

CCUS 技术在石化行业新能源耦合项目设计与成本效益研究

贾 瑩 徐 峰 张思琦 祝亚茹（中国石油工程建设有限公司北京设计分公司，北京 100085）

摘要：石油化工作为主要耗能和碳排放大户，如何在大环境下节能减排成为一项重要任务。基于二氧化碳捕集、利用与封存（CCUS）技术以及新能源技术并将其结合起来应用于实际生产的一种新型项目耦合模式为石化行业绿色、节能降碳和综合利用开辟了一条新道路，本文探讨了CCUS技术在石化行业新能源耦合项目的设计要点与成本效益，分析CCUS技术在石化行业的应用现状，从系统设计、运行方案、成本控制等方面探讨优化路径。

关键词：CCUS 技术；石化行业；新能源耦合；协同优化

中图分类号：TE624

文献标识码：A

文章编号：1674-5167(2025)026-0076-03

Research on Design and Cost-Benefit of New Energy Coupling Projects with CCUS Technology in the Petrochemical Industry

Jia Wei, Xu Feng, Zhang Siqi, Zhu Yaru(Beijing Design Branch of China Petroleum Engineering & Construction Corporation; Beijing 100085, China)

Abstract: As a major energy consumer and carbon emitter, the petrochemical industry faces the critical task of energy conservation and emission reduction in the current context. A new project coupling model that integrates Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) technology with new energy technologies and applies them to actual production has opened up a new path for the green development, energy conservation, carbon reduction and comprehensive utilization of the petrochemical industry. This paper explores the key design points and cost-benefit of new energy coupling projects with CCUS technology in the petrochemical industry, analyzes the current application status of CCUS technology in the petrochemical sector, and discusses optimization paths from aspects such as system design, operation schemes, and cost control.

Keywords: CCUS technology; petrochemical industry; new energy coupling; collaborative optimization

石化是国民经济的重要组成部分，在国民经济中占有举足轻重的地位，但是也产生出大量的二氧化碳，在世界气候变化问题日益严峻的大环境下，各个国家都给石化行业制定了严格的碳减排目标。CCUS技术是一种减少二氧化碳排放的关键技术，采用捕捉—输送—利用—封存的方式使二氧化碳转化利用或者封存起来，实现二氧化碳资源化利用和减排双重目的，同时新能源中包括太阳光能、风能、水能等，具有清洁、可再生的优点，逐渐受到重视，将CCUS技术和新能源相结合，并用于石化行业的相关项目上，不但可以有效降低石化生产过程中的碳排放，还可以依靠新能源稳定性好、灵活度高的优点来改善整个系统的能源结构，从而提高能源的利用效率。

1 CCUS 技术在石化行业的应用现状

1.1 CCUS 技术概述

CCUS是一项涉及CO₂捕获、输送、利用和封存全过程的技术系统，主要包含二氧化碳捕集和碳储层两个方面的技术。CO₂捕集主要有3种技术路线，分别是燃烧前捕集、燃烧后捕集和富氧燃烧捕集。①燃

烧前捕集是指在燃料燃烧前，通过煤的气化等技术把燃料转变为合成气(CO/H₂)，然后将CO转化为CO₂/HO₂，在此过程中可采用物理吸收、化学吸收或者膜分离的方式对CO₂进行分离；此技术适用于新的大型煤化工项目的建设，在源头实现对CO₂的分离。②燃烧后捕集是指从燃料燃烧产生的烟气中捕集CO₂，由于烟气成分复杂、CO₂含量低，目前多采用化学吸收法，采用醇胺类溶液作为吸收剂与CO₂发生可逆化学反应实现CO₂的吸收和解吸，在石化装置上的应用较广，但是由于热效率低，因此耗能大。③富氧燃烧捕集是通过富氧燃烧提高烟气中CO₂浓度，方便下一步分离，通常需要配套空分装置生产氧气，在一定条件下获得高浓度的二氧化碳气体，但是设备投入较高，运行成本较高。对于运输的过程来说，管道运输适用于大规模、长距离、稳定输送二氧化碳，运输到地质封存区去，这样不仅能够节约大量运输成本，并且安全可靠；罐车运输更加机动灵活，对于规模较小、距离较近或者运输量无固定要求，可以运输到附近的利用企业处。此外，用二氧化碳还有另外两种用途：一种是用来加

强石油开采（EOR）。它是向油藏注入二氧化碳以使原油的粘度减小，进而膨胀原油体积而增加原油产量的技术，能显著提高油田采收率；另一种就是用来制造成化工产品：除了用于制造可降解塑料、碳酸饮料等以外，还可以用来制造合成氨、聚碳酸酯等等。为了达到目的要将二氧化碳注入地下合适的深部地质构造中去，如咸水层、枯竭油气藏等地质体，在长期注入与储存的过程中必须依靠物理、化学作用的长久稳定封存，对于整个注入过程需要严密监测确保储层封存的二氧化碳不会外泄。

1.2 石化行业中 CCUS 技术的应用情况

CCUS 技术已经在石化行业得到了一定的应用，部分石化企业运用燃烧后捕集的方法，从炼油、化工装置烟气中捕集 CO₂，有些大型炼油厂设有专门的 CO₂ 捕集装置，通过化学吸收的方法把烟气中的 CO₂ 分离出来，经过解吸、提纯等一系列过程得到纯净的 CO₂ 产品。在解吸的过程中，需要将吸收 CO₂ 后的富液进行加热使富液中 CO₂ 得以释放，然后放空，整个过程中耗费大量的蒸汽，所以能否降低解吸能耗是影响燃烧后捕集经济效益的一个重要方面。

2 石化行业新能源耦合项目的必要性与潜力

2.1 石化行业遭遇碳排放的难题

石化行业生产多为复杂的化学反应，原料的加工过程以及产品生成过程都会产生大量二氧化碳。例如：炼油过程中原油经过常减压蒸馏、催化裂化、加氢精制等工序产生大量二氧化碳，而其中催化裂化产生二氧化碳较多，由于其温度较高。全球碳减排要求越来越高，石化企业如果不能及时有效的解决减排问题，就会付出高昂的代价，就像欧盟 ETS 那样，如果不能够充分利用自己的免费配额，则会付出高额的代价，不但压缩了自身的企业利润空间，而且不利于自身的市场竞争能力和可持续发展能力，在国际市场上会有更多的顾客开始关注其产品供应商的碳排放量问题，并且更喜欢低碳的产品。

2.2 新能源耦合的优势与潜力

新能源和石化行业相结合有以下优点：一方面，用太阳能、风能等新能源代替石化企业的部分化石燃料，减少企业对化石燃料的依赖，从而减少二氧化碳的排放；将太阳能光伏发电或风力发电接入石化企业生产装置中，取代部分使用煤炭、天然气等化石燃料所产生的电量，减少发电过程中的碳排放，实现绿色节能减排的目的；对于石化的辅助生产系统，比如照明、通风等设备，在满足需求的前提下优先使用新能源电力，不仅能够起到节能减排作用，同时也降低企业的用电成本。另一方面，将新能源与 CCUS 技术相融合，有利于更好

地达到能源配置最优化的目的。通过将新能源产生的电能用于二氧化碳的捕集与压缩中，可以降低 CO₂ 捕集的能耗，再把捕集得到的 CO₂ 利用新能源所产生的能量对 CO₂ 实行资源化应用或者储存起来。通过用新能源电力驱动压缩机来进行 CO₂ 捕集来代替传统的从大电网获取电力而带来的间接碳排放。

3 CCUS 技术与新能源耦合的协同设计机制

3.1 能源流设计协同

能源流协同在石化行业的新能源耦合项目中是关键所在，在新能源产生电能或者热能之后，可以由其直接供给 CCUS 系统的各个环节中去，其中在二氧化碳的捕集阶段当中利用了太阳能或者风能所发电能，代替了传统使用的电网供电的能耗，实现节能降耗的目的；有些新建的石化的二氧化碳化学吸收装置就采用了太阳能光伏发电，通过太阳能光伏板提供的电能来为二氧化碳化学吸收装置溶液循环泵、再生塔再沸器供能，从而实现节能减排目的；在二氧化碳的运输环节里如果采用电动车作为运输工具的话，那么新能源就可以作为它使用时的动力源，减少运输过程中的碳排放量。比如采用电动汽车运输 CO₂，在石化企业内部建设充电桩，用光伏发电给罐车充电运输整个过程都是零排放的；二氧化碳的利用和封存阶段可以使用新能源，用于驱动化学反应过程或者是驱动设备的运转过程。

3.2 物质流设计协同

物质流协同主要体现在二氧化碳资源化利用与新能源耦合方面，即从石化企业捕捉来的二氧化碳利用新能源所提供的能量来参与化工产品的合成，以太阳能或风能为原料制得氢气，通过一定的化学反应把氢气和二氧化碳转化为甲醇、甲烷等燃料或化工原料，在这个过程中新能源系统所产生的电能可以用于电解水制氢反应，此时二氧化碳作为碳源参与反应，既实现了碳的循环利用，也在某些情况下可以被新能源系统使用。还有些学者提出可借助新能源技术体系把部分材料也由二氧化碳来制备，有些研究成果表明可以用特定的方法将二氧化碳转化为碳纳米材料，并以此为原料制造电池电极或其他新能源装置的零部件，在此环节通过高温高压条件下分解和重组二氧化碳生成碳纳米管，碳纳米管有很好的导电性及机械性，有利于提高电池电极的性能。

3.3 信息流设计协同

信息流协同有助于 CCUS 技术与新能源耦合项目有效运转，建设智能化的信息管理系统，实时采集和传递新能源系统、CCUS 系统和石化生产系统的运行信息。如图 3 所示，采集太阳能光伏电站发电功率、

CCUS 系统二氧化碳的捕集量及纯度、石化装置生产负荷等信息，运用大数据分析、人工智能等技术方法进行计算和分析，并反馈到耦合系统，最终达到整个耦合系统的优化调度的目的。若新能源发电功率存在波动，可以通过本套系统来自动调整 CCUS 系统运行参数和石化生产装置能耗，保证 CCUS 项目的稳定运行和能源的充分使用。

4 CCUS 与新能源耦合项目的设计优化与成本控制

4.1 系统设计优化

在项目设计阶段需要结合 CCUS 技术与新能源系统相互之间的耦合协同优化，根据石化企业的规模大小、能源需求及碳排放特点，科学布局石化企业的新能源发电装置、CCUS 系统的规模及工艺流程；对大型石化企业而言，由于其厂区面积广、日照条件优，可规划建造大容量的光伏电站和相适应规模的二氧化碳捕集与利用装置；在确定光伏电站装机容量时要考虑石化企业的用电负荷曲线、消纳新能源能力和投资成本；在系统集成过程中要注意设计好各个子系统之间的接口，保证整个系统内能流、物流和信息流顺畅地传递；设计时考虑二氧化碳捕集装置与新能源供电系统的接口问题，在稳定供电上要能匹配相应的供电装置与控制策略，并使用相应的电力变换装置来匹配不同的能源设备。

4.2 运行策略优化

设计合理的运行策略才能实现上述方案的协同优化运行。新能源发电功率较大时优先使用新能源发电驱动 CCUS 运行，增加二氧化碳捕集与利用的数量，多余电力可以存储以供新能源发电功率较低时使用；配置大容量电池储能系统，在太阳能光照强或者风力大时将多余电量储存在电池中，在新能源发电功率低时为 CCUS 及石化生产装置提供电量支撑。设计储能系统的容量时要考虑新能源发电波动性、石化企业自身用电需求、储能系统投资额等多个方面的因素，既要保证电力能够得到很好的调节，又要使储能系统的经济性较好。并且要根据石化生产装置负荷及二氧化碳产生的数量来调整 CCUS 运行参数。

4.3 成本控制优化

增加对 CCUS 技术及新能源技术的研发投入，在技术创新的基础上提升捕集效率，节约能源消耗，延长装置寿命。研发低成本的新一代二氧化碳捕集材料，提高捕集效率的同时降低成本；研发高效的新能源转换、储电技术和设备，降低新能源发电与存储的成本；在二氧化碳捕集材料的研究中，探索新型吸附剂以及新型的膜材料如 MOFs，此类材料具有大比表面积和可调节的孔道，能够高效地捕集 CO₂；针对新能源转换

技术，在提高太阳能光伏电池光电转换效率的基础上，研制新型钙钛矿太阳能电池，并且通过改善器件材料、优化器件结构和制备工艺等方法来提高该类太阳能电池的稳定性和转换效率。其次要优化项目经济模式。采用一些如政策补贴、碳交易等手段来增加项目的经济价值。

4.4 技术创新优化

加大 CCUS 技术的研发，研制出更加高效、成本更低的二氧化碳捕集方法，比如开发出以膜分离技术为基础的新式捕集工艺，进一步提高捕集效率并降低能耗；探索新式利用方式，比如开发二氧化碳为基原料的高附加值新产品——用二氧化碳合成高性能工程塑料；开展膜分离技术开发，研发新型复合膜材料，把不同的材料复合起来制成膜，以提高膜的分离性能及稳定性；研究二氧化碳与单体间的共聚反应，在二氧化碳基产品开发上研究二氧化碳与其他单体共聚得到具有良好性能的工程塑料，例如高耐热型工程塑料或高强型工程塑料。发展高效太阳能光伏转换技术和大容量储能技术和稳定的风电技术。

5 结论

CCUS 技术与新能源耦合为石化行业的低碳转型提供了一种有效的途径。以 CCUS 技术在石化行业应用情况为基础，揭示其发展过程中遇到的问题与瓶颈，指出新能源耦合有利于解决石化行业碳排放问题，提出能源流、物质流和信息流融合的协同机制和多维联动、动态互补的系统集成，提出科学合理化装置运行调度机制，提出从整体上把控项目成本的控制方式，探索技术创新升级路径等措施，可大幅提升耦合项目的综合性能表现。

参考文献：

- [1] 阳国军, 刘会友. 现代煤化工与绿电和绿氢耦合发展现状及展望 [J]. 石油学报(石油加工), 2022(04):995-1000.
- [2] 苑晓, 宋红兵. “双碳”目标下二氧化碳多相催化转化的机遇与挑战 [J]. 石油炼制与化工, 2023(08):134-138.
- [3] 阳平坚, 彭栓, 王静, 王强, 任妮, 宋维宁. 碳捕集、利用和封存(CCUS)技术发展现状及应用展望 [J]. 中国环境科学, 2024(01):404-416.
- [4] 叶晓东, 陈军, 陈曦, 王海妹, 王慧珺. “双碳”目标下的中国 CCUS 技术挑战及对策 [J]. 油气藏评价与开发, 2024(01):1-9.
- [5] 阳平坚, 彭栓, 王静, 王强, 任妮, 宋维宁. 碳捕集、利用和封存(CCUS)技术发展现状及应用展望 [J]. 中国环境科学, 2024(01):404-416.