

DOI: 10.19666/j.rlfed.202504034

直接空气碳捕集耦合二氧化碳光、热、电 转化技术研究进展

柳 待¹, 王宇旻¹, 吴嘉僖¹, 吴宛霖¹, 王 腾¹, 熊 卓¹,
刘 婧², 赵永椿¹, 张军营¹

(1. 华中科技大学煤燃烧与低碳利用全国重点实验室, 湖北 武汉 430074;
2. 华东电力试验研究院有限公司, 上海 200437)

[摘 要] 直接空气碳捕集 (direct air capture, DAC) 技术作为典型的负碳排放技术, 是实现碳中和目标的关键技术之一, 但是其依然面临高成本、高能耗问题。DAC 技术与碳利用技术的深度耦合, 将捕集的 CO₂ 转化为高附加值产品, 可提升碳减排效率并降低全过程成本, 在碳中和路径中具有重要价值。介绍了 DAC 技术的分类和原理, 综述了 DAC 技术与 CO₂ 光、电、热转化技术耦合的研究进展和主要挑战, 最后展望了 DAC 技术与碳利用技术深度耦合的应用前景和发展方向。

[关 键 词] 直接空气碳捕集; CO₂ 光、电、热转化; 深度耦合; 研究进展

[引用本文格式] 柳待, 王宇旻, 吴嘉僖, 等. 直接空气碳捕集耦合二氧化碳光、热、电转化技术研究进展[J]. 热力发电, 2025, 54(6): 17-27. LIU Dai, WANG Yuyang, WU Jiayi, et al. Research progress on the technology of direct air carbon capture coupled with carbon dioxide photo-thermo-electric conversion[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(6): 17-27.

Research progress on the technology of direct air carbon capture coupled with carbon dioxide photo-thermo-electric conversion

LIU Dai¹, WANG Yuyang¹, WU Jiayi¹, WU Wanlin¹, WANG Teng¹, XIONG Zhuo¹,
LIU Jing², ZHAO Yongchun¹, ZHANG Junying¹

(1.State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2.China Energy Engineering Group East China Electric Power Test Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200437, China)

Abstract: Direct air capture (DAC) technology, a representative negative carbon emission solution, stands as a pivotal technology for achieving carbon neutrality. However, it still confronts challenges of high costs and energy consumption. The synergistic integration of DAC with carbon utilization technologies, namely transforming captured CO₂ into high-value products, can enhance carbon reduction efficiency while lowering lifecycle costs, rendering it a critical component in the carbon neutrality roadmap. This paper systematically reviews the classification and underlying principles of DAC, summarizes recent advancements and challenges in its integration with photovoltaic, electrochemical, and thermal CO₂ conversion technologies, and concludes with an outlook on the future development and applications of deep coupled DAC and carbon utilization.

Key words: direct air carbon capture; photo/electric/thermo conversion of carbon dioxide; deep coupling; research advances

直接空气捕集 (direct air capture, DAC) 技术 作为一种新兴的 CO₂ 捕集手段, 能够从大气中直接

收稿日期: 2025-04-02 网络首发日期: 2025-05-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFF0601000); 武汉市科技计划项目 (2023020302020572)

Supported by: National Key Research and Development Program (2021YFF0601000); Science and Technology Program of Wuhan (2023020302020572)

第一作者简介: 柳待 (2004), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为直接空气碳捕集, 2842281493@qq.com。

通信作者简介: 熊卓 (1989), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为碳捕集与转化利用, zxiong@hust.edu.cn。

捕获 CO_2 (图 1) [1], 为缓解气候变化[2-4]提供了新的可能性。与传统碳捕集技术不同, DAC 技术不依赖特定的工业排放源, 具有更强的灵活性和普适性, 其核心在于提供了一种可规模化的负排放 (carbon dioxide removal, CDR) 解决方案, 弥补了传统减排手段的局限性。DAC 不仅能够抵消难以脱碳行业 (如航空、农业) 的剩余排放, 还能逆转工业革命以来的历史碳排放, 对实现联合国政府间气候变化专门委员会 (intergovernmental panel on climate change, IPCC) 提出的 1 000 亿~10 000 亿吨 CO_2 清除目标至关重要[4]。相较于固定源的碳捕集、利用与封存 (carbon capture, utilization and storage, CCUS), DAC 不受地理限制, 可依托可再生能源高效运行, 并将捕集的 CO_2 转化为合成燃料、建筑材料或化工原料, 推动碳循环经济发展。

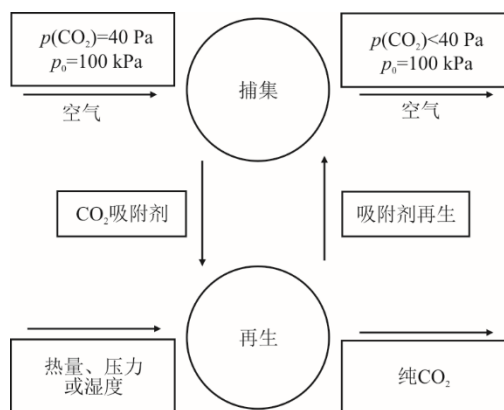


图 1 DAC 工作流程
Fig.1 Workflow of DAC

目前, DAC 系统的建设和运营成本仍然较高, 据估算, CO_2 捕集成本可能高达 200~600 美元/吨, 远高于传统碳捕集技术[5-7], 这主要归因于其所需的先进材料、复杂的工艺流程以及大量的能源需求。DAC 过程的高能源需求不仅增加了运行成本, 还可能带来额外的碳排放, 从而影响其净减排效益。同时, DAC 技术不能生产任何具有经济价值的产品, 限制了其只能在具有廉价能源的局部环境中使用。

若将 DAC 技术与 CO_2 利用技术耦合, 不仅能减少 CO_2 排放, 还能将 CO_2 转化为有价值的产品, 实现资源的循环利用。这种耦合技术在化工、能源、材料等多个领域展现了巨大潜力, 相较于固定源 CCUS 具有显著优势, 主要体现在其处理分散排放、实现负排放以及地理灵活性方面的独特能力。固定源 CCUS 仅适用于高浓度点源排放 (如电厂、水泥厂), 而 DAC 可直接从大气中捕集 CO_2 (浓度约

0.04%), 覆盖交通、农业等分散排放源, 可清除历史累积碳排放, 助力实现《巴黎协定》的 1.5 °C 温控目标[8-9]。此外, DAC 可灵活部署于可再生能源富集地区, 利用绿电驱动碳捕集, 同时与 CO_2 利用技术 (如合成燃料、矿化建材) 结合, 形成可持续的碳循环经济。据国际能源署 (international energy agency, IEA) 预测, 到 2050 年, DAC 技术将在全球碳减排中发挥重要作用, 有望实现数亿吨的 CO_2 减排量[7]。

CO_2 催化还原技术主要有热催化还原、光催化还原、电催化还原及生物催化还原等。热催化还原通过高温 (200~1 000 °C) 及金属/氧化物催化剂 (如 Ni、 CeO_2) 驱动 CO_2 与还原剂 (如 H_2) 反应生成甲烷、合成气等高能燃料, 其核心在于热力学活化与催化位点协同作用[10-11]; 光催化还原利用半导体材料 (如 TiO_2 、MOFs) 的光生载流子 (电子-空穴对) 驱动 CO_2 还原为碳氢化合物 (如 CH_3OH 、 C_2H_2), 依赖光吸收效率与电荷分离性能优化[12-13]; 电催化还原基于电解池中外加电场调控电极界面反应路径 (如 Cu 阴极选择性生成 C_2^+ 产物), 通过调节电位与电解质环境实现 CO_2 定向转化为 CO、甲酸或乙烯等化学品[14]; 生物催化还原则借助微生物代谢 (如产甲烷菌) 或酶催化体系 (如甲酸脱氢酶), 在常温常压下将 CO_2 转化为生物燃料 (如 CH_4 、乙酸), 其本质是生物酶活性中心的电子传递与底物特异性结合[15]。4 类技术各具能质转化特征, 共同构成 CO_2 资源化利用的多维路径。

本文将深入探讨 DAC 技术与 CO_2 光催化还原、 CO_2 热催化还原、 CO_2 电催化还原 3 种利用技术的分别耦合, 通过对国内外相关研究现状的梳理总结, 详细分析其工作原理与优势、技术进展以及面临的挑战, 并展望其下一步发展的方向。

1 直接空气碳捕集技术

DAC 技术是一种直接从空气中捕获 CO_2 的技术[16-18], 通过特定的物理或化学方法, 将大气中含量相对较低 (约 0.4 g/L) 的 CO_2 进行富集、分离和捕获, 为后续存储或利用提供可能。根据捕集原理和使用材料的不同, DAC 技术主要分为液体 DAC (L-DAC) 和固体 DAC (S-DAC) 2 类。

1.1 液体 DAC 技术

液体 DAC 技术基于化学反应, 主要利用化学溶液对 CO_2 进行吸收。常见的吸收溶液包括碱性氢氧化物溶液、胺溶液、氨基酸盐溶液等[19-21]。例如,

碱性氢氧化物溶液（如氢氧化钠 NaOH 溶液或氢氧化钾 KOH 溶液）与大气中的 CO₂ 反应，生成易溶于水的碳酸盐，从而实现 CO₂ 的吸收（图 2）^[22]。胺溶液则利用烷醇胺对 CO₂ 的高亲和力，在常温下从空气中吸收 CO₂，随后通过加热汽提等方式使胺溶液再生，释放 CO₂^[23-25]。

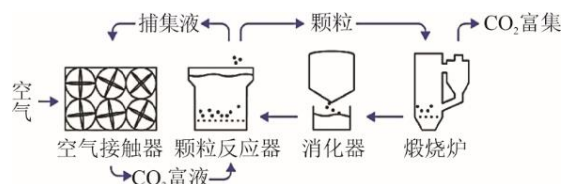


图 2 氢氧化物液体 DAC 流程
Fig.2 Liquid hydroxide DAC process

以胺溶液吸收为例，在吸收阶段，胺溶液中的胺分子与空气中的 CO₂ 发生反应，形成氨基甲酸盐或碳酸氢盐，如式(1)所示。



式中：R 代表有机基团。在上述反应中，胺分子（R₂NH）与 CO₂、H₂O 反应生成了胺盐（R₂NH₂⁺）和碳酸氢根离子（HCO₃⁻）。由于胺对 CO₂ 具有较高的亲和力，使得这一反应能够在相对温和的条件下进行，从而有效地将 CO₂ 从空气中吸收到溶液中^[26-28]。

当胺溶液吸收了一定量的 CO₂ 后，需要进行解吸再生，以便循环使用。解吸过程通常通过加热胺溶液实现。在加热的条件下，氨基甲酸盐或碳酸氢盐发生分解反应，释放出 CO₂，胺溶液得以再生。反应方程式见式(2)。



通过控制加热温度和压力等条件，可以使解吸过程高效进行，实现 CO₂ 的富集和胺溶液的循环利用^[29-31]。

1.2 固体 DAC 技术

除基于液体溶剂的化学吸收法外，固体吸附剂凭借物理/化学吸附特性成为 DAC 技术的另一分支，见图 3^[22]。两类技术的核心差异源于捕集介质的相态特性，即液体依赖动态化学反应，固体依赖材料表面吸附位点。

常见的固体吸附剂有固体碱（土）金属、金属有机框架（MOFs）材料、负载胺基吸附剂等^[32-34]。以固体碱（土）金属中的氧化钙（CaO）为例，其在常温常压下与 CO₂ 发生碳酸化反应生成碳酸钙（CaCO₃），从而实现 CO₂ 的吸附；在高温（通常 900 °C 以上）条件下，碳酸钙又可分解为氧化钙和 CO₂，

使吸附剂再生，释放出的 CO₂ 可被收集利用^[35-37]。MOFs 材料具有高比表面积和可调控的孔道结构，通过在其上负载胺基或调整孔径及活性点位分布，可获得对 CO₂ 具有较强吸附能力的材料，从而应用于 CO₂ 的捕集^[38-40]。Belmabkhout 等人于 2010 年报道将聚乙烯亚胺（polyethyleneimine, PEI）有机胺负载于硅基多孔载体用于 DAC，材料吸附容量达 0.98 mmol/g 且在 150 °C 惰性气吹扫下实现完全再生^[41]。与烟气 CO₂ 捕集的醇胺溶液类似，固体胺基与 CO₂ 反应的化学机理为在无水条件下，伯胺（RNH₂）与仲胺（R₁R₂NH）以化学计量数 2:1 与 CO₂ 反应，叔胺（R₁R₂R₃N）无 CO₂ 反应活性；在有水条件下，伯胺、仲胺与叔胺均可以以化学计量数 1:1 与 CO₂ 反应^[42]。

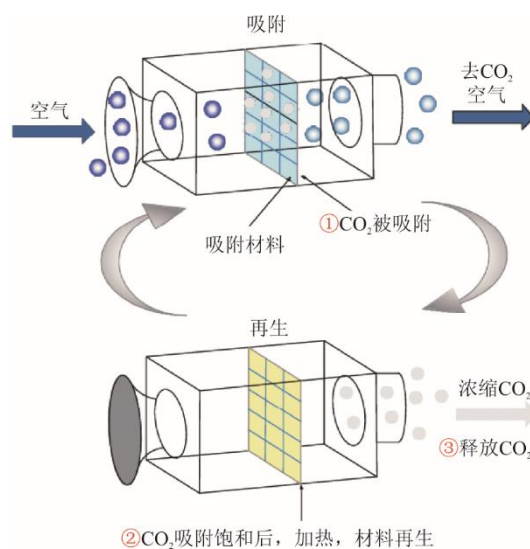


图 3 固体 DAC 工艺流程
Fig.3 Solid DAC process flow

以 MOFs 材料为例，其具有高度有序的多孔结构和丰富的活性位点。在吸附阶段，空气中的 CO₂ 分子通过扩散作用进入 MOFs 材料的孔道内，并与孔道表面的活性位点发生相互作用，从而被吸附在材料的表面层^[43-45]。这种相互作用可以是物理吸附，即通过范德华力等较弱的作用力将 CO₂ 分子吸附在材料的表面层；也可以是化学吸附，即 CO₂ 分子与活性位点发生化学反应，形成化学键合^[46-48]。

当 MOFs 材料吸附饱和后，需要进行脱附再生，可通过改变温度、压力等条件实现。例如：采用变温脱附时，通过升高温度使 CO₂ 分子的热运动加剧，从而克服与活性位点之间的相互作用力，从材料表面层脱附；采用变压脱附时，则是通过降低体系压力使 CO₂ 分压降低，促使其从吸附相转移到气相，

实现脱附^[49-51]。实际应用中也可结合多种脱附方式以提高脱附效率和 CO₂ 的回收率。

1.3 技术对比

从吸收/吸附效率方面看,液体 DAC 技术在某些情况下具有较高的吸收速率。例如,胺溶液对 CO₂ 的吸收速率较高,能够在较短时间内捕获大量 CO₂。

但随着吸收过程的进行,溶液中 CO₂ 浓度逐渐增加,吸收效率逐渐降低^[52-54]。固体 DAC 技术中的一些吸附剂,如 MOFs 材料,虽然吸附速率可能较慢,但具有较高的吸附容量,能够在达到吸附平衡时吸附较多的 CO₂,而且固体吸附剂的吸附选择性较好,能够更有效地从空气中分离出 CO₂^[55-57],见表 1^[22]。

表 1 DAC 技术对比
Tab.1 Comparison of DAC technologies

分类	原理	优点	缺点
液体 DAC 技术	CO ₂ 与碱性氢氧化物反应生成碳酸盐	技术成熟、吸收速率高	设备和运营成本较高,能耗和维护难度大
固体 DAC 技术	低温下固体吸附剂捕获 CO ₂	吸附效率较高、再生稳定性较好、技术成熟、吸附速率高、再生温度低	成本较高,长期稳定性差,吸附剂的回收和再生过程复杂

在设备复杂度与成本方面,液体 DAC 技术通常需要配备复杂的溶液循环系统、加热解吸装置以及防腐设备。例如,胺溶液吸收系统中,由于胺溶液具有一定的腐蚀性,需要使用耐腐蚀材料来制造设备,增加了设备成本和维护难度。同时,加热解吸过程需要消耗大量能量,进一步提高了运行成本^[58-60]。固体 DAC 技术的设备相对简单,一般只需要吸附塔和脱附装置等,而且固体吸附剂的使用寿命在特定工况下较长,减少了更换吸附剂的频率和成本^[61-63]。但固体 DAC 技术在吸附剂的制备和再生过程中也可能需要较高的能量投入^[64-66]。

稳定性与寿命也是评估 2 种技术的重要指标。液体 DAC 技术中的溶液容易受到杂质、温度、酸碱度等因素的影响,导致吸收性能下降。例如,胺溶液在长期使用过程中可能会发生氧化、降解等反应,影响其对 CO₂ 的吸收能力,从而降低系统的稳定性和使用寿命^[67-69]。固体 DAC 技术中,吸附剂的稳定性较好,例如一些固体碱(土)金属吸附剂具有较好的化学稳定性,能够在多次吸附-脱附循环中保持较高的吸附性能,但部分吸附剂,如 MOFs 材料,在潮湿环境下可能会发生结构变化,影响其吸附性能和稳定性^[70-72]。

2 DAC 耦合 CO₂ 光电热转化技术

DAC 技术可与包括 CO₂ 光催化还原、CO₂ 热催化还原、CO₂ 电催化还原在内的多种 CO₂ 利用技术进行耦合。CO₂ 光催化还原技术借助催化剂(如 TiO₂、CdS 等)利用光能将 CO₂ 还原为碳氢类化合物。光催化剂吸收光能后,电子会从价带跃迁至导带,进而形成电子-空穴对。在整个光催化反应机制里,电子承担着还原 CO₂ 的关键职责,空穴则发

挥着氧化催化剂或者水分子的重要作用^[73]。不过,仅依靠光催化过程,CO₂ 还原效率可能存在一定局限。此时,CO₂ 热还原技术便能作为有效的补充手段引入。该技术通过在高温条件下为 CO₂ 分子赋予充足的活化能量,大幅提升 CO₂ 分子的反应活性,使其能够更顺利地还原剂发生反应,高效实现还原转化。于是,热还原技术提供的额外能量支持,与光催化过程中电子-空穴对驱动的反应相互协同、相辅相成,从不同方面共同发力,全方位推动 CO₂ 还原反应更高效、顺畅地进行。以金属催化剂为例,首先 CO₂ 吸附到催化剂表面,然后催化剂将额外的电子提供给 CO₂ 分子,使其发生还原反应,形成一氧化碳等中间产物,一氧化碳可进一步转化为其他有机化合物,如甲烷或甲醇^[73]。而对于 CO₂ 电化学还原技术,CO₂ 在电解池中的电极表面发生氧化还原反应。一般在阴极,CO₂ 得到电子被还原,生成 CO、HCOOH、CH₃OH、CH₄、C₂H₄ 等还原产物;在阳极,通常水被氧化产生氧气。整个过程通过外部电源提供电能来驱动反应进行,将 CO₂ 从温室气体转化为具有经济价值的物质^[74-75]。

2.1 DAC 与 CO₂ 光催化还原技术耦合

DAC 技术与 CO₂ 光催化还原技术的耦合通过整合碳捕集与太阳能驱动的 CO₂ 催化转化,可构建“捕集-转化-利用”的负碳循环体系^[76-78]。其具体过程如下: DAC 从大气中捕集的 CO₂ (纯度 > 95%) 可直接作为光催化还原反应的碳源,避免了传统光催化中 CO₂ 浓度不足的瓶颈。光催化还原依赖太阳能驱动,与 DAC 的可再生能源供能(如光伏)形成低碳循环^[79-81]。Liu 等人成功制备的 MgAl(LDO)/TiO₂ 不仅能够接近真实烟气温度下 (~150 °C) 作

为高效吸附剂捕集 CO₂，而且在中等温度（300~500 °C）下可以作为光催化剂，将捕获的 CO₂ 以 10%~15% 的高转化效率转化为 CO^[82]。Ma 等人采用溶剂热法制备的 Pt/Ni-MOF 催化剂对大气中 CO₂ 的捕集和浓缩具有选择性，且通过红外光照射，可以利

用光热催化将捕获的 CO₂ 转化为 CO 和 CH₄^[83]。剑桥大学 Sayan Kar 团队设计了一种集成式气相直接空气碳捕集与利用流动反应器（图 4）^[79]，不仅能够从空气中捕集和浓缩 CO₂，而且可以使用模拟太阳光将 CO₂ 转化为可再生燃料^[79]。

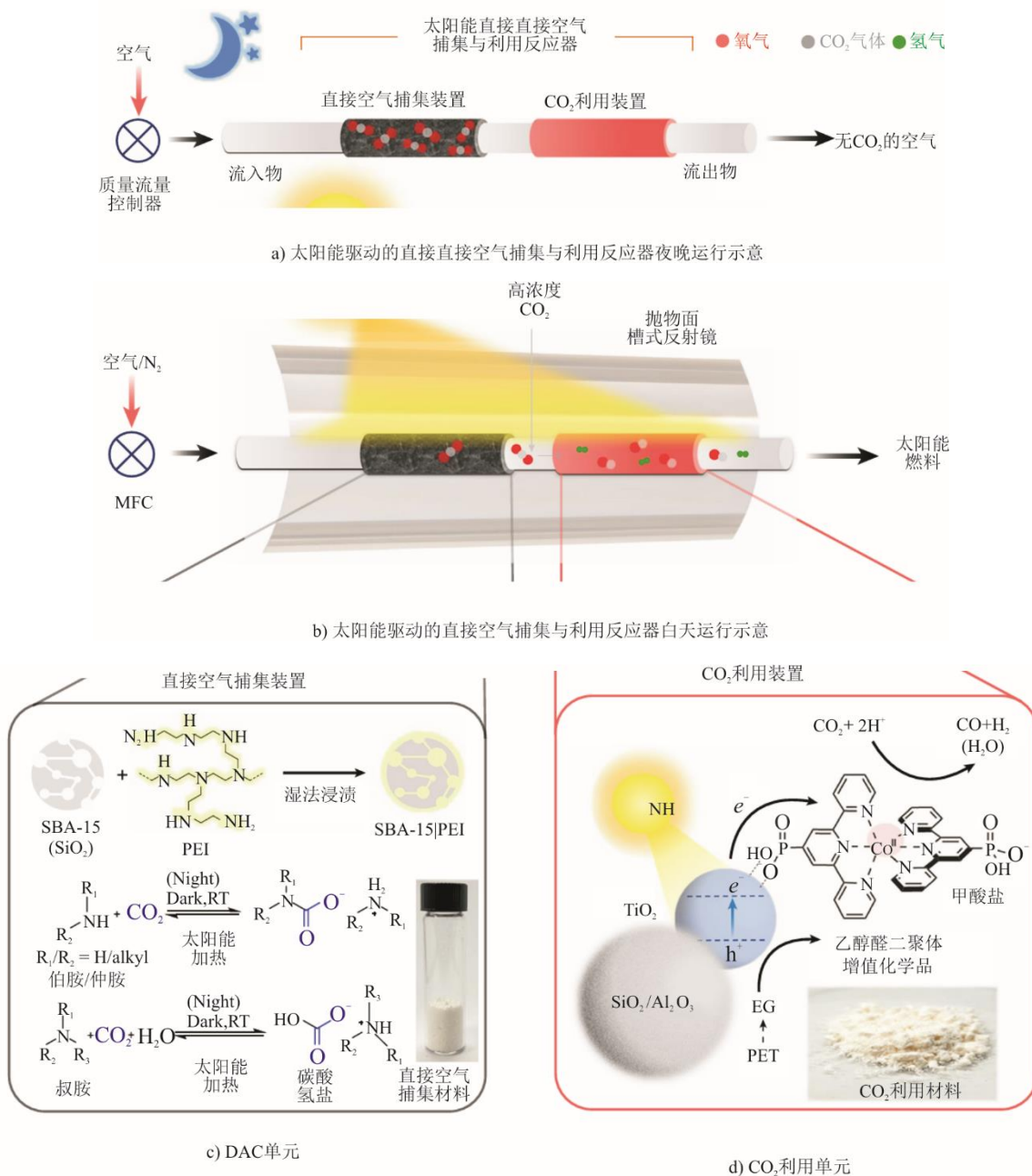


图 4 由 DAC 和 CO₂ 利用单元组成的双床层流化床反应器

Fig.4 The dual-bed fluidized bed reactor composed of a DAC unit and a carbon dioxide utilization unit

该团队组基于自主研发的氧化铝/二氧化硅-二氧化钛-钴双(三联吡啶)(Al₂O₃/SiO₂-TiO₂- CotpyP)复合体系，利用光驱动将 CO₂ 转化为燃料。此项目不仅展示了分子-半导体杂化材料对气相 CO₂ 的光催化还原性能，而且实现了 CO₂ 捕获与转换过程的

同步分离，为解决大气氧不足问题提供了新思路^[79]。北京化工大学樊佳轩等提出了一种用于耦合光催化 CO₂ 还原与 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF) 氧化的纳米催化剂，实现了 CO₂ 捕集与光催化的协同^[80]。田义欣等首次将 ZSM-5 吸附剂与 NiV₂Se₄ 光催化剂耦

合, 直接从空气中捕集 CO_2 并转化为乙烷 (C_2H_6), 产率达 $1.85 \mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ^[81]。中国科学院化学研究所韩布兴院士团队设计了 Z 型异质结光催化剂 (如 $\text{Cu}_2\text{O-Pt/SiC/IrO}_x$), 通过空间分离 CO_2 还原与水氧化位点, 提升光生电荷利用效率, 为 DAC 与光催化还原耦合提供了催化剂设计理论基础^[84]。Tian 等人设计的 Ni_x/NaA 双功能材料将 CO_2 从空气中直接捕集后, 利用太阳能驱动转化为清洁燃料, 例如 CH_4 , 该耦合反应可利用单个反应器进行, 在方便操作的同时优化了经济效益^[85]。

2.2 DAC 与 CO_2 热化学还原技术耦合

DAC 与 CO_2 热化学还原技术的耦合通过高温驱动将从空气中捕集的 CO_2 转化为高附加值燃料或化学品 (如合成气、甲烷、甲醇)。Veslovskaya 等人以 $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 为吸附剂、 $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 为催化剂, 将其分段填充于反应器, 应用 DAC 技术捕集 CO_2 , 并在 $300\sim 350^\circ\text{C}$ 条件下对捕集的 CO_2 进行还原, 得到产物甲烷^[86]。Jeong-Potter 等人在 DAC 装置中利用负载型双功能材料捕集空气中的 CO_2 并在 300°C 的加氢反应下还原 CO_2 得到产物甲烷^[87]。华中师范大学郭李娜等与中国科学院研究团队聚焦于中温 ($300\sim 500^\circ\text{C}$) 热催化体系, 开发了 $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂与胺基吸附剂的协同系统, 通过余热驱动 DAC 脱附, 降低整体能耗^[10]。中温条件下, 哥伦比亚大学 Chae Jeong-Potter 团队开发了 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 双功能材料, 在 550°C 下通过化学链循环实现 CO_2 捕集与甲烷化, 单次循环 CO_2 转化率达 65%。在高温 ($500\sim 1500^\circ\text{C}$) 下, 利用催化剂将 CO_2 与氢气 (H_2) 或水 (H_2O) 反应生成合成气 ($\text{CO}+\text{H}_2$)、甲烷 (CH_4) 或液体燃料 (如甲醇)。该过程能够实现 CO_2 高效转化, 单程转化率可达 80% 以上 (光还原通常 $<20\%$)^[11]。中国科学院大连化学物理研究所何佳慧等开发了

基于钙钛矿型氧化物的高温吸附-催化双功能材料 (如 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$), 在 $600\sim 800^\circ\text{C}$ 下实现 CO_2 吸附与甲烷化反应的耦合, CO_2 转化率可达 75%^[88]。Guo 等人开发的集成 CO_2 捕集与原位转化的装置在同一反应器内利用固体吸附剂吸附与非热等离子体催化相结合的方式实现了等离子体诱导的 CO_2 解吸和裂解转化^[89]。

2.3 DAC 技术与 CO_2 电化学还原技术耦合

DAC 与 CO_2 电化学还原技术的耦合通过电能驱动实现“捕集-转化-利用”的一体化闭环^[90]。DAC 技术从空气中捕集低浓度 CO_2 (约 0.4 g/L), 可以直接作为电化学还原反应的原料。再利用电化学还原技术, 在常温常压下, 利用可再生能源电力驱动催化剂 (如铜、银、锡基材料) 将 CO_2 转化为高附加值产物, 包括 C_1 产物 (CO 、甲酸 (HCOOH)、甲烷 (CH_4)) 和 C_2+ 产物 (乙烯 (C_2H_4)、乙醇 ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)、丙酸 ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$))。

该耦合方式可以实现能源协同, 绿电 (风电、光伏) 同时驱动 DAC 捕集与电化学还原, 实现全流程零碳^[90]且通过催化剂设计可精准控制产物类型 (如铜基催化剂倾向生成 C_2+ 产物)^[70]。同时, DAC 吸附单元与电解槽可直接串联, 减少中间储运成本。上海高等研究院提出“吸附-电解”一体化装置, 利用多孔碳负载 Cu 单原子催化剂, 直接以 DAC 捕集的 CO_2 为原料生成乙烯, 法拉第效率达 45%^[91]。Rabiee 等人通过综述关于膜基气体扩散电极在该过程中的应用, 总结了 CO_2 捕集和电催化耦合的应用前景^[14]。

加拿大多伦多大学的 David Sinton 院士团队聚焦于氨基酸盐溶液 (甘氨酸钾, K-GLY) 的 CO_2 反应性捕集, 见图 5^[92]。

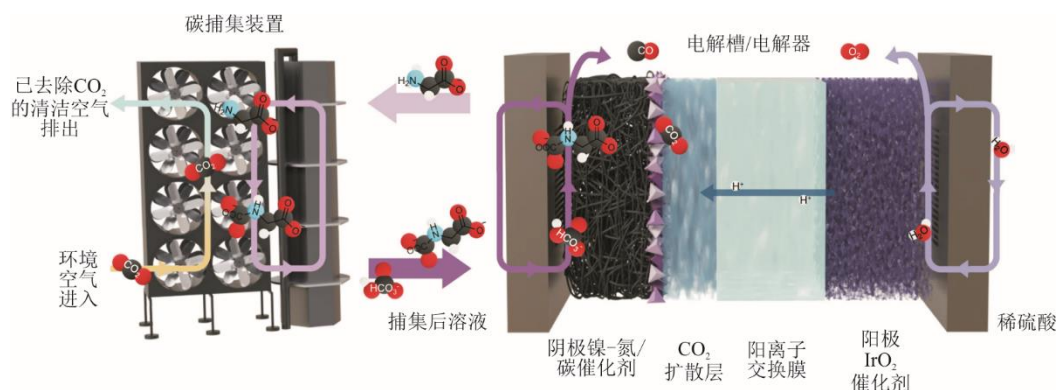


图 5 使用 K-GLY 作为捕获溶液的反应捕获系统示意

Fig.5 Schematic diagram of the reactive capture system using K-GLY as the capture solution

在捕获系统中, CO₂首先在碳捕获单元中与 K-GLY 溶液反应完成化学吸附,随后捕获 CO₂的溶液进入电解槽,阳极侧质子经 GEM 迁移,使化学吸附的 CO₂释放,释放后的 CO₂在极间扩散,并最后在阴极催化剂作用下被还原,还原后的产物使得甘氨酸两性离子再生捕获溶液。在众多氨基酸候选物中,由于甘氨酸钾在低 CO₂分压下具有快速 CO₂捕集能力和高 CO₂吸收容量,在 CO₂捕集方面展现出特别的潜力。同时将捕获后的电解液直接作为膜电极组件的输入,并通过原位生成的 CO₂进行电化学还原产生一氧化碳^[92]。

3 DAC 与 CO₂ 还原技术耦合的优势与挑战

DAC 技术与 CO₂ 还原技术的耦合具有诸多显著优势。将 DAC 和 CO₂ 光催化还原、CO₂ 热催化还原、CO₂ 电催化还原技术耦合之后,可以使整个工艺环节通过可再生能源驱动,从而实现负碳排放。例如,利用太阳能驱动 CO₂ 光催化还原、CO₂ 热催化还原、CO₂ 电催化还原,同时通过 DAC 精确控制能源转换过程,可以提高能源利用效率,减少对传统化石能源的消耗,从而降低温室气体排放。DAC 和 CO₂ 光催化还原、CO₂ 热催化还原、CO₂ 电催化还原技术耦合可以绕过碳捕集的再生环节,避免了 CO₂ 吸附剂再生环节的能耗浪费,从而提高整个工艺过程的经济性。在传统的碳捕集技术中,热再生环节需要消耗大量能源,增加了工艺成本,而通过耦合 DAC 和 CO₂ 光催化还原、CO₂ 热催化还原、CO₂ 电催化还原技术,可以实现更高效的能源转换和利用,降低工艺成本。

兼容性也是耦合技术的一大优势。DAC 技术可以与 CO₂ 光电热耦合技术进行有效结合,实现协同发展。如前文所述,DAC 技术既可以与传统的化工生产过程相结合,为化工产品生产提供 CO₂ 原料;又能与新兴的储能、生物转化、电化学还原等技术耦合,拓展 CO₂ 的利用途径。这种兼容性使得 CO₂ 能够在不同领域得到充分利用,提高了资源的综合利用效率。而且,不同的 CO₂ 利用技术在工艺和条件上具有一定的互补性,通过与 DAC 技术的耦合,可以实现资源的优化配置和能源的高效利用^[93]。

尽管 DAC 技术与 CO₂ 利用技术的耦合前景广阔,但目前仍面临诸多挑战,尤其是高成本挑战。DAC 技术本身的设备投资、运行能耗以及维护成本

均较高,CO₂ 光催化还原、CO₂ 热催化还原和 CO₂ 电催化还原技术目前也存在设备投资大,能耗高,运行成本大的问题。将 2 种技术耦合之后,虽然在部分情景下可降低能耗,但整体能耗仍较高,成本较大。

DAC 技术与 CO₂ 光电热转化技术发展不成熟也是制约耦合技术发展的重要因素。DAC 和 CO₂ 光催化还原、CO₂ 热催化还原、CO₂ 电催化还原利用技术仍处于实验室或示范阶段,尚未实现大规模工业化应用。

技术耦合集成仍面临挑战。DAC 和 CO₂ 光催化还原、CO₂ 电催化还原、CO₂ 热催化还原技术各自已经过一段时间的独立发展,形成了各具特点的材料、工艺和装备。耦合集成时需解决兼容性问题,确保各环节高效协同,这增加了系统设计和运行的难度。

4 总结与展望

本文综述了 DAC 技术耦合 CO₂ 光电热转化技术的主要研究进展,分析了该耦合技术的优势和面临的诸多挑战。成本高、技术不成熟以及耦合集成度低、协同性差等问题限制了其大规模推广应用。以下方面将是未来努力的方向。

1) 研发高效、低成本的 CO₂ 吸附/吸收剂、CO₂ 转化催化剂和器件,提高碳捕集效率和转化效率。聚焦高附加值 CO₂ 转化产物,提高系统经济性。

2) 设计优化 DAC 和 CO₂ 光催化还原、CO₂ 电催化还原、CO₂ 热催化还原的技术工艺过程,提高二者兼容度和耦合集成度,优化系统能量利用效率。

3) 聚焦太阳能、风能等可再生能源驱动的 DAC 分别和 CO₂ 光催化还原、CO₂ 电催化还原、CO₂ 热催化还原耦合的过程,开发可再生能源驱动的 DAC 耦合 CO₂ 光电热转化系统,降低过程碳足迹。

未来,随着技术的不断进步和成本降低,DAC 技术与 CO₂ 利用技术的耦合有望在多个领域得到广泛应用,助力碳中和目标的实现。

[参考文献]

- [1] SUTHERLAND B R. Pricing CO₂ direct air capture[J]. *Joule*, 2019, 3(7): 1571-1573.
- [2] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis: contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021: 1.
- [3] IPCC. Climate change 2022: impacts, adaptation, and

- vulnerability. contribution of working group ii to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022: 1.
- [4] IPCC. Climate change 2023: mitigation of climate change: contribution of Working Group III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023: 1.
- [5] LACKNER K S. A guide to carbon dioxide sequestration[J]. *Science*, 2003, 300(5626): 1677-1682.
- [6] KEITH D W. Why capture CO₂ from the atmosphere?[J]. *Science*, 2009, 325: 1654-1655.
- [7] SOCOLOW R M. Can we bury global warming?[J]. *Scientific American*, 2005, 292(1): 49-55.
- [8] TIAN, YI Y. Coupling direct atmospheric CO₂ capture with photocatalytic CO₂ reduction for highly efficient C₂H₆ production[J]. *Nano Letters*, 2023, 23: 10914-10921.
- [9] REALMONTE G, DROUET L, GAMBHIR A, et al. An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 3277.
- [10] 郭李娜, 李睿哲, 孙闯, 等. 层状双金属氢氧化物的层间阴离子对衍生的 Ni-Al₂O₃ 催化剂光热催化 CO₂ 甲烷化反应的影响[J]. *物理化学学报*, 2025, 41(1): 74-84.
- GUO Lina, LI Ruizhe, SUN Chuang, et al. Influence of interlayer anions in layered double hydroxides on the photothermal catalytic CO₂ methanation reaction over the derived Ni-Al₂O₃ catalyst[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2025, 41(1): 74-84.
- [11] JEONG-POTTER C, ABDALLAH M, KOTA S, et al. Enhancing the CO₂ adsorption capacity of γ -Al₂O₃ supported alkali and alkaline - earth metals: impacts of dual function material (DFM) preparation methods[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2022, 61: 10474-10482.
- [12] LIU L, ZHAO C, XU J, et al. Integrated CO₂ capture and photocatalytic conversion by a hybrid adsorbent/photocatalyst material[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 179: 489-499.
- [13] ZHAO Z Y, DORONKIN D E, YE Y H, et al. Enhancement of photothermal CO₂ hydrogenation over Pt/Al₂O₃ by light irradiation[J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2020, 41(2): 1288.
- [14] RABIEE H, YAN P, WANG H, et al. Electrochemical CO₂ reduction integrated with membrane/adsorption-based CO₂ capture in gas-diffusion electrodes and electro-lytes[J]. *EcoEnergy*, 2024, 2(1): 3-21.
- [15] ALISSANDRATOS A, EASTON C J. Biocatalysis for the application of CO₂ as a chemical feedstock[J]. *The Beilstein Journal of Organic Chemistry*, 2015, 11: 2370-2387.
- [16] FRIEDLINGSTEIN P, ANDREW R M, ROGELJ J, et al. Persistent growth of CO₂ emissions and implications for reaching climate goals[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(1): 30-36.
- [17] IPCC. Special report on global warming of 1.5°C[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018: 1.
- [18] BENSON M, COLE R. CO₂ sequestration in deep sedimentary formations[J]. *Energy & Environmental Science*, 2008, 1(1): 25-36.
- [19] HERZOG H J, DRAKE E M, ADAMS E E. An overview of CO₂ capture technologies[J]. *Energy*, 2004, 29(9/10): 1483-1513.
- [20] XU Q. Selective and efficient capture of CO₂ from air by a nanoporous metal-organic framework[J]. *Science*, 2012, 335(6068): 1606-1610.
- [21] LUEBKE D R. Highly efficient, reversible CO₂ capture materials based on amino-functionalized mesoporous silica[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 130(10): 3086-3077.
- [22] 张柠涛, 王茹洁, 汪黎东. 碳中和背景下直接空气捕碳(DAC)的技术发展和经济性评估[J]. *南方能源建设*, 2024, 11(5): 15-25.
- ZHANG Ningtao, WANG Rujie, WANG Lidong. Technical development and economic evaluation of direct air capture (DAC) under the carbon neutrality back-ground[J]. *Southern Energy Construction*, 2024, 11(5): 15-25.
- [23] LI X. Design of solid adsorbents for efficient CO₂ capture[J]. *Chemical Reviews Journal*, 2018, 118(14): 6522-6581.
- [24] ZHANG Y. High-capacity CO₂ capture by a nanoporous metal-organic framework with open metal sites[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2010, 49(40): 7132-7136.
- [25] SUMIDA K. CO₂ capture in metal-organic frameworks[J]. *Chemical Reviews Journal*, 2012, 112(2): 724-781.
- [26] 陈健. 有机胺吸收二氧化碳的热力学和动力学研究进展[J]. *化工学报*, 2014(1): 12-21.
- CHEN Jian. Research progress in thermodynamics and kinetics of carbon dioxide absorption by organic amines[J]. *CIESC Journal*, 2014(1): 12-21.
- [27] 吕碧洪. 有机胺溶液吸收 CO₂ 的研究现状及进展[J]. *石油化工*, 2011(8): 803-809.
- LYU Bihong. Research status and progress of CO₂ absorption by organic amine solution[J]. *Petrochemical Technology*, 2011(8): 803-809.
- [28] 赵毅. 有机胺法吸收二氧化碳的研究进展[J]. *再生资源与循环经济*, 2020(7): 26-29.
- ZHAO Yi. Research progress in absorption of carbon dioxide by organic amine method[J]. *Renewable Resources and Circular Economy*, 2020(7): 26-29.
- [29] 高红霞. N,N-二乙基乙醇胺(DEEA)溶液 CO₂ 吸收解吸性能的实验研究[J]. *化工学报*, 2015(9): 3739-3745.
- GAO Hongxia. Experimental study on CO₂ absorption and desorption performance of N,N-diethyl ethanolamine (DEEA) solution[J]. *CIESC Journal*, 2015(9): 3739-3745.
- [30] SUN Q, GAO H X, SEMA T, et al. Enhanced CO₂ desorption rate for rich amine solution regeneration over hierarchical HZSM-5 catalyst[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 469: 143871.
- [31] 赵伟, 施耀, 魏建文, 等. 甘氨酸钠溶液吸收 CO₂ 及再生实验研究[J]. *高校化学工程学报*, 2008, 22(4): 690-696.
- ZHAO Wei, SHI Yao, WEI Jianwen, et al. Experimental study on CO₂ absorption and regeneration of sodium glycinate solution[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2008, 22(4): 690-696.
- [32] 张彦星. 金属有机框架化合物的合成[J]. *广东化工*, 2020, 47(3): 87-88.
- ZHANG Yanxing. Synthesis of metal-organic frameworks[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2020, 47(3): 87-88.

- [33] 周宏仓, 肖旭, 何都良, 等. DBU-GAC 型 CO₂ 吸附剂性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(35): 78-83.
ZHOU Hongcang, XIAO Xu, HE Duliang, et al. Performance research on CO₂ adsorbent of DBU-GAC[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(35): 78-83.
- [34] 代钢, 李金昊, 杭咏平, 等. 多孔固体吸附剂的 CO₂ 吸附性能研究[J]. 应用化工, 2020, 49(11): 2683-2687.
DAI Gang, LI Jinhao, HANG Yongping, et al. Study on CO₂ adsorption performance of porous solid adsorbents[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(11): 2683-2687.
- [35] 范莎莎, 沈辉, 赵玉军, 等. 氧化钙吸附剂的制备及 CO₂ 吸附性能[J]. 化学工业与工程, 2016, 33(4): 343-348.
FAN Shasha, SHEN Hui, ZHAO Yujun, et al. Preparation of calcium oxide adsorbent and its CO₂ adsorption performance[J]. Chemical Industry and Engineering, 2016, 33(4): 343-348.
- [36] 王正义, 唐美, 张冰姿, 等. 碳酸钙还原低热耦合与 CO₂ 绿色原位转化[J]. 化学试剂, 2024, 46(6): 595-601.
WANG Zhengyi, TANG Mei, ZHANG Bingzi, et al. Low-temperature coupling of calcium carbonate reduction and green in-situ CO₂ conversion[J]. Chemical Reagents, 2024, 46(6): 595-601.
- [37] LIU Z X, LU Y L, WANG C F, et al. MOF-derived nano CaO for highly efficient CO₂ fast adsorption[J]. Fuel, 2023, 345: 127001.
- [38] 任颜卫, 李嘉伟, 江焕峰. 金属有机框架材料在 CO₂ 化学固定中的应用[J]. 化学进展, 2019, 31(10): 1559-1573.
REN Yanwei, LI Jiawei, JIANG Huanfeng. Application of metal-organic framework materials in CO₂ chemical fixation[J]. Progress in Chemistry, 2019, 31(10): 1559-1573.
- [39] 沈意, 许俊杰, 朱超, 等. 缺陷化金属有机骨架材料的合成及其污染控制应用[J]. 科学通报, 2021, 66(23): 3087-3097.
SHEN Yi, XU Junjie, ZHU Chao, et al. Synthesis of defective metal-organic frameworks and their applications in pollution control[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(23): 3087-3097.
- [40] 徐群娜, 仇瑞杰, 马建中. 聚合物基 MOFs 复合材料的制备及应用[J]. 材料导报, 2020, 34(15): 58-63.
XU Qunna, QIU Ruijie, MA Jianzhong. Synthesis and application of polymer-based MOFs composites[J]. Materials Review, 2020, 34(15): 58-63.
- [41] NUGENT P, BELMABKHOUT Y, BURD S, et al. Porous materials with optimal adsorption thermodynamics and kinetics for CO₂ separation[J]. Nature, 2013, 495: 80-84.
- [42] DIDAS S A, CHOI S, CHAIKITTISILP W, et al. Amine-oxide hybrid materials for CO₂ capture from ambient air[J]. Accounts of Chemical Research Journal, 2015, 48(10): 2680-2687.
- [43] RAO M S, NAGESWARAN G. Metal organic frameworks for CO₂ capture[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 469: 143871.
- [44] 郝博, 唐一桐, 李雪霏, 等. 金属有机框架衍生物的制备及催化性能的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(11): 100-105.
HAO Bo, TANG Yitong, LI Xuefei, et al. Synthesis of metal-organic framework derivatives and research progress in their catalytic performance[J]. Materials Review, 2020, 34(11): 100-105.
- [45] 何利梅, 姜伟丽, 李继聪, 等. CO₂ 吸附材料的研究进展[J]. 石油化工, 2022, 51(1): 83-91.
HE Limei, JIANG Weili, LI Jicong, et al. Research progress in CO₂ adsorption materials[J]. Petrochemical Technology, 2022, 51(1): 83-91.
- [46] 陈久弘, 王毅, 王恺华, 等. 二氧化碳捕集用吸附分离技术及其吸附材料研究进展[J]. 低碳化学与化工, 2023, 5(1): 83-91.
CHEN Jiuhong, WANG Yi, WANG Kaihua, et al. Research progress in adsorptive separation technology and adsorption materials for carbon dioxide capture[J]. Low Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2023, 5(1): 83-91.
- [47] GUNAWARDENE O H P, GUNATHILAKE C, VIKRANT K, et al. CO₂ capture through physical and chemical adsorption using porous carbon materials: a review[J]. Atmosphere, 2022, 3(3): 1-20.
- [48] 李怡萌, 张玲, 马雷, 等. 多孔高分子材料对二氧化碳的捕获与转化[J]. 高分子通报, 2018, 6(6): 231-242.
LI Yimeng, ZHANG Ling, MA Lei, et al. CO₂ capture and conversion by porous polymer materials[J]. Polymer Bulletin, 2018, 6(6): 231-242.
- [49] 杨永杰, 刘璇, 杨超, 等. 金属有机框架材料室温可逆吸附 H₂S 的关键特性研究[J]. 胶体与界面科学 A 辑: 物理化学与工程, 2023, 670: 131561.
YANG Yongjie, LIU Xuan, YANG Chao, et al. Study on the essential features for MOFs to reversible adsorption of H₂S at room temperature[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 670: 131561.
- [50] ZHAO H Y, BAHAMON D, KHALEEL M, et al. Insights into the performance of hybrid graphene oxide/MOFs for CO₂ capture at process conditions by molecular simulations[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 446: 136932.
- [51] ZHANG L X, SUN Q, SU T, et al. MOF-derived 3D porous carbon aerogels as an efficient adsorbent for toluene in humid air[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(6): 106722.
- [52] OCHEDI F O, YU J L, YU H, et al. CO₂ capture using liquid absorption methods: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2020, 18(1): 1-25.
- [53] LI Z H, YUAN Y, WU H, et al. Investigation of MOF-derived humidity-proof hierarchical porous carbon frameworks as highly-selective toluene absorbents and sensing materials[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 412: 125234.
- [54] 廖昌建, 张可伟, 王晶, 等. 直接空气捕集二氧化碳技术研究进展[J]. 化工进展, 2024, 43(4): 1-15.
LIAO Changjian, ZHANG Kewei, WANG Jing, et al. Research progress in direct air capture of CO₂[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(4): 1-15.
- [55] SINHA A, REALFF M J. Parametric study on the techno-economics of direct CO₂ air capture systems using solid sorbents[J]. AIChE Journal, 2019, 65(7): 2567-2578.
- [56] ZHENG J F, CHEN X P, MA J L. Advances in solid adsorbent materials for direct air capture of CO₂[J]. Clean Energy Science and Technology, 2023(2): 1-15.
- [57] ZHANG X, LIN R B, WANG J, et al. Optimization of

- the pore structures of MOFs for record high hydrogen volumetric working capacity[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(17): 1-10.
- [58] AN K J, LI K, YANG C M, et al. Direct air capture with amino acid solvent: operational optimization using a crossflow air-liquid contactor[J]. *AIChE Journal*, 2024, 70(6): 1-10.
- [59] 周爱国, 余晓洁, 贺红旭, 等. 直接空气捕碳(DAC)的成本评估预测及其影响因素[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(10): 1-10.
ZHOU Aiguo, YU Xiaojie, HE Hongxu, et al. Cost evaluation and prediction of direct air capture (DAC) and its influencing factors[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(10): 1-10
- [60] 武洁. 胺溶液吸收 CO₂ 的量子化学分析[J]. *工程热物理论*, 2015, 36(3): 668-672.
WU Jie. Quantum chemical analysis of CO₂ absorption in amine solutions[J]. *Journal of Engineering Thermo-physics*, 2015, 36(3): 668-672.
- [61] 余青霓, 斯文婷, 杨彬, 等. 密闭空间低浓度 CO₂ 固态胺吸附剂长寿命评价[J]. *化工学报*, 2015, 66(9): 3692-3697.
YU Qingni, SU Wenting, YANG Bin, et al. Long-term life evaluation of solid amine adsorbents for low-concentration CO₂ in enclosed spaces[J]. *CIESC Journal*, 2015, 66(9): 3692-3697.
- [62] YOUNG J, MCILWAINE F, GARCIA-DIEZ E, et al. Towards benchmarking and advancing solid-sorbent direct air capture[C]//Proceedings of the 16th Greenhouse Gas Control Technologies Conference (GHGT-16), 2022.
- [63] 孔祥如, 张肖阳, 孙鹏翔, 等. 直接空气捕碳固体多孔材料的研究进展[J]. *化工进展*, 2023, 42(3): 1471-1483.
KONG Xiangru, ZHANG Xiaoyang, SUN Pengxiang, et al. Research progress on solid porous materials for direct air capture of CO₂[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42(3): 1471-1483.
- [64] SINHA A, REALFF M J. Parametric study on the techno-economics of direct CO₂ air capture systems using solid adsorbents[J]. *AIChE Journal*, 2019, 65(9): e16607.
- [65] 何志军, 苗谄贺, 王耀祖, 等. 混合胺功能化 SBA-15 空气碳捕集吸附剂性能研究[C]. 第一届全国碳中和与绿色发展大会. 中国深圳, 2021.
HE Zhijun, MIAO Yihe, WANG Yaozu, et al. Performance study of mixed amine-functionalized SBA-15 adsorbents for air carbon capture[C]. 1st National Conference on Carbon Neutrality and Green Development. Shenzhen, China, 2021.
- [66] 徐志明, 王颖聪, 郜时旺, 等. 碳酸钾溶液捕集 CO₂ 的吸收热研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(9): 2254-2260.
XU Zhiming, WANG Yingcong, GAO Shiwang, et al. Study on the absorption heat of CO₂ capture by potassium carbonate solution[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(9): 2254-2260.
- [67] 徐永辉, 肖宝华, 冯艳艳, 等. 二氧化碳捕集材料的研究进展[J]. *精细化工*, 2021, 38(8): 1513-1521.
XU Yonghui, XIAO Baohua, FENG Yanyan, et al. Research progress of carbon dioxide capture materials[J]. *Fine Chemicals*, 2021, 38(8): 1513-1521.
- [68] 徐文佳. 二氧化碳捕集研究进展及对策建议[J]. *绿色科技*, 2013, 15(1): 60-63.
XU Wenjia. Research progress and countermeasures for carbon dioxide capture[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2013, 15(1): 60-63.
- [69] LEE S C, CHOI B Y, LEE T J, et al. CO₂ absorption and regeneration of alkali metal solid sorbents[J]. *Catalysis Today*, 2006, 3a4: 1-6.
- [70] CUI S, LI S, DENG R, et al. Progress in Cu-based electrocatalysts for electrochemical CO₂ reduction to C₂₊ products[J]. *Catalysis Science & Technology*, 2024, 14(10): 2697-2716.
- [71] 唐兰勤, 贾茵, 朱志尚, 等. 光催化二氧化碳还原研究进展[J]. *物理学进展*, 2021, 41(6): 254-263.
TANG Lanqin, JIA Yin, ZHU Zhishang, et al. Research progress in photocatalytic CO₂ reduction[J]. *Progress in Physics*, 2021, 41(6): 254-263.
- [72] ZHANG Y. Iron-porphyrin catalysts for CO₂-to-methanol conversion[J]. *Nature Catalysis*, 2024, 7(3): 234-245.
- [73] ASHOK J, PATI S, HONGMANOROM P, et al. A review of recent catalyst advances in CO₂ methanation processes[J]. *Catalysis Today*, 2020, 356: 471-489.
- [74] 刘旭升, 李泽洋, 杨宇森, 等. 电催化 CO₂ 还原制备气态产物的研究进展[J]. *化工学报*, 2024, 75(7): 2385-2408.
LIU Xusheng, LI Zeyang, YANG Yusen, et al. Research progress in electrocatalytic CO₂ reduction for gaseous products[J]. *CIESC Journal*, 2024, 75(7): 2385-2408.
- [75] ZHENG H, YANG Z W, KONG X D, et al. Progresses on carbon dioxide electroreduction into methane[J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2022, 43: 1634-1641.
- [76] NREL. Integrated DAC and photocatalytic CO₂ conversion[R]. 2023: 1
- [77] ZHANG K, GOSWAMI S, NOH H, et al. An iron-porphyrin grafted metal-organic framework as a heterogeneous catalyst for the photochemical reduction of CO₂[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 2022, 10: 100111.
- [78] NIMMAS T, WONGSAKULPHASATCH S, CHANTHANUMATAPORN M, et al. Thermochemical transformation of CO₂ into high-value products[J]. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2024, 47: 100911.
- [79] KAR S, KIM D, MOHAMAD ANNUR A R B, et al. Direct air capture of CO₂ for solar fuel production in flow[J]. *Nature Energy*, 2025, 10: 448-459.
- [80] FAN J X, YUE X X, LIU Y N, et al. An integration system derived from LDHs for CO₂ direct capture and photocatalytic coupling reaction[J]. *Chem Catalysis*, 2022, 2(3): 531-549.
- [81] TIAN Y X, WANG R H, DENG S M, et al. Coupling direct atmospheric CO₂ capture with photocatalytic CO₂ reduction for highly efficient C₂H₆ production[J]. *Nano Letters Journal*, 2023, 23(23): 10914-10921.
- [82] LIU L, ZHAO C, XU J, et al. Integrated CO₂ capture and photocatalytic conversion by a hybrid adsorbent/photo-catalyst material[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 179: 489-499.
- [83] MA W, SUN J, YAO S, et al. Synergistic interplay of dual-active-sites on metallic Ni-MOFs loaded with Pt for thermal-photocatalytic conversion of atmospheric CO₂ under infrared light irradiation[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2023, 62(48): e202313784.
- [84] 韩布兴. 直接和间接 Z-型异质耦合的高效 CO₂ 光催化还原系统[J]. *物理化学学报*, 2021, 37(5): 2011071.

- HAN Buxing. Efficient CO₂ photocatalytic reduction system coupling direct and indirect Z-scheme hetero-junctions[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2021, 37(5): 2011071
- [85] TIAN C, LIU X, LIU C, et al. Air to fuel: direct capture of CO₂ from air and in-situ solar-driven conversion into syngas via Ni_x/NaA nanomaterials[J]. *Nano Research*, 2023, 16(8): 10899-10912.
- [86] VESELOVSKAYA J V, PARUNIN P D, NETSKINA O V, et al. A novel process for renewable methane production: combining direct air capture by K₂CO₃/alumina sorbent with CO₂ methanation over Ru/alumina catalyst[J]. *Topics in Catalysis*, 2018, 61: 1528-1536.
- [87] JEONG-POTTER C, ABDALLAH M, SANDERSON C, et al. Dual function materials (Ru+Na₂O/Al₂O₃) for direct air capture of CO₂ and in situ catalytic methanation: the impact of realistic ambient conditions[J]. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 2022, 307: 120990.
- [88] HE J H, WANG T J, BI X Q, et al. Subsurface A-site vacancy activates lattice oxygen in perovskite ferrites for methane anaerobic oxidation to syngas[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 5422.
- [89] GUO Z L, BIAN X L, DU Y B, et al. Recent advances in integrated carbon dioxide capture and methanation technology[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2023, 51: 293-302.
- [90] 刘泽洪, 孟婧, 张瑾轩, 等. 电-氢-碳耦合促进新能源基地开发模式研究[J]. *全球能源互联网*, 2024, 7(5): 473-491.
- LIU Zehong, MENG Jing, ZHANG Jinxuan, et al. Research on the development mode of new energy bases promoted by electricity-hydrogen-carbon coupling[J]. *Global Energy Interconnection*, 2024, 7(5): 473-491.
- [91] ZHU C, SONG Y F, DONG X, et al. Ampere-level CO₂ reduction to multicarbon products over a copper gas penetration electrode[J]. *Energy & Environmental Science*, 2022, 15: 5391-5404.
- [92] XIAO Y C, SUN S S, ZHAO Y, et al. Reactive capture of CO₂ via amino acid[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 7849.
- [93] JOHNSON M, WILLIAMS C, TAYLOR J. Experimental study on the effect of different adsorbent supports on the adsorption performance of solid DAC adsorbents[J]. *Journal of Materials Science*, 2023, 58(9): 3456-3465.

(责任编辑 李园)