

加热炉富氧燃烧技术研究现状与发展趋势综述

魏海龙, 马嘉彤, 黄第玮

兰州交通大学化学化工学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年10月16日; 录用日期: 2025年10月30日; 发布日期: 2025年11月24日

摘要

本文系统地综述了加热炉富氧燃烧技术的研究背景、原理优势、国内外现状以及未来展望。传统空气助燃加热炉因为存在大量 N_2 , 排烟损失较大, 能效较低, 氮氧化物排放过高。富氧燃烧技术通过提升助燃气体中的氧含量, 使得燃烧温度和热效率大幅度上升, 并减少了热力型 NO_x 的生成。而且, 富氧燃烧会产生高浓度 CO_2 烟气, 为低成本碳捕集与封存创造了条件。同时, 研究表明, CFD数值模拟在研究燃烧机理、优化加热炉内参数等方面发挥了巨大作用。国内外工业应用的案例也证实了该技术在节能增产、降碳减排方面效果显著, 但是它的经济性受到制氧成本的限制。未来的研究方向应该关注富氧燃烧与低碳燃料的耦合、人工智能与CFD的深度融合, 以及一些低成本制氧技术的研究, 以此来推动工业加热过程的绿色化、高效化、智能化。本综述旨在为加热炉富氧燃烧技术的研究开发和工业化应用提供实践参考。

关键词

加热炉, 富氧燃烧, CFD仿真, 碳捕集, 文献综述

A Review of the Current Status and Development Trends of Oxygen-Enriched Combustion Technology in Heating Furnaces

Hailong Wei, Jiatong Ma, Diwei Huang

College of Chemistry and Chemical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: October 16, 2025; accepted: October 30, 2025; published: November 24, 2025

Abstract

This paper presents a systematic review of the research background, fundamental principles and inherent advantages, current domestic and international development status, as well as future prospects of oxygen-enriched combustion technology applied in heating furnaces. Traditional air-

assisted heating furnaces suffer from considerable flue gas losses, relatively low energy efficiency, and elevated nitrogen oxide (NO_x) emissions, primarily due to the high concentration of nitrogen (N_2) present in ambient air. In contrast, oxygen-enriched combustion technology enhances the oxygen concentration in the combustion-supporting gas, which leads to a significant increase in combustion temperature and overall thermal efficiency. This approach also contributes to a marked reduction in the formation of thermal NO_x . Additionally, oxygen-enriched combustion generates flue gases with a high concentration of carbon dioxide (CO_2), thereby facilitating conditions conducive to low-cost carbon capture and storage. Furthermore, existing research has demonstrated that Computational Fluid Dynamics (CFD) numerical simulation serves as a powerful tool for investigating combustion mechanisms and optimizing operational parameters within heating furnaces. Industrial application cases from both domestic and international contexts have validated that oxygen-enriched combustion technology is highly effective in achieving energy savings, enhancing production output, reducing carbon emissions, and lowering overall pollutant discharge. However, the economic feasibility of this technology remains constrained by the relatively high costs associated with oxygen production. Looking ahead, future research efforts should prioritize the integration of oxygen-enriched combustion with low-carbon fuel alternatives, the advanced combination of artificial intelligence techniques with CFD modeling, and the exploration of innovative, low-cost methods for oxygen production. These strategic directions are expected to drive the evolution of industrial heating processes toward greater sustainability, enhanced efficiency, and increased intelligent automation. This comprehensive review is intended to offer valuable insights and practical references for researchers, developers, and industry practitioners engaged in the advancement and industrial deployment of oxygen-enriched combustion technology in heating furnace applications.

Keywords

Heating Furnace, Oxygen-Enriched Combustion, CFD Simulation, Carbon Capture, Literature Review

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

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

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



Open Access

1. 引言

工业加热炉，作为冶金、石化、陶瓷及材料加工等工业领域的核心热工设备，承担着物料加热、熔炼与热处理等一系列重要工艺任务，通过将燃料中的化学能或电能高效转化为热能，为工业生产提供必需的高温环境。传统加热炉多采用天然气、高炉煤气或混合煤气作为燃料，并以预热空气为助燃介质[1]，但以传统空气作为助燃介质的加热炉，在能源效率和环保性能方面存在明显的技术瓶颈。这是由于空气中约 78%的成分为 N_2 ，而 N_2 本身并不参与燃烧反应。在炉内高温过程中，大量的 N_2 会吸收并带走大量的热，随烟气排放，导致排烟热损失显著，这是造成热效率偏低的主要原因之一。

在当前全球都在积极推进“双碳”目标的大宏观背景下，加热炉作为能源消耗的重点环节以及碳排放问题的主要源头，承受着前所未有的减排压力，其能效的提升以及清洁化改造已经成为了影响企业生存以及行业能否实现可持续发展的关键因素。基于以上背景，加强燃烧理论研究，提高燃料组织技术刻不容缓[2]，富氧燃烧技术作为一种有着显著应用前景的先进燃烧技术，受到了学术界的广泛关注。富氧燃烧技术以氧气浓度高于 21%的气体作为助燃介质，从根源上改变了炉内的燃烧物理化学环境，对节能减排具有重要意义。

本综述综合考虑了国内外的最新研究成果，并结合自身的深入理解，对加热炉富氧燃烧技术开展了较为系统的评述工作。文章从研究背景以及意义入手，深入分析富氧燃烧技术的原理和主要优势，全方

位展示国内外的研究现状，最后对现有的研究成果进行客观的评价，指出未来可能的发展方向，其目的在于为该领域的技术创新以及工程应用提供可用的参考依据。

2. 富氧燃烧技术基本原理与核心优势

2.1. 工业加热炉的重要性与挑战

工业加热炉作为隔热密闭设备常用于提升热传递效率，依靠辐射、对流等方式完成热量的传导与交换。加热炉应用领域十分广泛，既包括小型的热处理炉，也涵盖大型的轧钢加热炉。其运行工况的好坏、效率的高低，会直接对产品品质、成本投入，以及企业在可持续发展方面的表现产生重要影响。

目前，传统空气工况下燃烧的加热炉存在着两个突出问题亟待解决。一方面是能源利用效率不高。因为空气中 N_2 含量较高，使得反应物浓度被稀释，燃烧温度降低，而且 N_2 会随着烟气排出，将大约 12%~20% 的燃料热能携带并排放到大气中，排烟损失严重。另一方面，环境污染问题较为严重。在高温燃烧下，会产生氮氧化物(NO_x)，这些物质是形成光化学烟雾以及酸雨的关键前体物质，对环境危害严重。除此之外，当前普遍使用的末端治理技术，例如选择性催化还原(SCR)和选择性非催化还原(SNCR)，不但运行成本较高，而且难以从根源上解决伴随燃烧过程一同产生的碳排放问题。

2.2. 富氧燃烧技术的兴起与发展历程

富氧燃烧最早应用于钢铁冶炼行业的高炉富氧喷煤工艺中，主要通过提高助燃气体中的氧浓度来强化炉内的燃烧效率，从而直接提升冶炼效率。近年来，深冷空分、变压吸附以及膜分离等先进制氧技术越来越成熟，成本也逐渐可控，同时全球对气候变化议题越来越关注，富氧燃烧凭借其高效、低排放的特性，应用场景也从钢铁逐步拓展到更多工业领域。

从技术发展的角度来看，富氧燃烧技术的发展过程大致可以分为三个主要阶段：在第一阶段，即单元技术突破期，研究的重点主要集中在富氧环境对燃烧基本特性的影响机制上，例如火焰的温度变化及其稳定性等方面；进入第二阶段，也就是系统集成探索期，富氧燃烧技术开始与余热回收、烟气再循环等相关技术进行结合，并在连续式加热炉、工业锅炉等实际装置中开展了集成化的应用研究；到了第三阶段，即碳捕集耦合与智能化优化期，由于富氧燃烧能够产生高浓度的二氧化碳烟气，目前该技术已被认为是实现碳捕集、利用与封存(CCUS)目标中具有较高成本效益的重要途径之一[3]。与此同时，随着计算流体动力学等先进数值模拟技术的不断成熟，也为富氧燃烧技术的优化提供了更为智能化的选择。

2.3. 能效提升与污染物减排

富氧燃烧技术的深入研究，对于燃烧学、传热学以及流体力学等相关理论体系的健全与进步发挥着关键作用。富氧燃烧技术的实际应用价值体现在经济成本 and 环境保护方面。一方面，富氧燃烧使得能源利用效率显著提升，杨勇[4]的研究显示，富氧燃烧能够减少烟气量，降低排烟热损与风机消耗，氧含量每增加 1%，烟气量下降 3%~5%。富氧燃烧也会使火焰温度升高、辐射传热能力增强、加热炉效率提高，Biao Lu [5]、赵德强[6]等人的研究表明，氧含量每增加 1%，加热炉的热效率大约会提高 0.28%，节能率最高提升 0.74%，炼厂气用量减少约 109 Nm^3/h ，SANG [7]等使用数值计算方法对加热炉内采用富氧燃烧和空气燃烧进行了对比分析，结果表明，富氧燃烧条件下燃烧效率提高 50%。另一方面，富氧燃烧对污染物排放控制效果明显，由于从源头上降低了 N_2 含量，热力型 NO_x 的产生得到了极大的抑制。费轶[8]的研究指出，当采用 27%浓度的富氧助燃时， NO_x 的排放量较常规空气助燃降低多达 90%，主要是与 MILD(温和低氧稀释)燃烧技术相结合，甚至可以实现超低 NO_x 排放。富氧燃烧技术也为碳捕集与封存(CCUS)奠定了关键基础，富氧燃烧能够使烟气 CO_2 体积分数从常规空气燃烧的 15%~20%提升到 80%以

上, 经过简单的冷凝脱水操作就能够获取高纯度的 CO_2 流, 这极大地简化了碳捕集流程, 降低了碳捕集成本。章高霞[9]的研究解释了捕集成本能够降低至传统燃烧后捕集技术的 30%至 50%, 为工业过程的深度脱碳提供了重要的技术支持。

3. 富氧燃烧研究进展与核心方法

3.1. 富氧燃烧特性与 NO_x 生成机理

国内外的研究人员对富氧燃烧的基本特性与机理进行了大量反复的实验与模拟工作。研究结果一致表明, 当氧气浓度升高时, 理论燃烧温度逐渐上升, 同时火焰外观会变得短而明亮, 同时氧浓度的增加可能造成局部区域温度过高, 这对于设备的正常运行会产生不利影响, 还可能加剧 NO_x 的生成。 NO_x 的生成主要遵循三条路径:

1、热力型 NO_x (Thermal NO_x): 由助燃空气中的 N_2 在高温下与 O 原子反应生成, 其生成速率强烈依赖于温度, 遵循泽尔多维奇机理。当温度高于 1400°C 时, 生成速率呈指数级增加。在常规空气燃烧中, 这是最主要的 NO_x 来源。

2、快速型 NO_x (Prompt NO_x): 在碳氢燃料富燃的火焰锋面, 通过 CH 自由基等中间体与 N_2 反应生成 HCN , 进而氧化为 NO 。其生成量通常远少于热力型 NO_x 。

3、燃料型 NO_x (Fuel NO_x): 当燃料本身含氮(如煤、重油、含氮生物质)时, 燃料氮在燃烧过程中几乎定量地转化为 HCN 、 NH_3 等前驱体, 并进一步氧化生成 NO_x 。这是燃煤锅炉 NO_x 的主要来源。

在富氧燃烧工况时 NO_x 生成浓度会比常规空气助燃工况时显著增高[10]。 NO_x 的生成不仅受燃料类型和燃烧方式的影响, 还受温度、氧气浓度和燃烧压力等多种运行参数的制约这些因素共同影响 NO_x 的排放水平[11][12]。为解决局部高温问题, 在富氧燃烧过程中引入了烟气再循环技术。该技术通过将部分循环烟气与纯氧混合后再送入炉膛, 利用烟气中所含的二氧化碳和水蒸气作为稀释介质来降低火焰的最高温度, 使炉内温度分布更为均匀, 进一步降低氮氧化物的排放量。樊金成[13]等人通过研究, 系统对比了增氧燃烧与干法、湿法烟气再循环模式下加热炉内辐射传热特性, 结果表明特定工况下, 由于水蒸气辐射能力强, 湿法再循环方式展现出更优的传热效果。

近年来, 将 MILD(无焰)燃烧与富氧燃烧相结合的研究成为热点。金圻烨[14]的研究指出, 在 MILD 富氧燃烧条件下, 炉内会形成较为显著的烟气内循环现象, 反应区域分布较为分散, 其达姆数 $\text{Da} \ll 1$ 而卡数 $\text{Ka} \gg 1$, 呈低低温和燃烧特征, 炉内温度分布均匀, 氮氧化物排放极少。

当前研究多集中于实验室或中试规模, 对全尺度工业炉内复杂湍流-化学反应相互作用及其对 NO_x 生成路径(热力型、快速型、燃料型)影响的理解仍存在空白。

3.2. CFD 数值模拟的研究进展与应用

目前, CFD 数值仿真技术已成为研究与优化加热炉内富氧燃烧过程的重要工具, 当前的研究进展主要集中在模型构建与验证、以及过程优化与设计两个关键领域。

在模型构建与验证方面, 有效的 CFD 模拟需要依赖于准确的几何建模、高精度的网格划分以及合理的物理子模型选取。湍流模拟中, Standard k- ϵ 模型、Realizable k- ϵ 模型等基于雷诺平均 Navier-Stokes(RANS)方程, 因其具有较高的计算效率, 在工程实际模拟中得到了最广泛的应用。燃烧模型的选择, 需要根据火焰类型进行判断: 在处理扩散火焰时, 概率密度函数(PDF)模型被普遍采用; 若需要考虑详细化学反应, 有限速率/涡耗散模型则更为适合。王朔[15]的研究显示, 在低 NO_x 燃烧器的模拟中, 采用 SSG 雷诺应力模型适配旋流与回流流场, 并结合 WD1 甲烷一步反应简化反应机理, 可以取得较高的预测准确性。辐射传热模型方面, 离散坐标法与 P-1 模型是目前使用较多的方法。樊金成[13]、金圻烨[14]

等人指出,在富氧燃烧条件下,传统的基于空气燃烧环境所设定的灰气体加权和模型参数已不再适用,因此需要对这些参数进行适当改进,以降低传热计算的误差。为了保证 CFD 模型预测结果的可靠性,将其预测数据与“黑匣子”测温、烟气成分分析等实验结果进行对比验证是一个关键步骤,这一做法在赵义博、刘德新等多位研究人员的研究中均有体现。

在过程优化与设计方面,CFD 仿真能够清晰地展示出炉内温度场、速度场及组分场的分布情况,为系统优化提供坚实的理论依据。陈德敏等[16]通过 CFD 技术系统地分析了富氧注入位置和氧浓度对加热炉热工性能的影响,得出结论,在加热段或均热段进行富氧操作,并将氧浓度控制在 21%~37%之间,热效率提升和节能增产效果最佳;当氧浓度超过这一范围时,效益逐渐下降。韩丽莎[17]、陈德敏[16]等人通过研究燃烧器与炉体结构的优化发现,采用三角形喷孔有助于缩短火焰长度,避免火焰直接冲击炉管;将炉体进行绝热改造,采用 LX-2 隔热材料并与富氧燃烧技术相结合,能够进一步增强节能与增产的效果。

当前 CFD 模拟严重依赖经验模型和简化化学反应机理(如全局一步反应),其在预测富氧条件下中间物种和污染物(尤其是 NO_x)的生成时存在较大不确定性。大多数研究仍使用 RANS 方法,对瞬态湍流-化学反应相互作用捕捉不足。尽管 LES(大涡模拟)精度更高,但计算成本限制了其工业应用。此外,经过充分验证的、适用于宽范围富氧燃烧条件的标准化模型库仍显缺乏,这阻碍了 CFD 结果的普适性和可靠性。

4. 工业应用与技术经济性分析

4.1. 国内外工业应用实例分析

富氧燃烧技术在全球的工业领域中已呈现出明确的应用价值与多方向发展的潜力。从国内应用情况来看,钢铁行业是该技术发展最为完善的领域。典型实例包括马钢轧钢加热炉在应用无焰富氧燃烧技术后,燃料消耗量降低 15%+,产能提高 15%+,钢坯烧损降低 18%+[4];太钢的高炉热风炉经过富氧改造后,焦炉煤气用量从 11500 m³/h 降至 4500 m³/h,年省成本 860 万元[4]。在石油化工行业,为应对管式加热炉能耗偏高的问题,赵德强[5]等人通过模拟研究指出,一台功率为 2.3 MW 的加氢精制加热炉在不进行大规模设备改造的情况下,即能够适应氧气浓度介于 18.55%至 26%的富氧燃烧方式,从而实现热效率约 2.1%的提升。在电力生产与废弃物处理领域,华中科大所开展的 35 兆瓦富氧燃烧锅炉示范工程,成功实现了每小时 11.3 t 的二氧化碳捕集能力,锅炉效率微升 0.5%[4];在玻璃制造行业中,合肥彩虹玻璃有限公司采用全氧燃烧技术后,燃料消耗降低 30%+,并且完全消除了蓄热室换向过程中产生的热损失;而在城市固体废弃物的焚烧过程中引入富氧燃烧技术,也有效解决了由于垃圾成分复杂而导致的燃烧不稳定的难题。

国外在富氧燃烧技术方面研究更为深入,特别是在将富氧燃烧与碳捕集技术相结合的领域,美国某空气产品公司已推出了成熟的氧-燃料一体化解决方案。奥地利某生活垃圾焚烧炉通过将助燃气体中的氧浓度提升至 26%,使得燃烧强度增加 20%,排烟过程中的热损失降低了 12%[4]。在水泥回转窑应用方面,美国 California Portland's Mojave 水泥厂进行富氧燃烧,平均提产率达到 8.85%,取得了显著的生产效果;Hercules 水泥厂富氧运行表明,可提产 8%~10%,燃料消耗减少 3%~5%[4]。在电力行业,瑞典瀑布电力公司 2008 年在德国黑泵(Schwarze Pumpe)建立了世界上第一个全流程的煤粉锅炉富氧燃烧技术示范装置,功率为 30 MWth 运行经验表明,O₂ 体积浓度和系统总过氧系数共同影响燃料的着火和稳定燃烧过程。当氧气体积浓度超过 28%时,即使过氧系数较小,也能保证燃料具备良好的燃烧特性[11]。这些实践案例进一步地证明了富氧燃烧技术对于提升能源利用效率和优化燃烧过程作用明显。

4.2. 技术经济性分析

富氧燃烧技术能否大规模推广取决于其经济成本。唐龙伟[18]的研究构建了以“燃料价格与氧气价格比(K)”为关键参数的经济性分析模型,通过绘制盈亏平衡曲线,为富氧燃烧加热炉的节能优化与成本控

制提供可量化的数据，研究指出，富氧燃烧的经济性取决于排烟温度和制氧成本，对于台车炉、室式炉等排烟温度高的炉型，采用富氧或纯氧燃烧经济效益更佳。目前，制氧成本是制约富氧燃烧技术广泛应用的主要瓶颈之一，当前主流制氧技术成本对比[19] [20]见表 1。

Table 1. Comparison of oxygen production technology costs
表 1. 制氧技术成本对比

制氧技术	典型氧浓度	估算成本(元/Nm ³ O ₂)	能耗范围(kWh/m ³ O ₂)	适用规模
深冷空分法	≥ 99.6%	0.4~0.6	0.37	大规模，高纯氧，成本高
变压吸附法	≤ 93%	0.25~0.4	0.42~0.5	中小规模，成本与能耗有优化空间
膜分离法	25%~40%	0.25	0.4	小规模，低纯度富氧空气，成本最低，但膜分离材料昂贵

杨勇[4]、章高霞[9]等均在文献中强调，传统深冷法成本高，发展低成本的变压吸附(VPSA)和膜分离制氧技术，将制氧成本从当前的 0.4~0.6 元/m³ 降至 0.2~0.3 元/m³，是推动富氧燃烧技术工业化的关键。

5. 当前挑战与未来发展方向

5.1. 当前研究面临的关键挑战

通过对现有文献的系统归纳与总结，富氧燃烧技术在加热炉领域的研究进展与应用成果可归纳为以下几点：一是该技术具备可行性，大量的基础实验研究和工业化应用实例表明，富氧燃烧技术可以提升能源利用效率、降低污染物排放；二是 CFD 模拟仿真可应用于富氧燃烧技术研究，数值模拟可以有效揭示燃烧机理、优化工艺参数、降低实验成本；三是系统集成化是确保富氧燃烧成功实施的重要环节，在研究富氧燃烧时必须同时考虑燃烧器结构、炉体整体构造、余热回收系统等；最后一点是富氧燃烧技术成本受多重因素影响，包括行业特性、燃料类型、炉型结构、不同地区能源价格水平等，因此需要开展个性化经济成本评价。

目前研究仍存在一些挑战：如制氧成本较高对富氧燃烧技术工业化应用影响较大，需要更进一步研究低成本制氧技术；在污染物排放方面，富氧燃烧虽然减少了 N₂ 含量，降低了热力型 NO_x 生成的可能性，但是局部高温可能导致其他类型 NO_x 的生成，特别是在使用含氮燃料的情况下问题更为复杂，NO_x 排放时氧浓度存在的“临界拐点”现象需进一步深入研究；除此之外，现有的一些传统空气工况下的模型普适性有待提高，现有模型中经验参数较多，缺乏经过充分验证的标准化模型库，需要考虑富氧条件下模型的准确性；不可忽略的一点是富氧燃烧系统长期运行的可靠性、耐火材料的侵蚀行为以及系统维护成本等方面的公开数据和研究仍然较为有限。

5.2. 未来重点发展方向与趋势

基于上述分析，笔者认为未来加热炉富氧燃烧技术的研究应着重关注以下几个关键领域：

第一点是需要深入研究富氧燃烧与 H₂、NH₃ 等低碳或零碳燃料的联合应用，观察富氧环境中的燃烧行为特征和污染物产生机理。值得注意的是，富氧 - 氢燃烧系统目前被认为是达成近乎零碳排放的重要技术路径之一，但此研究必须同时攻克 NO_x 控制问题以及系统能够安全稳定运行的技术难题。

第二点是应当大力推进人工智能技术与计算流体力学(CFD)的深度整合，通过一些先进算法对仿真数据进行深度挖掘，建立高效的代理模型，实现加热炉系统的实时优化和智能化控制。

第三点是需要突破低成本制氧技术的瓶颈，积极开发高效膜分离技术和化学链空气分离技术等新型

的低成本制氧工艺, 需要从根本上提高富氧燃烧技术经济的可行性。

最后一点是从整个系统的宏观角度考虑, 进行能源利用效率和碳排放的综合管理。我们需要将富氧燃烧加热炉放置在完整的工业生产流程中, 系统性地去研究其与余热回收技术、CCUS 技术, 以及低成本制氧技术之间的集成应用, 去实现系统整体能效的最优化和碳排放量的最小化。

6. 结论

富氧燃烧技术作为传统化石能源向未来高效清洁化生产过渡的关键, 目前在工业加热炉的节能与低碳改造领域应用广泛。通过对目前文献的系统归纳总结, 发现该技术可调整助燃剂的成分, 提高热效率, 降低污染物排放量, 为开展具有经济性的碳捕集工作创造良好条件。

计算流体力学(CFD)数值模拟技术不断发展和完善, 研究人员能够更深入地去探究富氧燃烧的复杂过程, 为加热炉的优化改进提供技术支持。从国内到国外, 富氧燃烧技术在钢铁、工业锅炉等多行业的成功应用充分证明了一点, 那就是富氧燃烧技术在实际应用具备可行性和有效性。同时, 该技术工业化推广目前仍存在问题, 如制氧成本高、NO_x 排放大, 以及相关模型的普适性不足等。

展望未来, 富氧燃烧技术的发展需要考虑与其他新兴领域的融合, 例如与低碳燃料、人工智能技术紧密结合, 与整体工业系统和碳管理战略的紧密协作。相信通过跨学科和跨技术的不断创新, 富氧燃烧技术将更加绿色化、高效化、可持续化发展。

基金项目

兰州交通大学加热炉富氧燃烧技术开发项目(LZSH-2023-JS-210)。

参考文献

- [1] 刘亚辉, 刘延华, 沈良冲, 等. 富氧燃烧下加热炉内钢坯传热的数值研究[J]. 工业炉, 2025, 47(4): 19-26+33.
- [2] Liang, P. (2014) Study on Oxygen-Enriched Combustion Application Technology. *Advanced Materials Research*, **912**, 342-345. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.912-914.342>
- [3] 杨永钊, 周进生, 胡海文, 郭春雨, 罗森木, 马江波, 郭飞, 黄子容. CCUS-EOR 产业的发展现状、经济效益与未来展望[J]. 中国矿业, 2025, 34(2): 190-203.
- [4] 杨勇, 张义华, 蔡律律, 魏孟军, 李定波. 富氧燃烧的工业应用进展分析[J]. 能源与节能, 2021(7): 179-181+205.
- [5] Lu, B., Wang, X.Y., Chen, D.M., Wang, H., et al. (2025) Energy Saving Study of Reheating Furnace from Structure and Oxygen-Enriched Combustion. *Applied Thermal Engineering*, **263**, Article 125337. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125337>
- [6] 赵德强, 马伟, 郭安宁, 王良璧, 王良成. 2.3 Mw 加氢精制加热炉富氧燃烧改造模拟研究[J]. 广东化工, 2025, 52(15): 74-78+65.
- [7] Han, S.H., Lee, Y.S., Cho, J.R. and Lee, K.H. (2018) Efficiency Analysis of Air-Fuel and Oxy-Fuel Combustion in a Reheating Furnace. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **121**, 1364-1370. <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2017.12.110>
- [8] 费轶, 王振刚, 张帆, 徐伟, 张晨. 加热炉富氧燃烧特性的实验及数值模拟[J]. 安全、健康和环境, 2017, 17(4): 36-41.
- [9] 章高霞, 李志涛, 林常枫. 高耗能行业富氧燃烧技术的前景分析[J]. 能源研究与管理, 2023, 15(4): 91-98.
- [10] 赵侯, 张天赋, 马光宇, 等. 富氧燃烧工况下抑制 NO_x 生成的技术研究[J]. 鞍钢技术, 2025(1): 40-46.
- [11] 殷柳玲, 曹希, 卜昌盛. 煤富氧燃烧及污染物排放特性研究进展[J]. 电力科技与环保, 2025, 41(1): 96-109.
- [12] 王俊, 李延兵, 廖海燕, 等. 浅谈国外煤粉富氧燃烧技术发展[J]. 华北电力技术, 2014(8): 56-61.
- [13] 樊金成, 伊智, 李国军. 富氧燃烧条件下加热炉内辐射传热分析[J]. 材料与冶金学报, 2024, 23(3): 301-306.
- [14] 金圻烨. MILD 富氧燃烧特性的数值模拟及优化[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [15] 王朔. 低 NO_x 气体燃烧器数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021.

-
- [16] 陈德敏, 李宁, 刘骁, 赵义博, 酆秀萍, 陈光. 富氧燃烧条件对加热炉传热特性影响[J]. 钢铁, 2024, 59(2): 173-184.
- [17] 韩丽莎. 管式加热炉数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
- [18] 唐龙伟. 加热炉富氧燃烧技术经济性分析[J]. 工业加热, 2020, 49(4): 6-8.
- [19] 任慧来, 于庆波, 彭家燕, 等. 三种空气分离制氧工艺应用进展[C]//中国金属学会能源与热工分会. 第八届全国能源与热工学术年会论文集. 沈阳: 中国金属学会能源与热工分会, 2015: 100-104.
- [20] 周剑峰, 刘林林. 现代制氧技术综述[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(6): 20-23.