

# 碳捕集与封存 (CCUS) 技术在化工行业的工程化应用探索

杜文君

中国石化江苏油田分公司勘探开发研究院 江苏 扬州 225009

**摘要:** 本文围绕CCUS技术在化工行业的工程化应用展开探索, 阐述CCUS技术核心体系及化工行业碳排放特性, 分析二者工程化适配性, 结合合成氨、煤化工等领域实践案例, 总结应用成效, 剖析技术、经济、政策层面的核心问题, 提出技术优化、工程设计完善及保障体系构建的具体策略, 为化工行业依托CCUS技术实现低碳转型提供理论与实践参考, 助力“双碳”目标落地见效。

**关键词:** 碳捕集与封存 (CCUS) 技术; 化工行业; 工程化; 应用

引言: “双碳”目标下, 化工行业作为高耗能、高排放重点领域, 碳排放总量居工业前列, 减排压力突出。CCUS技术作为实现大规模碳减排的关键路径, 已成为化工行业低碳转型的核心支撑。当前, CCUS技术在化工领域的工程化应用虽取得一定突破, 但仍面临装备依赖进口、成本偏高、政策不完善等难题, 因此, 系统探索其工程化应用路径, 破解现存困境, 对推动化工行业绿色可持续发展具有重要现实意义。

## 1 CCUS技术体系及化工行业碳排放特性

### 1.1 CCUS技术核心体系及工作原理

(1) 碳捕集技术: 燃烧前捕集通过气化原料生成合成气, 经变换反应分离二氧化碳, 适用于煤气化场景;

燃烧后捕集用化学吸收剂分离烟气中低浓度二氧化碳, 适配现有燃煤、化工窑炉; 富氧燃烧用纯氧助燃, 冷却后分离高纯度二氧化碳, 需改造燃烧设备, 适用于大型化工装置。(2) 碳运输技术: 管道运输连续性强、成本低, 适用于长距离、大规模运输, 工程要求严格把控管道腐蚀与压力; 罐车运输灵活, 适用于短途小批量运输, 需符合危险品运输规范; 船舶运输适配跨海域运输, 工程需配套低温液化和泄漏监测设备。(3) 碳封存技术: 地质封存将二氧化碳注入深层咸水层、枯竭油气藏, 经密封岩层固定, 核心是选址勘察与长期监测; 海洋封存将二氧化碳注入深海, 需严格评估海洋环境影响, 核心是控制泄漏风险, 保障生态安全<sup>[1]</sup>。如图1。



图1 CCUS 技术核心体系及工作原理

### 1.2 化工行业碳排放现状及核心特征

(1) 化工行业碳排放总量居工业前列, 占全国总排放量约15%, 重点排放环节集中在合成氨、炼油、煤化工等领域, 其中合成氨、甲醇等基础化工产品排放占比最高, 传统工艺能耗高导致排放突出。(2) 化工行业碳排放核心特征: 排放源高度集中于大型生产基地; 排放浓

度差异大, 煤化工等环节浓度高, 部分精细化工环节浓度低; 成分复杂, 除二氧化碳外, 还含有微量有害气体, 增加捕集难度。

### 1.3 CCUS技术与化工行业的工程化适配性分析

(1) 适配优势: 化工行业部分环节二氧化碳浓度高, 可降低捕集能耗与成本; 排放源集中, 便于集中建设CCUS

设施,减少运输环节投入,提升工程化效率。(2)工程化约束:CCUS捕集、压缩环节能耗较高,可能影响化工生产效率;化工厂区空间有限,制约大型CCUS设备布局;前期投资大、运维成本高,增加企业经济负担。(3)可行性总结:化工行业高浓度、集中式排放源与CCUS技术适配性较强,现有技术可满足核心工程需求;虽面临能耗、成本等约束,但通过技术优化与政策支持,CCUS技术在大型化工企业具备良好的工程化应用可行性,是化工行业低碳转型的关键路径。

## 2 CCUS技术在化工行业的工程化应用实践

### 2.1 化工行业碳捕集工程化应用

(1)不同化工工艺的碳捕集技术选型需结合工艺特性与排放特点,实现精准适配。合成氨行业以燃烧后捕集为主,其锅炉烟气二氧化碳浓度适中,采用胺法吸收工艺可高效分离,无需对现有生产系统进行大规模改造,适配性强;煤化工行业多采用燃烧前捕集,利用原料气化生成的合成气,经水煤气变换反应将二氧化碳分离,捕集效率更高,且能与后续化工产品生产形成协同,减少能耗浪费;炼油行业则根据装置类型灵活选用,催化裂化装置适合燃烧后捕集,加氢装置可结合富氧燃烧捕集技术,兼顾减排效果与生产稳定性。(2)工程化应用关键参数直接决定捕集工程的实用性与经济性。捕集效率方面,化工行业主流捕集技术效率可达85%~95%,其中燃烧前捕集效率略高于燃烧后;能耗上,燃烧后捕集单位能耗约为2.5~3.5GJ/吨CO<sub>2</sub>,燃烧前捕集约为1.8~2.8GJ/吨CO<sub>2</sub>,富氧燃烧捕集能耗相对较高;投资成本受装置规模影响较大,大型化工项目捕集系统单位投资约150~300元/吨CO<sub>2</sub>,小型项目成本偏高;运行稳定性需重点把控吸收剂损耗、设备腐蚀等问题,通过优化工艺参数,可实现连续稳定运行,年运行时间可达8000小时以上<sup>[2]</sup>。(3)典型案例:延长石油榆煤化30万吨/年二氧化碳液化项目,是煤化工行业碳捕集工程化的标杆实践。该项目针对煤化工装置尾气,采用燃烧前捕集工艺,通过水煤气变换、低温甲醇洗等核心技术,分离出高纯度二氧化碳,再经液化处理后储存。项目捕集效率达90%以上,单位能耗控制在2.2GJ/吨CO<sub>2</sub>,年捕集液化二氧化碳30万吨,有效解决了煤化工生产中的碳排放问题,为同类项目提供了可复制的工程化经验。

### 2.2 化工行业碳运输与封存工程化应用

(1)化工园区碳运输路径规划以管道运输为主、罐车运输补充,兼顾效率与灵活性。管道运输主要用于园区内及周边短至中距离、大规模二氧化碳输送,工程化设计需结合园区布局,优化管道走向,避开敏感区域,采

用耐腐蚀、高压管道材料,设置泄漏监测装置,确保输送安全;罐车运输主要用于短途、小批量运输,以及管道未覆盖区域的补充输送,工程设计需符合危险品运输规范,配备低温绝热储罐,保障运输过程中的稳定性,降低泄漏风险。(2)化工行业碳封存选址需遵循安全、可行、经济的原则,优先选择深层咸水层、枯竭油气藏等地质条件稳定、密封性能好的区域,避开地下水保护区、生态敏感区。工程化施工流程主要包括选址勘察、钻井、注入井建设、二氧化碳注入等环节,施工过程中需严格控制钻井精度,做好井壁密封处理;安全监测体系涵盖地面监测、井下监测和环境监测,通过实时监测二氧化碳浓度、压力变化,及时发现泄漏隐患,保障封存区域的生态与人员安全<sup>[3]</sup>。(3)典型案例:齐鲁石化一胜利油田CCUS项目,是化工行业碳运输与封存工程化的典型代表。该项目依托齐鲁石化的碳排放源,采用管道运输方式,建设长距离输气管道,将捕集的二氧化碳输送至胜利油田枯竭油气藏进行封存。运输管道全长约80公里,设计输量达100万吨/年,封存区域经过严格勘察,采用分层注入工艺,配套完善的安全监测系统,实现了二氧化碳的安全、高效运输与封存,年封存二氧化碳超100万吨,同时助力油田提高采收率,实现了环保与效益双赢。

### 2.3 CCUS技术在化工行业的工程化应用成效评估

(1)环境成效显著,可有效减少化工行业碳排放,助力“双碳”目标实现。大型CCUS项目年减排二氧化碳可达数十万吨甚至上百万吨,显著降低化工行业碳排放总量;同时,在碳捕集过程中,可协同去除烟气中的硫化物、氮氧化物等污染物,减少大气污染,改善区域环境质量,实现污染物协同控制。(2)经济成效呈现多元化,长期收益可观。投资回报率方面,受碳价、补贴政策影响,目前大型项目投资回收期约8~12年,随着碳交易市场完善,投资回报将逐步提升;运营成本通过技术优化可实现有效控制,规模化应用能进一步降低单位运营成本;此外,捕集的二氧化碳可用于驱油、食品加工等领域,结合碳交易,可为企业带来额外的经济收益,提升企业市场竞争力。(3)技术成效突出,推动CCUS技术迭代与工程化成熟。通过工程化应用,逐步解决了捕集效率、能耗控制、设备腐蚀等技术难题,提升了CCUS技术的成熟度与可靠性;同时,积累了丰富的工程化设计、施工、运维经验,形成了适配化工行业不同工艺的技术方案,为后续大规模推广应用奠定了坚实基础。

## 3 CCUS技术在化工行业工程化应用的问题及优化策略

### 3.1 工程化应用存在的核心问题

(1)技术层面存在明显短板,制约工程化推广。核

心装备依赖进口是关键瓶颈,如高效吸收塔、低温液化机组等核心设备多依赖国外厂商,不仅增加设备采购成本,还存在运维不便、备件供应不及时等问题;低浓度碳源捕集效率偏低,化工行业中部分精细化工环节二氧化碳浓度低于15%,现有捕集技术难以实现高效分离,且易造成吸收剂损耗过大;能耗偏高问题突出,多数化工企业CCUS系统能耗占生产总能耗的8%~15%,过高的能耗会挤压企业生产效益,影响企业应用积极性。(2)经济层面压力较大,市场化推进受阻。初始投资规模庞大,一套百万吨级CCUS工程初始投资可达数十亿元,远超普通化工环保项目,多数中小企业难以承担;运营成本居高不下,捕集剂更换、设备运维、能耗消耗等持续投入,进一步增加企业经济负担;盈利模式尚不清晰,目前CCUS项目主要依赖政府补贴,碳交易收益有限,且缺乏多元化盈利渠道,导致企业投入与回报失衡,参与积极性不足。(3)政策与标准层面不完善,缺乏有效支撑。专项政策缺失,针对化工行业CCUS工程化的财政补贴、税收减免等政策较为零散,未形成系统性扶持体系;技术标准不统一,不同企业、不同工艺采用的捕集、运输、封存技术标准差异较大,导致项目设计、施工、验收缺乏统一规范,影响工程质量与安全性;安全监管体系不完善,针对化工行业CCUS项目的长期监测、泄漏应急处置等监管机制不健全,存在安全隐患<sup>[4]</sup>。

### 3.2 工程化应用优化技术策略

(1) 聚焦核心技术优化,突破技术瓶颈。加快新型捕集剂研发,重点开发高效、低损耗、易再生的新型胺类吸收剂及固体吸附剂,降低捕集过程中的吸收剂消耗与能耗;推进核心装备国产化替代,加大对国内装备企业的扶持力度,推动高效分离装备、压缩机组等核心设备实现自主研发与量产,降低设备采购与运维成本;加强工艺集成优化,将CCUS系统与化工生产工艺深度融合,实现能量梯级利用,提升系统整体效率,降低单位碳排放捕集能耗。(2) 优化工程设计,提升系统适配性与经济性。结合不同化工工艺的排放特点,开展CCUS系统集成设计,针对合成氨、煤化工等不同领域,定制适配性强的捕集、运输、封存一体化方案,减少对现有生产系统的干扰;强化能耗与成本控制优化,优化工艺流程,采用节能设备,降低系统运行能耗,同时通过规模化应用、集中建设等方式,摊薄初始投资与运营成本,提升项目经济性。(3) 升级安全技术,筑牢工程安全防线。推动封存安全监测技术升级,采用物联网、大数据等技术,构建全方位、实时化的监测体系,实现对二氧化碳注入、封存全过程的动态监测,及时发现泄漏隐患;完

善风险防控体系,制定针对性的泄漏应急处置方案,加强应急演练,配备专业应急设备,提升项目应对突发安全事件的能力,保障人员、环境与工程安全。

### 3.3 工程化应用保障策略

(1) 强化政策保障,完善扶持体系。加快完善CCUS专项扶持政策,出台针对化工行业的财政补贴、税收减免、信贷支持等政策,降低企业项目投入成本;将CCUS项目减排量正式纳入碳交易体系,提高减排量的市场价值,拓宽企业收益渠道;加快制定统一的技术标准与行业规范,明确项目设计、施工、验收、运维等各环节的要求,规范行业发展。(2) 健全经济保障,破解资金难题。拓宽融资渠道,鼓励社会资本、金融机构参与CCUS项目投资,形成政府引导、市场主导的多元化融资模式;通过技术优化、规模化应用等方式,进一步降低项目投资与运营成本,提升项目盈利水平;构建多元化盈利模式,推动捕集的二氧化碳用于驱油、食品加工、化工原料等领域,实现“减排+收益”双重效益,激发企业参与动力<sup>[5]</sup>。(3) 加强行业协同,推动落地见效。建立企业、科研机构、政府三方协同合作机制,企业负责工程化应用实践,科研机构聚焦核心技术攻关,政府负责政策引导与监管保障,形成协同发力的良好格局;加强技术交流与成果转化,推动科研成果快速落地为工程化技术,加速CCUS技术迭代升级,促进其在化工行业的规模化、规范化应用。

### 结束语

CCUS技术在化工行业的工程化应用是一项长期系统工程,兼具环境、经济与技术价值,既是化工行业践行“双碳”目标的必然选择,也是推动行业高质量发展的重要举措。尽管目前其应用仍面临诸多制约,但随着核心技术迭代、政策体系完善及行业协同发力,CCUS技术将逐步实现规模化、规范化应用,为化工行业低碳转型注入持久动力,助力构建绿色低碳化工产业体系。

### 参考文献

- [1]王键,杨剑,王中原,宋宝华.全球碳捕集与封存发展现状及未来趋势[J].环境工程,2022,30(04):118-120.
- [2]张卫东,张栋,田克忠.碳捕集与封存技术的现状与未来[J].中外能源,2024,14(11):57-61.
- [3]冯峰.我国能源消耗与二氧化碳排放的特征及其变化[J].经济研究参考,2024,10(19):144-145.
- [4]陆诗建,黄凤敏,李清方.燃烧后CO<sub>2</sub>捕集技术与工程进展[J].现代化工,2023,8(6):48-52.
- [5]孙路长,沈煜晖,斋滕聪.燃气-蒸汽联合循环电厂实施碳捕集的可行性研究[J].华电技术,2024,6(4):81-84.