

我国大型煤化工装置 CO₂ 高效捕集 及资源化利用工艺技术研究与应用前景

宋景涛 毛百虎 付金峰 (新疆广汇碳科技综合利用有限公司, 新疆 哈密 839300)

摘要: 随着我国社会经济的发展, 我国作为以煤炭为能源主体结构的全球碳排放大国, 2019 年 CO₂ 排放量约占全球碳排放总量的 28%, 位居全球首位。2020 年 9 月, 国家领导人在 75 届联合国大会宣布, 我国 CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值, 力争于 2060 年前实现碳中和。我国能源系统规模庞大、需求多样, 从兼顾实现碳中和目标和保障能源安全的角度考虑, 未来将积极构建以高比例可再生能源为主导, 核能、化石能源等多元互补的清洁低碳, 安全高效的现代能源体系。据已有研究预测, 到 2050 年化石能源仍将扮演重要角色, 占中国能源消费比例的 10%-15%。从实现碳中和目标的减排需求来看, 需实现该部分化石能源利用过程中 CO₂ 近零排放, 碳减排势在必行且面临着巨大压力与挑战。碳捕集、运输与封存技术作为 CO₂ 深度减排的主要方式之一, 是碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术的重要组成部分。中国陆地的理论封存能力仍为万吨级, 不仅如此, 中国具有良好的 CO₂ 源汇匹配体系, 有利于煤化工 CCUS 产业化建设。从我国源汇匹配的情况看, CCUS 技术可提供的减排潜力, 基本可以满足实现碳中和目标的需求 (6-21 亿 t CO₂)。我国高度重视 CCUS 技术发展, 稳步推进该技术研发与应用。目前, 我国 CCUS 技术整体处于工业示范阶段, 但现有示范项目规模较小。CCUS 的技术成本是影响其大规模应用的重要因素, 随着技术的发展, 我国 CCUS 技术成本未来有较大下降空间。

关键词: 煤化工; CO₂ 捕集技术; 源汇匹配; 驱油; 资源化利用; CO₂ 封存; 经济性; 节能减排; 创新与探索

1 引言

碳减排与碳中和不仅关乎国家政策的规划承诺, 更与我们赖以生存的地球环境息息相关, CO₂ 捕集与封存技术和 CO₂ 提高原油采收率技术 (CCUS-EOR) 是近年来国内外备受关注的温室气体减排及提高原油采收率技术, 是 CO₂ 限制排放和合理利用的有效途径。美国、澳大利亚、加拿大等国已建立起较为完善的大规模管输埋存驱油、管道输送技术和 CO₂ 驱油技术, CO₂ 回收利用技术渐趋成熟。相比之下, 目前国内捕集回收 CO₂ 主要采用槽车运输, 未实现大规模的管输, 运输成本相对较高。CO₂ 捕集和驱油利用的经济适用性对于各大油田企业高效经济回收利用 CO₂ 具有重要指导意义。鉴于此, 通过 CO₂ 捕集技术应用、捕集成本、运输成本、驱油成本、增油效益等几个方面进行分析评价, 建立一种 CO₂ 工业尾气捕集并用于油田驱油的经济评价方法, 现代工业生产中 CO₂ 的排放源很多, 如煤化工、水泥、钢铁、电力及炼化厂等都是 CO₂ 排放大户, 针对 CO₂ 排放问题, 各个行业均进行了 CO₂ 的捕集、利用和封存方面的研究探索, 每个行业又根

据自身行业特点形成了多种 CO₂ 捕集、利用和封存的技术方法, 中国已投运或建设中的 CCUS 示范项目约为 40 个, 捕集能力超 400 万 t/a。多以石油、煤化工、电力行业小规模捕集驱油示范为主, 缺乏大规模的多种技术组合的全流程工业化示范。

2 CO₂ 高效捕集工艺技术及成本

目前行业 CO₂ 捕集工艺技术主要分为化石燃料电厂排放 CO₂ 尾气回收和化工装置生产过程排放的 CO₂ 捕集回收两部分。全球现有电厂 CO₂ 年排放量约 106 亿 t, 占全世界排放总量的 40.6%; 化石燃料电厂排放量 76 亿 t, 占发电行业排放量的 72%。在石油化工、煤化工、天然气生产和化工转化过程中, 往往排放大量的 CO₂。针对排放的 CO₂, 捕集技术主要分为燃烧后捕集、燃烧前捕集以及富氧燃烧, 捕集后回收的方法主要有溶剂吸收法、吸附法、低温液化分离法、膜分离法四种。当前国内用于 CO₂ 尾气捕集回收的主流技术和成本价格差异较大, 目前燃煤电厂、钢铁厂的吨气回收成本 450-550 元, 炼油厂尾气吨气回收成本是 350-400 元, 煤化工、合成氨吨气回收成本 250-320 元。煤化工行

业高浓度 CO₂ 捕集工艺技术相对高效且捕集成本较低, 经济效益优势明显。

CO₂ 捕集成本由捕集工艺流程决定, 如何做到 CO₂ 高效捕集, 重点取决于实际发生的设备折旧、人工、动力、材料消耗及检维修等; 运输成本取决于运输方式和气源与 CO₂ 驱油注入点的距离决定; 注入成本相对波动不大, 主要包含设备折旧、人工、动力、材料消耗等费用。石化和化工(含煤化工)行业是 CO₂ 的主要利用领域, 通过化学反应将 CO₂ 转变成其他物质, 然后进行资源再利用。石化和化工(含煤化工)行业有很多高浓度 CO₂ (高于 70%) 排放源(包括天然气加工厂、煤化工工厂、氨/化肥生产厂、乙烯生产厂、甲醇、乙醇生产厂等), 相较于低浓度排放源, 其捕集能耗低、投资成本与运行维护成本低, 有显著优势。因此, 石化与化工领域高浓度排放源可为早期 CCUS 示范提供低成本机会。中国的早期 CCUS 示范项目优先采用高浓度排放源与 EOR 相结合的方式, 通过 CCUS-EOR 产生收益, 当市场油价处于高位时, CCUS-EOR 收益不仅可完全抵消 CCUS 成本, 并为 CCUS 相关利益方创造额外经济利润, 即以负成本实现 CO₂ 减排。中国 CCUS 示范项目整体规模较小, 成本较高。CCUS 的成本主要包括经济成本和环境成本。经济成本包括固定成本和运行成本, 环境成本包括环境风险与能耗排放。经济成本首要构成是运行成本, 是 CCUS 技术在实际操作的全流程过程中, 各个环节所需要的成本投入。运行成本主要涉及捕集、运输、封存、利用这四个主要环节。CO₂ 管道运输是未来大规模示范项目的主要输送方式, 预计 2030 和 2060 年管道运输成本分别为 0.7 和 0.4 元/t·km。在源汇匹配良好的基础上优先采用 CO₂ 管道输送, 可以大大降低运行成本。

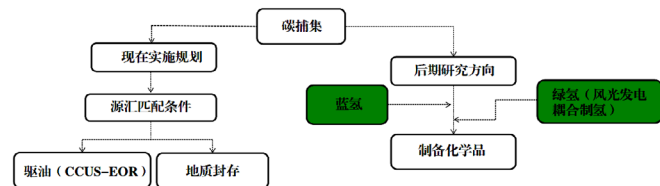


图 1

3 CO₂ 利用和封存技术的研究

碳捕集、利用和封存 (CCUS) 是目前最直接有效的碳减排技术之一, 煤化工行业实现双碳目标要加速行业低碳转型, 主动加强 CCUS 技术的发展。对 CO₂ 排放浓度高的煤化工项目尾气, 可以实现较低成本碳

捕集, 再用于油气田提高采收率 (EOR), 可以经济有效地助力实现碳中和目标, 从国内外碳捕集项目经验看地下封存、驱油和食品级利用是当前较主流的方向, 技术可以通过把煤化工或天然气化工产生的碳源和油田联系起来有较好的收益, 该技术通过把捕集来的 CO₂ 注入到油田中使即将枯竭的油田再次采出石油的同时也将 CO₂ 永久地贮存在地下 CO₂ 驱油的主要原理是降低原油粘度、增加原油内能从而提高原油流动性并增加油层压力, CO₂ 制化肥和食品级 CO₂ 商业利用也是目前较成熟的碳利用项目。

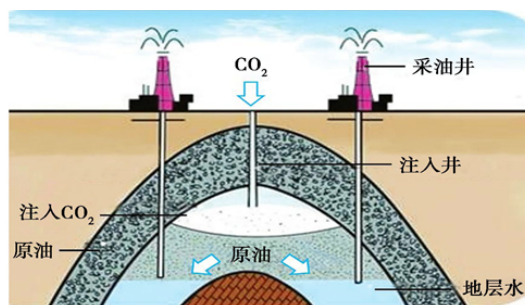


图 2 CO₂ 驱油技术示意图

随着工业化进程的加快, 国内也开启了 CO₂ 捕集项目的研究, 相比国外, 中国的 CCUS 项目起步较晚, 且百万吨级规模的捕集项目较少, 目前, 国内以捕集量为 10 万吨级规模的项目为主工业是现代社会的基础, 也是经济发展的源泉, 在带来了经济效益和工作机会的同时, 也带来了许多问题, 工业消耗了全球 1/3 的能源, 却产生了全球 1/3 的温室气体, 在实现近零排放目标, CCUS 技术将起到至关重要的作用, 预估利用 CCUS 技术, 从 2017 年-2060 年可以减少 280 亿 t 的 CO₂ 排放。

新的碳捕集技术将会在材料的创新、工艺或设备的改进上取得突破, 这些新的技术进展将使得投资运营成本降低的同时提高捕集效率, 随着工业的进步, 新的捕集技术将助推 CCUS 技术的进步和发展, 未来几十年, 对于应对全球气候变暖, 碳利用将起到重要作用, 纵观国内外成熟的工程项目, 地下封存、驱油和食品级利用是当前较主流的方向, 其中驱油技术可以通过 CO₂ 把煤化工或天然气化工产生的碳源和油田联系起来, 有较好的收益, 有较好的应用前景, 而未来与氢能利用相结合的 CCUS 项目将会越来越多。

4 源汇匹配的 CCUS 减排潜力

煤化工行业持续高质量发展, 目前新疆地区具有良好的源汇匹配性, 也是 CCUS-EOR 项目能否实现盈

利的关键。目前全球运行、在建和规划的 CCUS 项目有 400 多个,年捕集规模在 40 万 t 以上的大规模综合性项目约 43 个。大规模综合性项目主要集中在北美和欧洲,项目个数及 CO₂ 捕集量占 62%,其次是澳大利亚和中国。数据显示,CO₂ 运输距离一般在 315km 内,多数超过 100km。有关研究发现,80% 的 CO₂ 排放源与地质封存汇匹配发生在 300km 的运输距离内。目前制约 CCUS 发展的关键因素为成本因素,实现规模化商业运营难度较大,重启 CCER、扩大全国碳市场行业覆盖范围,弥补项目亏损或增加效益,将增加更多行业实施 CCUS 项目的积极性。

在目前的技术条件下,中国 CCUS-EOR 与主要行业的源汇匹配较好。从盆地规模来看,渤海湾盆地、松辽盆地具有较大的 CCUS-EOR 潜力,被视为 CCUS 项目实施的优先区域。CCUS 源汇匹配主要考虑排放源和封存场地的地理位置关系和环境适宜性。250km 是不需要 CO₂ 中继压缩站的最长管道距离,建设成本比较低,因此常常作为中国源汇匹配分析中的距离限制,超过 250km 一般不做考虑。我国非常重视 CCUS 的环境影响和环境风险,重点考虑 CO₂ 地质封存对于水资源(地下水和地表水)、地表植被和人群健康的环境风险和环境风险。

目前准噶尔盆地、吐鲁番-哈密盆地、鄂尔多斯盆地、松辽盆地和渤海湾盆地被认为是,煤化工、火电行业部署 CCUS 技术的重点区域,适宜优先开展 CCUS 早期集成示范项目,推动 CCUS 技术大规模、商业化发展。主要分布在吐鲁番-哈密盆地、鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、松辽盆地、柴达木盆地等具有中、高的封存适宜性。

5 结论

①通过对煤化工行业高浓度 CO₂ 捕集技术、捕集成本、运输成本、驱油成本、增油效益等方面的分析评价,可以建立一种 CO₂ 捕集驱油的经济评价方法,并以此对吐哈油田 CO₂ 驱油技术开展经济性评价;② CO₂ 捕集驱油的经济效益具有重要的指导意义。源汇匹配适用于全国各大油田低油价条件下开展碳捕集、利用和封存(CCUS)技术的经济可行性研究。同时开展 CCUS 与新能源耦合的技术是实现碳中和目标的重要技术保障;③完善 CCUS 政策支持与标准规范体系,有利于推动 CCUS 商业化步伐,将 CCUS 纳入产业和技术发展目录,完善优化法律法规框架,制定科学合理的建设、运营、监管、终止等标准体系;④

规划布局 CCUS 基础设施建设,加大 CO₂ 捕集、输送与封存各环节的基础设施投资力度与建设规模,提高技术设施管理水平,建立相关基础设施合作共享机制,推动 CCUS 技术与不同碳排放领域和行业的耦合集成,研究建立 CCUS-EOR 产业链涉及的捕集、运输、注入等各环节的成本分担、效益分成机制,调动各方积极性、消除各方后顾之忧;⑤有序开展大规模 CCUS 示范与产业化集群建设,提高 CCUS 全链条技术单元之间的兼容与优化,加快突破大规模 CCUS 全流程示范的相关技术瓶颈,促进 CCUS 产业优质发展。

参考文献:

- [1] 庞凌云,蔡博峰,陈潇君等,《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南(试行)》环境风险评估流程研究[J]. 环境工程,2019,37(2).
- [2] 秦积舜,李永亮,吴德斌等.CCUS 全球进展与中国对策建议[J]. 油气地质与采收率,2020,27(1):20-28.
- [3] 王丹. 二氧化碳捕集、利用与封存技术全链分析与集成优化研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所),2020.
- [4] 王枫,朱大宏,等.660MW 燃煤机组百万吨 CO₂ 捕集系统技术经济分析[J]. 洁净煤技术,2016,22(6).
- [5] 王金南,刘兰翠. 二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)项目的环境管理思考[J]. 低碳世界,2013(1):22-25.
- [6] 魏一鸣. 气候工程管理:碳捕集与封存技术管理[M]. 北京:科学出版社,2020.
- [7] 王永胜,中国神华煤制油深部咸水层二氧化碳捕集与地质封存项目环境风险后评估研究[J]. 环境工程,2018,36(2):21-26.
- [8] 魏宁,等. 国家能源集团燃煤电厂 CCUS 改造的成本竞争力分析[J]. 中国电机工程学报,2020,40(4).
- [9] 吴佳阳. 燃烧后二氧化碳捕集系统的全生命周期环境影响评价[D]. 杭州:浙江大学,2019.
- [10] 亚洲开发银行. 中国碳捕集与封存示范和推广路线图研究[R].2015.
- [11] 张贤. 碳中和目标下中国碳捕集利用与封存技术应用前景[J]. 可持续发展经济导刊,2020(12):22-24.
- [12] 耿海燕,等. 二氧化碳封存及提高石油采收率的环境风险研究[J]. 安全与环境工程,2012,19(3):55-58.
- [13] 李侠祥,张学珍,王芳,等. 中国 2030 年碳排放达峰研究进展[J]. 地理科学研究,2017,6(1):9.
- [14] 世界资源研究所(WRI). 零碳之路:“十四五”开启中国绿色发展新篇章[R].2021.