

石化工业炉富氧燃烧 CO₂ 捕集技术的经济性及应用前景

陈雷¹ 宋鹏飞^{1,2} 曹冲^{1,2}

(1. 中石化广州工程有限公司 海南 CO₂ 技术应用中心, 广东 广州 510620)

(2. 中石化广州工程有限公司 设备室, 广东 广州 510620)

摘要: 在石化领域向低碳、绿色转型的背景下, 富氧燃烧 CO₂ 捕集作为具有经济性, 能有效实现碳减排的技术备受关注, 具备较好的应用前景。本文围绕石化工业炉富氧燃烧 CO₂ 捕集技术展开讨论, 主要从富氧燃烧技术原理和发展、技术现状、技术应用优势和经济性四个方面进行分析, 为石化行业 CO₂ 捕集技术研究与应用提供参考。

关键词: 石化; 工业炉; 富氧燃烧; CO₂ 捕集技术; 经济性; 应用前景

0 引言

石化行业是工业领域仅次于钢铁和电力的第三大能源消耗和碳排放的密集型行业, 据统计, 石化行业的二氧化碳排放至少有 73% 来自于燃烧过程, 每年工业炉排放的二氧化碳量达到 400 ~ 500 万吨。因此, 把石化工业炉燃烧过程为碳减排研究的首要目标, 将能够取得显著的效果。

1 CO₂ 捕集

CO₂ 捕集是将化石能源燃烧时产生的 CO₂ 进行收集和分离的过程, 该环节是碳捕获、利用与封存 (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 能耗和成本产生的主要环节, 约占整个总投资的 70~80%^[1]。目前 CO₂ 捕集技术主要有三种: 燃烧后捕集、燃烧前捕集和富氧燃烧捕集, 其技术原理流程如图 1 所示。

1.1 燃烧后捕集技术

燃烧后捕集技术是指燃烧发生后从烟气中捕集

CO₂。该技术需要对现有工业炉进行局部改造, 已在小规模工业装置上得到实践, CO₂ 捕集规模达到 800 吨/天。由于现有工业炉烟气 CO₂ 浓度在 7~14% 之间, 为了将 CO₂ 浓度提高到 95.5% 以上满足运输和存储要求, 就需要大量的额外能耗来提高 CO₂ 浓度。

1.2 燃烧前捕集技术

燃烧前捕集技术是把煤或天然气等燃料在燃烧前进行燃料预处理, 将燃料转化形成 CO 和 H₂ 的合成气, 然后发生水气转移反应生成更多的 H₂, CO 则转化成 CO₂。

1.3 富氧燃烧捕集技术

富氧燃烧捕集技术 (Oxy-Combustion CO₂ Capture, OCCO) 是利用高纯度的氧气代替空气, 与工业炉中的化石燃料以及燃烧后返回的部分高浓度二氧化碳一同进入燃烧室进行燃烧。燃烧过程生成的烟气主要包含水蒸气、二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物以及颗粒物,

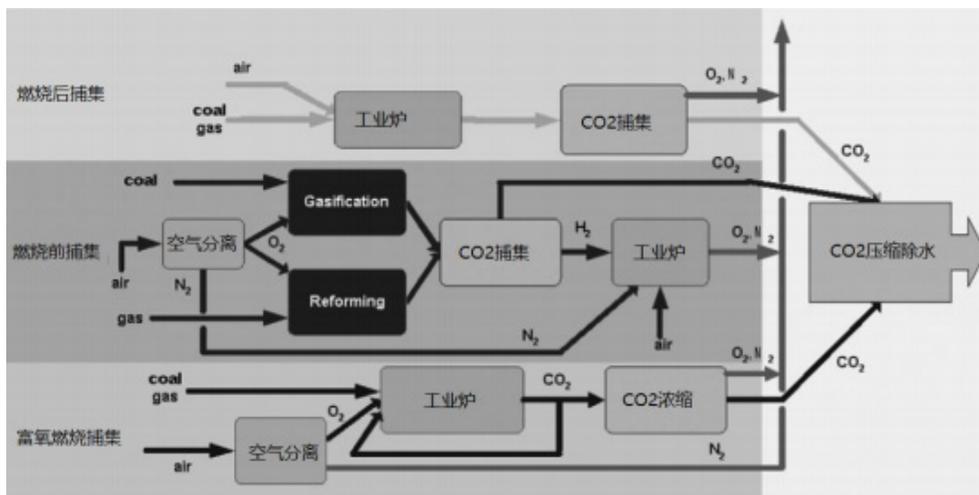


图 1 三种 CO₂ 捕集技术原理流程

通过采用传统的静电除尘器和烟气脱硫技术,有效地去除烟气中的颗粒物和二氧化硫,经处理后烟气中的二氧化碳的浓度显著提升,使CO₂更易于被捕集。

表1给出了三种CO₂捕集技术的对比,富氧燃烧捕集适用绝大部分工业炉,捕集能耗和运行成本低,生成烟气中CO₂浓度高,是石化工业炉碳减排可选的技术路线。

表1 不同CO₂捕集技术对比

| | 燃烧后捕集 | 燃烧前捕集 | 富氧燃烧捕集 |
|----|-------------------------------|------------------|-----------------------|
| 优势 | 对原有系统变动较少 | 相对成本较低 | CO ₂ 捕集能耗低 |
| 劣势 | 烟气中CO ₂ 浓度低,能耗和成本高 | 应用场景局限,只适用煤气化装置。 | 采用富氧燃烧,对操作环境有要求。 |
| 适用 | 适用绝大部分工业炉 | 煤气化装置和部分化工装置 | 适用绝大部分工业炉 |

2 富氧燃烧CO₂捕集技术现状

富氧燃烧CO₂捕集技术利用高纯度氧代替传统空气作为助燃剂与化石燃料进行燃烧,氧气浓度提高使燃烧反应更加充分高效,生成烟气中CO₂的体积分数也相应增加,可以达到80%至98%的高水平,这种高浓度的CO₂烟气为后续捕集过程提供效率,使CO₂的分离和提纯变得更经济高效。锅炉富氧燃烧CO₂捕集流程主要由空气分离单元、锅炉单元和CO₂压缩单元组成。如图2所示。

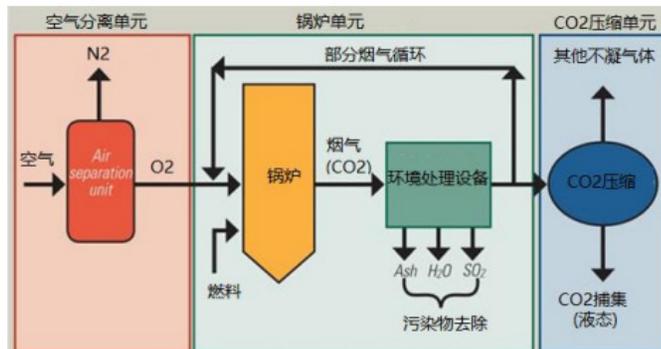


图2 典型锅炉富氧燃烧CO₂捕集流程图

富氧燃烧技术概念最早是由 Abraham 等人于 1981 年首次提出,该技术是在一个 3MW 的中式试验炉上进行了测试,ANL 实验室开展了进一步试验研究,包括技术经济评估和中式规模试验^[2,3],结果表明:在富氧燃烧条件下,燃烧效率较高且能生产高浓度CO₂。加拿大能源技术中心于 1994 年展开研究工作,其煤粉富氧燃烧试验炉最大功率达到 0.29MW^[4]。Kimura 等人在富氧燃烧实验中发现火焰着火不稳定,飞灰可燃物含量高,可通过提高混合气中氧气浓度可改善燃烧状态。在国内,富氧燃烧技术的研究也取得成果,

莱芜钢铁集团对其 130t/h 全燃高炉煤气锅炉富氧燃烧技术改造进行可行性分析,结论是运用富氧燃烧技术能有效降低空气消耗量和烟气生成量,减少烟气带走的热量损失,显著提高炉膛热效率^[5]。邢台钢铁集团对其 6 台高炉煤气锅炉进行富氧燃烧技术改造研究,结果表明,采用富氧燃烧技术不仅可以有效地利用企业内部富余的氧气,减少资源浪费,还实现了锅炉节能效果提升 20% ~ 40%^[6]。刘亮等对某钢铁集团 220t/h 燃气锅炉进行富氧燃烧试验,结果表明当通入富氧量 4000m³/h 进行燃烧时,锅炉效率为 91.87%,与常规燃烧方式相比效率提高 2.02%^[7]。基于富氧燃烧技术能够明显提高热效率,运行成本低,易于改造现有设备等诸多优势,被越来越多的学者和技术人员关注,国际能源署(EIA)已将该技术列为控制CO₂排放研究与开发计划项目。

3 石化工业炉富氧燃烧技术的应用优势

石化行业工业炉富氧燃烧CO₂捕集技术应用具备的主要优势分析如下:

3.1 提高工业炉热效率,降低工程投资

工业炉传统空气燃烧使用空气作为燃烧助燃剂,大量的N₂在燃烧过程中被加热,随废气排放,热损失达到6~10%;而对于富氧燃烧工业炉,烟气中不含N₂,而且有2/3的烟气会再循环与氧气混合进入辐射炉膛中,烟气排量显著减少,工业炉热效率会明显提高。同时,随着烟气量的减少,余热回收系统中烟气换热设备体积将减小,工业炉的结构设计更简约,整个装置平面布置也更紧凑,从而降低工程投资。

3.2 烟气中CO₂浓度高,捕集装置的投资和运行成本较低

石化企业的工业炉基本都属于工艺加热炉,一般使用自产干气或天然气作为燃料,还可以将丙烷作为燃料进行富氧燃烧,产生的烟气中CO₂浓度较高(75%~85%),可以提高CO₂捕集效率,减少捕集过程处理量,从而降低捕集能耗;同时,排放烟气中基本不含SO₂和颗粒物,其主要成份是CO₂和水,以及极少量的不凝性气体,相比电厂燃煤锅炉,无需增加静电除尘器和烟气脱硫装置,只需通过简单的冷凝除水就可以得到高浓度CO₂;因此对应的设备投资和运行成本较低。

3.3 接近零CO₂和零NO_x排放

在富氧燃烧环境下,烟气中CO₂浓度的提高将大幅提升后端捕集效率,同时由于助燃剂为氧气和再循环烟气的混合物,不存在N₂,因此NO_x生成会显著

减少, 烟气可不必分离而直接通过冷凝和加压液化回收处理, 冷凝过程中酸性水溶性污染物和颗粒物将被去除, 结合工业炉系统工程设计的完善, 采用富氧燃烧技术的工业炉可接近于零排放。

4 富氧燃烧技术经济性

阿斯通公司对美国一座燃煤 450MW 电厂的研究表明, 富氧燃烧使锅炉效率从 88.13% 提高到 90.47%, 但空气分离和 CO₂ 压缩需要大量能耗, 使电厂净发电效率由 35% 降低到 23%^[8]。A.Doukelis 等研究富氧燃烧技术中采用 MEA 脱出 CO₂ 技术进行了经济性模拟, 发现发电成本有所降低^[9]。Vladimir Kindra 和 Andrey Rogalev 等人对富氧燃烧 CO₂ 捕集技术进行技术和经济性分析指出, 在俄罗斯和欧洲实行碳税的基础上, 富氧燃烧技术的装置投资建设和运行财务情况是合理的^[10]。华北电力大学对 600MW 锅炉进行富氧燃烧经济性分析表明传统空气燃烧方式下(无脱碳系统)机组的供电成本为 0.3505 元/度, 当不考虑 CO₂ 产品收益时, 富氧燃烧技术机组供电成本达到 0.5 元/度, 但考虑 CO₂ 产品收益时, 富氧燃烧方式机组供电成本为 0.2918 元/度, 低于传统方式^[11]。

以上研究表明, 富氧燃烧技术发电厂是减少二氧化碳排放的最具投资吸引力的解决方案之一。但目前尚无石化工业炉富氧燃烧 CO₂ 捕集技术示范项目, 其技术应用还需要解决以下问题: 工业炉控制系统的数智化水平提升以及成套技术开发问题, 全厂氧气平衡研究和低成本氧气供应渠道开发(如电解水制氢产生的氧气)以对冲制氧设备及氧化剂燃烧器等投资和运行成本问题, 不同石化装置和不同燃料的应用效果评估, 优化工艺参数以降低运行成本问题, CCUS 商业模式和产业化发展进一步成熟等问题。但通过分析富氧燃烧 CO₂ 捕集能够大幅提高工业炉热效率, 节约燃料成本, 后端捕集装置的投资和运行成本较低, 以及接近零排放和未来可期的碳交易效益等技术优势, 判断富氧燃烧 CO₂ 捕集技术在石化行业 CCUS 领域的应用具备很好的经济性。

5 结论

通过以上探讨, 我们认为富氧燃烧 CO₂ 捕集技术是石化企业碳减排具有技术经济性的解决方案, 该技术可能是作为除 PCC 和 IGCC 碳减排技术之外, 第三种适合大规模推广和商业化的碳捕集技术。当前电力和钢铁行业的富氧燃烧技术的开发与应用基本成熟, 其工业化的进程迅速, 而石化行业的富氧燃烧技术研究相对较少, 尚未有应用和示范装置, 随着碳排放

“30.60”目标临近, 石化企业积极寻找具有技术经济性的碳减排技术的内在需求愈发强烈, 从富氧燃烧 CO₂ 捕集技术的经济性分析, 预测未来十年将可能是该技术在石化行业快速开发应用和商业规模形成的关键时期。

参考文献:

- [1] Blomen, Eliane, Chris Hendriks, and Filip Neele. "Capture technologies: improvements and promising developments." *Energy procedia* 1.1(2009):1505-1512.
- [2] Weller, A. E., et al. Experimental evaluation of firing pulverized coal in a CO₂/O₂ atmosphere. Lemont, IL, USA: Argonne National Laboratory, 1985, 12-16.
- [3] Berry, G., and A. Wolsky. "Modeling heat transfer in an experimental coal-fired furnace when CO₂/O₂ mixtures replace air." *Winter Annual Meeting. ASME*, 1986.
- [4] E. Croiset, K. Thambimuthu, A. Palmer. Coal combustion in O₂/CO₂ mixtures compares with air. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2000, 78(2):402-407.
- [5] 孙煜, 等. 莱钢 130 t/h 全燃高炉煤气锅炉富氧燃烧可行性分析 [J]. *冶金动力*, 2011(01): 58-59.
- [6] 廖立, 胡宇轩, 邓万里, 等. 燃气锅炉富氧燃烧研究进展与分析 [J]. *能源与节能*, 2023(09):160-165.
- [7] 刘亮, 陈明辉, 张家元, 等. 基于富氧燃烧技术的燃气锅炉能效诊断分析 [J]. *热力发电*, 2014, 43(04):95-97+101.
- [8] Nsakala N, Marion J, Bozzuto C, Liljedahl G. Engineering feasibility of CO₂ capture on an existing us coal-fired power plant [J]. In: *First national conference on carbon sequestration*, May 14-17. Washington DC; 2001.
- [9] A.Doukelis, L.Vorrias, P.Grammelis, et al. Partial O₂-fired coal power plant with post-combustion CO₂ capture: A retrofitting option for CO₂ capture ready plants [J]. *Fuel*, 2009, 88:2428-2436.
- [10] Kindra V, Rogalev A, Lisin E, Osipov S, Zlyvko O. Techno-Economic Analysis of the Oxy-Fuel Combustion Power Cycles with Near-Zero Emissions. *Energies*. 2021, 14(17):5358.
- [11] 邢晓娜. 600MW 微富氧燃烧煤粉锅炉技术经济性分析 [D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

作者简介:

陈雷(1969-), 男, 汉族, 河南洛阳人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事石化行业 CO₂ 技术应用和项目管理工。