

炼化企业 CCUS"捕---输---注"全产业链耦合油田驱油 技术实践

边 杰¹ 张海明¹ 刘建锋¹ 赵云奕² 张 泉¹

(1. 中国石油华北石化公司; 2. 克拉玛依职业技术学院)

摘 要: 在"双碳"战略引领下,炼化行业作为碳排放重点领域,低碳转型已成为高质量发展的必由之路^[1]。CCUS(碳捕集、利用与封存)技术作为深度减排的核心路径,其"捕---输---注"全产业链与油田驱油技术的耦合应用,实现了"炼化减碳"与"油田增油"的双赢目标^[2]。本文结合华北石化---华北油田、辽河石化---辽河油田、以及齐鲁石化---胜利油田等国内标杆项目实践,系统阐述炼化企业 CCUS 全产业链的技术路径优化、关键装备创新及耦合驱油的工程应用成效,分析不同环节的技术瓶颈与解决方案,为石油石化行业绿色低碳转型提供可复制、可推广的实践经验。

关键词: 炼化企业; CCUS 全产业链; 捕---输---注耦合; 油田驱油; 绿色低碳

1 引 言

炼化行业在原油加工、制氢等生产过程中产生大量高浓度二氧化碳,既是主要碳排放源,也是优质的碳资源^[3]。传统排放模式不仅加剧环境压力,也造成资源浪费;而油田开发进入中后期后,低渗透油藏采收率低、老油田稳产难等问题日益突出^[4]。CCUS"捕---输---注"全产业链耦合油田驱油技术,通过将炼化企业捕集的二氧化碳经输送管道注入油田油藏,利用超临界二氧化碳的独特理化特性提高原油流动性,在实现二氧化碳地下封存的同时提升原油采收率,为炼化减排与油田增效提供了协同解决方案^[5]。

近年来,国内已建成多个规模化示范项目,其中华北石化 20 万吨/年 CCUS 项目于 2025 年底顺利投产;齐鲁石化---胜利油田百万吨级 CCUS 项目每年减排二氧化碳 100 万吨,15 年预计累计增油 300 万吨;辽河石化 10 万吨/年二氧化碳回收装置投运后,年回收 8.52 万吨高纯度二氧化碳用于辽河油田驱油;标志着我国在该领域已实现工业化应用突破^[6]。本文基于上述实践案例,从技术体系、工程实践、效益分析及发展展望等方面展开论述,为行业技术推广提供参考。

2 CCUS"捕---输---注"全产业链技术体系与耦合机理

2.1 炼化企业二氧化碳捕集技术优化

炼化企业碳捕集以高浓度排放源为核心,重点针对制氢装置、催化裂化装置等尾气开展回收。目前主流技术路线包括抽真空变压吸附(VPSA)和中压液化工艺,具有工艺成熟、产品纯度高、运行成本低等优势^[7]。华北石化采用西南化工研究院 V-PSA 工艺,可稳定产出纯度超 99% 的工业级液

体二氧化碳，为后续驱油应用奠定基础。辽河石化采用 VPSA+ 中压液化组合工艺，对 2 号制氢装置尾气进行处理，生产出纯度 99.9% 的液态二氧化碳产品，收率与稳定运行周期均达到行业领先水平；齐鲁石化针对煤制氢装置 90% 纯度的尾气，通过中压法低温液化提纯工艺，使产品纯度提升至 99% 以上。

捕集环节的核心优化方向在于低成本与低能耗，通过精准调控吸收塔压力、再生热负荷及压缩机组匹配度，实现系统高效运行。同时，依托炼化企业现有装置布局，构建“就近捕集、集中处理”的模块化架构，降低设备改造与土地占用成本，成为规模化应用的关键前提。

2.2 长距离二氧化碳输送技术创新

二氧化碳相态易受温度压力影响，长距离输送需解决保压、防泄漏及冷量回收等技术难题^[8]。国内标杆项目创新采用“常温密相管道输送”模式，打造二氧化碳“专属地铁”：齐鲁石化——胜利油田项目建设 109 公里长输管道，通过自主研发的高压增压泵使二氧化碳保持常温密相状态，避免了液态输送的冻胀风险与气态输送的低效率问题。

管道设计集成了换热升温与冷量回收技术，在保障输送安全的同时降低厂区运行能耗。针对百公里级管道的压力稳定控制难题，通过设置分气增压点与智能监测系统，实现全程压力精准调控，解决了传统管道压力不足 1 兆帕的技术瓶颈，年输送能力达 100 万吨，为规模化耦合应用提供了关键支撑。

2.3 油田驱油注入技术与封存机理

注入环节的核心目标是实现二氧化碳高效封存与驱油增效的协同。胜利油田研发模块化、自动化高效低温密闭注入装备，通过增设回流遇冷管路和高压气液分离装置，将二氧化碳气态损耗率降至最低，封存率达 60%—70%；针对低渗透油藏特点，创新采用“高压混相驱”技术，当注入压力提升至 40 兆帕时，二氧化碳与原油充分互溶，显著提升原油流动性^[9]。

二氧化碳在油藏中的封存主要通过三种路径实现：一是置换原油后占据孔隙空间实现物理封存；二是与地层水中的镁离子、钙离子发生化学反应形成碳酸盐矿物实现矿物封存；三是与地层水和残余油相溶实现溶解封存。实践表明，该技术使驱油效率比常规水驱高 40%，原油采收率提升 7—20 个百分点，为老油田稳产增产提供了有效手段^[10]。

2.4 全产业链耦合协同机制

“捕——输——注”全产业链耦合的核心在于上下游协同联动：炼化企业提供稳定的高纯度二氧化碳原料，油田提供驱油与封存空间，通过一体化管网规划实现资源高效匹配。华北石化——华北油田通过“当天定节点、当天出纪要、当天强落实”的协同推进机制，快速打通“捕集——输送——注入”全流程；辽河石化与辽河油田依托地理邻近优势，构建“捕集——液化——输送——注入”无缝衔接体系；齐鲁石化——胜利油田通过跨区域管道连接，形成“异地捕集、长距输送、本地利用”的耦合模式；三种模式分别为近距离协同、跨区域规模化应用及高效组织协同提供了示范。

耦合机制的关键在于参数协同优化，即根据炼化排放源特性调整捕集工艺参数，依据输送距离优化管道压力与温度控制，结合油藏地质条件定制注入方案，实现全链条能效最大化与成本最小化。

3 工程实践案例分析

3.1 华北石化 —— 华北油田 CCUS 项目

作为河北省重点前期项目，华北石化 20 万吨 / 年 CCUS 项目于 2025 年 3 月启动建设，历时 9 个月圆满达成 “当年开工、当年中交、当年投产” 目标。项目采用西南化工研究院 V-PSA 工艺，稳定产出纯度超 99% 的工业级液体二氧化碳，年捕集能力 20 万吨，减排量相当于植树近 800 万棵。

项目产出的二氧化碳输送至华北油田八里西潜山 CCUS 先导试验站，采用液相注入 + 超临界回注的闭环工艺，实现二氧化碳的循环利用。该项目作为京津冀地区最大的碳驱油碳埋存先导试验项目，已进入系统试运行阶段，全周期预计埋存二氧化碳 800 余万吨。项目通过 “日沟通、周调度、月复盘” 协同机制，严把质量、安全、进度、投资、环保、风险六大控制，为京津冀炼化行业 CCUS 技术规模化应用提供了 “华北样本”。



3.2 齐鲁石化 —— 油田百万吨级 CCUS 项目

作为国内首个百万吨级示范工程，该项目覆盖 12 个油藏区块，设计注气井 73 口、采油井 166 口，新建 15 座注气站与 2 座集中处理站。捕集端采用中压液化提纯工艺处理煤制氢尾气，输送端通过 109 公里长输管道实现跨区域输送，注入端针对低渗透油藏实施高压混相驱技术。

项目投运以来累计注入二氧化碳超 200 万吨，示范区日产油量从 220 吨提升至 460 吨，每年减排二氧化碳 100 万吨，相当于植树近 900 万棵。该项目制定 4 项国家及行业标准，授权发明专利 56 件，验证了百万吨级全产业链耦合的技术可行性与经济合理性。

3.3 辽河石化 —— 辽河油田 CCUS 一体化项目

项目依托地理邻近优势，构建短距离耦合体系，辽河石化 10 万吨 / 年二氧化碳回收装置投运一个月生产合格产品 3056 吨，纯度高于 99.5%。通过优化 VPSA 工艺参数与压缩机组匹配度，实现年回收二氧化碳 8.52 万吨，全部输送至辽河油田冷家、兴隆台等潜力区块用于驱油。

项目创新采用 “当天定节点、当天出纪要、当天强落实” 的协同推进机制，快速解决了从建设到运行的多环节衔接问题，实现了 “建设 —— 调试 —— 投产” 的高效转化，为中小型炼化企业与邻近油田的耦合应用提供了轻量化示范方案。

4 技术效益与推广价值

4.1 环境效益

CCUS 全产业链耦合技术实现了二氧化碳的资源化利用与永久封存，华北石化项目年减排 20 万吨二氧化碳，相当 8900 万棵树木的固碳量；齐鲁石化——胜利油田项目每年减排量相当于 900 万棵树木的固碳量，辽河石化项目年减排 8.52 万吨二氧化碳，为炼化行业深度减排提供了关键路径。若在全国炼化企业与油田广泛推广，将大幅降低行业碳排放强度，助力“双碳”目标实现。

4.2 经济效益

项目实现了“炼化减碳”与“油田增油”的双赢：华北石化项目投产后为区域能源结构优化注入新动能；辽河石化通过碳回收获得稳定收益，辽河油田采收率显著提升；胜利油田 15 年预计增油 300 万吨，直接经济效益显著；同时，自主技术与装备的应用降低了项目投资成本，与国外同类技术相比，设备购置成本降低 30% 以上，运行能耗降低 15%—20%，提升了技术的市场竞争力。

4.3 行业推广价值

三类示范项目形成了差异化推广模式：近距离耦合模式适用于炼化企业与油田地理邻近的场景，具有投资小、见效快的优势；跨区域规模化模式适用于大型炼化基地与整装油田的协同，可实现更大范围的碳减排与资源增效；高效组织协同模式为快速推进项目建设与投产提供了管理范本。项目研发的自主技术与装备，填补了国内多项技术空白，制定的行业标准为技术规范推广提供了依据。

5 现存问题与发展展望

5.1 主要技术瓶颈

当前全产业链耦合应用仍面临三方面挑战：一是捕集环节能耗较高，低浓度二氧化碳捕集成本尚未达到经济阈值；二是长距离输送管道的安全监测与泄漏应急处置技术需进一步完善；三是复杂油藏的二氧化碳前缘控制与气窜防治技术有待突破，部分区块存在封存效率不稳定问题。

5.2 未来发展方向

技术创新升级：聚焦低能耗捕集技术研发，优化吸附材料与分离工艺，降低捕集成本；研发智能监测与泄漏预警系统，提升长输管道安全保障能力；针对复杂油藏开发二氧化碳驱油提效技术，提高采收率与封存率。

产业链协同拓展：构建“炼化+油田+新能源”一体化体系，利用新能源为捕集、输送环节供电，进一步降低碳足迹；拓展“二氧化碳+”应用场景，结合地热、储能等技术提升综合效益。

政策与市场支撑：完善碳交易与财政补贴政策，建立 CCUS 项目收益共享机制；推动跨行业协同，吸引化工、煤电等领域碳排放源参与，形成规模化碳资源循环利用网络。

6 结 论

炼化企业 CCUS“捕—输—注”全产业链耦合油田驱油技术，通过捕集环节的工艺优化、输送环节的装备创新、注入环节的机理突破及全链条的协同联动，实现了环境效益与经济效益的统一。国内标杆项目的成功实践验证了技术的可行性与可靠性，形成了差异化的推广模式与完善的技术标准体系。

该技术不仅为炼化行业深度减排提供了有效路径，也为老油田稳产增产注入了新动力，是石油石化行业践行绿色低碳发展理念的核心支撑。未来通过持续的技术创新、产业链拓展与政策支持，该技术将实现规模化、低成本应用，为我国“双碳”目标实现与能源安全保障作出重要贡献。

参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会．“十四五”节能减排综合工作方案 [R]．北京：国家发展和改革委员会，2023.
- [2] 张宏伟，李志强．碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术发展现状与展望 [J]．中国工程科学，2024，26(1)：1-10.
- [3] 中国石油和化学工业联合会．中国炼化行业碳排放白皮书 [R]．北京：中国石油和化学工业联合会，2025.
- [4] 王德民，郭平．提高油气采收率技术原理与应用 [M]．北京：石油工业出版社，2022.
- [5] International Energy Agency (IEA). CCUS in Clean Energy Transitions [R]. Paris: IEA, 2024.
- [6] 张对红，邹才能．中国 CCUS 产业化发展路径研究 [J]．石油勘探与开发，2025，52(2)：1-12.
- [7] 孙丽丽，高雄厚．炼化企业低碳转型路径与关键技术 [J]．石油炼制与化工，2024，55(5)：1-8.
- [8] 国家石油天然气管网集团有限公司．二氧化碳长输管道关键技术研究报告 [R]．北京：国家管网集团，2024.
- [9] 李明丰，韩布兴．二氧化碳驱油提高采收率技术 [M]．北京：石油工业出版社，2023.
- [10] 刘中民，杨震．CCUS 地质封存机理与安全性评价 [J]．地质科技通报，2024，43(4)：1-15.