力)下的换热性能。

2.2 循环层面

由部件层面到循环层面,应用 CO₂基混合物的循环构型引起了一些学者的关注。简单回热循环是最基本的循环形式之一。为降低压缩功耗,再压缩循环在简单回热循环的基础上增加了中间冷却器和再压缩机,通过分流降低低温回热器中高压流体的质量流量,进而减少低温回热器两股流体的热容差,使回热器中换热温差减小,提升循环效率。图 3 为带再热的再压缩循环结构示意图及温熵图。在探究应用超临界 CO₂基混合工质的布雷顿循环工作中,最为常见的是再压缩循环,

简单回热循环、中间冷却循环、部分冷却循环、预压缩循环、分流膨胀循环也都有所涉及。表 3 整理了应用 CO₂基混合工质的常见循环结构。



1—主压缩机进口; 2—低温回热器低温高压流体进口; 3—高温回热器低温高压流体进口; 4—主加热器进口; 5—高压透平进口; 6—再加热器进口; 7—低压透平进口; 8—高温回热器高温低压流体进口; 9—低温回热器高温低压流体进口; 10—冷却器进口。

图 3 再压缩超临界布雷顿循环结构及温熵图

Fig. 3 Configuration and temperature-entropy diagram of recompression with supercritical Brayton cycle

表 3 应用 CO₂基混合工质的常见循环结构

Tab. 3 Common cycle structures for the application of CO₂-based mixture

| 循环结构 | 特点 | 已有研究 |
|--------|-------------------|-------------------------------------|
| 简单回热循环 | 基本循环形式 | 文献[26-28, 30, 36] |
| 再压缩循环 | 降低高压流的质量流量 | 文献[20, 22, 24-34, 36, 39-41, 54-59] |
| 预压缩循环 | 增加低压流的压力 | 文献[29, 54, 59] |
| 中间冷却循环 | 分级压缩、中间冷却,减少压缩机功耗 | 文献[26-27, 30-31] |
| 部分冷却循环 | 再压缩分流前进行预冷却和预压缩 | 文献[26-27, 30-31] |
| 分流膨胀循环 | 减少热应力 | 文献[29, 54, 59] |

再压缩循环是学者探究 CO₂基混合工质最普遍的循环形式。孙铭泽等^[24]探究了超临界 CO₂二元混合工质中低温余热布雷顿循环发电系统性能,针对再压缩布雷顿循环形式,分析采用丙烷、新

戊烷、异丁烷等与 CO_2 混合工质的循环热效率和焓效率。Wang等^[34]以再压缩循环为研究对象，探讨了混合工质物性对提高循环效率的影响。Niu等^[20]对集成在塔式太阳能发电厂中的再压缩布雷顿循环采用3种 CO_2 基混合工质，应用最优分流比的分析方法评价各混合工质的应用潜力，分析各部件的焓损失及关键参数的影响，结果表明， CO_2 -丙烷具有实际应用的潜力。

学者们也比较了在不同循环结构下应用混合工质的性能。Jeong等^[28]探究了简单回热布雷顿循环和再压缩循环应用 CO_2 基二元混合工质的热力性能。Guo等^[26]比较了应用于塔式太阳能场景下基于 CO_2 基混合物的不同超临界布雷顿循环的热力性能，包括简单回热带再热循环、再压缩带再热循环、中间冷却带再热循环、部分冷却带再热循环，采用 CO_2 -Xe、 CO_2 -丁烷混合工质并进行对比，结果表明，应用 CO_2 -Xe工质的中间冷却循环是塔式太阳能系统中最合适的循环布局，其焓效率最高为34.07%。Valencia-Chapi等^[30]将采用 CO_2 基混合工质的超临界布雷顿循环应用在光热系统中，其中考虑了4种布雷顿循环形式：简单回热循环、再压缩循环、部分冷却循环、中间冷却循环。Tafur-Escanta等^[31]开展了再压缩循环、中间冷却循环、部分冷却循环应用纯 CO_2 工质、 CO_2 - NH_3 、 CO_2 - SO_2 、 CO_2 - H_2S 、 CO_2 - COS 混合工质的热力性能分析。

3 性能指标及工况分析

3.1 性能指标

对于 CO_2 基混合工质超临界布雷顿循环的研究，循环的热力性能是普遍关注的指标，如热效率和焓效率。孙铭泽^[54]分析了5种不同混合工质超临界布雷顿再压缩循环的热效率。马宁^[55]对比分析了丁烷、 H_2S 、丙烷与 CO_2 混合工质在再压缩循环中的热效率和焓效率。整体来看，循环的热力学效率是学者们关注的重点，也是在工程应用领域所重视的指标。

CO_2 基混合工质循环的经济性能和环保性能等也被一些学者所探究。Liang等^[60]对新型塔式太阳能热发电系统开展热经济性能分析，应用 CO_2 -

R290、 CO_2 -R600a、 CO_2 -R601a混合工质作为循环工质，研究了四季典型日辐照条件下光热系统的热效率、焓效率、发电量、平准化度电成本。Haroon等^[61]综合热力、经济、环保指标，分析了闭式布雷顿循环采用纯 CO_2 工质和 CO_2 - C_7H_8 混合工质的性能，结果表明，采用 CO_2 - C_7H_8 混合工质循环的 CO_2 排放更少，焓效率更高，但平准化度电成本增加。Ma等^[41]开展了 CO_2 基混合物超临界布雷顿循环的热经济分析和多目标优化工作，针对再压缩循环采用Xe和Kr作为添加工质，以循环焓效率和平准化度电成本为目标，优化压比、最大压力、分流比、换热性能。结果表明，与纯 CO_2 工质循环相比，添加Xe和Kr组元的混合工质循环效率均有所提高，但平准化度电成本也增大。Manzolini等^[36]探究了采用 N_2O_4 和 TiCl_4 混合工质的太阳能塔式发电站的热电转化效率和经济性能。

综上所述，混合工质超临界布雷顿循环的热力性、经济性、环保性已被学者关注，但与纯工质相比，采用混合工质的循环性能计算模型的差异性并没有被深入研究。为进一步探究混合工质循环的综合性能，建议从理论和工程实际的角度评估与纯工质循环的主要区别，如可制定适用于混合工质更加精准的部件经济计算模型。

3.2 工况分析

对于循环工况，大多数学者是基于设计工况进行研究的。考虑到在真实运行场景下的循环可能受到热源温度或环境温度变化的影响，透平进口温度和压缩机进口温度可能会偏离设计工况。此外，部分学者对于混合工质超临界布雷顿循环的非设计性能进行了探究。Xu等^[32]探究了 CO_2 - H_2S 混合工质超临界布雷顿循环非设计工况运行特性，评估了循环的热效率和净输出功率，结果表明，即使在环境温度高达50℃条件下，干冷超临界 CO_2 - H_2S 再压缩布雷顿循环也能表现出优异的热力学性能。Ma等^[21]研究了集成 CO_2 -丙烷混合工质超临界布雷顿循环的塔式太阳能系统运行策略及非设计工况性能，结果表明：添加丙烷工质可以延续系统的太阳能有效利用时间； CO_2 -丙烷系统的热盐填充率随太阳法向直射辐照度变化更加敏感。刘昕昕^[56]开展了混合工质布雷顿循环的

设计工况及非设计工况性能分析,对混合工质在PCHE中的流动与传热特性进行了评估。

在动态特性方面,王瑞^[62]探究了CO₂混合工质跨临界循环的动态特性。然而,目前针对CO₂基混合工质超临界布雷顿循环的动态特性还有待进一步研究和完善。

4 结论

1) 超临界CO₂混合工质应用于布雷顿循环的性能并非总优于CO₂纯工质,组元的种类和比例、循环结构、循环参数、应用场景等都影响着循环的最佳性能。

2) 对超临界CO₂基混合工质热物理性质的研究亟需加强并深化。目前,普遍采用的商用软件所提供的预测物性参数范围有限,缺乏实验数据支撑和检验,因此热力学性质和输运性质理论模型需要进一步深化研究。此外,还应综合考虑混合工质的稳定性、腐蚀性、安全环保性、应用温度区间的匹配性等因素。

3) 针对超临界CO₂混合工质循环形式的研究,主要集中于再压缩循环,还应针对混合工质特性开发新型循环形式,用以提升循环性能。此外,混合工质对于循环部件的影响应进一步探究,尤其是压缩机和换热器。

4) 目前对循环性能的研究主要集中在热力性能,如热效率和焓效率,除此之外,还需评估循环的综合性能,如经济性能、环保性能等。另外,探究适用混合工质特定部件的精确经济模型也是十分有必要的。

5) 应用超临界CO₂混合工质的布雷顿循环动态响应特性有待进一步探究与完善,热力参数瞬态变化对系统性能的影响有待揭示,循环启停状态、工质能流与物流分布、工质充注存储过程、故障诊断需纳入考虑范围。

6) 应进一步加强多场景应用潜力评估,探究超临界CO₂混合工质布雷顿循环在实际场景的应用潜力,如太阳能热电厂、中低温余热回收等场景,分析真实的环境温度波动和热源温度波动对循环性能的影响。

参考文献

- [1] 郑开云. 超临界二氧化碳循环发电技术应用[J]. 发电技术, 2020, 41(4): 399-406.
ZHENG K Y. Application of supercritical carbon dioxide cycle power generation technology[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(4): 399-406.
- [2] 高垚楠, 陈海峰, 王建永. 一种新型CO₂工质冷热电联供系统的热力性分析[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 131-138.
GAO Y N, CHEN H F, WANG J Y. Thermodynamic analysis of a new combined cooling, heating and power system using CO₂ working fluid[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 131-138.
- [3] TOLLEFSON J. Innovative zero-emissions power plant begins battery of tests[J]. Nature, 2018, 557(7707): 622-623.
- [4] SULZER G. Verfahren zur erzeugung von arbeit aus warme: Swiss Patent CH, 269599[P]. 1950-07-15.
- [5] ANGELINO G. Carbon dioxide condensation cycles for power production[J]. Journal of Engineering for Power, 1968, 90(3): 287-295.
- [6] FEHER E G. The supercritical thermodynamic power cycle[J]. Energy Conversion, 1968, 8(2): 85-90.
- [7] YANG J, YANG Z, DUAN Y. Off-design performance of a supercritical CO₂ Brayton cycle integrated with a solar power tower system[J]. Energy, 2020, 201: 117676.
- [8] YANG J, YANG Z, DUAN Y. Part-load performance analysis and comparison of supercritical CO₂ Brayton cycles[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 214: 112832.
- [9] WANG K, HE Y L, ZHU H H. Integration between supercritical CO₂ Brayton cycles and molten salt solar power towers: a review and a comprehensive comparison of different cycle layouts[J]. Applied Energy, 2017, 195: 819-836.
- [10] LIU T, YANG J, YANG Z, et al. Techno-economic feasibility of solar power plants considering PV/CSP with electrical/thermal energy storage system[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 255: 115308.
- [11] DOSTAL V, DRISCOLL M J, HEJZLAR P, et al. A supercritical CO₂ gas turbine power cycle for next-generation nuclear reactors[C]//10th International Conference on Nuclear Engineering, Arlington, Virginia, USA. 2009: 567-574.
- [12] AHN Y, BAE S J, KIM M, et al. Review of supercritical CO₂ power cycle technology and current

- status of research and development[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2015, 47(6): 647-661.
- [13] 陕西省发展与改革委员会. 国内首座大型超临界二氧化碳循环发电试验机组在西安投运[EB/OL]. (2021-12-13)[2023-04-22]. <https://sndrc.shaanxi.gov.cn/fgyw/wngzdt/eicyUr.htm>.2021.
- Shaanxi Provincial Development and Reform Commission. The first large-scale supercritical carbon dioxide cycle power generation test unit in China is put into operation in Xi'an[EB/OL]. (2021-12-13)[2023-04-22]. <https://sndrc.shaanxi.gov.cn/fgyw/wngzdt/eicyUr.htm>.2021.
- [14] 王林. 5 MW 超临界二氧化碳机组锅炉闭式循环吹管工艺研究[J]. *发电技术*, 2023, 44(5): 731-737.
- WANG L. Research on closed cycle pipe blowing technology of 5 MW supercritical carbon dioxide unit boiler[J]. *Power Generation Technology*, 2023, 44(5): 731-737.
- [15] 郑开云. 超临界CO₂循环冷端温度优化研究[J]. *发电技术*, 2021, 42(2): 261-266.
- ZHENG K Y. Study on cold end temperature optimization of supercritical CO₂ cycle[J]. *Power Generation Technology*, 2021, 42(2): 261-266.
- [16] 唐鑫, 钱突然, 方华伟, 等. 超临界二氧化碳布雷顿循环控制策略研究综述[J]. *发电技术*, 2023, 44(4): 492-501.
- TANG X, QIAN Y R, FANG H W, et al. A review of control strategies for supercritical carbon dioxide Brayton cycle[J]. *Power Generation Technology*, 2023, 44(4): 492-501.
- [17] LIU T, YANG J, YANG Z, et al. Multiparameter optimization and configuration comparison of supercritical CO₂ Brayton cycles based on efficiency and cost tradeoff[J]. *Science China Technological Sciences*, 2021, 64(10): 2084-2098.
- [18] ZHOU Y, YIN D, GUO X, et al. Numerical analysis of the thermal and hydraulic characteristics of CO₂/propane mixtures in printed circuit heat exchangers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 185: 122434.
- [19] YIN D, ZHOU Y, GUO X, et al. Numerical analysis of wavy PCHes in supercritical CO₂/propane mixture Brayton cycle[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 235: 121346.
- [20] NIU X, MA N, BU Z, et al. Thermodynamic analysis of supercritical Brayton cycles using CO₂-based binary mixtures for solar power tower system application[J]. *Energy*, 2022, 254: 124286.
- [21] MA N, BU Z, FU Y, et al. An operation strategy and off-design performance for supercritical Brayton cycle using CO₂-propane mixture in a direct-heated solar power tower plant[J]. *Energy*, 2023, 278: 127882.
- [22] LIU X, XU Z, XIE Y, et al. CO₂-based mixture working fluids used for the dry-cooling supercritical Brayton cycle: thermodynamic evaluation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 162: 114226.
- [23] MA N, MENG F, HONG W, et al. Thermodynamic assessment of the dry-cooling supercritical Brayton cycle in a direct-heated solar power tower plant enabled by CO₂-propane mixture[J]. *Renewable Energy*, 2023, 203: 649-663.
- [24] 孙铭泽, 马宁, 李浩然, 等. 中低温超临界CO₂及其混合工质布雷顿循环热力学分析[J]. *化工学报*, 2022, 73(3): 1379-1388.
- SUN M Z, MA N, LI H R, et al. Thermodynamic analysis of Brayton cycle of medium and low temperature supercritical CO₂ and its mixed working medium[J]. *CIESC Journal*, 2022, 73(3): 1379-1388.
- [25] HU L, CHEN D, HUANG Y, et al. Investigation on the performance of the supercritical Brayton cycle with CO₂-based binary mixture as working fluid for an energy transportation system of a nuclear reactor[J]. *Energy*, 2015, 89: 874-886.
- [26] GUO J Q, LI M J, XU J L, et al. Thermodynamic performance analysis of different supercritical Brayton cycles using CO₂-based binary mixtures in the molten salt solar power tower systems[J]. *Energy*, 2019, 173: 785-798.
- [27] GUO J Q, LI M J, HE Y L, et al. A study of new method and comprehensive evaluation on the improved performance of solar power tower plant with the CO₂-based mixture cycles[J]. *Applied Energy*, 2019, 256: 113837.
- [28] JEONG W S, JEONG Y H. Performance of supercritical Brayton cycle using CO₂-based binary mixture at varying critical points for SFR applications[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, 262: 12-20.
- [29] VESELY L, MANIKANTACHARI K R V, VASU S, et al. Effect of mixtures on compressor and cooler in supercritical carbon dioxide cycles[C]//ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Oslo, Norway. 2018: 1-9.
- [30] VALENCIA-CHAPI R, COCO-ENRÍQUEZ L, MUÑOZ-ANTÓN J. Comparing line-focusing and central tower solar power plants with s-CO₂ binary mixture Brayton power cycles[C]//SOLARPACES 2019:

- International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems. Daegu, South Korea: AIP Publishing, 2020: 1-9.
- [31] TAFUR-ESCANTA P, LÓPEZ-PANIAGUA I, MUÑOZ-ANTÓN J. Thermodynamics analysis of the supercritical CO₂ binary mixtures for Brayton power cycles[J]. *Energy*, 2023, 270: 126838.
- [32] XU Z, LIU X, XIE Y. Off-design performances of a dry-cooled supercritical recompression Brayton cycle using CO₂-H₂S as working fluid[J]. *Energy*, 2023, 276: 127595.
- [33] VALENCIA-CHAPI R, COCO-ENRÍQUEZ L, MUÑOZ-ANTÓN J. Supercritical CO₂ mixtures for advanced Brayton power cycles in line-focusing solar power plants[J]. *Applied Sciences*, 2019, 10(1): 55.
- [34] WANG L, PAN L M, WANG J, et al. Investigation on the effect of mixtures physical properties on cycle efficiency in the CO₂-based binary mixtures Brayton cycle[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2022, 143: 104049.
- [35] BINOTTI M, INVERNIZZI C M, IORA P, et al. Dinitrogen tetroxide and carbon dioxide mixtures as working fluids in solar tower plants[J]. *Solar Energy*, 2019, 181: 203-213.
- [36] MANZOLINI G, BINOTTI M, BONALUMI D, et al. CO₂ mixtures as innovative working fluid in power cycles applied to solar plants. Techno-economic assessment[J]. *Solar Energy*, 2019, 181: 530-544.
- [37] BONALUMI D, LASALA S, MACCHI E. CO₂-TiCl₄ working fluid for high-temperature heat source power cycles and solar application[J]. *Renewable Energy*, 2020, 147: 2842-2854.
- [38] CONBOY T, AMES D, LEWIS T, et al. Operation of a supercritical fluid compression loop using CO₂-based mixtures[J]. *Transactions of the American Nuclear Society*, 2011, 104: 1034-1035.
- [39] YU A, SU W, ZHAO L, et al. New knowledge on the performance of supercritical Brayton cycle with CO₂-based mixtures[J]. *Energies*, 2020, 13(7): 1741.
- [40] JEONG W S, LEE J I, JEONG Y H. Potential improvements of supercritical recompression CO₂ Brayton cycle by mixing other gases for power conversion system of a SFR[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(6): 2128-2137.
- [41] MA Y N, HU P, JIA C Q, et al. Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of supercritical Brayton cycles with CO₂-based mixtures[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 219: 119492.
- [42] LEMMON E W, BELL I H, HUBER M L, et al. Reference fluid thermodynamic and transport properties. NIST Standard Reference Database 23, V10[CP/DK]. Boulder: National Institute of Standards and Technology, 2018.
- [43] 乔加飞, 李卓, 廖海燕, 等. 超临界二氧化碳循环混合工质热力学性质研究进展[J]. *热力发电*, 2022, 51(9): 1-10.
- QIAO J F, LI Z, LIAO H Y, et al. Research progress on thermodynamic properties of supercritical carbon dioxide mixture[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(9): 1-10.
- [44] BIERLEIN J A, KAY W B. Phase-equilibrium properties of system carbon dioxide-hydrogen sulfide[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1953, 45(3): 618-624.
- [45] SOBOCINSKI D P, KURATA F. Heterogeneous phase equilibria of the hydrogen sulfide-carbon dioxide system[J]. *AIChE Journal*, 1959, 5(4): 545-551.
- [46] KRICHEVSKII I, SORINA G. Liquid-gas phase equilibria in the cyclohexane-carbon dioxide and cyclohexane-nitrous oxide systems[J]. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*, 1960, 34: 1420-1424.
- [47] 张敬畅, 吴向阳, 曹维良. 超临界二氧化碳二元体系相平衡性质的研究[J]. *高等学校化学学报*, 2002, 23(1): 10-13.
- ZHANG J C, WU X Y, CAO W L. Phase equilibrium properties of supercritical carbon dioxide in binary system[J]. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2002, 23(1): 10-13.
- [48] ZHANG R, QIN Z, WANG G, et al. Critical properties of the reacting mixture in the selective oxidation of cyclohexane by oxygen in the presence of carbon dioxide[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2005, 50(4): 1414-1418.
- [49] KUSKOVA N V, KUKARIN V F, MARTYNETS V G, et al. Study of the phase equilibrium of $\{(1-x)\text{CO}_2+x\text{Kr}\}$ for $x<0.032$ near the critical point of CO₂[J]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 1991, 23(6): 523-530.
- [50] BIAN B, WANG Y, SHI J, et al. Simultaneous determination of vapor-liquid equilibrium and molar volumes for coexisting phases up to the critical temperature with a static method[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 1993, 90(1): 177-187.
- [51] LEWIS T G, CONBOY T, WRIGHT S. Supercritical CO₂ mixture behavior for advanced power cycles and applications[R]. Albuquerque: Sandia National

- Laboratories, 2011.
- [52] XIA J, ZHOU K, WANG J, et al. Thermal design and CFD analysis of the radial inflow turbine for a CO₂-based mixture transcritical Rankine cycle[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(10): 7938-7956.
- [53] KRAVANJA G, ZAJC G, KNEZ Ž, et al. Heat transfer performance of CO₂, ethane and their azeotropic mixture under supercritical conditions[J]. Energy, 2018, 152: 190-201.
- [54] 孙铭泽. 超临界CO₂二元混合工质中低温余热布雷顿循环发电系统性能研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2022.
- SUN M Z. Performance Study of supercritical CO₂ binary mixed mass medium and low temperature waste heat Brayton cycle power generation system[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2022.
- [55] 马宁. 基于CO₂混合工质布雷顿循环的塔式太阳能发电系统性能分析[D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- MA N. Thermodynamic analysis of supercritical Brayton cycle using CO₂-based binary mixtures for solar power tower system application[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2023.
- [56] 刘昕昕. 干冷CO₂基混合工质超临界布雷顿循环性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- LIU X X. A performance study on CO₂-based mixture working fluids used for the dry-cooling supercritical Brayton cycle[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [57] TAFUR-ESCANTA P, VALENCIA-CHAPI R, LÓPEZ-PANIAGUA I, et al. Supercritical CO₂ binary mixtures for recompression Brayton s-CO₂ power cycles coupled to solar thermal energy plants[J]. Energies, 2021, 14(13): 4050.
- [58] PARK J H, PARK H S, KWON J G, et al. Optimization and thermodynamic analysis of supercritical CO₂ Brayton recompression cycle for various small modular reactors[J]. Energy, 2018, 160: 520-535.
- [59] VESELY L, DOSTAL V, STEPANEK J. Effect of gaseous admixtures on cycles with supercritical carbon dioxide[C]//ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Seoul, South Korea. 2016: 1-8.
- [60] LIANG Y, LIN X, SU W, et al. Thermal-economic analysis of a novel solar power tower system with CO₂-based mixtures at typical days of four seasons[J]. Energy, 2023, 276: 127602.
- [61] HAROON M, SHEIKH N A, AYUB A, et al.

Exergetic, economic and exergo-environmental analysis of bottoming power cycles operating with CO₂-based binary mixture[J]. Energies, 2020, 13(19): 5080.

- [62] 王瑞. CO₂混合工质动力循环动态特性及控制策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.

WANG R. The dynamic performance and control strategy of CO₂-mixture transcritical power cycle system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.

收稿日期: 2023-12-18.

修回日期: 2024-02-24.

作者简介:



王天堃

王天堃(1982), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为热能工程, tiankun.wang@chnenergy.com.cn;



刘天野

刘天野(1997), 女, 博士研究生, 研究方向为能源系统分析, liutianye126@126.com;



王兵兵

王兵兵(1986), 男, 高级工程师, 研究方向为热能工程, 16810124@ceic.com;



杨震

杨震(1979), 男, 博士, 副教授, 研究方向为太阳能发电与储存、微尺度传热传质、相变换热等, zhenyang@tsinghua.edu.cn;



段远源

段远源(1971), 男, 博士, 教授, 研究方向为热力学、流体的热物理性质、中低温热能利用等, 本文通信作者, yyduan@mail.tsinghua.edu.cn.

(责任编辑 苗雪连)