

基于流态化活化的煤基燃料 O_2/CO_2 燃烧 碳捕集技术研究进展

张海霞¹, 沈 威², 朱治平³, 刘晓星¹, 徐贵玲⁴, 齐晓宾³, 曹晓阳³, 颜云飞^{1,5}

(1.中国科学院 过程工程研究所 介科学与工程全国重点实验室, 北京 100190; 2.盈德气体工程(浙江)有限公司, 浙江 杭州 313200; 3.中国科学院 工程热物理研究所 煤炭高效低碳利用全国重点实验室, 北京 100190; 4.南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042; 5.北京化工大学化学工程学院, 北京 100049)

摘 要:我国承诺将在 2030 年前推动 CO_2 排放量达到峰值,进而在 2060 年前达成碳中和目标。目前,煤炭等化石能源在我国能源消费结构中仍占据相当比重,对保障能源供应的稳定性与安全性意义重大。采用碳捕集技术,可以有效降低碳排放,甚至实现近零排放,助力能源转型稳步推进。富氧燃烧是燃烧中碳捕集的核心工艺,具有 CO_2 浓度高、捕集成本低、燃烧效率高、污染物排放少等优势,因而具有广阔的应用前景。为拓宽富氧燃烧技术的燃料适应性并增强其与工业领域的适配性,提出了碳基原料流态化活化技术新思路,采用该技术可制备气固活化态类气体燃料,进而通过类气体燃料的富氧燃烧,实现碳捕集;或通过类气体燃料的富氧气化,制取富 CO 合成气,用于化学品合成,实现 CO_2 资源化利用。首先剖析了流态化活化技术的基本原理,阐明了 CO_2 在该过程中的作用机制。然后,全面综述了碳基原料经流态化活化后所得煤气的特性和活化半焦的特性,重点探究了活化温度、碳与 CO_2 物质的量比(CC 比)、反应气氛、氧气浓度及燃料种类等对煤气组成、煤气产率、煤气热值的影响,同时还研究了这些因素对活化半焦粒径分布、微观形貌、比表面积、孔隙结构、碳架结构、反应活性等的影响规律。此外,梳理了气固活化态类气体燃料在 O_2/CO_2 气氛下的气化特性,考察了燃料特性、 CO_2 浓度和 O_2/C 物质的量比等对气化性能指标的影响;梳理了气固活化态类气体燃料在 O_2/CO_2 气氛下的燃烧特性,总结归纳了 NO_x 排放规律及反应调控机理。最后,对流态化活化技术进行了总结和展望,以期工业领域燃烧中碳捕集技术及 CO_2 的大规模资源化利用提供理论依据和数据支撑。

关键词:流态化活化;类气体燃料;富氧燃烧;碳捕集; CO_2 还原; CO_2 资源化利用

中图分类号:TQ53 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2025)04-0062-16

Research progress of carbon capture technology for O_2/CO_2 combustion of coal-based fuels based on fluidization activation

ZHANG Haixia¹, SHEN Wei², ZHU Zhiping³, LIU Xiaoxing¹, XU Guiling⁴, QI Xiaobin³,
CAO Xiaoyang³, YAN Yunfei^{1,5}

(1. State Key Laboratory of Mesoscience and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Yingde Gas Engineering (Zhejiang) Co., Ltd., Hangzhou 313200, China; 3. State Key Laboratory of Coal Conversion, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China; 5. School of Chemical Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To address climate change and reduce carbon emissions, China has pledged to peak CO_2 emissions before 2030 and achieve carbon neutrality by 2060. Currently, fossil fuels such as coal still occupy a significant proportion in China's energy consumption structure, which is of great significance for ensuring the stability and safety of energy supply. Utilizing carbon capture technology can

收稿日期: 2025-02-24; 策划编辑: 白娅娜; 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CBJ25022401

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFE0206600); 煤炭高效低碳利用全国重点实验室开放课题基金资助项目(J24-25-901-2)

通讯作者: 张海霞(1981—), 女, 河北保定人, 副研究员。E-mail: zhanghaixia_cas@163.com

引用格式: 张海霞, 沈威, 朱治平, 等. 基于流态化活化的煤基燃料 O_2/CO_2 燃烧碳捕集技术研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2025, 31(4): 62-77.

ZHANG Haixia, SHEN Wei, ZHU Zhiping, et al. Research progress of carbon capture technology for O_2/CO_2 combustion of coal-based fuels based on fluidization activation [J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(4): 62-77.



effectively reduce carbon emissions, even achieving near-zero emissions, thereby facilitating a steady transition in energy sources. Oxygen-enrichment combustion is the core process in carbon capture during combustion. It has advantages such as high CO₂ concentration, low capture cost, high combustion efficiency, and low pollutant emissions, and thus has broad application prospects. To broaden the fuel adaptability of oxygen-enrichment combustion technology and enhance its compatibility with industrial fields, the authors proposed a new idea of the fluidized activation technology of carbon-based raw materials. By using this technology, gas-solid activated like-gas fuel can be prepared. Subsequently, carbon capture can be achieved through oxygen-enriched combustion. Alternatively, the gas-solid activated like-gas fuel can generate CO-rich syngas via oxygen-enriched gasification, which could offer sufficient and high-grade raw materials and key reaction fundamentals for the production of chemicals with CO as the feedstock, thereby achieving the utilization of CO₂ and carbon fixation. Firstly, the basic principle of fluidized activation technology is analyzed, and the functioning mechanism of CO₂ in this process is clarified. The characteristics of the produced fuel gas and the activated semi-char from carbon-based raw materials after fluidized activation process are reviewed. The emphasis is on exploring the effects of activation temperature, molar ratio of carbon to CO₂ (C/C ratio), reaction atmosphere, oxygen concentration, and fuel type on the gas composition, gas yield, and gas calorific value, as well as the influence on the particle size distribution, microstructure, specific surface area, pore structure, carbon framework structure, and reactivity of the activated semi-char. The gasification characteristics of gas-solid activated like-gas-fuel in an O₂/CO₂ atmosphere are summarized, and the effects of fuel type, CO₂ concentration, and O₂/C molar ratio on gasification performance are compared. The combustion characteristics of gas-solid activated like-gas-fuel in an O₂/CO₂ atmosphere are also summarized, and the NO_x emission properties and reaction control mechanisms are analyzed. Finally, the fluidized activation technology is summarized and prospected, with the hope of providing a theoretical basis and data support for in-combustion carbon capture technology in the industrial field and the large-scale resource utilization of CO₂.

Key words: fluidized activation; like-gas fuel; oxygen-enrichment combustion; carbon capture; CO₂ reduction; resource utilization of CO₂

0 引 言

面对全球气候变化的严峻挑战,我国承诺将在2030年前推动CO₂排放量达到峰值,进而在2060年前达成碳中和目标。2023年全世界与能源相关CO₂排放量增加了1.1%,达到创纪录的374亿t,我国CO₂排放量增长了约5.65亿t^[1],这是迄今为止全球最大的增长量。我国作为碳排放大国,面临严峻的挑战。当前,煤炭等化石能源在我国能源消费中仍占据相当比重,碳捕集可以使化石能源在利用过程中减少碳排放,实现相对低碳甚至近零排放,延长化石能源的清洁利用周期,为能源转型争取时间,保障能源供应的稳定性和安全性,同时也符合能源可持续发展的要求^[2-5]。

碳捕集技术包括燃烧前、燃烧后、燃烧中碳捕集,以及化学链燃烧捕集等^[2,6-7]。富氧燃烧是燃烧中碳捕集的核心技术,具有CO₂浓度高、捕集成本低、燃烧效率高、污染物排放少、可与现有技术集成等优势,具有广阔的应用前景^[8-11]。富氧燃烧技术的原理是利用空分系统制备高浓度O₂,再将其与一定量的循环烟气(主要成分为CO₂)混合,以此代替空气作为氧化剂。由于将N₂从空气中提前分离出来,CO₂在尾部烟气组分中的体积分数可达到95%以上,为后续压缩、提纯及应用提供了便利。

近年来,国内外在富氧燃烧技术原理及试验研究等方面取得了较大进展。LUPION等^[12]报道了30MW

循环流化床富氧燃烧工业示范装置从设计构思、建设实施到开展试验的全过程,研究结果显示,在各类工况条件下,干烟气里CO₂的体积分数始终维持在80%及以上。NORMANN等^[13]综述了富氧燃烧过程中含氮污染物(NO_x)的生成特性及控制方法。郑楚光等^[14]总结了国内在富氧燃烧方面开展的基础研究和示范装置上开展的试验研究。郭军军等^[15]详细介绍了在35MW煤粉富氧燃烧示范装置上所取得的系列研发成果,并总结了从中积累的实践经验。葛臣等^[16]总结了循环流化床富氧燃烧在技术研发及专利等方面的主要进展。王越明等^[17]综述了富氧燃烧过程中颗粒物的生成机理及灰沾污沉积特性。王学斌等^[18]详细阐述了加压富氧燃烧工况下,SO_x与NO_x之间存在的强耦合效应,深入剖析了这种耦合作用如何促进SO₃的生成。欧洲水泥研究院在水泥窑炉领域开展了大量研究,在实验室环境下成功完成富氧空气气氛及O₂/CO₂气氛下的回转窑测试工作^[19]。总体来看,已有的富氧燃烧碳捕集研究主要聚焦于燃烧发电行业,针对工业领域的研究较少,因此亟需结合我国能源结构现状及发展需求开发新技术与新工艺。

笔者及项目团队承担了国家重点研发计划战略性科技创新合作专项项目“典型工业过程燃烧中碳捕集共性关键技术与示范”,提出了“碳基原料流态化富氧活化制类气体燃料耦合富氧燃烧”的新型碳捕集技术思路,通过推进模型构建、关键部件的

创新开发、中试试验以及工业等级的技术验证，形成低成本、宽燃料适应性的富氧低氮高效燃烧技术，助力水泥、有色冶金、钢铁、化工等工业领域的低碳发展。为深入理解流态化富氧活化技术特征并更好地支持项目开展，笔者阐述了流态化活化技术原理，论述了 CO_2 在该过程中的作用机制，分析了流态化活化过程中的气固产物特性，重点总结了温度、 C/CO_2 物质的量比（CC 比例）、气氛、氧气浓度及燃料种类等因素对流态化活化过程的影响，以及气固活化态类气体燃料的气化特性和燃烧特性，最后探讨了流态化活化技术的发展方向。

1 流态化活化技术的原理及优势

为提升燃料适应性并实现稳定燃烧，国内外学者开发了多种燃料预处理技术。俄罗斯全俄热能工程研究所、美国燃气技术所、西安交通大学等单位开发了燃气辅热式预热燃烧技术^[20-24]；清华大学、西安交通大学和煤炭科学研究总院研发了燃烧器煤

粉预热燃烧技术^[25-29]；中国科学院工程热物理研究所开发了流化床煤粉预热燃烧技术^[30-32]，对颗粒流动^[33]、燃料预热特性^[34]、燃烧和排放特性等^[35-37]进行了系统研究，并完成了技术示范^[38-39]。该技术结合了流化床与煤粉炉的优势，具备宽燃料适应性的特点，适用于现役锅炉改造。目前，该技术尚未广泛应用于水泥、钢铁、有色金属、化工等领域，在 CO_2 捕集和资源化利用方面的潜力有待验证和挖掘。

流态化活化技术是利用流化床反应器，将固体碳基原料在一定温度条件下活化成高温气固活化态类气体燃料的技术，所制备的类气体燃料可以输送至燃烧系统进行富氧燃烧，从而实现碳捕集；或送至气化系统进一步转化制富 CO 合成气，为化学品的制备提供原料，技术路线如图 1 所示。在流态化活化过程中，碳基原料与流化气体之间发生剧烈的物理化学作用，使固体燃料经历破碎、干燥、热解、部分气化等过程，释放出大部分挥发分，燃料颗粒形成大量微孔结构和活性位点^[40-41]。

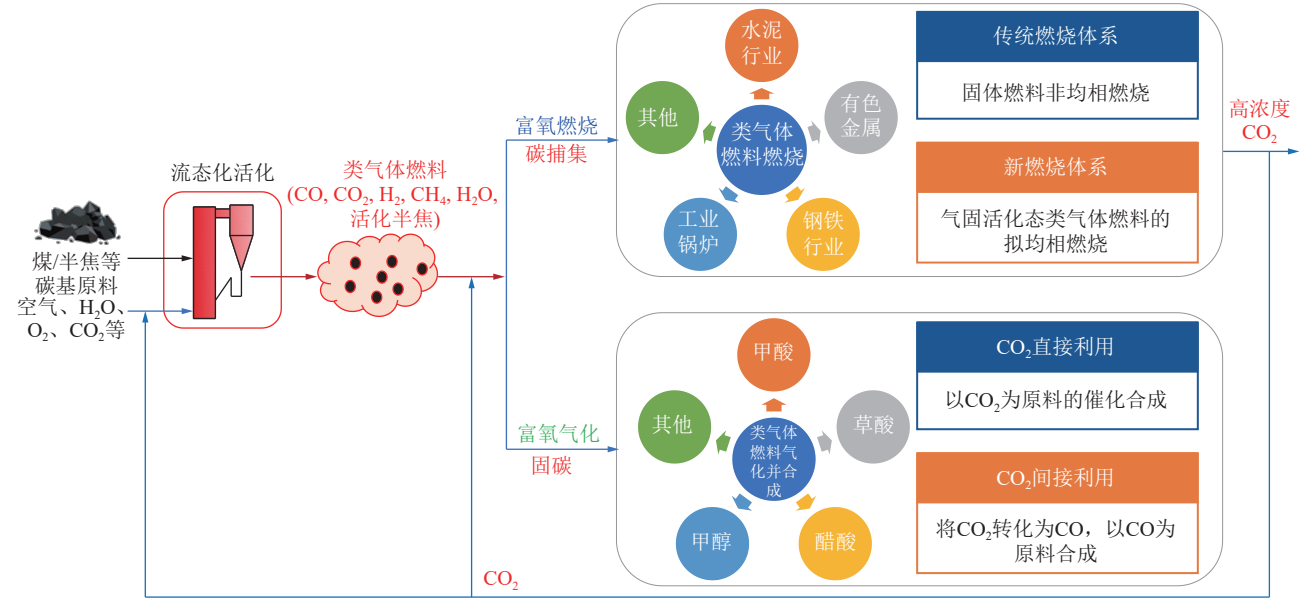


图 1 流态化活化技术路线

Fig. 1 Technical route of fluidized activation technology

流化床反应器内发生的主要化学反应见表 1^[42]，形成的产物包括以 CO 、 CO_2 、 H_2 、 CH_4 等为主要成分的高温煤气和高温活化半焦。在流态化状态下，气固两相接触效率显著增强，促使流化床内温度均匀分布，防止局部高温；同时还大幅强化气固两相之间的热量和质量传递，提高反应速率和固体燃料的活化效果，有利于流化床反应器内活化反应过程的精准调控。经过活化过程后，固体碳基原料转化为高温气固活化态类气体燃料，在燃烧单元的燃烧方式将由异相燃烧转化为高反应速率的气相燃

烧，显著提升燃烧稳定性和燃料适应性。活化后的类气体燃料可以直接通入锅炉进行富氧燃烧，或者与水泥、冶金、钢铁等工艺耦合，用于工业过程的燃烧中碳捕集。此外，该过程也为 CO_2 的高效还原创造了条件，可将 CO_2 转化为 CO ，为化学品制备提供优质原料，实现 CO_2 资源化利用。

国内外众多机构和学者对碳捕集及资源化利用途径展开了深入探讨^[2,43-45]。基于我国富煤、贫油、少气的能源资源禀赋特征，中国科学院提出了多能融合发展路径，应综合考虑能源资源在加工利用过

表 1 流化床反应器内主要化学反应^[42]

Table 1 Main chemical reactions in fluidized bed reactor^[42]

编号	反应式	反应热/(kJ·mol ⁻¹)
R1	C+1/2O ₂ →CO	-110.4
R2	C+O ₂ →CO ₂	-394.1
R3	C+H ₂ O⇌H ₂ +CO	135.0
R4	C+CO ₂ ⇌2CO	173.3
R5	C+2H ₂ →CH ₄	-84.3
R6	H ₂ +1/2O ₂ →H ₂ O	-245.3
R7	CO+1/2O ₂ →CO ₂	-283.7
R8	CO+H ₂ O⇌CO ₂ +H ₂	-38.4
R9	CO+3H ₂ ⇌CH ₄ +H ₂ O	-219.3

程中的能源属性和物质属性，通过促进化石能源与非化石能源、各能源分系统之间、各能源资源加工利用不同过程之间的能量流、物质流和信息流的互补融合，实现能源资源利用过程中多个目标的优化。基于多能融合理念，通过技术创新和过程耦合，有望实现化石能源利用过程排放 CO₂ 的资源化利用，甚至推进典型高能耗高排放行业的低碳/零碳工艺的技术突破^[45]。

CO₂ 既是碳的载体，又是氧的载体，将 CO₂ 转化为甲醇、甲酸、醋酸等高价值燃料或者化学品，是实现 CO₂ 资源化利用的关键路径，在“双碳”目标中占据举足轻重的作用^[46-48]。然而，CO₂ 化学性质稳定，标准反应吉布斯自由能高，还原难度大^[47]。借助催化手段，可以降低 CO₂ 反应能垒，在较温和条件下实现 CO₂ 高效转化，但存在催化剂价格昂贵、积碳、反应选择性差等问题。本文提出的碳基原料流态化活化技术可实现 CO₂ 高效还原并制备富 CO 合成气，在降低反应能垒、提升反应选择性、简化工艺、装置放大和应用推广等方面具有显著优势，具有广阔的应用前景。

2 流态化活化煤气的特性

2.1 温度的影响

温度对碳基原料热转化过程的反应速率、气相产物的组成与分布，以及 CO₂ 还原率等具有重要影响^[49-52]。董倩等^[53]利用热重分析仪考察了温度对煤快速热解焦在 CO₂ 气氛下的反应特性并获得了反应动力学参数。JIANG 等^[54]利用热重分析仪考察了温度对不同比例配煤样品在 CO₂ 气氛下的反应特性，获得了优化的配煤比例条件。然而这些研究是在煤焦静置状态下开展的，仅注重了半焦反应特性的评

价，未能给出半焦特性的演化、煤气的特性及 CO₂ 还原率等。为了探究流态化活化过程中碳基原料与 CO₂ 间的相互作用并定量评估 CO₂ 还原特性，虎慧等^[40]在连续给料流态化小试平台上，考察了活化温度对榆林半焦流态化活化还原 CO₂ 的影响。

在 900~1 100 ℃ 活化温度及 C/CO₂ 物质的量比为 1 的条件下，煤气成分变化显著，其结果如图 2a 所示。当温度从 900 ℃ 升至 1 050 ℃ 时，CO₂ 体积分数由 58.42% 降至 29.48%，CO 体积分数由 39.28% 增至 64.53%，表明 Boudouard 反应（R4）增强，CO₂ 向 CO 转化显著。若温度继续升至 1 100 ℃，CO 和 CO₂ 体积分数分别稳定在约 64% 和 30%，反应趋于平衡。在温度从 900 ℃ 升至 950 ℃ 时，水煤气变换反应（R8）增强，H₂ 含量增加，之后稳定在 4%~5%。随着温度升高，CO 和 H₂ 含量之和上升，煤气低位热值和碳转化率显著提高，当温度达到 1 100 ℃ 时碳转化率达 52.11%。

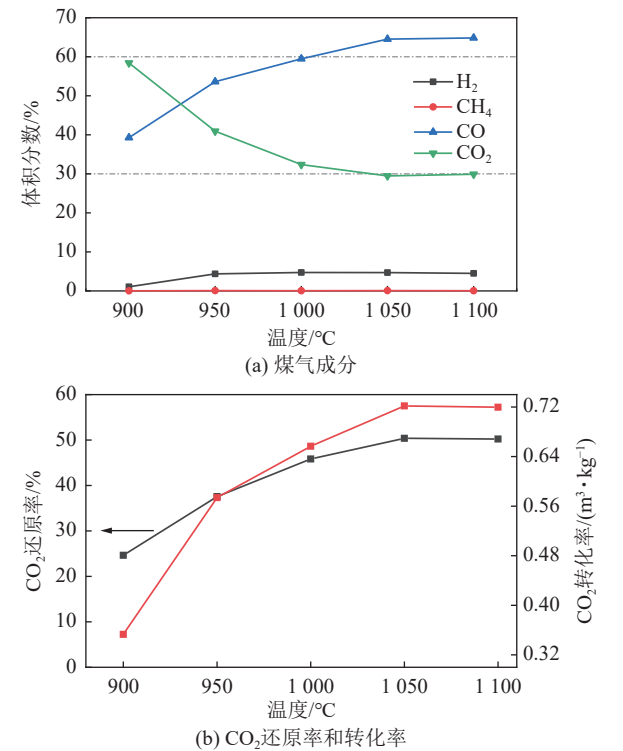


图 2 不同温度下的煤气成分和 CO₂ 还原特性^[40]

Fig. 2 Gas composition at different temperatures^[40]

不同温度下，CO₂ 还原率和转化率呈现显著变化，结果如图 2b 所示。当温度从 900 ℃ 升至 950 ℃ 时，CO₂ 还原率从 24.65% 提升至 37.55%，半焦对 CO₂ 的转化率从 0.35 m³/kg 增至 0.57 m³/kg，增幅达 63%。当温度达到 1 050 ℃ 时，CO₂ 还原率达最高值 50.37%，此时半焦对 CO₂ 的转化率为 0.72 m³/kg。然而，当温度升至 1 100 ℃ 后，CO₂ 还原率趋于稳

定, 主要因高温加剧气体膨胀和固体破碎, 缩短了气固反应时间。这说明温度是碳基原料高效还原 CO_2 的关键因素, 适当升温可促进 CO_2 向 CO 转化, 提升煤气热值和碳转化率。但过高温度可能导致结渣, 不利于装置稳定运行, 因此具体流态化活化温度的选择还需结合煤质特征等因素综合考虑并确定。

2.2 C/CO₂ 物质的量比的影响

在流化床反应器的密相区, 碳浓度过高易阻碍 CO_2 扩散, 使反应从动力学主导转向传质限制, 降低 CO_2 还原速率; 而碳浓度不足则限制 Boudouard 反应 (R4) 活性位点, 减少 CO 生成。通过优化 C/CO_2 物质的量比, 可平衡气固接触效率与反应驱动力, 打破热力学平衡对反应的限制, 促进反应朝着正方向进行, 提升 CO_2 还原率及 CO 浓度。此外, 合理的 C/CO_2 物质的量比可维持流化床稳定运行, 避免死区形成, 同时降低原料与能耗成本, 从而可为流态化活化技术工艺开发提供关键数据支撑。

为评估榆林半焦流态化活化还原 CO_2 的效果并获得煤气产物特性, 张海霞等^[41] 在 1 050 ℃ 条件下, 通过连续给料流态化小试平台研究了不同 C/CO_2 物质的量比对榆林半焦活化还原 CO_2 效果及煤气产物特性的影响, 试验结果如图 3 所示。

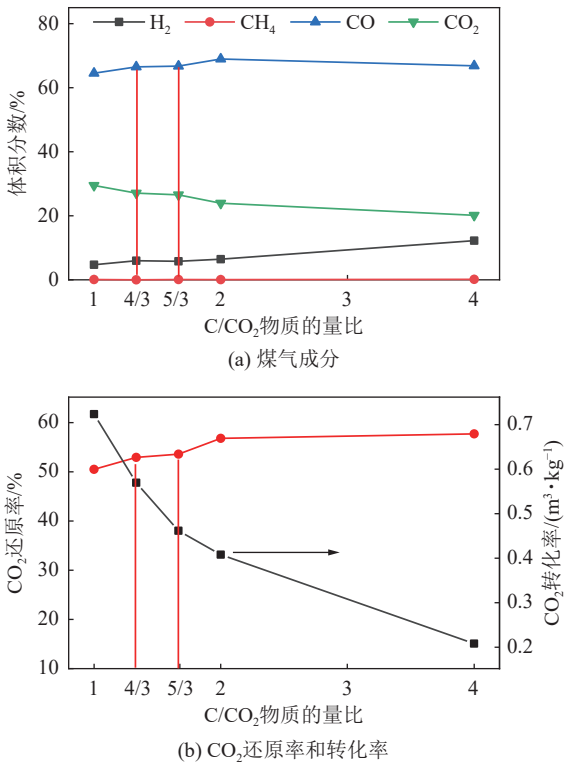


图 3 C/CO_2 物质的量比对煤气成分和 CO_2 还原特性的影响^[41]
Fig. 3 Effect of C/CO_2 molar ratio on gas composition and CO_2 reduction properties^[41]

图 3a 中随着 C/CO_2 物质的量比的增加, CO 体积分数先增后减, 当 C/CO_2 物质的量比为 2 时, CO 体积分数达到最大 (68.96%), 随后随着 C/CO_2 物质的量比的升高略有下降; 而 CO_2 体积分数随着 C/CO_2 物质的量比的升高持续降低, 表明更多的 CO_2 被有效还原成 CO 。与此相反的是 H_2 体积分数随 C/CO_2 物质的量比增加而上升, 尤其在物质的量比为 4 时, H_2 体积分数达到了 12.24%。其中, CH_4 含量极低并一直保持稳定。

Boudouard (R4) 反应随 C/CO_2 物质的量比增加而加强, 促进了 CO_2 向 CO 的转化; 水煤气变换反应 (R8) 也会因水分增加而增强, 导致 H_2 生成增多的同时也消耗了一定量的 CO 。图 3b 为 CO_2 还原率与转化率随 C/CO_2 物质的量比的变化趋势图。图中 CO_2 还原率随 C/CO_2 物质的量比增加而升高, 但在物质的量比超过 2 后增幅放缓。此外, 碳转化率随 C/CO_2 物质的量比增加而降低, 这说明未反应的碳逐渐累积。而煤气的低位热值从 $8.69 \text{ MJ}/\text{m}^3$ 上升到 $9.83 \text{ MJ}/\text{m}^3$, 主要得益于 CO 和 H_2 等可燃气体比例的增加。研究表明, 在所考察条件下, 保持 C/CO_2 物质的量比在 1~2, 即可实现良好的 CO_2 还原效率与煤气品质。

2.3 气氛及氧气浓度的影响

在碳基原料流态化热转化过程中, 气氛 (O_2 、 H_2O 、 CO_2 等)、氧气浓度、氧气分级等通过多反应耦合直接调控反应路径、反应进程、煤气成分、活化半焦特性及煤灰组分^[55-60]。高 O_2 浓度可促进碳的氧化 (R1、R2), 释放一定热量以维持系统所需的高温条件, 并促进强吸热反应 R3 和 R4 的进行; 但过量 O_2 会导致大量 CO_2 的生成, 降低煤气有效成分的含量和热值。再者, H_2O 与 CO_2 的竞争吸附及反应会影响煤气中 H_2/CO 的比例, 进而影响煤气的化工利用方向, 或影响水泥、钢铁等工业领域物料转化过程的反应路径及产品品质。此外, O_2 浓度的高低可调控碳表面活性位点的动态演变, 可能加剧碳气化速率与灰分熔融的矛盾。因此, 有必要通过优化氧气浓度及气氛配比, 实现反应热力学-动力学的平衡, 定向调控煤气组分 (CO 、 H_2 、 CH_4 等) 与碳转化率等性能指标。

LIANG 等^[60] 在 10 kg/h 循环流化床试验平台上, 以神木煤为原料, 对比了 O_2/N_2 与 O_2/CO_2 气氛对反应过程的影响, 结果如图 4 所示。图 4a 为炉膛高度方向上温度的变化趋势, 图中 2 种气氛下炉膛温度沿高度均呈先升后降趋势, 并且均在 400 mm 处 (T3) 达到峰值, 这主要归因于返料器循环半焦颗粒强化气固混合, 促进碳与 O_2 的氧化

放热反应 (R1 和 R2) 集中发生。炉膛上部 (T4 ~ T6) 温度下降则与煤的干燥、热解及吸热反应 (R3 和 R4) 相关。而在 O₂/CO₂ 气氛下各测点温度均低于 O₂/N₂, 且温差沿高度非均匀分布: T3、T4、T6 处温差分别为 15、20、17 °C。温差产生的主要原因是 CO₂ 的高比热容, 但 T3 ~ T4 温差增加

5 °C 表明该区域存在额外吸热贡献。动力学分析显示, T3 ~ T4 区间碳浓度较高, 促进了 Boudouard 反应 (R4) 导致局部吸热增强, 而 T4 ~ T6 区间因反应物浓度及温度降低, 吸热效应减弱。研究揭示了 CO₂ 替代 N₂ 对气化反应路径及炉内热场分布的多尺度调控机制。

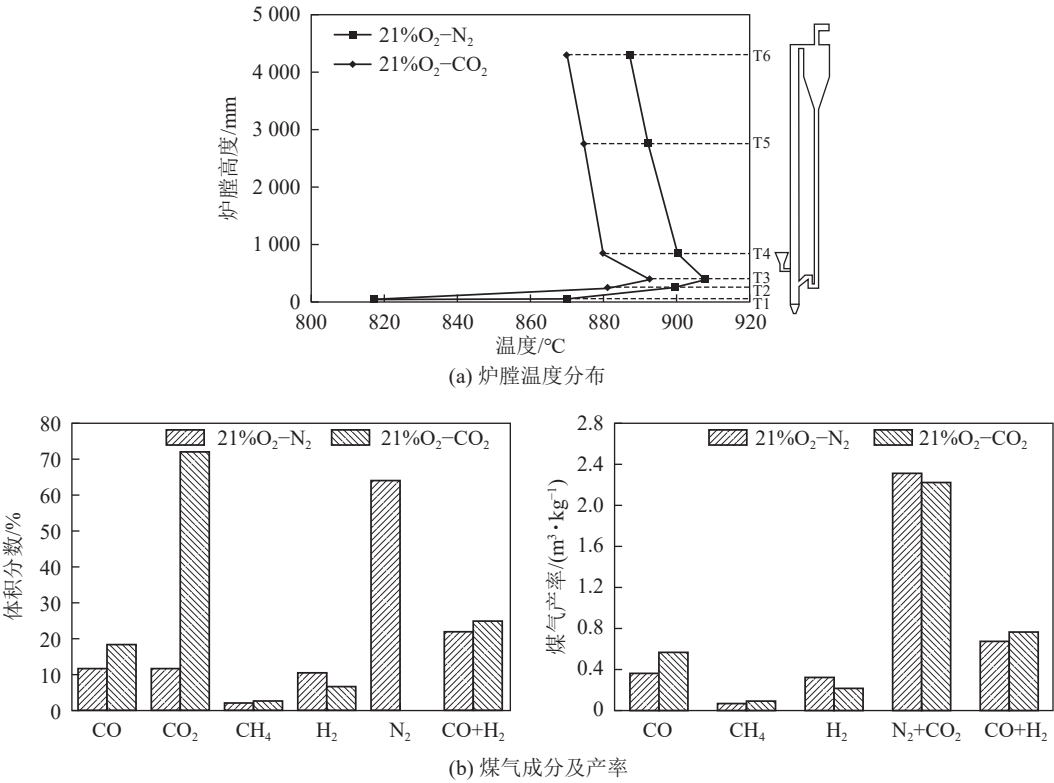


图 4 O₂/N₂ 与 O₂/CO₂ 气氛对反应过程的影响^[61]
Fig. 4 The effects of O₂/N₂ atmosphere and O₂/CO₂ atmosphere on reaction processes^[61]

图 4b 对比了 O₂/N₂ 与 O₂/CO₂ 气氛下的煤气成分及产率。当 N₂ 被 CO₂ 取代后, 煤气中 CO₂ 体积分数从 11.4% 增至 72.5%, 主要因气化剂中 CO₂ 浓度较高。然而, O₂/CO₂ 气氛下 CO₂ 体积分数 (72.5%) 仍低于 O₂/N₂ 气氛下 N₂ 与 CO₂ 的总体积分数 (75.9%)。由于水煤气变换反应 (R8) 不影响 H₂ 和 CO 总产率, 因此 H₂ 和 CO 产率变化更能反映 Boudouard 反应 (R4) 的强弱。O₂/CO₂ 气氛下 H₂ 和 CO 总产率及体积分数均高于 O₂/N₂ 气氛 (0.76 m³/kg 对比 0.67 m³/kg, 24.9% 对比 22.0%), 表明 Boudouard 反应 (R4) 增强, 更多 CO₂ 参与反应, CO 体积分数从 11.7% 增至 18.2%, 产率从 0.36 m³/kg 升至 0.56 m³/kg。同时, CO₂ 取代 N₂ 促使水煤气变换反应 (R8) 逆向进行, 导致 H₂ 体积分数从 10.4% 降至 6.7%。2 种气氛下 CH₄ 浓度无明显差异, 因其主要来源于煤热解^[61]。ZHANG 等^[62] 研究发现, O₂/CO₂ 气氛下 O₂ 浓度为 30% 时 CO₂

转化率最大, 但高 CO₂ 浓度下其还原受温度及半焦反应活性限制, 随氧碳比增加, CO₂ 产率逐渐上升。

LIU 等^[63] 基于 30 kW 循环流化床预热燃烧实验系统, 对比了空气气氛及不同 O₂/CO₂ 浓度下高挥发分神木烟煤与低挥发分榆林半焦的流态化活化及燃烧特性。图 5a 为不同条件下所得煤气成分的对比结果, 图中 O₂/CO₂ 气氛下煤气中 CO 生成量增加, 净热值高于空气气氛。空气气氛下半焦煤气热值仅为烟煤的 50%, 而在 O₂/CO₂ 气氛下, O₂ 体积分数增至 27.3% 时, 煤气净热值达空气气氛的 2 倍 (烟煤为 1.3 倍), 且 O₂ 浓度增加缩小了 2 种燃料煤气热值差异, 凸显了 O₂/CO₂ 气氛对燃料改性的优势。此外, O₂/CO₂ 气氛下 H₂ 含量低于空气气氛, 与 LIANG 等结果一致, 主要因高浓度 CO₂ 促进碳与 CO₂ 的高温还原反应 (R4), 消耗 H 自由基并抑制 H₂ 生成。图 5b 表明, 煤气中还含有

HCN 和 NH_3 气氛，二者由燃料氮转化而来，在 NO 形成中起重要作用。神木烟煤因挥发分较高，HCN 和 NH_3 释放量显著高于半焦，且半焦活化过程中不生成 HCN。 NH_3 在燃料氮释放过程中更易生成。LIU 等^[60] 还研究了不同过量氧系数 (λ_{Pr}) 对煤气成分的影响 (图 6)，发现 λ_{Pr} 在 0.3~0.5 范围内增加时， O_2/CO_2 气氛下流化床内部分气化强度减弱，CO、 H_2 和 CH_4 释放量减少，但氧分压增加有利于 CO 生成。

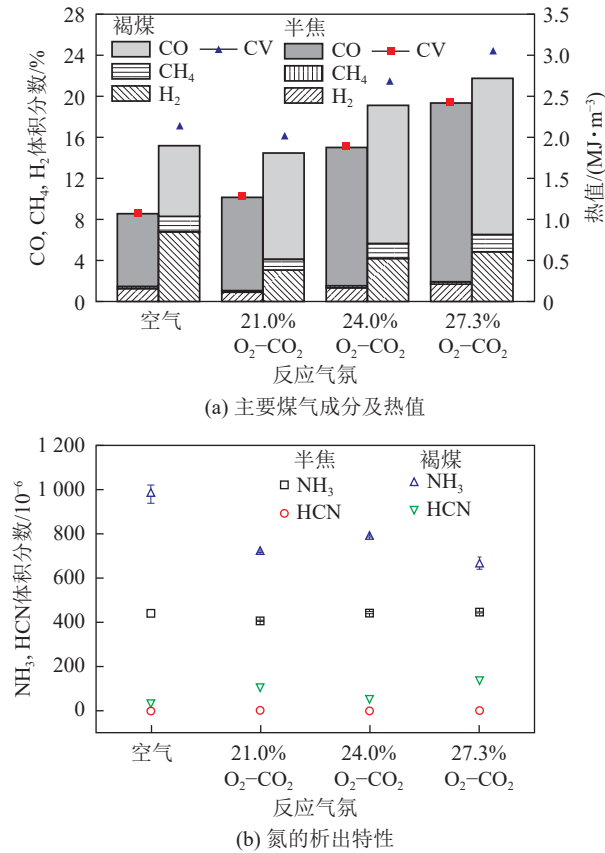


图 5 气氛及氧气浓度对流态化活化煤气的影响^[63]
Fig. 5 Effects of atmosphere and oxygen concentration on fluidized preheating gas^[63]

2.4 燃料种类的影响

我国煤炭资源种类繁多，煤质特性（如挥发分、灰分、硫分、灰熔点、反应活性等）差异显著，导致热转化技术的燃料适应性成为关键技术瓶颈之一^[64-68]。XIAN 等^[69] 通过热重质谱联用分析技术研究了新疆广汇煤、甘肃红沙岗煤、陕西神木煤在 CO_2 气氛下的气体释放特性，并与石墨进行了对比，发现 CO、 H_2 、 H_2S 、COS 等气体的释放与煤质特征相关，较大的比表面积降低了气化反应初始阶段的阻力，促进了气体析出。LIU 等^[63] 对比了高挥发分神木烟煤和低挥发分榆林半焦在空气及不同

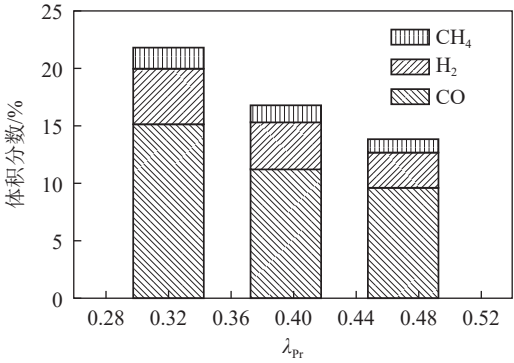


图 6 一次风不同过量氧系数下产生的煤气成分^[60]
Fig. 6 Coal gas components produced by different excess oxygen coefficient of the primary air^[60]

O_2 浓度 O_2/CO_2 气氛下的活化特性，发现原料不同导致主要煤气成分及含 N 污染物析出特性存在显著差异，且同一原料在不同 O_2 浓度下也存在差异。ZHANG 等^[70] 研究了荏平气化飞灰 (CPGC) 和宜化气化飞灰 (YHGC) 在 O_2/CO_2 气氛下的流态化活化特性，煤气成分及气体产率如图 7 所示。与 CPGC 相比，当使用 YHGC 作为原料时，煤气中 CO 含量更高， CO_2 含量仅为 CPGC 的一半，这是因为 CPGC 的 O_2/C 和 CO_2 浓度较高，增强了燃烧反应，而 YHGC 的较大比表面积和更高反应活性促进了 Boudouard 反应 (R4) 的进行。

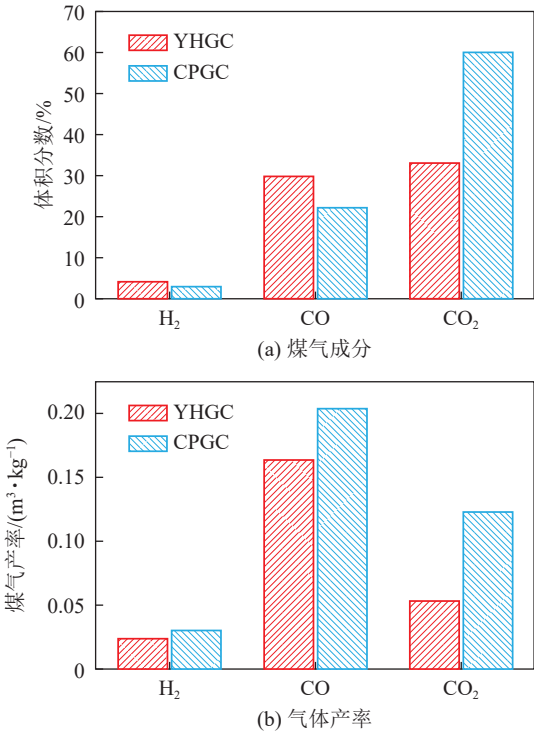


图 7 2 种气化飞灰的流态化活化煤气成分及气体产率^[70]
Fig. 7 Fluidized activated gas composition and gas yield of two types of gasification fly ash^[70]

3 流态化活化半焦的特性

3.1 温度的影响

CO₂ 参与反应过程中，其对半焦的改性效果会直接影响半焦的物理化学性质，进而影响其在后续反应中的活性、燃烧稳定性以及与其他物质的相互作用。流态化活化过程中，一部分细颗粒活化半焦（FC）会随同煤气一同进入尾部系统，另一部分粗颗粒活化半焦（BC）会在反应器内继续反应。虎慧等^[40]对 CO₂ 气氛、900~1 100 ℃ 条件下制得粗颗粒活化半焦和细颗粒活化半焦的比表面积、孔容积和平均孔径进行了表征，并与榆林半焦原料（RC）进行了对比，结果见表 2。粗颗粒活化半焦和细颗粒活化半焦的平均孔径比半焦原料降低了约 50%，活化半焦的平均孔径比原料降低了约 50%，主要集中在 2~3 nm，并且其比表面积显著增大。其中，细颗粒活化半焦的比表面积在 1 050 ℃ 时达到最大值，为 219.99 m²/g，是原料的 36.24 倍；粗颗粒活化半焦的比表面积在 1 000 ℃ 时达到最大值，为 382.42 m²/g，是原料的 63 倍。粗颗粒活化半焦在反应器内停留时间较长，孔隙发展更充分，比表面积更高。拉曼光谱分析显示，粗颗粒活化半焦的无定形碳结构在 1 050 ℃ 时活性点位最多，反应活性最佳，但温度继续升高会消耗活性位点。结合煤气成分及碳转化率等指标，1 050 ℃ 为适宜的流态化活化温度，可保证半焦活化效果并促进 CO₂ 高效还原。

由于粗颗粒活化半焦在反应器内停留时间较长，其形貌变化对运行安全性和结渣问题至关重

表 2 样品的比表面积、孔容积和平均孔径^[40]

Table 2 The specific surface area, pore volume and average pore diameter of all samples ^[40]					
样品	比表面积/(m ² · g ⁻¹)			孔容积/ (cm ³ · g ⁻¹)	平均孔径/ nm
	总比表面积	微孔面积	外表面积		
RC	6.07	0.00	6.07	0.01	7.78
900℃ BC	345.56	273.43	72.13	0.21	2.39
950℃ BC	342.53	237.21	105.32	0.23	2.73
1 000℃ BC	382.42	287.02	95.4	0.27	2.87
1 050℃ BC	345.26	236.22	109.04	0.24	2.81
1 100℃ BC	353.64	280.47	73.17	0.21	2.39
900℃ FC	53.17	49.39	3.78	0.03	2.46
950℃ FC	141.20	101.19	40.01	0.10	2.77
1 000℃ FC	184.81	115.49	69.32	0.15	3.25
1 050℃ FC	219.99	145.67	74.32	0.16	2.96
1 100℃ FC	187.60	149.48	38.12	0.12	2.52

要。图 8 展示了榆林半焦原料及不同温度下粗颗粒活化半焦的微观形貌。半焦原料表面光滑，仅有少量裂缝与孔洞。当活化温度为 900 ℃ 时，粗颗粒活化半焦表面出现较大孔洞；950 ℃ 时出现层状纹理结构；1 050 ℃ 时呈海绵状多孔结构，表明半焦与 CO₂ 充分反应，形成大量孔隙。温度升至 1 100 ℃ 时，颗粒表面变得粗糙并出现矿物质微团，未发生熔融现象。反应器内较高的碳浓度抑制了灰分团聚，但矿物质微团的形成阻碍了 CO₂ 与剩余碳的接触，对高温下 CO₂ 还原效果产生不利影响。

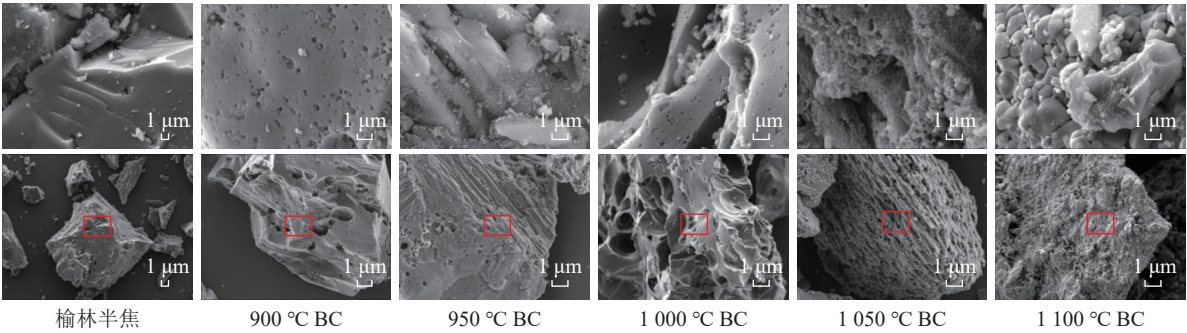


图 8 活化半焦和榆林半焦原料的扫描电子显微镜图片^[40]
Fig. 8 SEM image of activated Yulin semi-char and raw semi-char^[40]

3.2 C/CO₂ 物质的量比的影响

张海霞等^[41]对 CO₂ 气氛、1 050 ℃、不同 C/CO₂ 物质的量比（1~4）流态化活化过程中所得的细颗粒活化半焦（FC）和粗颗粒活化半焦（BC）进行了比表面积和微孔面积表征分析，结果如图 9 所示。

随着 C/CO₂ 物质的量比的增加，细颗粒活化半焦和粗颗粒活化半焦的比表面积均呈现出先增大后减小的趋势。榆林半焦原料的比表面积非常小，仅为 6.07 m²/g，并且主要为外比表面积。相比之下，经过流态化活化处理后，粗颗粒活化半焦和 FC 的比

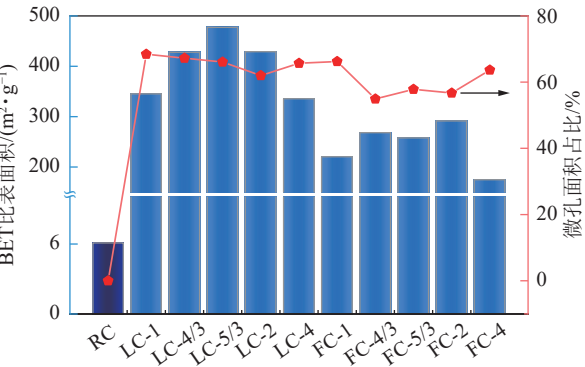


图 9 比表面积及微孔面积占比^[41]

Fig. 9 Specific surface area and percentage of microporous area^[41]

表面积显著增加，微孔面积占比处于 54.93% ~ 68.42%，相比之下，外比表面积较小。具体来看，粗颗粒活化半焦的最大比表面积能够达到 477.15 m²/g，是半焦原料比表面积的 78 倍；细颗粒活化半焦的最大比表面积为 291.21 m²/g，是半焦原料的 48 倍。这充分说明流态化活化过程对半焦颗粒的表面孔隙

结构具有明显的改善作用。值得注意的是，在相同 C/CO₂ 物质的量比条件下，细颗粒活化半焦的比表面积始终低于粗颗粒活化半焦，孔隙结构发展不如粗颗粒活化半焦充分，这是由于细颗粒活化半焦粒径较小，在炉内停留的时间较短，致使其与 CO₂ 的相互作用和反应程度受到限制。

对榆林半焦原料、细颗粒活化半焦和粗颗粒活化半焦进行了拉曼光谱分析，结果如图 10 所示。榆林半焦原料经 CO₂ 流态化活化后，有序芳香环结构被打开，石墨化程度降低，有利于半焦的后续转化，同时活性位点数量显著增加，尤其在细颗粒活化半焦中更为明显。这一现象源于 CO₂ 与半焦原料的反应进程及活性位点的形成与消耗。当 C/CO₂ 物质的量比在 1 ~ 2 时，活化效果最佳，既能避免碳转化过度导致的活性位点消耗，又能确保 CO₂ 对半焦的充分改性。流态化活化技术提高了半焦的比表面积，优化了孔隙结构，降低了石墨化程度并增加了活性位点，为高浓度 CO₂ 环境下的工业应用提供了重要依据。

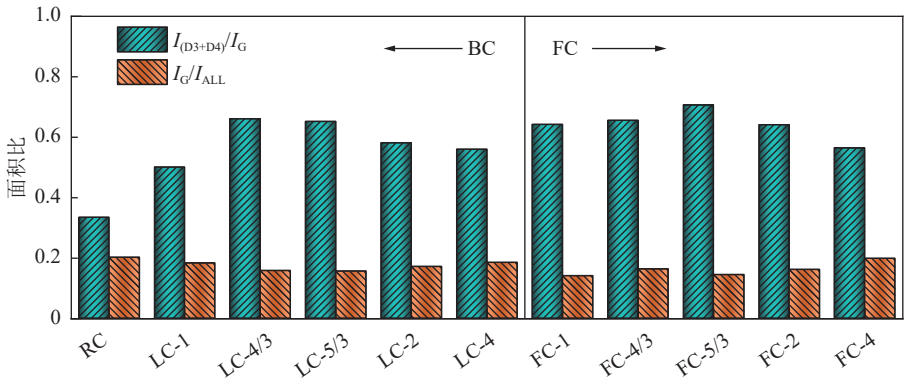


图 10 拉曼光谱峰面积比值^[41]

Fig. 10 Peak area ratio of Raman spectral^[41]

3.3 气氛及氧气浓度的影响

图 11a 为神木烟煤和榆林半焦原料的粒径分布结果，以及空气气氛和 O₂/CO₂ 气氛下两种原料经流态化活化后所得半焦的粒径分布结果^[63]。对比可知，活化后半焦的颗粒尺寸仅为原料的 20%，且燃料特性和反应气氛对其无明显影响，表明流态化活化技术可实现不同原料的一致性处理，可以获得粒径分布均匀的颗粒，为进一步转化提供有力条件。颗粒粒径减小主要归因于 2 个关键因素：一方面，反应器内部存在返混现象使颗粒间频繁碰撞与摩擦，进而减小颗粒尺寸；另一方面，燃料中挥发分从颗粒内部向外释放，同时气氛中的 O₂、CO₂ 等与半焦相互作用并发生化学反应，推动颗粒破碎，同样促使颗粒粒径减小。

图 11b 的比表面积分析表明，O₂/CO₂ 气氛下所得活化半焦的比表面积大于空气气氛下的产物，且反应位点比例上升，石墨化程度下降。在 O₂/CO₂ 气氛中，一次风氧气体积分数为 21% 时，活化半焦的碳架结构稳定性低于空气气氛，但活性位点比例更高。然而，随着一次风氧气浓度升高，活性位点比例逐渐下降^[70]。从化学键能角度看，碳氧单键的结合能低于碳氧双键。在 CO₂ 气氛下，O₂ 的扩散系数较低，低 O₂ 体积分数时 C—C 单键更易断裂，断裂后的碳原子与氧原子结合形成新单键；但随着 O₂ 浓度增加，CO₂ 浓度减小，碳氧单键易被氧化为双键或三键，提升了碳架结构的稳定性。相比之下，空气气氛中 O₂ 扩散系数较大，含碳官能团的氧化主要形成碳氧单键。

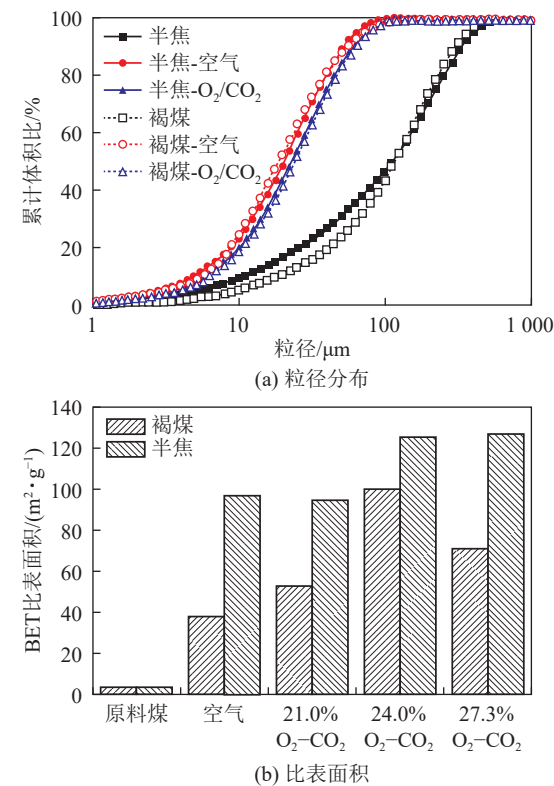


图 11 神木烟煤和榆林半焦原料的粒径分布结果和比表面积分析结果^[63]

Fig. 11 Particle size distribution and BET analysis of Shenmu bituminous coal and Yulin semi coke^[63]

3.4 燃料种类的影响

不同燃料因其化学组成、结构特性和元素含量的差异，在流态化活化过程中会发生不同的物理和化学反应，进而可能改变活化半焦的特性。图 11b 为分别以神木烟煤和榆林半焦为原料时所得活化半焦的比表面积分析结果，神木烟煤和榆林半焦原料的比表面积相近，流态化活化过程中二者比表面积均显著增加，但采用榆林半焦为原料时所得活化半焦的比表面积增加幅度更大，神木烟煤所得活化半焦的比表面积呈现先增加后减小的趋势，最大增加约 30 倍，而榆林半焦所得活化半焦的比表面积呈单调增加趋势，最大增加约 40 倍^[63]。

图 12 展示了 CPGC 和 YHGC2 种气化飞灰在 O₂/CO₂ 气氛下经流态化活化后所得活化半焦的电镜照片。活化后的半焦表面更加粗糙且孔隙发达，主要因固相碳参与了燃烧反应和 Boudouard 反应 (R4)，导致颗粒表面及内部固体碳消耗，形成大量小孔隙^[70]。其中，YHGC 所得活化半焦 (YHGC-char) 石墨化程度较低，无序碳含量较高，芳香层面内缺陷较多，拉曼光谱显示其碳结构反应性更高，但与孔隙结构差异相比，碳结构差异并不显著。结果表明，燃料特性对流态化活化效果影响显

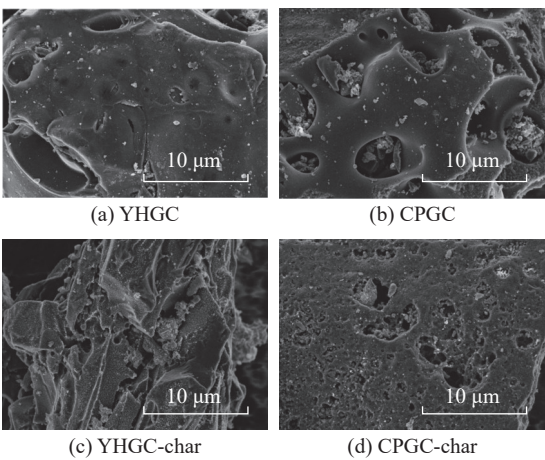


图 12 气化飞灰原料及活化半焦的扫描电镜照片^[70]

Fig. 12 Scanning electron microscopy images of gasification fly ash raw materials and activated semi coke^[70]

著，因此需结合燃料特性及后续工艺需求，优化操作条件，充分发挥流态化活化技术优势，实现燃料高效活化，为气固活化态类气体燃料的高效转化提供有利条件。

4 类气体燃料的转化特性

4.1 气化特性

煤气化是煤炭高效清洁利用的龙头技术。与气流床气化技术相比，流化床气化技术虽有独特优势，但气化温度较为温和，反应速率较低，致使气化飞灰和底渣中存在一定量未反应碳，从而限制了碳转化率的提升。流态化活化技术制备的气固活化态类气体燃料，可进一步在 O₂/CO₂ 气氛中进行气化转化，有望克服传统流化床气化技术的弊端，提升碳转化率，助力碳资源的高效利用。再者，气化剂中 CO₂ 可进一步转化为 CO，从而可获得富 CO 合成气，并可以此为原料制备化学品，从而实现固碳。

经流态化活化后，活化半焦的反应活性与其微观结构（比表面积、孔隙分布、表面官能团）、原料特性等密切相关。通过活性评价，可以深入理解气化或燃烧过程中的反应动力学与传质机制，为原料选择、工艺优化提供理论支持。虎慧等^[40]、张海霞等^[41]对半焦原料和不同条件所得的活化半焦的反应活性进行了系统评价。当流态化活化温度为 1050 ℃、C/CO₂ 物质的量比为 1 时，粗颗粒活化半焦和细颗粒活化半焦的碳转化率如图 13 所示，基于反应性指数 R_{0.5} 可以得到 3 个样品的 CO₂ 气化活性规律，即细颗粒活化半焦>粗颗粒活化半焦>半焦原料。细颗粒活化半焦具有丰富的孔结构和无定形碳结构，使得反应活化能比半焦原料减小，有利于进一步转化^[40]。

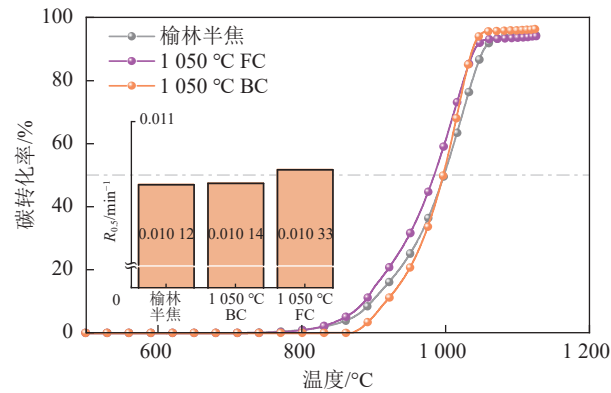


图 13 半焦、1050 °C BC 和 FC 的碳转化率^[40]
Fig. 13 Carbon conversion of semi-coke, 1050 °C BC and FC^[40]

当流态化活化温度为 1 050 °C、C/CO₂ 物质的量比分别为 1 和 2 时，细颗粒活化半焦的反应速率对比结果如图 14 所示^[41]。在反应开始阶段，细颗粒活化半焦的反应速率明显低于半焦原料，然而随着反应的推进，在碳转化率达到 10% 之后直至反应结束，2 种细颗粒活化半焦的反应速率转而均高于半焦原料。从图 14 中能够清晰地发现，2 种细颗粒活化半焦的质量平均反应速率均超过半焦原料，这一现象表明流态化活化过程对细颗粒活化半焦在反应中后期的速率有着显著的增强作用，从而可促进碳的转化。进一步分析整个反应进程可知，C/CO₂ 物质的量比为 1 时的细颗粒活化半焦（FC-1）在各个阶段的反应速率均高于 C/CO₂ 物质的量比为 2 时的细颗粒活化半焦（FC-2），这是由于 FC-1 拥有高的微孔面积占比、更多的活性点位，并且石墨化程度较低。

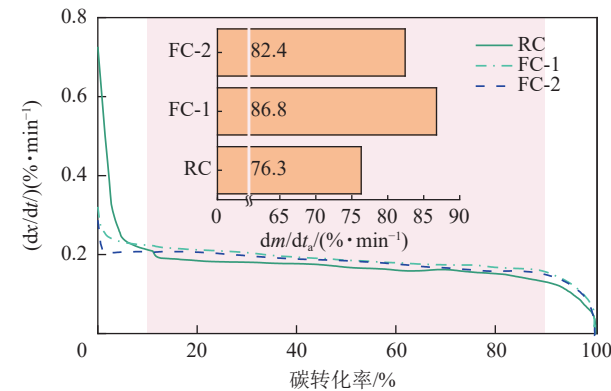


图 14 RC 和 FC 的反应速率^[41]
Fig. 14 Reaction rate of RC and FC^[41]

ZHANG 等^[70]研究了循环流化床气化飞灰的流态化活化及气化特性，重点考察了还原炉中 CO₂ 浓度、O₂/C 物质的量比及飞灰种类的影响。以 YHGC 为原料时，随着 CO₂ 体积分数从 30% 增至 70%，还原炉顶部和中部温度逐渐降低，顶部温度

变化更显著；当 CO₂ 体积分数达到 70% 时，中部温度超过顶部温度。图 15 是 CO₂ 体积分数对还原炉气体成分及气体产率的影响规律。CO₂ 体积分数增加导致 CO 和 H₂ 体积分数降低，CO₂ 体积分数上升；当 CO₂ 体积分数小于 50% 时，CO₂ 净产率为负，实现 CO₂ 净还原。CO 体积分数和温度通过 Boudouard 反应（R4）影响 CO₂ 还原，CO 体积分数接近上限时抑制还原，远离上限时温度影响更显著，1 200 °C 时 CO 体积分数上限约为 55%。

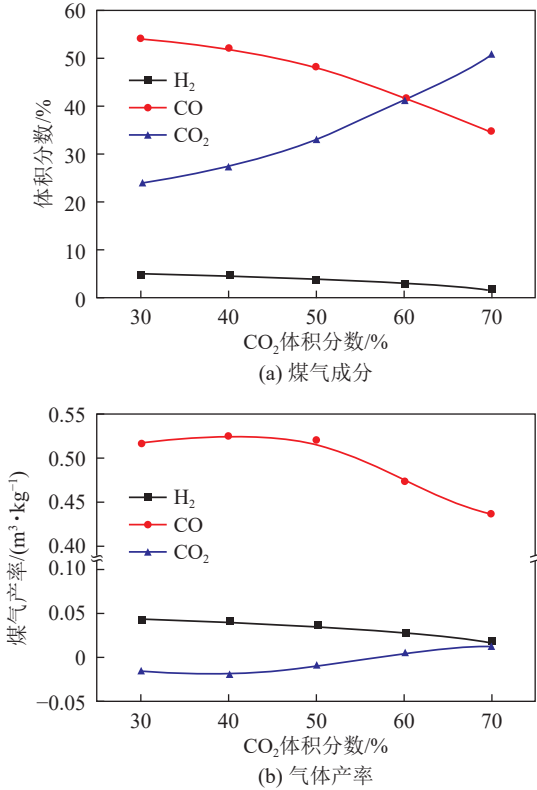


图 15 CO₂ 浓度对还原炉煤气成分及气体产率的影响^[70]
Fig. 15 Effect of CO₂ concentration on the gas composition and net gas yield of the reduction furnace^[70]

以 YHGC 为原料，在相同给料量、活化炉参数及还原炉 O₂/CO₂ 浓度条件下，通过调整 O₂ 流量改变 O₂/C 物质的量比，研究 CO₂ 还原特性。结果表明，当 O₂/C 物质的量比从 0.12 增至 0.27 时，还原炉顶部和中部温度均升高，且中部温度变化更显著，表明燃烧反应区域扩大。图 16 显示了 O₂/C 物质的量比对气体成分及净产率的影响：O₂/C 物质的量比在 0.12-0.22 时，CO 浓度增加，CO₂ 浓度降低，Boudouard 反应（R4）强度增强；当 O₂/C 物质的量比超过 0.22 时，Boudouard 反应（R4）受到抑制，气体成分变化趋于平缓。这是由于 CO₂ 浓度影响燃烧反应区移动，而 O₂/C 物质的量比影响反应区大小。研究确定了 CO₂ 还原的最佳参数：当 CO₂ 体积分数为 40% 时，O₂/C 物质的量比为 0.18

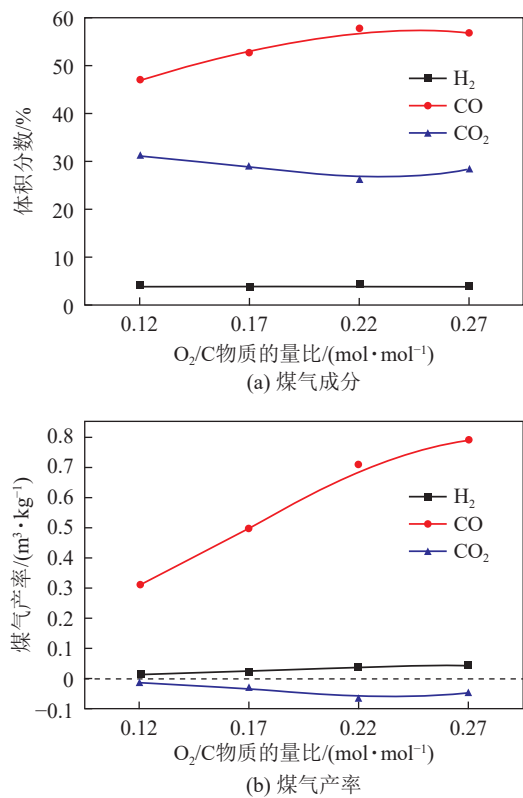


图 16 O₂/C 物质的量比对还原炉煤气成分及煤气产率的影响^[70]

Fig. 16 Effect of O₂/C molar ratio on gas composition and net gas yield in reduction furnace^[70]

时还原效果最佳，CO₂ 净还原量为 0.021 m³/kg；当 CO₂ 体积分数为 50% 时，O₂/C 物质的量比为 0.22 时 CO₂ 净还原量最大，达 0.065 m³/kg。

流态化活化过程对不同种类的循环流化床气化飞灰的反应性影响不同，通过流态化活化过程可缩小原料间的差异，使其具有相对一致的特性，从而有利于进一步转化并实现 CO₂ 高效还原。比较而言，YHGC 比表面积大，反应性高，通过流态化活化过程提高了飞灰的反应性，有利于 CO₂ 还原。该研究为实现 CO₂ 热还原提供了技术参考，其成果有助于优化流态化活化及气固活化态热燃料的进一步还原工艺，对推动 CO₂ 的资源化利用具有重要意义，可为后续相关研究和技术验证提供数据支持。

4.2 燃烧特性

将流态化活化技术制备的气固活化态类气体燃料进一步在 O₂/CO₂ 气氛下进行燃烧，可实现燃烧中碳捕集^[71-74]。LYU 等^[75] 研究了气固活化态类气体燃料在 O₂/CO₂ 气氛下的燃烧特性，在下行燃烧室内，设置了 2 种二次气体喷嘴位置、3 种三次气体位置布置以及 4 种二次氧比例。试验过程中，流化床反应器内的燃烧温度保持均匀，出口煤气中的 CO₂ 体积分数达到约 90%。当二次气体喷嘴位于中

心位置时，类气体燃料的燃烧反应分散至下行燃烧室上部的低氧空间，温度分布均匀度提升，实现了无焰燃烧（图 17）。在保证较高燃烧效率的前提下，NO 排放量降低了约 50%。通过特定的三次气体位置布置，NO 排放量可进一步降低，但代价是燃烧效率有所下降。

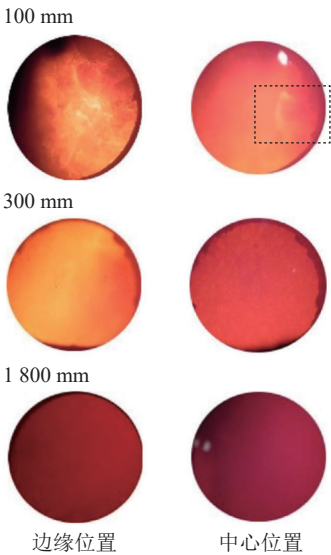


图 17 下行燃烧室火焰观察窗^[75]

Fig. 17 Photos of the flame observation windows in the down-flow combustion chamber^[75]

LIU 等^[63] 研究结果表明，在保证 O₂ 浓度相同的条件下，CO₂ 的存在会导致流化床反应器的温度低于空气气氛下的温度；随着一次风 O₂ 浓度增加，反应器中部温度升高，当气氛中的 O₂ 浓度增至 27% 时，反应器的温度与空气气氛相当。在相近的实验参数条件下，以半焦为原料时炉膛温度比神木烟煤高约 50 ℃。半焦燃烧时挥发分释放少、含碳量高，燃尽所需燃烧区域比烟煤长；随着燃烧器中 O₂ 浓度增加，半焦在下行燃烧室中的燃烧温度显著上升，还原区前移，其结果如图 18 所示。提高二次风 O₂ 浓度会使烟煤的 NO 排放减少，但半焦的 NO 排放量会增加。在 O₂/CO₂ 气氛中，由于二次风和三次风 O₂ 体积分数高且烟煤含碳量低，其 NO 排放高于空气气氛。半焦的含碳量高，需要更高的 O₂ 浓度以点燃高温气固活化态热燃料并且需要更长的燃烧区域以燃尽，当一次风 O₂ 浓度较低时无法实现高效燃烧，提高一次风 O₂ 浓度时，燃烧效率提高，但 NO 排放增加，而烟煤在低一次风 O₂ 浓度时也能完全燃烧，燃料改性增强，并且 NO 排放减少。

为深入探究 O₂/CO₂ 物质的量比对氮元素迁移转化的影响，DING 等^[76] 以小型试验台上获取高温煤焦为原料，利用热重质谱联用分析技术开展了研

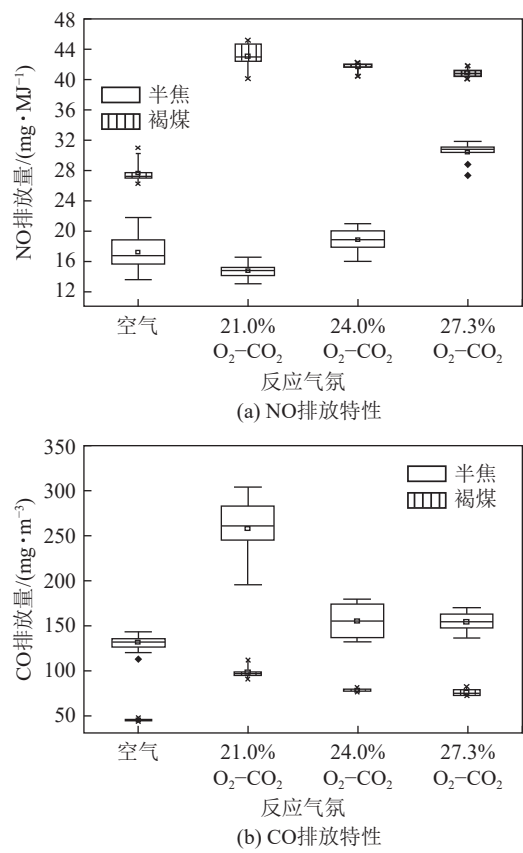


图 18 下行燃烧室 NO 和 CO 排放特性^[63]

Fig. 18 Characteristics of NO and CO emissions from downward combustion chamber^[63]

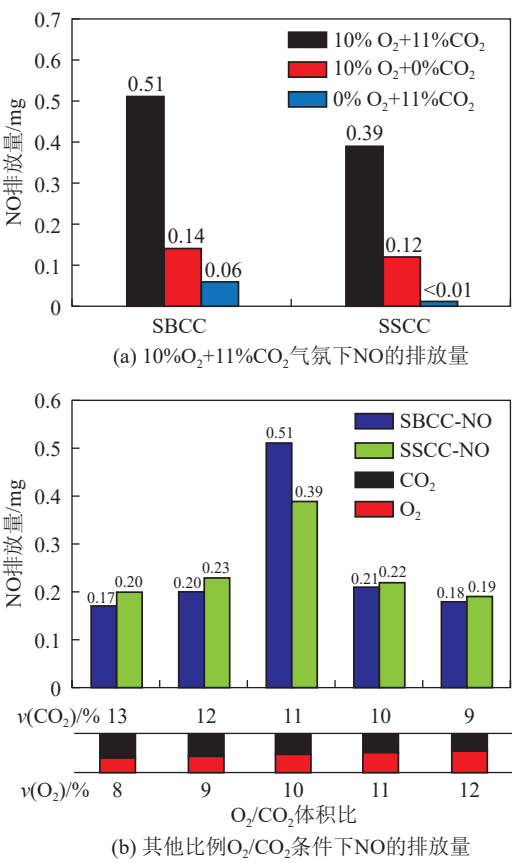


图 19 不同试验条件下 NO 的排放量对比结果^[76]

Fig. 19 Comparison results of NO emissions under different experimental conditions^[76]

究。实验以 Ar 为载气，设定 O₂ 和 CO₂ 体积分数总和为 21%，通过等效特征谱分析（ECSA）方法定量分析了不同比值下气体产物的生成规律，结果如图 19 所示。在 11%CO₂+10%O₂+79%N₂ 气氛下，NO 排放达到峰值。神木烟煤高温煤焦中 NO、HCN 和 N₂ 的析出时间早于神木半焦，且逸出温度范围更宽。高浓度 CO 的还原性促进了（NO+CO→0.5N₂+CO₂）反应，减少 NO 释放。随着 O₂/CO₂ 体积比增加，神木烟煤和半焦的失重温度区间变窄，最大失重速率增大；燃烧反应的活化能、着火温度、燃尽温度和最大失重温度均降低，在纯 O₂ 气氛下达到最低值。研究为理解煤炭燃烧和 NO 的转化和排放机制提供了参考。

5 结语与展望

碳捕集及利用技术在应对全球气候变化、保障能源安全和推动工业可持续发展等方面具有重要意义。笔者及项目团队提出的流态化活化技术，为碳捕集及利用相关领域的发展提供了新的可能方向。在流态化活化过程中，碳基燃料可转化为高温气固活化态类气体燃料，类气体燃料通过富氧燃烧，可

以实现碳捕集；或者通过富氧气化制取富 CO 合成气，用于化学品合成，实现 CO₂ 资源化利用。未来，流态化活化技术相关研究可从以下几个方向开展：

1）拓宽燃料适应性。虽然流态化活化技术已取得一定研究成果，但是在燃料适应性、CO₂ 高效还原等方面仍存在广阔的研究空间。燃料物性对其流态化活化特性影响显著，后续应针对不同类型的燃料开展系统性研究，深入探究不同工况条件下煤气生成特性、半焦活化特性等。通过活化温度、氧气浓度、停留时间等运行参数优化，全面掌握不同类型燃料的最佳活化条件，拓展技术的燃料适应性，进一步提升燃料的能源综合利用效益。

2）建立流态化活化技术数据库。流态化活化涉及的化学反应过程复杂、影响因素繁多，建立全面、系统的流态化活化技术数据库对于技术迭代创新和推广应用至关重要。目前，人工智能（AI）在能源领域的应用正展现出巨大潜力。利用 AI 算法对复杂的流态化活化过程建模和优化，通过大量实验数据训练，有望实现 AI 针对不同流态化活化工况下煤气组成和产率、CO₂ 还原率、半焦特性等关键指标的精准预测，降低流态化活化新工艺研发周期

和开发成本。同时, 利用 AI 技术还可以进行流态化活化过程的实时监测和智能控制, 根据用户需求自动调整工况操作参数, 提高生产效益和装置运行稳定性。通过建立流态化活化技术数据库, 可以为科研人员和生产企业提供全面的数据支持, 促进技术创新和产业发展。

3) 制定流态化活化技术标准。随着流态化活化技术发展和推广应用, 制定相应的技术标准势在必行。制定标准需要考虑多个方面: 在技术指标方面, 明确流态化活化过程的关键参数范围; 在设备设计和制造方面, 规范流态化反应器型号和结构尺寸; 在操作运行方面, 制定调试和运行导则, 确保设备安全性和可靠性。制定技术标准有助于推动流态化活化技术的规范化发展, 提高技术的市场竞争力和应用水平。

4) 加强与工业系统耦合验证。流态化活化技术既可以作为整体技术独立运行, 亦可以作为单元技术, 与其它系统工艺耦合。开展流态化活化技术与其它工业系统的耦合运行研究和技术验证, 对于技术的进一步推广应用至关重要。具体地, 可以与钢铁、化工等代表性工业生产流程进行耦合, 将流态化活化装置作为前置的能源供应单元。在具体系统耦合设计过程, 需要研究如何优化技术与现有工业系统的接口设计, 解决诸如设备兼容性、运行控制等实际问题, 还需全面评估系统耦合运行的稳定性和可靠性, 以及整个生产工序的经济性。通过工业等级技术示范, 积累长周期耦合运行数据, 为流态化活化技术的大规模推广应用提供有力支撑。

参考文献 (References) :

[1] International Energy Agency. 《CO₂ Emissions in 2023》[EB/OL]. [https://www.iea.org/reports/CO₂-emissions-in-2023](https://www.iea.org/reports/CO2-emissions-in-2023).

[2] ZHU H Y, JIANG M H, ZHANG D D, et al. Carbon neutrality pathways exploration-a state-of-the-art study: Key technological advancements, current challenges, and potential opportunities[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, 60: 103489.

[3] 谢克昌. 因地制宜推进区域能源革命的战略思考和建议 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(1): 1-6.

XIE Kechang. Strategic thinking and suggestions on promoting regional energy revolution based on local conditions[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(1): 1-6.

[4] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(7): 2197-2211.

XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(7): 2197-2211.

[5] 吕清刚, 柴祯. “双碳” 目标下的化石能源高效清洁利用 [J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(4): 541-548.

LYU Qinggang, CHAI Zhen. Highly efficient and clean utilization of fossil energy under carbon peak and neutrality targets[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(4): 541-548.

[6] SEDIGHPOUR A, KHOSHBAKHTI SARAY R, MIRMASOUMI S, et al. Optimization of a combined gas turbine and steam Rankine cycle utilizing the chemical looping combustion (CLC) reactor for CO₂ capture and Storage: Towards enhanced efficiency and Cost-Effectiveness[J]. *Fuel*, 2024, 371: 132015.

[7] ZHENG Y W, ZENG X L, LIU J H, et al. Impact of energy integration on post-combustion CO₂ capture: A comparative analysis of chemical absorption and calcium looping technologies in coal-fired and natural gas combined cycle power plants[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 359: 130756.

[8] 王晶, 廖昌建, 王海波, 等. 锅炉低氮燃烧技术研究进展 [J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(2): 99-114.

WANG Jing, LIAO Changjian, WANG Haibo, et al. Research progress of low-NO_x combustion technology for boilers[J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(2): 99-114.

[9] 江蓉, 张进, 李小姗, 等. 基于富氧燃烧的 CO₂ 压缩纯化技术研究进展 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(11): 3914-3925.

JIANG Rong, ZHANG Jin, LI Xiaoshan, et al. Research progress of CO₂ compression purification technology based on oxygen-enriched combustion[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(11): 3914-3925.

[10] 王长安, 车得福. O₂/CO₂ 燃烧技术研究进展 1: 燃烧与传热特性 [J]. *热力发电*, 2011, 40(5): 10-14, 19.

WANG Chang'an, CHE Defu. Progress in research of O₂/CO₂ combustion technology 1: Combustion and heat transfer behavior[J]. *Thermal Power Generation*, 2011, 40(5): 10-14, 19.

[11] LIU H, ZAILANI R, GIBBS B M. Comparisons of pulverized coal combustion in air and in mixtures of O₂/CO₂[J]. *Fuel*, 2005, 84(7-8): 833-840.

[12] LUPION M, ALVAREZ I, OTERO P, et al. 30 MWth CIUDEN oxy-cfb boiler-first experiences[J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 6179-6188.

[13] NORMANN F, ANDERSSON K, LECKNER B, et al. Emission control of nitrogen oxides in the oxy-fuel process[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, 35(5): 385-397.

[14] 郑楚光, 赵永椿, 郭欣. 中国富氧燃烧技术研发进展 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(23): 3856-3864.

ZHENG Chuguang, ZHAO Yongchun, GUO Xin. Research and development of oxy-fuel combustion in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(23): 3856-3864.

[15] 郭军军, 张泰, 李鹏飞, 等. 中国煤粉富氧燃烧的工业示范进展及展望 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(4): 1197-1208, 1526.

GUO Junjun, ZHANG Tai, LI Pengfei, et al. Industrial demonstration progress and trend in pulverized coal oxy-fuel combustion in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(4): 1197-1208, 1526.

[16] 葛臣, 王传浩, 李诗媛. 循环流化床富氧燃烧技术研究进展 [J]. *工程热物理学报*, 2023, 44(3): 840-849.

GE Chen, WANG Chuanhao, LI Shiyuan. A review on the progress of oxy-fuel combustion technology in circulating fluidized bed[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(3): 840-849.

[17] 王越明, 刘慧敏, 仇兴雷, 等. 富氧燃烧颗粒物生成和灰沉积特性研究进展 [J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(2): 17-30.

WANG Yueming, LIU Huimin, QIU Xinglei, et al. Research progress on the characteristic of particulate matter formation and

- ash deposition in oxy-fuel combustion[J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(2): 17–30.
- [18] 王学斌, 戴高峰, Grigory Yablonsky, 等. 加压富氧燃烧模式下 SO_x/NO_x 强耦合促进 SO_3 形成的机理研究 [J]. *工程热物理学报*, 2020, 41(1): 223–228.
- WANG Xuebin, DAI Gaofeng, YABLONSKY G, et al. Synergistic promotion of SO_3 formation with SO_x/NO_x coexisting in pressurized oxy-combustion[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 41(1): 223–228.
- [19] CCS. Carbon capture and storage [EB/OL]. <https://ecra-online.org/research/ccs/>, 2023.
- [20] RABOVITSER J, BRYAN B, NESTER S, et al. Methane de- NO_x for utility PC boilers[M]. 2002.
- [21] RABOVITSER J, BRYAN B, KNIGHT R, et al. Development and testing of a novel coal preheating technology for NO_x reduction from pulverized coal fired boilers[J]. *Gas*, 2003, 1: 1–17.
- [22] 王帅, 刘洋, 刘愿武, 等. 煤粉预热低 NO_x 燃烧技术进展 [J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(4): 33–41.
- WANG Shuai, LIU Yang, LIU Yuanwu, et al. A review of preheating-low NO_x combustion coupling technology of pulverized coal[J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(4): 33–41.
- [23] LIU C C, HUI S E, PAN S, et al. Experimental investigation on NO_x reduction potential of gas-fired coal preheating technology[J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(9): 6089–6097.
- [24] LIU C C, HUI S E, PAN S, et al. The influence of air distribution on gas-fired coal preheating method for NO emissions reduction[J]. *Fuel*, 2015, 139: 206–212.
- [25] 王帅, 龚彦豪, 牛艳青, 等. 煤粉预热-燃烧耦合过程中 NO 生成研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(9): 2951–2959.
- WANG Shuai, GONG Yanhao, NIU Yanqing, et al. Study on NO formation during preheating-combustion coupling of pulverized coal[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(9): 2951–2959.
- [26] ZHANG H, JIA Z, MAO J X, et al. Research on high temperature air combustion technology via primary air enrichment and preheating burner[J]. *Journal of Power Engineering*, 2008, 28(1): 36–39.
- [27] 贾臻, 毛健雄, 尹正军, 等. 煤粉浓缩预热低 NO_x 燃烧器 (PRP) 燃烧器 [C]//贵州省科学技术协会. “建设资源节约型、环境友好型社会——节能、环保、可持续发展” 研讨会论文集. 贵阳, 2006: 7–17.
- [28] 王金华, 王乃继. 散煤资源清洁利用工程示范: 现代煤粉工业锅炉 [J]. *煤炭工程*, 2016, 48(9): 1–5, 10.
- WANG Jinhua, WANG Naiji. Demonstration project of high efficiency pulverized coal fired industrial boiler for bulk coal clean utilization[J]. *Coal Engineering*, 2016, 48(9): 1–5, 10.
- [29] ZHANG H, YUE G X, LU J F, et al. Development of high temperature air combustion technology in pulverized fossil fuel fired boilers[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 2779–2785.
- [30] 牛天钰. 高温煤基燃料燃烧和氮氧化物生成特性的试验研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2008.
- [31] WANG J, ZHU J G, LU Q G. Experimental study on combustion characteristics and NO_x emissions of pulverized anthracite preheated by circulating fluidized bed[J]. *Journal of Thermal Science*, 2011, 20(4): 355–361.
- [32] 吕清刚, 王俊, 朱建国. 循环流化床预热的无烟煤粉燃烧特性试验研究 [J]. *锅炉技术*, 2011, 42(5): 23–27.
- LU Qinggang, WANG Jun, ZHU Jianguo. Experimental study on the combustion characteristics of pulverized anthracite preheated by circulating fluidized bed[J]. *Boiler Technology*, 2011, 42(5): 23–27.
- [33] 周祖旭. 细粉碳燃料在循环流化床的流动特性研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2015.
- [34] 刘玉华, 刘敬樟, 吕清刚, 等. 煤粉流态化预热气态组分 CO/CO_2 生成转化特性研究 [J]. *洁净煤技术*, 2020, 26(4): 140–146.
- LIU Yuhua, LIU Jingzhang, LYU Qinggang, et al. Study on the formation and conversion characteristics of gaseous component CO/CO_2 with fluidized preheating pulverized coal[J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26(4): 140–146.
- [35] ZHANG Y, ZHU J, LYU Q, et al. The ultra-low NO_x emission characteristics of pulverized coal combustion after high temperature preheating[J]. *Fuel*, 2020, 277: 118050.
- [36] LIU J, LIU Y, ZHU J, et al. Bituminous coal deep regulated ultra-low NO_x flameless combustion with fluidized self-preheating fuel: A 2 MW_{th} experimental study[J]. *Fuel*, 2021, 294: 120549.
- [37] ZHU S, LYU Q, ZHU J, et al. Low NO_x emissions from pulverized coal moderate or intense low-oxygen dilution combustion in O_2/CO_2 preheated by a circulating fluidized bed[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(10): 10956–63.
- [38] 吕清刚, 朱书骏, 朱建国, 等. 煤粉预热燃烧技术研发进展 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(18): 6535–47.
- LYU Qinggang, ZHU Shujun, ZHU Jianguo, et al. Research and development on preheated combustion of pulverized coal[J]. *Proceeding of the CSEE*, 2022, 42(18): 6535–47.
- [39] 田继林, 朱建国, 朱书骏, 等. 60 t/h 煤粉预热燃烧锅炉宽负荷运行特性研究 [J]. *热力发电*, 2024, 53(4): 133–140.
- TIAN Jilin, ZHU Jianguo, ZHU Shujun, et al. Wide load operation characteristics of a 60 t/h boiler with pulverized coal preheating[J]. *Thermal Power Generation*, 2024, 53(4): 133–140.
- [40] 虎慧, 张海霞, 朱治平. 温度对半焦非催化还原 CO_2 的影响 [J]. *煤炭学报*, 2023, 48(S2): 748–756.
- HU Hui, ZHANG Haixia, ZHU Zhiping. Effect of temperature on non-catalytic reduction of CO_2 by semi-coke[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(S2): 748–756.
- [41] 张海霞, 虎慧, 朱治平, 等. C/CO_2 物质的量比对 CO_2 气氛流态化预热活化半焦特性的影响 [J]. *煤炭学报*, 2024, 49(4): 2067–2075.
- ZHANG Haixia, HU Hui, ZHU Zhiping, et al. Effect of C/CO_2 molar ratio on CO_2 atmosphere fluidized preheating activation characteristics of semi-char[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(4): 2067–2075.
- [42] 郭树才. 煤化工工艺学 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [43] KHAN S, YUAN H P, WANG Y H, et al. Pathways to carbon neutrality in G7 economies: The role of technology-innovation and R&D in reducing CO_2 emissions[J]. *Gondwana Research*, 2024, 128: 55–68.
- [44] ABBAS S, SAQIB N, MOHAMMED K S, et al. Pathways towards carbon neutrality in low carbon cities: The role of green patents, R&D and energy use for carbon emissions[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2024, 200: 123109.
- [45] 蔡睿, 朱汉雄, 李婉君, 等. “双碳”目标下能源科技的多能融合发展路径研究 [J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(4): 502–510.
- CAI Rui, ZHU Hanxiong, LI Wanjuan, et al. Development path of energy science and technology under “dual carbon” goals: Perspective of multi-energy system integration[J]. *Bulletin of*

Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 502–510.

[46] HUANG C H, TAN C S. A review: CO_2 utilization[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, 14(2): 480–499.

[47] MA J, SUN N N, ZHANG X L, et al. A short review of catalysis for CO_2 conversion[J]. *Catalysis Today*, 2009, 148(3–4): 221–231.

[48] ZHANG Z E, PAN S Y, LI H, et al. Recent advances in carbon dioxide utilization[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 125: 109799.

[49] ZHANG H X, XIAN S X, FAN Y Q, et al. A perspective on sodium-induced agglomeration of Zhundong coal gasification: Experiments and calculations[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2021, 94: 39–48.

[50] ZHANG Y K, ZHANG H X, ZHU Z P. Regasification properties of industrial CFB-gasified semi-char[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, 131(3): 3035–3046.

[51] 韩广怡, 朱治平, 张海霞. 配煤比例及温度对气化反应特性影响[J]. *化学工程*, 2018, 46(4): 57–61, 67.

HAN Guangyi, ZHU Zhiping, ZHANG Haixia. Effect of coal blending ratio and temperature on gasification characteristics[J]. *Chemical Engineering (China)*, 2018, 46(4): 57–61, 67.

[52] ZHANG H X, GUO X W, ZHU Z P. Effect of temperature on gasification performance and sodium transformation of Zhundong coal[J]. *Fuel*, 2017, 189: 301–311.

[53] 董倩, 张海霞, 朱治平. 3 种煤焦的 CO_2 气化反应特性及动力学模型[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(9): 2193–2199.

DONG Qian, ZHANG Haixia, ZHU Zhiping. CO_2 gasification characteristics and dynamic models of three coal chars[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(9): 2193–2199.

[54] JIANG D H, ZHANG H X, XIAN S X, et al. Effect of coal blending on gasification performance and agglomeration[J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(3): 2772–2780.

[55] ZHANG H X, ZHANG Y K, ZHU Z P, et al. Circulating fluidized bed gasification of low rank coal: Influence of O_2/C molar ratio on gasification performance and sulphur transformation[J]. *Journal of Thermal Science*, 2016, 25(4): 363–371.

[56] 梁晨, 吕清刚, 张海霞, 等. 循环流化床煤富氧-水蒸气气化实验研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2019, 25(2): 105–111.

LIANG Chen, LÜ Qinggang, ZHANG Haixia, et al. Experimental investigation of circulating fluidized bed gasification in O_2 -enriched air and steam[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2019, 25(2): 105–111.

[57] GUO X W, ZHANG H X, ZHU Z P. The effect of O_2/C ratio on gasification performance and sodium transformation of Zhundong coal[J]. *Fuel Processing Technology*, 2019, 193: 31–38.

[58] FAN Y Q, XIAN S X, LYU Q G, et al. Investigation on the slagging characteristics of high-AAEM lignite under different atmospheres[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2021, 95: 154–165.

[59] LIU Y H, LIU J Z, LYU Q G, et al. Effects of oxygen partial pressure on physical and chemical characteristics of fuel and deep low NO_x emission[J]. *Fuel*, 2021, 286: 119339.

[60] LIANG C, ZHANG H X, ZHU Z P, et al. CO_2 - O_2 gasification of a bituminous coal in circulating fluidized bed[J]. *Fuel*, 2017, 200: 81–88.

[61] LIU J P, ZHU Z P, JIANG H B, et al. Gasification of bituminous coal in a dual-bed system at different air/coal ratios[J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(2): 496–500.

[62] ZHANG S Y, LIANG C, WANG X F, et al. Experimental study and equilibrium analysis on thermal reduction of CO_2 by CFB gasification[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2024, 115: 101623.

[63] LIU Y H, LIU J Z, LYU Q G, et al. Comparison of oxy-fuel preheated combustion characteristics of high- and low- volatility carbon-based fuels[J]. *Fuel*, 2022, 330: 125583.

[64] 侯吉礼. 兰炭清洁燃烧及有害排放物的生成规律研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.

[65] 赵奇. 中国褐煤资源清洁高效利用现状[J]. *洁净煤技术*, 2018, 24(2): 9–14.

ZHAO Qi. Clean and efficient utilization of lignite resources in China[J]. *Clean Coal Technology*, 2018, 24(2): 9–14.

[66] 张海霞, 刘伟伟, 于旷世, 等. 循环流化床工业气化炉高钠煤配煤气化[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(4): 1021–1027.

ZHANG Haixia, LIU Weiwei, YU Kuangshi, et al. High sodium blended coal gasification in an industrial circulating fluidized bed[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(4): 1021–1027.

[67] 杨震, 庄恩如, 张建文, 等. 大型电站锅炉采用切向燃烧方式燃用无烟煤的研究[J]. *动力工程*, 2006, 26(6): 766–772.

YANG Zhen, ZHUANG Enru, ZHANG Jianwen, et al. Research on tangential firing of anthracite in large capacity station boilers[J]. *Journal of Power Engineering*, 2006, 26(6): 766–772.

[68] WANG X X, ZHOU B M, WANG Y B, et al. Nitrogen migration and gasification characteristics of pulverized coal using the novel gasification-combustion technology[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 479: 143984.

[69] XIAN S X, ZHANG H X, CHAI Z, et al. Release characteristics of gaseous products during CO_2 gasification of char[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, 140(1): 177–187.

[70] ZHANG S, LIANG C, ZHU Z, et al. Experimental study on CO_2 reduction through activated-reduction technology[J]. *Energies*, 2024, 17: 2164.

[71] 刘玉华, 刘敬樟, 吕清刚, 等. 半焦富氧预热燃烧特性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(5): 1875–1884.

LIU Yuhua, LIU Jingzhang, LYU Qinggang, et al. Study on characteristics of semi-coke with oxy-fuel preheating combustion[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(5): 1875–1884.

[72] ZHU S J, ZHU J G, LYU Q G, et al. NO emissions under pulverized char combustion in $O_2/CO_2/H_2O$ preheated by a circulating fluidized bed[J]. *Fuel*, 2019, 252: 512–521.

[73] 刘玉华, 刘敬樟, 吕清刚, 等. 燃料流态化预热后 NO_x 生成路径及详细机理研究[J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(3): 232–240.

LIU Yuhua, LIU Jingzhang, LYU Qinggang, et al. Study on NO_x migration path and detailed mechanism after fuel fluidized preheating[J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(3): 232–240.

[74] ZHU S J, LYU Q G, ZHU J G, et al. NO emissions under pulverized char MILD combustion in O_2/CO_2 preheated by a circulating fluidized bed: Effect of oxygen-staging gas distribution[J]. *Fuel Processing Technology*, 2018, 182: 104–112.

[75] LYU Q G, ZHU S J, ZHU J G, et al. Experimental study on NO emissions from pulverized char under MILD combustion in an O_2/CO_2 atmosphere preheated by a circulating fluidized bed[J]. *Fuel Processing Technology*, 2018, 176: 43–49.

[76] DING H L, OUYANG Z Q, WANG W Y, et al. Experimental study on the influence of O_2/CO_2 ratios on NO conversion and emission during combustion and gasification of high-temperature coal char[J]. *Fuel*, 2022, 310: 122311.