

燃煤机组CCUS生产交易一体化管理平台构想

文/于春庆
中国石油集团电能有限公司热电一公司

某电厂是大庆油田的CO₂主要排放单位，对其进行一系列CCUS措施具有重要意义。在此基础上以化学吸收法为基础，以CCUS工艺过程为对象，通过在线成本和用能耗差分析，建立一套完整、科学的CCUS生产交易一体化管理系统，确保CCUS装置精准生产、节能降耗，实现公司深度碳减排的环保指标。

随着国家“3060”碳达峰、碳中和目标的推进，2021年初中国石油集团公司制定了目标明确的绿色行动计划“三步走战略”，大庆油田计划2028年实现碳达峰。通过加快新能源开发利用，2025年可提前实现碳达峰，2050年实现“近零”排放目标。根据集团公司CO₂捕集、利用及封存（Carbon Capture Utilization and Storage, CCUS）重大专项顶层设计要求，2025年大庆油田年注CO₂ 173万t，年埋存CO₂ 143万t，初步完成大庆油田百万吨级注入规模CCUS全产业链方案。

CCUS工作原理

2-羟基乙胺，别名乙醇胺（以下简称MEA），是一种有机化合物，化学式为C₂H₇NO，捕集CO₂的工艺流程如图1所示，烟气经冷却洗涤塔后由风机送入吸收塔，利用MEA吸收CO₂，反应后的富液经换热器回收热量后送入再生塔，解吸出的CO₂连同水蒸气冷却后分离除去水分，得到纯度99%的CO₂气体。MEA溶剂往返循环构成连续吸收和解吸过程，干燥单元得到绝干CO₂气体，经过离心压缩机压缩，升压至15 MPa输送至下游用户。

MEA室温下呈无色透明粘稠液体状，该类物质具有很强的碱性，能较快地和CO₂反应生成氨基

甲酸盐化合物，加热条件下CO₂从中解吸出来，从而达到脱除CO₂的目的，主要反应式及其特点见表1。

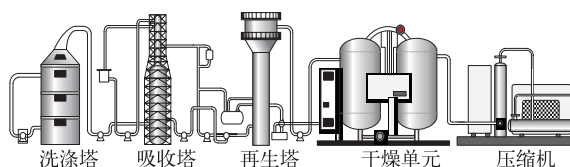


图1 基于MEA吸收法CO₂捕集工艺流程

表1 MEA主要反应式及其特点

吸收剂	主要反应式	特点
MEA	$\text{CO}_2 + 2\text{HOCH}_2\text{NH}_2 \rightleftharpoons \text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{HNCOO}^- + \text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_3^+$	反应速率快；气体净化度高；在质量浓度相同的情况下，比其他胺类吸收剂有更大的吸收能力

MEA化学吸收法经济与技术层面最成熟，是实现CO₂捕集的重要工艺过程，但MEA具有再生能耗大、降解易产生污染物等缺点。

燃煤机组CCUS特点

现役先进煤电机组结合CCUS技术实现降碳改造是开发企业减排潜力的重要途径，不仅可以实现煤电机组的近零排放，还可以保留电力系统的转动惯量，保障系统的安全性和稳定性，是符合中国国

情的战略性选择。集团公司已实现CCUS全流程打通，编制完成《中国石油CCUS-EOR规划部署》方案，计划在某电厂重点开展“60万t/年CO₂捕集回收项目示范工程”，以现有燃煤锅炉直接排放的净化烟气作为原料气，捕集烟气中的CO₂，得到含量≥99%的CO₂产品，管输至油田生产单位回注油层用于驱油，在达到CO₂减排目的的同时，有效减少油田生产的清水用量，并提高油田采出率，一举多得。

但是CCUS项目资本密集度高，投入和产出能效比不清晰，导致现有项目的碳消纳能力、排放量与资本投入之间存在巨大矛盾，多数CCUS投资的净现值为负，难以实现可持续发展。因此，降低投入和产出间的能耗差距及生产交易各环节成本，既是维持CCUS高效运行，促进经济目标和环境目标达成的核心重点，又是中油电能实现电力集群的低碳、零碳排放的可持续发展之路。

生产交易一体化管理平台主要构想

某电厂是一家燃煤电厂，与CO₂捕集系统耦合后，CO₂捕集过程中需要消耗能量，必然导致电厂净效率降低。为更好完成减碳目标，降低捕集能耗，减少购买碳排放配额成本支出，走可持续发展之路，助力油田长期稳产是该电厂面临的首要问题。

基于上述目标及方向，构想以化学吸收法为基础，以CCUS工艺过程为对象，通过在线成本和用能耗差分析，建立一套完整、科学的CCUS生产交易一体化管理系统，确保CCUS装置精准生产、节能降耗，实现深度碳减排的环保目标。

1. CCUS在线能耗差分析系统

耗差分析也称偏差分析，即根据运行参数的优

化目标值，确定参数偏差的大小，通过计算将偏差值折算为影响成本与能耗的量值，实时反映运行工况变化对经济性的影响，指导运行值班员根据这些量值，进行运行参数量化调整，减少CCUS可控损失，提高CCUS经济性，最终达到提高CCUS工业生产增加值的目的。

(1) 生产用能耗差分析

基于化学吸收法的烟气CO₂吸收工艺过程。

1) 烟气经预洗塔降温到40℃后进入CO₂吸收塔，塔中烟气自下向上流动，与从上部喷淋入塔的胺溶液逆流接触，CO₂被胺溶液吸收，尾气由塔顶排入大气。在吸收塔上部设置水洗系统，以减少胺蒸汽随烟气带出造成的胺液损失。

2) 吸收CO₂富液由塔底经泵送入贫富液换热器，回收贫液热量后，喷淋进入再生塔上部，通过汽提解吸部分CO₂。经汽提解吸后的半贫液进入再沸器，使其中的CO₂进一步解吸。解吸后贫液由再生塔底流出，经贫富液换热器、贫液冷却器冷却后进入吸收塔循环使用。

3) 再生塔解吸出高浓度CO₂气体（干基>99.5%）经喷淋塔两段冷却后，降温分离除去所含水分，进入压缩机压缩至2.5 Mpa以便输送。

CCUS生产过程用能耗差分析涉及的过程参数主要有温度（入系统烟气温度、再生气温度、再生塔底温度、再生塔顶温度和吸收塔贫液温度等）、压力（入系统烟气压力、再生气CO₂压力和产品压缩出口压力等）、流量（入系统烟气量、入吸收塔贫液量）、含量（入系统烟气CO₂含量、产品CO₂含量（干基））、电流、电压（10 kV/380 V/220 V）值。这些都是基于生产用能耗差分析的基础，分析流程如图2所示。

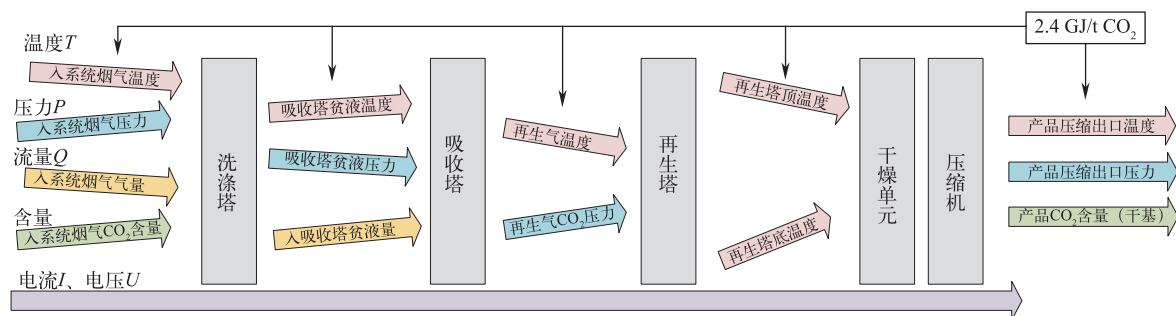


图2 生产用能耗差分析流程图

因原料CO₂浓度、类型不同，CCUS 装置的能耗及成本有明显差异，在已投运的CCUS示范项目中，电力行业捕集能耗为1.6~3.2 GJ/t CO₂。

(2) 生产成本耗差分析

CCUS成本耗差分析涉及的原材料主要有原料气、MEA溶液、除盐水，氢氧化钠溶液、分子筛、循环水压缩氮气、蒸汽及电能消耗。这些都是基于实时成本耗差分析的基础，分析流程如图3所示。

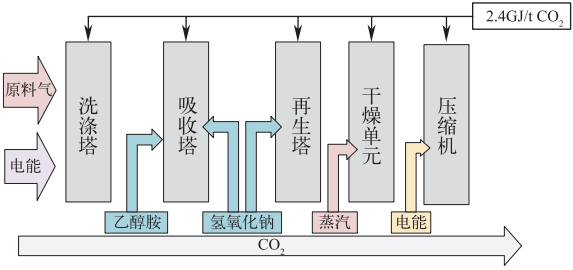


图3 生产成本耗差分析流程图

基于以上认识，构想使用基于大数据技术的层次聚类分析（HCA）和最小生成树（MST）模型，

以2.4 GJ/t CO₂为耗差分析中值，通过提取系统内的量、质等信息，测算CCUS全流程各环节的材料成本耗差分析和基于过程参数的用能耗差分析；包括碳捕获源识别、边界界定，综合各项指标对CCUS全链条耗差测算分析，分析运行经济性；对比同类企业运行趋势，分析内部结构因素，给出减碳用能建议，全面优化CCUS减碳用能效率，以更好满足大庆油田CO₂驱油的“适用、安全、经济、合理”的要求。

2. CCUS市场化生产运行系统

2021年7月16日，全国碳市场上线交易正式启动，纳入发电行业重点排放单位2 162家，覆盖约45 亿t CO₂排放量，是全球规模最大的碳市场。2022年1月，生态环境部在全国碳市场第二履约期配额分配方案征求意见稿中，考虑将新基准线在第一履约期基准线基础上下调8%以上，其中，300 MW以下燃煤机组供电基准线下调12.4%，供热基准线下调8.7%。具体见表2。

表2 全国碳市场第二履约期配额分配方案

机组类别	2019—2020供电基准线/[t CO ₂ / (MW·h)]	2021—2022供电基准线/[t CO ₂ / (MW·h)]	下调幅度 (%)	2019—2020供热基准线/[t CO ₂ / (MW·h)]	2021—2022供热基准线/[t CO ₂ / (MW·h)]	下调幅度 (%)
300 MW以上燃煤	0.887	0.808	7.9	0.126	0.115	8.7
300 MW以下燃煤	0.979	0.858	12.4	0.126	0.115	8.7
燃气	0.392	0.392	0	0.059	0.056	5.1

目前全国碳交易市场价格已由2021年10月份43 元/t，上涨至58元/t，中国未来几年的碳价可能超过100元/t。潜在的碳交易市场的获利是可期的，由此构想出基于CCUS在线耗差分析的线上、线下煤电CCUS市场化交易反演机制，为提高电厂市场化交易的经济性提供技术支撑。

(1) 线下煤电CCUS市场化交易反演系统

由于CO₂运输成本占全部成本的比例较大，CO₂应用市场具有极强的区域性，因此需要对油田及其周边CO₂应用市场做全面调研。拟新建的“60万t/年CO₂捕集回收项目示范工程”使用量不到电厂目前排放烟气量10%，为此，有向油田周边CO₂应用市场发展的必要。

目前，油田及周边CO₂主要应用领域有CO₂驱油；CO₂的焊接；CO₂超临界萃取的医药、化妆品、食品精制及反应工程、环保工程和超细粉等领域；蔬菜CO₂气肥；CO₂与氢合成工业原料；CO₂清洗剂；干冰；食品级CO₂的饮料、啤酒；食品级CO₂替

代氟利昂进行烟丝膨化等，如图4所示。

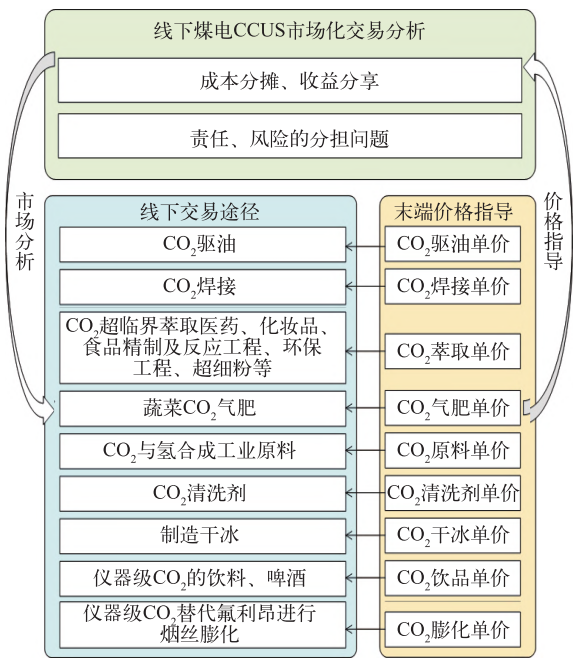


图4 线下煤电CCUS市场化交易反演流程

基于以上分析，通过成本分摊、收益分享，以及责任、风险的分担问题等，建立产业集群，通过各行业的末端价格指导CCUS的生产（市场、价格、工艺、投入）。给出大庆油田各个采油厂用气建议，尤其瞄准页岩油增储上产的机遇，增加有效供给；给出本地区潜在的CO₂用户的用气建议，提升CCUS的用户数量，为公司做CCUS市场决策提供准确、有效数据支撑。

（2）线上煤电CCUS市场化交易反演系统

拟引入“全国碳市场上线交易”实时数据，通过研究评估三种激励政策（碳市场价格、清洁电价上网补贴和CO₂封存利用补贴）对CO₂市场的影响，结合使用卡内基梅隆大学开发的综合环境控制模型（Integrated Environmental Control Model, IECM），对煤电CCUS实时成本投入进行反演推算，如图5所示。进一步确定碳捕获的经济、环境、工艺条件，更好地满足生产过程中的成本控制及集团公司的“双碳”目标。

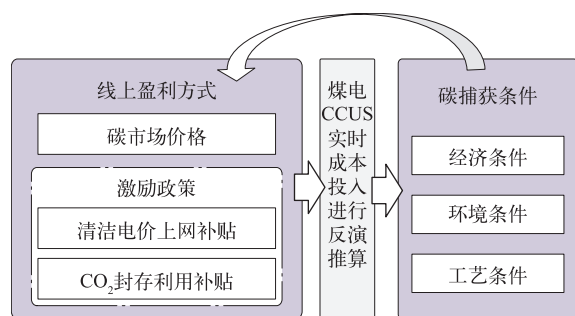


图5 线上煤电CCUS市场化交易反演流程

3. CCUS生产交易一体化管理平台

目前国内外还没有CCUS耗差分析方面的应用软件，构建CCUS生产交易一体化耗差分析管理平台，可以提高煤电CCUS耗差分析与市场化交易管理水平，进一步量化生产成本，固化环境目标，为CCUS决策提供准确、有用的情报支持。

管理平台除数据采集、数据录入、数据库组织、计划管理和报表统计等平台功能，还包括CCUS生产用能耗差分析子系统；CCUS成本耗差分析子系统；线上煤电CCUS市场化交易分析子系统；线下煤电CCUS市场化交易分析子系统；SIS接口开发；移动（手机）发布接口开发；APP传输接口开发等，子系统相互之间数据互通、逻辑共用，共同形成一套生态系统，如图6所示。

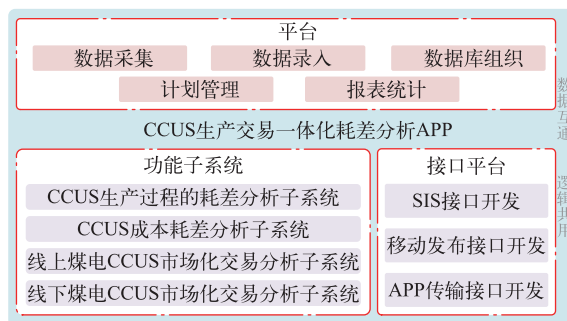


图6 CCUS生产交易一体化管理平台

预期效果

通过建立一套完整、科学的CCUS生产交易一体化管理平台，有效降低CCUS运行成本和能耗，并为电厂带来可观的直接经济效益；为今后燃煤电站锅炉的低浓度烟气碳捕集工作做好示范工作。2022年12月6日，全国碳市场碳排放配额成交价已达57.39元/t，累计成交2.04亿t。随着市场规模的增加，碳市交易价格具有较大的上升空间，捕集CO₂后节省的碳排放权指标有可能产生更高收益，CO₂产品用于页岩油等常规或非常规驱油，也是实现大庆油田长期稳产，做强新领域、打造新支撑，有效提升企业核心竞争力的重要举措和手段。煤电CCUS符合产业政策的发展要求、符合市场需求，能够明显减少CO₂排放量，对实现集团公司碳达峰、碳中和目标具有重要意义，最终实现保护生态环境，经济、社会和环境效益达到高度统一。EA

参考文献

- [1] 徐玉兵，宋东昱，骆亮．中国煤化工碳捕集利用与封存基础设施建设需求预测[J]．国际石油经济，2022，30(7)：1-13．
- [2] 张希良，黄晓丹，张达，等．碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J]．管理世界，2022，38(1)：35-66．
- [3] 相宏伟，杨勇，李永旺．碳中和目标下的煤化工变革与发展[J]．化工进展，2022，41(3)：1399-1408．
- [4] 李娜，杨景胜，陈嘉茹．“双碳”背景下能源行业的机遇和挑战[J]．中国国土资源经济，2021，34(12)：63-69．