

碳捕集技术在火电节能减碳中的应用前景

伏晓光

华电阜康热电有限公司 新疆昌吉 831500

摘 要：碳捕集技术作为实现“双碳”目标的重要手段，对火电行业节能减碳具有重要意义。当前火电行业仍是我国碳排放的主要来源，碳捕集技术的应用有助于实现火电行业绿色低碳转型，但该技术在实际应用中仍面临技术成熟度不足、经济成本过高、政策支持体系不完善等现实挑战。本文分析碳捕集技术在火电节能减碳中的重要价值，深入剖析应用过程中存在的关键问题，并从技术创新、成本控制、政策保障等方面提出推进该技术在火电领域应用的实施路径，以期为火电行业绿色低碳发展提供参考。

关键词：碳捕集技术；火电；节能减碳；应用前景；绿色发展

在全球气候变化日益严峻的背景下，我国提出了 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的战略目标，火电作为我国电力系统的主要组成部分，其碳排放量占全国总排放量的 40% 以上，是实现“双碳”目标的关键领域。碳捕集、利用与封存（CCUS）技术作为减少化石燃料燃烧产生 CO₂ 排放的重要技术路径，为火电行业节能减碳提供了新的解决方案。深入研究碳捕集技术在火电领域的应用前景，探索其推广路径和实施策略，对于推动我国能源结构优化、实现绿色低碳发展具有重要现实意义。

1 碳捕集技术在火电节能减碳中的重要意义

1.1 助力实现碳达峰碳中和战略目标

碳捕集技术在助力实现国家“双碳”战略目标方面发挥着不可替代的作用，作为我国碳排放的重要来源，火电行业的减碳成效直接关系到全国碳排放总量的控制，根据国家能源局统计数据 2023 年全国火电发电量约占总发电量的 68.4%，其产生的二氧化碳排放量巨大。碳捕集技术能够有效捕获火电厂燃烧过程中产生的二氧化碳捕集效率可达 85% 以上，为大幅削减火电行业碳排放提供了技术可能。在现有火电机组加装碳捕集装置，可在不改变能源结构的前提下实现火电行业碳排放的大幅下降，国际能源署研究表明要实现全球温升控制在 1.5 摄氏度的目标，CCUS 技术需要贡献约 15% 的减排量^[1]。在我国能源禀赋以煤为主的现实条件下，碳捕集技术的大规模应用将成为实现碳中和目标的重要支撑，为我国履行国际气候承诺、彰显负责任大国形象提供坚实的技术保障。

1.2 推动火电行业绿色低碳转型发展

火电行业作为传统的高耗能、高排放行业，面临着严峻的环保压力和转型需求，碳捕集技术的应用为火电企业提供了绿色转型的新路径，有助于延长现有火电机组的使用寿命保护既有投资价值。我国现有火电装机容量超过 13 亿千瓦，平均服役年限仅约 12 年，远低于国际先进水平的 30 ~ 40 年，提前退役将造成巨大的资产损失和社会浪费，应用碳捕集技术这些机组可在满足环保要求的前提下继续运行，实现经济效益与环境效益的双赢。同时碳捕集技术的发展还将催生新的产业链条，包括捕集设备制造、运营维护等环节，为火电企业创造新的业务增长点。部分先进的火电企业已开始布局 CCUS 产业，如华能集团在多个电厂开展碳捕集示范项目，探索“发电 + 碳捕集 + 碳利用”的新型商业模式，这种转型不仅有助于火电企业摆脱传统高污染形象，还能增强其在低碳经济中的竞争优势，为行业可持续发展注入新动能。

1.3 提升能源安全保障和环境治理水平

碳捕集技术的应用对于保障国家能源安全具有重要战略意义，我国能源结构以煤炭为主的基本国情在相当长时期内难以根本改变，煤电在保障电力系统安全稳定运行方面仍将发挥重要作用。碳捕集技术使得煤电能够在满足环保要求的前提下继续承担基荷和调峰功能，为新能源大规模接入电网提供可靠的支撑，这不仅有助于缓解我国对进口化石燃料的依赖，还能为新能源发展争取更多时间和空间^[2]。在环境治理方面碳捕集技术的推广应用将显著改善大气环境质量，除了减少二氧化碳排放外，现代碳捕集系统往往与脱硫脱硝

等污染物控制技术协同运行,能够实现多种污染物的协同治理。以华能绿色煤电为例其配套的 CCUS 装置在捕集二氧化碳的同时,还能有效去除烟气中的二氧化硫、氮氧化物等污染物,实现了环境效益的倍增,此外捕获的二氧化碳还可作为工业原料用于生产化工产品,或通过地质封存实现永久减排,形成完整的碳循环利用体系,为构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系提供了有力支撑。

2 碳捕集技术在火电应用中面临的现实挑战

2.1 技术成熟度有待进一步提升完善

当前碳捕集技术在火电领域的应用仍处于示范验证阶段,技术成熟度和可靠性有待进一步提升,主流的碳捕集技术路线包括燃烧后捕集、燃烧前捕集和富氧燃烧等,每种技术路线都存在各自的技术瓶颈。燃烧后捕集技术虽然适用性广,但存在能耗高、溶剂损失大等问题,捕集过程需要消耗电厂约 20% ~ 30% 的发电量,严重影响机组整体效率。燃烧前捕集技术需要对有机组进行大规模改造,技术复杂度高,投资成本巨大,富氧燃烧技术虽然捕集效率高,但空分制氧设备能耗大,经济性较差。此外不同技术路线的集成优化、设备腐蚀防护等关键技术问题尚未完全解决。以华能石洞口第二电厂 12 万吨/年 CO₂ 捕集示范工程为例,项目在运行过程中曾遇到溶剂降解、系统稳定性等多项技术挑战,需要持续的技术攻关和工艺优化。国际上虽然有一些商业化 CCUS 项目投运,但大多规模较小缺乏大型化工程应用经验,技术标准体系也不够完善,不同厂家的设备兼容性差,系统集成难度大,制约了技术的规模化推广应用。

2.2 经济成本偏高制约大规模推广应用

经济成本过高是制约碳捕集技术在火电行业大规模应用的主要障碍。根据国际能源署测算,目前 CCUS 技术的成本约为 50-100 美元/吨 CO₂,远高于碳交易市场价格,在我国火电厂应用碳捕集技术的总投资成本约为 2000-4000 元/千瓦,相当于新建火电机组投资的 50% ~ 80%,经济负担沉重。运营成本方面碳捕集装置的能耗约占电厂总发电量的 20% ~ 30%,加上溶剂补充、设备维护等费用,运营成本约为 150-300 元/吨 CO₂。以一台 60 万千瓦火电机组为例,年运行 8000 小时,CO₂ 排放量约 400 万吨,安装碳捕集装置后年增加运营成本约 6 亿-12 亿元严重侵蚀了企业盈利空间^[3]。当前我国碳交易价格约为 40-60 元/吨,远低于碳捕集的边际成本,企业缺乏投资动力,同时我国火电行业整体

盈利水平不高,2023 年全国火电企业平均利润率仅为 3.2%,难以承受高昂的减排成本。此外碳捕集技术的经济性还受到电价政策、技术进步等多种因素影响,存在较大的不确定性风险,在缺乏有效激励机制的情况下,企业更倾向于采用成本较低的节能改造措施,而非高投入的碳捕集技术。

2.3 政策支持体系和标准规范尚不健全

我国碳捕集技术发展的政策支持体系和标准规范体系仍不够完善,缺乏系统性的顶层设计和有针对性的扶持措施。虽然国家在“十四五”规划等重要文件中提出要推进 CCUS 技术发展,但具体的实施细则、监管要求等方面还不够明确,现行的环保政策主要侧重于污染物排放控制,对碳减排的约束力度相对较弱,未能形成倒逼企业投资碳捕集技术的有效机制。财政补贴政策方面国家虽然设立了节能减排专项资金,但对 CCUS 技术的专项支持力度有限,难以覆盖高额的技术开发和示范应用成本。税收政策方面碳捕集设备的折旧年限、进口关税优惠等配套措施尚不明确,影响企业投资积极性。在标准规范方面,我国 CCUS 技术标准体系建设相对滞后,缺乏统一的技术规范、环境影响评价指南等,导致项目建设和运营缺乏统一的技术依据。监测、核查(MRV)体系也不够完善,缺乏权威的第三方认证机构和标准化的碳减排量核算方法,影响了碳捕集项目的可信度和市场认可度。此外跨部门协调机制不够健全,发改委、生态环境部、能源局等部门在 CCUS 监管职责上存在交叉重叠,政策执行效果有待提升。

3 推进碳捕集技术在火电领域应用的实施路径

3.1 加强技术研发创新,提升碳捕集工艺水平

技术创新是推动碳捕集技术产业化应用的根本动力。要建立政府引导、产学研协同的技术创新体系,集中攻关碳捕集技术的关键技术瓶颈。在基础研究方面,要加强新型捕集溶剂、催化转化机制等前沿技术研究,开发高效低耗的下一代碳捕集技术,重点支持固体吸附、化学循环等新兴技术路线的研发,力争在技术原理和工艺路线上实现突破创新^[4]。在工程示范方面要分层次、分阶段开展技术示范,从千吨级小试、万吨级中试逐步扩展到百万吨级工业示范,积累大型化工程应用经验,支持华能、国电投等大型电力企业建设 CCUS 综合示范基地,开展不同技术路线的对比验证加速技术成熟度提升。例如华能集团在天津 IGCC 电厂开展的 12 万吨/年 CO₂ 捕集示范项目,通过技术攻关和工艺优化成

功解决溶剂稳定性、设备腐蚀防护等关键技术问题。项目运行数据显示, CO₂ 捕集率达到 85% 以上, 能耗降低至 2.5GJ/tCO₂, 技术指标达到国际先进水平, 在此基础上华能进一步开展了百万吨级 CCUS 产业化示范, 为技术推广奠定了坚实基础。同时要加强国际技术交流合作, 引进消化吸收国外先进技术, 支持国内企业参与国际 CCUS 项目在开放合作中提升自主创新能力。建立 CCUS 技术创新联盟整合高校、科研院所、企业等创新资源, 构建协同攻关、成果共享的创新平台, 设立 CCUS 技术专项基金加大对关键技术研发的投入力度, 支持产业链上下游协同创新推动技术链向产业链转化。

3.2 优化成本控制策略, 探索商业化运营模式

降低成本是实现碳捕集技术商业化应用的关键所在, 要从技术创新、产业协同等多个维度系统推进成本控制, 探索可持续的商业化运营模式。在技术层面要持续推进工艺流程优化, 提高系统集成度和自动化水平, 降低建设和运营成本, 重点开发低能耗溶剂、智能控制系统等关键技术和装备, 力争将能耗降低到 15% 以下。在制造层面要推动关键设备的标准化、模块化生产, 发挥规模效应降低制造成本, 支持专业化 CCUS 装备制造企业发展建立完整的产业链条, 提高设备国产化率和可靠性^[5]。以国家能源集团鄂尔多斯 CCUS 示范项目为例, 通过技术创新和工程优化项目总投资成本控制在 3000 元/千瓦以下, 运营成本降低至 200 元/tCO₂ 较国外同类项目成本降低 30% 以上, 项目采用模块化设计, 建设周期缩短至 18 个月为成本控制探索了有效路径。在商业模式方面, 要探索多元化的价值实现机制, 除了传统的碳交易收益外还要充分挖掘捕获 CO₂ 的资源化利用价值。支持发展“CCUS+ 化工”“CCUS+ 农业”等产业融合模式, 将 CO₂ 作为工业原料生产甲醇、水泥等高附加值产品提高项目经济效益。建立碳捕集项目投资基金, 吸引社会资本参与分散投资风险, 推广 PPP、BOT 等融资模式, 发挥政府和市场两个积极性, 建立碳减排量交易机制, 提高碳价水平增强企业投资动力, 探索绿色金融支持政策, 为 CCUS 项目提供低息贷款、绿色债券等融资支持。

3.3 完善政策保障机制, 构建标准规范体系

政策引导和标准规范是推动碳捕集技术发展的重要保障, 要建立完善的政策支持体系, 为技术推广应用营造良好的制度环境。在法律法规层面要加快制定《碳捕集利用与封存管理条例》等专项法规, 明确 CCUS 项目的法律地位、责任义务等为产业发展提供法治保障。在规划政策层面要将

CCUS 技术纳入国家和地方的能源发展规划、环境保护规划, 明确发展目标、重点任务和保障措施。在财税政策方面要建立多元化的财政支持机制, 设立国家 CCUS 产业发展基金, 重点支持技术研发、产业化推广等关键环节, 对 CCUS 设备制造企业给予税收优惠, 降低设备采购成本。对开展碳捕集的火电企业给予电价补贴或碳减排奖励, 提高项目经济性, 建立差别化的环保电价政策对配套 CCUS 装置的火电机组给予电价支持, 在标准体系方面要建立覆盖技术、环境、经济等各个方面的标准规范体系。例如欧盟制定了完善的 CCUS 政策框架, 包括《欧盟排放交易体系》《可再生能源指令》等, 为 CCUS 技术发展提供了强有力的政策支撑, 美国通过《45Q 税收抵免》政策, 对每吨 CO₂ 捕集利用给予 35-50 美元的税收抵免, 极大激发了企业投资热情。我国可借鉴国际经验结合国情制定适合的政策体系, 加强部门协调, 建立发改委牵头、相关部门参与的 CCUS 发展协调机制, 统筹推进政策制定和实施。

4 结语

碳捕集技术作为实现火电行业深度脱碳的重要技术路径, 在助力国家“双碳”目标实现、推动行业绿色转型、保障能源安全等方面具有重要战略价值。尽管当前该技术在成熟度、政策支撑等方面仍面临挑战, 但随着技术不断进步、成本持续下降、政策日益完善, 其应用前景十分广阔。未来应坚持创新驱动, 加大技术研发力度, 突破关键技术瓶颈; 坚持市场导向, 优化成本控制策略, 探索可持续商业模式; 坚持政府引导, 完善政策保障体系, 营造良好发展环境。在全球应对气候变化的时代背景下, 我国火电行业必须抓住 CCUS 技术发展的战略机遇期, 在绿色低碳发展的道路上勇立潮头, 用科技创新的力量书写能源革命的崭新篇章。

参考文献:

- [1] 陈阿小, 冉真真, 马双忱, 等. 火电厂碳捕集技术: 现状、应用与发展 [J]. 洁净煤技术, 2024,30(S01):52-64.
- [2] 陈菲琳. LDD 型圆盘污泥干化技术在燃煤电厂掺烧发电中的减污降碳应用 [J]. 中国环保产业, 2025,(02):36-40.
- [3] 王江. 节能减碳技术在采矿工程中的应用研究 [J]. 中国轮胎资源综合利用, 2024,(09):44-46.
- [4] 张雨琦. 节能减碳技术在煤化工废水催化氧化处理中的应用 [J]. 中国轮胎资源综合利用, 2024,(10):35-37.
- [5] 陆胤君. 碳捕集与封存技术在造纸行业的应用前景 [J]. 华东纸业, 2024,54(12):34-36.