

混合工质对sCO₂布雷顿循环热效率与高点压力的协同提升机制

王伟^{1,2}, 许鲁丰^{1,2}, 吴玉庭^{1,2}

¹北京工业大学机械与能源工程学院, 北京

²传热与能源利用北京市重点实验室, 北京

收稿日期: 2025年11月30日; 录用日期: 2025年12月23日; 发布日期: 2025年12月30日

摘要

超临界二氧化碳(sCO₂)布雷顿循环因高热效率和紧凑性被广泛关注, 但其依赖纯CO₂工质需在高温高压(临界点304.13 K/7.39 MPa)下运行, 导致设备成本高且热源适配性受限。针对此问题, 本研究通过热力学建模与数值模拟, 系统研究了乙烷、丙烷、R116等低浓度(0~10 mol%)混合工质对sCO₂循环热效率与系统高点压力的协同调控作用, 明确了工质临界参数对循环性能的调控规律。结果表明, 丙烷在800 K工况下既能使热效率提升2.5%, 又能降低系统高点压力15.2%, 在效率-压力权衡中表现最优; R116和R125则分别适用于效率优先与压力敏感场景。该研究为sCO₂循环在核能、太阳能热发电等领域的高效低碳运行提供了明确的工质选型策略, 拓展了混合工质调控技术的应用边界。

关键词

sCO₂布雷顿循环, 混合工质, 热效率, 系统压力

Synergistic Enhancement Mechanism of Mixed Working Fluids on Thermal Efficiency and Peak Pressure in sCO₂ Brayton Cycles

Wei Wang^{1,2}, Lufeng Xu^{1,2}, Yuting Wu^{1,2}

¹College of Mechanical and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

²Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, Beijing Municipality, Beijing

Received: November 30, 2025; accepted: December 23, 2025; published: December 30, 2025

文章引用: 王伟, 许鲁丰, 吴玉庭. 混合工质对 sCO₂ 布雷顿循环热效率与高点压力的协同提升机制[J]. 可持续能源, 2025, 15(6): 93-105. DOI: 10.12677/se.2025.156011

Abstract

The supercritical carbon dioxide ($s\text{CO}_2$) Brayton cycle has attracted extensive attention due to its high thermal efficiency and compactness. However, its reliance on pure CO_2 as working fluid requires operation under high temperature and pressure conditions (critical point: 304.13 K/7.39 MPa), leading to elevated equipment costs and restricted thermal source compatibility. To address these challenges, this study systematically investigates the synergistic regulation effects of low-concentration (0~10 mol%) mixed working fluids (ethane, propane, R116) on thermal efficiency and peak system pressure of $s\text{CO}_2$ cycles through thermodynamic modeling and numerical simulations. The regulatory mechanisms of working fluid critical parameters on cycle performance are elucidated. Results demonstrate that propane achieves optimal trade-off performance under 800 K operating conditions, simultaneously improving thermal efficiency by 2.5% and reducing peak system pressure by 15.2%. R116 and R125 are respectively recommended for efficiency-prioritized and pressure-sensitive scenarios. This research provides clear working fluid selection strategies for efficient and low-carbon operation of $s\text{CO}_2$ cycles in nuclear energy and solar thermal power generation applications, thereby expanding the application boundaries of mixed working fluid regulation technology.

Keywords

$s\text{CO}_2$ Brayton Cycle, Mixed Working Fluid, Thermal Efficiency, System Pressure

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球“双碳”战略目标的驱动下，构建清洁、低碳、高效的能源体系已成为能源转型的核心任务。这不仅需要大规模开发可再生能源，更亟需推动能源转换技术的技术性革新。热功转换系统作为能量利用的关键环节，其效率的提升对实现全局节能减排目标具有决定性意义。然而，当前主流的热力循环技术仍主要基于化石燃料，面临着碳排放高与热效率瓶颈的双重挑战[1]。尽管超超临界发电、高效内燃机等技术通过提升初始参数与系统集成优化已达到较高能量转换水平，但其碳基燃料特性导致温室气体排放问题依然突出。另一方面，太阳能热发电、核能等非化石能源技术虽具备“双碳”或“低碳”优势，但在连续功能、经济性以及中低温热源高效利用等方面仍存在显著约束。在此背景下，仅依靠现有技术路线的渐进式改进已难以满足“双碳”目标下对能源系统高效、低碳与灵活运行的多重要求。因此，必须从热力循环架构与工质本身寻求突破，发展适用于宽温域、特别是中高品位热源的新型动力循环。

超临界二氧化碳($s\text{CO}_2$)布雷顿循环因其理论效率高、系统紧凑与环境友好等优点，被广泛视为下一代热功转换技术的重要方向，在核能、太阳能热发电及高温工业余热回收等领域展现出潜力[2]。然而， $s\text{CO}_2$ 工质临界温度低(31.1°C)、临界压力高(7.38 MPa)，限制了其在宽工况范围内的适用性，也带来系统运行安全性与经济性的挑战。事实上，除了二氧化碳，以氦、氩等其他工质为核心的布雷顿循环也面临着因工质固有物性带来的类似局限[3]，并且单一工质在复杂多变的热源条件下难以实现全过程物性最优匹配。为突破上述局限，研究焦点逐渐从循环结构优化转向工质本身的革新。混合工质策略通过组分调配可实现热物性的定向调控，被认为是提升 $s\text{CO}_2$ 循环性能、拓展其应用范围的有效途径。已有研究表明，在 CO_2

中添加少量惰性气体或有机物可改善其临界特性、提高循环效率或降低系统压力[4]。在循环系统层面，多项研究通过热力学分析证实，掺入特定添加剂可有效优化系统性能：例如，韩国科学技术院(KAIST)[5]与西安交通大学[6]的团队均发现，在CO₂中掺入氙气(Xe)、氪气(Kr)等惰性气体能显著提升布雷顿循环效率，并指出工质配比为关键影响因素；重庆大学[7]的研究进一步表明，CO₂-He/Kr混合物在提升效率的同时，还能减少回热器负荷；而意大利米兰理工大学[8]的研究则另辟蹊径，采用N₂O₄/CO₂混合物，通过提高工质临界温度，为高温环境下的系统简化与效率提升提供了新路径。在部件性能层面，东北电力大学[9]的研究聚焦于关键换热设备，其数值模拟表明，CO₂/丙烷混合物能在印刷电路换热器(PCHE)中实现更低的流动阻力与更高的传热系数，展现了显著的工程应用价值。国家能源集团与清华大学[10]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。

现有研究虽已证实CO₂基混合工质在调控临界参数、提升循环效率方面的潜力，但多数工作仍停留在针对特定添加剂的“工质筛选”阶段，尤其缺乏将“低浓度添加剂-关键物性变化-宏观性能响应-工程选型策略”贯穿一体的系统研究框架[11]。具体表现在：其一，对低浓度区间内添加剂如何协同调控CO₂临界温度与压力的微观机理尚不清晰，物性演变与循环性能之间的定量关联未能充分建立；其二，研究多孤立关注效率或压力等单一目标，未能系统揭示“效率-压力-临界参数”之间的内在权衡规律，因而难以形成面向不同工程优先级(如高效、低压或稳健运行)的混合工质选型指导图谱。围绕上述研究目标，本文主要开展以下工作：对CO₂基混合工质进行定向改良，研究低浓度添加剂对关键物性及循环性能的调控作用，揭示其性能提升的内在机制，阐明“效率-压力-临界参数”之间的内在权衡关系，并据此构建面向不同工程需求的混合工质选型策略图谱。

2. 工质选择依据与混合方案

工质作为能量载体与工作介质，其热物理性质直接决定了热力循环的架构、运行参数与性能边界。在超临界布雷顿循环中，工质在临界点附近的物性行为对系统热力过程与转换效率具有关键影响。因此，对工质物性的深入理解与主动调控，是优化循环性能的核心环节。本文采用混合工质策略，旨在通过分子层面的组分设计与配比优化，定向调控工质热物性，以突破纯sCO₂工质在临界温度与压力方面的运行限制，提升循环综合性能。

2.1. 混合方案设计与筛选

为探讨突破纯sCO₂工质在临界温度与压力方面的运行限制，本研究采用混合工质策略，旨在通过分子层面的组合与配比优化，对工质热物理性质进行定向调控，从而探索提升循环综合性能的可能途径。研究聚焦于对现有sCO₂体系的定向改良，通过引入低浓度(0~10%，摩尔分数)添加剂，在尽量保持sCO₂高密度、低压缩功等特性的基础上，调节其临界特性，以研究其在宽工况下的适应性与性能变化规律。

为确保筛选兼具科学性与工程适用性，本研究依据以下三项核心准则进行遴选：

- (1) 热物性及稳定性准则：候选工质应在循环运行工况下保持足够的热化学稳定性，其临界参数宜具备通过混合实现调节的潜力；
- (2) 安全与环境相容性准则：建议选择低毒性、不可燃或难燃工质，并尽可能采用低全球变暖潜能值(GWP)与零臭氧消耗潜能值(ODP)的组分；
- (3) 应用适配性准则：工质遴选需考虑目标热源特性，使其临界参数与热源温度区间相适应。

基于上述遴选标准，本研究对表1所列的系列候选工质进行了系统性初筛。筛选过程并非单一指标的简单排序，而是一个综合多目标权衡与工程判断的过程。

Table 1. The physicochemical properties, thermal stability, and environmental characteristics of the working fluid
表 1. 工质的物理化学性质、热稳定性和环境特性

物质	结构式	临界参数		热稳定性阈值	环境数据	
		Tc [K]	pc [MPa]		ODP	GWP (100 yr)
乙烷	CH ₃ CH ₃	305.32	4.8722	~550	0	<1
丙烷	CH ₃ CH ₂ CH ₃	369.83	4.247	~650	0	0.01
CO ₂	CO ₂	304.13	7.38	~2000	0	~1
N ₂ O	N ₂ O	309.52	7.245	~800	0	~298
R116	CF ₃ CF ₃	293.03	3.048	~842	0	~11,100
R125	CF ₃ CHF ₂	339.17	3.6177	~396	0	~3170
R1234ze(E)	CF ₃ CH=CHF	382.5	3.6349	~170	0	~4
R1234yf	CF ₃ CF=CH ₂	367.9	3.3822	~170	0	~4
R236fa	CF ₃ CH ₂ CF ₃	398.07	3.2	~380	0	~8060
R218	CF ₃ CF ₂ CF ₃	345.02	2.64	~800	0	~8600

首先，基于热稳定性进行初筛。由于目标循环透平入口温度较高(500~800 K)，热稳定性不足的工质(如R1234ze(E)、R1234yf等)被排除。继而，依据临界参数对剩余工质进行区分：一类选用具有较高临界温度的工质(如丙烷、R236fa)，以期提升循环的平均吸热温度；另一类选用具有较低临界压力的工质(如R116、R218)，旨在降低系统运行压力与设备承压需求。最后，综合考虑环境特性与工程安全性进行优选，倾向选择零ODP及低GWP的组分；对于虽具较高GWP但性能有代表性的工质(如R125)，则保留作为对比案例。经上述逐级筛选，最终确定乙烷、丙烷、R116、R125及N₂O作为核心研究对象。这些工质在热物性、临界参数及环境特性上具有差异性，能够系统反映低浓度添加剂对CO₂基础工质的不同调控作用，为探究混合工质的“构效关系”提供基础。

2.2. 混合工质体系构建

在保留纯sCO₂工质高密度、低压缩功等特性的前提下，系统探究低浓度添加剂对循环性能的调控规律，本研究将所有候选添加剂(乙烷、丙烷、R116、R125、N₂O)的浓度严格限定在0~10%(摩尔分数)范围内进行对比分析。该低浓度区间的设定主要基于以下考虑：一方面，已有研究及前期物性分析表明，在此添加比例下，混合物能较好地继承纯CO₂的核心热物理性质，其关键物性参数变化相对平缓，可视为对基础工质的一种“定向微调”。另一方面，低浓度添加有助于控制因组分引入而可能引发的潜在风险(如对烷烃可燃性的抑制、对材料相容性与长期化学稳定性的影响)，从而提升混合工质的工程安全性与系统兼容性。

具体而言，浓度低于3%的微量添加被报道可在不明显改变主流体物性的前提下有效改善传热；而将上限设为10%，则为考察添加剂在“提升性能”与“引入副作用”之间的权衡提供了必要的设计空间，同时避免了因添加量过高而导致工质主体特性发生根本性改变。

基于上述配比范围，图1展示了五种添加剂对CO₂基混合工质临界参数的调控规律。在临界温度方面(图1(a))，各添加剂呈现三类不同行为：R125表现出较明显的提升作用，其临界温度随掺混比例增加而上升；R116与乙烷则对临界温度有一定降低作用；丙烷与N₂O在整个研究配比范围内，对临界温度的影响相对较小。在临界压力方面(图1(b))，所有添加剂均能不同程度地降低混合工质的临界压力，其中

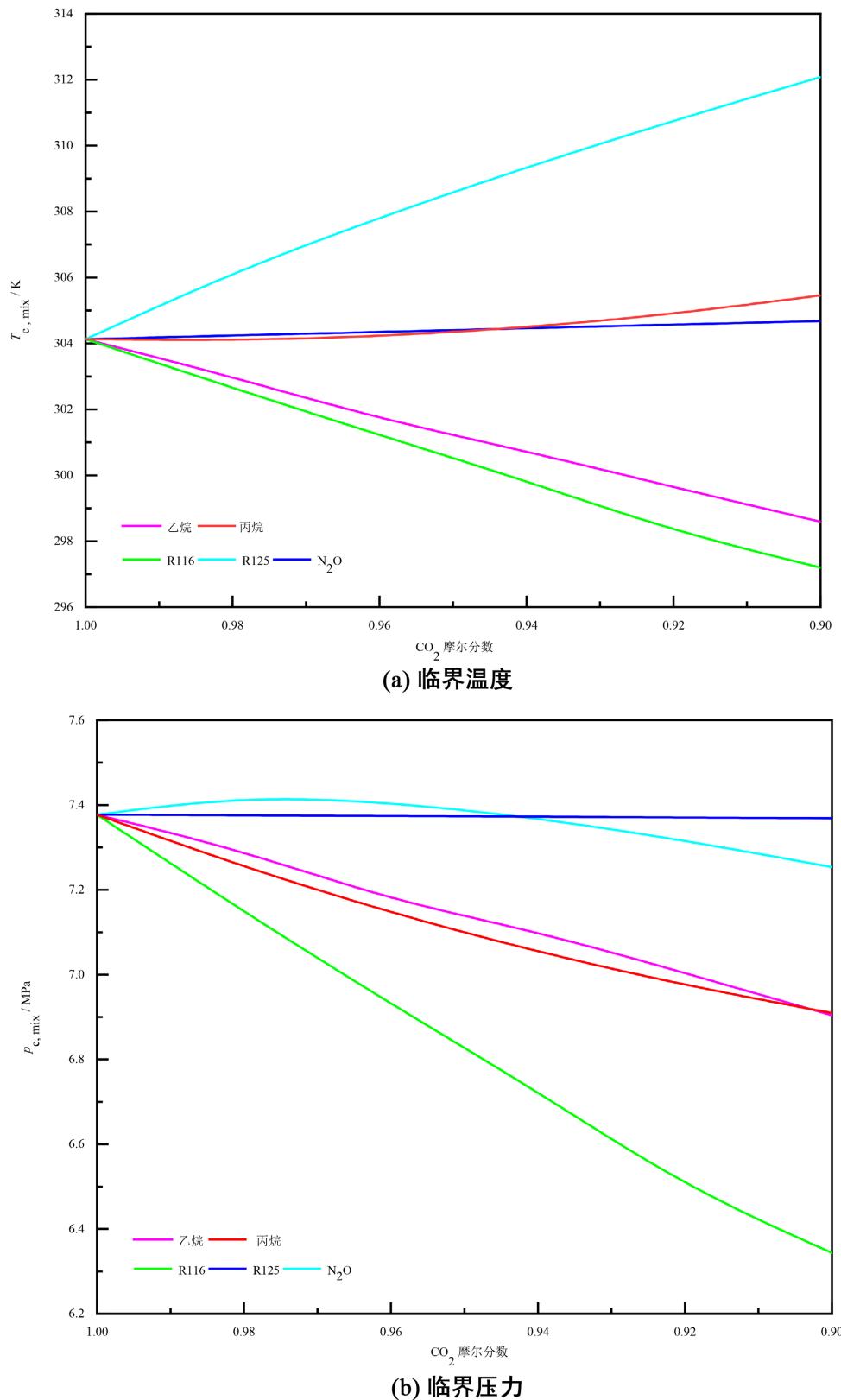


Figure 1. Variation of the critical parameters of five mixtures with the mole fraction of carbon dioxide
图 1. 五种混合物的临界参数随二氧化碳摩尔分数变化

R116 的降低效果最为显著，乙烷与丙烷次之，R125 与 N₂O 的影响则相对较弱。上述结果表明，提升临界温度与降低临界压力这两个目标在一定程度上存在制约关系。在此背景下，R116 与乙烷的表现具有特定应用价值：它们能在对临界温度影响较小的同时，显著降低混合工质的临界压力，这种“温度变化平缓、压力明显下降”的特性，为在维持原有循环温度框架下降低系统运行压力提供了潜在路径。相较而言，丙烷则在效率与压力之间展现出更好的综合平衡性。这些差异化的调控效果，为后续面向不同工程需求(如追求高效率、低运行压力或综合优化)的混合工质选型与性能研究奠定了基础。

3. 热力学模型

3.1. 简单回热布雷顿循环

简单回热布雷顿循环是超临界二氧化碳动力系统中一种典型的热力循环构型，其系统构成与热力过程构成本文性能分析的基础。该系统主要由压缩机、透平、回热器、作为热源的高温换热器以及预冷器组成，其对应的系统流程与温熵(T-s)图如图 2 所示。

循环过程如下：(1) 工质在压缩机中经历绝热压缩过程，压力与温度升高；(2) 随后进入回热器的冷侧通道，吸收来自透平排气的余热，温度得以提升；(3) 经预热后的工质在热源中被进一步加热至透平入口设计温度；(4) 高温高压工质进入透平发生膨胀做功，输出有效功；(5) 透平排气仍具有较高温度，它流入回热器的热侧，将热量传递给压缩机出口的低温工质，自身温度随之降低；(6) 最后，工质在预冷器中被冷却至设定的压缩机入口温度，从而完成一个完整的热力循环。

为便于分析并聚焦于工质本身的热力性能，本研究在模型建立过程中引入了以下基本假设：

- (1) 系统在运行过程中处于稳态；
- (2) 透平与压缩机内的膨胀和压缩过程被视为绝热过程，并采用恒定等熵效率进行表征；
- (3) 除冷却器外，系统与环境间的换热予以忽略；
- (4) 模型中不考虑各部件及连接管道的流动摩擦与压降损失，仅计及压缩机和透平内部因做功过程引起的压力变化；
- (5) 工质的势能、动能变化均不予考虑，且假定其化学性质稳定，不发生反应；
- (6) 压缩机入口温度设定为比工质临界温度高 1 K，入口压力设定为比工质临界压力高 0.5 MPa；

为实现循环性能的定量分析，本研究构建了该循环的数学模型。模型的核心输入与输出参数如表 2 所示。模型计算所依赖的设备性能参数，如等熵效率与换热器效能等，其具体设定值将在后续分析中给出。

在上述假设的基础上，从热力学第一定律出发，s-CO₂ 混合工质再压缩布雷顿循环系统的数学模型如下：

压缩机压缩过程(1→2)：

$$W_{mc} = q_m (h_2 - h_1) = q_m (h_{2s} - h_1) / \eta_{mc} \quad (1)$$

式中， W_{mc} 是压缩机压缩耗功，kW； q_m 是循环的质量流量，kg·s⁻¹； h 是比焓，kJ·kg⁻¹；下标数字和 s 分别表示循环状态点和等熵过程； η_{mc} 是压缩机效能。

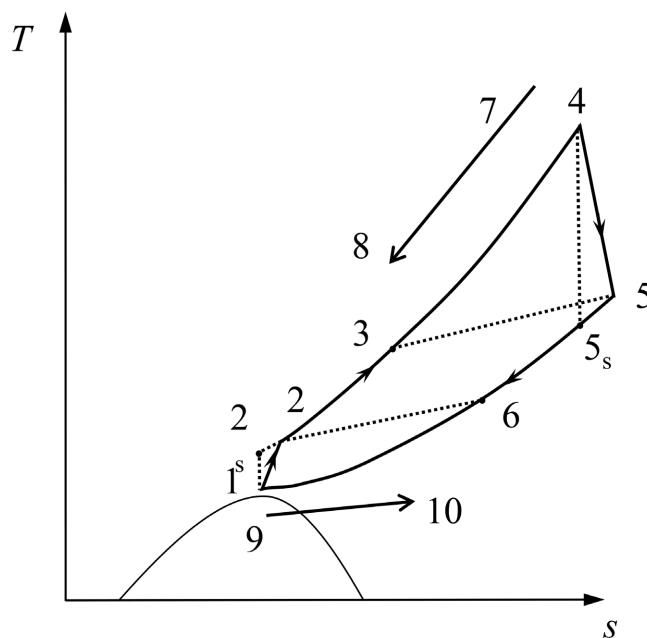
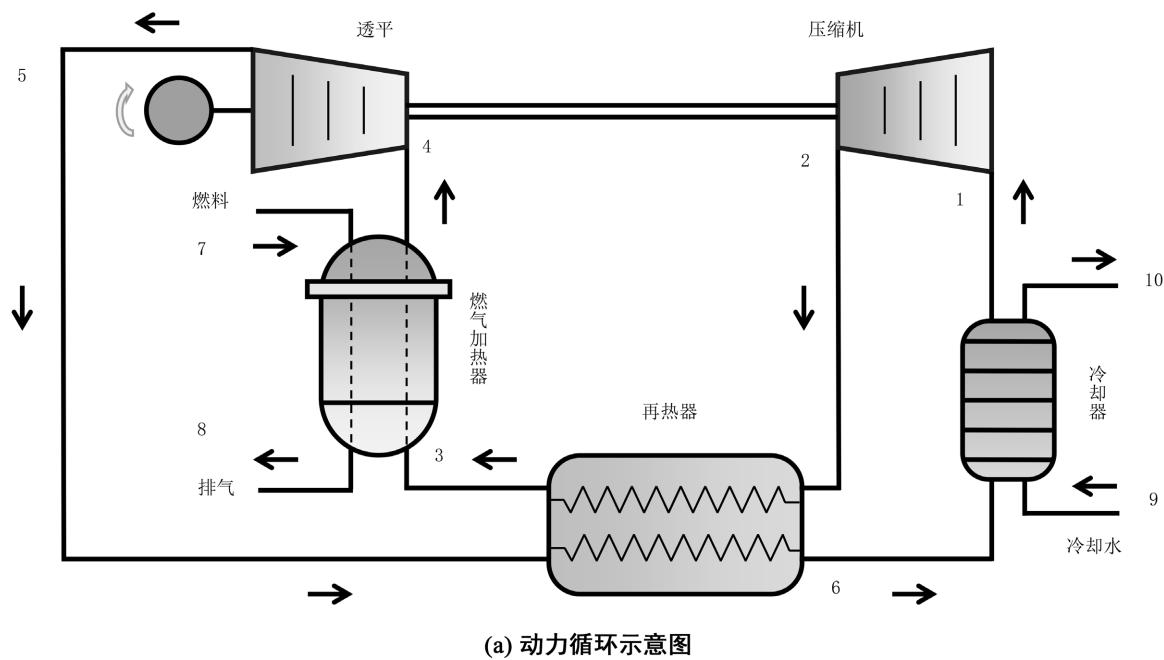
回热器过程(2→3, 5→6)：

$$q_m (h_2 - h_3) = q_m (h_6 - h_5) \quad (2)$$

热源加热过程(3→4)：

$$Q_r = q_m (h_4 - h_3) \quad (3)$$

式中， Q_r 是热源的输入热量，kW。



(b) 简单回热超临界实际气体布雷顿循环的温熵图

Figure 2. Simple regenerative Brayton cycle**图 2.** 简单回热布雷顿循环**Table 2.** Model input parameters and values**表 2.** 模型输入参数和值

参数	值
透平入口温度, t_4/K	500~800
压缩机入口温度, t_1/K	$T_c + 1$

续表

透平入口压力, p_4/MPa	$p_c + 0.5$
压缩机入口压力, p_1/MPa	123,123
再热器夹点温度, $\Delta T/\text{K}$	20
透平效率, η_t	0.9
压缩机效率, η_{com}	0.9

透平膨胀过程(4→5):

$$W_t = q_m (h_4 - h_5) = q_m (h_4 - h_{5s}) \eta_{ts} \quad (4)$$

式中, W_t 是透平膨胀做功, kW; η_t 是透平效率。

冷却器冷却过程(6→1):

$$Q_{pc} = q_m (h_6 - h_1) \quad (5)$$

式中, Q_{pc} 是冷却器放出的热量, kW。

在部件方程的基础上, 定义以下核心性能评价指标, 用于系统分析:

循环净功(W_{net}), 反应系统对外做的有用功, 可表达为:

$$W_{net} = W_t - W_{mc} \quad (6)$$

循环热效率(η_{th}), 作为衡量能量转换效果的指标, 用于比较不同工质及混合配比下的基准性能, 可表达为:

$$\eta_{th} = W_{net} / Q_r \quad (7)$$

系统高点压力(P_{\max}), 与系统承压需求、设备造价及运行安全性密切相关。本研究将其与热效率结合分析, 旨在探讨不同效率水平下对应的压力情况, 其值在模型中由压缩机出口压力确定:

$$P_{\max} = P_4 \quad (8)$$

本研究所有工质(纯质及混合物)的热物性数据, 包括比焓、比熵等, 均通过 NIST REFPROP 9.0 [12] 数据库获取。对于混合物, 其物性基于 Peng-Robinson 状态方程及经典混合规则计算。该方法广泛应用于工程热物性计算, 可保证结果的可靠性。

3.2. 模型验证

为验证所建模型的可靠性, 针对纯 sCO₂ 工质, 在相同工况下将本文模型计算得到的热效率与文献中的实验数据进行对比[13], 两者偏差为+2.62%, 在工程可接受范围内, 证实了本文模型具有较好的计算可靠性, 可用于后续混合工质的性能分析与比较。

4. 结果与讨论

为系统评估 CO₂ 基混合工质在不同品位热源下的适应性与性能调控规律, 本节选取透平入口温度为 800 K、700 K 与 600 K 三种典型工况进行对比分析。其中, 800 K 代表当前材料耐温极限下的高性能工况; 700 K 对应于燃气轮机排气等工业高品质余热利用温度; 600 K 则拓展至中低温余热、地热等更广泛热源条件, 以考察混合工质在热源品位下降时的性能稳健性。

图 3~5 分别展示了在 800 K、700 K 与 600 K 下, 循环热效率与系统高点压力随 CO₂ 摩尔分数的变化规律。

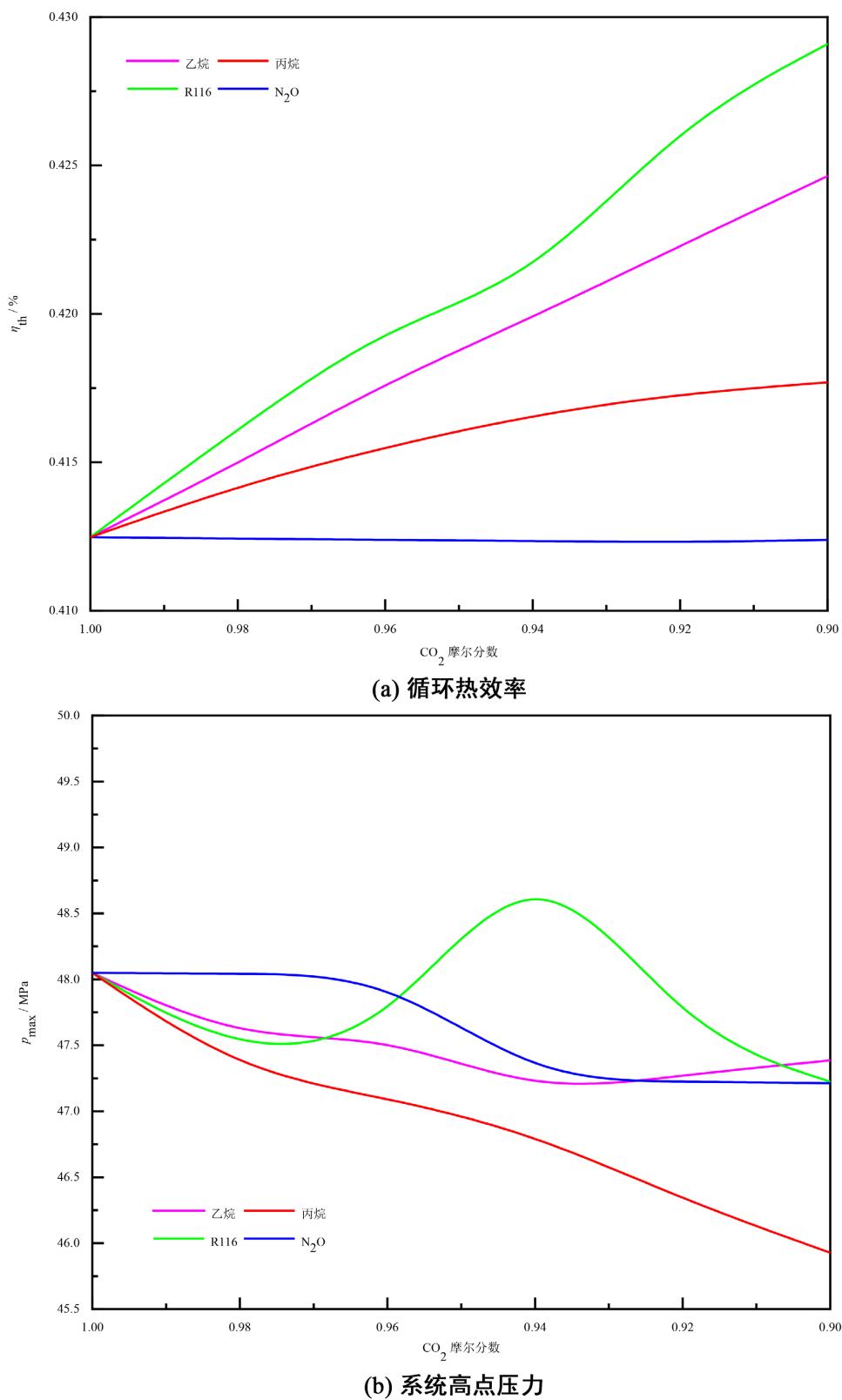


Figure 3. Effect of carbon dioxide mole fraction on the thermal efficiency and peak system pressure of four different hybrid working fluid cycles (800 K)

图 3. 二氧化碳摩尔分数对四种不同混合工质循环热效率和系统高点压力的影响(800 K)

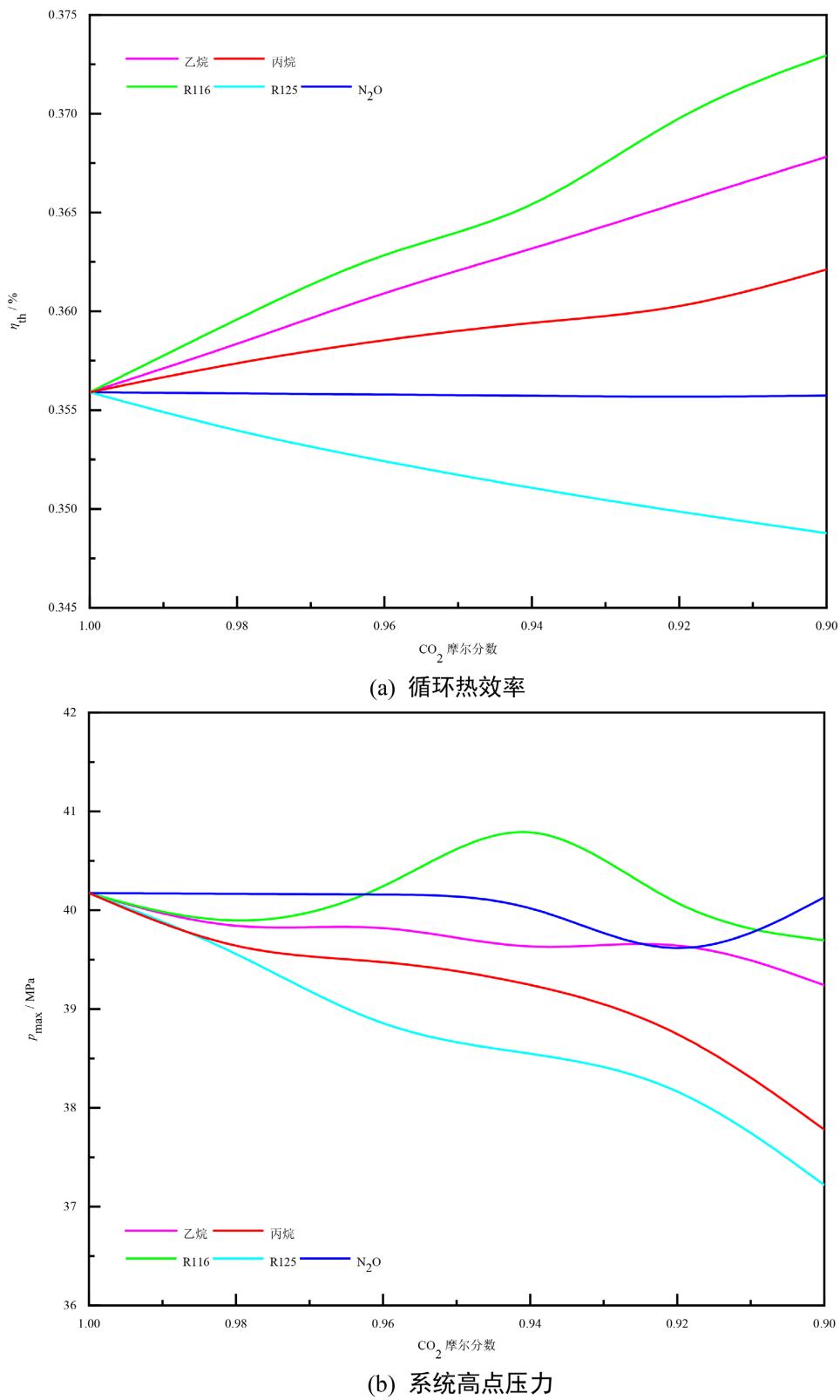


Figure 4. Effect of carbon dioxide mole fraction on the thermal efficiency and peak system pressure of four different hybrid working fluid cycles (700 K)

图 4. 二氧化碳摩尔分数对四种不同混合工质循环热效率和系统高点压力的影响(700 K)

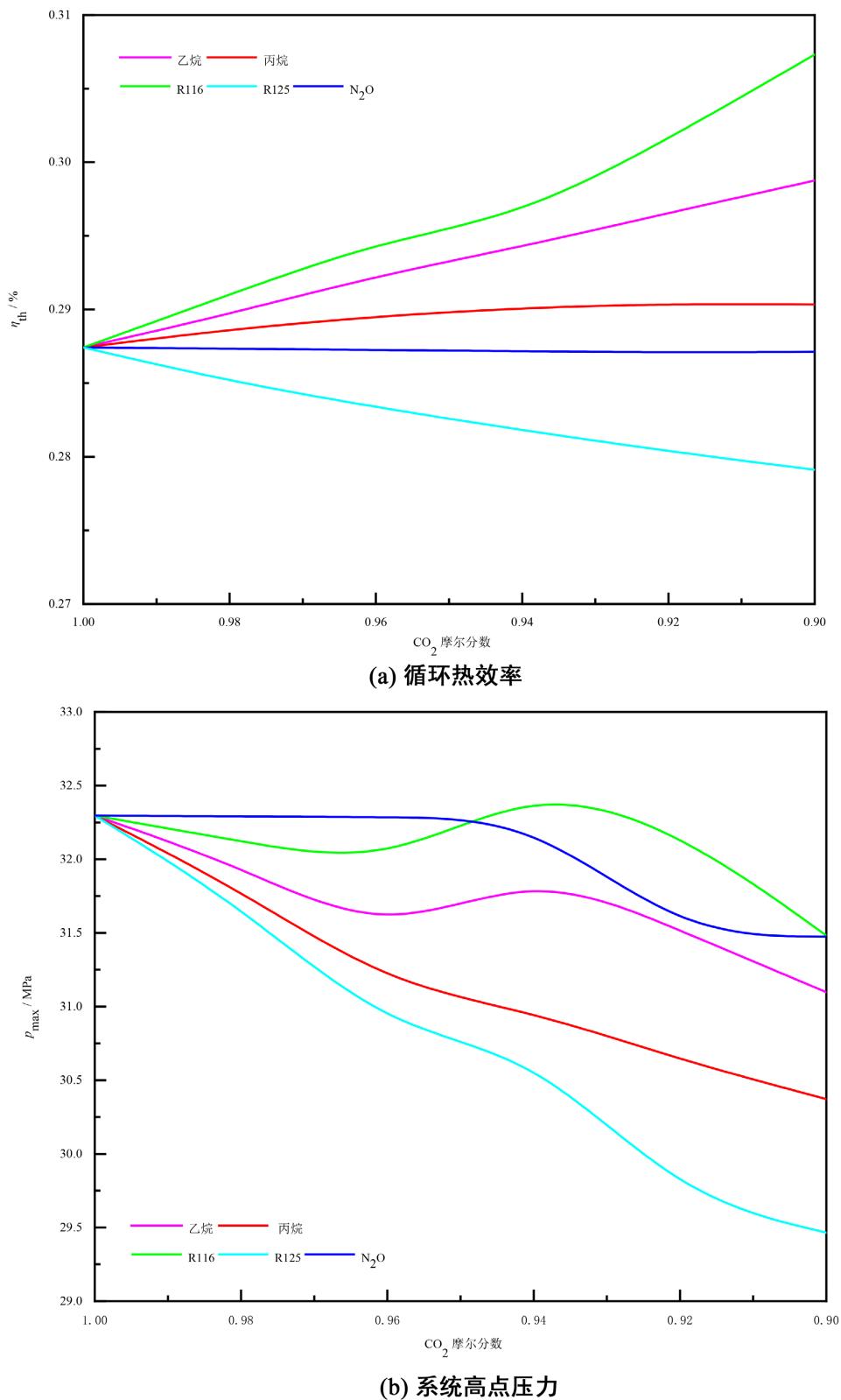


Figure 5. Effect of carbon dioxide mole fraction on the thermal efficiency and peak system pressure of four different hybrid working fluid cycles (600 K)

图 5. 二氧化碳摩尔分数对四种不同混合工质循环热效率和系统高点压力的影响(600 K)

在三种温度工况下，除 R125 外，其余四种添加剂(乙烷、丙烷、R116、N₂O)均对循环热效率表现出明确的正面调控作用。随着添加剂比例增加，热效率均呈上升趋势，其中 R116 的提升效果最为显著。以 800 K 工况为例(图 3(a))，在 10%添加比例下，CO₂/R116 混合工质的热效率较纯 CO₂ 提升约 2.8 个百分点。相比之下，R125 的掺入则导致热效率持续下降，说明该组分虽可能具备其他特性优势，但不适用于追求高热效率的场景。

在系统高点压力方面，除 R116 外，其余添加剂均能有效降低系统的承压需求(图 3(b))。其中，丙烷与 R125 的降压效果最为突出，在 10%添加量下系统高点压力较纯 CO₂ 降低约 15%~18%。乙烷与 N₂O 也具有一定降压作用，但幅度相对较小。R116 表现出独特的非线性特性：其系统高点压力随添加比例增加呈先降后升再降的波动趋势，且波动幅度随温度降低而减弱。该现象提示，使用 R116 作为添加剂时需对其配比进行精确控制，以兼顾热效率提升与压力管理目标。

温度升高对 CO₂ 基混合工质的循环性能产生了系统性影响。随着热源温度从 600 K 升高至 800 K，所有研究混合工质的循环热效率均显著提升，体现了高温工况对热力循环性能的积极促进作用。与此同时，系统高点压力也随温度升高而系统性增加，显示出工质热力学参数对温度变化的敏感性。重要的是，尽管绝对数值随温度变化，但各混合工质的循环效率和系统高点压力随 CO₂ 摩尔分数变化的相对趋势在不同温度间保持了高度一致性。这种温度不变性表明，混合工质的热力学行为特征主要由其组成配比决定。

综合热效率与系统高点压力两方面表现，丙烷在较宽配比范围内同时实现了热效率提升与系统高点压力的有效抑制，表现出最佳的综合性能。R116 虽在热效率提升方面优势突出，但其压力行为的非线性特征要求更精确的配比优化。R125 虽具备显著的降压能力，但需以牺牲热效率为代价，适用于对系统压力极为敏感、且对效率损失容忍度较高的特定场景。

上述规律可通过混合工质的临界参数进行机理解释：添加剂对循环热效率的调控主要与其临界温度相关，临界温度较高的组分更有助于提高平均吸热温度，从而提升效率；而对系统高点压力的影响则直接关联于混合物的临界压力，临界压力较低的添加剂能更有效地降低系统运行压力。丙烷因其适中的临界温度和较低的临界压力，在效率与压力之间取得了良好平衡。

5. 结论

本文通过构建热力学模型，系统研究了低浓度(0~10%) CO₂ 基混合工质对简单回热布雷顿循环性能的调控作用，重点考察了乙烷、丙烷、R116、R125 和 N₂O 五种添加剂在 600~800 K 透平入口温度范围内的性能影响。主要结论如下：

- (1) 添加剂对循环性能的调控作用呈现规律性差异。R116 对提升循环热效率效果最为显著，在 800 K 工况下最大可提升约 2.8%；丙烷与 R125 能有效降低系统高点压力，降幅可达 15%~18%；丙烷在效率与压力之间取得了最佳综合平衡。
- (2) 示了“效率 - 压力 - 临界参数”之间的内在权衡关系。效率提升与添加剂的临界温度正相关，而系统压力降低与其临界压力负相关。这一关联为混合工质的定向设计提供了明确的理论依据。
- (3) 基于上述规律，建立了面向不同工程需求的混合工质选型策略：追求综合性能时优选 CO₂/丙烷；侧重效率提升时可选用 CO₂/R116；对降压有极端要求时则可考虑 CO₂/R125。

参考文献

- [1] Agency, I.E. (2024) World Energy Outlook 2024. IEA.
- [2] Zheng, N., Li, Z., Fang, J. and Wei, J. (2023) Supercritical CO₂ Mixture Brayton Cycle with Floating Critical Points for Concentrating Solar Power Application: Concept and Thermodynamic Analysis. *Energy Conversion and Management*, 284, Article 116989. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116989>

- [3] Teja, D.V.H., Muvvala, P., Prashanth Nittala, N.A., Bandhu, D., Khan, M.I., Saxena, K.K., *et al.* (2024) Comparative Performance Analysis of Recuperative Helium and Supercritical CO₂ Brayton Cycles for High-Temperature Energy Systems. *Energy*, **312**, Article 133469. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133469>
- [4] Wang, X., Zhang, L., Zhu, Z., Hu, M., Wang, J. and Fan, X. (2023) Performance Improvement Overview of the Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle. *Processes*, **11**, Article 2795. <https://doi.org/10.3390/pr11092795>
- [5] Jeong, W.S. and Jeong, Y.H. (2013) Performance of Supercritical Brayton Cycle Using CO₂-Based Binary Mixture at Varying Critical Points for SFR Applications. *Nuclear Engineering and Design*, **262**, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.04.006>
- [6] Guo, J.Q., Li, M.J., He, Y.L., *et al.* (2019) A Study of New Method and Comprehensive Evaluation on the Improved Performance of Solar Power Tower Plant with the CO₂-Based Mixture Cycles. *Applied Energy*, **256**, Article 113837. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113837>
- [7] Hu, L., Chen, D., Huang, Y., Li, L., Cao, Y., Yuan, D., *et al.* (2015) 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. *Energy*, **89**, 874-886. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.029>
- [8] Binotti, M., Invernizzi, C.M., Iora, P. and Manzolini, G. (2019) Dinitrogen Tetroxide and Carbon Dioxide Mixtures as Working Fluids in Solar Tower Plants. *Solar Energy*, **181**, 203-213. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.079>
- [9] Zhou, Y., Yin, D., Guo, X. and Dong, C. (2022) Numerical Analysis of the Thermal and Hydraulic Characteristics of CO₂/Propane Mixtures in Printed Circuit Heat Exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **185**, Article 122434. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122434>
- [10] 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.
- [11] Sun, R., Wang, J., Tian, H. and Shu, G. (2024) Critical Points Calculation of CO₂-Based Binary Mixture Working Fluids: Evaluation of PC-SAFT Equation of State. *Fluid Phase Equilibria*, **577**, 113986. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2023.113986>
- [12] Lemmon, E.W., Bell, I.H., Huber, M.L., *et al.* (2018) NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermo-dynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0. National Institute of Standards and Technology.
- [13] Wright, S.A., Conboy, T.M., Parma, E.J., *et al.* (2011) Summary of the Sandia Supercritical CO₂ Development Program. *Chinese Journal of Chemistry*, **19**, 1562-1564.