

石化行业碳捕集与低碳工艺一体化集成发展趋势及未来前景展望

刘金鹏 刘 威 (恒力石化(大连)炼化有限公司, 辽宁 大连 116318)

摘要: 在“双碳”目标下,石化行业迎来了全新挑战。为积极应对低碳转型压力,本研究从技术内核与应用逻辑两个层面入手,对石化行业碳捕集与低碳工艺一体化集成发展趋势及未来前景展开详细分析,明确了一体化集成在工艺协同降耗、整合系统投资、碳资源循环利用三个维度的优势,在全链条技术深度耦合、绿氢等零碳能源融合应用、跨企业管网共享方面的发展趋势,在千万吨级项目规模化落地提速、核心技术与标准海外输出扩容、碳资源化应用场景多元拓展领域的演进方向。旨在石化为行业实现低碳转型、满足“双碳”需求、提高可持续发展能力奠定坚实基础。

关键词: 石化行业; 碳捕集; 低碳工艺; 一体化集成; 零碳能源

中图分类号: TE65 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 034-0001-03

The integrated development trend and future prospects of carbon capture and low-carbon processes in the petrochemical industry

Liu Jinpeng, Liu Wei (Hengli Petrochemical (Dalian) Refining Co., Ltd. Dalian Liaoning 116318, China)

Abstract: Under the “dual carbon” goal, the petrochemical industry has faced new challenges. In order to actively respond to the pressure of low-carbon transformation, this study starts from the two levels of technical core and application logic, and conducts a detailed analysis of the development trend and future prospects of carbon capture and low-carbon process integration in the petrochemical industry. It clarifies the advantages of integrated integration in three dimensions: process synergy and consumption reduction, integrated system investment, and carbon resource recycling. It also explores the development trend in the deep coupling of full chain technology, zero carbon energy integration such as green hydrogen, and cross enterprise pipeline network sharing, and the evolution direction in the areas of accelerating the large-scale landing of 10 million ton projects, expanding the overseas output of core technologies and standards, and diversifying the application scenarios of carbon resource utilization. Aiming to lay a solid foundation for the petrochemical industry to achieve low-carbon transformation, meet the demand for “dual carbon”, and enhance sustainable development capabilities.

Keywords: petrochemical industry; Carbon capture; Low carbon technology; Integrated integration; Zero carbon energy

随着“双碳”目标在我国社会经济发展中的深入推进,人民对耗能较高、排放量大的石化行业提出了更加严苛、规范的低碳转型要求与标准。传统减排技术功能单一,具有的效率低、成本高、资源使用不合理等问题始终无法得到彻底解决,难以与行业平衡产能、减排降污的核心需求高度适配。作为能够有效解决上述问题的系统性方案,碳捕集与低碳工艺一体化集成凭借工艺协同性高、成本优化力度大、资源可循环利用的优势,成为现阶段石化行业实现转型升级的关键发展路径。鉴于此,本文深入探究碳捕集与低碳工艺一体化集成技术体系的发展趋势与未来前景,系统剖析技术演进逻辑,结合行业发展需求,明确产业应用潜力,以期石化行业低碳转型实践措施的有效落地提供可行思路与技术支持。

1 石化行业碳捕集与低碳工艺一体化集成

石化行业碳捕集与低碳工艺一体化集成并非单一

技术的简单拼接,而是以“全流程协同、资源循环、系统降本”为核心的低碳转型系统性方案,打破碳捕集与生产工艺的孤立壁垒,通过工艺流、能量流、物质流的深度耦合,实现减碳与效益的双重突破。

一体化集成以精准的工艺匹配为基础,采用胺基功能化 MOFs 吸附材料与膜分离技术耦合的复合捕集体系,结合夹点分析优化热集成路径,将捕集过程的再生余热、低压蒸汽精准匹配至炼化装置的原料预热、催化剂活化等环节,降低额外能源消耗。利用全流程数字孪生系统构建动态模型,实时调控温度、压力、吸收剂浓度等关键参数,解决传统独立系统中“参数脱节、能耗叠加”问题,提高碳捕集效率,降低系统综合能耗。一体化集成通过跨环节资源共享摊薄设备投资与运营成本,推动碳资源的原位高值化利用,捕集的高纯度 CO₂ 可直接接入炼化装置的催化转化单元,在绿氢辅助下通过逆水煤气变换反应生成合成气,通

过电化学还原技术转化为高附加值化工中间体,实现“捕集—转化—利用”的闭环循环,避免碳资源输送过程中的损耗与安全风险。

2 石化行业碳捕集与低碳工艺一体化集成优势

2.1 工艺协同降耗,实现减碳与产能双赢

一体化设计可使碳捕集过程精准匹配炼化、化工装置的工艺特性。在吸收剂选择上采用高稳定性复配醇胺体系,结合级间冷却与富液分流技术,提升回收捕集过程中的低压蒸汽热量,相较传统独立捕集系统可降低 15% 左右的再生能耗。捕集环节与生产工艺形成能量互补,碳捕集所需冷量供给通过 CO 变换气的低温余热转化提供,不必单独配置制冷单元,捕集的高纯度 CO₂ 可反哺生产环节,作为驱油介质或化工合成原料,降低碳排放强度,提升主产品收率,实现减碳与产能的协同双赢。

2.2 整合系统投资,降低单环节成本

传统模式下,碳捕集、运输、封存各环节需单独建设基础设施,管道铺设与设备购置成本高昂,一体化模式可利用现有石化园区的公用工程系统,共享供水、供电、蒸汽管网等设施,减少重复建设投入^[1]。跨企业、跨环节的共享管网与封存场地可摊薄运输与封存成本。系统整合后可优化设备负荷匹配,减少闲置产能,利用规模化效应,降低单位 CO₂ 捕集的折旧、减少能耗、缩减维护成本,消除单一环节投资回报周期长的弊端。

2.3 碳资源循环利用,拓展增值路径

通过工艺耦合,捕集的 CO₂ 可直接接入现有生产体系,借助生物催化、电解转化等技术,转变为乙烯、乙醇等高端化工原料,也可以作为合成材料、碳酸二甲酯等产品的生产基材,形成产业闭环^[2]。高纯度 CO₂ 可用于原油开采中的混相驱油,提升原油采收率,实现永久性封存,打破传统碳捕集“只投入不产出”的局限,促使 CO₂ 成为创造经济价值的新要素,为石化行业实现低碳转型提供新的利润增长点。

3 石化行业碳捕集与低碳工艺一体化集成发展趋势

3.1 全链条技术深度耦合,提升系统效率

对于石化行业碳捕集与低碳工艺一体化集成而言,其核心发展趋势是将全链条深度耦合模式彻底替代传统单一环节技术拼接模式,通过跨工艺技术协同,解决系统效率问题^[3]。未来,应将技术耦合的重点方向集中到“捕集—转化—利用—封存”全流程参数匹配与机理协同方面,将新型膜分离捕集技术与胺法吸收工艺耦合,发挥膜组件选择性渗、透特性预处理烟气的功能,使后续吸收塔的负荷与吸收剂损耗大幅降

低,使用流程模拟软件,构建数字化模型系统,对温度、压力、流量等关键参数进行动态优化。碳捕集过程与炼化装置的热集成技术的进一步成熟,利用夹点分析方法,对各环节热量需求、供给进行精准匹配,在原料预热、催化剂活化等生产环节运用捕集系统的再生余热,避免额外能源输入。

3.2 绿氢等零碳能源融合应用成主流

绿氢这一类零碳能源与一体化集成系统的深度融合,已经从补充应用模式向主流配置模式逐渐转变,成为石化行业实现低碳转型的重要支撑。未来,绿氢能源将不再受困于只能替代化石能源的局限,而是通过工艺重构,实现与碳捕集、化工生产协同联动。绿氢与捕集的 CO₂ 在逆水煤气变换反应中,生成合成气,可直接作为生产乙烯、丙烯等核心产品的原料,不仅消纳了大量 CO₂,还减少了化石原料的消耗量^[4]。绿氢生产与碳捕集系统的能源互补将成为技术重点,利用电解水制氢过程低谷时段产生的电能,为碳捕集的压缩、输送提供动力支持,通过捕集系统回收的低压蒸汽,使电解槽的余热得到充分利用。在高效加氢催化剂、固态储氢材料等配套技术方面的突破,会大幅提升一体化系统中绿氢能源的兼容性、利用率,促使零碳能源成为一体化集成系统的核心。

3.3 跨企业管网共享,摊薄运输成本

石化行业碳捕集与低碳工艺一体化集成降低成本的重要发展趋势之一,是跨企业、跨区域的碳输送管网共享,能够将单一企业自建管网的局限与资源浪费问题彻底打破^[5]。未来,石化园区应积极组织相关领域构建区域性碳输送主干管网,将园区内炼化、煤化工、精细化工等企业的碳捕集产出进行充分整合,统一规划管网系统,并输送到集中式封存场地、资源化利用中心,从根源杜绝重复铺设支线管道导致的投资浪费。

管网技术向“高强度、低损耗、智能化”转变,利用耐 CO₂ 腐蚀的双相不锈钢管材、泄漏监测传感器、物联网技术,实时监控并预警管网压力、流量、泄漏等问题,提高能源输送安全、输送质量、输送能效。

4 石化行业碳捕集与低碳工艺一体化集成发展未来前景展望

4.1 千万吨级项目规模化落地提速

随着各种先进技术与关键技术的持续迭代更新,无论是高效胺基功能化吸附材料、大型化膜分离组件等核心设备的国产化突破,还是全流程数字化管控系统的广泛、高效应用,都会进一步提高项目运行稳定性、碳捕集效率,为技术应用的规模化落地奠定坚实基础^[6]。

结合不断完善的碳市场机制、精准发力的政策补贴制度,不仅能够保证项目投资的回报周期大幅缩减,而且还能引导更多社会资本集中参与,为单一企业示范项目朝着园区级、区域级集群化项目转型提供积极助力。千万吨级项目可利用多企业碳源整合渠道、共享封存场地、公用工程系统,使企业碳减排成本得到合理摊铺,以“捕集—输送—利用—封存”于一体的规模化产业生态链条,为石化行业实现碳达峰目标提供帮助。

4.2 核心技术与标准海外输出扩容

通过在国内多个区域建立石化行业碳捕集与低碳工艺一体化集成示范项目,结合实践验证可知,目前已形成的低成本一体化技术路线适配不同规模石化企业发展需求,特别是在中、低浓度烟气捕集、长距离管道输送、咸水层封存监测等领域具有独特的技术优势,无论是方案的投资成本,还是运行能耗,与欧美国家同类技术相比,竞争力更强,并逐步朝着构建包括设计、施工、运维、安全评估于一体的完整标准体系方向完善^[7]。

未来,石化行业碳捕集与低碳工艺一体化集成系统应借助“一带一路”能源合作、国际低碳技术论坛等多元化渠道,推动相关标准与国际接轨。海外输出方面,该系统应转变传统单一技术设备出口模式,向输出全流程解决方案领域转变,利用技术授权、工程总承包、运维服务等有效方式,为全球石化行业实现低碳转型提供助力,确保我国在国际低碳技术领域更具话语权。

4.3 碳资源化应用场景多元拓展

在我国催化转化、电化学还原等技术不断突破的背景下,利用相关技术捕集的CO₂将不再只用于驱油、生产基础化工原料等传统场景,而是朝着电子级碳酸酯、可降解生物塑料、高端复合材料这一类高附加值产品持续延伸,进一步提高了碳资源的经济价值^[8]。跨行业融合凭借独特的应用优势,将成为石化行业的全新亮点,将一体化系统捕集的CO₂与新能源行业充分融合,利用绿电驱动的CO₂电化学还原反应,制备多碳产物;与建筑行业积极合作,生产低碳水泥、泡沫混凝土等环保建材,组建跨产业碳循环链条。在食品加工、医药合成、人工光合作用等领域,CO₂的应用也将逐步落实,通过构建减排+增值的多元化产业新格局,使碳资源成为提高石化行业利润增长的黑马。

5 结束语

根据上述对石化行业碳捕集与低碳工艺一体化集成发展趋势及未来前景展开的详细分析可知:现阶段,我国石化行业碳捕集与低碳工艺一体化集成正朝着多

技术、全流程深度整合方向不断演进,利用跨环节参数匹配与机理协同,实现对系统运行效率的持续优化。将零碳能源与一体化系统深度融合作为石化行业改革发展的核心支撑,能够确保能源供给模式从传统外部依赖向内部循环全面转型。通过跨企业、跨区域资源共享模式,能够有效解决成本方面的问题,确保石化企业将更多资源投入到技术规模化推广领域。

未来发展中,石化行业碳捕集与低碳工艺一体化集成凭借自身的多元化优势,不仅能够实现向规模化、国际化、高值化方向快速发展,为集群化项目的大规模摊铺创造条件,构成一个具有较高成熟化、低碳化的产业生态模型,借助完整的技术体系与规范标准,向海外市场深度输出,而且还能对传统资源化路径进行不断突破,深度拓展跨行业、高附加值的碳利用场景,形成减排与增值并重的全新产业格局,为国际石化行业低碳转型发展提供可行、能行、必行的中国方案。

参考文献:

- [1] 石秀玲,梁锋,艾光艳,等.石化企业绿色供应链管理中的碳足迹评估与减排策略[J].石化技术,2025,32(6):203-205.
- [2] 关键,杨东升.探究二氧化碳的工业捕集——“基于碳中和理念的低碳行动方案设计”项目式学习[J].化学教与学,2024(2):3-9.
- [3] 刘强,肖金,于航,等.变压吸附捕集CO₂技术研究进展及其在石化行业应用案例分析[J].南方能源建设,2024,11(5):37-49.
- [4] 黄钟斌,陈曦,叶宁,等.MA-2吸收剂在国能锦界电厂15万t/a碳捕集装置上的应用研究[J].现代化工,2024,44(5):243-246.
- [5] 翟明洋,周长波,张永波,等.二氧化碳捕集利用与封存项目纳入碳市场的现状、挑战与对策[J].中国环境管理,2023,15(6):87-93.
- [6] 陈雷,宋鹏飞,曹冲.石化工业炉富氧燃烧CO₂捕集技术的经济性及应用前景[J].中国化工贸易,2024,16(11):26-28.
- [7] 彭鑫,沈菲菲,张庭伟,等.大型炼化一体化过程全流程低碳运行分析与决策优化综述[J].中国科学基金,2024,38(4):571-582.
- [8] 李远,耿海虹,张楚珂,等.“双碳”目标下基于LCA的典型石化产品碳足迹研究[J].中国环境管理,2024,16(4):131-140.

作者简介:

刘金鹏(1985-),男,满族,辽宁兴城人,大学本科,工程师,研究方向:石化行业生产工艺技术。