

流化床载氧体辅助燃烧技术研究进展

董伟¹, 殷柳玲², 曹希², 卜昌盛^{2*}

(1. 中国质量认证中心有限公司, 北京 100070; 2. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要:【目的】载氧体辅助燃烧(oxygen carrier aided combustion, OCAC)作为一种新型燃烧方式,能够通过活性床料来实现氧的动态存储与迁移,从而提升燃料转化效率并降低污染物排放,深入探讨OCAC技术在实际应用中面临的挑战,更好地指导研究和应用。【方法】本文综述流化床OCAC技术的研究进展,着重分析载氧体的理化特性,探讨其在提升燃烧效率、降低污染物排放方面的潜力,并展望其在实际应用中面临的挑战与发展方向。【结果】研究表明OCAC可有效抑制CO与未燃尽碳的排放,替代石英砂床料后,燃料的燃烧性能得到显著提升,烟气中NO浓度也大幅降低,同时具有一定的氧缓冲与稳定燃烧作用。在此基础上,研究者提出了OCAC与富氧燃烧相结合的策略,以进一步提升碳捕集效率和燃烧稳定性。作为应用最广泛的载氧体,铁基载氧体因其资源丰富、价格低廉和环境友好而受到广泛关注。但其循环使用过程中易发生烧结、磨损及反应活性衰退,限制了长期运行的经济性和反应器稳定性。已有研究尝试通过矿物改性、复合氧化物设计及助剂添加等方式改善其抗烧结性与反应性能,但仍需解决材料成本与寿命之间的平衡问题。【结论】总体而言,OCAC技术在燃烧效率提升和碳减排方面展现出良好潜力,但要实现大规模应用,还需建立系统的技术经济评价框架,量化载氧体寿命、补充成本与整体碳减排效益的关系;优化流化床反应器的气固耦合特性,提升运行稳定性;开发高循环稳定性的铁基复合载氧体,实现低成本与高性能的兼顾。未来,随着载氧体设计和反应器工艺的不断优化,OCAC技术有望在清洁高效燃烧与二氧化碳减排中发挥重要作用。

关键词:流化床;载氧体辅助燃烧;富氧燃烧

中图分类号:TK06

文章编号:1674-8069(2025)06-0888-12

文献标志码:A

DOI编号:10.19944/j.eptep.1674-8069.2025.06.003

[引用本文格式]董伟,殷柳玲,曹希,等.流化床载氧体辅助燃烧技术研究进展[J].电力科技与环保,2025,41(6):888-899.

DONG Wei, YIN Liuling, CAO Xi, et al. Research progress of fluidized bed oxygen carrier aided combustion technology[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2025, 41(6):888-899.

Research progress of fluidized bed oxygen carrier aided combustion technology

DONG Wei¹, YIN Liuling², CAO Xi², BU Changsheng^{2*}

(1. China Quality Certification Centre Co., Ltd, Beijing 100070; 2. School of Energy & Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, Jiangsu China)

Abstract: [Objective] Oxygen carrier aided combustion (OCAC) represents an innovative combustion approach that enables dynamic oxygen storage and migration through active bed materials, thereby enhancing fuel conversion efficiency and reducing pollutant emissions. [Methods] This review examines research progress in fluidised bed OCAC technology, exploring its potential for improving combustion efficiency and lowering pollutant emissions, whilst analysing challenges encountered in practical applications and future development directions. [Results] Research indicates it effectively suppresses CO and unburned carbon emissions. Substituting quartz sand bed materials significantly improves fuel combustion performance and substantially reduces NO concentrations in flue gas, while also providing oxygen buffering and combustion stabilisation effects. Building upon this, researchers proposed integrating OCAC with oxygen-enriched combustion to further enhance carbon capture efficiency and combustion stability. As the most widely applied oxygen carrier, iron-based carriers have garnered significant attention due to their abundant resources, low cost, and environmental friendliness. However, their susceptibility to sintering, wear, and reactivity decline during recycling

收稿日期:2025-08-20 录用日期:2025-10-10

Received: 2025-08-20 Accepted: 2025-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(52376116);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX-0727)

limits long-term operational economics and reactor stability. Previous studies have attempted to improve sintering resistance and reactivity through mineral modification, composite oxide design, and additive incorporation. Nevertheless, balancing material cost with service life remains a challenge. **[Conclusion]** OCAC technology demonstrates promising potential for enhancing combustion efficiency and reducing carbon emissions. However, achieving large-scale deployment requires establishing a systematic techno-economic evaluation framework to quantify the relationship between oxygen carrier lifespan, replenishment costs, and overall carbon reduction benefits, optimising gas-solid coupling characteristics in fluidised bed reactors to enhance operational stability and developing iron-based composite oxygen carriers with high cycle stability to achieve both low cost and high performance. In the future, with continuous optimisation of oxygen carrier design and reactor processes, OCAC technology is expected to play a significant role in clean, efficient combustion and carbon dioxide reduction.

Key words: fluidized bed; OCAC technology; oxy-fuel combustion

0 引言

化石能源的利用在促进全球社会科技经济快速发展的同时,排放出大量的 CO_2 ,对地球生态环境造成了负面的影响。世界气象组织发布的《2023年全球气候状况》报告显示^[1],2023年全球多项气候指标将达到新高,大气中 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 浓度分别比工业化前的高出50%、64%和12%;2023年的近地面平均温度将比1850—1900年的高出 $1.45 \pm 0.12\text{ }^\circ\text{C}$ 。为控制全球温室气体排放,世界各国于2016年签署了《巴黎协定》,目标是将全球平均气温较工业化前上升幅度控制在 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 以内^[2]。中国作为《巴黎协定》的缔约方之一,已于2020年正式提出“2030碳达峰·2060碳中和”的重大战略目标^[3]。2021年,在《联合国气候变化框架公约》第26次缔约方大会(COP26)上,《巴黎协定》缔约方制定了完整的实施细则,以落实各国的减排承诺,共同应对气候变化带来的危机和挑战^[4]。研究并开发温室气体减排技术,对于控制全球气候变化具有极为重要的现实意义。

流化床燃烧(fluidized bed combustion, FBC)是一种广泛应用的固体燃料转化技术^[5-6],与其他固体燃料燃烧技术相比,具有燃料灵活、燃烧效率高、排放(NO_x 、 SO_x)低等优点。燃料在流化床中的燃烧效率主要取决于燃料与氧气的混合强度,以及传热传质速率。实现燃料和空气的充分混合对于减少不完全燃烧造成的损失和提高整体燃烧效率至关重要。流化床富氧燃烧条件下, O_2 体积浓度通常需提高至24%~30%才可达到与空气气氛相近的煤燃烧特性。 O_2 浓度提高后,极易出现 O_2 与燃料在空间上分布不均,引起流化床燃烧室局部 O_2 浓度过高、超

温,从而引发灰熔融、结焦、积灰、不完全燃烧增加等众多影响锅炉安全、高效运行的现象发生。如何确保流化床炉内氧气的均匀分布,成为流化床富氧燃烧技术发展所面临的一项重要挑战。2013年,瑞典查尔姆斯理工大学的Thunman等人基于化学链燃烧(chemical looping combustion, CLC)^[7]和三元催化技术(three-way catalytic, TWC)^[8]的原理,首次报道了钛铁矿替代石英砂床料在提升流化床燃烧生物物质效率、改善炉膛氧分布均匀性、降低污染物排放水平的有益效果,并将该燃烧方式命名为“载氧体辅助燃烧(OCAC)”。在过去的10年中,Thunman教授团队针对OCAC下载氧体选取^[6,9]、燃料燃烧特性^[10-11]、中试示范^[12-13]等方面开展了持续性研究。同时,国内外研究机构如:加拿大CanmetENERGY^[14-15]、德国埃尔朗根-纽伦堡大学^[16-17]、英国诺丁汉大学^[18]、韩国能源技术研究院^[19]以及清华大学^[20]、华中科技大学^[21]、东南大学^[22]、南京师范大学^[23-25]等,同步开展OCAC技术研发,验证其在调节炉内氧分布和提升氧与燃料接触几率的有益作用。该技术还引起了众多能源公司关注,如全球能源巨头E.ON集团分别在75MW_{th}^[26]和115MW_{th}^[27]流化床上进行了超12 000 h的示范运行^[28],目前正在进行商业化推广该技术,显示出广阔应用前景。

本文旨在对流化床OCAC技术的最新研究进展进行全面的综述。首先详细介绍OCAC的基本原理,着重分析载氧体的理化特性及其要求;其次,系统介绍不同规模下OCAC的典型示例,分析其在提高燃烧效率、降低污染物排放等方面的有益效果;然后,深入探讨OCAC技术在实际应用中面临的挑战;最后,对OCAC技术的未来发展趋势进行展望,为进一步的研究和应用提供参考。

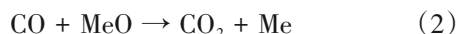
1 流化床载氧体辅助燃烧技术原理

1.1 基本概念及原理

OCAC是利用活性载氧体部分或全部取代流化床内的惰性床料,通过载氧体在反应器内不断发生氧化和还原反应,从而使氧气在整个燃烧室中有效迁移和分布,改善燃料的燃烧条件,提升燃料燃烧效率,优化整个系统的运行性能^[29]。在这个过程中,载氧体发挥着作为“热载体”有效地传递热能和作为“氧载体”为炉内发生的燃烧反应提供必要的氧气双重作用。图1为流化床OCAC的原理示意图,其核心组件包含两部分:一是流化床反应器,指通过气流(如空气、燃料气)向上吹动床料颗粒,使颗粒呈流化状态,气固两相接触面积大、传质传热效率高,且颗粒可通过管道实现循环输送,为载氧体的重复利用提供条件。二是载氧体,指可实现吸氧-释氧循环的固体颗粒,载氧体的核心功能是“氧传递媒介”:在空气侧吸收氧气转化为氧化态,再到燃料侧释放氧气与燃料反应,自身还原为还原态,且循环过程中活性基本保持稳定,无需持续补充。载氧体在流化床中的具体反应过程为:①氧分配:载氧体Me在炉膛富氧区域与O₂发生氧化反应后生成MeO,携带周边环境富余的O₂,这一过程可有效避免炉膛局部氧气浓度过高、燃烧温度过高等问题^[30],氧分配过程可用式(1)描述。



②氧迁移:随着床料在炉内迁移,流动中的载氧体MeO为欠氧环境下的燃料燃烧提供氧,生成Me,改善燃料燃烧条件,减少不完全燃烧热损失。除与碳氢化合物发生还原反应,还与CO、H₂发生反应,如式(2)和式(3)。



③再循环:被还原的载氧体Me经旋风分离器后进入返料器,而后重新回到流化床进行氧化反应。总之,通过载氧体在流化床中的氧化还原反应及宏观流动,实现了氧气的分布和迁移,达到了调节炉内氧气分布、优化燃料燃烧环境的目的。

1.2 载氧体特性

对OCAC技术而言,选择合适的载氧体颗粒至关重要。载氧体在燃烧过程中兼具氧和热量传递的功能,其理化性质直接关系到氧与热量的储存与

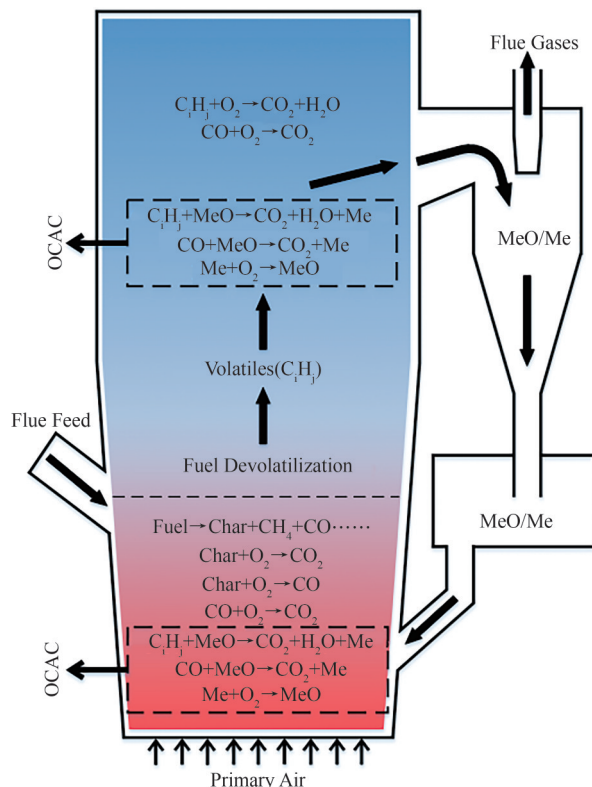
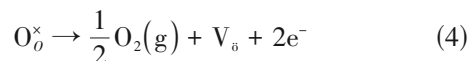


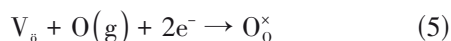
图1 流化床载氧体辅助燃料燃烧原理示意图

Figure 1 Schematic diagram of fluidized bed oxygen carrier assisted fuel combustion principle

迁移效率,从而影响反应系统整体的反应特性及热稳定性。当前,针对载氧体的研究主要集中于开发新型载氧体材料,以及通过改性方法来提升其性能表现这两大方向。载氧体应具备对环境友好、价格低廉、易获得,还需要具有较好的载氧能力、抗结渣能力、机械强度好等特点。载氧体种类繁多,根据其组成成分可大致分为金属基载氧体、非金属基载氧体以及复合载氧体,不同类型的载氧体具有各自独特的物理化学性质和应用特性,但均应具有以下特性^[31]:(1)产生氧离子、电子或空穴;(2)促进晶格氧的扩散;(3)为表面反应提供活性位点。载氧体的晶格氧迁移机理利用可用 Kröger-Vink 法表示为^[32],



上式中, $\text{O}_o^{\times}$ 为晶格氧, V_o 为氧空位, e^- 为电子。当载氧体中的晶格氧与燃料发生反应时,其晶体内部会形成氧空位。随后,载氧体通过与气相中的氧气反应重新被氧化,填补所产生的氧空位。



由于铁基载氧体具有对环境友好、天然无毒以及价格低廉等显著优势,作为载氧体辅助燃烧工业化的首选材料,受到了广泛关注。在 OCAC 技术的工业运用中,主要选用天然铁矿石(钛铁矿、赤铁矿、锰铁矿)和含铁工业固废(铁粉尘、钢渣)及其他廉价富铁材料为床料。

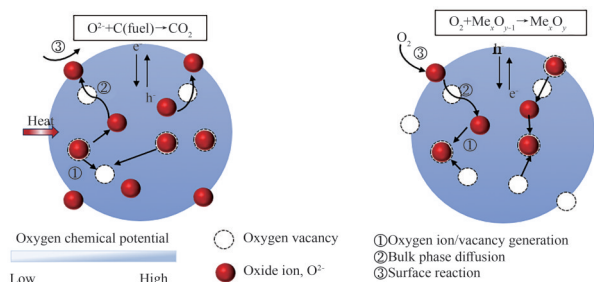


图2 载氧体的氧转移机制^[31]

Figure 2 Oxygen transfer mechanisms in oxygen carrier^[31]

铁基载氧体的氧迁移机理如图2所示,氧化离子(O^{2-})在能量激发下迁移到载氧体表面与燃料反应生成 H_2O 和 CO_2 ,载体的表面和内部形成化学势梯度,导致更多的 O^{2-} 向表面迁移。同时,电子(e^-)移动到粒子的中心以平衡局部电荷。当被还原的载氧体粒子被氧化时,电子从内部迁移到表面与 O^{2-} 发生反应,生成 O^{2-} 配体来填补在还原过程中形成的氧空位,载氧体被重新氧化。一般情况下,氧迁移机制与燃料燃烧机理相结合,会因不同的反应条件而呈现出显著差异。例如 Shen 等^[33]提出了赤铁矿催化石油焦燃烧的机理,认为赤铁矿并不直接加速碳的燃烧,而是主要参与一氧化碳氧化的中间燃烧过程,在与焦炭颗粒的物理接触点,赤铁矿将晶格氧转移以氧化一氧化碳,增强了气态氧扩散的驱动力。晶格氧的迁移使一些 Fe 位点部分还原,赤铁矿表面的气相氧会迅速填充这些氧缺陷位点。赤铁矿促进了焦炭的燃烧,并降低 CO 的生成。但是, Yin 等^[25]在富氧燃烧气氛下发现, AR- Fe_2O_3 替代石英砂床料后,烟煤、无烟煤、褐煤焦的燃烧特性得以改善;然而,在赤铁矿和钢渣的辅助下,褐煤炭的燃烧表现出与用 AR- Fe_2O_3 代替石英砂床材料时相反的特征。铁基载氧体在这一过程中不仅展现出促进煤焦燃烧的能力,同时也显现出对其燃烧的抑制

作用。结合热力学计算对 OCAC 机理的分析表明,铁基载氧体具有双重作用:向燃料提供氧气,同时与燃料竞争可用氧。当煤焦表现出高反应性时,载氧体和燃料之间对氧气的竞争比载体提供的氧气更为重要。Liu 等^[34]利用密度泛函理论(density functional theory, DFT)计算表明,晶格氧的反应性不仅与配位金属原子的类型和数量有关,而且与晶格氧的空间结构有关。

从氧化还原的过程来看,氧化铁主要存在 3 种氧化态的转换: $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4$, $Fe_3O_4 \rightarrow FeO$ 及 $FeO \rightarrow Fe$ 。然而,这 3 种氧化态的转变面临着一系列的挑战。例如, Fe_2O_3 在实际转化过程中没有完全还原至 FeO 和 Fe,因此转化过程中提供的氧量有限^[35],其载氧能力仅为 0.03~0.10^[36]。此外,铁基载氧体的反应活性相对较低,在高温下可能会发生烧结现象,影响其循环使用性能^[35]。虽可通过添加惰性载体(如 Al_2O_3 、 TiO_2 、水泥等)提高载氧体的孔隙率和机械强度,进而提高载氧体的热稳定性,延长载氧体的使用寿命,但铁氧化物和惰性载体之间会发生相互作用产生惰性成分的化合物如 $FeAl_2O_4$ 等,这些物质会降低载氧体的反应活性。

2 研究现状

2.1 流化床载氧体辅助燃烧

OCAC 概念从被提出之后,受到学者的广泛关注。在不同规模的流化床反应器以及反应条件下验证了 OCAC 技术的有效性和可靠性。表 1 显示了实验室、中试和工业规模 OCAC 研究进展。

在实验室规模上,有学者对铁基载氧体床料下燃料的燃烧特性和污染物排放特性进行了研究。Wang 等^[20]在小型鼓泡流化床反应器上,针对不同空燃比条件下,以钛铁矿、锰矿以及两种钢渣替代石英砂作为床料时,对木炭燃烧过程中 CO 和 NO 排放的影响进行了深入研究。研究发现,在相同的碳转化率下,载氧体的加入显著降低了烟气中的 CO 和 NO 浓度。这一现象表明,载氧体的使用不仅提高了木炭的燃烧效率,还有效减少了 NO 的排放。Ma 等^[21]深入研究流化风速、空燃比以及载氧体掺混比例对煤燃烧的影响,发现载氧体的加入显著提高了 CO_2 的生成率。对反应后的载氧体进行 XRD 检测分析,结果显示其主要活性相为 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 ,充分验证了载氧体在反应器中确实发生了氧化还原反应。

表1 流化床载氧体辅助燃烧相关研究
Table 1 Development of fluidized bed OCAC

规模	载氧体	反应器	研究内容	参考文献
实验室	钛铁矿、锰矿、钢渣	鼓泡流化床	考察不同操作条件下对钛铁矿、锰矿、钢渣燃烧木炭的影响	Wang等 ^[20]
	铁矿石	鼓泡流化床	考察不同工况下对含47%Fe ₂ O ₃ 、90% Fe ₂ O ₃ 的铁矿石对燃烧木屑的影响	Ma等 ^[21]
	钛铁矿、合成锰酸钙	鼓泡流化床	OCAC下载氧体对H ₂ 、CH ₄ 、CO组成的混合气转化率的影响	Stenberg等 ^[37]
	Fe ₂ O ₃	鼓泡流化床	添加少量Fe ₂ O ₃ 对CH ₄ 燃烧效率影响	Chadeesingh等 ^[38]
中试	钛铁矿	Chalmers 12 MW _{th} CFB	引入燃料脉冲,验证OCAC下氧缓冲能力	Lind等 ^[26]
	钛铁矿	Chalmers 12 MW _{th} CFB	试验周期6周以上连续加料,观察钛铁矿理化特性	Corcoran等 ^[39]
	钢渣	Chalmers 12 MW _{th} CFB	不同掺混比例下的钢渣对燃烧木屑时CO和NO生成量的影响	Hildor等 ^[40]
	赤铁矿	50 kW _{th} Oxy-FBC	赤铁矿对加拿大煤燃烧特性的影响	Hughes等 ^[14]
	钛铁矿	0.3 MW _{th} CFB	以钛铁矿为床料改进煤和石油焦燃烧	Li等 ^[41]
工业	钛铁矿	75 MW _{th} CFB	超12 000 h钛铁矿床料下燃烧MSW	Lind等 ^[28]
	钛铁矿	115 MW _{th} CFB	不同钛铁矿掺混比例下燃烧废木3周	Moldenhauer等 ^[27]
	钛铁矿	75 MW _{th} CFB	对钛铁矿中微量元素迁移的考察	Ivana等 ^[42]

Stenberg等^[37]在小型鼓泡床反应器上,探究了钛铁矿替换石英砂床料后对CH₄燃烧效率的影响,研究发现在钛铁矿床料下能够将CH₄的燃烧效率从石英砂床料下的84.7%提升至100%,分析指出,钛铁矿能够通过氧化反应携带反应装置底部的氧气,达到顶部后再通过还原反应释放氧从而氧化顶部的可燃气体。Chadeesingh等^[38]同样在鼓泡流化床中研究发现加入Fe₂O₃能够提高CH₄燃烧效率,CO、CH₄、C₂H₄等不完全燃烧的气体浓度降低,床层上部的O₂浓度得到提升,且在床料中检测到被还原后的Fe₃O₄颗粒,表明载氧体床料通过Fe₂O₃与Fe₃O₄之间的循环反应,在富氧区携带氧并在贫氧区释放氧,从而改善了炉内氧分布并促进了CH₄燃烧。

实验室研究结果显示,铁基载氧体床料在提升燃料燃烧效率和控制污染物排放方面展现出显著优势,为流化床铁载氧体辅助燃烧技术的实际应用提供了有力的理论和数据支撑。为了进一步验证OCAC技术在更接近实际工业生产条件下的性能,Chalmers^[26]在12 MW循环流化床上通过在5 s内引入燃料负载增加8 MW对应的燃料脉冲,研究了该过程的阶跃响应,发现在引入燃料脉冲后,石英砂床料下CO排放浓度迅速升高后降低,钛铁矿床料下CO排放浓度几乎保持不变,载氧体(OC)作为床层材料在炉内运动,可以提供额外的氧缓冲,提高

锅炉运行的安全性和可靠性。Li等^[41]在0.3 MW_{th}循环流化床(CFB)中试燃烧器上,对OCAC技术在燃煤中的应用效果进行综合评价。结果表明,用钛铁矿代替惰性床料后,旋风分离器出口CO排放量降低,OCAC使烟气中SO₂和NO_x的排放量分别降低和升高,OCAC促进煤灰的自脱硫反应,减小燃烧室中的可还原区域,从而削弱NO_x的还原,随着载氧体在床料中占比的增加,烟气浓度变化增大,如图3所示。加拿大Canmets能源研究中心Hughes等^[14]在加压流化床上对比了以钛铁矿与石英砂作为床料时加拿大煤(高谷烟煤、白杨河褐煤)的燃烧特性,研究结果显示钛铁矿替换石英砂床料后可以显著降低CO排放量,密相区温度降低近10℃,燃烧性能大幅提升。

随着OCAC技术显著提升燃料燃烧效率,其潜力已吸引了众多能源公司的目光,促使该技术在工业规模上得以应用。全球能源巨头E.ON集团更是开展了超过12 000 h的示范运行,以验证OCAC技术在实际生产中的可行性与稳定性^[28]。此外,Lind等^[28]在75 MW_{th}循环流化床锅炉上,以钛铁矿替换石英砂床料,在保证生活垃圾充分燃烧的同时,入炉空气量可以减少25%,热输出提高了13%。Moldenhauer等^[27]在115 MW_{th}燃用木屑的循环流化床锅炉上得到了同样结果:钛铁矿床料可以减少近

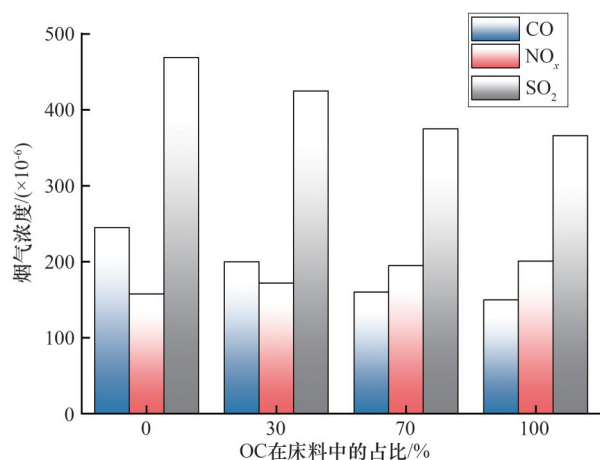


图3 不同载氧体占比下,旋风分离器出口的CO、NO_x和SO₂的浓度^[14]

Figure 3 The concentrations of CO, NO_x and SO₂ at the outlet of the cyclone separator under different proportions of oxygen carriers^[14]

30% 的空气量,锅炉也负荷从 115 MW_{th} 提高到了 123 MW_{th}。

上述关于 OCAC 的研究成果充分证实,OCAC 技术在实现炉内氧分布与燃料燃烧精准匹配方面具备高度可行性,同时有力凸显了铁基载氧体所发挥的关键“氧载体”作用。在整个燃烧进程中,载氧体床料深度参与其中,通过自身独特的氧化还原反应机制,不断调整炉内不同区域的氧气浓度,使得炉内氧分布得到有效改善,为燃料的充分燃烧创造了更为有利的条件,进而显著提升了燃料的燃烧效率,为能源高效利用提供了坚实保障。

2.2 流化床载氧体辅助富氧燃烧

富氧燃烧,又称 O₂/CO₂ 燃烧,是利用空气分离所获得的 O₂ 和部分循环烟气来代替空气与燃料组织燃烧,提高了烟气中 CO₂ 的浓度,实现 CO₂ 的捕集。自 Abraham^[43] 于 1982 年首次提出富氧燃烧方式以来,这一技术在全球范围内引发了广泛的关注。国内外众多研究机构和企业纷纷投身于探索富氧燃烧的机理及其在工业领域的应用研究,推动了相关技术的快速发展。流化床富氧燃烧结合了流化床燃烧和富氧燃烧的优势,是一种极具发展与应用前景的洁净高效燃煤及 CO₂ 捕集技术。但在流化床富氧燃烧过程中,随着氧气浓度的进一步提升,炉内氧气与燃料的空间分布不均匀现象愈发显著^[44-45]。尽管流化床内部存在显著的气固流动现象,但氧气

仍主要以气泡形式快速穿过密相区,导致氧气与煤颗粒之间的传质阻力较大。这种现象可能引发局部超温、灰分熔融、结渣等问题,并且会增加不完全燃烧损失,同时导致 SO₂ 和 NO_x 等污染物排放量增加,从而对流化床的安全、高效和稳定运行产生不利影响^[46]。这一现象在小型鼓泡流化床实验中也得到了验证,富氧气氛下,当氧气浓度达到 30% 时,煤焦颗粒温度较床温高出 300 °C,已接近煤灰的熔点温度^[47]。

将 OCAC 应用在空气燃烧中获得的成功经验促使人们将该方法应用于富氧燃料燃烧。卜昌盛等^[48]公开了一种以铁基载氧体为床料的流化床富氧燃烧系统及方法,利用载氧体携带和释放氧气来调节煤的燃烧,提高炉膛内热量分布的均匀性,保障流化床的稳定运行。加拿大 Canmet 能源研究中心 Hughes 等^[44]在加压流化床上对比了以钛铁矿和石英砂作为床料时加拿大煤(高谷烟煤、白杨河褐煤)的燃烧特性,研究显示相较于石英砂床料,钛铁矿床料下的流化床密相区温度波动幅度降低近 10 °C,烟煤和褐煤燃烧出口烟气中 CO 浓度分别降低了 30% 和 13%。Bu 等^[23]在 10%O₂/90%CO₂ 气氛下,进行了铁基载氧体(Fe₂O₃、赤铁矿和钢渣)辅助煤焦(褐煤、烟煤和无烟煤)富氧燃烧的研究。实验结果表明,与石英砂床料相比,载氧体床料下煤焦的燃烧速率升高,燃尽温度降低,综合燃烧指数至少提高了 100%,如图 4 所示。Kim 等^[19]探讨了载氧体的添加对富氧循环流化床燃烧(Oxy-CFBC)的影响特性,得出了使用铁矿石载氧体可以在不降低燃烧效率的情况下改善燃烧性能。

截至目前,有关载氧体辅助富氧燃烧(OCAC)技术的研究报道仍然较为有限。尽管已有研究对 O₂/CO₂ 气氛下的燃烧特性进行了探讨,但对于载氧体在富氧燃烧过程中对燃料燃烧特性及污染物排放特性的影响,仍缺乏系统深入的研究。

2.3 铁基载氧体

对于燃烧工艺,铁基载氧体需要具有足够的反应性、携氧能力和磨损强度。最优的载氧体还应该是经济上可行的,并且对环境无害。大量研究致力于开发用于化学链燃烧或载氧体辅助燃烧的合成载氧体。特别地,由单一金属或复合氧化物构成的合成材料成为了研究焦点^[49-50],这些材料通常能够实现极高的燃料转化率,但缺点是价格昂贵。从 2.1

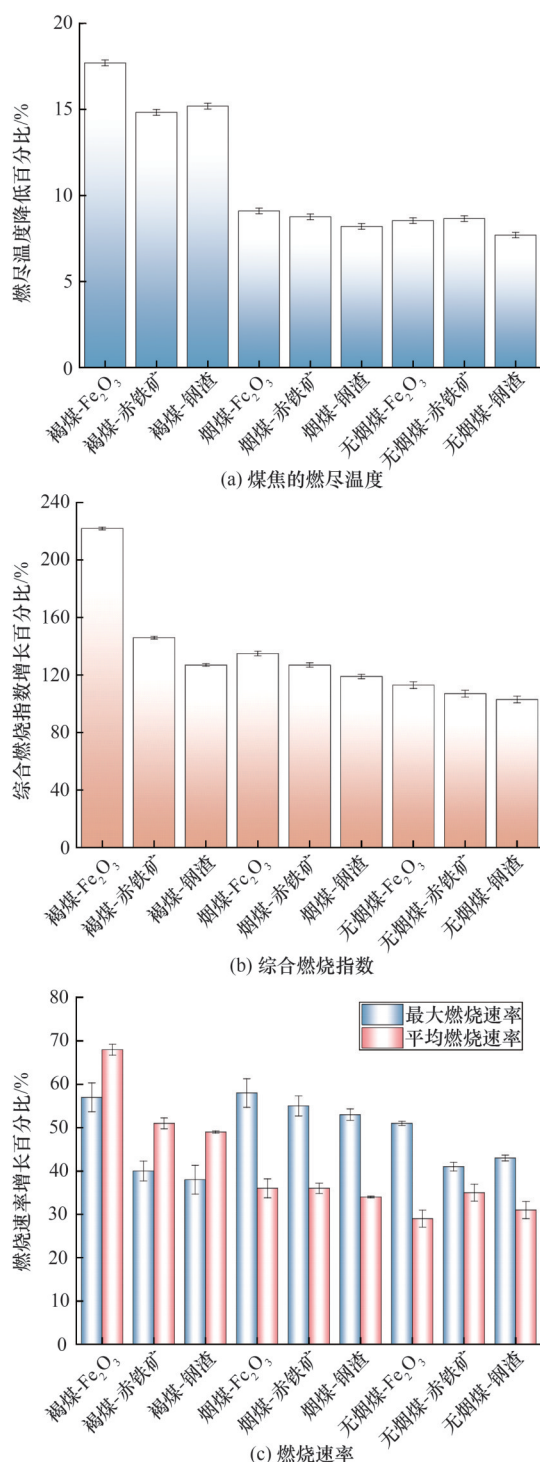


图4 载氧体床料下煤焦燃烧特性降低/增长百分比
Figure 4 The percentage decrease/increase in the combustion characteristics of coal chars under the oxygen carrier bed material

和2.2节可看出,在OCAC中,当前研究中用于固体燃料(尤其是生物质与固废)OCAC的铁基载氧体主

要可分为两大类:一是天然矿石(赤铁矿、钛铁矿等);二是来源于工业副产物或废弃物的低成本材料(钢渣、赤泥等)。考虑到运行成本,天然矿石或工业副产物是生物质OCAC的合适氧载体。近年来,由天然矿石组成的廉价载氧体受到了越来越多的关注。锰^[20]和铁矿石^[21]是两种常见的材料,但最受关注的可能是钛铁矿^[51-53]。钛铁矿主要由铁和钛组成,可以作为天然砂或从岩石矿石中开采,后者通常含有更多的铁。虽然一些Fe-Ti相可以被氧化和还原,但钛铁矿中最重要的氧转移组分是铁,它在还原和氧化过程中在Fe²⁺和Fe³⁺之间发生变化,形成FeO和Fe₂O₃氧化物^[54]。新开采的钛铁矿需要被活化,才能转移足够数量的氧气。活化过程通过连续的氧化还原循环进行,在材料的氧化和还原过程中,铁在晶格结构中迁移,产生富铁的表面^[54]。因此,钛铁矿的氧化铁浓度和载氧能力随着氧化还原循环次数的增加而增加。尽管氧的传递应该随着时间的推移而增加,但生物质锅炉复杂的环境可能会降低钛铁矿的有效性^[51]。因其稳定的晶相和良好的热机械性能,在中高温流化床OCAC中被广泛测试并显示出良好的长期运行潜力。钛铁矿在实际循环中表现出较好的抗烧结与机械完整性,因而在工业示范与试验中被频繁采用。天然铁基载氧体通常具有较高的热稳定性和抗裂性,但铁价态以及晶格氧的迁移往往伴随体积与相的微结构变化,燃料灰分中的K、Ca、Si等会与铁相或在表面形成覆盖层或复合物,导致有效氧化面积减少、活性衰减以及促进团聚/粘结,长周期运行后可能出现活性下降或团聚问题。因此,与高灰分/高碱金属燃料耦合时需要采取额外措施以防止失活或团聚。

随着资源化与低成本路线的推动,许多研究将工业固体废弃物作为潜在载氧体或床料替代物进行评估。代表性材料包括钢渣^[23,25]、赤泥^[24,55]以及某些富铁材料等,已有多项试验和中试工作验证了钢渣、赤泥等在CLC和OCAC中的可用性。工业副产品具有较低的原料成本并分布广泛,若能在不显著降低反应性能的前提下直接用作载氧体,将大幅降低OCAC的床料成本并提升产业化可行性。然而,工业副产品的化学成分相较于天然矿物更为复杂,通常含有较高的Ca、Si、Al、Mg、Fe、Ti等元素。这种复杂性虽然有可能提高载氧体的活性,但同时也可能引入杂质,从而促进熔融盐相的形成,或者与燃

料灰分反应生成低熔点相,进而降低载氧体的活性。Yu 等^[24]研究有机 CH_3COOK 和无机钾 (K_2CO_3 、 KCl 、 K_2SO_4 、 K_3PO_4) 与赤泥载氧体的相互作用,揭示床颗粒的团聚主要取决于载氧体和灰分中的元素比例。K 进入赤泥载氧体后与载氧体中的 Al_2O_3 、 SiO_2 反应形成 KAlSiO_4 和 KAlSi_3O_8 , 与 Fe_2O_3 反应形成 K-Fe-O 化合物,这种 K-Fe-O 化合物会提高铁基载氧体反应性。对于工业副产品而言,长周期运行中,燃料灰分不断沉积在载氧体表面,阻塞载氧体孔隙,降低比表面积,影响传质,导致反应活性下降,损害流态化特性并提高粉尘/磨损。另一方面,工业副产品中常含重金属或有害元素(如 V、Cr、Pb 等),在 OCAC 过程中这些元素可能发生挥发、捕获或沉积转移,影响排放与后处理,因此在将副产品直接用作载氧体前需评估其污染物迁移规律,并考虑配套的排放治理或稳定化处理措施。

3 技术面临的挑战与应对策略

3.1 载氧体的性能衰退问题

在载氧体的循环使用过程中,性能衰退是一个亟待解决的关键问题,其中磨损是导致载氧体性能下降的重要因素之一^[56]。在流化床中,载氧体颗粒在高温和高流化速率的恶劣环境下,会与颗粒之间以及流化床壁面之间持续发生剧烈的碰撞与摩擦。这种频繁的相互作用致使载氧体颗粒表面逐渐磨损,进而导致颗粒尺寸减小,比表面积降低,这会显著影响载氧体的反应活性和载氧能力。Ma 等^[57]在循环床锅炉中研究了载氧体在长周期运行下的物化性能,发现运行 100 h 后载氧体表面的生物质灰层显示出显著的结构完整性,灰层完全包裹了载氧体颗粒。这种包裹阻碍了载氧体的氧化还原过程,并通过增加其颗粒尺寸而损害了其流态化。载氧体的比表面积从新鲜样品的 $5.73 \text{ m}^2/\text{g}$ 降至 $0.19 \text{ m}^2/\text{g}$,孔体积减少约 50%。在长期运行的流化床中,载氧体的磨损量可能高达初始质量的 10%~20%^[56]。此外,烧结现象也会对载氧体的性能产生显著的负面影响,生物质灰中的元素发生反应或与载氧体发生反应生成低熔点化合物使载氧体发生团聚,进一步加剧性能衰退的过程^[58]。因此,深入研究载氧体的磨损和烧结机制,并开发有效的抗磨损和抗烧结方法,对于提高载氧体的使用寿命和降低系统运行成本具有重要意义。为了预防和解决载氧体的性能

衰退问题,可以采取多种措施。在材料选择方面,应优先选择机械强度高、耐磨性好的载氧体。通过优化制备工艺,如控制颗粒尺寸分布、提高颗粒的致密度等,可以增强载氧体的抗磨损性能。在流化床运行过程中,可以通过调整操作参数,如降低流化速度、优化气体分布等,减少载氧体颗粒之间的碰撞和摩擦,从而降低磨损程度。针对烧结问题,可以通过添加助剂或采用特殊的制备工艺,提高载氧体的热稳定性,抑制烧结现象的发生。例如,魏泽华等^[59]研究碱金属对载氧体结构、煤化学链燃烧特性和循环稳定性的影响,发现 5% K_2CO_3 掺杂的载氧体循环稳定性更好,碱金属 K 的掺杂提高了反应活性,抑制了团聚,且晶相结构保持不变。

载氧体作为核心材料,其制备、循环寿命及消耗率直接决定了系统的经济性。载氧体的制备和补充费用在整个 OCAC 系统的运行成本中占据较大比例。载氧体的采购与补充成本可能占到系统总运行成本的 15%~30%。一旦载氧体的磨损和烧结速度过快,将显著提高运行过程中的补充频率,增加原料消耗与采购成本。同时,频繁更换载氧体还会带来运输、存储和停机更换等间接经济损失。相比之下,若能够通过优化载氧体制备工艺(如采用高强度骨架结构、引入抗烧结掺杂元素)来提升循环寿命,即使前期材料成本略有增加,也能在长周期运行中降低载氧体更换频率,从而实现整体经济性的优化。换句话说,延长载氧体的循环寿命,不仅是提高技术可行性的需求,更是降低度电成本、提升投资回报率的核心环节。在已有的成本评估研究中,Newby 等^[60]指出,原料成本在载氧体产品的总成本中占据了极大的比例。事实上,载氧体产品的成本几乎可以视为其原料成本的线性函数。因此,选择低价、储量丰富的原料对降低整体成本尤为关键。例如,天然矿物基的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 组合往往比 NiO 、 CuO 等高成本材料更具经济竞争力。表 2 给出了机械混合工艺条件下不同类型载氧体的成本对比结果,可以看出,钛铁矿和菱铁矿- Al_2O_3 类载氧体具有更低的总成本,而 NiO 和 CuO 基载氧体虽然性能优良,但价格昂贵,限制了其在大规模应用,难以支撑在大规模商业化运行中长期替换的需求。

因此,载氧体经济性的关键不仅在于其制备工艺和循环寿命,还与原料选择有关。对于 OCAC 系统而言,若载氧体在长期运行过程中能够兼具低原

表2 机械混合基准工厂的载氧体成本

Table 2 Oxygen carrier cost of the mechanical mixing benchmark plant

载氧体类型	原材料成本/(\$·kg ⁻¹)	资本成本/(\$·kg ⁻¹)	可变成本/(\$·kg ⁻¹)	固定成本/(\$·kg ⁻¹)	总成本/(\$·kg ⁻¹)
钛铁矿	0.35~0.55	0.042~0.060	0.011~0.018	0.002~0.002	0.41~0.63
菱铁矿-Al ₂ O ₃	0.24~0.42	0.13~0.15	0.07~0.07	0.15~0.15	0.59~0.79
Fe ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃	0.51~0.95	0.15~0.20	0.07~0.07	0.15~0.15	0.88~1.37
NiO-Al ₂ O ₃	3.20~10.25	0.44~1.17	0.15~0.37	0.15~0.15	3.90~11.94
CuO-TiO ₂	1.46~2.51	0.26~0.37	0.09~0.13	0.15~0.15	1.96~3.16

料成本、较强抗磨损与抗烧结能力以及较高的循环稳定性,便能在保证反应性能的同时显著降低运行成本。因而,开发以铁基天然矿物为核心、兼顾结构强化与寿命提升的经济型载氧体,将是未来实现OCAC规模化推广和商业应用的关键方向。同时需要助剂或采用特殊的制备工艺,提高载氧体的热稳定性,抑制烧结现象的发生。

3.2 流化床运行的稳定性

流化床的稳定运行对于载氧体辅助燃烧技术的实际应用至关重要。由于流化床内气体和固体颗粒的复杂运动,可能会出现局部气速过高或过低的情况,导致气固接触不均匀,影响燃烧效果。有学者研究表明^[61-64],在21%的氧浓度环境下,由于氧气扩散速率的减缓、气体比容热的提升以及气化反应强度的增加,煤的燃烧速率呈现出下降趋势。这导致了气体和固体不完全燃烧损失的增加。在流化床运行过程中,氧气浓度的合理控制是保障燃烧稳定性的重要因素。研究表明,为了使煤在富氧条件下保持与空气燃烧相近的燃烧特性,氧气体积分数通常需要提升至24%~30%。Czestochowa科技大学^[65]在一套0.1 MW_{th}循环流化床实验系统上对波兰烟煤进行了富氧燃烧试验,结果发现,当氧气浓度由21%提高至25%时,生成气体中的CO浓度显著降低,而在过量空气系数为1.15的条件下,能够获得更高的燃烧效率。这说明在流化床运行中,通过适当调节O₂浓度与过量空气系数,不仅能够改善燃烧反应的均匀性和效率,还能降低CO的累积,减少因局部不完全燃烧而引起的床层波动,从而提升系统的整体稳定性。此外,流化床内的温度和压力变化对燃烧过程也有显著影响。高温条件下,虽然燃烧速率提高,但容易造成局部过热,增加设备的热负荷。而压力变化则直接影响气体的密度和流动性,进而影响燃烧的稳定性和效率。因此,维持适

宜的温度和压力范围是保证流化床稳定运行的关键因素之一。

床层结渣也是一个需要关注的问题。在燃料燃烧的过程中,倘若燃料中含有较高的灰分,这些灰分在高温环境的作用下便会逐渐软化乃至熔融。此时,若熔融的灰分与载氧体或者是其他颗粒相互碰撞并粘连在一起,就极有可能形成结渣现象。结渣的形成会对流化床的正常流化状态造成严重的破坏。随着结渣的增多,床层的阻力会显著增加,这会直接影响流化床内的气流分布和物料流动,使得整个燃烧过程变得不稳定。一旦结渣问题严重到一定程度,还可能引发一系列的设备故障,例如布风板堵塞、风帽损坏等,从而对设备的正常运行和安全造成极大的威胁。因此,在设计和运行流化床锅炉时,必须采取有效的措施来预防和控制结渣的发生,如合理选择燃料、控制燃烧温度、优化床料配比等,以确保流化床燃烧系统的安全、稳定和高效运行。Qi等^[66]针对流化床燃烧/气化过程中因灰分熔融导致的结渣与聚结问题开展了研究,重点考察了不同床材料对结渣行为的影响规律。研究结果表明,燃料灰分中的碱金属元素(K、Na)是导致低熔点物质生成和床层聚结的主要因素,运行温度和气氛变化会进一步加剧结渣风险;相比之下,橄榄石等高熔点床料能够显著延缓团聚的发生,延长床层的稳定运行时间。此外,通过燃料预处理或引入高岭土类添加剂也能有效捕集碱金属,抑制低熔点相的形成。该研究不仅揭示了流化床结渣的形成机理,而且提出了通过床料选择、操作优化与添加剂应用等手段改善运行稳定性的可行路径,为减少因结渣造成的停机和载氧体失效提供了重要参考。

4 总结

流化床铁基载氧体辅助燃烧通过以铁基载氧体替代传统惰性床料,使床料同时具备“热载体”与“氧载体”的双重功能,有效缓解了炉内氧与燃料时空分布不均衡以及氧与燃料间质量传递效率低的问题,为流化床的清洁低碳、安全高效运行提供了新思路。现有不同规模的实验与应用均已验证该技术的可行性和有效性。然而,在实际运行中,铁基载氧体仍面临性能衰退与床层运行不稳定等挑战。未来研究可从以下几个方面展开:其一,开发以铁基天然矿物为核心、兼顾结构强化与寿命提升的经济型载氧体,并通过添加助剂或特殊制备工艺提升热稳定性、抑制烧结;其二,结合燃料特性与床层动态行为,优化流化床结构与运行条件以增强系统稳定性;其三,引入智能监测与控制技术,实现床层温度、气氛及颗粒状态的实时调节;其四,探索与碳捕集利用(CCU)及可再生能源耦合的技术路径,推动流化床燃烧技术的低碳化与规模化应用。总体而言,尽管仍有诸多问题亟待解决,流化床铁基载氧体辅助燃烧在未来的清洁能源体系中仍展现出广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] 王喆,王留群. 2023 年多项气候变化指标创下新高[J]. 生态经济, 2024, 40: 5–8.
- [2] 吕江.《巴黎协定》:新的制度安排、不确定性及中国选择[J]. 国际观察, 2016(3): 92–104.
LYU Jiang. Paris agreement: New climate institutional arrangement, uncertainty, and China's choices[J]. International Review, 2016(3): 92–104.
- [3] 习近平. 中国力争碳排放 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和[J]. 今日制造与升级, 2020(9): 10.
- [4] 苑杰.《联合国气候变化框架公约》第 26 届缔约方大会成果[J]. 国际社会科学杂志(中文版), 2022, 39(2): 159–172.
YUAN Jie. COP26: Achievements[J]. International social science journal (Chinese Edition), 2022, 39(2): 159–172.
- [5] TASLEEM A, ULLAH A, LI F, et al. Detection of onset of agglomeration in a bubbling fluidized bed biomass combustor using reactive Eulerian computational fluid dynamics[J]. Particuology, 2024, 90: 504–515.
- [6] RYDÉN M, HANNING M L, LIND F. Oxygen carrier aided combustion (OCAC) of wood chips in a 12 MW_{th} circulating fluidized bed boiler using steel converter slag as bed material[J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 2657.
- [7] ADÁNEZ J, ABAD A. Chemical-looping combustion: Status and research needs[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(4): 4303–4317.
- [8] CARRERO-MANTILLA J, LLANO-RESTREPO M. Chemical equilibria of multiple-reaction systems from reaction ensemble Monte Carlo simulation and a predictive equation of state: Combined hydrogenation of ethylene and propylene[J]. Fluid Phase Equilibria, 2006, 242(2): 189–203.
- [9] KAJNÄS C, HEDBERG M, LEION H. The effect of iron and manganese-based oxygen carriers as bed materials in oxygen carrier aided combustion[J]. Energy Technology, 2019, 7(7): 1900321.
- [10] RYDÉN M, HANNING M L, CORCORAN A, et al. Oxygen carrier aided combustion (OCAC) of wood chips in a semi-commercial circulating fluidized bed boiler using manganese ore as bed material[J]. Applied Sciences, 2016, 6(11): 347.
- [11] STANIČIĆ I, MATTISSON T, BACKMAN R, et al. Oxygen carrier aided combustion (OCAC) of two waste fuels – Experimental and theoretical study of the interaction between ilmenite and zinc, copper and lead[J]. Biomass and Bioenergy, 2021, 148: 106060.
- [12] BERDUGO VILCHES T, LIND F, RYDÉN M, et al. Experience of more than 1 000 h of operation with oxygen carriers and solid biomass at large scale[J]. Applied Energy, 2017, 190: 1174–1183.
- [13] STÖRNER F, LIND F, RYDÉN M. Oxygen carrier aided combustion in fluidized bed boilers in Sweden—Review and future outlook with respect to affordable bed materials[J]. Applied Sciences, 2021, 11(17): 7935.
- [14] HUGHES R W, LU D Y, SYMONDS R T. Improvement of oxy-FBC using oxygen carriers: Concept and combustion performance[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(9): 10101–10115.
- [15] LU D Y, TAN Y W, DUCHESNE M A, et al. Potassium capture by ilmenite ore as the bed material during fluidized bed conversion[J]. Fuel, 2023, 335: 127008.
- [16] SCHNEIDER T, KRUMREIN J, MÜLLER D, et al. Investigation of the oxygen supply and distribution in a bubbling fluidized bed by using natural ilmenite for oxygen carrier aided combustion[J]. Energy & Fuels, 2021, 35(15): 12352–12366.
- [17] SCHNEIDER T, MOFFITT J, VOLZ N, et al. Long-term effects of ilmenite on a micro-scale bubbling fluidized bed combined heat and power pilot plant for oxygen carrier aided combustion of wood[J]. Applied Energy, 2022, 314: 118953.
- [18] GARCIA E, LIU H. Ilmenite as alternative bed material for the combustion of coal and biomass blends in a fluidised bed combustor to improve combustion performance and reduce agglomeration tendency[J]. Energy, 2022, 239: 121913.
- [19] KIM S J, MOON J H, JO S H, et al. Enhancing oxygen savings and carbon dioxide purity in biomass oxy-circulating fluidized bed combustion with an oxygen carrier[J]. Fuel, 2023, 334: 126612.
- [20] WANG P N, LEION H, YANG H R. Oxygen-carrier-aided combustion in a bench-scale fluidized bed[J]. Energy & Fuels,

- 2017, 31(6): 6463–6471.
- [21] MA J C, HAN D, ZHAO H B. Investigation on iron ore for the oxygen carrier aided combustion[J]. Fuel Processing Technology, 2022, 230: 107214.
- [22] LIU X, DUAN L B, DUAN Y Q, et al. Improved fuel conversion through oxygen carrier aided combustion during incineration of biomass-based solid waste in a rotary kiln[J]. Fuel, 2023, 331: 125714.
- [23] BU C S, ZHAO X, LECKNER B, et al. Iron based oxygen-carrier-aided oxy-fuel combustion of coal char: Reactivity and oxygen transfer mechanism[J]. Fuel, 2023, 333: 126445.
- [24] YANG Y, SHAO Y L, MA S W, et al. Biomass ash chemistry in oxygen carrier aided combustion: Interaction between potassium and red mud[J]. Fuel, 2024, 357: 129720.
- [25] YIN L L, ZHAO X, CAO X, et al. Analysis of characteristics and mechanisms of iron-based oxygen carrier-aided oxy-fuel combustion of coal char in a bubbling fluidized bed[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 357: 130121.
- [26] LIND F, CORCORAN A, THUNMAN H. Validation of the oxygen buffering ability of bed materials used for OCAC in a large scale CFB boiler[J]. Powder Technology, 2017, 316: 462–468.
- [27] MOLDENHAUER P, CORCORAN A, THUNMAN H, et al. A scale-up project for operating a 115 MW_{th} biomass-fired CFB boiler with oxygen carriers as bed materia [Z]. Proceedings of the 5th International Conference on Chemical Looping. Park City, Utah, USA. Park City, Utah, USA, 2018
- [28] LIND F, CORCORAN A, ANDERSSON B-Å, et al. 12,000 Hours of operation with oxygen-carriers in industrially relevant scale (75,000 kW_{th}) [J]. VGB Power Tech, 2017, 7: 1–6.
- [29] SCHNEIDER T, MÜLLER D, KARL J. Effect of natural ilmenite on the solid biomass conversion of inhomogeneous fuels in small-scale bubbling fluidized beds[J]. Energies, 2022, 15(8): 2747.
- [30] THUNMAN H, LIND F, BREITHOLTZ C, et al. Using an oxygen-carrier as bed material for combustion of biomass in a 12-MW_{th} circulating fluidized-bed boiler[J]. Fuel, 2013, 113: 300–309.
- [31] GUAN Y, LIU Y H, LIN X L, et al. Research progress and perspectives of solid fuels chemical looping reaction with Fe-based oxygen carriers[J]. Energy & Fuels, 2022, 36(23): 13956–13984.
- [32] BOUMAZA S, BOUDJEMAA A, OMEIRI S, et al. Physical and photoelectrochemical characterizations of hematite α -Fe₂O₃: Application to photocatalytic oxygen evolution[J]. Solar Energy, 2010, 84(4): 715–721.
- [33] SHEN T X, YAN J C, ZHU X, et al. Catalytic combustion behaviors of petroleum coke with hematite catalyst in a micro fluidized bed thermogravimetric analysis[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 422: 130087.
- [34] LIU F, LIU J, LI Y, et al. Studies on the synergistically improved reactivity of spinel NiFe₂O₄ oxygen carrier for chemical-looping combustion[J]. Energy, 2022, 239: 122100.
- [35] 刘通, 王辰, 宋毅文, 等. 化学链燃烧减排二氧化碳技术展望[J]. 绿色矿山, 2024(2): 206–220.
- LIU Tong, WANG Chen, SONG Yiwen, et al. Research on chemical looping combustion technology[J]. Journal of Green Mine, 2024(2): 206–220.
- [36] 张志丰. 煤化学链燃烧中煤灰及其中活性元素修饰对铁基载氧体性能影响研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2020.
- ZHANG Zhifeng. Study on effect of ash and active element modification on performance of iron-based oxygen carrier in chemical looping combustion of coal[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2020.
- [37] STENBERG V, RYDÉN M, MATTISSON T, et al. Experimental investigation of oxygen carrier aided combustion (OCAC) with methane and PSA off-gas[J]. Applied Sciences, 2021, 11(1): 210.
- [38] CHADEESINGH D R, HAYHURST A N. The combustion of a fuel-rich mixture of methane and air in a bubbling fluidised bed of silica sand at 700 °C and also with particles of Fe₂O₃ or Fe present[J]. Fuel, 2014, 127: 169–177.
- [39] CORCORAN A, KNUTSSON P, LIND F, et al. Mechanism for migration and layer growth of biomass ash on ilmenite used for oxygen carrier aided combustion[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(8): 8845–8856.
- [40] HILDOR F, MATTISSON T, LEION H, et al. Steel converter slag as an oxygen carrier in a 12 MW_{th} CFB boiler-ash interaction and material evolution[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019, 88: 321–331.
- [41] LI L, MAO J H, TANG W, et al. Experimental study on coal combustion by using the ilmenite ore as active bed material in a 0.3 MW_{th} circulating fluidized bed[J]. Fuel, 2023, 342: 127007.
- [42] STANIČIĆ I, BACKMAN R, CAO Y, et al. Fate of trace elements in Oxygen Carrier Aided Combustion (OCAC) of municipal solid waste[J]. Fuel, 2022, 311: 122551.
- [43] ABRAHAM B M, ASBURY J G, LYNCH E P, et al. Coal-oxygen process provides CO₂ for enhanced recovery [J]. Oil and Gas Journal, 1982, 80(11): 68–70.
- [44] FERNANDEZ M J, LYNKFELT A, JOHNSON F. Gas concentrations in the lower part of the combustion chamber of a circulating fluidized bed boiler: influence of bed height[J]. Energy & Fuels, 2000, 14(6): 1127–1132.
- [45] YUE G X, LU J F, ZHANG H, et al. Design theory of circulating fluidized bed boilers[C]//18th International Conference on Fluidized Bed Combustion. May 22–25, 2005. Toronto, Ontario, Canada. ASMEDC, 2005: 135–146.
- [46] LECKNER B. Fluidized bed combustion: Mixing and pollutant limitation[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1998, 24(1): 31–61.
- [47] 卜昌盛. 煤颗粒流化床富氧燃烧机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- BU Changsheng. Investigation on mechanism of OXY-fuel coal combustion in fluidized beds[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [48] 卜昌盛, 王昕晔, 张居兵, 等. 一种流化床载氧体辅助富氧燃

- 烧系统及方法: CN103233709A[P]. 2020-08-18.
- [49] 严舒. 熵效应调控多元铁基钙钛矿载氧体化学链燃烧反应动力学及晶格氧活化机制[D]. 银川: 宁夏大学, 2025.
- YAN Shu. Entropy effect regulates chemical chain combustion kinetics and lattice oxygen activation mechanism of multicomponent iron-based perovskite oxygen carriers[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2025.
- [50] 陈千惠, 齐文义, 郝代军, 等. 循环流化床燃煤锅炉铁基载氧体辅助燃烧性能研究[J]. 炼油技术与工程, 2024, 54(10): 35-39.
- CHEN Qianhui, QI Wenyi, HAO Daijun, et al. Research on the performance of Fe-based oxygen carrier assisted combustion in circulating fluidized bed boilers[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2024, 54(10): 35-39.
- [51] ANDERSSON V, STANIČIĆ I, KONG X R, et al. Alkali desorption from ilmenite oxygen carrier particles used in biomass combustion[J]. Fuel, 2024, 359: 130400.
- [52] KUHN A, GRAF C, STRÖHLE J, et al. Experimental study on oxyfuel-combustion of solid recovered fuel using ilmenite as bed material in a 1 MW_{th} fluidized bed reactor[J]. Carbon Capture Science & Technology, 2025, 15: 100436.
- [53] KUHN A, GRAF C, HÜLSBRUCH D, et al. Oxygen Carrier Aided Combustion (OCAC) of Solid Recovered Fuel (SRF) and coal in a 1 MW_{th} CFB pilot plant using Ilmenite[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 274: 126692.
- [54] GYLLÉN A, KNUTSSON P, LIND F, et al. Magnetic separation of ilmenite used as oxygen carrier during combustion of biomass and the effect of ash layer buildup on its activity and mechanical strength[J]. Fuel, 2020, 269: 117470.
- [55] JIANG Y D, YANG Y, SHAO Y L, et al. Biomass ash chemistry in oxygen carrier aided combustion: Effect of steam on potassium and red mud agglomeration behavior[J]. Fuel, 2025, 398: 135541.
- [56] 朱丹, 刘方, 宋晨, 等. 化学链燃烧中载氧体磨损及抗磨损方法研究进展[J]. 低碳化学与化工, 2024, 49(5): 50-61.
- ZHU Dan, LIU Fang, SONG Chen, et al. Research progress on oxygen carrier attrition and anti-attrition methods in chemical looping combustion[J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2024, 49(5): 50-61.
- [57] MA J C, MI Y J, ZHAO H B. Evolutionary behavior of bed materials in oxygen Carrier-Aided combustion of biomass[J]. Journal of the Energy Institute, 2025, 121: 102124.
- [58] ZHAO J K, MIAO Z W, LYU J, et al. Effect of preparation of iron-based oxygen carriers on its agglomeration behavior with application to biomass chemical looping gasification[J]. Fuel, 2024, 369: 131736.
- [59] 魏泽华, 刘道诚, 王九占, 等. 碱金属掺杂对 NiFeAlO₄ 载氧体结构及反应特性的影响[J]. 石油学报(石油加工), 2020, 36(6): 1178-1188.
- WEI Zehua, LIU Daocheng, WANG Jiuzhan, et al. Effects of alkali metal doping on NiFeAlO₄ oxygen carrier structures and its coal chemical looping combustion performance[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2020, 36(6): 1178-1188.
- [60] NEWBY R A, KEAIRNS D L, STEVENS R W. Chemical looping combustion oxygen carrier production cost study[J]. Applied Energy, 2023, 345: 121293.
- [61] DUAN L B, SUN H C, ZHAO C S, et al. Coal combustion characteristics on an oxy-fuel circulating fluidized bed combustor with warm flue gas recycle[J]. Fuel, 2014, 127: 47-51.
- [62] BU C S, PALLARÈS D, CHEN X P, et al. Oxy-fuel combustion of a single fuel particle in a fluidized bed: Char combustion characteristics, an experimental study[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 287: 649-656.
- [63] SALINERO J, GÓMEZ-BAREA A, FUENTES-CANO D, et al. The influence of CO₂ gas concentration on the char temperature and conversion during oxy-fuel combustion in a fluidized bed[J]. Applied Energy, 2018, 215: 116-130.
- [64] DUAN L B, LI L, LIU D Y, et al. Fundamental study on fuel-staged oxy-fuel fluidized bed combustion[J]. Combustion and Flame, 2019, 206: 227-238.
- [65] CZAKIERT T, MUSKALA W, JANKOWSKA S, et al. Combustible matter conversion in an oxy-fuel circulating fluidized-bed (CFB) environment[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(9): 5437-5445.
- [66] QI X, SONG G, SONG W, et al. Effect of bed materials on slagging and fouling during Zhundong coal gasification [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2017, 35(5): 558-578.



第一作者简介:董 伟(1986—),男,高级工程师,主要从事碳排放核算、碳减排机制技术及相关政策等方面的研究, dongw@cqc.com.cn;



殷柳玲(2001—),女,硕士研究生,主要从事固体燃料燃烧等研究, 231912011@njnu.edu.cn;



曹 希(1991—),女,讲师,主要从事含碳资源高效定向热转化制备合成气、化学品能源消费过程中的低碳化利用等研究, xicao@njnu.edu.cn;



通信作者简介:卜昌盛(1987—),男,教授,主要从事太阳能制氢、二氧化碳捕集与利用、固体燃料燃烧与气化、固体废物资源化与资源化利用等研究, csbu@njnu.edu.cn。

(编辑 沈凡卉)