DOI: 10.19666/j.rlfd.202512040

基于响应曲面法的超临界二氧化碳富氧发电系统多因素分析

张智羽[1,2]，朱 琳[1,2]，张 波[1,2]，秦西杰[1,2]，丛 健[1,2]，高晨蔓[1,2]
（1. 内蒙古科技大学能源与环境学院，内蒙古 包头 014017；
2. 内蒙古自治区新型重要能源综合利用技术集成攻关大平台，内蒙古 包头 014017）

［摘 要］【目的】为缓解富氧燃烧技术因碳捕集辅助系统能耗高而导致的发电效率显著下降问题，本文创新性地将超临界二氧化碳（S-CO_2）布雷顿循环与富氧燃煤发电技术相结合，旨在构建并优化一种新型的高效低碳复合发电系统。【方法】建立了 S-CO_2 布雷顿循环富氧燃煤发电系统的热力学模型，针对系统多变量、强耦合的特点，采用响应曲面法进行多因素优化设计。通过构建以系统净电效率和㶲效率为目标的二次回归方程，定量分析了关键操作参数的主效应及其交互效应。【结果】各参数对系统性能的影响程度排序为：一次干循环烟气比例>冷一次风温度>省煤器分流比>高压透平进口压力。交互作用分析显示，对于净电效率，省煤器分流比与一次干循环烟气比例、高压透平进口压力与冷一次风温度的交互效应最为显著；对于㶲效率，高压透平进口压力与冷一次风温度的交互作用最为突出。研究得出了 S-CO_2 富氧发电系统性能参数的回归预测方程，并通过计算得到了最优响应目标预测值。【结论】S-CO_2 布雷顿循环的集成能有效提升富氧燃烧发电系统的能效。研究通过建模与多因素优化，明确了关键参数的优化次序与协同机制，为该系统未来的工程设计与运行优化提供了重要的理论依据。

［关 键 词］超临界二氧化碳；㶲分析；布雷顿循环；富氧燃烧；响应曲面法

［引用本文格式］张智羽，朱琳，张波，等. 基于响应曲面法的超临界二氧化碳富氧发电系统多因素分析[J]. 热力发电，2026，55(9)：53. Zhang Z Y, Zhu L, Zhang B, et al. Multi-factor analysis of an S-CO_2 oxy-fuel power generation system based on response surface method[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(9): 53.

Multi-factor analysis of an S-CO_2 oxy-fuel power generation system based on response surface method

Zhang Zhiyu[1,2], Zhu Lin[1,2], Zhang Bo[1,2], Qin Xijie[1,2], Cong Jian[1,2], Gao Chenman[1,2]
(1. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014017, China;
2. Integrated Research Large Platform for Comprehensive Utilization Technologies of New Important Energy, Baotou 014017, China)

Abstract: [Objective] Oxy-fuel combustion technology is a critical pathway for achieving near-zero emission from coal-fired power generation, yet its high energy consumption from auxiliary systems constrains economic viability. Integrating an S-CO_2 Brayton cycle can improve efficiency, but existing optimization studies predominantly rely on single-factor analyses, failing to capture complex parameter interactions. This study addresses this gap by developing a thermodynamic model and employing a multi-factor optimization framework to quantitatively analyze the individual and interactive effects of key parameters, thereby optimizing system performance. [Methods] A detailed thermodynamic model of an S-CO_2 Brayton cycle integrated with an oxy-fuel coal-fired power plant was developed. To systematically investigate the multi-parameter design space, response surface methodology (RSM)

收 稿 日 期：2025-12-12 修 回 日 期：2026-02-09 接 受 日 期：2026-02-13 网络首发日期：2026-04-30
基 金 项 目：内蒙古自然科学基金项目（2022MS05036）；内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目（2023QNJS141）；内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目（2025YFHH0099）
Supported by: Inner Mongolia Natural Science Foundation (2022MS05036); Basic Research Operating Expenses of Colleges and Universities Directly under the Inner Mongolia Autonomous Region (2023QNJS141); Key Research and Development and Achievement Transformation Program of Inner Mongolia Autonomous Region (2025YFHH0099)
第一作者简介：张智羽（1979），男，博士，副教授，主要研究方向为富氧燃烧技术，多能互补系统，zzy0021@126.com。

was employed. Using a central composite design (CCD) within the Design-Expert software platform, a structured simulation plan was executed. Four key operational parameters were selected as independent variables: the economizer bypass ratio, the primary dry cycle flue gas proportion, the high-pressure turbine inlet pressure, and the cold primary air temperature. The system's net electrical efficiency and exergy efficiency were defined as the primary performance responses. Based on the simulation data, multi-factor quadratic regression models were constructed. These explicit mathematical models enabled a rigorous quantitative analysis to determine the main effect (individual influence) of each parameter and, crucially, to evaluate the significance and nature of the two-factor interaction effects between them. [Results] The analysis yielded clear quantitative insights. The hierarchy of influence for the four parameters on both net electrical efficiency and exergy efficiency was definitively established as: primary dry cycle flue gas proportion > cold primary air temperature > economizer bypass ratio > high-pressure turbine inlet pressure. More importantly, the interaction effect analysis revealed significant coupling between parameters. For optimizing net electrical efficiency, the most pronounced interactions were between the economizer bypass ratio and the primary dry cycle flue gas proportion, and between the high-pressure turbine inlet pressure and the cold primary air temperature. For exergy efficiency, the interaction between the high-pressure turbine inlet pressure and the cold primary air temperature was identified as the most significant. [Conclusion] This research confirms that the S-CO_2 Brayton cycle can effectively mitigate the efficiency penalty associated with oxy-fuel carbon capture. By moving beyond conventional single-factor analysis, the application of Response Surface Methodology successfully quantified the complex interdependencies governing system performance. The study thus delivers a clear, multi-stage optimization pathway and robust theoretical support for the design of high-efficiency S-CO_2 Brayton cycle oxy-fuel power generation systems.

Key words: supercritical carbon dioxide; exergy analysis; Brayton cycle; oxy-fuel combustion; response surface method

随着我国能源结构加速向以风电、光伏为主体的方向转型，高比例、强波动性可再生能源并网对电力系统的运行灵活性、调节能力及整体效率提出了前所未有的挑战。传统蒸汽朗肯循环发电技术的热效率及运行灵活性提升已逐渐接近理论极限，难以充分适应新型电力系统对快速启停、宽负荷高效运行及深度调峰的严苛需求。因此，发展能够与高比例可再生能源高效协同、兼具灵活性与高热经济性的新型动力循环技术，已成为构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系的关键。

超临界二氧化碳（supercritical carbon dioxide，S-CO_2）布雷顿循环因系统结构紧凑、理论热转换效率高[1]，且与燃煤[2]、核能[3-4]及太阳能[5-6]等多种先进热源具有良好的热力学匹配特性，被国际学术界视为极具发展潜力的下一代发电技术。自 Feher[7]首次提出该循环概念以来，学者们围绕循环构型优化开展了系统性研究：Angelino[8]提出的再压缩循环有效缓解了回热器夹点问题；Dostal 等人[9]的研究表明，当透平入口温度高于 550 ℃时，S-CO_2 循环在效率上显著优于传统朗肯循环，在耦合富氧燃烧技术时，S-CO_2 循环因其更高的效率潜力，能够有效补偿空分及烟气压缩等辅助系统的能耗损失；冯雪佳等[10]研究证实，通过系统集成优化可将 S-CO_2 富氧燃烧系统供电效率提升至 43.75%；段元强等[11]的模拟对比也表明，直接燃煤的 S-CO_2 循环在净电效率上较煤气化路径更具优势。

然而，现有研究大多采用单因素分析方法，集中于特定循环构型下的参数敏感性研究。此方法虽能直观反映单一变量的影响趋势，却难以揭示多个关键运行参数之间复杂的非线性交互作用，可能导致无法获得系统全局最优工况。与之相比，多因素优化方法能够有效解析参数间的耦合效应，从而逼近系统全局最优。响应曲面法（response surface methodology，RSM）的基本思想是利用相对容易处理的函数代替隐式或难以确定极限状态的函数[12]。相较传统的优化方法，RSM 在分析过程中考虑到了实验的随机误差[13]，且在能源系统优化中得到成功应用，但在 S-CO_2 循环系统的多参数协同优化研究上尚未充分发挥潜力。

因此，本文基于响应曲面法对 S-CO_2 布雷顿循环富氧燃煤发电系统的㶲效率、净电效率进行多因素分析，通过构建“多变量−性能”的数学模型，得到各因素对响应指标的影响程度排序，以及各因素之间影响的交互作用，得出全局最优解，以期为 S-CO_2 布雷顿循环发电系统的设计与优化提供理论依据。

1 系统描述

1.1 系统流程

再热再压缩循环在保留再压缩循环简单高效及结构紧凑优势的基础上，通过增加再热突破了再压缩循环效率的提升瓶颈，成为当前应用最广泛的循环[14]。本文模型在文献[15]常规 S-CO_2 模型的基

础上改进而成，图 1 为新型 S-CO_2 布雷顿循环一次再热再压缩富氧燃煤发电系统的热力学模型。

S-CO_2 一次再热再压缩布雷顿循环在运行时始终位于临界状态（7.39 MPa，31.1 ℃）以上。循环主要流程如下：再热后的 CO_2 工质进入低压透平中膨胀做功，之后流入高温回热器与其中的冷侧工质换热；换热后进入低温回热器与来自主压缩机的高压工质换热，换热后的工质分为两部分，一部分工质经过再压缩机压缩，另一部分工质经过冷却器冷凝后进入主压缩机；主压缩机出口工质经过低温回热器加热后，与再压缩机出口工质混合，进入高温回热器中继续加热；混合后的工质一部分经过省煤器加热后与高温回热器低温侧出口工质混合，混合后经过锅炉过热段（过热气冷壁—低温过热器—高温过热器）加热后送入高压透平膨胀做功，高压透平出口工质经过锅炉再热段（再热气冷壁—低温再热器—高温再热器）加热后进入低压透平完成循环。

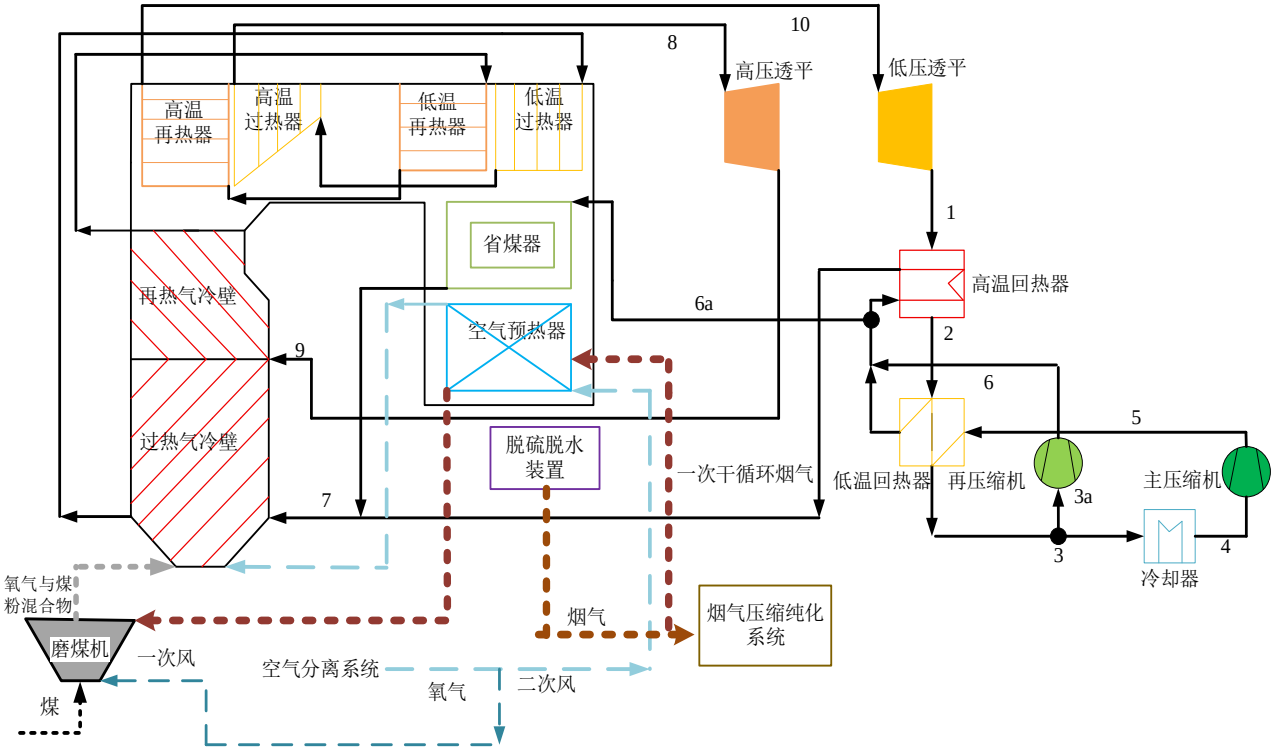


图 1 新型 S-CO_2 布雷顿循环一次再热再压缩富氧燃煤发电系统的热力学模型

Fig.1 Thermodynamic model of a novel S-CO_2 Brayton cycle with one-time reheating and recompression for oxygen-enriched coal-fired power generation system

1.2 热力学模型

本文利用 EBSILON Professional 及 Aspen Plus 软件构建 S-CO_2 布雷顿循环富氧发电系统稳态仿真模型，模型主要假设包括：

1）CO_2 工质在整个循环中始终处于临界状态以上（7.39 MPa，31.1 ℃）；

2）压缩及膨胀过程绝热；

3）压缩机及透平具有恒定的等熵效率；

4）管道及换热器的热损失忽略不计。

其他模型计算的初始设计参数如表 1 所示。

1.2.1 热力学基础模型

热力学分析的基本方程为质量守恒、能量守恒方程，具体平衡方程[16]如下。

表 1 系统分析的主要初始参数

Tab.1 Main initial parameters of system analysis

参数	数值	参数	数值
高压透平效率/%	93.50	一次干循环烟气比例/%	50.0
低压透平效率/%	94.50	省煤器分流比/%	11.0
主压缩机效率/%	90.0	冷一次风温度/℃	45
再压缩机效率/%	91.0	循环最低压力/MPa	7.6
再压缩机分流比/%	33.80	循环最低温度/℃	32
高压透平入口压力/MPa	28.5	发电功率/MW	300
高压透平入口温度/℃	602	锅炉效率/%	99.29
低压透平入口压力/MPa	17.3	供电标准煤耗量/(t h^{-1})	125.04
低压透平入口温度/℃	622	净电效率/%	42.86

$$\sum m_i = \sum m_o \tag{1}$$

$$Q-P=\sum m_{\mathrm{i}}h_{\mathrm{i}}-\sum m_{\mathrm{o}}h_{\mathrm{o}} \tag{2}$$

式中：h_{i}、h_{o} 分别为入口及出口工质比焓，kJ/kg；m_{i}、m_{o} 分别为入口及出口工质质量流量，kg/s；P 为系统发电量，kW·h；Q 为系统热负荷，MW。

1.2.2 涡轮机械功耗

透平组件通过过程流的膨胀模拟能量转换，能够将过程流中的热能或势能转换为轴的机械能。高压、低压透平的等熵效率输出功计算式[17]如下：

$$W_{\mathrm{HPT}}=\frac{m(h_{\mathrm{HPT,i}}-h_{\mathrm{HPT,o}})\eta_{\mathrm{HPT}}}{100} \tag{3}$$

$$W_{\mathrm{LPT}}=\frac{m(h_{\mathrm{LPT,i}}-h_{\mathrm{LPT,o}})\eta_{\mathrm{LPT}}}{100} \tag{4}$$

式中：W_{HPT}、W_{LPT} 分别为高压、低压透平做功，MW；m 为工质质量流量，kg/s；$h_{\mathrm{HPT,i}}$、$h_{\mathrm{HPT,o}}$ 分别为高压透平入口、出口工质等熵焓值，MJ/kg；$h_{\mathrm{LPT,i}}$、$h_{\mathrm{LPT,o}}$ 分别为低压透平入口、出口工质等熵焓值，MJ/kg；η_{HPT}、η_{LPT} 分别为高压、低压透平等熵效率，%。

压缩机功耗计算式[18]为：

$$W_{\mathrm{MC}}=m_{\mathrm{MC}}(h_2-h_1)=xm_{\mathrm{c}}(h_{2\mathrm{s}}-h_1)/\eta_{\mathrm{c,s}} \tag{5}$$

$$W_{\mathrm{RC}}=m_{\mathrm{RC}}(h_{7\mathrm{b}}-h_{6\mathrm{b}})=(1-x)m_{\mathrm{c}}(h_{7\mathrm{bs}}-h_{6\mathrm{b}})/\eta_{\mathrm{c,s}} \tag{6}$$

式中：W_{MC}、W_{RC} 分别为主、再压缩机耗功量，MW；m_{MC}、m_{RC} 分别为主、再压缩机工质质量流量，kg/s；h_5、h_4 分别为主压缩机出口及进口等熵比焓，MJ/kg；x 为主压缩机中工质质量流量与总工质质量流量的比值，%；m_{c} 为工质质量流量，kg/s；$h_{5\mathrm{s}}$ 为压缩机出口等熵比焓，MJ/kg；$\eta_{\mathrm{c,s}}$ 为压缩机等熵效率，%；h_6、$h_{3\mathrm{a}}$ 分别为再压缩机出口及进口等熵比焓，MJ/kg；$h_{6\mathrm{s}}$ 为再压缩机出口等熵比焓，MJ/kg。

1.2.3 热交换器热负荷

模型中属于热交换器的装置有高温回热器、低温回热器及冷却器，其运行遵循能量守恒方程：

$$m_{\mathrm{L}}\times(h_{\mathrm{L,in}}-h_{\mathrm{L,out}})=m_{\mathrm{H}}\times(h_{\mathrm{H,out}}-h_{\mathrm{H,in}}) \tag{7}$$

式中：m_{L}、m_{H} 分别为低温、高温侧工质质量流量，kg/s；$h_{\mathrm{L,in}}$、$h_{\mathrm{H,in}}$ 分别为低温、高温侧进口工质等熵比焓，MJ/kg；$h_{\mathrm{L,out}}$、$h_{\mathrm{H,out}}$ 分别为低温、高温侧出口工质等熵比焓，MJ/kg。

单位时间内，冷却器热负荷计算式[19]如下：

$$Q_{\mathrm{cooler}}=m_{\mathrm{cooler}}(h_{\mathrm{cooler,out}}-h_{\mathrm{cooler,in}}) \tag{8}$$

式中：Q_{cooler} 为冷却器热负荷，MW；m_{cooler} 为流经冷却器的工质质量流量，kg/s；$h_{\mathrm{cooler,out}}$、$h_{\mathrm{cooler,in}}$ 分别为冷却器出口及入口工质等熵比焓，MJ/kg。

换热器热负荷为：

$$Q_{\mathrm{HEX}}=m_{\mathrm{HEX}}\times(h_{\mathrm{HEX,out}}-h_{\mathrm{HEX,in}}) \tag{9}$$

式中：Q_{HEX} 为换热器热负荷，MW；m_{HEX} 为换热器工质质量流量，kg/s；$h_{\mathrm{HEX,out}}$、$h_{\mathrm{HEX,in}}$ 分别为换热器出口及进口等熵比焓，MJ/kg。

1.2.4 省煤器分流比

省煤器分流比[20]定义为从高温换热器出口分流到省煤器的 S-CO_2 流体的比例：

$$\alpha_{\mathrm{ECO}}=\frac{m_{\mathrm{ECO}}}{m_{\mathrm{b}}}\times100\% \tag{10}$$

式中：α_{ECO} 为省煤器分流比，%；m_{ECO} 为流经省煤器的工质质量流量，kg/s；m_{b} 为参与循环的总工质质量流量，kg/s。

1.2.5 空气分离子系统

空气分离子系统主要流程为：除尘后的空气进入空气压缩机，压缩后的空气被送入预冷系统中冷却，冷却后进入分子筛，之后分别进入主换热器和膨胀机，出来的气体送入精馏塔得到高纯氧气。

空气分离子系统的能耗通过生产氧气所需电力求出，计算式[21]如下：

$$E_{\mathrm{ASU}}=\frac{\sum\left(\varphi_{\mathrm{k},j}\sum_{i}^{n}W_{i,(\mathrm{k},j)}^{0}\right)(\varphi(\mathrm{O_2})+\varphi(\mathrm{N_2})-100)V(\mathrm{O_2})}{22.4\eta_{\mathrm{com}}(\varphi_{\mathrm{k}}(\mathrm{O_2})+\varphi(\mathrm{N_2})-100)} \tag{11}$$

式中：$\varphi_{\mathrm{k},j}$ 为 j 气体体积所占百分比，%；n 为压缩机级数；$W_{i,(k,j)}^{0}$ 为第一级压缩机对 j 气体进行绝热压缩所需要的理论压缩功，kJ/mol；$\varphi(\mathrm{O_2})$为氧气纯度，%；$\varphi(\mathrm{N_2})$为氮气纯度，%；$V(\mathrm{O_2})$为氧气体积流量，m³/s；η_{com} 为多级压缩机效率，%；$\varphi_{\mathrm{k}}(\mathrm{O_2})$为空气中氧气所占的体积份额，%。

1.2.6 烟气压缩纯化子系统

烟气压缩纯化子系统主要流程为：处理后的烟气进入多级压缩机中压缩，初步脱水后分离 CO_2 并深度脱水，再进入纯化系统进行闪蒸分离与纯化。

该系统能耗主要通过计算压缩锅炉排烟中高纯 CO_2 所需的电能来得到[22]，公式如下：

$$E_{\mathrm{CPU}}=\frac{\sum\left(\varphi_{i,\mathrm{y}}\sum_{i}^{n}W_{i,(\mathrm{y}-j)}^{0}\right)V_{\text{com-cy}}+\sum_{i}^{n}W_{i}^{0}(\mathrm{CO_2})V_{i}(\mathrm{CO_2})}{22.4\eta_{\mathrm{com}}}+\frac{W_{\mathrm{p}}^{0}(\mathrm{CO_2})V(\mathrm{CO_2})}{22.4\eta_{\mathrm{bp}}} \tag{12}$$

式中：$\varphi_{i,y}$为 j 气体在所有气体中所占的比例，%；$W^0_{i,(y-j)}$为第 i 级压缩机压缩 j 气体的理论功，kJ/mol；$V_{\text{com-cy}}$为待处理烟气流量，m^3/s；$W^0_i(CO_2)$为 i 级压缩机压缩烟气中 CO_2 的理论功，kJ/mol；$V_i(CO_2)$为进入第 i 级压缩机的 CO_2 体积流量，m^3/s；$V(CO_2)$为进入增压泵的烟气 CO_2 体积流量，m^3/s；$W^0_P(CO_2)$为增压泵压缩液体 CO_2 的理论功，kJ/mol；η_{bp}为增压泵效率，%。

1.2.7 系统热力学评价指标

S-CO_2 循环富氧发电系统净输出电量为：

$$P_e = P - P_{\text{loss}} \tag{13}$$

式中：P_e为系统净输出电量，kW·h；P_{loss}为系统运行消耗的发电量，kW·h。

系统净电效率是指系统净输出电量与系统总发电量的比值，计算式[23]如下：

$$\eta = \frac{P_e}{BQ_{\text{net,ar}}} \times 100\% \tag{14}$$

式中：η为系统净电效率，%；B 为单位时间内锅炉实际耗煤量，kg/s；$Q_{\text{net,ar}}$ 为煤的低位发热量，20 910 kJ/kg。

系统输入㶲与输出㶲的比值定义为系统㶲效率[24]，计算公式如下：

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} \times 100\% \tag{15}$$

式中：η_{ex}为系统㶲效率，%；E_{out}为系统输出㶲，MW；E_{in}为系统输入㶲，MW，即煤的㶲，计算式如下：

$$E_{\text{in}} = (Q_{\text{net,ar}} + 340.051\,87C_{\text{ar}} - 831.916\,575H_{\text{ar}} + 477.832\,8O_{\text{ar}} + 5.25N_{\text{ar}} + 2\,237.166\,9S_{\text{ar}} - 48.815\,34A_{\text{ar}})/1\,000 \tag{16}$$

系统输出㶲为额定输出功率，为 300 MW。

1.3 模型验证

S-CO_2 布雷顿循环富氧发电系统模型验证结果如表 2 所示，其中测量点位置见图 1。可见，所建立的 S-CO_2 布雷顿循环发电系统参数与文献[15]基本一致，其中压力误差为 0，温度最大误差为 0.98%，质量流量最大误差为 0.23%，所有误差均不超过 1%，因而验证了本文所设计 S-CO_2 布雷顿循环发电系统的合理性。

表 2 S-CO_2 布雷顿循环富氧发电系统验证

Tab.2 Validation of the S-CO_2 Brayton cycle oxy-fuel power generation system

测量点	温度/℃		误差/%	质量流量/(kg·s^{-1})		误差/%
	本文	文献[15]		本文	文献[15]	
1	516.31	516.31	0	2 209	2 209	0
2	218.73	220.19	–0.66	2 209	2 209	0
3	86.07	86.87	–0.92	2 209	2 209	0
3a	86.07	86.87	–0.92	746.64	746.79	–0.02
4	32.04	32	0.125	1 462.36	1 462.21	0.01
5	80.63	79.85	0.98	1 462.36	1 462.21	0.01
6	218.21	219.07	–0.39	746.64	746.79	–0.02
6a	215	215	0	243.546	242.99	0.23
7	510.33	508.9	0.28	2 209	2 209	0
8	602	602	0	2 209	2 209	0
9	539.09	539.09	0	2 209	2 209	0
10	622	622	0	2 209	2 209	0

2 方案设计

本文采用 RSM 的中心复合设计[25]（central composite design，CCD）方法，借助 Design-Expert 软件平台，参考相关文献选取关键运行参数[26]，构建以省煤器分流比 A、一次干循环烟气比例 B、高压透平进口压力 C 及冷一次风温度 D 等 4 种运行参数为影响因素的试验设计及优化方案，将系统净电效率η及系统㶲效率η_{ex}作为响应指标进行分析，得到各因素对响应指标的影响排序、各因素之间的交互作用、最佳运行参数方案及最佳响应指标。表 3 为响应曲面的设计因素及设计水平数。

影响因素以文献[26]中影响因素的取值范围为基准，具体取值如下：省煤器分流比 A 取 9%~13%，一次干循环烟气比例 B 范围为 30%~50%，高压透平进口压力 C 范围为 28~30 MPa，冷一次风温度 D 变化区间设定为 45~85 ℃。

表 3 设计因素及设计水平数
Tab.3 Design factors and design level numbers

设计因素	水平数		
	–1	0	1
省煤器分流比 *A*/%	9	11	13
一次干循环烟气比例 *B*/%	30	40	50
高压透平进口压力 *C*/MPa	28	29	30
冷一次风温度 *D*/℃	45	65	85

针对 S-CO_2 富氧发电系统净电效率η及㶲效率η_{ex}等响应值在不同影响因素组合下的结果进行拟合，建立多元二次回归方程并对其进行方差分析，表 4 为影响因素设计及响应值结果。

表 4 影响因素设计及响应值结果
Tab.4 Design of influencing factors and response results

试验号	影响因素				响应值	
	A/%	*B*/%	*C*/MPa	*D*/℃	η/%	η_{ex}/%
1	9	30	29	65	42.28	45.94
2	9	40	28	65	42.41	46.01
3	9	40	29	85	42.15	45.73
4	9	40	29	45	41.71	45.40
5	9	40	30	65	42.28	45.81
6	9	50	29	65	42.77	46.28
7	11	30	29	45	41.98	45.66
8	11	30	30	65	41.23	44.89
9	11	30	29	85	41.43	45.12
10	11	40	28	85	41.98	45.60
11	11	40	29	65	41.95	45.55
12	11	30	28	65	41.97	45.59
13	11	40	30	85	42.02	45.60
14	11	40	28	45	42.35	45.94
15	11	50	29	85	42.29	45.95
16	11	40	30	45	41.83	45.40
17	11	50	29	45	42.24	45.81
18	11	50	28	65	42.97	46.45
19	11	50	30	65	42.23	45.68
20	13	40	29	85	42.13	45.70
21	13	50	29	65	41.96	45.44
22	13	40	29	45	42.18	45.74
23	13	30	29	65	41.90	45.54
24	13	40	30	65	41.89	45.43
25	13	40	28	65	42.03	45.61

3 关键运行参数影响分析

3.1 响应曲面结果分析

对响应曲面进行回归分析时，*P* 值表示影响的显著性，其大小反映了影响因素对响应值的影响程度。当 $P \leqslant 0.000\,1$ 时，影响因素对响应值的影响特别显著；当 $P \leqslant 0.001\,0$ 时，影响因素对响应值的影响显著；当 $P \leqslant 0.050\,0$ 时，影响较为显著[21]。使用偏差 R^2 与校正偏差 R_{adj}^2 表示模型的总体拟合情况：R^2 越大，且越接近 1，模型与数据拟合得越好；R_{adj}^2 与 R^2 的差距越小，模型的拟合程度越高[22]。

3.1.1 净电效率分析

表 5 为 S-CO_2 布雷顿循环富氧发电系统净电效率η的回归方差分析。由表 5 可得：系统净电效率η的二阶模型显著性参数 $P<0.000\,1$，表明该模型极为显著；偏差 R^2 为 0.977 9，校正偏差 R^2_{adj} 为 0.947 1，可知该模型拟合程度高，效果显著，误差较小，模型结果准确，能够预测不同影响因素组合下的 S-CO_2 富氧发电系统净电效率η。

其中 *A*-*B*、*C*-*D*、C^2、D^2 对η的影响特别显著，一次干循环烟气比例 *B* 对η的影响显著，冷一次风温度 *D*、*B*-*C*、B^2 对η的影响较显著，其他因素对η的影响不显著。运行参数对η的影响程度排序为：一次干循环烟气比例 *B*＞冷一次风温度 *D*＞省煤器分流比 *A*＞高压透平进口压力 *C*。

表 5 S-CO_2 布雷顿循环富氧发电系统净电效率方差分析
Tab.5 Variance analysis of net power efficiency of the S-CO_2 Brayton cycle oxy-fuel power generation system

方差来源	平方和	自由度	均方差	*F* 值	*P*＞*F*
Model	3.040 0	14	0.217 2	31.670 0	＜0.000 1
A	0.023 0	1	0.023 0	3.350 0	0.097 1
B	0.221 0	1	0.221 0	32.230 0	0.000 2
C	0.005 5	1	0.005 5	0.807 0	0.390 1
D	0.103 6	1	0.103 6	15.100 0	0.003 0
AB	0.352 2	1	0.352 2	51.360 0	＜0.000 1
AC	0.025 7	1	0.025 7	3.750 0	0.081 4
AD	0.079 6	1	0.079 6	11.600 0	0.006 7
BC	0.092 6	1	0.092 6	13.500 0	0.004 3
BD	0.041 0	1	0.041 0	5.990 0	0.034 5
CD	0.510 4	1	0.510 4	74.420 0	＜0.000 1
A^2	0.042 0	1	0.042 0	6.120 0	0.032 9
B^2	0.103 5	1	0.103 5	15.080 0	0.003 0
C^2	0.697 3	1	0.697 3	101.680 0	＜0.000 1
D^2	0.880 7	1	0.880 7	128.420 0	＜0.000 1
残差	0.068 6	14			
失拟度	0.068 6	10			
R^2	0.977 9				
R_{adj}^2	0.947 1				

3.1.2 系统㶲效率分析

S-CO_2 布雷顿循环富氧发电系统㶲效率 η_{ex} 回归方差分析如表 6 所示。由表 6 可知：系统㶲效率η_{ex}的二阶模型显著性参数 $P<0.000\,1$，表明该模型可极为显著地揭示影响因素与η_{ex}之间的关系；偏差 R^2 为 0.976 3，校正偏差 R_{adj}^2 为 0.943 1，说明该模型拟合程度高，效果显著，误差较小，模型结果准

确，能够预测不同影响因素组合下的 S-CO_2 富氧发电系统㶲效率η_{ex}。

表 6 S-CO_2 布雷顿循环富氧发电系统㶲效率方差分析
Tab.6 Variance analysis of exergy efficiency of the S-CO_2 Brayton cycle oxy-fuel power generation system

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P>F
Model	2.530 000	14	0.180 400	29.410 0	<0.000 1
A	0.023 400	1	0.023 400	3.820 0	0.079 3
B	0.336 800	1	0.336 800	54.890 0	<0.000 1
C	0.000 009	1	0.000 009	0.001 4	0.970 8
D	0.118 900	1	0.118 900	19.370 0	0.001 3
AB	0.230 600	1	0.230 600	37.580 0	0.000 1
AC	0.005 600	1	0.005 600	0.915 6	0.361 2
AD	0.065 600	1	0.065 600	10.690 0	0.008 4
BC	0.119 200	1	0.119 200	19.430 0	0.001 3
BD	0.006 200	1	0.006 200	1.020 0	0.336 7
CD	0.347 600	1	0.347 600	56.650 0	<0.000 1
A^2	0.031 000	1	0.031 000	5.050 0	0.048 4
B^2	0.047 800	1	0.047 800	7.780 0	0.019 1
C^2	0.540 800	1	0.540 800	88.140 0	<0.000 1
D^2	0.658 900	1	0.658 900	107.390 0	<0.000 1
残差	0.061 400	14			
失拟度	0.061 400	10			
R^2	0.976 300				
R_{adj}^2	0.943 100				

其中一次干循环烟气比例 *B*、*C*-*D*、C^2、D^2 对η_{ex} 的影响特别显著，*A*-*B* 对η_{ex} 的影响显著，冷一次风温度 *D*、*A*-*D*、*B*-*C*、A^2、B^2 对η_{ex} 的影响较为显著，其他影响因素对η_{ex} 的影响不显著。运行因素对 S-CO_2 布雷顿循环富氧发电系统㶲效率η_{ex} 的影响程度排序为：一次干循环烟气比例 *B*＞冷一次风温度 *D*＞省煤器分流比 *A*＞高压透平进口压力 *C*。

从能量平衡角度分析，在富氧条件下一次干循环烟气比例之所以成为影响系统效率的主导因素，核心在于它直接且显著地调控着整个布雷顿循环的可用能（㶲）输入总量、输入品位以及系统内部的关键㶲损分布。

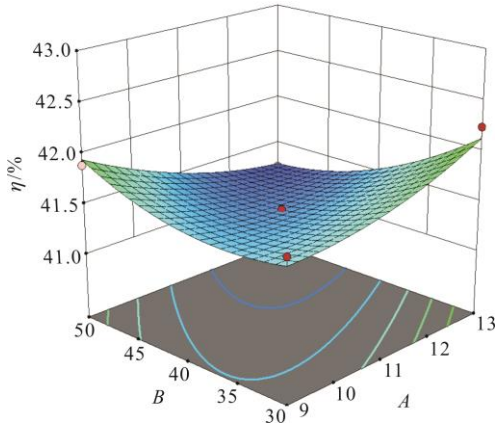
一方面，一次干循环烟气比例决定了有多少高温烟气的高品位热能（高㶲）被分配给布雷顿循环的主加热器（如锅炉/高温换热器）：当其增大时，更多高品位热量进入主循环，提升透平进口温度或 S-CO_2 流量，直接增加透平输出功；当其减小时，高品位热量被分流至再热、省煤或旁路等低品位用途，降低了主循环的做功能力。在富氧条件下，此控制作用被放大：因为烟气比热容大，同样比例的变化所引起的能量流量变化比常规烟气更大，对系统功率输出的冲击更显著。

另一方面，高压透平进口压力变化主要影响工质循环本身的热力学完善度（如压缩机压比、回热器性能），但在富氧环境下，“能量输入”的约束可能比“内部转化”的优化（压力变化）对效率的影响更大。即，如果输入的热量品位和数量不合理，不断优化内部循环仍可能导致整体输出受限。同冷一次风温度/省煤器分流相比，这两种因素更多影响的是低温段热回收和辅助系统的能量平衡，影响量级通常小于对主循环高温能量输入进行控制的一次干循环烟气比例。

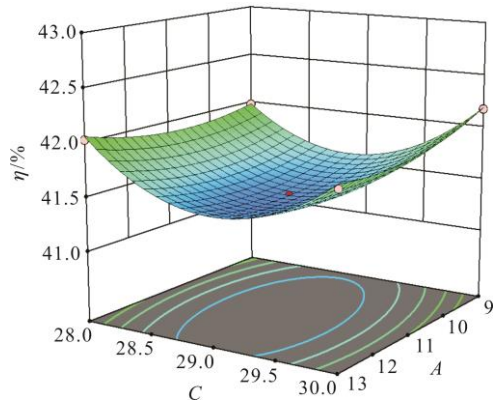
3.2 响应曲面法多因素分析

3.2.1 系统净电效率分析

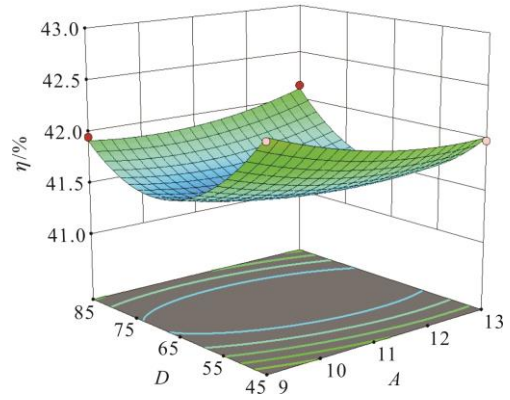
图 2 为各影响因素组合对 S-CO_2 富氧发电系统净电效率η的影响。根据表 5 方差分析结果，由图 2a)可得，省煤器分流比 *A* 和一次干循环烟气比例 *B* 的交互作用极为显著。当省煤器分流比 *A* 较小时，S-CO_2 富氧发电系统净电效率η随一次干循环烟气比例 *B* 增加逐渐增大；省煤器分流比 *A* 较大时则反之。当一次干循环烟气比例 *B* 较小时，η随省煤器分流比 *A* 增加逐渐增大，一次干循环烟气比例 *B* 较大时随省煤器分流比 *A* 增大，η逐渐减小。



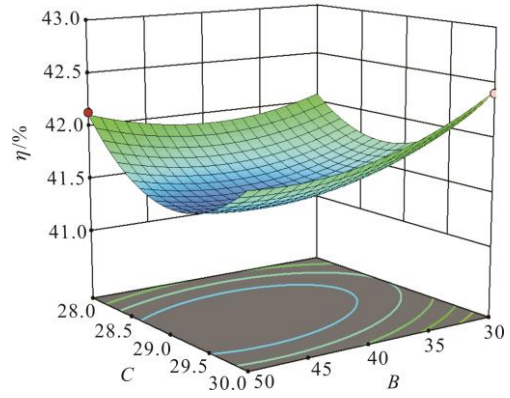
a) 省煤器分流比 *A*—一次干循环烟气比例 *B*



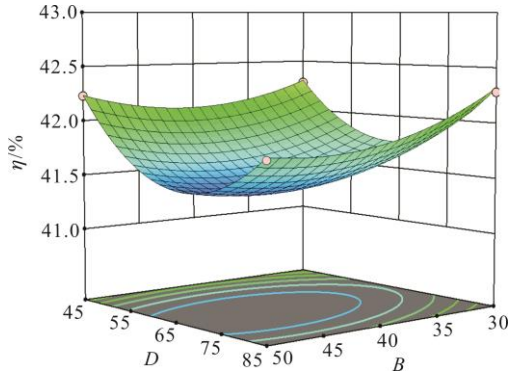
b) 省煤器分流比 *A*—高压透平进口压力 *C*



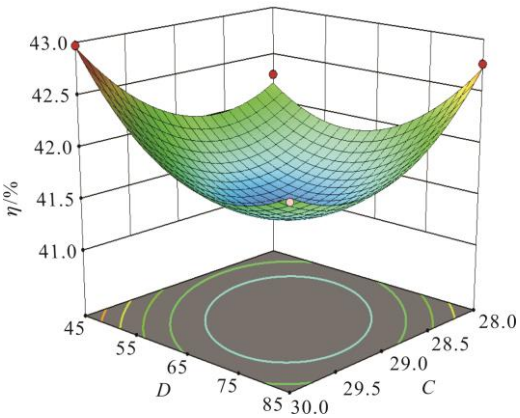
c) 省煤器分流比 *A*—冷一次风温度 *D*



d) 一次干循环烟气比例 *B*—高压透平进口压力 *C*



e) 一次干循环烟气比例 *B*—冷一次风温度 *D*



f) 高压透平进口压力 *C*—冷一次风温度 *D*

图 2 影响因素组合对系统净电效率的影响

Fig.2 Influences of the combinations of influencing factors on the net electrical efficiency of the system

如图 2b)所示：η随省煤器分流比 *A* 增加先减小后增大，但变化幅度很小；随着高压透平进口压力 *C* 增加，η先减小后增大。

根据图 2c)可得：当冷一次风温度 *D* 较低时，η随省煤器分流比 *A* 的增加先减小后增大；冷一次风温度 *D* 较高时与之相反，总体变化幅度较小。整体上，η随冷一次风温度 *D* 升高呈先减小后增大的趋势。

如图 2d)所示：η随高压透平进口压力 *C* 的增加先减小后增大；当高压透平进口压力 *C* 较小时，η随一次干循环烟气比例 *B* 的增加先减小后增大，但变化幅度较小；当高压透平进口压力 *C* 处于高值时，η随一次干循环烟气比例 *B* 的增加逐渐减小。

据图 2e)可得，冷一次风温度 *D* 对η的影响远大于一次干循环烟气比例 *B*，η随冷一次风温度 *D* 的升高呈先减小后增大的趋势。

如图 2f)所示，高压透平进口压力 *C* 与冷一次风温度 *D* 的交互最为显著。η随高压透平进口压力 *C* 增加呈先减小后增大的趋势，随冷一次风温度 *D* 升高呈先减小后增大的趋势。

由此可得，系统净电效率η的影响因素中，省煤器分流比 *A* 和一次干循环烟气比例 *B*、高压透平进口压力 *C* 和冷一次风温度 *D* 的交互作用最显著，省煤器分流比 *A* 和高压透平进口压力 *C* 之间的交互作用不显著，其他因素组合的交互作用较显著。

3.2.2 系统㶲效率分析

图 3 为各影响因素组合对 S-CO_2 富氧发电系统㶲效率η_{ex}的影响。根据表 6 方差分析结果及图 3a)，省煤器分流比 *A* 与一次干循环烟气比例 *B* 交互作用显著。当一次干循环烟气比例 *B* 处于低值时，S-CO_2 富氧发电系统㶲效率 η_{ex} 随省煤器分流比 *A* 的增加逐渐增大；当一次干循环烟气比例 *B* 较大时，η_{ex} 随省煤器分流比 *A* 的增加逐渐减小。当省煤器分流比 *A* 较小时，η_{ex} 随一次干循环烟气比例 *B* 的增加呈先减小后增大的趋势；当省煤器分流比 *A* 较大时，η_{ex} 随一次干循环烟气比例 *B* 的增加逐渐减小。

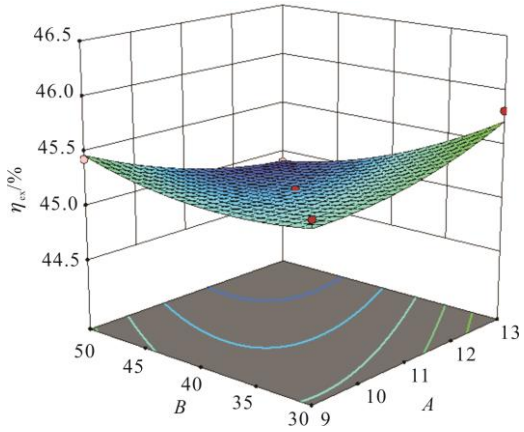
由图 3b)可得，省煤器分流比 *A* 和高压透平进口压力 *C* 的交互作用不显著。η_{ex} 随高压透平进口压力 *C* 的增加呈先减小后增大的趋势，省煤器分流比 *A* 对 η_{ex} 的影响较小，变化幅度不明显。

由图 3c)可知，省煤器分流比 *A* 和冷一次风温度 *D* 的交互作用不显著，省煤器分流比 *A* 对 η_{ex} 的

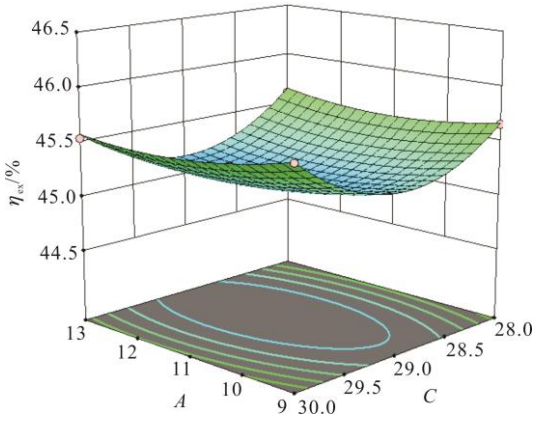
影响很小，η_{ex} 随冷一次风温度 D 的升高呈先减小后增大的趋势。

如图 3d)所示，η_{ex} 随高压透平进口压力 C 的增加先减小后增大。当高压透平进口压力 C 较大时，η_{ex} 随一次干循环烟气比例 B 的增加逐渐降低；当高压透平进口压力 C 位于低值时，η_{ex} 随一次干循环烟气比例 B 的变化不明显。

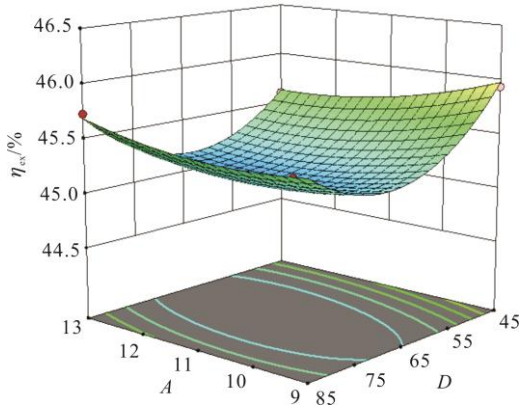
根据图 3e)可得，η_{ex} 随冷一次风温度 D 升高先减小后增大，随一次干循环烟气比例 B 的增加逐渐降低。



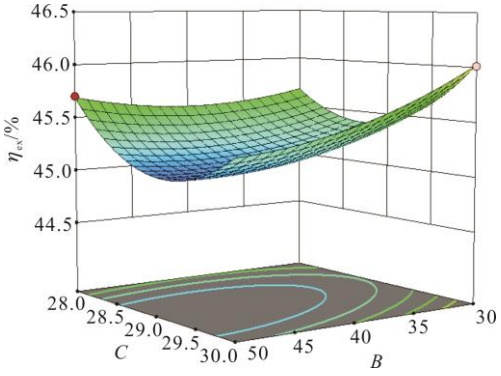
a) 省煤器分流比 A—一次干循环烟气比例 B



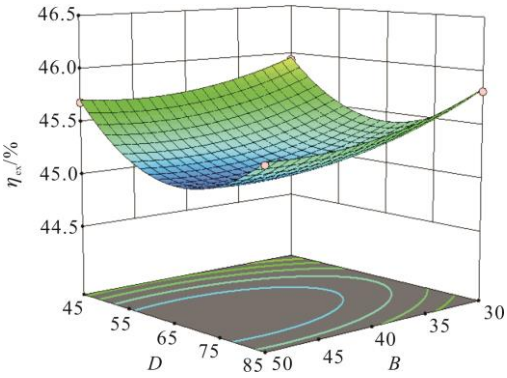
b) 省煤器分流比 A—高压透平进口压力 C



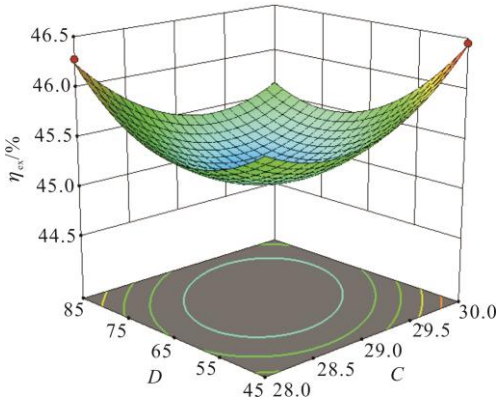
c) 省煤器分流比 A—冷一次风温度 D



d) 一次干循环烟气比例 B—高压透平进口压力 C



e) 一次干循环烟气比例 B—冷一次风温度 D



f) 高压透平进口压力 C—冷一次风温度 D

图 3 影响因素组合对系统㶲效率的影响

Fig.3 Influences of the combinations of influencing factors on the exergy efficiency of the system

如图 3f)所示，高压透平进口压力 C 与冷一次风温度 D 的交互最显著。

由此可知，系统㶲效率 η_{ex} 的影响因素中，高压透平进口压力 C 和冷一次风温度 D 的交互作用最显著，省煤器分流比和一次干循环烟气比例的交互作用显著，省煤器分流比 A 和冷一次风温度 D、一次干循环烟气比例 B 和高压透平进口压力 C 的交互作用较显著，其他组合之间的交互作用不显著。

由于各参数之间的交互及制约作用，影响参数组合对响应曲面的影响较为复杂，本研究仅从热力

学角度简要判断了影响参数组合的影响。以文中交互作用最优组合为例：在系统净电效率分析中，高压透平进口压力 C 与冷一次风温度 D 交互作用显著，如图 2f)所示。无论冷一次风温度 D 如何，系统净电效率η均随着高压透平进口压力 C 呈先减后增的趋势。但冷一次风温度 D 较高时，炉膛内烟气温度提升，使得工质提温更快，锅炉换热效率更高，系统净电效率η在低压时已经达到最大值；冷一次风温度较低 D 时，锅炉换热效率有所下降，净电效率 D 在高压时达到最大。高温加剧了透平膨胀过程的热损失，削弱了压力提升的效果，因而在高温时反而适宜使用较低压力来得到最佳性能。

3.3 结果验证

根据响应指标回归方程，可以预测得出响应目标的最优值，并通过模拟进行验证。式(17)为系统净电效率η及系统㶲效率η_{ex}的线性回归方程表达式，其中 Y 为响应目标，α为回归方程常数，X_n 为影响因素系数，回归方程具体参数见表 7。

$$\begin{aligned} Y = {} & a + X_1 \times A + X_2 \times B + X_3 \times C + X_4 \times D + \\ & X_5 \times A \times B + X_6 \times A \times C + X_7 \times A \times D + \\ & X_8 \times B \times C + X_9 \times B \times D + X_{10} \times C \times D + \\ & X_{11} \times A^2 + X_{12} \times B^2 + X_{13} \times C^2 + X_{14} \times D^2 \end{aligned} \tag{17}$$

表 7 回归方程的参数

Tab.7 Parameters of the regression equation

Y	η	η_{ex}
α	403.041 79	367.492 2
X_1	0.083 505 7	0.217 139
X_2	0.471	0.524 794
X_3	–26.591	–23.529 02
X_4	0.313 260	0.238 147
X_5	–0.014 838	–0.012 005
X_6	–0.040 112	–0.018 737
X_7	0.003 526	0.003 201
X_8	–0.015 215	–0.017 265
X_9	–0.000 506	–0.000 198
X_{10}	–0.017 860	–0.014 739
X_{11}	0.030 484	0.026 197
X_{12}	0.001 914	0.001 3
X_{13}	0.496 950	0.437 636
X_{14}	0.001 396	0.001 208

根据上述响应目标的线性回归表达方程，通过计算可得到各响应目标的预测最优值。之后，依据各响应目标预测最优值所对应的影响因素数值进行流程模拟计算，得到模拟最优值。通过对比预测值与模拟值，进行误差分析，可进一步验证本次试验的可行性与正确性。响应目标预测最优值与模拟值对比如表 8 所示。

表 8 S-CO_2 布雷顿循环富氧发电系统响应目标回归预测值及模拟值对比

Tab.8 Comparison of predicted and simulated values of response targets for the S-CO_2 Brayton cycle oxy-fuel power generation system

目标	回归预测值/%	模拟值/%	误差/%	各响应目标最优时对应的影响因素值			
				A/%	B/%	C/MPa	D/℃
η	43.26	42.86	0.92	9.13	49.45	29.81	45.94
η_{ex}	46.52	46.35	0.36	10.44	37.62	29.98	45.31

对比各响应目标回归预测最优值与模拟值可知：系统净电效率η的误差为 0.92%，系统㶲效率η_{ex}的误差为 0.36%，各相应目标误差值均不超过 1%；虽然存在误差，但是因为在复杂的 S-CO_2布雷顿循环中，模拟过程会受到热损失影响，无法忽略所有热损失影响；同时，模拟软件本身存在迭代容差和收敛精度；其次，S-CO_2 的物性（尤其是近临界区）高度非线性，不同物性数据库或状态方程的计算结果可能存在微小差异，这些差异会传导至系统效率，从而产生一定的误差。以上原因均会导致模拟值与回归预测值之间不可避免的误差。

4 结 论

本文采用响应曲面法，研究了省煤器分流比、一次干循环烟气比例、高压透平进口压力、冷一次风温度等影响因素对 S-CO_2 富氧发电系统净电效率及㶲效率的影响，通过方程分析得出各影响因素对系统热力性能的影响程度及各因素之间的交互作用，获得了回归预测方程表达式及最佳运行参数组合和响应值。主要结论如下：

1）通过 RSM 分析，各影响因素对系统净电效率及㶲效率的影响程度排序为：一次干循环烟气比例＞冷一次风温度＞省煤器分流比＞高压透平进口压力。其中一次干循环烟气比例对系统净电效率、㶲效率的影响均大于其他 3 种因素。

2）影响因素组合对系统净电效率的影响中，省煤器分流比和一次干循环烟气比例、高压透平进口压力和冷一次风温度的交互最显著；影响因素组合对系统㶲效率的影响中，高压透平进口压力和冷一次风温度的交互最显著。

3）研究得出了 S-CO_2 富氧发电系统性能参数的回归预测方程，通过计算得到了最优响应目标预测值：系统净电效率的最佳值为 43.26%，对应的影响因素参数为省煤器分流比 9.13%，一次干循环烟气比例 49.45%，高压透平进口压力 29.81 MPa，冷一次风温度 45.94 ℃；系统㶲效率最佳值为 46.52%，对应的影响因素参数为省煤器分流比 10.44%，一次干循

环烟气比例 37.62%，高压透平进口压力 29.98 MPa，冷一次风温度 45.31 ℃。模拟最优值与回归预测值的误差均在 1%以内，可验证本次试验的准确性。本研究相关结果为超临界二氧化碳布雷顿循环富氧燃烧发电系统的优化设计与性能分析奠定了理论基础。

［参 考 文 献］

［1］ Le Moullec Y. Conceptual study of a high efficiency coal-fired power plant with CO_2 capture using a supercritical CO_2 Brayton cycle[J]. Energy, 2013, 49(45): 32.

［2］ Pan M, Zhu Y, Bian X, et al. Theoretical analysis and comparison on supercritical CO_2 based combined cycles for waste heat recovery of engine[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 219: 113049.

［3］ 薛琪, 冯民, 马云铎, 等. 超临界二氧化碳核能系统负荷运行策略研究[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(5): 136.
Xue Q, Feng M, Ma Y D, et al. Research on load operation strategies for supercritical carbon dioxide nuclear energy systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(5): 136.

［4］ Wilberforce T, Baroutaji A, Soudan B, et al. Outlook of carbon capture technology and challenges[J]. Science of the Total Environment, 2019, 657: 56.

［5］ 邓成刚, 李伟科, 梁展鹏, 等. 太阳光热发电-超临界二氧化碳循环系统经济性分析与优化[J]. 热力发电, 2021, 50(5): 59.
Deng C G, Li W K, Liang Z P, et al. Economic analysis and optimization for concentrated solar power-supercritical carbon dioxide Brayton cycle system[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(5): 59.

［6］ Utamura M, Tamaura Y, Hasuike H. Some alternative technologies for solar thermal power generation[C]// ASME International Solar Energy Conference, 2006.

［7］ Feher E G. The supercritical thermodynamic power cycle[J]. Energy Conversion, 1968, 8(2): 85.

［8］ Angelino G. Carbon dioxide condensation cycles for power production[J]. Journal of Engineering for Power, 1968, 90(3): 287.

［9］ Dostal V, Hejzlar P, Driscoll M J. High-performance supercritical carbon dioxide cycle for next-generation nuclear reactors[J]. Nuclear Technology, 2006, 154(3): 265.

［10］ 冯雪佳, 王顺森. 在煤富氧燃烧下的超临界 CO_2 再压缩循环的热力学分析[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(11): 100.
Feng X J, Wang S S. Thermodynamic analysis of the supercritical CO_2 recompression cycle in oxygen-enriched combustion of coal[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(11): 100.

［11］ 段元强, 方冬东, 吴柯, 等. 煤基直接加热式超临界二氧化碳动力循环系统建模及性能分析[J]. 动力工程学报, 2021, 41(11): 1001.
Duan Y Q, Fang D D, Wu K, et al. Modelling and performance analysis of a coal-based directly heated supercritical carbon dioxide power cycle system[J]. Journal of Power Engineering, 2021, 41(11): 1001.

［12］ Fu X, Xie S L, Li J, et al. Strain response based finite element model updating by using response surface method[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016, 52(34): 1087.

［13］ Myers R H, Montgomery D C, Vining G G, et al. Response surface methodology: a retrospective and literature survey[J]. Journal of Quality Technology, 2004, 36(1): 53.

［14］ Guo J Q, Li M J, He Y L, et al. A systematic review of supercritical carbon dioxide(S-CO_2) power cycle for energy industries: technologies, key issues, and potential prospects[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 258: 115437.

［15］ Tong Y J, Duan L Q, Pang L P. Off-design performance analysis of a new 300MW supercritical CO_2 coal-fired boiler[J]. Energy, 2021, 216(12): 306.

［16］ Mehrpooya M, Mousavi S, Asadnia M, et al. Conceptual design and evaluation of an innovative hydrogen purification process applying diffusion-absorption refrigeration cycle (exergoeconomic and exergy analyses)[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 316(12): 1282.

［17］ Wang D, Xie X Y, Wang C N, et al. Thermo-economic analysis on an improved coal-fired power system integrated with SCO_2 Brayton cycle[J]. Energy, 2021, 220: 119654.

［18］ Li H, Ju Y P, Zhang C H. Optimization of supercritical carbon dioxide recompression Brayton cycle considering anti-condensation design of centrifugal compressor[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 254: 115.

［19］ 佟勇婧. 超临界 CO_2 布雷顿循环发电系统设计优化与性能分析研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023: 15.
Tong Y J. Study on optimization design and performance analysis of supercritical CO_2 Brayton cycle power generation system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023: 15.

［20］ 张波. 塔式太阳能耦合 S-CO_2 循环富氧机组热力性能研究及参数优化[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2025: 25.
Zhang B. Thermodynamic performance study and parameter optimization of a solar tower-driven supercritical CO_2 Brayton cycle integrated with an oxy-fuel power generation unit[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2025: 25.

［21］ 贾威. 太阳能热辅助富氧燃烧 CFB 燃煤发电耦合系统优化[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022: 13.
Jia W. Optimization of solar thermal assisted oxy-fuel combustion CFB coal-fired power generation coupling system[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2022: 13.

［22］ 张智羽. 富氧燃煤机组多因素参数优化及与塔式太阳能耦合特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 20.
Zhang Z Y. Optimization of multi-factor parameters and coupling characteristics of oxy-fuel coal-fired units with tower solar energy[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020: 20.

［23］ Guo J Q, Li M J, Xu J L, et al. Energy, exergy and economic (3E) evaluation and conceptual design of the 1 000 MW coal-fired power plants integrated with S-CO_2 Brayton cycles[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 211: 112713.

［24］ Wang Y J, Xu J L, Liu Q B, et al. New combined supercritical carbon dioxide cycles for coal-fired power plants[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 50: 101656.

［25］ Mehrabi N, Soleimani M, Sharififard H, et al. Optimization of phosphate removal from drinking water with activated carbon using response surface methodology (RSM)[J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(33): 15613.

［26］ 张智羽, 张波, 秦龙, 等. 300 MW 超临界二氧化碳布雷顿循环富氧燃烧发电机组热力特性分析[J]. 热力发电, 2025, 54(10): 73.
Zhang Z Y, Zhang B, Qin L, et al. Study on thermodynamic performance of a 300 MW supercritical carbon dioxide Brayton cycle oxy-fuel generating unit[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(10): 73.

（责任编辑　李园）