

碳中和目标下炼化企业碳捕集与封存技术经济性分析

臧世超 (中国石化青岛石油化工有限责任公司, 山东 青岛 266043)

摘要: 全球推进碳中和目标, 炼化企业碳减排对实现此目标极为重要, 碳捕集与封存技术至关紧要。梳理行业状况、剖析问题, 研发低成本捕集技术, 强化封存风险管控, 提升技术集成协同水平, 优化技术路径。凭借政策扶持、人才培养创新、借鉴国际合作经验, 保障技术实施。这些能助炼化企业降成本、提安全性与运行效率, 有力支撑炼化行业绿色转型, 助力实现碳中和目标。

关键词: 炼化企业; 碳捕集与封存; 技术路径; 保障措施; 碳中和

中图分类号: TE624 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 013-0062-03

Exploration of Carbon Capture and Storage Technology Path for Refining and Chemical Enterprises under Carbon Neutrality Target

Zang Shichao (Sinopec Qingdao Petrochemical Co., Ltd., Qingdao Shandong 266043, China)

Abstract: The global push for carbon neutrality goals is crucial for refining companies to reduce carbon emissions, and carbon capture and storage technology is essential for achieving this goal. Sort out the industry situation, analyze problems, develop low-cost capture technology, strengthen risk control for storage, enhance the level of technology integration and collaboration, and optimize the technology path. By relying on policy support, innovative talent cultivation, and drawing on international cooperation experience, we ensure the implementation of technology. These can help refining enterprises reduce costs, improve safety and operational efficiency, strongly support the green transformation of the refining industry, and help achieve carbon neutrality goals.

Keywords: Refining and chemical enterprises; Carbon capture and storage; Technical path; Safeguard measures; Carbon Neutrality

碳中和目标成全球共识, 炼化行业作为碳排放大户, 碳减排行动备受瞩目。碳捕集与封存技术为炼化企业减排提供有效途径, 可当前应用中存在成本高、风险评估棘手、技术协同欠佳等难题。新发展理念下, 解决这些问题对推动炼化企业可持续发展极为关键。探讨炼化企业碳捕集与封存技术路径、实施保障措施, 能填补行业研究空白, 为企业提供实践指引, 助力全球碳中和目标, 对促进经济与环境协调发展意义重大。

1 炼化企业碳捕集与封存面临的问题

首先, 碳捕集成本高昂是当前炼化企业面临的主要难题之一。从设备采购到安装调试, 再到运行维护, 各个环节都需要大量的资金投入。传统的化学吸收法是目前应用较为广泛的碳捕集技术, 但其所使用的特殊吸收剂价格昂贵, 且在使用过程中会不断损耗, 需要定期补充, 这进一步增加了企业的运营成本。此外, 该技术的设备能耗较高, 大量能源消耗不仅增加了成本, 还降低了企业的能源利用效率。高昂的成本使得企业在采用碳捕集技术时顾虑重重, 极大地阻碍了其在炼化行业的推广。

其次, 封存风险评估难度极大。地下地质构造复杂多变, 不同区域的地质条件存在显著差异。在选定封存地点时, 难以精准判断地质稳定性, 潜在的泄漏隐患难以识别。即使在封存初期被认为是安全的, 地

质条件也可能随着时间推移而发生变化, 从而加大泄漏风险。一旦二氧化碳发生泄漏, 将对生态环境和人类健康造成严重危害, 这使得企业在选择封存地点和进行封存操作时如履薄冰, 不敢轻易冒险。

最后, 碳捕集与封存技术与炼化企业现有生产工艺的集成和协同性较差。炼化企业的生产工艺繁杂, 碳捕集与封存技术难以与现有生产流程实现无缝衔接。部分技术改造设备可能会干扰正常的生产流程, 甚至导致生产效率下降。同时, 各环节之间缺乏高效的协同机制, 导致整体运行效率低下, 难以充分发挥碳捕集与封存技术的综合效益。这些问题不仅增加了企业的运营成本, 还降低了企业的生产效率, 使得企业在采用碳捕集与封存技术时面临巨大的挑战。

2 炼化企业碳捕集与封存技术路径优化策略

2.1 研发低成本碳捕集技术

科研人员借助材料基因组计划等, 凭借高通量实验与计算模拟, 全力投入新型吸附材料的开发工作, 在筛选与设计具备特殊物理化学性质材料时, 精准操作, 得以快速找到提升对二氧化碳吸附能力的有效途径。金属有机框架 (MOF) 材料展现出高比表面积, 其孔隙结构具备可调控特性, 科研人员对有机配体和金属节点进行精心设计优化, 让二氧化碳吸附量实现显著提升, 部分 MOF 材料成本相对较低, 在规模化

表格名称：不同二氧化碳捕集技术性能参数对比表

捕集技术类型	材料 / 方法示例	CO ₂ 吸附能力 (mmol/g)	材料比表面积 (m ² /g)	制备成本 (元/kg)	能耗 (MJ/kgCO ₂)	技术成熟度 (TRL)	分离效率 (%)	可工业化规模 (万吨/年)
MOF 吸附材料	ZIF-8, UiO-66	3.8 ~ 6.5	1200 ~ 3000	200 ~ 800	1.5 ~ 3.0	5 ~ 7	85 ~ 95	10 ~ 50
改性聚合物膜	添加 SiO ₂ 纳米颗粒的 PEEK 膜	—	—	150 ~ 500	0.8 ~ 1.5	6 ~ 8	75 ~ 88	5 ~ 20
石墨烯基膜	单层氧化石墨烯膜	—	—	1000 ~ 3000	0.6 ~ 1.2	4 ~ 6	90 ~ 97	1 ~ 10
藻类生物捕集系统	螺旋藻、微衣藻	—	—	50 ~ 150 (运营)	3.0 ~ 6.0	3 ~ 5	65 ~ 80	1 ~ 5
基因改造藻类系统	转基因小球藻	—	—	100 ~ 300 (运营)	2.5 ~ 5.5	2 ~ 4	70 ~ 85	0.5 ~ 2

生产工艺方面，经多轮测试，发现可大规模制备，具备良好的应用前景。膜分离技术改进进程中，采用纳米技术对膜进行改性处理。在聚合物膜里引入二氧化硅纳米颗粒这类纳米粒子，从微观层面调整膜的孔径分布，改善膜的表面性质，以此提升二氧化碳的分离效率，同时精确控制，降低膜的厚度，从而有效减少能耗。在探索新型膜材料方面，像石墨烯基膜，其原子级厚度和独特二维结构，经理论分析与初步实验验证，有望实现高效的气体分离效果，生物碳捕集技术研究领域，利用藻类等微生物的光合作用来捕获二氧化碳，已成为极具潜力的可行方向。构建藻类养殖系统时，对光照时长、温度区间、营养盐浓度等藻类生长条件进行细致优化，以此提高藻类的生长速度，增强其二氧化碳固定能力。

2.2 强化封存风险评估与管理

封存前，采用地质勘探技术，像地震勘探、重力勘探、磁力勘探这些，去了解地质构造，绘制精细地质图，识别断层、裂缝等潜在泄漏风险点，运用大地电磁测深、地温监测等地球物理监测手段，掌握地下地质体电学、热学性质，分析地质稳定性。借助 CO₂RE 活动开发的数值模型这类数值模拟软件，模拟二氧化碳地下运移、封存过程，预测潜在风险。封存时，搭建实时监测网络，布置压力、温度、二氧化碳浓度传感器等设备，对封存区域全面监测，用卫星遥感技术，查看地表变形、气体泄漏状况。一旦察觉异常，马上启动应急预案，比如注入惰性气体堵泄漏通道、

改变注入策略，强化和科研机构、高校合作，搭建产学研联合创新平台。高校、科研机构凭借科研资源，开展基础研究，探寻新风险评估方法、技术；企业提供实际项目数据、应用场景，推动科研成果转化。

2.3 提升技术集成与协同水平

在挑选碳捕集技术之际，依据各生产环节废气流量、二氧化碳浓度、温度以及压力等参数做适配。炼油产出的高温且高浓度二氧化碳废气，采用热稳定性优良的吸附剂或膜分离技术应对；化工生产中低浓度二氧化碳废气，可运用化学吸收法或者生物碳捕集技术处理。技术改造与优化工作上，借助数字化技术对现有生产设备构建模型并仿真，剖析碳捕集技术和现有设备的适配情况，进而拟定有针对性的改造方案。利用虚拟工厂技术，在计算机模拟碳捕集设备的安装和运转过程，提前洞察潜在问题并加以优化。协同管理层面，搭建统一调度与控制系统，运用工业互联网技术，达成各环节数据实时共享及交互。大数据分析，依二氧化碳物理特性与运输距离，优化运输路线与方式，挑选适宜运输工具，长距离、大规模二氧化碳输送适宜用管道运输，短距离、小批量运输则罐车较为合适。封存阶段，与周边能源企业或者地质利用项目建立合作，将二氧化碳用于提升石油采收率、地热开发等，实现资源化利用，提高经济效益。

3 炼化企业碳捕集与封存技术经济性分析

3.1 成本构成分析

炼化企业碳捕集与封存技术的成本主要由设备投

资、运行维护、能耗以及技术改造等多个方面构成。在设备投资方面,碳捕集设备如吸附塔、分离膜组件、压缩机等,以及封存相关的地质监测设备、注入设备等,都需要大量的资金投入。以传统的化学吸收法为例,其设备采购成本较高,且由于需要使用特殊的吸收剂,这些吸收剂价格昂贵,且在使用过程中会有损耗,需要定期补充,进一步增加了设备的运行成本。在运行维护方面,碳捕集与封存技术涉及复杂的工艺流程和设备操作,需要专业的技术人员进行维护和管理,这使得人力成本成为运行维护成本的重要组成部分。此外,设备的定期检修、部件更换以及故障排除等也会产生额外的费用。能耗方面,碳捕集过程中的吸附、分离、压缩等环节都需要消耗大量的能源,尤其是对于一些能耗较高的技术,如传统的化学吸收法,其能耗成本占据了总成本的较大比例。技术改造方面,为了实现碳捕集与封存技术与现有生产流程的无缝衔接,炼化企业需要对现有生产设备和工艺进行改造,这不仅需要投入大量的资金用于设备更新和技术升级,还可能会影响正常的生产进度,带来额外的经济损失。

3.2 成本效益分析

尽管碳捕集与封存技术的成本较高,但其带来的效益也是显著的。从环境效益来看,通过碳捕集与封存技术,炼化企业能够有效减少二氧化碳的排放,降低对大气环境的污染,缓解气候变化的压力,这对于实现全球碳中和目标具有重要意义。此外,减少二氧化碳排放还可以避免企业因碳排放超标而面临的罚款和政策限制,降低企业的环境风险。从经济效益来看,随着碳市场的逐渐完善,炼化企业通过碳捕集与封存技术所减少的碳排放量可以转化为碳配额,在碳市场上进行交易,从而为企业带来额外的经济收益。同时,通过优化碳捕集与封存技术,降低其成本,还可以提高企业的竞争力,为企业在未来的低碳经济中占据有利地位。此外,将二氧化碳用于提升石油采收率、地热开发等资源化利用项目,不仅可以实现二氧化碳的有效利用,还可以为企业带来额外的经济收益,进一步提高碳捕集与封存技术的经济效益。

3.3 经济性提升策略

为了提高炼化企业碳捕集与封存技术的经济性,需要从多个方面采取措施。首先,加强技术研发与创新,降低碳捕集与封存技术的成本。例如,开发新型的吸附材料和膜分离技术,提高二氧化碳的吸附能力和分离效率,降低材料成本和能耗。其次,优化技术集成与协同,提高碳捕集与封存技术的整体运行效率。通过数字化技术对现有生产设备进行建模与仿真,优

化碳捕集技术与现有生产流程的适配,减少技术改造对生产的影响。同时,利用工业互联网技术实现各环节数据的实时共享与交互,优化运输路线与方式,降低运输成本。最后,加强与周边企业的合作,实现二氧化碳的资源化利用,提高经济效益。例如,与能源企业合作,将二氧化碳用于提升石油采收率、地热开发等项目,不仅可以实现二氧化碳的有效利用,还可以为企业带来额外的经济收益。此外,还可以通过政策支持和市场机制的完善,鼓励炼化企业采用碳捕集与封存技术,提高其经济性。

4 结语

在碳中和目标背景下,炼化企业碳捕集与封存技术的发展意义非凡却也充满挑战。这项技术存在成本高昂、封存风险评估不易、技术集成协同性欠佳等状况。研发低成本捕集技术、加强风险评估管理、提高技术集成协同水平,能够优化技术发展路径。凭借政策支持引导、人才培养和技术创新、借鉴国际合作经验这些保障手段,可推动技术落地实施。持续解决技术难题、健全保障体系,将助力炼化企业迈向绿色低碳转型,为全球实现碳中和目标贡献重要力量。

参考文献:

- [1] Rais A. 碳捕集、利用和封存(CCUS)技术引领全球碳中和新潮流 [J]. 流程工业, 2025, (01): 42-43.
- [2] 蔡力宏, 顾永正, 于常军, 等. 煤电行业碳中和路径分析与研究 [J]. 洁净煤技术, 2024, 30(S1): 91-98.
- [3] 韦贤, 何理鹏, 石磊, 等. 随钻测压取样技术在碳捕集与封存项目中的应用 [J]. 测井技术, 2023, 47(06): 758-763.
- [4] 磨昕玥, 毕哲, 范晓辉, 等. 碳中和目标下碳捕集、利用和封存技术的计量检测需求及挑战 [J]. 计量科学与技术, 2023, 67(09): 3-14.
- [5] 张星竹, 冯骊安. 油气行业碳捕集、利用与封存技术探析 [J]. 黑龙江环境通报, 2023, 36(03): 136-138.
- [6] 柴麒敏. 碳中和、新能源与土地 [J]. 世界环境, 2022, (02): 16-17.
- [7] 姚宏. 工业企业碳中和与绿色发展 [M]. 化学工业出版社: 2022.
- [8] 刘婧, 王娜, 程凡, 等. 加速迈向碳中和之碳捕集、利用与封存技术 [J]. 张江科技评论, 2021, (06): 11-13.
- [9] 鲁军辉, 王随林, 唐进京, 等. 可再生能源与余热协同辅助碳捕集技术研究现状与展望 [J]. 华电技术, 2021, 43(11): 97-109.

作者简介:

臧世超(1998-),男,汉族,山东省泰安市新泰市,本科,助理工程师,研究方向为石油化工。