DOI: 10.19666/j.rlfd.202510010

真空变温吸附捕碳耦合分流低温回热超临界二氧化碳热电联产系统㶲分析

周 彤[1,2]，郝铭星[3]，李丽锋[4]，郝艳红[5]
（1. 山西大学资源与环境工程研究所，山西 太原 030006；
2. 中煤华晋集团有限公司王家岭选煤厂，山西 运城 043300；
3. 山西河坡发电有限责任公司，山西 阳泉 045011；
4. 山西国际能源裕光煤电有限责任公司，山西 阳泉 045011；
5. 山西大学环境与资源学院，山西 太原 030006）

［摘 要］【目的】为实现“双碳”目标，燃煤热电联产系统需满足高效、灵活、减污降碳的要求。【方法】提出了一种耦合真空变温吸附捕碳的超低排放分流供热与低温回热超临界二氧化碳（S-CO_2）燃煤热电联产（SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA）系统，并以单乙醇胺捕碳的 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统为对照，进行了㶲性能对比分析。【结果】任一电负荷下，SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统的㶲效率均高于 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统，原因在于 VTSA 捕碳子模块的㶲损仅为 MEA 的不足 1/3，100%电负荷时，其㶲效率为 39.84%，高于对照系统的 35.16%；不同电负荷下，SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统可通过供热分流比 x_1 与驱动真空泵的 CO_2 涡轮机分流比 x_2 的匹配实现热电解耦，任一电负荷下随着分流比 x_1 与 x_2 的增大系统㶲效率均减小，x_1 与 x_2 的最佳值随着电负荷的减小而增大，100%电负荷时，x_1、x_2 的最佳分流比分别为 0.52 与 0.14；SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统的减碳量显著，与 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统相比，100%~30%电负荷下减碳量从 11.9 g/(kW·h)提高到 85.3 g/(kW·h)。【结论】SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统可作为高效低碳燃煤热电联产的可行解决方案，在实现“双碳”目标中发挥重要作用。

［关 键 词］S-CO_2 燃煤热电联产；高效灵活；减碳；SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统；㶲分析

［引用本文格式］周彤，郝铭星，李丽锋，等. 真空变温吸附捕碳耦合分流低温回热超临界二氧化碳热电联产系统㶲分析[J]. 热力发电, 2026, 55(6): 125-134. ZHOU Tong, HAO Mingxing, LI Lifeng, et al. Exergy analysis of a supercritical carbon dioxide cogeneration system with vacuum temperature swing adsorption for carbon capture coupling split-flow low-temperature heat recovery[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(6): 125-134.

Exergy analysis of a supercritical carbon dioxide cogeneration system with vacuum temperature swing adsorption for carbon capture coupling split-flow low-temperature heat recovery

ZHOU Tong[1,2], HAO Mingxing[3], LI Lifeng[4], HAO Yanhong[5]
(1. Institute of Resources and Environmental Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;
2. Wangjialing Coal Preparation Plant, China Coal Huajin Group Co., Ltd., Yuncheng 043300, China;
3. Shanxi Hepo Power Generation Co., Ltd., Yangquan 045011, China; 4. Shanxi International Energy Yuguang Coal Power Co., Ltd., Yangquan 045011, China;
5. School of Environmental & Resource Sciences of Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: [Objective] In the context of achieving the “dual-carbon” goals in the new era, coal-fired cogeneration systems are required to be highly efficient, flexible, and low in pollution and carbon emissions. [Methods] To tackle these challenges, this study proposes a novel system that integrates a supercritical CO_2 cycle with split-flow heating

收 稿 日 期：2025-10-10 修 回 日 期：2025-11-09 接 受 日 期：2025-11-18 网络首发日期：2026-01-06
基 金 项 目：山西省基础研究计划资助项目（202303021221077）
Supported by: Fundamental Research Program of Shanxi Province (202303021221077)
第一作者简介：周彤（2000），女，硕士，主要研究方向为超临界 CO_2 热电联产系统的评价优化，1290075632@qq.com。
通信作者简介：郝艳红（1973），女，博士，教授，主要研究方向为先进能源系统的评价优化，haoyanhong@sxu.edu.cn。

and low-temperature regeneration (SR-SCO_2-CHP), an ultra-low emission (ULE) flue gas control module, and a vacuum temperature swing adsorption (VTSA) carbon capture module (denoted as the SR-SCO_2-CHP-ULE-VTSA system). A system using monoethanolamine (MEA) for carbon capture (SR-SCO_2-CHP-ULE-MEA) serves as the benchmark for comparison. A comparative exergy analysis is conducted. [Results] The results demonstrate that the proposed system achieves superior exergy efficiency across all electrical loads, because the exergy loss of the VTSA carbon capture submodule is less than one-third of that of the MEA. The exergy losses of MEA mainly occur in the absorption tower and desorption tower, which account for 80% of the total exergy losses of the carbon capture submodule. However, the exergy losses of VTSA adsorption & desorption tower and the pressure machine are relatively large, accounting for more than 60% of the total exergy losses of the carbon capture submodule. At full load, its exergy efficiency reaches 39.84%, significantly outperforming the benchmark system's 35.16%. Furthermore, the proposed system enables effective thermo-electric decoupling through adjustments in the heat split ratio (x_1) and the split ratio of CO_2 turbine driving vacuum pump (x_2). The exergy efficiency of the system decreases as the split ratio x_1 and x_2 increase under any electrical load, and the optimal split ratios of x_1 and x_2 increase as the electrical load decreases. At 100% electrical load, the optimal values for x_1 and x_2 are 0.52 and 0.14, respectively. The carbon reduction capability of the proposed system is also remarkable. Across the electrical load range from 100% to 30%, the carbon reduction increases from 11.9 g/(kW·h) to as high as 85.3 g/(kW·h), demonstrating a significant advantage over the benchmark system. [Conclusion] This work confirms the SR-SCO_2-CHP-ULE-VTSA system as a promising solution for highly efficient and low-carbon coal-fired cogeneration. It should be noted that in terms of economic performance, the initial investment of the carbon capture module of the SR-SCO_2-CHP-ULE-VTSA system is closely related to the performance of the adsorbent material, and further optimization of the adsorbent is required to reduce equipment size and cost. Additionally, in terms of operation, its carbon capture module has a complex structure and high requirements for multi-tower operation switching, so its technical maturity needs to be further improved to promote its industrial application.

Key words: S-CO_2 coal-fired cogeneration; high efficiency and flexibility; carbon reduction; SR-SCO_2-CHP-ULE-VTSA system; exergy analysis

我国是世界最大的煤炭生产及消费国，近年来60%的煤炭用于燃煤发电，截至2024年底全国火电装机容量占比43.14%[1]，燃煤发电在一段时期内仍占据我国发电行业的主导地位。2021年，国家发展改革委、国家能源局发布的《关于开展全国煤电机组改造升级的通知》中提出了“三改联动”[2]，其中供热改造体现了热电联产的节能环保等优势[3]。但该系统存在“以热定电”的问题，不满足“双碳”目标下不稳定的可再生能源装机大量并网带来的煤电机组需具备热电解耦及灵活运行能力的要求。

传统燃煤电厂采用蒸汽朗肯循环，受高温耐热材料等因素制约[4]，进一步提升循环效率面临极大困难。超临界二氧化碳（S-CO_2）动力循环以处于超临界状态的CO_2作为循环工质，其在550 ℃以上的循环效率高于蒸汽循环效率[5]，并且具有灵活、紧凑、低成本等优势[6]。众多研究者从多角度探索了S-CO_2循环布局，其中一次再热分流再压缩构型因具有高效率[7]等优点成为首选。Sun 等人[8]比较了有、无预冷器的S-CO_2燃煤热电联产系统，提出了由再压缩−间冷、高压抽汽加热和再热集成的高效系统构型，其能量效率和㶲效率分别达到73.9%和40.8%；Chen 等人[9]基于再压缩、回热布局将S-CO_2循环用于燃煤热电联产系统，以㶲效率最大为目标优化设计参数，优化后系统㶲效率达到46.24%。研究证明将S-CO_2循环用于燃煤热电联产系统具有良好的应用前景[10]。

燃煤电厂是最大的CO_2集中排放源[11]，因而S-CO_2燃煤热电联产系统在满足烟气污染物超低排放要求[12]的同时，也应满足大规模降碳要求。燃烧后碳捕集技术是一种高效碳减排方法，主要包括吸收法和吸附法[13]。当前，吸收法以工业示范最广的单乙醇胺为代表，捕集率在90%以上[14]，存在解吸能耗（3.5~4.5 MJ/(kg CO_2)[15]）较高、溶剂有腐蚀性会对设备造成损耗的问题[16]，而吸附法具有流程简单、吸附再生程度高的优势[17]，根据吸附剂再生驱动力的不同[18]主要分为变压吸附和变温吸附两大类。两类吸附工艺均存在一定缺陷：变压吸附技术吸附容量低、所需吸附剂量大；变温吸附技术循环周期较长，能耗偏高。将变压与变温耦合的吸附方法具有吸附剂再生条件温和、吸附床再生程度高、能耗低的优点[19]。江南、王璐等[20-22]研究了变压吸附与变温吸附结合形成的真空变温吸附工艺。江南等[20-21]以沸石13X为吸附剂，发现其捕集率高且能耗低；王璐等[22]对采用沸石13X-APG的变压吸附、变温吸附和真空变温吸附捕碳工艺进行了对比，结果表明真空变温吸附工艺CO_2捕集率为93.6%，与变压吸附、变温吸附相比，真空变温吸附工艺的再生条件更温和，同时能耗显著降低。由此可见，真

空变温吸附技术用于捕碳性能优良。

基于以上分析，本文针对 S-CO_2 燃煤热电联产系统存在的热电解耦困难以及动力循环与捕碳子模块的系统集成问题，以团队前期提出的一种分流供热与低温回热 S-CO_2 燃煤热电联产（SR-SCO$_2$-CHP）系统[23]为循环子系统，与超低排放（ultra-low emission，ULE）和真空变温吸附（vacuum temperature swing adsorption，VTSA）捕碳耦合，集成带真空变温吸附捕碳的超低排放分流供热与低温回热 S-CO_2 燃煤热电联产（SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA）系统，并以带单乙醇胺捕碳的超低排放分流供热与低温回热 S-CO_2 燃煤热电联产（SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA）系统为对照，进行㶲性能的对比分析，以期对捕碳超低排放 S-CO_2 燃煤热电联产技术的发展提供参考。

1 系统描述

1.1 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统

SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统包含 SR-SCO$_2$-CHP 子系统和烟气污染控制子系统，其中：SR-SCO$_2$-CHP 子系统又包含锅炉子模块和 S-CO_2 循环子模块两部分；烟气污染控制子系统由选择性催化还原（selective catalytic reduction，SCR）脱硝装置、静电除尘（electrostatic precipitator，ESP）装置和石灰石−石膏湿法脱硫（wet flue gas desulfurization，WFGD）装置组成的超低排放子模块与 VTSA 捕碳子模块构成，如图 1 所示。该热电联产系统的供热体现在流股 6-1 流入热网加热器，对热网回水进行加热，定义流股 6-1 流量与流股 6 流量之比为供热分流比，记作 x_1。

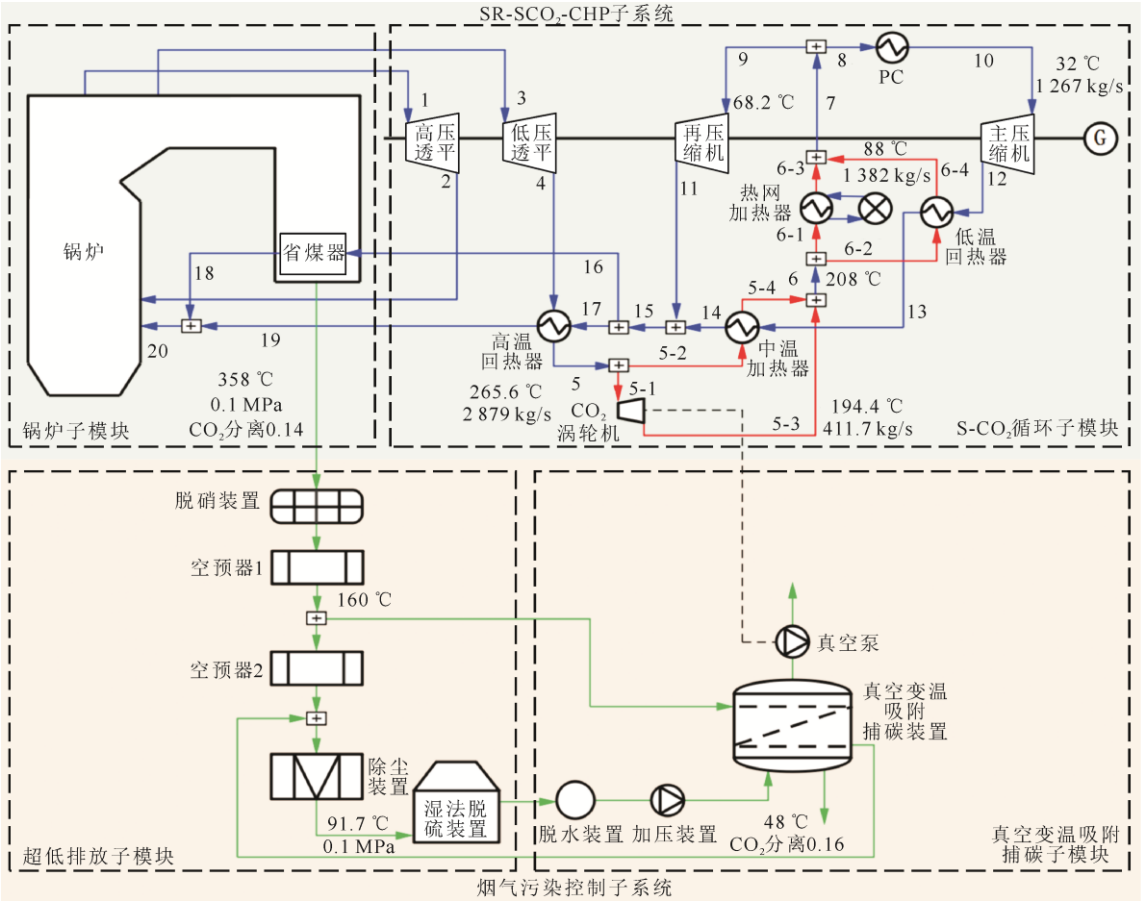


图 1 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统流程

Fig.1 Flowchart of the SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA system

SR-SCO$_2$-CHP 子系统流程如下。吸收锅炉各受热面热量后，S-CO_2 流入高压透平膨胀做功，之后返回锅炉再热，再热后流入低压透平膨胀做功，驱动发电机发电。低压透平出口的 S-CO_2 流经高温回热器，出口 S-CO_2 分流：流股 5-1 流入 CO_2 涡轮机做功驱动真空泵，定义流股 5-1 流量与流股 5 流量之比为 CO_2 涡轮机分流比，记作 x_2；流股 5-2 流入中温回热器加热冷侧 S-CO_2。随后流股 5-1 和 5-2 混合再分流：流股 6-1 流入热网加热器，加热热网回水；流股 6-2 流入低温回热器，加热主压缩机出口

工质。放热后的两部分 S-CO_2 混合，然后再分流：流股 8 通过预冷器放热经主压缩机加压，之后 S-CO_2 依次流入低温回热器和中温回热器吸收热量；流股 9 直接流入再压缩机进行压缩处理。再压缩机出口与中温回热器冷侧出口 S-CO_2 混合后再分流：流股 17 流入高温回热器吸热；流股 16 流入锅炉尾部省煤器中吸收烟气余热。之后两者混合为流股 20 再次通过锅炉各受热面，完成整个热力循环过程。

烟气污染控制子系统流程为：烟气经过 SCR 装置进行脱硝处理后进入第一空气预热器（空预器），降温后分流，一路烟气进入真空变温吸附捕碳子模块中升温解吸 CO_2，另一路烟气进入第二空预器预热空气；两股烟气汇合后，再依次进入静电除尘器除尘、湿法脱硫装置脱硫、脱水装置以及加压装置，最后进入真空变温吸附捕碳子模块进行碳捕集。真空变温吸附捕碳子模块依次进行如下 6 个步骤：

1）*加压*　吸附压力为 200 kPa；

2）*吸附*　N_2/CO_2 混合物进入吸附塔，CO_2 被吸附剂 13X 沸石分子筛吸附；

3）*升温*　来自 APH1 出口的烟气加热吸附塔至 80~140 ℃；

4）*抽真空*　CO_2 涡轮机 PGT 膨胀做功驱动真空泵 VP 抽真空至解吸压力 10 kPa；

5）*吹扫*　N_2 逆流吹扫吸附塔；

6）*冷却*　冷却至吸附温度，开始新的循环。

采用 Aspen Adsorption 软件对真空变温吸附捕碳子模块进行仿真模拟，相关参数如表 1 所示。设置吸附剂为 13X 沸石分子筛，其捕集率为 90%。CO_2 涡轮机使用 Compr 模块，真空变温吸附捕碳装置物流参数采用 User2 用户模型将其输入 Aspen Plus 模拟流程中，物性方法选择 PR-BM 计算模型。

表 1 真空变温吸附捕碳子模块相关参数
Tab.1 Parameters of the VTSA carbon capture submodule

参数	取值	参数	取值
吸附剂装填高度 H_b/m	30.0	吸附剂堆积密度/(kg·m^{-3})	756.0
床层壁厚 W_t/m	1.0	CO_2 传质系数/s^{-1}	0.1
吸附塔内径 D_b/m	20.0	N_2 传质系数/s^{-1}	0.5

1.2 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统

将耦合单乙醇胺捕碳子模块形成的 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统作为对照，如图 2 所示。该系统与 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统的不同之处在于，集成后 S-CO_2 循环子模块流程为：高温回热器出口 S-CO_2 分流，流股 5-1 流入单乙醇胺捕碳子模块解吸塔再沸器作为解吸热源；烟气污染控制子系统流程中烟气顺次流经一系列超低排放处理装置后，由脱水装置进行脱水处理后进入单乙醇胺捕碳子模块进行 CO_2 捕集。两系统关键参数标识于图 1、图 2 中。

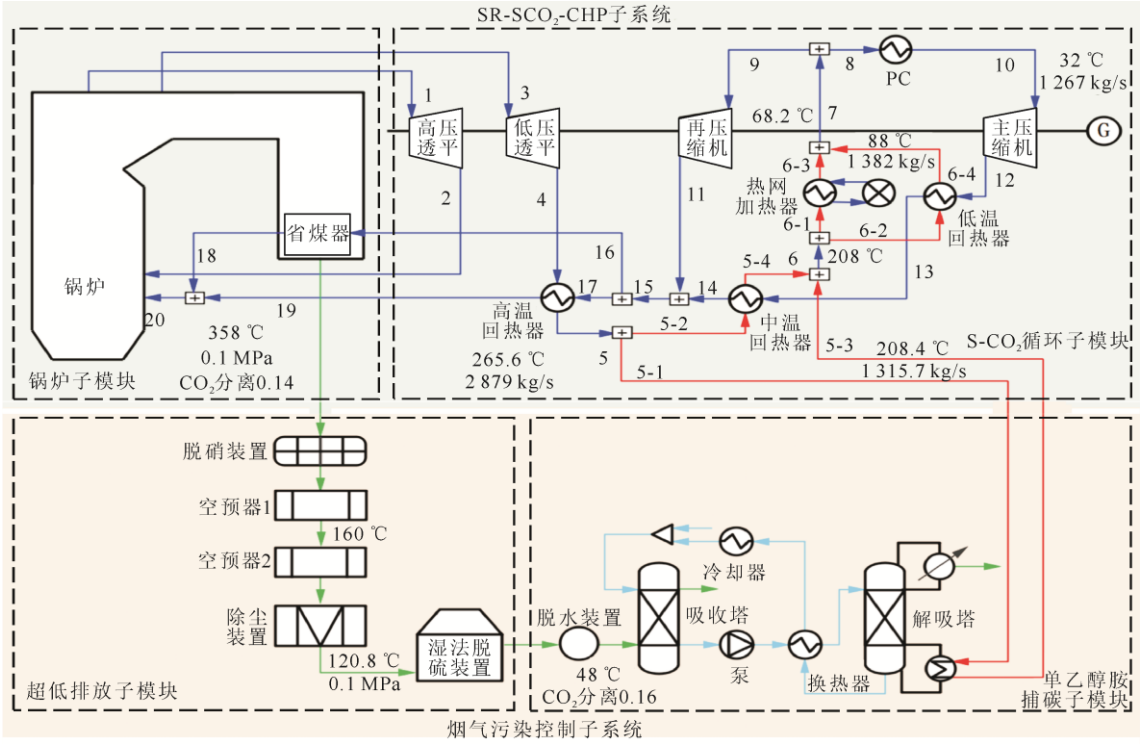


图 2 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统流程
Fig.2 Flowchart of the SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA system

2 数学模型

2.1 㶲分析数学模型

本研究参考环境参数为 25 ℃和 0.1 MPa。㶲分析过程中，所计算的㶲值由物理㶲E_{xph}和化学㶲E_{xch}组成，具体计算方法参考文献[24]。

煤的化学㶲表达式为：

$$e_{\mathrm{coal}}=\Delta H_{\mu,\mathrm{l}}\cdot\left(\begin{array}{l}1.006\ 4+0.151\ 9\times\dfrac{w(H)}{w(C)}+\\ 0.061\ 6\times\dfrac{w(O)}{w(C)}+0.042\ 9\times\dfrac{w(N)}{w(C)}\end{array}\right)\tag{1}$$

式中：$\Delta H_{\mu,\mathrm{l}}$为原煤低位发热量，kJ/kg；$w$(C)、$w$(H)、$w$(O)、$w$(N)分别为煤种收到基 C、H、O、N 元素的质量分数，%。

热电联产系统㶲效率表达式为：

$$\eta_{\mathrm{ex}}=\frac{3\ 600\cdot\left(W_{\mathrm{g}}+Q_{\mathrm{h}}\cdot\left(1-\dfrac{T_0}{\overline{T}}\right)\right)}{1\ 000\cdot B\cdot e_{\mathrm{coal}}}\tag{2}$$

式中：W_{g}为供电负荷，kW；Q_{h}为供热负荷，kJ/s；T_0为环境温度，K；$\overline{T}$为平均供热温度，K；B为煤耗量，t/h；e_{coal}为煤的化学㶲，kJ/kg。

设备㶲损的表达式为：

$$E_{k,\mathrm{loss}}=E_{\mathrm{in},k}-E_{\mathrm{out},k}+E_{\mathrm{Q},k}-E_{\mathrm{W},k}\tag{3}$$

式中：$E_{\mathrm{in},k}$、$E_{\mathrm{out},k}$分别为设备 k 入口、出口工质的㶲值，MW；$E_{\mathrm{Q},k}$为设备 k 输入的热流㶲，MW；$E_{\mathrm{W},k}$为设备 k 输出的功流㶲，MW。

其中，透平与压缩机㶲损的表达式为：

$$E_{\mathrm{TC,loss}}=E_{\mathrm{in,TC}}-E_{\mathrm{out,TC}}-W_{\mathrm{TC}}\tag{4}$$

式中：$E_{\mathrm{in,TC}}$、$E_{\mathrm{out,TC}}$分别为膨胀机/压缩机入口、出口工质的㶲值，MW；W_{TC}为膨胀机/压缩机的功流㶲，MW，输出为+，输入为–，其数值上等于做功量。

换热器㶲损的表达式为：

$$E_{\mathrm{RC,loss}}=(E_{\mathrm{in,h}}+E_{\mathrm{in,c}})-(E_{\mathrm{out,h}}+E_{\mathrm{out,c}})\tag{5}$$

式中：下标 h 和 c 表示回热器热端和冷端流体。

烟气污染控制子系统㶲损的表达式为：

$$E_{\mathrm{FGC,loss}}=E_{\mathrm{in,FGC}}-E_{\mathrm{out,FGC}}-W_{\mathrm{FGC}}+Q_{\mathrm{FGC}}\left(1-\frac{T_0}{T}\right)\tag{6}$$

2.2 分流比优化数学模型

以㶲效率为优化目标，建立优化模型为：

$$\max\eta_{\mathrm{ex}}=f(x_1,x_2,W_{\mathrm{g}},Q_{\mathrm{h}})\tag{7}$$

约束条件：

$$\begin{cases}0<x_1<1\\ 0.14<x_2<0.37\\ Q_{\mathrm{h}}=300\ \mathrm{MW}\end{cases}\tag{8}$$

式(8)中x_2取值范围根据供热负荷保证 300 MW 来确定。优化时所调节的参数为分流比 x_1 和 x_2，利用 Aspen Plus 软件中的敏感性分析工具进行计算，获得最佳分流比取值。

3 结果分析与讨论

3.1 基础数据

采用山西某热电厂设计煤种，煤质分析如表 2 所示。采用 Aspen Plus 软件进行系统变工况仿真模拟。系统设计工况下的热力参数见表 3[25-26]，保证供热负荷为 300 MW 不变，设计工况即 100%电负荷下系统净功（指透平总做功减去压缩机总耗功的值）为 350 MW。

表 2 煤质分析
Tab.2 Proximate analysis for the used coal

参数	取值	参数	取值
w_{ar}(M)/%	8.88	w_{ar}(V)/%	10.06
w_{ar}(A)/%	38.05	w_{ar}(FC)/%	43.01
w_{ar}(O)/%	3.32	w_{ar}(C)/%	44.69
w_{ar}(N)/%	0.67	w_{ar}(H)/%	2.38
w_{ar}(S)/%	2.01	低位发热量 $Q_{\mathrm{ar,net}}$/(kJ·kg^{-1})	17 190

表 3 机组设计工况下的热力参数
Tab.3 Thermal parameters of the unit under design conditions

参数	数值	参数	数值
高压透平入口温度/℃	600	预冷器出口温度/℃	32
高压透平入口压力/MPa	30.0	预冷器出口压力/MPa	7.6
低压透平入口温度/℃	620	再压缩分流比	0.66
低压透平入口压力/MPa	15.1	省煤器分流比	0.09
主压缩机入口温度/℃	32	换热器最小换热温差/℃	5
主压缩机入口压力/MPa	7.6	透平等熵效率/%	93
再压缩机入口温度/℃	68	压缩机等熵效率/%	89
再压缩机入口压力/MPa	7.65	透平与压缩机机械效率/%	99

由于缺乏同等负荷下变工况文献数据，本文保持高低压透平入口温度、再压缩机入口压力不变，高低压透平入口压力、再压缩机入口温度与工质质量流量等参数参考文献[27]进行模拟调整，得到不同电负荷下的热力参数，见表 4。

表 4 不同电负荷下机组的热力参数
Tab.4 Thermal parameters of the unit under different electrical loads

电负荷	总工质流量/(kg s^{-1})	高压透平入口温度/℃	高压透平入口压力/MPa	低压透平入口温度/℃	低压透平入口压力/MPa	再压缩机入口温度/℃	再压缩机入口压力/MPa	供热分流比 x_1
100%	2 879	600	30.00	620	15.10	68	7.65	0.52
75%	2 374	600	26.40	620	13.10	64	7.65	0.63
50%	1 761	600	21.40	620	11.80	57	7.65	0.85
30%	1 515	600	15.20	620	11.45	53	7.65	0.99

3.2 系统模型验证

由于 S-CO_2 燃煤热电联产系统尚未实现工业化应用，所以获取其实际运行参数不可行。为了验证所搭建的系统模拟流程是否准确，选取文献[25]中 S-CO_2 再热再压缩燃煤发电系统的循环参数进行仿真模拟，结果显示，模拟系统的循环效率为 49.96%，与文献报道的 50.82%相比，误差为 1.69%。锅炉（Boiler）换热量、预冷器（PC）放热量、主压缩机（MC）耗功等各部件能量参数的模拟结果与文献数据对比如图 3 所示，可见误差均在 2%以内，从而证实了所构建模型的可靠性。

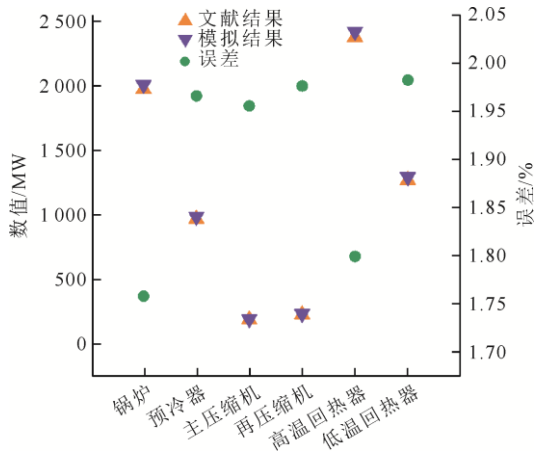


图 3 模拟结果与文献[25]数据对比
Fig.3 Comparison between the simulation results and the data from literature [25]

3.3 系统㶲分析

3.3.1 SR-SCO_2-CHP-VTSA 系统㶲分析

图 4 为 SR-SCO_2-CHP-ULE、SR-SCO_2-CHP-ULE-VTSA、SR-SCO_2-CHP-ULE-MEA 三类系统在变电负荷条件下的锅炉、S-CO_2 循环、烟气污染控制各子模块/系统与整体系统㶲效率。由图 4 可见：带捕碳的两类系统 SR-SCO_2-CHP-ULE-VTSA 与 SR-SCO_2-CHP-ULE-MEA 在变电负荷条件下的系统㶲效率均小于 SR-SCO_2-CHP-ULE 系统；在 100%电负荷时，三类系统的㶲效率分别为 43.70%、39.84%、35.16%；相比于 SR-SCO_2-CHP-ULE 系统，SR-SCO_2-CHP-ULE-VTSA 系统㶲效率仅降低了 3.86 百分点，而 SR-SCO_2-CHP-ULE-MEA 系统㶲效率则降低了 8.54 百分点。SR-SCO_2-CHP-ULE-VTSA 系统㶲效率高于 SR-SCO_2-CHP-ULE-MEA 系统的原因在于，尽管其 S-CO_2 循环子模块的效率偏低，但其锅炉子模块与烟气污染控制子系统的效率均高于对照系统。SR-SCO_2-CHP-ULE-VTSA 系统 S-CO_2 循环子模块效率偏低的原因为 S-CO_2 循环子模块与捕碳子模块集成中进入 VTSA 捕碳模块驱动真空泵的 CO_2 涡轮 PGT 的工质流量远低于进入 MEA 捕碳模块中解吸塔再沸器的工质流量，使得相同电热输出下，SR-SCO_2-CHP-ULE-VTSA 系统 S-CO_2 循环子模块的热耗偏大。锅炉与烟气污染控制子模块的㶲效率均为 SR-SCO_2-CHP-ULE 系统最高，SR-SCO_2-CHP-ULE-VTSA 系统次之，SR-SCO_2-CHP-ULE-MEA 系统最低，增设捕碳模块后烟气污染控制子系统的㶲效率下降明显。对于 S-CO_2 循环子模块，电负荷低于 50%时，SR-SCO_2-CHP-ULE-MEA 系统的 S-CO_2 循环子模块效率下降缓慢，高于 SR-SCO_2-CHP-ULE 系统。

为分析三类子模块㶲效率结果产生的原因，图 5 给出了锅炉、S-CO_2 循环、烟气污染控制各子模块/系统的㶲损。由图 5 可见，任一电负荷下均为 SR-SCO_2-CHP-ULE 系统的总㶲损最小，SR-SCO_2-CHP-ULE-MEA 系统的总㶲损最大。在 100%电负荷时，SR-SCO_2-CHP-ULE、SR-SCO_2-CHP-ULE-MEA 和 SR-SCO_2-CHP-ULE-VTSA 三类系统的总㶲损分别为 493.42、663.72、548.79 MW，且三类系统中均为锅炉子模块的㶲损最大，占比最高。烟气污染控制子系统的㶲损占比在三类系统中分别为 1%~2%、16%~20%和 7%~9%，可见增设捕碳模块 MEA 和 VTSA 对系统能耗均有影响，且 VTSA 产生的㶲损占比小于 MEA。

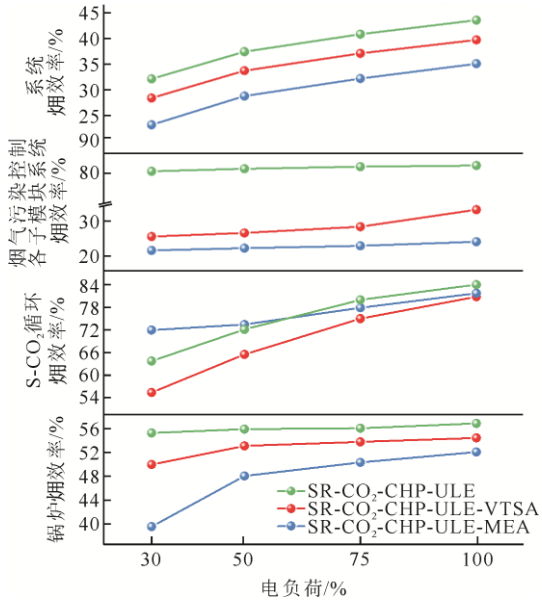


图 4 锅炉、S-CO_2 循环、烟气污染控制各子模块/系统与系统㶲效率

Fig.4 Exergy efficiencies of the boiler, S-CO_2 cycle, flue gas pollution control submodules/subsystem and the integrated system

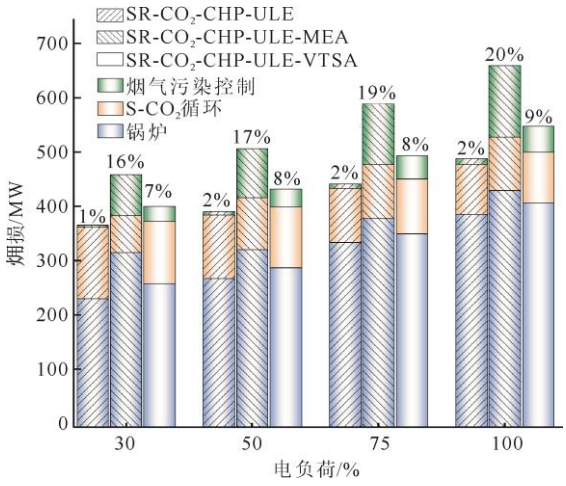


图 5 锅炉、S-CO_2 循环、烟气污染控制各子模块/系统㶲损

Fig.5 Exergy loss in the boiler, S-CO_2 cycle and flue gas pollution control submodules/subsystem

为分析 50%电负荷及以下，SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统中 S-CO_2 循环子模块㶲效率高于 SR-SCO$_2$-CHP-ULE 系统的原因，图 6 给出了三类系统中 S-CO_2 循环子模块各部件㶲损。由图 6 可见，50%及以下电负荷时，SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统高温和中温回热器㶲损明显小于 SR-SCO$_2$-CHP-ULE 系统，带来循环子模块总㶲损较小，如 30%电负荷时 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统 S-CO_2 循环子模块总㶲损比无捕碳 SR-SCO$_2$-CHP-ULE 系统小 63 MW。

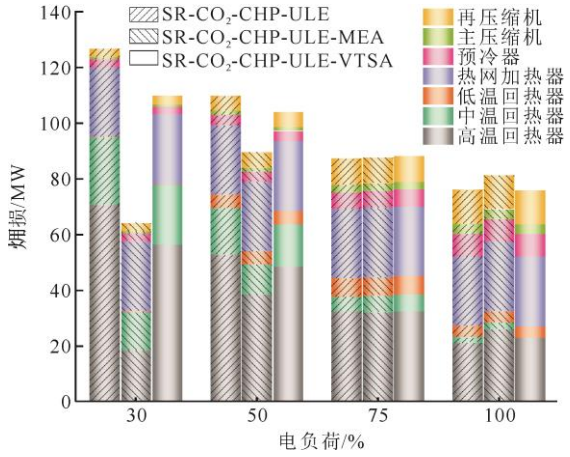


图 6 S-CO_2 循环子模块各部件㶲损

Fig.6 Exergy loss in the components of S-CO_2 cycle submodule

为了重点对两类捕碳子模块进行比较，图 7 给出了 VTSA 和 MEA 捕碳子模块各部件的㶲损。由图 7 可见：任一电负荷下 VTSA 子模块的㶲损仅为 MEA 子模块的不足 1/3；MEA㶲损主要发生在吸收塔和解吸塔中，这两部分㶲损占捕碳子模块总㶲损的 80%，其中解吸塔的㶲损主要是由再沸器热交换产生；VTSA 吸附/解吸塔、加压机中的㶲损较大，两者占捕碳子模块总㶲损的 60%以上。需要说明的是，本文 VTSA 捕碳子模块在满足碳捕集率为 90%的条件下，由于采用了部分分流烟气作为其升温解吸的热源，其单位 CO_2 解吸能耗仅为 0.48 MJ/kg，显著低于目前研究中报道的 3.71 MJ/kg[28]。

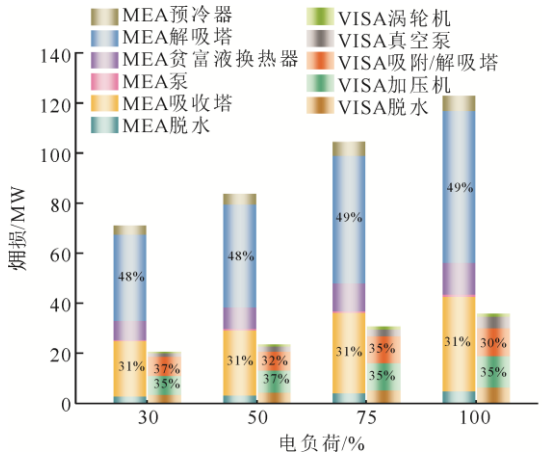


图 7 VTSA 和 MEA 捕碳子模块㶲损

Fig.7 Exergy loss in the VTSA and MEA carbon capture submodules

3.3.2 敏感性分析

对 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统中分流比 x_1 与 x_2 进行㶲效率的影响分析，结果如图 8 所示。由

图 8 可见，任一电负荷下，随着分流比增大系统㶲效率均减小。在 100%电负荷条件下，x_2 增大时 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统的㶲效率降低了 0.51%。这是因为在额定热负荷与同一电负荷下烟气量一定，捕碳子模块所需能耗一定，系统中 CO$_2$ 涡轮机做功一定，x_2 增大意味着 CO$_2$ 涡轮机出口工质温度升高，焓值增加，因而预冷器入口温度升高，换热温差增大，㶲损增加，致使 S-CO$_2$ 循环子模块㶲效率减小，系统总㶲效率随之降低。

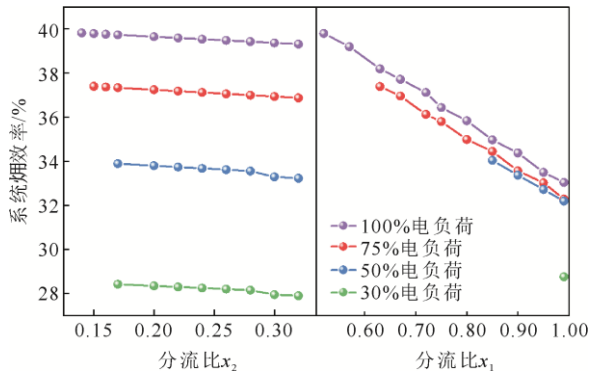


图 8 分流比 x_1 与 x_2 对系统㶲效率的影响
Fig.8 Effects of split ratio x_1 and x_2 on exergy efficiency of the integrated system

由图 8 还可见，100%、75%、50%与 30%电负荷条件下，x_1 与 x_2 的最佳值分别为 0.52 与 0.14、0.63 与 0.15、0.85 与 0.16、0.99 与 0.17。当电负荷从 100%降到 30%时，x_1 从 0.52 升高到 0.99，这是因为电负荷降低 S-CO$_2$ 工质总流量减小，为保证供热负荷，分流进入热网加热器的工质比例需增大。x_2 最佳值随着电负荷的减小而增大，这是因为保证供热负荷一定的情况下，随着电负荷的减小，烟气量减小，捕碳子模块所需能耗降低，因而驱动捕碳装置 CO$_2$ 涡轮机的 S-CO$_2$ 流量也减小，系统总的 S-CO$_2$ 流量随着电负荷的减小也减小，但烟气量减小的幅度为 41.68%，小于系统总的 S-CO$_2$ 流量减小幅度 47.38%，因此最佳分流比增大。

3.3.3 减碳性能分析

不同电负荷下 SR-SCO$_2$-CHP-ULE、SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA、SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统的 CO$_2$ 排放量如表 5 所示。由表 5 可见，增设捕碳子模块后 CO$_2$ 排放量显著减少，其中，100%电负荷下 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统的 CO$_2$ 排放量减少了 753.5 g/(kW ħ)。任一电负荷下，SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统的 CO$_2$ 排放量最低，与 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统相比，100%电负荷下减碳量为 11.9 g/(kW ħ)，30%电负荷下减碳量高达 85.3 g/(kW ħ)。随着电负荷降低，SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统相较于 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统减碳量增加是因为两类系统㶲效率随着负荷减小差值增大，100%负荷下，SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统㶲效率比 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统高 4.68 百分点，30%负荷下则高出 5.25 百分点。

表 5 不同电负荷下的 CO$_2$ 排放量
Tab.5 CO$_2$ emissions under different electrical loads

电负荷	CO$_2$ 排放量/(g (kW ħ)$^{-1}$)				
	A 系统	B 系统	C 系统	A-B	A-C
100%	68.9	80.8	822.4	–11.9	–753.5
75%	79.2	96.4	979.2	–17.2	–900.0
50%	98.2	126.6	1 284.9	–28.4	–1 186.7
30%	151.9	237.2	2 402.3	–85.3	–2 250.4

注：A 系统为 SR-S-CO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统；B 系统为 SR-S-CO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统；C 系统为 SR-S-CO$_2$-CHP-ULE 系统；A-B、A-C 分别表示 A 系统与 B 系统、A 系统与 C 系统 CO$_2$ 排放量的差值。

4 结论与展望

为实现燃煤热电联产系统高效、灵活、减污降碳的需求，本文提出了一种 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统，并以 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统为对照进行了㶲分析，得出如下结论。

1）任一电负荷下，SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统的㶲效率均高于 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统。100%电负荷时，SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统的㶲效率为 39.84%，高于对照系统的 35.16%，原因在于任一电负荷下 VTSA 捕碳子模块的㶲损仅为 MEA 的不足 1/3。MEA㶲损主要发生在吸收塔和解吸塔中，这两部分㶲损占捕碳子模块总㶲损的 80%；VTSA 吸附/解吸塔、加压机中的㶲损较大，两者占捕碳子模块总㶲损的 60%以上。

2）SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统可通过供热分流比 x_1 与 CO$_2$ 涡轮机分流比 x_2 的匹配实现热电解耦。任一电负荷下，随着分流比 x_1 与 x_2 的增大，系统㶲效率减小。x_1、x_2 的最佳值随着电负荷的减小而增大，100%、75%、50%与 30%电负荷条件下，其值分别为 0.52 与 0.14、0.63 与 0.15、0.85 与 0.16、0.99 与 0.17。

3）SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统的减碳量显著，与 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统相比，100%电负荷下减碳量为 11.9 g/(kW ħ)，30%电负荷下高达 85.3 g/(kW ħ)。

4）尽管 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-VTSA 系统的能源利用、减碳性能均优于 SR-SCO$_2$-CHP-ULE-MEA 系统，但是：在经济性能方面，其捕碳模块初投资与吸附材料的性能密切相关，有待通过进一步优化吸附剂降低设备尺寸与成本[29]；在运行方面，其捕碳采用变温变压相结合，且与 S-CO$_2$ 循环相集成，系统灵活性很高，但捕碳模块结构复杂、多塔运行切换要求高，因此需进一步提高其技术成熟度，以推动工业化应用。

[参 考 文 献]

[1] 周倜然, 衣韵潼. 预计全社会用电量超 10 万亿千瓦时[N]. 中国电力报, 2025-02-13(002).
ZHOU Qiran, YI Yuntong. It is estimated that the electricity consumption of the whole society will exceed 10 trillion kWh[N]. China Electric Power News, 2025-02-13(002).

[2] 刘志强, 叶春, 张源, 等. 煤电“三改联动”实施分析与措施建议[J]. 热力发电, 2023, 52(5): 154-159.
LIU Zhiqiang, YE Chun, ZHANG Yuan, et al. Analysis and suggestions on the implementation of “three-renovation” of coal-fired power[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(5): 154-159.

[3] 戈志华, 孙诗梦, 万燕, 等. 大型汽轮机组高背压供热改造适用性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3216-3222.
GE Zhihua, SUN Shimeng, WAN Yan, et al. Applicability analysis of high back-pressure heating retrofit for large-scale steam turbine unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3216-3222.

[4] 刘入维, 肖平, 钟犁, 等. 700 ℃超超临界燃煤发电技术研究现状[J]. 热力发电, 2017, 46(9): 1-7.
LIU Ruwei, XIAO Ping, ZHONG Li, et al. Research progress of advanced 700 ℃ ultra-supercritical coal-fired power generation technology[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(9): 1-7.

[5] 纪宇轩, 邢凯翔, 岑可法, 等. 超临界二氧化碳布雷顿循环研究进展[J]. 动力工程学报, 2022, 42(1): 1-9.
JI Yuxuan, XING Kaixiang, CEN Kefa, et al. A review on supercritical carbon dioxide Brayton cycle[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(1): 1-9.

[6] QI J G, JIA M L, LING Y H, 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.

[7] ZHANG Y, LI H, HAN W, et al. Improved design of supercritical CO$_2$ Brayton cycle for coal-fired power plant[J]. Energy, 2018, 155: 1-14.

[8] SUN R Q, LIU M, CHEN X, et al. Thermodynamic optimization on supercritical carbon dioxide Brayton cycles to achieve combined heat and power generation[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 251: 114929.

[9] CHEN D X, HAN Z H, HAN X, et al. Design, operation, and case analyses of a novel thermodynamic system combining coal-fired cogeneration and decoupled Carnot battery using CO$_2$ as working fluid[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 296: 117680.

[10] LI H, JIN Z, YANG Y, et al. Preliminary conceptual design and performance assessment of combined heat and power systems based on the supercritical carbon dioxide power plant[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 199: 111939.

[11] 米剑锋, 马晓芳. 中国 CCUS 技术发展趋势分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2537-2544.
MI Jianfeng, MA Xiaofang. Development trend analysis of carbon capture, utilization and storage technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2537-2544.

[12] 朱法华, 许月阳, 孙尊强, 等. 中国燃煤电厂超低排放和节能改造的实践与启示[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 1-8.
ZHU Fahua, XU Yueyang, SUN Zunqiang, et al. Practice and enlightenment of ultra-low emission and energy-saving retrofit of coal-fired power plants in China[J]. Electric Power, 2021, 54(4): 1-8.

[13] 梁辉, 刘振, 王璐, 等. 13X-APG 沸石真空变压变温耦合工艺吸附捕集烟道气中 CO$_2$[J]. 过程工程学报, 2010, 10(2): 249-255.
LIANG Hui, LIU Zhen, WANG Lu, et al. Capture of CO$_2$ from flue gases by a combined process of vacuum and temperature swing adsorption using 13X-APG zeolite[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(2): 249-255.

[14] VITORIANO A A J, RAFAEL C, FRANÇOIS M, et al. Exergy and economic analysis of the trade-off for design of post-combustion CO$_2$ capture plant by chemical absorption with MEA[J]. Energy, 2023, 280: 128004.

[15] 焦文婷, 程伟良. 耦合碳捕集的水泥窑闪蒸式余热发电系统热力学分析[J]. 动力工程学报, 2023, 43(8): 1077-1084.
JIAO Wenting, CHENG Weiliang. Thermodynamic analysis on flash-type waste heat power generation system coupled with carbon capture unit in cement kilns[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(8): 1077-1084.

[16] 徐燕洁, 张威, 葛春亮, 等. 烷醇胺类两相吸收剂降解性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1347-1355.
XU Yanjie, ZHANG Wei, GE Chunliang, et al. Degradation performance of alkanolamine based biphasic solvent[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1347-1355.

[17] 陈旭, 杜涛, 李刚, 等. 吸附工艺在碳捕集中的应用现状[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(增刊 1): 155-163.
CHEN Xu, DU Tao, LI Gang, et al. Application of adsorption technology on carbon capture[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(Suppl.1): 155-163.

[18] 刘双, 宋学行, 尚丽, 等. 基于 AHP-TOPSIS 法的碳捕集技术方案综合评估[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(1): 1-14.
LIU Shuang, SONG Xuexing, SHANG Li, et al. Based on AHP-TOPSIS method for the comprehensive assessment of development path of carbon capture technology[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(1): 1-14.

[19] SU F, LU C. CO$_2$ capture from gas stream by zeolite 13X using a dual-column temperature/vacuum swing adsorption[J]. Energy & Environmental Science: EES, 2012, 5(10): 9021-9027.

[20] JIANG N, SHEN Y, LIU B, et al. CO$_2$ capture from dry flue gas by means of VPSA, TSA and TVSA[J]. Journal of CO$_2$ Utilization, 2020, 35(C): 153-168.

[21] 江南, 刘冰, 唐忠利, 等. 真空变温吸附捕集干烟道气中 CO_2 的模拟研究[J]. 化工学报, 2019, 70(10): 4032-4042.
JIANG Nan, LIU Bing, TANG Zhongli, et al. Simulation study on CO_2 capture from dry flue gas by temperature vacuum swing adsorption[J]. CIESC Journal, 2019, 70(10): 4032-4042.

[22] WANG L, LIU Z, LI P, et al. Experimental and modeling investigation on post-combustion carbon dioxide capture using zeolite 13X-APG by hybrid VTSA process[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 197: 151-161.

[23] 郝艳红, 周彤, 白静利. 分流供热与低温回热超临界二氧化碳燃煤热电联产系统及其运行方法: 202411659201.2[P]. 2025-04-04.
HAO Yanhong, ZHOU Tong, BAI Jingli. Split-flow heating and low-temperature regenerative S-CO_2 coal-fired cogeneration system and its operation method: 202411659201.2[P]. 2025-04-04.

[24] LI Q, KHOSRAVI A, FARSAEI A, et al. Thermodynamics, economic and carbon emission analysis of power-to-methanol process through alkaline electrolysis and monoethanolamine (MEA) carbon capture[J]. Chemical Engineering Science, 2024, 293: 120029.

[25] 孙恩慧, 郑雅文, 王鸽, 等. 超临界 CO_2 再压缩/再热燃煤发电系统热力循环[J]. 科学通报, 2019, 64(2): 234-244.
SUN Enhui, ZHENG Yawen, WANG Ge, et al. Thermodynamics analysis of S-CO_2 recompression- reheating cycle for coal fired power plant[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(2): 234-244.

[26] 赵世飞, 王为术, 刘军. 1 000 MW 超临界二氧化碳燃煤发电系统热力学性能分析[J]. 热力发电, 2020, 49(12): 9-16.
ZHAO Shifei, WANG Weishu, LIU Jun. Thermodynamic performance analysis for a 1 000 MW coal-fired supercritical carbon dioxide power plant[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(12): 9-16.

[27] 陈璟, 陈磊, 周敬, 等. 1 000 MW 超临界二氧化碳动力循环燃煤发电机组变工况特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6681-6688.
CHEN Jing, CHEN Lei, ZHOU Jing. Research on the performance of 1 000 MW supercritical carbon dioxide power cycle coal-fired unit under off-design conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6681-6688.

[28] CHEN X, WANG J, REN T S, et al. Novel exchanger type vacuum temperature swing adsorption for post- combustion CO_2 capture: process design and plant demonstration[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 308: 122837.

[29] ZHOU C A, HE K W, LV W Y, et al. Energy and economic analysis for post-combustion CO_2 capture using amine-functionalized adsorbents in a temperature vacuum swing process[J]. Energy & Fuels, 2019, 33(3): 1774-1784.

（责任编辑　李园）