

引用格式: 侯成龙, 来振亚, 陈嘉映, 等. 浙江省碳捕集利用与封存技术研究进展 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 26-36. HOU Chenglong, LAI Zhenya, CHEN Jiaying, et al. Research review of CO₂ capture, utilization and storage technology in Zhejiang Province [J]. Southern energy construction, 2024, 11(5): 26-36. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.03.

浙江省碳捕集利用与封存技术研究进展

侯成龙^{1,2,✉}, 来振亚^{1,2}, 陈嘉映¹, 吕洪坤¹, 丁历威¹, 章康¹, 张晓龙¹

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014;

2. 浙江大学能源高效清洁利用全国重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: [目的] 能源安全前提下的绿色低碳转型与工业结构调整是浙江省“碳达峰碳中和”工作面临的严峻挑战。由于浙江省煤电发电量占比较高, 碳捕集利用与封存技术 (CCUS) 有望在浙江省能源与工业等领域的双碳技术体系中扮演重要角色, 是实现化石能源大规模低碳利用的重要技术选择。[方法] 从 CO₂ 捕集、输送、利用与封存方面综述了浙江省 CCUS 技术的研究进展, 介绍了浙江省 CCUS 工程示范项目的开展情况; 总结了 CCUS 全链条各环节主要技术的特点, 简要分析了当前 CCUS 技术发展的挑战; 展望了 CCUS 技术在浙江省的发展前景, 并提出了发展建议。[结果] 浙江省在 CCUS 各环节, 特别是 CO₂ 捕集方面拥有良好的技术储备。省内全流程示范项目工艺路线多样, 捕集侧包括燃烧前和燃烧后捕集, 利用与封存侧涵盖生物、矿化、化工利用及地质封存, 各环节技术成熟度差异化较明显。项目规模较小, 初投资和运行成本普遍较高, 空间分布分散, 不利于形成产业集群。[结论] 需准确把握浙江省重点领域 CCUS 潜力和源汇条件, 因地制宜推广 CCUS 集成项目, 持续开展技术研发, 并在激励机制、政策法规、商业模式等方面予以保障。

关键词: CO₂ 捕集; CO₂ 利用; 地质封存; CCUS; 碳达峰碳中和

中图分类号: TK01; X701

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)05-0026-11

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.03

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Research Review of CO₂ Capture, Utilization and Storage Technology in Zhejiang Province

HOU Chenglong^{1,2,✉}, LAI Zhenya^{1,2}, CHEN Jiaying¹, LÜ Hongkun¹, DING Liwei¹, ZHANG Kang¹, ZHANG Xiaolong¹

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, Zhejiang, China;

2. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

Abstract: [Introduction] The green and low-carbon transformation and industrial restructuring under the premise of energy security is a serious challenge faced by Zhejiang Province to achieve its "carbon peaking and carbon neutrality" goals. Given the high proportion of coal-fired power generation in Zhejiang, carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology, as an important choice to realize the low-carbon utilization of fossil energy, is vital to the "double carbon" technology system in the energy sector and industrial circle of the province. [Method] This paper presents a research review of CCUS technology from multiple aspects, including CO₂ capture, transportation, utilization and storage, and introduces the development of CCUS demonstration projects in Zhejiang. This study summarizes the features of the major technologies throughout the full CCUS chain, and briefly analyzes the existing challenges amid the ongoing technological advancements. Besides, the prospect of CCUS technology in Zhejiang is explored along with corresponding suggestions. [Result] Zhejiang boasts a solid technical foundation in the field of CCUS, especially in CO₂ capture, and has numerous full-chain demonstration projects employing various process routes, including pre-combustion and post-combustion capture (CO₂ capture),

收稿日期: 2023-04-26 修回日期: 2024-06-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“耦合离子筛分的直接空气 CO₂ 捕集电化学再生及系统优化研究”(52276137); 国家电网公司总部科技项目“面向终端燃料清洁替代的电解 CO₂ 制-储-用甲醇技术研究及应用”(5400-202219176A-1-1-ZN)

biological, mineral, and chemical utilization (CO₂ utilization), as well as geological storage (CO₂ storage). However, technology readiness level differs largely across the process chain, in addition to other challenges, such as small scale, generally high initial capital and operating costs, and dispersed spatial distribution, which hinder the development of industrial clusters. [Conclusion] It is important to promote CCUS integration projects to adapt to local conditions, based on a thorough understanding of Zhejiang's potential and source/sink conditions related to CCUS in key areas. Additionally, continuous investment in technological research and development is necessary, along with guarantees in terms of incentive mechanisms, policies, regulations, and business models.

Key words: CO₂ capture; CO₂ utilization; geological storage; CCUS; carbon peaking and carbon neutrality

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

以 CO₂ 为主的温室气体排放是全球性气候变化的主要原因。联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 特别报告指出, 为平衡全球生态、确保人类生存安全, 21 世纪末全球温度升高幅度应当在《巴黎协定》2 °C 目标基础上, 进一步控制在 1.5 °C 以内, 其将依赖于包括碳捕集、利用与封存 (Carbon Capture Utilization and Storage, CCUS) 在内的一系列技术手段^[1]。国际能源署 (International Energy Agency, IEA) 特别报告指出 2020—2070 年全球 CO₂ 累计排放量的 15% 有望通过 CCUS 技术实现^[2]。而在《巴黎协定》后各国提交的国家自主贡献 (Nationally Determined Contribution, NDC) 中, CCUS 技术已被广泛纳入气候行动方案。

2019 年我国碳排放 (能源) 总量约为 111 亿 t CO₂, 占全球排放量的 1/3, 其中煤电机组排放占比高达 45%, CCUS 可为这一部分煤电提供有效的减碳途径, 发挥煤电作为能源电力转型过程中压舱石的“兜底保障”作用, 同时也可避免大规模的化石燃料基础设施资产搁置; 对于钢铁、水泥、化工等难减排行业, CCUS 是其深度脱碳与低碳转型的重要技术保障; 同时, 结合生物质能碳捕集与封存 (Bio-Energy with Carbon Capture and Storage, BECCS)、直接空气捕碳 (Direct Air Capture, DAC) 等负碳技术, CCUS 可助力能源系统的近零排放, 有力支撑我国“2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和”目标愿景的达成^[3-4]。

2020 年浙江省碳排放总量约为 4.6 亿 t CO₂, 居全国第 10 位, 人均碳排放居全国第 15 位, 单位 GDP CO₂ 排放居全国第 25 位。能源领域的碳排放约占全社会排放总量的 65%, 其中以煤电为主的碳基电

力碳排放占全社会排放比重超过 50%。鉴于“十四五”期间浙江省将继续新增约 7.32 GW 的煤电机组, 在 2035 年前, 存量煤电机组 CCUS 改造将是保障能源、电力安全稳定供应的前提下, 实现大规模碳减排的关键。钢铁、建材、石化、化工、造纸、化纤和纺织等 7 大重点行业的节能降碳是浙江省工业“碳达峰碳中和”的重点和难点。以浙江省石化及化工行业为例, 其碳排放总量大、碳排放强度高, 特别是随着浙石化二期等重特大型石化项目的投产, 碳排放增量的上涨速度将进一步提高。石化及化工行业中工艺排放的 CO₂ 浓度较高, 可为 CCUS 技术应用提供低成本的发展机遇, 碳达峰前 CCUS 减排需求将持续增长。同时, 浙江省农作物秸秆等农林生物质资源丰富, 如将其用于发电、钢铁、水泥或生物燃料制备, BECCS 等负碳技术可作为浙江省碳中和目标的托底保障^[5]。

鉴于 CCUS 技术在“双碳”目标背景下浙江省绿色低碳转型中的重要作用, 文章将对浙江省碳捕集、利用与封存技术的发展进行系统性综述, 并分析 CCUS 技术在浙江省各行业的应用前景。

1 CCUS 技术内涵及政策支持

碳捕集、利用与封存作为减缓气候变化的一项关键技术, 是指收集能源、工业及其他行业生产活动产生的 CO₂, 并采用各种方法储存和利用以避免其排放到大气中的一种技术。

CCUS 技术按流程分为 CO₂ 捕集、CO₂ 输送、CO₂ 利用与封存等环节。CO₂ 捕集是指将不同排放源排放的 CO₂ 进行捕获分离的过程, 包括燃烧前捕集、燃烧后捕集和富氧燃烧技术等。CO₂ 输送是指将捕集、压缩的 CO₂ 运输至封存或利用场所。CO₂ 利用是指以 CO₂ 为原料生产具有经济价值的产品,

包括地质利用、生物利用和化工利用等。CO₂封存技术是指将捕集的 CO₂ 注入深层地质构造,包括陆上咸水层封存、海底咸水层封存和枯竭油气田封存等。

2021 年以来,浙江省政府已制定并发布了一批 CCUS 有关的政策及规划,如表 1 所示^[6]。《浙江省能源发展“十四五”规划》《浙江省生态环境保护“十

四五”规划》《浙江省应对气候变化“十四五”规划》等均指出需突破 CCUS 关键核心技术,推进 CCUS 技术示范工程,有序推动规模化、全链条 CCUS 技术的引进、研发、产业化和应用推广;“双碳”相关的政策文件均将 CCUS 技术作为实现浙江省“双碳”目标的重要技术手段,强调需超前部署,加快加强基础前沿技术攻关。

表 1 浙江省碳捕集、利用与封存技术相关政策

Tab. 1 CCUS related policies in Zhejiang Province

文件名称	发布时间	相关内容
浙江省碳达峰碳中和科技创新行动方案	2021.6.8	加强基础前沿创新引领(CCUS领域);超前部署CCUS技术;CCUS技术转化应用
浙江省应对气候变化“十四五”规划	2021.6.16	组织开展重点领域技术攻关(CCUS及碳汇方向);有序推动规模化、全链条CCUS技术的引进、研发、产业化和应用推广
浙江省生态环境保护“十四五”规划	2021.7.12	推进碳捕集利用和封存技术示范工程
浙江省全球先进制造业基地建设“十四五”规划	2021.7.19	开展碳捕集利用关键核心技术攻关
关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的实施意见	2021.12.7	超前部署碳捕集利用与封存等负碳技术;积极推广碳捕集利用与封存技术
关于完全准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的实施意见	2021.12.23	加快关键核心技术攻关(围绕碳捕集利用与封存等方向)
浙江省能源发展“十四五”规划	2022.5.7	重点突破CO ₂ 捕集封存利用等关键技术;推动CO ₂ 利用与封存等重大科技项目
关于支持碳达峰碳中和工作的实施意见	2022.6.21	支持CO ₂ 利用与封存等领域关键核心技术研发
浙江省“十四五”节能减排综合工作方案	2022.8.29	探索CO ₂ 捕集利用一体化等低碳技术应用
浙江省减污降碳协同创新区建设实施方案	2022.12.23	推动CO ₂ 捕集、利用与封存技术研发和转化应用
关于加强浙江自由贸易试验区生态环境保护推动高质量发展的实施意见	2023.1.28	研究CCUS项目碳排放“双控”管理办法
关于培育发展未来产业的指导意见	2023.2.10	探索发展6个潜力巨大的未来产业(低成本碳捕集利用与封存)
浙江省水泥工业高质量发展暨碳达峰行动计划(2022—2025年)	2023.3.30	推广碳捕捉纯化等行业前沿低碳技术,探索开展水泥二氧化碳捕集、封存、及固碳建材等试点建设
浙江省建材行业碳达峰行动方案	2023.12.14	推动窑炉烟气碳捕集利用与封存等技术攻关
浙江省绿色低碳转型促进条例(草案)	审议中	逐步推动二氧化碳捕集利用技术在火电、建材、化工等行业的转化应用

2 浙江省 CO₂ 捕集技术研究进展

2.1 燃烧前捕集技术

燃烧前捕集技术是指在燃烧前将 CO₂ 从燃料或

燃料变换气中分离的技术,如天然气、煤气或合成气中的碳捕集,应用于化工脱碳和整体煤气化联合循环发电(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)等。该技术处理的气体压力高、CO₂ 浓度高且杂质

较少。具体技术主要包括吸收、吸附和膜分离技术。

用于燃烧前捕集的吸收技术以低温甲醇洗(物理吸收)为代表,在浙江省煤化工行业已处于商业应用阶段,其分离依靠低温高压条件下 CO_2 、 H_2S 以及有机硫等酸性气体同 CO 、 H_2 在甲醇中溶解度的差异。如浙江石油化工有限公司24万t/a CO_2 回收装置项目,对4000万t/a炼化项目副产的石油焦、焦油,经气化、变换与热回收后,通过低温甲醇洗技术实现 CO_2 、 H_2S 等酸性气体脱除及 CO 的深冷分离。

考虑到较高的 CO_2 气源压力,燃烧前捕集的吸收技术可采用物理吸附。浙江大学邢华斌等开发了一种铁掺杂丝光沸石分子筛吸附材料,通过孔径结构和尺寸的精确设计,25℃和100kPa条件下材料的 CO_2 体积吸附容量高达 $219\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, CO_2/N_2 、 CO_2/CH_4 分离选择性显著高于商用沸石分子筛^[7]。浙江师范大学Zhao等^[8]以烷基胺为模板,异丙醇钛为前体制备了介孔氧化钛材料,在 CO_2/H_2 摩尔比50:50,125℃和500kPa条件下的 CO_2 选择性达9.87;在 CO_2/CH_4 摩尔比75:25,60℃和 $3.5\times 10^5\text{ MPa}$ 下的 CO_2 选择性达22.1。

CO_2 膜分离主要通过高分子膜的渗透性差异实现,在天然气、生物气(沼气)脱碳方面已有商业化案例。例如宁波北仑大榭填埋气提纯天然气项目中,对大榭填埋场产生的 $1500\text{ m}^3/\text{h}$ 填埋气,经干法脱硫、除硅氧烷、脱水与压缩后,通过中空纤维膜分离技术,将原料气中25.6%的 CO_2 脱除至3%,达到二类天然气品质后外供至用户。

在IGCC技术方面,浙江省内相关研究集中于流程模拟及工艺优化。浙江工业大学Han等^[9]针对IGCC系统的模拟研究指出,以Selexol(二甲基醚聚乙二醇)为典型吸收剂的常温物理吸收适用于常规的水煤气变换反应(340~400℃)产生的合成气脱碳;而当合成气经高温脱硫时,可采用碳酸钾修饰水滑石为典型吸附剂的中温吸附法脱碳,得益于吸附增强的新型水煤气变换反应,IGCC电站的净效率较基准工况可提高1.3%至46.9%。

2.2 燃烧后捕集技术

燃烧后捕集技术是指从燃煤锅炉或其他工业燃烧过程除尘和脱硫后的烟气中分离和回收 CO_2 。燃烧后捕集处理的 CO_2 气源(烟气)一般为常压,浓度较低(3%~30%)。可采用的技术主要包括吸收(化学、

物理)分离、吸附(化学、物理)分离和膜分离技术。

化学吸收是目前技术成熟度最高的燃烧后捕集技术,有机胺(乙醇胺MEA、二乙醇胺DEA、*N*-甲基二乙醇胺MDEA、2-氨基-2-甲基-1-丙醇AMP、哌嗪PZ及混合胺等)是化学吸收法捕集常用吸收剂,研究以高性能吸收剂研发及工艺流程优化为重心。

在高性能吸收剂研发方面,浙江大学方梦祥、王涛团队^[10-11]开发了一系列用于烟气 CO_2 捕集的低能耗混合胺吸收剂与少水吸收剂。混合胺吸收剂可结合一、二级胺吸收速率较快和三级胺、空间位阻胺吸收容量大、再生能耗低的优势。烟气量 $200\text{ Nm}^3/\text{h}$ 试验装置的运行结果表明,AMP/MEA、MDEA/PZ相较于30%MEA的基准吸收剂, CO_2 循环容量分别提升40%、10%,再生能耗分别降低22%和6%。在高效反应器和工艺优化方面,浙江大学董文峰等^[12]研发了基于塔内温度分区调控的强化传质吸收-再生塔,优选并重新设计了塔内件,结合级间冷却、富液分级流、机械式蒸汽再压缩(MVR)等工艺,综合能耗下降15%,同时实现了高效脱碳(>92%)。所开发的 CO_2 高效吸收复合增强聚丙烯规整填料及填料塔,生产成本仅为不锈钢填料的30%,装填后吸收塔投资降低30%以上(图1)。结合新型混合胺吸收剂、先进反应器和节能工艺,由浙江大学技术支持的15万t/a国能锦界电厂600MW亚临界机组燃烧后碳捕集与驱油封存全流程示范项目,于2021年6月完成168h性能考核,验证其 CO_2 捕集效率达90%,捕集再生能耗小于 2.4 GJ/t CO_2 。

新型两相吸收剂利用分相性质降低需加热的溶液循环量,可大幅降低再生能耗。浙江大学刘飞等^[13]开发的*N,N'*-二乙基乙醇胺(DEEA,50%)/羟乙基乙二胺(AEEA,25%)两相吸收剂,在40℃、 CO_2 负荷为 2.2 mol/kg 条件下分相为上、下层,90%的 CO_2 富集于下层,再生塔富液循环量减少38%,再生能耗降至 2.58 GJ/t CO_2 。NMR分析揭示了吸收剂分相行为与 CO_2 负荷及吸收剂浓度的关系:过低、过高的 CO_2 负荷和过低的吸收剂浓度下均不发生分相(图2)。浙江工业大学张士汉等^[14]开发了三乙烯四胺(TETA)/*N,N'*-二甲基环己胺(DMCA)复合胺相变吸收体系。结合NMR分析与量子化学模拟,揭示了双阶段协同的反应机制,1M:3M最优组分配比下吸收剂循环容量较MEA提高60%,捕集能耗较MEA降低40%。

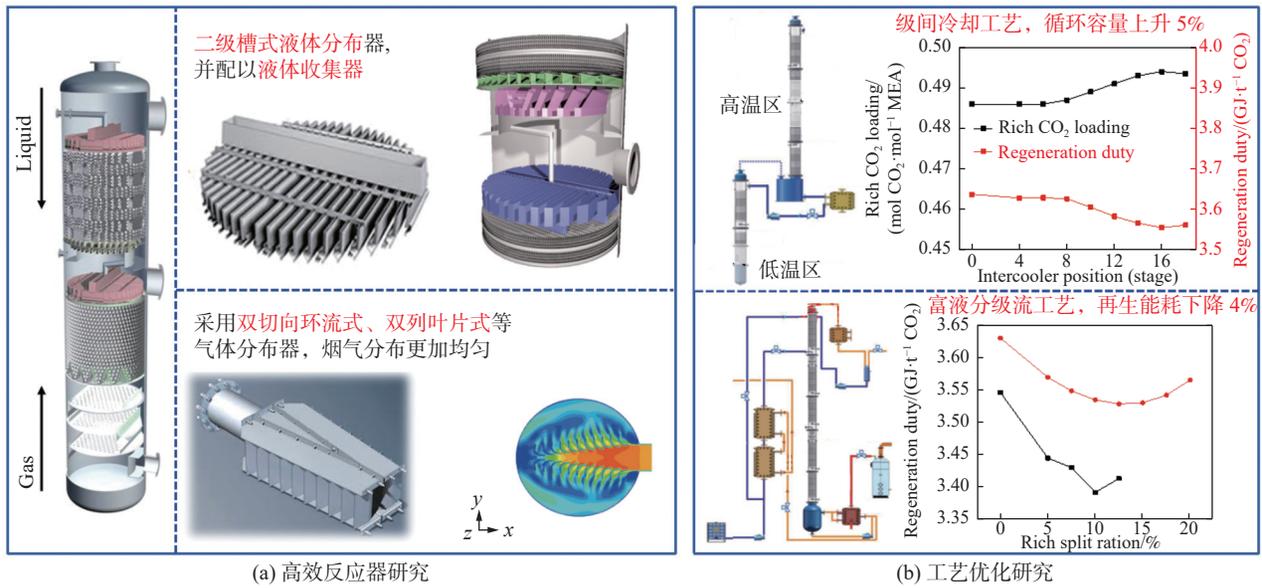


图 1 高效反应器和工艺优化研究进展
 Fig. 1 Development of high-performance reactor and process optimization for CO₂ absorption

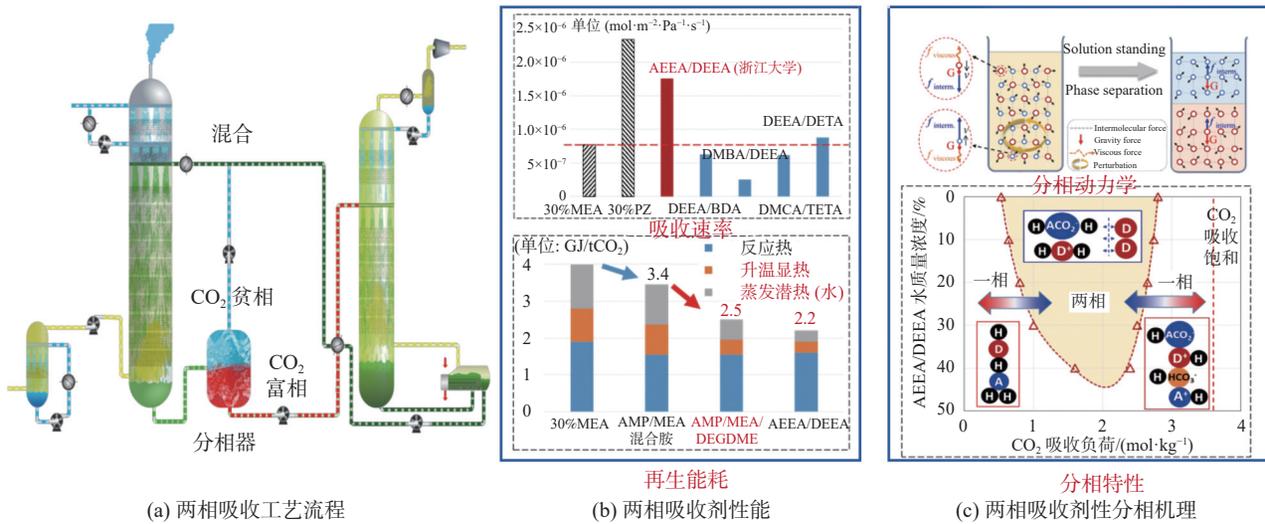


图 2 两相吸收剂研究进展
 Fig. 2 Development of biphasic CO₂ absorbents

少水吸收剂主要通过低比热有机溶剂替代溶剂水以降低能耗。浙江大学徐燕洁等^[15]开发了以双胺(*N,N'*-二甲基乙二胺, DMEDA)为主剂、NMP 为辅剂的少水型吸收剂(含水率低于 20%),有效改善了少水吸收剂高黏度的通病,CO₂ 循环吸收容量较 30%MEA 提升 140%,再生能耗较 MEA 降低 36%。

传统的离子液体是一类通过物理溶解机制捕集 CO₂ 的吸收剂。近年来,学者探索了一系列功能化离子液体,引入化学吸收机制以提高 CO₂ 吸收容量。

浙江大学李伟等^[16]开发了氨基功能化的离子液体吸收剂,在 15 kPa CO₂ 分压下的吸收负荷为 6.4 mol/kg,再生率达 98.8%。浙江大学王从敏等^[17]开发了离子液体的大规模产业化应用方法,提出了多位点吸收、碱性调控、双重调控等策略,以实现离子液体对 CO₂ 的高效稳定捕集。

固体吸附技术具有低能耗、低腐蚀性等优势。由于烟气中 CO₂ 分压较低,活性炭等传统物理吸附材料捕集性能不佳,将有机胺等具有 CO₂ 反应活性

的物质负载到多孔载体形成的化学吸附材料是近年来的研究热点。浙江大学施曜等^[18]以新型介孔分子筛材料 SBA-16、KIT-6 为载体、聚乙烯亚胺(PEI)、四乙烯五胺(TEPA)为改性剂合成固体胺吸附剂,在 70 °C 模拟烟气条件下,CO₂ 吸附量为 3.2 mol/kg,并在经过 40 次吸附/脱附循环后仍保持稳定。浙江农林大学李莹莹等^[19]将聚乙烯亚胺负载到纤维素载体制备了多孔材料,在 25 °C、100 kPa 条件下 CO₂ 可达 6.45 mol/kg。中科院宁波材料所陈亮等^[20]开发的多胺功能化多孔有机聚合物用于 CO₂ 吸附,在 50 °C、150 kPa 条件下吸附容量达 4.52 mol/kg。

膜分离技术设备紧凑、能耗低、操作简单并可克服热力学限制,在燃煤烟气 CO₂ 分离方面前景良好。高 CO₂ 渗透系数、高稳定性的膜材料设计是研究重点。聚合物膜普遍存在渗透性与选择性的权衡关系,高渗透系数膜一般选择性不佳,在传统聚合物膜中掺混多孔介质形成混合基质膜是突破这一权衡关系的有效手段。浙江大学刘牛等^[21]将金属有机骨架衍生复合多孔材料加入聚乙二醇聚合物膜中,CO₂ 渗透系数与 CO₂/N₂ 选择性较聚乙二醇膜分别提高 99.7%、66.4%。

2.3 富氧燃烧和化学链技术

富氧燃烧利用氧气代替助燃空气,可结合大比例烟气循环调节炉膛内燃烧和传热特性,燃烧烟气中 CO₂ 浓度可达到 90% 以上。化学链基于固体载氧体或载碳体循环“反应-再生”过程的热化学吸放热效应实现含碳燃料的转化利用,避免了燃料与空气直接接触,在燃烧和气化等过程中实现 CO₂ 的内分离,降低捕集能耗。浙江省在富氧燃烧研究方面有良好的技术积累,浙江大学联合法液空公司已在湖南株洲、河北秦皇岛开展了 MW 级富氧燃烧示范应用。在化学链技术方面,浙江大学、浙江工业大学进行了 20 kW 规模小试,基于钙基载碳体,采用双循环流化床反应装置原位捕集煤和生物质气化产生的 CO₂ 并副产高纯氢气^[22]。

2.4 直接空气捕碳技术(DAC)

直接空气捕碳技术(DAC)通过捕集装置直接从空气中去除 CO₂。针对一类季铵聚合物,浙江大学董昊等^[23]发现环境湿度变化可改变材料水合状态,并进而改变表面吸附能量,最终实现在较低的湿度条件下吸附空气中的 CO₂、在较高的湿度下释放

CO₂ 的变湿吸附-解吸附循环。通过提高材料孔隙率、降低界面亲水性等优化设计,CO₂ 吸附效率超过 90%,传质动力学较同类材料提高 1 个数量级以上。基于变湿吸附工艺,该团队开发了捕集量为 30 kg/d 的小型空气捕集样机,实现了从空气中高效捕集、浓缩 CO₂ 并供给温室的集成设备和工艺。

3 浙江省输送技术研究进展

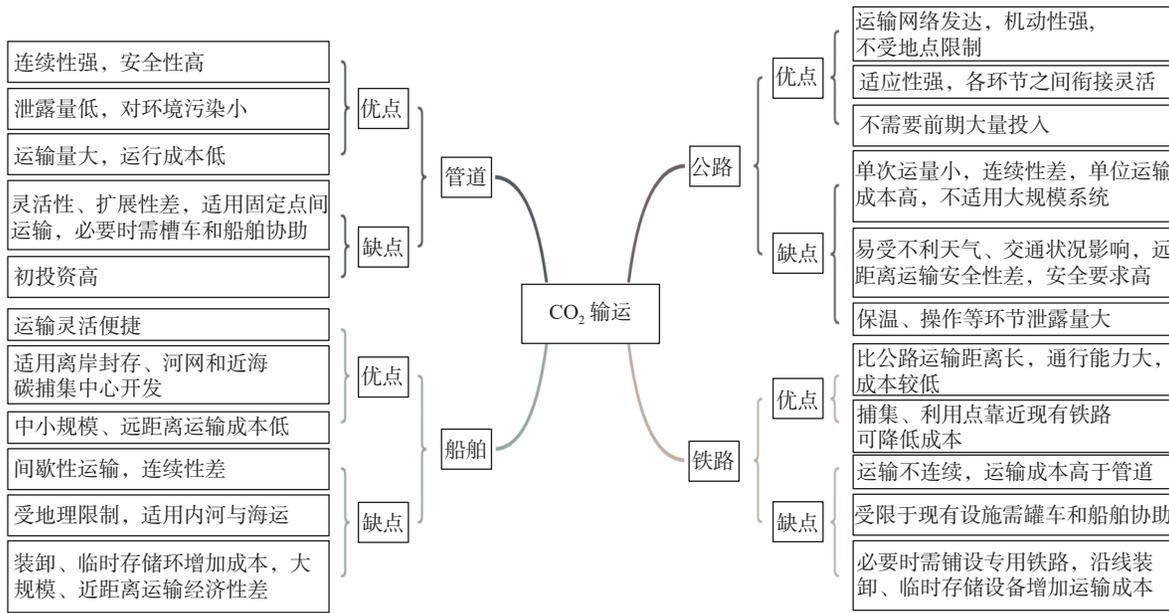
CO₂ 输送是指将液化的 CO₂ 运送到可利用或封存的场地。其中液化环节可在常温下通过高压使 CO₂ 液化,工艺简单,无需低温制冷设备,但压缩机、净化装置等均处在高压状态,设备管道、阀门投资高;也可在低温下通过较低的压力使 CO₂ 液化。液态 CO₂ 的运输方式包括管道、船舶、公路和铁路等。管道运输可分为气相运输、一般液体运输、密相运输和超临界运输。管道运输运输量大、运行成本低、安全性高,但初投资较大。船舶运输仅适用于内河与海洋运输。公路运输运量小,成本高,但最为灵活、适应性强。铁路运输运量高于公路,成本稍低,一般需依托现有的铁路设施。各方式的优缺点如图 3 所示。具体选择需要综合考虑运输起点同终点的位置和距离、CO₂ 运输量、CO₂ 品质、CO₂ 温度和压力、运输过程成本以及运输设备等因素。

同 CO₂ 捕集相比,CO₂ 输送技术已趋于成熟。浙江省内相关技术和工程应用主要以企业为主体。包括杭州萧山杭氧气体有限公司、华东能源环保股份有限公司、三江化工有限公司等均有万吨级至十万吨级 CO₂ 压缩液化工程案例,具体如表 2 所示。受限于基础设施,目前液态 CO₂ 运输主要通过公路。

4 浙江省 CO₂ 利用与封存技术研究进展

4.1 CO₂ 利用技术

CO₂ 生物利用是以生物转化为特征,通过光合作用将 CO₂ 用于生物质合成。浙江大学程军等^[24]针对 CO₂ 微藻利用开展了长期研究,利用生物化学反应过程将 CO₂ 转化为高经济价值产品,通过改良调控关键生物基因、反应催化酶和细胞代谢网络等促进固碳反应。在内蒙古鄂尔多斯、山东烟台、广东湛江、河南郑州和广东深圳等地开展了微藻固定燃煤烟气 CO₂ 示范工程,涵盖跑道池、水平管式反应

图 3 CO₂ 运输方式优缺点比较Fig. 3 Advantages and disadvantages of different CO₂ transportation methods表 2 浙江省 CO₂ 压缩液化典型工程案例Tab. 2 Engineering cases of CO₂ compression and liquefaction in Zhejiang

技术介绍	装置规模	实施单位	地点
空分过程原料气(97% CO ₂)经压缩至2.6 MPa, 经预脱水、脱硫、脱烃等初提纯后, 精馏获得99.9%的工业级(15万t)和食品级(5万t)CO ₂ 液体产品。	20万t/a	杭州萧山杭氧气体有限公司	杭州
空分过程原料气(95% CO ₂)经压缩至2.5 MPa, 经预脱水、脱硫、脱烃等初提纯后, 精馏获得99.9%的工业级和食品级CO ₂ 液体产品。	45万t/a	华东能源环保股份有限公司	宁波
环氧乙烷尾气(95% CO ₂)经压缩至2.5 MPa, 经预脱水、脱硫、脱烃等初提纯后, 精馏获得99.9%的工业级CO ₂ 液体产品。	5万t/a	三江化工有限公司	嘉兴
煤化工尾气(92% CO ₂)经预脱水、粗脱硫, 压缩至2.2 MPa, 再精脱硫、干燥等初提纯后, 精馏获得99.9%的工业级CO ₂ 液体产品。	4万t/a	浙江凤登绿能环保股份有限公司	绍兴
合成氨原料气(97% CO ₂)经压缩至3.0 MPa, 经预脱水、脱硫、脱烃等初提纯后, 精馏获得99.9%的食品级CO ₂ 液体产品。	6万t/a	浙江晋巨化工有限公司	衢州
煤化工尾气(92% CO ₂)经预脱水、粗脱硫, 压缩至2.2 MPa, 再精脱硫、干燥等初提纯后, 精馏获得99.9%的工业级CO ₂ 液体产品。	4万t/a	浙江凤登绿能环保股份有限公司	金华

器、立柱式反应器等多种反应器形式, 固碳规模 10~10 000 t/a。固碳获得的微藻可生产营养保健食品、畜禽水产饲料、功能性有机肥、可降解生物塑料等。

利用生物法将 CO₂ 转化为碳基化学品近年来获得关注。浙江海洋大学贺亚雪等^[25] 利用产醇菌将 CO 及 CO₂ 转化为生物乙醇及丁醇, 发现微生物作为合成气发酵的主体经过筛选菌种后的混菌系统具有更好的优势, 合成气发酵的挑战在于产醇菌种类有限、产物浓度低等。西湖大学曾安平等^[26] 的最新研究集成生物催化和化学催化过程, 实现从甲醇(C1)和

空气中捕捉的 CO₂(C1)高效合成甘氨酸(C2 氨基酸), 丝氨酸(C3 氨基酸)和丙酮酸(C3 有机酸), 固碳速率高达 $6.78 \times 10^{-2} \text{ mol}/(\text{min} \cdot \text{kg})$, 产品浓度达到 g/L 水平。

CO₂ 矿化利用是指通过天然矿物、工业材料和工业固废中钙、镁等碱性金属将 CO₂ 进行碳酸化固定为化学性质极其稳定的碳酸盐。CO₂ 矿化利用技术包括钢渣矿化利用、磷石膏矿化利用、钾长石加工联合 CO₂ 矿化利用与 CO₂ 矿化养护混凝土利用技术等。浙江大学王涛等^[27] 新型 CO₂ 矿化养护建材方案, 实现 90% 的工业固废掺杂, 最优养护压力在常

规蒸压养护压力范围内,产品抗压强度提升30%以上,形成了15 MPa与30 MPa两个等级产品。依托该技术在河南焦作开展了万吨级CO₂养护混凝土示范项目,在72 h内封存100 t CO₂,转化率>98%,净封存率>84%,共消纳钢渣、粉煤灰、炉渣和电石渣等工业固废共1 700 t,生产混凝土1 800 t。

CO₂化工转化主要是利用CO₂制备具有较高附加值的能源化学品、精细化工品和聚合物材料等,可与现有的能源、化工工艺深度耦合。CO₂化工转化技术可分为:CO₂重整CH₄制备合成气技术、CO₂裂解经CO制备液体燃料技术、CO₂加氢合成甲醇技术、CO₂加氢直接制烯烃技术、CO₂光电催化转化技术、CO₂合成有机碳酸酯技术、CO₂合成可降解聚合物材料技术、CO₂合成异氰酸酯/聚氨酯技术、CO₂制备聚碳酸酯/聚酯材料技术等。目前CO₂裂解经CO制备液体燃料以及加氢直接制烯烃技术仍在进行基础研究,CO₂重整CH₄制备合成气、CO₂加氢合成甲醇技术和CO₂光电催化转化技术处于中试验证阶段,CO₂合成有机碳酸酯/可降解聚合物材料/异氰酸酯/聚氨酯技术处于工业示范阶段,CO₂制备聚碳酸酯/聚酯材料技术已进入工业应用。浙江大学吴浩斌等^[28]在电催化CO₂制多碳化学品研究方面研制的铜基催化剂实现高达85%的C₂₊产物选择性,可稳定运行超过66 h。浙江工业大学梁初等^[29]将CO₂在低温条件下快速转化为石墨及其他化学品,形成了一批具有自主知识产权的CO₂绿色节能高效转化新技术。浙江理工大学李本侠等^[30]采用基于半导体光催

化技术的人工光合作用将CO₂合成为乙烯,选择性达到73.9%。浙江大学伍广鹏等^[31]利用CO₂制备聚碳酸酯实现对CO₂的吸收利用率高达99%,并可用于生产迄今为止最高分子量的聚碳酸酯且实现催化剂的循环再利用。

4.2 CO₂封存技术

CO₂封存技术方面,浙江省内适合碳封存的陆上沉积盆地面积小、分布散,封存潜力非常有限;而邻近海域有大型沉积盆地,CO₂近海地质封存潜力较高,例如东海盆地封存潜力可达234亿t,能就近接纳封存沿海大型CO₂点源(沿海火电厂、海上石化基地等)排放的温室气体,源汇匹配度高,封存成本可控。浙江大学李春峰、浙江工业大学姚泽伟、浙江海洋大学彭希等^[32]从断裂活动、盆地压力、构造沉降特征、地震活动性和低温梯度等角度分析了我国海域盆地适宜大规模CO₂地质封存的条件和目标,认为东海陆架盆地、珠江口盆地、琼东南盆地及南海中央海盆是最优的地质封存区域。浙江工业大学潘志彦等^[33]研究了不同矿化度模拟盐溶液中CO₂溶解度随封存深度的关系,估测了深部盐水层的溶解封存量,为深部盐水层CO₂封存技术发展提供了实验参数。

5 浙江省CCUS全流程技术示范进展

CCUS全流程技术涵盖上游的捕集、中游的压缩与运输,以及下游的利用与封存,按照排放源的行

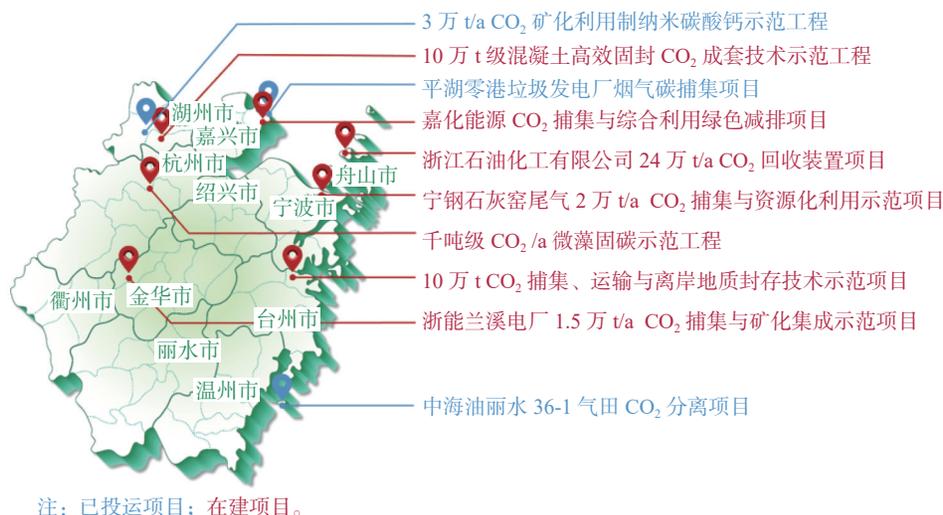


图4 浙江省CCUS全流程技术示范工程示意图

Fig. 4 CCUS full-chain demonstration projects in Zhejiang Province

业类别、CO₂ 浓度、压力、捕集规模、输送距离、方式、区域利用和封存的市场需求、技术成熟度、经济性等因素,需采用“因地制宜、一厂一策”的技术耦合和系统集成方式,来保证 CCUS 项目技术经济性。浙江省 CCUS 全流程技术示范项目处于起步阶段,主要集中在能源、钢铁、建材(水泥)和化工行业,已经投运和正在开展的链式流程化示范项目约 10 项,具体如图 4 所示。

西子清洁能源装备制造股份有限公司正在杭州开展千吨级 CO₂/a 微藻固碳示范工程,项目占地 2 hm²,采用立柱式光生物反应器,总计养藻水体容积约 3 600 t,年可固碳约 1 000 t。中国空分工程有限公司基于燃烧后 CO₂ 低分压先进捕集工艺技术,将在典型热电行业(杭州热电)开展 10 万 t 级 CO₂ 捕集技术示范研究,在浙江沿海(台州三门)开展 10 万 t 级 CO₂ 存储、运输与离岸地质封存技术示范研究。杭州钢铁集团有限公司正在宁波开展石灰窑尾气 2 万 t/a CO₂ 捕集与资源化利用示范项目,采用先进化学吸收法捕集工艺,捕集提纯后 CO₂ 一部分用于制取干冰,一部分用于钢渣矿化固碳及探索 CO₂ 保护气、顶吹/底吹替代气等多途径综合利用场景。

浙江嘉化能源化工股份有限公司正在嘉兴开展 CO₂ 捕集与综合利用绿色减排项目,捕集厂区内热电装置锅炉燃烧过程中产生的 CO₂ 并与厂区副产 H₂ 合成甲醇,实现年捕集利用 20 万 t CO₂。福建龙净环保股份有限公司碳中和研究院在嘉兴平湖实施了垃圾发电厂烟气碳捕集项目,有机胺吸收工艺系统以高效填料吸收塔和解吸塔为核心。在垃圾焚烧烟气 CO₂ 含量 8% 条件下,捕集效率达 95% 以上,再生能耗为 2.6 GJ/t CO₂,已于 2022 年 7 月建成投产。谢菲尔考克碳酸钙湖州有限公司开展了 3 万 t/a CO₂ 矿化利用制纳米碳酸钙示范工程,利用燃煤热电厂烟气中的 CO₂ 矿化制备高品质碳酸钙,年捕集利用 CO₂ 约 1.32 万 t,已于 2019 年 1 月建成投产。

浙江省建材集团浙西建筑产业化有限公司正在湖州开展 10 万 t 级混凝土高效固封 CO₂ 成套技术示范工程,将产业前端捕集到的液态 CO₂ 直接注入、参与预拌混凝土制备,以预拌混凝土及其制品为载体,实现 CO₂ 永久固化封存。浙江省能源集团有限公司兰溪电厂 1.5 万 t/a CO₂ 捕集与矿化集成示范项目已处于调试阶段,其利用新型两相吸收剂捕集大

型燃煤电厂烟气中的 CO₂ 矿化养护粉煤灰加气砌块,年捕集利用 CO₂ 约 1.5 万 t。中国海洋石油集团有限公司已开展丽水 36-1 气田 CO₂ 分离项目,采用“催化氧化-精馏提纯”工艺回收天然气处理装置放空 CO₂,并生产食品级 CO₂,年减排 25 万 t。

6 结论

在 CO₂ 捕集技术方面,基于物理吸收的燃烧前捕集技术目前成熟度较高,可在浙江省内煤化工行业进行规模化技术推广。固体吸附、低温分馏等技术商业化难度较高,有望在 2030—2035 年后逐步应用。燃烧后捕集技术较为成熟,浙江省内浙江大学、浙江工业大学等高校研究实力雄厚,可作为 2030 年前 CO₂ 捕集技术推广的方向,特别是化学吸收技术,有望在 2025—2030 年间在化石燃料发电、水泥、钢铁等行业广泛推广。富氧燃烧和化学链技术在浙江省内尚无中试级别项目开展,发展前景尚不明朗,有待低能耗低成本制氧、富氧燃烧器稳定放大、高性能低成本载氧体和载碳体宏量制备技术等领域进一步突破。

在 CO₂ 输送技术方面,浙江省内已具备良好的产业化条件。2030 年前浙江省 CO₂ 输运方式将以公路运输为主,船舶和管道运输为辅;随着 CCUS 集群化发展,到 2060 年管道运输有望成为主流,公路和船舶运输作为其灵活性补充。

在 CO₂ 利用与封存技术方面,生物利用和矿化利用的成熟度较高。预计 2030 年浙江省微藻固碳养藻产业基地逐渐增多,生物固碳规模达到国内先进水平。2030 年矿化利用在钢铁、建材行业可形成大规模应用案例,钢渣矿化利用、CO₂ 矿化养护混凝土将形成规模化产能,并在 2030—2060 年持续快速增长。CO₂ 化学利用体系最为复杂,产品附加值较高,预计 2030 年前会形成若干技术示范。随着 CO₂ 被纳入工业体系,形成全新的产业链,到 2060 年 CO₂ 化工转化技术将实现全面商业化。

浙江省内 CCUS 全流程技术示范的工艺路线复杂多样,CO₂ 捕集侧包括燃烧前和燃烧后捕集技术,CO₂ 利用与封存侧涵盖生物、矿化、化工利用及地质封存,各环节技术成熟度差异化较为明显。目前项目规模较小,初投资和运行成本普遍较高,空间分

布分散,不利于后期形成产业集群。因此需准确把握浙江省重点领域 CCUS 潜力和源汇条件,因地制宜部署 CCUS 集成项目,构建低成本、低能耗、安全可靠的技术体系和产业集群。近中期(2030年前)可以以电力、钢铁、水泥等典型行业重点项目示范为主,形成系列新成果及技术集成示范,建立完善符合浙江实际的 CCUS 激励政策与法规标准体系。远期(2060年)可重点研究在某些区域形成 CCUS 集群,加强产业链协同,打造技术、经济成熟的商业模式,推动技术大规模产业化发展。

参考文献:

- [1] IPCC. Summary for policymakers [M]//MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P, PÖRTNER H O, et al. Global Warming of 1.5 C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2018.
- [2] IEA. Energy technology perspectives 2020-special report on carbon capture utilisation and storage: CCUS in clean energy transitions [R]. Paris, France: IEA, 2020.
- [3] 张贤, 李阳, 马乔, 等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 70-80. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2021.06.004.
ZHANG X, LI Y, MA Q, et al. Development of carbon capture, utilization and storage technology in China [J]. *Strategic study of CAE*, 2021, 23(6): 70-80. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2021.06.004.
- [4] 张贤, 李凯, 马乔, 等. 碳中和目标下 CCUS 技术发展定位与展望 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(9): 29-33. DOI: 10.12062/cpre.20210827.
ZHANG X, LI K, MA Q, et al. Orientation and prospect of CCUS development under carbon neutrality target [J]. *China population, resources and environment*, 2021, 31(9): 29-33. DOI: 10.12062/cpre.20210827.
- [5] 刘飞, 关键, 祁志福, 等. 燃煤电厂碳捕集、利用与封存技术路线选择 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(7): 1-13. DOI: 10.13245/j.hust.220701.
LIU F, GUAN J, QI Z F, et al. Technology route selection for carbon capture utilization and storage in coal-fired power plants [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural science edition)*, 2022, 50(7): 1-13. DOI: 10.13245/j.hust.220701.
- [6] 浙江省人民政府办公厅. 浙江省人民政府办公厅关于印发浙江省能源发展“十四五”规划的通知 [EB/OL]. (2022-05-19) [2023-05-17]. https://www.zj.gov.cn/art/2022/5/19/art_1229655896_2407420.html.
- [7] ZHOU Y, ZHANG J L, WANG L, et al. Self-assembled iron-containing mordenite monolith for carbon dioxide sieving [J]. *Science*, 2021, 373(6552): 315-320. DOI: 10.1126/science.aax5776.
- [8] ZHAO X L, HU X, HU G S, et al. Enhancement of CO₂ adsorption and amine efficiency of titania modified by moderate loading of diethylenetriamine [J]. *Journal of materials chemistry A*, 2013, 1(20): 6208-6215. DOI: 10.1039/c3ta10651a.
- [9] HAN L, DENG G Y, LI Z, et al. Influences of syngas pretreatment on the performance and energy distribution in an IGCC power plant [J]. *Chemical engineering research and design*, 2018, 131: 117-126. DOI: 10.1016/j.cherd.2017.12.007.
- [10] WANG T, LIU F, GE K, et al. Reaction kinetics of carbon dioxide absorption in aqueous solutions of piperazine, N-(2-aminoethyl) ethanolamine and their blends [J]. *Chemical engineering journal*, 2017, 314: 123-131. DOI: 10.1016/j.cej.2016.12.129.
- [11] FANG M X, DONG W F, ZHANG Y, et al. Study on the chemical absorption main heat exchanger and process modification for 150 kt/y CCS demonstration project [J]. *International journal of greenhouse gas control*, 2021, 112: 103470. DOI: 10.1016/j.ijggc.2021.103470.
- [12] DONG W F, FANG M X, LIU Z J, et al. Study on chemical absorption absorber with polypropylene packing for Guohua Jinjie CCS demonstration project [J]. *International journal of greenhouse gas control*, 2022, 114: 103581. DOI: 10.1016/J.IJGGC.2022.103581.
- [13] LIU F, FANG M X, DONG W F, et al. Carbon dioxide absorption in aqueous alkanolamine blends for biphasic solvents screening and evaluation [J]. *Applied energy*, 2019, 233-234: 468-477. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.10.007.
- [14] ZHANG S H, SHEN Y, SHAO P J, et al. Kinetics, thermodynamics, and mechanism of a novel biphasic solvent for CO₂ capture from flue gas [J]. *Environmental science & technology*, 2018, 52(6): 3660-3668. DOI: 10.1021/acs.est.7b05936.
- [15] XU Y J, WANG T, YANG Q, et al. CO₂ absorption performance in advanced water-lean diamine solvents [J]. *Chemical engineering journal*, 2021, 425: 131410. DOI: 10.1016/J.CEJ.2021.131410.
- [16] LIU F, SHEN Y, LI W, et al. Novel amino-functionalized ionic liquid/organic solvent with low viscosity for CO₂ capture [J]. *Environmental science & technology*, 2020, 54(6): 3520-3529. DOI: 10.1021/acs.est.9b06717.
- [17] LUO X Y, GUO Y, WANG C M, et al. Significant improvements in CO₂ capture by pyridine-containing anion-functionalized ionic

- liquids through multiple-site cooperative interactions [J]. *Angewandte chemie international edition*, 2014, 53(27): 7053-7057. DOI: 10.1002/anie.201400957.
- [18] LIU Y M, SHI J J, CHEN J, et al. Dynamic performance of CO₂ adsorption with tetraethylenepentamine-loaded KIT-6 [J]. *Microporous and mesoporous materials*, 2010, 134(1-3): 16-21. DOI: 10.1016/j.micromeso.2010.05.002.
- [19] 李莹莹, 陈新杰, 林坚, 等. 一种用于碳捕集的纤维素基多孔材料的制备方法和应用: CN202211476492.2 [P]. 2023-03-28. LI Y Y, CHEN X J, LIN J, et al. Preparation method and application of cellulose based polyporous material for carbon capture :CN202211476492.2 [P]. 2023-03-28.
- [20] ZHAO D C, KONG C L, CHEN L, et al. A molecular-templating strategy to polyamine-incorporated porous organic polymers for unprecedented CO₂ capture and separation [J]. *Science China materials*, 2019, 62(3): 448-454. DOI: 10.1007/s40843-018-9333-6.
- [21] LIU N, CHENG J, HOU W, et al. Bottom-up synthesis of two-dimensional composite via CuBDC-nS growth on multilayered MoS₂ to boost CO₂ permeability and selectivity in Pebax-based mixed matrix membranes [J]. *Separation and purification technology*, 2022, 282: 120007. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.120007.
- [22] HAN L, WANG Q H, LUO Z Y, et al. H₂ rich gas production via pressurized fluidized bed gasification of sawdust with in situ CO₂ capture [J]. *Applied energy*, 2013, 109: 36-43. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.03.035.
- [23] 董昊, 王涛, 侯成龙, 等. 直接空气捕碳 CO₂ 吸附剂综述 [J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2022, 56(3): 462-475. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2022.03.005. DONG H, WANG T, HOU C L, et al. Review of CO₂ direct air capture adsorbents [J]. *Journal of Zhejiang University (engineering science)*, 2022, 56(3): 462-475. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2022.03.005.
- [24] CHENG J, ZHU Y X, ZHANG Z, et al. Modification and improvement of microalgae strains for strengthening CO₂ fixation from coal-fired flue gas in power plants [J]. *Bioresour technol*, 2019, 291: 121850. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121850.
- [25] HE Y X, CASSARINI C, LENS P N L. Enrichment of homoacetogens converting H₂/CO₂ into acids and ethanol and simultaneous methane production [J]. *Engineering in life sciences*, 2023, 23(2): e2200027. DOI: 10.1002/ELSC.202200027.
- [26] LIU J M, ZHANG H, ZENG A P, et al. Turn air-captured CO₂ with methanol into amino acid and pyruvate in an ATP/NAD(P)H-free chemoenzymatic system [J]. *Nature communications*, 2023, 14: 2772. DOI: 10.1038/s41467-023-38490-w.
- [27] WANG T, YI Z W, SONG J Y, et al. An industrial demonstration study on CO₂ mineralization curing for concrete [J]. *iScience*, 2022, 25(5): 104261. DOI: 10.1016/j.isci.2022.104261.
- [28] LI X T, WANG J H, WU H B, et al. Hetero-interfaces on Cu electrode for enhanced electrochemical conversion of CO₂ to multi-carbon products [J]. *Nano-micro letters*, 2022, 14(1): 1-13. DOI: 10.1007/s40820-022-00879-5.
- [29] LIANG C, CHEN Y, WU M, et al. Green synthesis of graphite from CO₂ without graphitization process of amorphous carbon [J]. *Nature communications*, 2021, 12: 119. DOI: 10.1038/s41467-020-20380-0.
- [30] WANG T, CHEN L, LI B X, et al. Engineering catalytic interfaces in Cu⁰/CeO₂-TiO₂ photocatalysts for synergistically boosting CO₂ reduction to ethylene [J]. *ACS nano*, 2022, 16(2): 2306-2318. DOI: 10.1021/acsnano.1c08505.
- [31] YANG G W, XU C K, WU G P, et al. Pinwheel-shaped tetranuclear organoboron catalysts for perfectly alternating copolymerization of CO₂ and epichlorohydrin [J]. *Journal of the American chemical society*, 2021, 143(9): 3455-3465. DOI: 10.1021/jacs.0c12425.
- [32] 李春峰, 姚泽伟, 彭希, 等. 中国海域盆地 CO₂ 地质封存选址方案与构造力学分析 [J]. *力学学报*, 2023, 55(3): 719-731. DOI: 10.6052/0459-1879-22-384. LI C F, YAO Z W, PENG X, et al. Strategic and geodynamic analyses of geo-sequestration of CO₂ in China offshore sedimentary basins [J]. *Chinese journal of theoretical and applied mechanics*, 2023, 55(3): 719-731. DOI: 10.6052/0459-1879-22-384.
- [33] 金旻钧, 陈乃安, 潘志彦, 等. 地质封存条件下 CO₂ 在模拟盐层溶液中的溶解度研究 [J]. *油气藏评价与开发*, 2019, 9(3): 77-81, 88. DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2019.03.015. JIN Y J, CHEN N A, PAN Z Y, et al. Study on the solubility of CO₂ in simulated saline solution under geological storage condition [J]. *Petroleum reservoir evaluation and development*, 2019, 9(3): 77-81, 88. DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2019.03.015.

作者简介:



侯成龙

吕洪坤

1981-, 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事能源互联网、综合能源服务、电力节能减排相关工作 (e-mail) hongkunlv@126.com。

侯成龙(第一作者, 通信作者)

1993-, 男, 博士后研究员, 博士, 主要从事综合能源、电力系统双碳技术相关工作 (e-mail) clhouzju@163.com。

(编辑 赵琪)