

# 关于石化行业应用 CCUS 技术的效益分析研究

何富炬 (中国轻工业广州工程有限公司, 广东 广州 510000)

**摘要:** CCUS 技术是一种二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 捕集、运输、利用及封存技术。目前全球 CCUS 相关设施每年可捕集的 CO<sub>2</sub> 达到约 4000 万 t, 其中约 62% 集中在欧美, 其次便是中国与澳大利亚。我国 CCUS 项目主要集中在一些大型能源公司。尤其是在石油化工企业, CO<sub>2</sub> 驱油已经成为了促进石油采收率提升的一项关键技术。本文主要对石化行业上下游企业中 CCUS 技术的应用成本及效益进行了相关的计算和分析, 并在此基础上对我国进行以商业化为目的的 CCUS 项目建设提出了相关的建议。

**关键词:** 石化行业; CCUS 技术; 经济效益

## 0 前言

国家领导人在 2020 年 9 月召开的七十五届联合国大会上提出, 我国将在 2030 年通过相应的正常措施力争将二氧化碳排放达到峰值, 并于 2060 年前达到碳中和。通过“碳达峰”与“碳中和”目标的提出, 将我国积极践行国家使命, 积极应对全球气候变暖挑战的决心充分彰显了出来。而为了实现这一目标, 就必须积极利用低碳技术。作为目前全球公认的一种无需大幅对现有电力及工业生产流程进行改变就可以达到大规模降低碳排放的重要技术, CCUS 技术便成为了我国石化能源行业实现低碳发展的一项主要技术选择, 并表现出了非常大的发展潜力。近年来, 发改委、环境部等国家相关部门对我国 CCUS 科技的研发进行了大力的扶持, 促进了 CCUS 技术水平的快速提升, 初步掌握了全产业链关键技术, 并取得了显著的示范应用效果。

## 1 CCUS 技术概述和应用意义

### 1.1 CCUS 技术概述

CCUS 技术是以温室气体为目标的一种减排技术, 通过应用该技术能够使化石燃料排放的温室其他大幅降低, CCUS 技术具体包含 4 个环节的内容, 分别为二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 的捕集、运输、利用以及封存。捕集环节中目前主要包括 3 种技术, 分别为: ①燃烧后捕集, 通常来说, 这项技术在燃煤锅炉以及燃气轮机发电设施中的应用比较常见; ②燃烧前捕集, 此技术需要较高的成本投入, 因此经常需要与 IGCC 联合循环发电技术同时进行应用, 只能在新建设的发电站中应用该技术; ③富氧燃烧, 通过应用制氧技术获得高浓度氧气来实现氧气循环。在运输环节中, 其方式较为灵活, 管道、船舶、公路、铁路等都可以实现二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 的运输, 目前管道输送已经逐渐开始实

现商业化发展。国内采用较多的是罐车公路运输。在利用环节中, CO<sub>2</sub> 地质利用特别是驱油技术因为封存规模大且能够有效提高采收率, 使得其被广泛应用。与此同时, 化工利用、物理利用、生物利用技术也逐渐被囊括于 CCUS 技术范畴中。在封存阶段, 又可以将地质分层细分为三种不同类型, 即废弃油气藏封存、咸水层封存以及不可开采煤层封存。现阶段, 部分国家已经开始实施海上盐水层和废弃油气田封存 CO<sub>2</sub> 的项目。根据其封存类型而言, 其中 CO<sub>2</sub> 驱油项目占比达到 60% 以上。

### 1.2 应用 CCUS 技术的重要性

基于碳减排与低碳发展视角, 加强推广和应用 CCUS 技术的意义非常重大:

在现有的技术层面上, 能够有效实现工业流程温室气体减排的只有 CCUS 这一种技术。尤其是对于钢铁、水泥、电气、石化等行业而言, 要想在生产过程中实现深度减排, 就必然需要应用到 CCUS 技术, 这与当前我国提出的“双碳”战略目标完全相符。

作为一项重要的减排技术, CCUS 技术具有一定的经济性。一般而言, 水泥、钢铁、化工等行业要想实现减排具有很大的难度, 其最好的选择就是技术成熟且表现出较好成本效益的 CCUS 技术。如果不应用 CCUS 技术, 以上行业都难以达到净零排放的目标。此外, 煤炭以及天然气行业也可以利用 CCUS 技术来达到进一步降低低碳制氢成本的目的。在以上有着较大减排难度的行业中, 这项技术的应用意义可以说非常重大。

CCUS 技术是一种重要的低碳氢生产方式。IEA 指出, 除了通过利用再生能源电解水进行制氢以外, 利用 CCUS 技术对化石能源制氢设备进行改造, 也是一种重要的低碳氢来源。全球目前已经实施过 CCUS 技

术改造的制氢车间共有 7 个, 每年能够生产的氢气达到 40 万 t, 产量为电解槽制氢量的 3 倍以上。今后利用 CCUS 技术制备低碳氢的项目还将继续增加, 从而促进碳捕集量实现进一步的增长。初步预计到 2070 年, “化石燃料+CCUS 技术”所产出的低碳氢将达到低碳氢制备总量的 40% 以上。

## 2 CCUS 技术的应用

### 2.1 CO<sub>2</sub> 的捕集技术

目前, 工业脱碳捕集主要有乙醇胺与冷冻氨两种方法, 可以通过下列方式核算两者之间的成本:

$$COR = C_{AI} + C_{OM} + C_R$$

式中: COR 为年分离总成本 (元);  $C_{AI}$  为年设备折旧费 (元);  $C_{OM}$  为年设备运行维护费 (元);  $C_R$  为年再生液成本 (元)。

$$C_F = P_C \times Q_D / (Q_C \times \eta)$$

$$C_R = C_F \times M$$

式中:  $C_F$  为燃料费 (元);  $Q_D$  为再生液能耗量 (GJ/(t CO<sub>2</sub>));  $Q_C$  为燃料产能量 (GJ/t);  $P_C$  为燃料价格 (元);  $M$  为二氧化碳分离量 (t);  $\eta$  为热效率。默认燃料为煤炭。

$$C_{AI} = r_{AI} \times K$$

$$C_{OM} = r_{OM} \times K$$

$$r_{AI} = [(1-r)/k] \times 100\%$$

式中:  $r_{AI}$  为年设备折旧率,  $r_{OM}$  为年设备运行维护费率;  $K$  为设备总价值 (元)。

### 2.2 CO<sub>2</sub>-EOR 技术

CO<sub>2</sub>-EOR 技术是一种在油层中注入 CO<sub>2</sub>, 通过二氧化碳体积膨胀的原理、气化原油的特性等途径, 使原有的采收率得到提高。通过运用这项技术, 除了能够有效提升原油的采收率之外, 还能够进一步的提升采收到的原有质量。在石化行业中, 利用 CO<sub>2</sub> 驱油来增加原有采收率已经具有多年历史, 是一种较为成熟的原有开采技术。该技术的创新点就是通过工业废气 CO<sub>2</sub> 来实现驱油, 同时将 CO<sub>2</sub> 封存到油层中。

近年来, CO<sub>2</sub>-EOR 技术在全球范围内得到了快速的发展。相关研究表明, 在油层中注入 CO<sub>2</sub> 不仅能够有效促进原油采收率的提升, 并且能够将 CO<sub>2</sub> 进行封存, 最终实现降低二氧化碳排放和提高油藏开发的双重目标。

## 3 CCUS 技术的经济效益分析

### 3.1 企业分析

本文以中国石化下属企业作为对象, 对企业应用

CCUS 技术的经济效益进行分析。

中国石化的下属炼油厂配备有全套加氢裂化装置、减压蒸馏装置、催化裂化装置以及催化重整装置, 化肥厂配备有合成氨装置, 烯烃厂配备有乙烯裂解装置, 其中, 化肥厂合成氨装置运行过程中产生的高浓度二氧化碳能够直接供给于化工生产。烟道气、裂解气等其他副产物则只能通过废气处理装置进行处理, 使其达到排放标准后进行排放。

油田开采原油是 API 度较高且流动性较差的稠油, 因此要使原油流入到井筒中, 并将其从井筒升至地面具有一定的困难, 开采过程中具有很大的难度。传统的原油开采工艺, 平均开采率一般在 27% 左右, 通过对 CO<sub>2</sub>-EOR 技术的应用, 油田综合采收率可达到 30%, 随着 CO<sub>2</sub> 捕集和运输技术逐渐成熟, 能够保障原有开采拥有充足的 CO<sub>2</sub> 使用, 可以将油田的采收率进一步提升至 40% 左右。

### 3.2 经济效益分析

通过上文分析可以得知:

#### 3.2.1 上游分析

乙醇胺法 (炼油厂):

年二氧化碳排放量:  $Q_{CO_2} = Q_{oil} \times R_{oil} = 3.25 \times 10^6 \text{ t/a}$

年二氧化碳回收量:  $M_1 = Q_{CO_2} \times R_1 \times \eta_1 = 8.78 \times 10^5 \text{ t/a}$

回收液处理成本:  $C_F = P_C \times Q_D / (Q_C \times \eta_c) = 500 \text{ 元/t}$

回收液年处理成本:  $C_R = C_F \times M_1 = 4.39 \times 10^8 \text{ 元/a}$

设备年折旧率:  $r_{AI} = [(1-r)/k] \times 100\% = 5\%$

设备年折旧费:  $C_{AI} = r_{AI} \times K = 5.32 \times 10^8 \text{ 元}$

设备年维护费:  $C_{OM} = r_{OM} \times K = 4\% \times 10.64 \times 10^9 \text{ 元} = 4.26 \times 10^8 \text{ 元}$

二氧化碳捕集年总成本:  $C_{OR} = C_{AI} + C_{OM} + C_R = 1.40 \times 10^9 \text{ 元}$

二氧化碳年销售收入:  $TR_1 = P_1 \times M_1 = 3.16 \times 10^8 \text{ 元}$

冷冻氨法 (化肥厂):

年二氧化碳排放量:  $Q_{CO_2} = Q_{cf} \times R_{eo} = 0.41 \times 10^6 \text{ t/a}$

年二氧化碳回收量:  $M_2 = Q_{CO_2} \times R_2 \times \eta_2 = 1.10 \times 10^5 \text{ t/a}$

回收液处理成本:  $C_F = P_C \times Q_D / (Q_C \times \eta) = 400 \text{ 元/t}$

回收液年处理成本:  $C_R = C_F \times M_2 = 4.40 \times 10^7 \text{ 元/a}$

设备年折旧率:  $r_{AI} = [(1-r)/k] \times 100\% = 5\%$

设备年折旧费:  $C_{AI} = r_{AI} \times K = 6.44 \times 10^8 \text{ 元}$

设备年维护费:  $C_{OM} = r_{OM} \times K = 5.15 \times 10^8 \text{ 元}$

二氧化碳捕集年总成本:  $C_{OR} = C_{AI} + C_{OM} + C_R = 1.20 \times 10^9 \text{ 元}$

二氧化碳年销售收入:  $TR_2 = P_2 \times M_2 = 3.96 \times 10^7 \text{ 元}$

### 3.2.2 下游分析

针对下游 EOR, 计算方法采用的是荷兰 Ecofys 公司的计算方法:

$$M_{oil} = OOIP \times ER \times CF$$

其中,  $M_{oil}$  为油田增产原油量, OOIP 为油田储量, ER 为提高的采收率, CF 为二氧化碳与原油的接触系数。

$$TR_{oil} = M_{oil} \times P_{oil}$$

$P_{oil}$  为原油价格, 元/t。

$$M_{oil} = OOIP \times ER \times CF = 5.61 \times 10^5 t$$

$$TR_{oil} = M_{oil} \times P_{oil} = 2.30 \times 10^9 \text{ 元}$$

通过分析以上论证可以得知, 在石化行业当前技术设施的基础上建设和应用 CCUS 技术项目, 能够使石化企业的经济效益得到有效的提升, 但对于上游工期企业而言, 由于气体捕集装置的捕集成本以及运维成本较高, 且现阶段二氧化碳市场价格较低, 因此效益表现不佳。随着未来 CCUS 技术的发展, 相信其经济效益也会有所提升。

## 4 推进 CCUS 技术发展的对策

### 4.1 推进全流程 CCUS 技术发展

全流程 CCUS 技术指的是一种包含了  $CO_2$  捕集与装备、高压输送管道研发、 $CO_2$  地质封存、 $CO_2$  高效驱油利用、 $CO_2$  地下监测等多项技术分支的一种技术体系。由于地质条件对于  $CO_2$  地质地质封存技术应用的限制非常严格, 因此想要规模化推广 CCUS 技术仍然存在较大的难度。基于此, 油气开采企业要以实际情况为根据, 进一步加快 CCUS 产业布局, 加强对 CCUS 技术的研发工作。与此同时, 还可以依托三大石油公司和各个高等院校、科研机构现有的 CCUS 实验设备, 对低浓度  $CO_2$  捕集与储运、低温  $CO_2$  密闭注入、 $CO_2$  驱油与封存等技术难题进行深入研究, 通过创新技术方法和优化商业模式, 争取企业运营成本及能耗的进一步下降, 使石化行业减碳增效目标得到更好的实现。从政府角度来看, 则需要对现有的 CCUS 技术规范以及法规制度进行优化和完善, 形成科学合理的建设、运营和监管体系, 建立起统一的全流程 CCUS 技术标准。

### 4.2 以碳定价推动 CCUS 市场化

碳税与碳交易机制是碳定价的主要形式。碳税指的是政府部门以税收的形式来确定碳价格, 从而对碳的市场价格确实进行弥补; 碳交易机制则是基于国家政策规定的碳排放总量限制, 由各交易主体通过市场

交易的方式形成价格。基于碳定价政策, 企业能够以评估碳价格的方式来实现低企业运营风险的识别与判断, 投资者也可以通过分析碳定价来了解其投资组合中可能存在的风险因素。为此, 政府部门要与市场共同发力。

一是要从供需两端发力, 加强技术研发力度, 激发市场活力, 为  $CO_2$  排放量赋予市场属性, 从而间接实现 CCUS 技术的增效降本; 二是要对现阶段的碳交易市场机制加以完善, 选择合适的时机为碳交易市场引入碳税进行补充, 引导石化、能源等行业通过开发各种类型的碳资产项目来获取碳减排权证, 再将自身的碳减排指标出售至碳交易市场, 从而保障 CCUS 技术能够通过碳交易获取更大的收益。

## 5 结语

综上所述, 加强对 CCUS 技术的推广和应用, 不仅能够为我国“双碳”目标的实现提供有效的支持, 同时还能够为各个行业提供新的能源利用方式, 促进企业市场竞争力的提升。但是, 现阶段的 CCUS 技术应用还存在一定的困难, 只有在解决这些难题之后, CCUS 技术应用效益才会获得更大的提升, 从而更好的促进我国经济发展。

### 参考文献:

- [1] 黄晶, 马乔, 史明威, 彭雪婷, 张贤. 碳中和视角下 CCUS 技术发展进程及对策建议 [J]. 环境影响评价, 2022,44(1):42-47.
- [2] 张宗耀, 吕广忠, 王杰. 胜利油田 CCUS 技术及应用 [J]. 油气藏评价与开发, 2021,11(6):812-822.
- [3] 钱媛, 曹馨. 基于文献计量的 CCUS 研究发展态势分析 [J]. 工业安全与环保, 2023,49(1):97-101+106.
- [4] 殷卓成, 杨高, 王朝阳, 马青, 刘菲, 柳庆仁. 制氢与 CCUS 关键技术耦合研究进展及展望 [J]. 现代化工, 2022,42(11):76-81.
- [5] 谢和平, 刘涛, 吴一凡, 王云鹏, 陈彬, 廖海龙.  $CO_2$  的能源化利用技术进展与展望 [J]. 工程科学与技术, 2022,54(1):145-156.
- [6] 郭天宁. 石化产业的 CCUS 技术应用的效益分析 [J]. 化工管理, 2020(13):2.

### 作者简介:

何富炬 (1989-), 男, 汉族, 广东肇庆人, 本科, 工程师, 研究方向: 化工、轻工、能源、节能、环保、碳排放权及碳交易。