

碳捕集与碳转化关键材料发展研究

朱锋¹, 刘馨雨¹, 李毅^{1,2}, 罗祖伟¹, 吕厚甫¹, 范益群^{1,3*}

(1. 苏州实验室, 江苏苏州 215000; 2. 江苏大学材料科学与工程学院, 江苏镇江 212013;
3. 南京工业大学化工学院, 南京 211816)

摘要: 二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术作为我国实现碳中和目标技术组合的重要组成部分, 不仅是我国化石能源近零排放的必由之路, 也是钢铁、水泥等难减排行业深度脱碳的现实选择。发展高效低成本 CCUS 技术是实现碳中和目标的关键路径, 关键材料的性能直接决定了碳捕集与碳转化技术的效率、经济性和适用性, 开发具有高效分离与催化转化功能的新型材料是当前技术迭代与产业化的核心任务。本文围绕碳捕集与碳转化技术机理、关键材料的结构特征、应用场景与技术发展路径四个维度展开研究, 针对吸收剂、吸附剂、分离膜等碳捕集材料体系, 以及热催化、电催化、光催化等碳转化材料体系, 系统梳理了国内外工业应用示范项目的研究进展与面临的技术瓶颈, 指出材料性能提升与成本控制并重是产业化推广的关键挑战。同时分析了关键材料结构设计单一、工艺集成复杂、产业链协同不足、政策支持力度欠缺等共性问题。基于此, 提出分领域实现材料体系创新突破、开展颠覆性技术的规模化示范、加强产业链上下游协同联动、完善政策支撑体系等发展建议, 以推动碳捕集与碳转化关键材料的规模化应用, 加速低碳流程再造与负碳体系构建, 为实现碳中和目标奠定坚实基础。

关键词: 二氧化碳捕集; 二氧化碳转化; 关键材料; 化学吸收; 物理吸附; 膜分离; 电催化; 热催化; 光催化

中图分类号: T-1 **文献标识码:** A

Development of Key Materials for Carbon Capture and Conversion

Zhu Feng¹, Liu Xinyu¹, Li Yi^{1,2}, Luo Zuwei¹, Lv Houfu¹, Fan Yiqun^{1,3*}

(1. Suzhou Laboratory, Suzhou 215000, Jiangsu, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; 3. College of Chemical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technology is an essential component of China's strategy to achieve carbon neutrality. It represents the necessary pathway for near-zero emissions from fossil fuels and provides viable solutions for deep decarbonization in challenging sectors like steel and cement industries. Developing highly efficient and low-cost CCUS technologies is a critical pathway toward carbon neutrality, where the performance of key materials directly determines the economics, efficiency, and applicability of carbon capture and conversion technologies. Thus, creating novel materials with high-efficiency separation and catalytic conversion functions is central to current technological advancements and industrialization efforts. This study investigates carbon capture and conversion from four dimensions: technological principles, performance characteristics of key materials, application scenarios, and development pathways. By reviewing industrial demonstration projects in China and abroad, this study highlights research progress and technical bottlenecks of key materials, including absorbents, adsorbents, and separation membranes

收稿日期: 2025-07-28; 修回日期: 2025-10-27

通讯作者: *范益群, 苏州实验室 / 南京工业大学化工学院教授, 研究方向为材料化学工程; E-mail: fanyq@szlab.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国化工新材料绿色低碳发展战略研究”(2024-XBZD-09)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

for carbon capture, as well as thermal catalytic, electrocatalytic, and photocatalytic materials for carbon conversion. It identifies that simultaneously improving material performance and controlling costs remains the primary challenge for industrial-scale deployment. Additionally, common issues such as simplistic material structure design, complex process integration, insufficient industrial chain coordination, and limited policy support are analyzed. Consequently, this study proposes targeted development strategies, including sector-specific innovations in material systems, large-scale demonstration of disruptive technologies, enhanced upstream-downstream industry collaboration, and strengthened policy frameworks. These recommendations aim to accelerate the scaled application of key materials for carbon capture and conversion, foster low-carbon process restructuring, and establish a negative-carbon system, thereby laying a solid foundation for achieving China's carbon neutrality goals.

Keywords: CO₂ capture; CO₂ conversion; key materials; chemical absorption; physical adsorption; membrane separation; electrocatalysis; thermal catalysis; photocatalysis

一、前言

全球气候变化的影响给人类生存发展带来了日益严峻的挑战。我国工业领域承担了全球35%的产能，每年工业碳排放量接近我国碳排放总量的1/2，是未来开展深度减排的主战场^[1]。对于电力、钢铁、水泥、化工等高排放与难减排行业，电气化或可再生能源难以彻底替代化石原料。二氧化碳捕集、利用与封存（CCUS）技术作为工业领域脱碳的兜底保障，能够通过碳抵消机制和跨行业利用，实现工业领域全生命周期碳减排，减少流程工业的碳足迹，不仅是我国化石能源近零排放的唯一技术选择，也是流程工业深度脱碳的可行技术方案。

当前，我国流程工业碳捕集与碳转化相关技术处于工业示范阶段，离商业化大规模应用仍有距离，而碳捕集与碳转化技术的规模化应用高度依赖于关键材料的性能突破与技术集成创新。在碳捕集领域，吸收剂、吸附剂与分离膜材料直接影响捕集过程的选择性、能效与稳定性，目前关键材料普遍面临再生效率低、能耗高、循环稳定性不足及渗透性-选择性相互制约且难以兼具的核心挑战，限制了碳捕集技术的效率与经济性。在碳转化领域，热催化、电催化和光催化材料直接影响CO₂的转化效率和产物选择性，决定了CO₂高值化转化的经济可行性与应用规模。当前材料体系的性能瓶颈集中在热催化剂受限于高温高压条件下的活性衰减与产物分布宽；电催化材料的电流效率与长周期稳定性亟待突破；光催化剂则因载流子复合率高、太阳光谱响应范围有限，导致实际转化效率与理论值存在显著差距等方面。此外，材料与工艺装备的适配性不足以及全生命周期成本偏高，进一步延缓了技术迭代与产业化进程。鉴于关键碳捕集与碳转化材料及其制备技术的重要性和紧迫性，亟需加速碳捕集与

碳转化关键材料的自主创新，推动工艺效率取得突破，为降低成本、拓展应用场景和实现规模化应用奠定基础。以“材料-工艺-装备”协同创新为主线，强化基础研究、中试验证与工程示范的衔接，构建“产学研用”一体化体系，驱动碳捕集与碳转化技术向高效、经济、规模化应用迈进，加快工业碳减排的实现进程，助力我国在全球碳中和技术竞争中抢占战略高地。

本文系统梳理碳捕集与化学法碳转化关键材料的研究进展、主要研究技术路线及应用示范，重点聚焦吸收剂、吸附剂、膜材料以及热催化、电催化、光催化材料等核心材料体系，阐释碳捕集与碳转化材料创新和技术迭代存在的关键问题以及未来发展方向。通过关键材料与技术路线发展现状调研，分析在材料研发及产业化过程中面临的挑战与问题，以更好地理解碳捕集与碳转化前沿材料的研发潜力，并为行业内的企业、政策制定者和投资者提供战略布局建议，旨在推进能源低碳转型。

二、二氧化碳捕集技术关键材料

碳捕集技术是构建负碳体系的基础，也是实现碳中和目标的托底技术。它通过捕集工业排放中的CO₂，为碳减排和资源化利用提供了关键支持。全球典型CCUS项目中碳捕集技术统计情况如表1所示^[2-8]。碳捕集技术按照燃烧过程和燃烧方式主要分为燃烧前捕集、燃烧中捕集和燃烧后捕集三类。燃烧前捕集主要针对煤气化联合循环系统，通过物理吸收（如甲醇洗）在燃料燃烧前从高浓度、杂质少的气体中分离CO₂；燃烧中捕集则包括富氧燃烧和化学链燃烧技术，富氧燃烧利用氧气替代空气，并配合高比例烟气循环（约70%）直接获得CO₂浓度高达80%的烟气，而化学链燃烧则依靠固体载氧

表1 典型CCUS项目涉及的碳捕集关键材料统计情况

技术类型	关键材料	国家	项目名称	时间/年	规模/ ($\times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)	技术指标/(CO_2 捕集率/纯度)	能耗/ ($\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1} \text{CO}_2$)	成本/ ($\text{元} \cdot \text{t}^{-1} \text{CO}_2$)	适用 场景	
吸附法	酶促碳酸钾 溶剂	加拿大	瓦莱菲尔德 (Valleyfield)	2015	0.37	65%~95%/ 99.95%	3.8	200	天然气 锅炉	
	分子筛 吸附剂	美国	阿瑟港 (Port Arthur)	2020	90	—/98%	2.5	—	制氢 合成气	
	固体胺 吸附剂	中国	国能锦界千吨级 燃煤电厂烟气 CO_2 固体吸附项目	2021	0.1	90%/95%	~2.2	200	燃煤电厂	
	碳基 吸附剂	中国	国家能源集团宁 海电厂CCUS项目	2025	1	—	1.1 (目标)	—	燃煤电厂	
	吸收法	单胺溶剂	挪威	Sleipner	1996	85~100	88%/—	—	120~140	天然气 处理
单胺溶剂		加拿大	Boundary Dam	2014	100	90%/—	3.0	700	燃煤电厂	
复配溶剂		美国	Petra Nova	2017	140	92%/—	2.6	490	燃煤电厂	
胺溶剂		英国	NZT Power	2024	200	95%/—	2.4	420	发电厂	
相变溶剂		法国	Dunkirk (3D)	2025	100	88%/—	2.2	280	钢铁厂	
相变溶剂		中国	华能石洞口电厂 CCUS项目	2009 (运行) 2021 (改造)	12	90%/99.99%	2.8	245~350	燃煤电厂	
甲醇溶剂		中国	神华集团鄂尔多斯 二氧化碳捕获与 封存(CCS)项目	2010	10	—/88%	1.2	—	煤气化 制氢装置	
复配溶剂		中国	国能锦界电厂 CCUS项目	2021	15	90%/99%	2.3	245~280	燃煤电厂	
复配溶剂		中国	国能泰州电厂 CCUS项目	2023	50	90%/99.99%	2.3	245	燃煤电厂	
单胺溶剂		中国	北京金隅北水环 保科技有水泥窑 烟气CCUS项目	2024	10	—/99.99%	—	—	水泥窑	
相变溶剂		中国	中国华能清能院正 宁电厂CCUS项目	2025	150	90%/99.5% (目标)	2.2 (目标)	224 (目标)	燃煤电厂	
膜分 离法		Polaris膜 材料	美国	National Carbon Capture Cente	2015	0.73	85%/—	—	210~350	—
		Polaris膜 材料	美国	Dry Fork Station	2025	5	—	—	—	燃煤电厂
	聚乙烯基胺 膜材料	中国	中石化南京化工 研究院有限公司 膜法捕集 CO_2 工业示范项目	2021	0.35	90%/95%	3.1	—	燃煤电厂	

体在燃烧过程中实现氧气传递及 CO_2 分离；燃烧后捕集技术是从燃烧过程尾部烟气进行除尘和脱硫后，通过溶剂吸收、固体吸附和膜分离等方式回收 CO_2 ，是目前全球应用最广、成熟度最高的方案。碳捕集技术正从基于单一胺的传统燃烧后化学吸收

技术、燃烧前物理吸收技术等第一代碳捕集技术向基于胺基两相吸收剂等新型吸收剂、金属有机框架吸附技术、增压富氧燃烧、膜分离等第二代碳捕集技术过渡，电化学、化学链燃烧等第三代技术也开始崭露头角。在各类技术中，燃烧前物理吸收法和

燃烧后化学吸收法已实现商业应用，而其他技术还在发展过程中。关键材料（如高效吸收剂、吸附剂、膜材料等）不仅决定了CO₂的捕集效率和设备运行稳定性，也直接影响碳捕集技术的经济性和可持续性。

（一）吸收法关键材料

1. 研究进展

吸收法作为碳捕集领域的主流技术，凭借其成熟的技术体系和广泛的适用性，在全球CCUS实践中占据重要地位。根据作用机理的不同，可分为物理吸收和化学吸收两大类。物理吸收依赖溶剂对CO₂的溶解度差异，常见溶剂如Selexol（基于聚乙二醇二甲醚的有机溶剂混合物）和Rectisol（核心成分为甲醇，在-35~-75℃下操作），主要适用于高CO₂浓度场景，例如燃烧前捕集或天然气处理，其优点在于工艺简单、能耗较低，但对低浓度CO₂的捕集效率有限^[9]。化学吸收通过溶剂与CO₂的可逆化学反应实现高效分离，典型溶剂包括单乙醇胺（MEA）和混合胺，广泛用于燃烧后捕集，能在低浓度CO₂的烟道气中实现90%以上的捕集率。然而，吸收剂再生能耗占运行能耗的60%~70%，以MEA为代表的第一代吸收剂，再生能耗约为3.5~4.5 GJ/tCO₂。降低再生能耗需减弱CO₂化学吸附力，降低解吸温度和减少溶剂的蒸发，现阶段的主要方法是设计新型吸附剂以降低吸附热^[10]。但从动力学出发，推动力（吸附热）的减弱也带来解吸速率的降低。这一过程显热与溶剂蒸发热损耗巨大，且需消耗大量蒸汽^[11]。因此，通过新型吸收剂材料的开发实现CO₂的低能耗、高效率捕集是发展吸收法的关键。以混合胺为代表的第二代吸收剂（如美国德克萨斯大学的PZ混合胺吸收剂，Shell Cansolv公司基于胺基的DC-201、DC-103，日本三菱化学集团的KS-1吸收剂，中石化南京化工研究院有限公司的MA吸收剂等）已能将捕集能耗降低至2.8~3.3 GJ/tCO₂^[12]。国内外研究者正积极探索第三代吸收剂体系，浙江大学、湖南大学、中国科学院过程工程研究所、北京理工大学等开发了新型相变有机胺、功能化离子液体和非水基胺等吸收剂，能将再生能耗的理论值降低至2.5 GJ/tCO₂以下^[13-20]。目前，此类两相或少水吸收剂仍处于实验室验证阶段，在长期循环稳定性、传质效率及高黏度控制等方面尚需深入研究。

同时，强化反应器传质与系统节能工艺的集成优化也成为吸收法碳捕集技术的主要发展方向。

在国际范围内，吸收法已在多个标志性CCUS项目中展现出其技术可靠性和工业化潜力，为全球碳捕集技术的发展提供了重要参考^[3,21]。加拿大的Boundary Dam项目是全球首个商业化燃煤电厂CCUS案例，采用胺类化学吸收技术，年捕集CO₂能力达1×10⁶ t，捕集效率稳定在90%以上，已累计捕集CO₂超5×10⁶ t，验证了化学吸收在大规模部署中的可行性。美国的Petra Nova项目年捕集CO₂量达1.4×10⁶ t，通过优化胺类溶剂和热集成技术，将再生能耗降至2.6 GJ/tCO₂，凸显了吸收剂的性能对吸收法技术效率与能耗成本具有决定性作用。此外，挪威的Sleipner项目则展示了物理吸收的长期稳定性，自1996年起利用Selexol溶剂从天然气中捕集CO₂封存于北海海底地层，年捕集量约为1×10⁶ t，运行超过25年未见明显衰减，已累计封存CO₂超过2.2×10⁷ t。这些项目分别针对不同CO₂来源和应用场景，验证了吸收法在燃煤电厂、天然气处理及地质封存中的适应性，为后续CCUS技术的全球推广提供了实践依据。

我国在吸收法碳捕集领域的应用起步较晚，但近年来依托政策支持和工业需求，多个示范项目快速推进，展现出后发优势。华能集团北京高碑店热电厂项目是我国最早的燃煤电厂CCUS试点，于2008年投运，采用化学吸收技术，CO₂捕集能力虽仅为3×10⁵ t/a，但其稳定运行验证了胺类溶剂在国内烟道气条件下的适用性。2011年建成的中国神华煤制油化工有限公司鄂尔多斯项目作为全球首个煤制油CCUS项目，利用甲醇吸收技术捕集CO₂用于地质封存，CO₂纯度>88%，捕集量达1×10⁵ t/a，实现了经济效益的初步探索^[5]。国家能源集团泰州发电有限公司项目采用第二代复配溶剂技术，碳捕集量达5×10⁵ t/a，能耗下降至2.2~2.4 GJ/tCO₂，捕集成本低于250元/tCO₂，其高性能吸收剂的应用显著改善了工艺经济性^[2]。由浙江大学、北京化工大学、中国科学院过程工程研究所、天津大学等研发机构提供技术支持的1.5×10⁵ t/a国能锦界能源有限责任公司CCUS示范项目，于2021年完成168 h性能考核，验证其CO₂捕集效率达90%，捕集再生能耗<2.4 GJ/tCO₂^[14,22]。这些项目的推进反映了我国在吸收法碳捕集技术能耗降低和规模化应用方面所做

的努力,然而与国际先进水平相比,仍面临规模较小、成本控制不足的挑战,部分项目因经济性问题暂停扩建。未来,随着新型溶剂的开发和设备国产化研究的深入,有望实现进一步突破,支撑我国CCUS产业加速迈向商业化阶段。

2. 关键材料面临的问题与发展趋势

吸收法的核心材料是吸收剂,其性能直接影响捕集效率和能耗。当前吸收剂开发面临的主要挑战包括:①再生能耗高。物理吸收剂(如Rectisol、Selexol)对CO₂具有高溶解度并已有成熟应用基础,但在低CO₂分压条件下捕集效率有限,且溶剂再生过程高耗能导致运行成本增加。化学吸收剂(如醇胺类吸收剂)对CO₂具有高反应性和选择性,适用于低浓度烟道气捕集,但其挥发性强、腐蚀性大且热稳定性差,设备腐蚀和溶剂降解问题突出,再生过程需消耗大量热能。采用混合胺、新型相变有机胺、功能化离子液体(ILs)和非水基胺等吸收剂可将再生能耗降至3 GJ/tCO₂以下,同时提升溶剂稳定性。②稳定性与寿命。胺类溶剂易挥发且具有腐蚀性,长期循环使用会发生氧化和热降解,导致溶剂有效浓度降低,需要定期补充或更换。此外,吸收过程中溶剂与烟气中杂质(如SO₂、NO_x)的不可逆反应使溶剂失活,长期运行下容量衰减明显。③腐蚀与材料兼容性。醇胺溶剂副产物对环境和设备安全构成威胁,需要添加缓蚀剂和选用耐腐材料,增加了系统复杂性和成本。

未来吸收法关键材料的研发将围绕提高吸收剂性能、降低能耗和提升耐久性展开,聚焦优化吸收剂的作用机理和分子结构,使其在兼顾高容量、高选择性的同时实现更低的再生能耗和更长的使用寿命,以满足大规模工业应用需求。主要方向包括以下几个方面。

(1) 开发高容量、低能耗的新型溶剂。开发能在吸收后发生液液或液固相分离的双相吸收剂,将CO₂富集于一相,大幅减少再生加热量。研究低挥发性和高热稳定性的新型离子液体材料。针对其黏度高、传质慢的问题,通过官能团改性、加入共溶剂或开发支撑型离子液体吸收剂提升传质效率^[23]。基于ILs的CO₂捕集工艺的总能耗估计约为1.4 GJ/tCO₂,显著低于胺基溶剂^[24]。

(2) 通过创新吸收剂化学结构,实现更高的CO₂容量和更低的再生热耗,在确保吸收速率的前

提下,削弱CO₂键合强度,降低反应热。例如,开发反应热低但活性良好的胺类(如空间位阻胺、季胺)或碱性氨基酸盐,以减少解吸所需能量。引入第三代新型溶剂体系,包括水贫溶剂和非水体系,实现“快吸收-低再生”兼顾的溶剂体系,平衡吸收热和动力学,在保证捕集效率的同时减少能耗。

(3) 提高溶剂稳定性与耐杂质性能。针对胺类溶剂氧化降解和热分解问题,引入抗氧化剂或稳定剂抑制自由基反应,开发热稳定、抗氧化的胺衍生物。同时,通过添加剂强化溶剂对SO_x/NO_x等酸性气体的耐受性,避免不可逆失活。未来还应研发低挥发性、低腐蚀的新溶剂,减少溶剂逸失和设备防腐需求,从而提高系统长周期运行的经济性。

(二) 吸附法关键材料

1. 研究进展

吸附法作为第二代碳捕集技术,以其低能耗、高灵活性和环境友好性在碳捕集领域展现出显著潜力。其潜在优势在于模块化设计便于集成到现有工业流程,且有望在2035年前后发展为成熟技术,相较传统胺吸收法节能约20%~30%,为CCUS提供高效低成本路径。吸附法碳捕集技术主要分为物理吸附与化学吸附两类。物理吸附依赖于分子间作用力(如范德华力),利用吸附剂的高表面积和孔隙结构(如活性炭、沸石、金属有机框架(MOFs))捕获CO₂。其优势在于吸附-解吸循环快、能耗低,适用于高压环境,但受限于CO₂在低浓度下的吸附容量。化学吸附则通过吸附剂表面活性位点(如胺基团、碱金属)与CO₂发生可逆化学反应,具有更高的选择性和捕集能力,尤其适合燃烧后低压烟道气环境。代表性材料包括固态胺、钙基吸附剂等,其吸附容量高且对湿度耐受性强,但再生能耗较高。吸附工艺多采用固定床、流化床或移动床反应器,再生方式涵盖变压吸附(PSA)、变温吸附(TSA)及真空吸附(VSA)等,不仅能满足低温低压下CO₂捕集要求,还可通过多级配置提高捕集效率。吸附法在能耗较低、操作简单及环境友好方面具有独特优势,但在CO₂选择性、吸附容量和动态响应等方面仍存在一定局限性,需要针对不同工况进行材料和工艺的优化改进^[25]。

在全球范围内,吸附法碳捕集技术已从实验室向中试及商业化阶段推进。美国RTI国际能源技术

中心开发的干碳酸盐工艺使用负载型 Na_2CO_3 吸附剂, 2015 年在北卡罗来纳州 UNC-Chapel Hill 电厂实现 1×10^2 t/d 的 CO_2 捕集, 回收率为 90%, 捕集成本较传统胺吸收法降低 40%, 成本约为 124 元/ tCO_2 ^[26]。加拿大 CO_2 Solutions 公司开发的酶促碳酸钾溶剂(碳酐酶催化)于 2015 年在蒙特利尔的天然气锅炉完成 10 t/d 的示范运行, CO_2 纯度超 99.3%, 能耗低至 2.8 GJ/ tCO_2 ^[27]。我国的化学吸附技术也实现了关键进展, 国能锦界能源有限责任公司的千吨级项目通过固体胺吸附材料的应用, 将能耗控制在 2.2~2.4 GJ/ tCO_2 , 成本约为 200 元/ tCO_2 , 展现了良好的技术经济性^[7]。正在建设中的国家能源集团浙江公司宁海电厂 CCUS 项目, 使用高容量碳基物理吸附材料进行 CO_2 捕集, 预计捕集量可达 1×10^4 t/a, 捕集能耗 < 1.08 GJ/ tCO_2 ^[28]。这些项目表明, 吸附法在高技术成熟度阶段已接近工业应用, 但需解决大规模再生能耗和材料稳定性问题以进一步推广。

2. 关键材料面临的问题与挑战

吸附法碳捕集的核心在于吸附剂性能与再生效率, 但在容量、选择性、稳定性及成本等方面仍存在显著瓶颈。① 低压下容量受限: 物理吸附剂(如沸石、活性炭)虽成本低、易再生, 但在烟气 CO_2 分压低于 0.15 bar 时容量不足, 难以实现高捕集率; 同时需较低温或高压操作以增强吸附力, 不利于能耗优化。② 选择性与竞争吸附: 工业烟气中 H_2O 、 O_2 、 N_2 等组分会竞争吸附活性位点, 降低有效容量。亲水性沸石与部分 MOFs 在高湿环境中结构不稳定, 性能衰减严重, 限制了实际应用。③ 循环寿命与结构稳定性不足: 多次吸附-解吸循环易引起孔结构坍塌、活性基团失活或载体堵塞。提升骨架强度、引入抗氧化剂或原位修复机制, 有助于延长吸附剂寿命。总体来看, 吸附法碳捕集要实现工业化突破, 需构建兼具性能与经济竞争力的材料体系与工艺路线。

如何平衡高吸附容量、快吸附速率、低脱附再生温度(低脱附热)和良好的热化学稳定性是未来吸附法关键材料研究的重要内容。主要发展方向包括以下方面。

(1) 高选择性高容量吸附剂: 通过设计功能化多孔材料, 使其在低 CO_2 分压下仍具有高吸附性能。典型策略是将胺基功能团接枝到多孔载体(如活性炭、MOFs、共价有机框架(COFs)等)孔道

内或开发含氮有机骨架材料, 增强 CO_2 亲和作用, 提高化学吸附能力和对 CO_2 的选择性。固体胺吸附剂、改性 MOFs 及杂化分子筛是关键研究体系。

(2) 多级孔结构与传质强化: 针对吸附过程中固-气内部扩散阻力, 构建微-介-大孔协同结构, 微孔提供容量、介孔与大孔促进扩散, 以加快 CO_2 分子传输速率。可通过模板法或将纳米孔材料负载于介孔载体实现分级结构, 并控制颗粒粒径和形貌以减少扩散距离, 提高吸附-解吸循环速率。

(3) 降低再生能耗并引入新再生机理: 通过调控吸附热开发在低温或真空下可再生的吸附材料, 如含弱碱性官能团的固体吸附剂, 探索微波、电驱动等非热再生方式, 以减少显热损耗, 实现吸附与解吸间的能量平衡。

(4) 提升热化学循环稳定性: 针对工业烟气中的水分及杂质影响, 开发疏水改性吸附剂, 防止水分竞争占据孔道。针对吸附剂循环性能衰减, 通过引入环氧化物、螯合剂和含硫化合物等添加剂提升固态胺吸附剂的热化学稳定性。

(三) 膜分离法关键材料

1. 研究进展

膜分离技术作为第二代碳捕集技术, 目前虽未实现大规模应用, 但其在提高碳捕集效率、降低能耗和成本控制等方面展现出显著潜力。膜分离技术的核心在于膜材料, 理想的膜材料需兼具优异的气体分离性能、热稳定性与化学稳定性、机械强度以及良好的成膜性能^[29]。根据材料体系的不同, 气体分离膜主要分为有机高分子膜、无机膜和有机-无机复合膜三类。有机高分子膜材料来源广泛, 易于加工, 并具备良好的气体分离性能与稳定性, 典型代表包括聚酰亚胺、聚硅氧烷、聚环氧乙烷、聚砜、聚烯烃、醋酸纤维素等^[30]。然而有机膜普遍存在选择性和渗透性之间相互平衡的“trade-off”效应, 难以同时兼具优异的选择性与渗透性, 表现为“罗伯森上限”^[31]。无机膜材料在热稳定性、耐溶剂性及机械性能方面优于有机膜, 但存在脆性大、制造成本高及难以制备大面积无缺陷膜等局限。典型代表包括沸石分子筛、碳基材料(如碳分子筛、石墨烯等)、MOFs 以及陶瓷等。在不能使用有机膜的情况下, 沸石分子筛膜和碳分子筛膜由于其优异的热稳定性和化学稳定性、良好的抗侵蚀性, 表现出

高效的 CO₂ 分离潜力。MOFs 由有机配体和金属阳离子通过配位键自组装而成，具有高度有序的孔道结构与优异的骨架可调控性能，可同时实现高 CO₂ 渗透速率和选择性。近年来，以二维过渡金属碳化物 / 氮化物 (MXene)、层状双氢氧化物 (LDHs) 为代表的新型二维无机材料也显示出潜在应用价值；有机-无机复合膜 (混合基质膜) 通过在高分子基体中引入无机填料 (如沸石、MOFs、石墨烯等)，结合了聚合物良好的加工性能与无机材料优异的传递特性，显著改善了气体分离的选择性和渗透性，但填料与聚合物间的相容性差、易团聚等问题仍制约其实际应用^[32]。气体分离膜材料的研究方向仍在于开发出兼顾高渗透性和高选择性，同时抗污染性、加工性等性能优良的适于工业化应用的膜材料。

国际上，美国 MTR 公司的 Polaris 膜、德国 GKSS 公司的 Polyactive 膜性能优异且已实现规模化生产，并已开展膜装备制造和中试测试研究，所用膜材料属于遵循溶解扩散机制的聚醚氧 (PEO) 类聚合物。在众多 PEO 共聚物中，由聚酰胺 (PA) 和 PEO 共聚制备的 Pebax 膜材料已经实现商业生产，也是目前研究最成熟的碳捕集膜材料。2015 年，美国 MTR 公司利用其自行开发出的 Polaris™ 聚合物膜建成了碳捕集二段膜过程装置，对美国阿拉巴马州威尔逊维尔电厂烟道气进行处理，运行 20 tCO₂/d 的示范工程，CO₂ 捕集率约为 85%，捕集成本可降至 280 元/tCO₂^[33]。美国 MTR 公司已经开始在怀俄明州建设世界上最大的非溶剂型碳捕集工厂，从盆地电力公司产生的烟气中收集二氧化碳，预计 2025 年建设完成，将具备超过 1.5×10² tCO₂/d 的碳捕集能力^[34]。

国内在碳捕集膜技术方面的研究以实验室规模的新型膜材料设计与制备为主，天津大学、南京工业大学、天津工业大学、郑州大学、华南理工大学和中国科学院大连化学物理研究所等高校和科研机构均有碳捕集膜材料相关成果，主要聚焦多孔 CO₂ 吸附纳米材料设计、膜内 CO₂ 传递通道优化、混合基质膜相容性提高等方面。天津大学团队在中国石化南京化学工业有限公司自备电厂建成了膜法捕集 CO₂ 工业示范装置并于 2021 年 12 月成功开车运行，示范装置使用三级三段膜分离工艺，稳定运行期间烟气平均流量为 2.12×10³ Nm³/h，CO₂ 含量为 13%，

产品气 CO₂ 纯度为 96.15%，CO₂ 捕集率为 81.6%，CO₂ 捕集量约为 3.5×10³ t/a，工业示范装置综合能耗约为 3.05 GJ/tCO₂^[8]。

2. 关键材料面临的问题与挑战

膜材料性能是决定膜分离技术效率的关键，当前制约其大规模应用的挑战包括：① 性能权衡与分离极限。高分子膜的渗透性与选择性之间存在相互制约的“倒置关系”。高自由体积材料虽然能提升 CO₂ 的渗透率，但在低浓度环境下选择性不足，难以满足高效分离需求^[35]。② 工况稳定性与抗污染性能。实际烟气具有高温、高湿及 SO_x、NO_x 等杂质，易引发高分子链段塑化、物理老化及化学侵蚀，竞争吸附或不可逆反应可能破坏膜结构，导致长期运行性能衰退。促进传递膜虽具高选择性，但其含水环境敏感性强，运行控制复杂；无机膜及混合基质膜虽耐热性优越，却仍受热应力与界面失配限制。③ 规模化制备挑战。实验室小面积膜在放大到卷式元件或大面积膜组件时，容易产生针孔、界面剥离等缺陷。例如，薄膜复合膜的选择层与多孔支撑层界面结合和均匀性难以在工业放大中保证，膜组件的封装、密封材料及与膜材料的化学兼容性成为制约工业应用的关键环节，限制了规模化应用^[36]。④ 成本与可制造性。高性能聚合物、MOFs 或有机-无机复合膜的合成复杂且成本高，难以满足大规模部署需求^[37]。

膜分离法碳捕集要实现工业化突破，需通过膜材料设计打破渗透通量-选择性的权衡效应，提升抗塑化与抗污染能力，并发展连续化、可放大的膜制备与集成工艺，以实现高性能、长寿命和经济可行性的统一。主要发展方向包括以下几种。

(1) 在分离性能方面，突破“罗伯森上限”仍是核心目标。通过分子层次设计或改性聚合物材料开发高自由体积聚合物和促传递膜等新材料，实现高渗透性与高选择性兼备；深入认识混合基质膜中纳米填料的构效关系及纳米填料对成膜过程及膜结构影响规律，通过纳米填料表面功能化与尺寸调控避免聚集，以充分发挥纳米填料中选择性通道的作用。

(2) 在稳定性方面，针对复杂烟气中高温、高湿及酸性杂质环境，应强化膜材料的工况稳定性。可通过交联、接枝或氟化改性抑制高分子链段运动，增强抗塑化与抗溶胀性能；采用表面疏水化或

防污涂层设计，提高抗湿热与抗腐蚀能力；无机膜与复合膜体系则可引入柔性支撑或梯度结构缓冲热应力，避免膜层缺陷产生。新型二维材料膜可通过化学交联与层层组装技术提高机械强度和长期稳定性。

(3) 在膜材料规模化制造方面，改进涂覆工艺和设备，使纳米级厚度的致密选择层能够大面积均一地附着在支撑层上而无缺陷。引入在线监测与检测技术，确保大规模膜材料生产的一致性和良率，使其满足工业应用的要求。

(四) 电化学生介导碳捕集法关键材料

1. 研究进展

电化学生介导碳捕集 (EMCC) 技术是以电能输入代替传统热能驱动 CO_2 捕集的新兴技术路径，其基本原理是，通过活性介质的可逆氧化还原反应调控溶液的化学环境 (如 pH 或亲核性) 以实现 CO_2 的可逆吸收与释放。在吸收阶段，介质的还原态促进 CO_2 转化为溶解态碳酸盐或加合物；在解吸阶段，通过电化学反应使介质氧化、溶液酸化，从而释放高浓度 CO_2 [38,39]。其主要优势在于可在常温常压下进行，避免了传统吸收法对低品位蒸汽的依赖，理论能耗更低，且易于与光伏、风电等间歇性可再生能源集成。在 EMCC 系统中，核心材料如电解质、电极和膜材料的性能决定了整体的 CO_2 捕集容量、选择性、能耗、循环寿命以及最终的经济性 [40]。

(1) 氧化还原活性介质：作为 EMCC 系统的核心材料，氧化还原活性介质通过价态切换引发溶液酸碱度的改变，在低电压下实现 CO_2 的可逆吸附与解析。中国科学技术大学孟征团队首次将 MOFs 材料应用于电驱动的二氧化碳捕获，通过将 $\text{Ni}_5(\text{HITP})_2$ 材料组装为固态电池，比传统胺法能耗降低 70% (最低仅需 30.5 kJ/molCO_2)，经 50 次循环容量无衰减，耐受 70% 湿度、 O_2 、 SO_2/NO_2 干扰 [41]。约翰霍普金斯大学刘亚媛团队开发出氧化还原可调 Brønsted 酸，表现出超过 20 个单位的 pK_a 可逆可调性，在含 10% CO_2 、21% O_2 的环境中稳定运行 400 h，电化学效率接近 100%，能耗约为 $84.6 \pm 30 \text{ kJ/molCO}_2$ [42]。

(2) 电极材料与结构：电极是决定 EMCC 反应速率与能效的关键载体，研究重点在于提高传质与

电化学反应效率。莱斯大学汪溟田团队设计利用阴极气体扩散电极构建三相界面，开发了氧还原耦合的膜电极系统，突破了传统气液接触的扩散瓶颈，可在 440 mA/cm^2 电流密度下高效工作，同时法拉第效率 >90%、碳捕集率 >98%，输出 CO_2 产品纯度 >99%，起始能耗约为 150 kJ/molCO_2 [43]。深圳大学谢和平团队将传统的单步电化学反应转化为电化学生-化学相耦合的双步反应过程，通过在阴极和阳极上分别进行氢气析出反应、有机还原载体的氧化反应，避免氧气副反应。该体系在模拟烟气下连续运行 >200 h，能耗低至 1.12 GJ/tCO_2 ，电流效率超 99%，展示出在低能耗、高效碳捕集方面的巨大潜力 [44]。

(3) 膜材料：膜材料在维持电解液分区与离子选择传输中起关键作用，其离子电导率、选择性与稳定性直接决定体系的能效与电流密度上限。当前，先进阴/阳离子交换膜在水系电解液中面电阻已低于 $1 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，但双极膜 (BPM) 因厚度与水离解动力学限制仍存在较高的工作电压，其电压损失在系统总能耗中占主导地位 [45,46]。加州理工大学团队 [47] 设计了直接耦合 BPM 电渗析与气相还原反应器的新型系统，实现海水中 CO_2 的原位捕集与电转化耦合，捕集效率为 71%，能耗约为 155 kJ/molCO_2 ，整体法拉第效率达 95%。

2. 关键材料面临的问题与挑战

尽管电化学生介导碳捕集展现出低温、低能耗和可调节性优势，但其关键材料仍面临多重挑战。

① 氧化还原介质稳定性：多数醌、酚嗪及金属络合物在含空气、烟气等氧气源中易发生氧化副反应或降解失活，导致法拉第效率与循环寿命下降 [48,49]。
② 电极-电解质界面传质耦合不均：气-液-固三相界面同时承担 CO_2 溶解、离子迁移与电子转移过程。多孔碳或金属电极虽提供高比表面积，但孔径分布不均导致局部浓差极化，界面接触电阻大，传质阻力显著，影响 CO_2 吸附动力学。电极表面气泡积聚、局部过电位上升、流体滞留均使得能量效率下降。
③ 膜与电解质的离子选择性与稳定性不足：阴离子交换膜在碳酸盐沉积或离子交叉渗透作用下电导下降，降低酸碱分区效率。BPM 在高电流密度下水裂解速率不均，酸碱交叉严重。电解质组成影响离子迁移率与载体活化能，非水体系的低离子电导进一步限制了反应速率。

未来电化学介导碳捕集关键材料的主要发展方向包括以下几个方面。

(1) 阐明电化学介导碳捕集机理：阐明不同电化学碳捕集机理的反应路径与界面过程，包括电化学生成亲核体、电化学 pH 摆动、电容式捕集以及电化学介导的胺再生等。解析电子-质子转移途径、中间体结构及动力学，通过原位与工况表征技术解析界面电化学反应与传质行为，并结合计算模拟与机器学习建立机理模型，为材料设计、反应优化与装置开发提供理论依据。

(2) 高稳定氧化还原活性介质设计：通过调控分子取代基与共轭结构拓宽电化学窗口，开发耐氧、耐湿且具多电子转移能力的氧化还原介质，并将其负载于导电多孔支撑体或接枝于聚合物骨架上抑制溶解与副反应，提升循环稳定性与法拉第效率。

(3) 电极结构与界面传质优化：未来需构建具有连续电子和离子传输路径的多孔电极结构，缩短扩散距离并降低欧姆阻抗。在气-液-固三相界面通过界面微结构与润湿性调控加速气泡脱附并稳定三相反应界面，从而在高电流密度下维持高法拉第效率和单程 CO₂ 转化率。

(4) 膜材料与电解质性能提升：开发离子通道与表面电荷密度可调的阴离子交换膜，提升抗碳酸盐沉积能力与尺寸稳定性；构建非对称 BPM，通过催化层梯度设计实现高电流密度下可控的水裂解与离子传输，抑制酸碱交叉；研究具有宽电化学窗口、高离子电导的电解质体系，通过“膜-电解质-电极”的协同优化改善非水体系的传输与稳定性。

三、二氧化碳转化技术关键材料

热、电、光催化转化技术是推动二氧化碳资源化利用的重要驱动力，也是实现碳循环闭合与能源结构转型的战略性技术支撑。它们通过不同能量形式的驱动机制，为二氧化碳定向转化为高附加值化学品提供了多种技术路径。热催化以高温高压环境为基础，借助含过渡金属等组分的催化剂实现二氧化碳转化成甲醇、烃类等化学品，具有反应效率高、可规模化生产的优势；电催化依托可再生能源电力驱动，通过电极表面电子转移反应将二氧化碳还原为一氧化碳、乙烯等产物，其反应条件温和

且可与绿电系统深度耦合；光催化则利用半导体材料的光生载流子激发特性，在太阳光驱动下将二氧化碳与水转化为甲酸、甲醇等产物，展现出清洁能源驱动的零碳转化潜力。当前技术正从单一催化体系向光-热协同催化、光电耦合催化等复合系统升级，催化材料创新（如单原子催化剂、钙钛矿电极）与反应器设计优化成为提升转化效率与选择性的关键突破点。其中热催化已进入工业示范阶段，电催化正加速迈向规模化应用，而光催化仍处于实验室向工程化过渡的关键期，如表 2 所示^[50-75]。这些技术的协同发展不仅为碳中和目标提供了负碳转化解决方案，更推动了能源、化工、材料等多领域的技术革命。催化材料的创新是驱动 CCUS 技术从理念走向现实、从低效迈向高效的核心引擎。通过对活性位点结构的精准设计，显著提升了反应效率与产物选择性，推动 CCUS 从单纯捕集迈向高值化学品合成，最终实现降耗增效与产业链升级。

(一) 热催化二氧化碳加氢材料体系

1. 研究进展

CO₂ 加氢技术是指在一定温度、压力及催化剂作用下，将 CO₂ 与可再生能源生成的绿氢 (H₂) 转化为高附加值燃料（如甲醇、汽油、柴油等）或化学品（如烯烃、芳烃等）的催化过程，不仅能够推动 CO₂ 资源化利用，还可实现绿色氢能与碳资源的协同转化，为构建低碳循环的能源化工体系提供重要技术支撑。反应通常在 200~400 °C、2~10 MPa 条件下进行，具有产物选择性可调、可连续化生产以及工艺放大潜力显著等优势，是多相催化领域的关键方向^[76]。通过设计铜基、铁基等高效催化剂，热催化 CO₂ 加氢可直接合成甲醇、低碳烯烃和长链液态烃类燃料，同时将间歇性可再生能源以化学能形式存储于高密度碳氢化合物中，兼具规模化生产可行性与全生命周期碳减排效益，是实现化石能源替代和碳中和目标的战略性技术之一。通过对活性位点结构的精准设计，显著提升反应效率与产物选择性，推动 CCUS 从单纯捕集迈向高值化学品合成，最终实现降耗增效与产业链升级。

CO₂ 加氢催化材料体系多样，按组分类型可分为金属基催化剂、金属氧化物催化剂及分子筛复合催化剂等，其设计与优化是提升 CO₂ 转化率和产物选择性的核心。其中，金属基催化剂以铜 (Cu)、

表2 碳转化相关材料与技术成熟度评估

技术类别	材料体系	驱动能源与反应条件	典型目标产物	核心优势	关键挑战 / 材料瓶颈	技术成熟度
热催化二氧化碳加氢	Cu-ZnO-Al ₂ O ₃ , Fe基费托催化剂, 氧化物 / 分子筛复合催化剂	热能 (200~400 °C)、高压 (2~10 MPa)、绿氢	甲醇、低碳烯烃、汽油、航煤、芳烃等	反应速率快, 工艺相对成熟, 可直接利用现有化工基础设施	催化剂高温烧结与积碳失活; 依赖高成本绿氢; 产物选择性调控难; 对原料气中杂质 (如硫) 敏感	示范走向商业化
高温电催化二氧化碳还原	固体氧化物电解池 SOEC: Ni-YSZ 燃料电极、LSM 氧电极、YSZ/GDC 电解质	可再生电力与高温热能 (600~800 °C) 协同驱动	合成气 (H ₂ /CO)、CO、亦可进一步合成燃料	能量效率高, 反应动力学快, 可直接共电解 CO ₂ 和 H ₂ O	关键材料 (电极 / 电解质) 在高温、高湿下的长期化学与机械稳定性差; 系统启停频繁易导致衰减; 集成成本高	中试示范
常温电催化二氧化碳还原	膜电极 MEA 体系: Cu基、Zn基催化剂, AEM/PEM/BPM 膜	可再生电力、可低至常温常压	甲酸、CO、乙烯、乙醇等多碳产物	反应条件温和, 模块化设计灵活, 可与波动性可再生能源直接耦合	催化剂稳定性差 (团聚、中毒); 膜材料成本高 (如 AEM); 系统能量效率偏低 (通常 <40%); 产物分离能耗高	实验室向中试过渡
光催化二氧化碳还原	TiO ₂ 基、MOFs、COFs、二维钙钛矿、MXene 基复合材料	太阳光、可低至常温常压	CO、CH ₄ 、CH ₃ OH 等	能源需求最为绿色、温和, 理论上可实现全太阳能驱动的“人工光合作用”	太阳能转化效率极低 (通常 <1%); 光生载流子分离效率差; 产物选择性低且产率难以满足应用要求	基础研究为主

注: AEM为阴离子交换膜; PEM为质子交换膜; SOEC为高温固体氧化物电池。

铁 (Fe)、钴 (Co) 及其合金为主, Cu 基催化剂因制备成本低和催化活性高获得广泛应用, 其中合成气制甲醇 Cu/ZnO/Al₂O₃ 催化剂也广泛应用于 CO₂ 加氢制甲醇。鉴于该反应的高温条件和 H₂O 生成易引起 Cu 的烧结失活, 通过引入 ZrO₂、CeO₂、Ga₂O₃ 等助剂以构筑丰富的界面结构或形成金属-载体相互作用来改善 Cu 催化剂热的稳定性^[50]; 铁基催化剂 (如 Fe-Co 双金属或 Fe₃C₂ 碳化物) 通过费托合成 (FTS) 路径将 CO₂ 经逆水煤气变换 (RWGS) 生成 CO, 进一步合成 C₂₊ 液态烃类燃料, 具有高链增长能力^[51]。分子筛复合催化剂 (如 SAPO-34、ZSM-5 与金属氧化物物理混合) 通过限域效应与酸性位点调控中间体扩散与 C-C 偶联, 在 CO₂ 加氢制芳烃或异构烷烃中展现高选择性^[52]。近年来, 我国在 CO₂ 加氢催化材料领域成果显著, 随着原位表征与理论计算技术的进步, 催化剂设计正从“试错法”向“构效关系导向”的精准合成转变, 为 CO₂ 加氢

技术的工业化落地注入新动能。

中国科学院大连化学物理研究所李灿院士团队合成的 ZnO-ZrO₂ 固溶体催化剂表现出优异的甲醇选择性和产率, 其在千吨级“液态太阳燃料合成示范项目”的工业化装置上甲醇选择性达到 98%, 甲醇纯度达到 99.5%, 催化剂抗中毒和抗烧结, 运行 1000 h 以上无明显失活^[53]。此外, 2024 年中煤鄂尔多斯能源化工有限公司 1×10⁵ t/a “液态阳光”项目二氧化碳精制及甲醇装置桩基础开始施工, 标志着国内首个拥有 100% 自主知识产权的全流程“液态阳光”二氧化碳加绿氢制甲醇工业化 1×10⁵ t 示范项目正式开工建设^[54]。2025 年由华东理工大学开发的燃煤电厂烟气二氧化碳捕集制甲醇万吨级项目, 在 CO₂ 转化制甲醇工段中通过对 Cu-ZnO-Al₂O₃ 催化剂进行元素掺杂有效提升了催化剂在高水含量下的催化活性, H₂ 和 CO₂ 的转化率 >99%, 甲醇选择性 >99%, 并在上海外高桥第三发电有限责任公

司连续运行 72 h, 顺利通过性能试验考核^[55]。

在 CO₂ 制备低碳烯烃方面, 太原理工大学李聪明团队开发的 ZnFeAlO₄/SAPO-34 复合催化剂, 通过分步路径 (CO₂ → CO → CH₃OH → 烯烃), 结合尖晶石中 Fe/Zn 活性位与分子筛酸性调控, 实现 CO₂ 转化率达 42%、烯烃选择性为 83%, 收率达 18%, 稳定性超 450 h, 解决了活性与选择性难以兼顾的难题^[56]。在 CO₂ 制备高碳烯烃方面, 中国科学技术大学曾杰团队构建了 Cu-Fe₃C 界面催化剂, 利用 Fe₃C 的高 CO 亲和力与 Cu 的加氢能力, 协同在常压下实现长链烯烃的高效合成, 在 320 °C, 1 bar (H₂:CO₂=3:1), 空速为 2400 h⁻¹ 的反应条件下, 该催化剂对 C₄₊ 烯烃选择性高达 66.9%, 同时 CO₂ 转化率为 27.3%, CO 选择性为 43.7%, 为 C—C 键可控增长提供了新策略^[57]。

催化材料的作用机理深刻影响着 CCUS 技术中 CO₂ 资源化利用的路径与效率。在 CO₂ 加氢制甲醇过程中, 对长久以来存在争议的甲酸盐 (HCOO*) 机理的进一步揭示是优化催化剂设计的关键^[58,59]。该机理表明, CO₂ 在金属-氧化物界面位点上加氢生成甲酸盐中间体, 并进一步转化为甲醇, 因此催化剂设计侧重稳定甲酸盐中间体, 精准调控反应路径, 抑制副产物 (如 CO) 生成, 直接提升甲醇的选择性与产率。在更具挑战的 CO₂ 制烯烃过程中, 则需要通过氧化物与分子筛的精准匹配来实现“接力催化”^[60,61]。该过程通常采用复合催化剂 (如 ZnZrO_x/SAPO-34), 其机理核心是分工与协同: 氧化物组分如 ZnZrO_x 负责将 CO₂ 活化和初步加氢, 高选择性地转化为甲醇等中间体; 随后这些中间体在分子筛组分 (如 SAPO-34) 的择形孔道和酸性位点上发生 C—C 键偶联, 最终生成目标烯烃。二者的匹配程度——包括空间距离、酸性强度和孔道结构直接决定了中间体的传递效率与最终产物的分布, 是实现高烯烃选择性的决定性因素, 推动了 CCUS 技术从简单转化迈向复杂高值化学品的高效合成。

2. 关键材料面临的挑战与发展趋势

当前, 实验室研制的 CO₂ 加氢催化剂尽管已取得很多突破, 但与工业需求相比, 仍存在难以满足的指标。① 活性与选择性矛盾。目前 CO₂ 加氢制甲醇的转化率与甲醇选择性在多数催化剂上难以兼顾, 而工业需求中 CO₂ 转化率在高于 20% 的基础上希望甲醇选择性高于 90%。② 长期稳定性不足。目前高温下催化剂中金属烧结、积碳等问题难以解

决, 且工业 CO₂ 原料气中往往含有硫化物、卤素等杂质, 容易进一步加剧催化剂失活。

除了上游绿氢成本需要大幅度降低之外, 针对当前 CO₂ 加氢催化剂材料性能不足, 未来技术创新可考虑从以下几个方面出发: ① 催化反应机理明晰。CO₂ 加氢反应涉及到多步中间体加氢过程, 目前动力学机制尚未完全明确。未来的催化剂设计需从“试错”转向“机理导向的精准构建”。利用原位表征和理论计算, 明确活性位点在真实反应条件下的动态演变规律。② 催化剂结构与优化。设计多活性位点 (如金属-氧化物界面结构) 以平衡 CO₂ 加氢历程中吸附/活化和中间体加氢速率, 优化催化剂结构提升活性位点分散度与催化剂传质效率。在此基础上, 设计多活性位点协同的催化剂, 分别优化 CO₂ 活化与中间体加氢步骤, 发展提升抗烧结与抗中毒能力方法。③ 工艺集成设计与创新。设计膜催化反应器分离加氢过程中生成的水以突破反应热力学限制, 耦合催化剂原位再生工艺进一步提升催化剂稳定性。产业化推进中可通过建立百吨级催化剂中试平台验证规模化制备过程中放大效应, 并跨产业链合作构建“绿氢-CO₂-甲醇”一体化产业体系。

(二) 高温电催化二氧化碳还原材料体系

1. 研究进展

电化学转化 CO₂ 为高附加值化学品, 不仅可以助力 CO₂ 减排与资源化利用, 还可以实现可再生电能向化学能的转化, 为构建碳循环利用的能源体系提供有效途径。SOEC 在 600~800 °C 工作, 具有电极过电势低、反应动力学速率快以及全固态结构易于模块化集成等优点, 是电催化 CO₂ 还原领域的一个重要分支^[62]。SOEC 能够高效电解 H₂O/CO₂, 将电能和热能以化学能的形式储存在 H₂、合成气、烃类燃料或 O₂ 中, 进一步可制取甲醇、汽油及其他工业燃料, 具有高效、低污染的优点, 是一种很有前景的能源转化和储存技术。

固体氧化物燃料电池 (SOFC) 和 SOEC 具有高效、低碳的特性, 在丹麦、德国、美国等国家已经开始向产业化发展, SOFC/SOEC 技术也有望成为实现“双碳”目标的重要助力之一。SOEC 为阴极/电解质/阳极三明治结构, 阴极常用材料为金属-陶瓷基复合电极, 如 Ni-YSZ (Zr_{0.84}Y_{0.16}O₂)、

Ni-GDC ($Gd_{0.2}Ce_{0.8}O_{1.9}$) 等；此外，基础研究比较广泛的是钙钛矿氧化物电极材料，钙钛矿材料具有优异的电子-离子混合导电性和氧化还原稳定性，并且具有良好的抗积碳性能，因此被广泛研究。电解质材料通常包括 ZrO_2 基氧化物，如 8YSZ ($Zr_{0.84}Y_{0.16}O_2$)、3YSZ ($Zr_{0.94}Y_{0.06}O_2$)、SSZ ($(Sc_2O_3)_{0.1}(CeO_2)_{0.01}(ZrO_2)_{0.89}$) 等；阳极常用材料包括 $La_{1-x}Sr_xMnO_{3-\delta}$ (LSM)、 $La_{1-x}Sr_xCo_{1-y}Fe_yO_{3-\delta}$ (LSCF)、PBM ($PrBa_{0.5}Sr_{0.5}Co_{1.5}Fe_{0.5}O_{6-\delta}$) 等混合离子-电子导体钙钛矿氧化物材料。近 5 年内，全球高温固体氧化物电解池 CO_2 电解研究相关文献发表量陡增，我国在 SOEC 电解 CO_2 关键催化剂材料及反应体系研究方面处于领先地位。

2023 年年底，中国科学院上海应用物理研究所与中海石油气电集团有限责任公司技术研发中心组成 SOEC 联合研发团队在“中国科学院变革性洁净能源关键技术与示范专项”和“中国海洋石油集团公司 CCUS 专项”的共同支持下，结合前期研究成果，掌握了高温共电解制备合成气的关键技术。团队采用模块化设计理念，成功研制了 10 千瓦级高温共电解装置，其电解池核心是以 Ni/YSZ 电极支撑的平板式电池板，以此叠层构成电堆单元。该装置电解功率最高为 10.14 kW，装置稳定运行达 210 h。该技术的突破代表着电力经由合成气转天然气、电力转燃料、电力转化学品等技术将走出实验室，未来通过储能、能源转换等方式将电力、热力、运输以及工业紧密联系起来。基于可再生能源制备的绿色燃料将取代石油、天然气、煤等传统化石燃料成为“主要能源”，为“双碳”科技创新提供关键的技术支撑，推动我国能源低碳转型。

近年来，固体氧化物电解系统规模放大技术和示范运行在国内外备受关注，国内以北京思伟特新能源科技有限公司、浙江氢邦科技股份有限公司 / 中国科学院宁波材料技术与工程研究所、北京质子动力发电技术有限公司、潮州三环（集团）股份有限公司、宁波索福人能源技术有限公司等机构为代表，拥有十千瓦级以上电解堆开发工艺。然而，高温共电解技术尚处于产业化初期，仍需克服材料、催化剂等方面的技术瓶颈。未来，随着技术的进一步成熟，基于高温共电解的电化工技术路线能耗水平与经济有望进一步改善。

2. 关键材料面临的问题与发展趋势

SOEC 共电解 CO_2 商业化仍面临巨大的挑战，

特别是电堆性能不足以及长时间运行过程中的衰减问题。首先是 SOEC 关键材料的研发不足，如高性能电极电解质材料，高性能下长期稳定运行的材料依然匮乏；其次是电堆系统问题，电堆内部气体扩散传质受限，存在温度梯度等影响其运行寿命。因此应延长电解池运行稳定性，同时降低设备成本、提高自动化生产程度以降低制合成气成本，提高竞争力。与国外相比，我国相关技术发展起步较晚，国内 SOEC 系统可以达到几十千瓦级别，个别企业可达到百千瓦级，而国外已经迈入到 MW 级别。因此在 SOEC 电解和共电解 CO_2 应用方面，仍需核心元件和关键材料如电极 / 电解质材料，密封体材料、集流体材料等的突破以进一步突破系统耦合技术壁垒，降低系统成本等。技术方面主要包括电堆电场分布、气体流场分布及温度场分布的优化，提高系统匹配集成以发展低成本、高效、稳定的 SOEC 电解系统。因此，在 SOEC 电解 CO_2 关键材料方面有待突破。

(1) 在电解质材料方面：基于氧化锆基的电解质材料是目前 SOEC 电解制氢及 CO_2 共电解的首选。目前对电解质部分优化的主要研究挑战是缺乏电解质薄膜化技术。制备更薄、稳定性更好的电解质层，可以进一步减少电解的欧姆损失，大幅度地提升电解性能，在安培级工业电解电流密度下，提升 SOEC 长期运行稳定性，延长更换周期，对于推进该技术的尽快实用化和降低成本具有重要意义。

(2) 在电极材料方面：近年来的研究一般认为高温高湿的环境对燃料电极侧材料稳定性的影响更大。目前燃料电极常用的 Ni/YSZ 电极材料在 SOEC 模式下长期稳定性不足。当其运行环境不能长期保持还原性（或惰性）气氛时，燃料电极的结构会被破坏从而导致性能的衰减。目前已经有大量旨在替代现有 Ni/YSZ 燃料电极的研究，主要研究方向是具有混合离子-电子电导的钙钛矿类材料。

(3) 在阴阳极反应方面：SOEC 共电解制合成气涉及两个重要的基本反应，即阴极水和 CO_2 的还原及阳极氧的析出。其中制约电解性能的关键是阳极上所发生的氧析出反应。氧电极（阳极）相对于氢电极（阴极）有更大的过电位需求，是主要的极化损失来源。如何对氧电极进行有效活化，以降低极化损失，是国际热点问题。

(三) 常温电催化二氧化碳还原材料体系

1. 研究进展

电催化 CO_2 还原反应 (CO_2RR) 作为一种可持续的碳循环策略, 能够利用可再生电力将 CO_2 转化为高附加值的燃料和化学品。铜基催化剂因其在 C—C 偶联反应中的独特活性而受到广泛关注, 能够生成多碳产物, 如烃类和含氧化合物。同时, 电催化还原 CO_2RR 是一个非常复杂的过程, 在气体—电极—溶液界面上包括多个步骤。因此构筑高效活性位点并且调控有助于反应的微环境非常重要。

(1) 关键催化剂材料: 中国科学院上海高等研究院开发的 Zn 中空纤维透散电极 (Zn HPE), 在 $8 \times 10^2 \text{ mA/cm}^2$ 下连续运行 110 h, CO 法拉第效率保持 90%。透散结构通过多孔壁强制 CO_2 向电解液渗透, 大幅提升 CO_2 传质效率和局部浓度, 电极材料成本仅 406 元/tCO^[65]。北京理工大学通过十二烷基硫醇 (DDT) 修饰 CuO 分层纳米结构, 在 -1.2 V vs. RHE 下乙烯 FE 达 80%, 电流密度提升至 $3.5 \times 10^2 \text{ mA/cm}^2$, 突破了传统铜基催化剂选择性低、稳定性差的瓶颈, 从分子尺度的表面工程精准调控了催化剂活性位点的电子结构与反应路径^[64]。

(2) 膜材料: 西湖大学孙立成院士团队设计的一种由纤维素纤维与果胶协同作用构建的微孔结构和连续氢键网络的仿生离子溶剂化膜, 在室温下 (饱和 1 M KOH 溶液) 实现了 282.3 mS/cm 的高离子电导率。当 CO_2RR 流动池中平均电压分别为 2.98 V 和 2.55 V 时, 实现了 $5 \times 10^2 \text{ mA/cm}^2$ 的高电流密度^[65]。荷兰代尔夫特理工大学研究表明, BPM 系统在反向偏置下可实现 CO_2 高选择性还原, 但需通过超薄层设计 (<50 μm) 和水离解催化剂 (如 IrO_2) 降低电池电压至 2.5 V 以下, 目前实验室最高 FE 为 75%^[66]。江苏大学许晖团队开发的 APMA-MEA 体系 (AEM 与 PEM 复合), 在纯水供给下实现电堆 10 A 稳定运行超 1000 h, 乙烯 FE 为 50%。通过膜间电场调控抑制碳酸盐沉淀, 解决传统 AEM 碱性环境导致的盐析问题^[67]。

(3) 电堆关键材料涉及电解液、气体扩散层以及电组件等的优化: 中国科学院上海高等研究院使用具有分层微 / 纳米结构的中空纤维银渗透电极 (CD-Ag HPE), 在强酸电解液 (pH=1) 中, 通过平衡 CO_2 和 K^+/H^+ 供应, 实现局部电流密度高达 4.3 A/cm^2 时, 95% 的 CO 法拉第效率, 并在 2 A/cm^2

电流密度下连续电解 200 h, CO_2 单程转换率超过 85%^[68]。中国科学院大连化学物理研究所邓德会团队开发的膜电极电解池通过外循环阳极电解液, 降低内阻并提升 CO_2 转化效率, 电流密度可达工业级水平 ($>200 \text{ mA/cm}^2$)^[69]。英国庄信万丰 (Johnson Matthey) 公司推出的模块化电堆系统 (JM- $\text{CO}_2\text{ER-100}$), 采用碳纤维增强钛合金框架, 电流密度达 5 A/cm^2 , CO 选择性为 90%, 已完成 100 千瓦级中试, 计划在德国建设首个商业化示范工厂。

(4) 电堆应用示范: 中国科学院上海高等研究院研制的 Zn HPE 电堆实现安培级 CO_2 转化, CO 产品成本降至 2700 元/tCO, 接近工业合成气成本 (2100~2800 元/t), 为工业级应用提供经济性参考^[63]。厦门大学膜电极系统在高电流密度 (1 A/cm^2) 下保持 C_2 产物高选择性, 展示膜电极技术的规模化潜力^[70]。江苏大学 APMA-MEA 体系可实现电堆在总电流 10 A 下稳定运行 1000 h 以上, 乙烯 FE 达 50%, 验证了纯水供给系统的可行性^[67]。

2. 关键材料面临的问题与发展趋势

(1) 催化剂稳定性差: 锌基催化剂长期运行后易发生团聚 (寿命 <500 h), 铜基催化剂在高电流密度下易中毒失活 (如 CO 吸附饱和)。

(2) 膜材料成本高: 高性能 AEM 成本高达 1400~2100 元/ m^2 , BPM 需要稀有金属作为催化剂, 限制了工业化推广。

(3) 能量效率低: 当前电堆能量转化效率普遍 <40%, 远低于化石燃料工艺 (60%~70%)。

(4) 产物分离复杂: 混合气体 (CO 、 C_2H_4 、 H_2) 分离能耗占总成本的 30% 以上, 缺乏高效集成技术。

当前的常温电催化 CO_2 还原技术已逐步从基础研究迈向应用验证阶段, 其核心突破体现在催化剂选择性提升 (如单原子体系)、反应器传质优化 (如流动池设计) 及能量效率突破 (部分体系能量转化效率接近 50%)。未来的研究将迈向“催化剂—微环境—反应器”的系统性优化。在催化剂层面, 设计核壳结构、应力调控催化剂以增强稳定性; 在微环境层面, 通过修饰气体扩散层、调控电解液局部 pH 值来优化反应界面; 在反应器层面, 开发高通量、低电阻的膜电极, 并优化流场设计以强化传质。最终目标是构建能够适应可再生能源波动、兼具高电流密度、高选择性与长寿命的完整电解系统。

(四) 光催化二氧化碳还原材料体系

1. 研究进展

光催化二氧化碳转化为高附加值产物在缓解温室效应和解决能源危机方面备受关注。光催化是一种利用光能驱动化学反应的绿色催化方法，具有重要的研究价值。光催化剂通常分为均相光催化剂和多相光催化剂两种。与均相光催化剂相比，多相光催化剂在保持高催化活性的同时，具有可回收和可重复使用的优势，使其在工业应用中更具前景。包括 CO_2 光催化还原制甲烷、 CO 、低碳烃等 Cu 基氧化物/半导体载体双功能复合催化剂($\text{CuO}_x/\text{TiO}_2$ 、 BiVO_4 、 InVO_4 、 ZnO 、 MOF 、 COF 、 $\text{Zn}_3\text{V}_2\text{O}_8$ 等)^[71]。其主要用到的催化剂材料有如下几种。

(1) MOFs 等晶态多孔材料因高孔隙率、高比表面积和结构可调等优点，在光催化还原二氧化碳领域得到了广泛应用^[72]。气-液-固相反应体系由于反应温度接近室温、催化剂易于分散等优点，适用于这类含有有机基团的 MOFs 光催化剂。

(2) COFs 材料通常具有高度有序的结构、大比表面积以及良好的热稳定性，广泛应用于气体储存与分离、催化、传感、能量存储以及光电转换等领域。近年来，随着对 COFs 研究的不断深入，人们发现 COFs 在光照下能够实现电荷分离，结合其可设计的孔隙结构， COFs 已成为潜在的光催化剂^[73]。

(3) 二维(2D)钙钛矿在光催化条件下更稳定，与三维(3D)钙钛矿相比，具有较好的激子特性。2D钙钛矿具有高稳定性、极化子形成、量子阱结构和高激子结合能等独特的物理和化学性质，在光催化 CO_2 还原(pCO_2RR)方面仍有待开发。通过改变层厚度和间隔阳离子，2D钙钛矿比3D钙钛矿更容易调整这些特性。因此，2D钙钛矿光催化剂是一种很有前途的材料，可以将 CO_2 还原成有价值的产品^[74]。

(4) 过渡金属碳/氮化物(MXene)因其导电性能优异、性质高度可调以及活性位点丰富，在很多领域受到了研究者的广泛关注。不少研究者将 MXene 引入光催化还原 CO_2 体系中，借助 MXene 优异的性质进一步提升现有光催化还原 CO_2 体系的活性和稳定性^[75]。

2. 关键材料面临的问题与发展趋势

光催化 CO_2 还原可以在温和的条件下实现 CO_2

的转化、利用，同时降低 CO_2 排放、促进碳中和。然而，尽管近年来光催化还原 CO_2 的研究取得了重大的突破，但仍存在太阳能利用率低、光催化材料对 CO_2 吸附性能差以及对 CO_2 活化和光生电子-空穴分离效率考虑不足等问题，所以碳氢化合物的产率依然很低。光催化还原 CO_2 关键材料的发展方向主要体现在以下几个方面。

(1) 提高光催化剂的效率：当前的研究方向包括改进光催化剂的结构和物理性质，以提高其光吸收效率和催化活性。例如，通过掺杂其他元素或形成复合材料来扩展光催化剂对光的吸收范围，使其更有效地利用可见光。

(2) 促进反应过程中电子和空穴的分离：在光催化反应中，电子和空穴的快速有效分离是提高反应效率的关键。相关研究正在探索不同的催化剂设计和制备方法，以降低载流子复合率，从而增强光催化效果。

(3) 光热催化技术的结合：光热催化是一种将光催化与热能结合的策略，旨在通过吸收太阳光谱来激发热化学和光化学过程的结合，从而在较温和的条件下进行高效的 CO_2 转化。

(4) 催化剂的工程化应用：将光催化剂固定在载体上，以提高其稳定性和重复利用性，是另一个重要的研究方向。此外，开发适用于大规模应用的光催化反应器也是当前的一个研究重点。

(5) 反应机理的深入研究：通过对光催化 CO_2 还原反应的详细机理进行研究，可以更好地理解反应过程，为开发更高效的光催化剂提供理论依据。

光催化技术作为一项战略性新兴产业技术，在推广和应用过程中仍面临挑战。在政策与经费的支持下，随着新型体系、新型结构的高效光催化剂的开发，需开展光吸收、气体吸附、气体活化与光生载流子基本行为等诸多因素最佳匹配的物理参数调控，光催化材料纳米尺度的多功能化集成式设计，以及太阳能高效利用、超强气体吸附与高效气体转化的光还原反应体系的最终建立。未来光催化还原 CO_2 技术的大规模商业化应用前景广阔。催化剂的终极目标是实现高效的人工光合作用，未来发展将围绕全光谱响应、载流子分离与表面反应三大瓶颈展开。具体包括：建立太阳能光催化 H_2O 分解与 CO_2 还原的耦合系统，通过太阳能光催化制 H_2 ，然后将 CO_2 经催化加氢转化为 CH_3OH 和其他化

学品等，并以 H_2 或 CH_4 驱动现有以化石燃料为驱动力的机器，同时建立完善的 CO_2 捕集系统，实现以太阳能为基础的能源体系的可持续发展。最终，通过材料-反应器的跨尺度集成设计，实现太阳能到化学能转化效率的跨越式提升。

（五）二氧化碳捕集与利用集成技术材料体系

1. 研究进展

二氧化碳捕集与利用集成技术 (ICCU) 作为 CCUS 领域的前沿方向，通过将传统的碳捕集、再生、压缩、运输和转化等多个高能耗步骤集成在单一反应器内完成，实现了工艺流程的革命性简化。这种技术范式的转变不仅大幅降低了系统复杂度和设备投资成本，更重要的是通过过程集成实现了能量的高效耦合与利用。研究表明，ICCU-甲烷化过程所需煤耗约为传统碳捕集与利用 (CCU) 路线的 1/3，这一能效提升主要得益于消除了中间环节的能量损失^[77]。在考虑碳税政策的情景下，ICCU-甲烷化生产的甲烷成本可降至 3680 元/t，已十分接近当时 3560 元/t 的天然气市场价格^[78]。这一数据表明 ICCU 技术已初步具备市场竞争力。此外，在合成气生产方面，ICCU 路线同样表现出色，其生产成本约为 5040 元/t，远低于传统 CCU 路线的 7028 元/t^[79]。

双功能材料 (DFMs) 作为 ICCU 技术的核心，其性能直接决定了整个系统的效率。近年来，DFMs 的研究在材料设计和性能优化方面取得了显著进展。在材料设计方面，研究者通过精妙的纳米结构调控实现了吸附位点与催化位点的协同增效。例如，吴春飞团队开发的 Ni/CaO 体系通过构建高度分散的 Ni 纳米团簇与 CaO 基底的紧密界面，在 ICCU-甲烷化反应中实现了超过 95% 的 CO_2 转化率和接近 100% 的甲烷选择性^[80]。这种优异的性能源于材料独特的界面特性：Ni 纳米团簇提供了优异的加氢活性，而 CaO 基底不仅作为 CO_2 吸附剂，还通过金属-载体相互作用稳定了 Ni 纳米颗粒，防止其在高湿条件下烧结。除了传统的金属-氧化物体系，新型 DFMs 的设计理念也在不断拓展。研究人员开发了多功能复合材料，如中国科学院上海高等研究院魏伟团队报道的 Ni-MgO- Al_2O_3 层状纳米片，该材料通过二维限域效应同时实现了高 CO_2 吸附容量和优异的甲烷化活性^[81]。

在机理研究方面，DFMs 中的 CO_2 转化可能遵循两种路径：一是碳酸盐物种直接在界面处加氢转化；二是碳酸盐先分解为 CO_2 再在催化位点上加氢^[77]。具体路径的选择取决于吸附剂-催化剂的组合方式及反应条件。例如，在强碱性位点存在的条件下，甲酸盐路径往往占主导地位；而在弱碱性环境中，RWGS 路径更为有利。

2. 关键材料面临的问题与发展趋势

(1) 材料稳定性。尽管 ICCU 技术前景广阔，但其产业化进程仍面临多重挑战，主流吸附剂如 CaO 在循环使用过程中面临严重的性能衰减问题。这主要源于两个机制：一是高温下的烧结现象导致比表面积减少和活性位点密度下降；二是碳化/再生循环中伴随的显著体积变化（从 CaO 的 $16.9 \text{ cm}^3/\text{mol}$ 到 $CaCO_3$ 的 $34.1 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ）引起的机械应力，导致颗粒破裂和活性位点包覆。

(2) 过程匹配性。不同目标产物对应的最佳操作条件存在显著差异，导致“温度/压力匹配”矛盾。例如， CO_2 甲烷化的最佳温度窗口为 300~500 $^\circ\text{C}$ ，而甲醇合成则需要 200~350 $^\circ\text{C}$ 的中温和较高压力。这种不匹配严重制约了 DFMs 的设计和系统优化。

(3) 实际环境适应性。实际工业烟气中的杂质组分（如 O_2 、 H_2O 、 SO_2 等）对 DFMs 的稳定性构成严重威胁。 O_2 会导致金属催化剂的氧化失活， H_2O 会竞争吸附位点并加速材料烧结， SO_2 则会引起不可逆的硫酸盐化中毒。研究表明，即使在含有少量 O_2 (6.7%) 和 H_2O (6%) 的模拟烟气中，Ni-CaO DFMs 的性能也会显著下降^[81]。此外，低含量 NO_x 会对吸附剂产生严重的不可逆影响^[82]。

基于当前 ICCU 技术的研究现状和挑战，未来的发展重点应集中在以下几个方向：① 设计开发具备自修复功能的新一代智能 DFMs（如多孔框架材料、高熵氧化物等），能够在循环过程中自动修复结构缺陷，可根据进气组成自动调节表面性质，提高长期稳定性。开发具有宽温度适应性的 DFMs，设计分级反应系统实现温度区间的优化配置；② 围绕过程及系统的集成优化，开发新型反应器构型增强传质传热效率，优化循环策略提高时空产率，探索与可再生能源的耦合，利用波动性的可再生能源驱动 ICCU 过程；③ 推进中试验证和示范工程建设，在接近真实的工况下评估 DFMs 的长期性

能，建立寿命预测模型，并开展全生命周期评价，为技术商业化提供可靠的数据支撑。

四、发展建议

（一）碳捕集关键材料

碳捕集材料体系的进阶发展需要构建“性能突破—成本控制—工程验证”三位一体的技术路线。当前核心攻关方向聚焦新型材料体系研发、能效系统优化及产业化验证三个维度，需突破从材料分子级设计到工业放大的全链条技术壁垒，实现高效低成本的CO₂捕集。目前我国已部署相关科技研发任务，重点攻关CO₂捕集关键技术，致力于开发高性能碳捕集材料，突破大规模碳捕集关键技术，优化捕集工艺，缩短流程，降低建设投资及运行能耗，并实现50万至100万吨级低能耗碳捕集工业示范。相关技术成熟后，其能耗和成本将比现有技术降低30%以上，预计到2035年将得到广泛应用。

1. 研发新型碳捕集材料系统

研发新型碳捕集材料系统是实现低浓度、多气源和多应用场景下高效、低能耗CO₂捕集技术突破的关键。在吸收法方面，当前研究正聚焦于通过分子设计优化溶剂的黏度与溶解性、开发抗降解的胺类混合溶剂以及集成低能耗再生工艺。未来研究方向包括提高吸收能力、降低溶剂成本、减少再生的能量需求、提高溶剂稳定性并减少降解、减少溶剂引起的腐蚀以及减少对环境的影响。通过新型吸收材料的开发，进一步提升CO₂捕集效率并降低整体能耗和成本。在吸附法方面，未来的研发方向包括研发和设计具有特定场景所需的定制吸附剂材料；加深对分子、微观和宏观结构水平及其与吸附剂材料特性关系的理解；提高吸附剂的长期反应性、可回收性和稳健性；优化吸附剂在工艺中的集成。在膜分离方面，未来的研发方向包括加深对新型膜材料界面传输现象的理解，以提高其渗透性和选择性性能；通过功能化改性、纳米填料掺杂等手段提升CO₂捕集效率；设计和制造大规模、低成本膜结构或模块化单元方法；针对复杂工况开展膜材料稳定性的系统性改进，提高膜的寿命和对气体进料中污染物有害影响的抵抗力以降低运行成本和能耗，确保膜分离技术在碳捕集中的实用性。

2. 降低碳捕集能耗与运营成本

降低碳捕集能耗与运营成本是实现碳捕集技术大规模推广应用的重要前提。首要任务在于优化再生工艺，通过改进吸附剂结构设计，显著降低材料在CO₂捕集过程中的再生能耗。在这一过程中，采用低温操作、闪蒸、多级膜分离等工艺技术，利用温度、压力梯度实现CO₂的有效解吸，不仅可以降低热能和电能消耗，还能有效控制副产物生成，保障系统稳定运行。同时，通过引入新型相变溶剂及催化剂体系，在分子层面降低解吸能垒，加速解吸速率，进一步提升整体能效。其次，在生产和运营环节，通过改进合成方法，采用低成本原料及高效催化反应，实现材料合成过程的绿色化、自动化和标准化，有效缩短生产周期，降低设备投资与维护成本。工艺集成与模块化设计的应用，将进一步提升系统整体经济性。最后，通过优化捕集工艺、热能回收和智能化监控，构建高效能量利用链，使材料在多次循环使用中保持性能稳定，实现能源消耗与捕集效率的最佳平衡。综合这些措施，既能够降低碳捕集系统的运营成本，又有助于推动技术从实验室向工业化大规模应用的转化，为未来低碳经济提供可行的技术支撑。

3. 建设规模化示范项目

建设规模化示范项目是验证碳捕集关键材料与技术在工业环境中应用性能的重要途径，也是实现碳捕集产业化转型的关键环节。当前技术路线应以实验室研发成果为基础，通过中试和示范项目不断验证材料在高浓度、复杂气体工况下的吸附、解吸与长期稳定性。在电力、化工、钢铁等高排放行业，依托中大型示范工程，构建从原料供应、生产工艺、设备集成到系统调控的全流程产业链，确保碳捕集材料在不同工况下均能实现高效稳定运行。同时，建设示范项目还需注重经济性和环境效益的综合平衡，通过实时监控、数据反馈和工艺优化，及时解决现场应用过程中出现的技术瓶颈。此外，应加强跨行业、跨学科的协同合作，推动“产学研”联合，通过政策支持、财政补贴、碳定价等激励措施，以及国际技术交流与合作，形成有利于技术成果转化和产业规模化推广的良好生态。预计到2035年，将实现第二代、第三代碳捕集材料在能源密集型行业的大规模部署，为实现全球碳中和目标提供坚实的材料与技术支撑。

(二) 碳转化关键材料

CO₂催化还原技术的发展目标主要包括提高效率、降低成本和推动产业化应用。新兴碳转化利用技术正处于从实验室走向市场的关键期,建议构建“技术-政策-市场”协同生态,通过技术创新降本、政策精准激励、产业链协同破局,打通“减排-增值”闭环,真正释放其规模化应用潜力。CO₂催化还原技术将致力于以下几个方面的发展。

1. 提高碳转化材料催化效率并降低成本

当前,CO₂催化还原技术面临的主要挑战之一是催化效率较低,导致产率不高。为了解决这一问题,科研人员正在探索新的催化剂材料和反应条件,以期提高催化反应的选择性和产率。例如,开发高效的催化剂材料(如金属纳米材料),以及优化反应条件(如调整温度、压力和反应时间)都是提高催化效率的有效途径。突破关键催化剂和核心反应器,提升催化剂寿命、原料转化率和产物选择性;攻关低成本高效节能反应体系。通过优化催化剂性能,采用无循环工艺流程,提升能量利用率,降低能效损失。从原料成本角度,充分利用炼化、煤化工装置副产CO₂纯度高的特点,开展CO₂规模化捕集、转化示范,同时将当地水泥、钢铁等行业排放的CO₂纳入规模化捕集范围,降低单位捕集成本;从能源消耗角度,利用风能、太阳能、地热能等可再生能源生产绿电和绿氢,尤其是充分考虑我国可再生能源地域分布不均、间歇性强等特点,发挥地缘优势,利用废弃的可再生能源耦合化工耗能过程,为CO₂化工利用提供低成本的能源支持。

2. 推动碳转化技术的产业化应用

为了实现CO₂转化利用技术的产业化推广,需要解决规模化生产中的技术难题和经济效益问题。这包括建立从实验室研究到工业应用的桥梁,确保技术的稳定性和可靠性;强化工艺集成优化,推动绿电-绿氢-化工耦合,例如通过“风光储”一体化系统匹配电解制氢与CO₂转化协同,降低间歇性供电导致的能效损失。构建规模化效应,降低绿氢成本和CO₂捕集成本,进一步降低原料成本。通过设备大型化来降低单位生产成本,建立科学、统一的全生命周期评价体系,推动产业规范化、规模化发展。持续加大对基础研究的支持力度,设立专项基金激励,鼓舞科研团队瞄准国际前沿,聚焦制约

CO₂化工利用技术规模化发展的关键科学问题,开展前瞻性、创新性研究,力求颠覆性突破。鼓励高校、科研机构和企业以多元化的合作模式,将CO₂化工利用技术研究打造为校企合作的创新平台典范,建立“基础研究-中试验证-工程设计”全链条“产学研”协同创新的长效机制,着力提高科技创新效能,以创新驱动CO₂化工利用产业优化升级。

3. 相关政策支持

为了推动CO₂催化还原技术的发展和應用,政府和相关机构提供了多项政策支持。例如,设立专项基金激励科研创新,鼓励高校、科研机构和企业合作开展前瞻性、创新性研究;优化生产成本,利用可再生能源降低单位捕集成本;以及通过政策引导构建良好的产业发展环境等。国家层面需加大CO₂加氢制备高附加值化学品研发力度,设立国家专项基金以支持机理研究与应用开发,制定CO₂化工利用中长期产业化发展规划、科技支撑规划和实施计划,着力搭建上中下游全产业链联动平台,加快从散点探索迈向体系化布局;构建“CO₂捕集-制氢-高值化学品合成”示范网络项目,完善电价与碳税相关政策体系和实施细则,提高企业规模化推进CO₂化工利用技术示范工程的积极性和主动性;建立健全CO₂化工利用技术的标准计量和质量认证体系,完善评价标准,为技术推广、项目建设与管理、风险管理等环节提供可遵循的标准,加强对行业的监管和管理。建议强化财税激励,对CO₂衍生品实行增值税即征即退,对首台(套)装备给予一定的购置补贴。探索“碳汇银行”模式,通过金融手段进行资源优化配置,支持企业质押碳资产获取低息贷款。强制市场创造,在政府采购、重大工程中设定排放CO₂材料最低使用比例等。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: July 28, 2025; **Revised date:** October 27, 2025

Corresponding author: Fan Yiqun is a professor from the Suzhou Laboratory and College of Chemical Engineering, Nanjing Tech University. His major research field is materials-oriented chemical engineering. E-mail: fanyq@szlab.ac.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Green and Low-carbon Development Strategy of New Chemical Materials in China” (2024-XBZD-09)

参考文献

- [1] 张贤, 杨晓亮, 鲁玺. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告 [R]. 北京: 中国21世纪议程管理中心, 全球碳捕集与封存研究院, 清华大学, 2023.
Zhang X, Yang X L, Lu X. China carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) annual report (2023) [R]. Beijing: The Administrative Center for China's Agenda 21, Global CCS Institute, Tsinghua University, 2023.
- [2] 魏一鸣, 康佳宁, 刘兰翠, 等. 碳捕集技术发展前沿与趋势预测 [R]. 北京: 北京理工大学能源与环境政策研究中心, 2025.
Wei Y M, Kang J N, Liu L C, et al. Development frontier and trend forecast of carbon capture technology [R]. Beijing: Energy and Environmental Policy Research Center, Beijing Institute of Technology, 2025.
- [3] Zhang J T, Wang Z Y, Kang J N, et al. Several key issues for CCUS development in China targeting carbon neutrality [J]. Carbon Neutrality, 2022, 1(1): 17.
- [4] Furre A K, Meneguolo R, Ringrose P, et al. Building confidence in CCS: From Sleipner to the northern lights project [J]. First Break, 2019, 37(7): 81–87.
- [5] Wu X Z. Shenhua Group's carbon capture and storage (CCS) demonstration [J]. Mining Report, 2014, 150(1/2): 81–84.
- [6] Bai B, Lü G Z, Li X C, et al. Quantitative measures for characterizing the sealing ability of caprock with pore networks in CO₂ geological storage [J]. Energy Procedia, 2014, 63: 5435–5442.
- [7] Lu S J, Yang F, Zhang J J, et al. Research and design experience of a 150 kt/a CO₂ capture and purification project in the Shaanxi Guohua Jinjie power plant [J]. Separation and Purification Technology, 2023, 320: 124089.
- [8] Wu H Y, Li Q H, Sheng M L, et al. Membrane technology for CO₂ capture: From pilot-scale investigation of two-stage plant to actual system design [J]. Journal of Membrane Science, 2021, 624: 119137.
- [9] Chen W H, Chen S M, Hung C I. Carbon dioxide capture by single droplet using Selexol, Rectisol and water as absorbents: A theoretical approach [J]. Applied Energy, 2013, 111: 731–741.
- [10] McCann N, Phan D, Wang X G, et al. Kinetics and mechanism of carbamate formation from CO₂ (aq), carbonate species, and monoethanolamine in aqueous solution [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2009, 113(17): 5022–5029.
- [11] Goto K, Yogo K, Higashii T. A review of efficiency penalty in a coal-fired power plant with post-combustion CO₂ capture [J]. Applied Energy, 2013, 111: 710–720.
- [12] 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.
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.
- [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.
- [14] 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.
- [15] Hu X, Sun Q, Xiao M, et al. Energy reduction in phase-change absorbents: Bridging the gap between theory and practice with additives [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2025, 64(25): 12605–12615.
- [16] Hong S M, Li T, Xiao M, et al. A low energy-consuming phase change absorbent of MAE/DGM/H₂O for CO₂ capture [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 480: 148079.
- [17] Yang Y, Wang S N, Yang K H, et al. Organic solvents induced enhancement of phase-splitting behaviors and CO₂ absorption performance in biphasic absorbent [J]. Separation and Purification Technology, 2025, 362: 131798.
- [18] Geng Z B, Fu L, Yang Y, et al. Effect of sterically hindered amines on the cycling capacity of biphasic absorbents for industrial CO₂ capture [J]. Journal of Environmental Sciences, 2025, 157: 501–510.
- [19] Zhao F, Deng Y M, Li M Y, et al. Low-energy electrochemical CO₂-amine desorption driven by the proton-coupled electron transfer reaction (PCET) [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 495: 153217.
- [20] Bai L J, Zhao D F, Zhong X K, et al. Comprehensive technical analysis of CO₂ absorption into a promising blended amine of DEEA-HMDA [J]. Chemical Engineering Science, 2023, 280: 119025.
- [21] Mantripragada H C, Zhai H B, Rubin E S. Boundary Dam or Petra Nova—Which is a better model for CCS energy supply? [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019, 82: 59–68.
- [22] Ye Y, Zhao X L, Chen J, et al. Pilot-scale experimental study of a new high-loading absorbent for capturing CO₂ from flue gas [J]. Processes, 2022, 10(3): 599.
- [23] Yu J W, Wang S J. Modeling analysis of energy requirement in aqueous ammonia based CO₂ capture process [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 43: 33–45.
- [24] Mao J M, Yun Y B, Li M, et al. Dual-functionalized ionic liquid biphasic solvents with aqueous-lean for industrial carbon capture: Energy-saving and high efficiency [J]. Separation and Purification Technology, 2023, 315: 123722.
- [25] Soo X Y D, Lee J J C, Wu W Y, et al. Advancements in CO₂ capture by absorption and adsorption: A comprehensive review [J]. Journal of CO₂ Utilization, 2024, 81: 102727.
- [26] Nelson T O, Coleman L J I, Green D A, et al. The dry carbonate process: Carbon dioxide recovery from power plant flue gas [J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 1305–1311.
- [27] Fradette L, Lefebvre S, Carley J. Demonstration results of enzyme-accelerated CO₂ capture [J]. Energy Procedia, 2017, 114: 1100–1109.
- [28] Liu S N, Wei N, Jiang D L, et al. Emission reduction path for coal-based enterprises via carbon capture, geological utilization, and storage: China energy group [J]. Energy, 2023, 273: 127222.
- [29] Hou R J, Fong C, Freeman B D, et al. Current status and advances in membrane technology for carbon capture [J]. Separation and Purification Technology, 2022, 300: 121863.
- [30] Han Y, Winston Ho W S. Polymeric membranes for CO₂ separation and capture [J]. Journal of Membrane Science, 2021, 628: 119244.

- [31] Robeson L M. The upper bound revisited [J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, 320(1/2): 390–400.
- [32] Niu Z H, He N Y, Yao Y F, et al. Mixed matrix membranes for gas separations: A review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 494: 152912.
- [33] Brickett L, Munson R, Litynski J. U.S. DOE/NETL large pilot-scale testing of advanced carbon capture technologies [J]. *Fuel*, 2020, 268: 117169.
- [34] Merkel T, Baker R, Hao P, et al. Carbon capture with membranes: An opportunity revisited [J]. *Journal of Membrane Science*, 2025, 738: 124829.
- [35] Park H B, Kamcev J, Robeson L M, et al. Maximizing the right stuff: The trade-off between membrane permeability and selectivity [J]. *Science*, 2017, 356(6343): eaab0530.
- [36] Peng L E, Yang Z, Long L, et al. A critical review on porous substrates of TFC polyamide membranes: Mechanisms, membrane performances, and future perspectives [J]. *Journal of Membrane Science*, 2022, 641: 119871.
- [37] Gin D L, Noble R D. Designing the next generation of chemical separation membranes [J]. *Science*, 2011, 332(6030): 674–676.
- [38] Rahimi M, Khurram A, Hatton T A, et al. Electrochemical carbon capture processes for mitigation of CO₂ emissions [J]. *Chemical Society Reviews*, 2022, 51(20): 8676–8695.
- [39] Voskian S, Hatton T A. Faradaic electro-swing reactive adsorption for CO₂ capture [J]. *Energy & Environmental Science*, 2019, 12(12): 3530–3547.
- [40] Sun K G, Tebyetekerwa M, Zhang H X, et al. Electrode, electrolyte, and membrane materials for electrochemical CO₂ capture [J]. *Advanced Energy Materials*, 2024, 14(24): 2400625.
- [41] Liu J X, Yang M Y, Zhou X Y, et al. Solid-state electrochemical carbon dioxide capture by conductive metal–Organic framework incorporating nickel bis(diimine) units [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2024, 146(48): 33093–33103.
- [42] Li X, Musgrave C B, Liu A D, et al. Electrifying amine carbon capture with robust redox-tunable acids [J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 4339.
- [43] Zhu P, Wu Z Y, Elgazzar A, et al. Continuous carbon capture in an electrochemical solid-electrolyte reactor [J]. *Nature*, 2023, 618(7967): 959–966.
- [44] Liu T, Wang Y P, Wu Y F, et al. Continuous decoupled redox electrochemical CO₂ capture [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 10920.
- [45] Blommaert M A, Aili D, Tufa R A, et al. Insights and challenges for applying bipolar membranes in advanced electrochemical energy systems [J]. *ACS Energy Letters*, 2021, 6(7): 2539–2548.
- [46] Oener S Z, Foster M J, Boettcher S W. Accelerating water dissociation in bipolar membranes and for electrocatalysis [J]. *Science*, 2020, 369(6507): 1099–1103.
- [47] Digdaya I A, Sullivan I, Lin M, et al. A direct coupled electrochemical system for capture and conversion of CO₂ from ocean water [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4412.
- [48] Jin X Y, Jin S J, Li L, et al. Direct air capture of CO₂ in an electrochemical hybrid flow cell with a spatially isolated phenazine electrode [J]. *Nature Energy*, 2025, 10(9): 1146–1154.
- [49] Jing Y, Amini K, Xi D W, et al. Electrochemically induced CO₂ capture enabled by aqueous quinone flow chemistry [J]. *ACS Energy Letters*, 2024, 9(7): 3526–3535.
- [50] Zhong J W, Yang X F, Wu Z L, et al. State of the art and perspectives in heterogeneous catalysis of CO₂ hydrogenation to methanol [J]. *Chemical Society Reviews*, 2020, 49(5): 1385–1413.
- [51] Liu N, Fan Q X, Wei J, et al. Fine-tuning the active phases of CoFe alloy carbides for boosting olefin synthesis from CO₂ hydrogenation [J]. *ACS Catalysis*, 2025, 15(1): 179–192.
- [52] Cheng K, Li Y B, Kang J C, et al. Selectivity control by relay catalysis in CO and CO₂ hydrogenation to multicarbon compounds [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2024, 57(5): 714–725.
- [53] Li Y N, Yao X Q, Guo Z L, et al. Powering hydrogen refueling stations with local renewable curtailment—A Lanzhou case study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 473: 143492.
- [54] Wang Y, Li W J, Lu X Y, et al. Innovating for a greener tomorrow [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2024, 38: 2024021.
- [55] 华东理工大学化工学院. 开车成功! 华理开发全国首个燃煤烟气二氧化碳捕集制甲醇万吨级项目 [EB/OL]. (2025-01-20)[2025-04-01]. <https://hgxy.ecust.edu.cn/2025/0120/c1183a175311/page.htm>.
School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology. Successful launch! ECUST developed China's first 10,000-ton CO₂-to-methanol project from coal flue gas [EB/OL]. (2025-01-20)[2025-04-01]. <https://hgxy.ecust.edu.cn/2025/0120/c1183a175311/page.htm>.
- [56] Wang X Y, Zeng T, Guo X H, et al. Breaking the activity-selectivity trade-off of CO₂ hydrogenation to light olefins [J]. *PNAS*, 2024, 121(37): e2408297121.
- [57] Li Z L, Wu W L, Wang M L, et al. Ambient-pressure hydrogenation of CO₂ into long-chain olefins [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 2396.
- [58] Al Abdulghani A J, Ganguly S, Haggmann R H, et al. Uncovering the pressure-dependent mechanism of CO₂ hydrogenation to methanol on Ga-promoted Cu/ZrO₂ using operando modulation-excitation DRIFTS [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025, 147(31): 27438–27448.
- [59] Liu X Y, Luo J, Wang H W, et al. *In situ* spectroscopic characterization and theoretical calculations identify partially reduced ZnO_{1-x}/Cu interfaces for methanol synthesis from CO₂ [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61(23): e202202330.
- [60] Zhou W, Cheng K, Kang J C, et al. New horizon in C1 chemistry: Breaking the selectivity limitation in transformation of syngas and hydrogenation of CO₂ into hydrocarbon chemicals and fuels [J]. *Chemical Society Reviews*, 2019, 48(12): 3193–3228.
- [61] Cheng K, Gu B, Liu X L, et al. Direct and highly selective conversion of synthesis gas into lower olefins: Design of a bifunctional catalyst combining methanol synthesis and carbon–carbon coupling [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2016, 55(15): 4725–4728.
- [62] Hauch A, Küngas R, Blennow P, et al. Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis [J]. *Science*, 2020, 370(6513): eaba6118.

- [63] Liu X H, Li S J, Chen A H, et al. Zinc hollow-fiber penetration electrode promotes ampere-level CO₂ electroreduction for viable applications [J]. ACS Catalysis, 2025, 15(5): 4259–4269.
- [64] Yao Y C, Shi T, Chen W X, et al. A surface strategy boosting the ethylene selectivity for CO₂ reduction and *in situ* mechanistic insights [J]. Nature Communications, 2024, 15: 1257.
- [65] Liu Q L, Tang T, Tian Z Y, et al. A high-performance watermelon skin ion-solvating membrane for electrochemical CO₂ reduction [J]. Nature Communications, 2024, 15: 6722.
- [66] Petrov K V, Koopman C I, Subramanian S, et al. Bipolar membranes for intrinsically stable and scalable CO₂ electrolysis [J]. Nature Energy, 2024, 9(8): 932–938.
- [67] She X J, Zhai L L, Wang Y F, et al. Pure-water-fed, electrocatalytic CO₂ reduction to ethylene beyond 1,000 h stability at 10 A [J]. Nature Energy, 2024, 9(1): 81–91.
- [68] Li S J, Wu G F, Mao J N, et al. Tensile-strained Cu penetration electrode boosts asymmetric C–C coupling for ampere-level CO₂-to-C²⁺ reduction in acid [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2024, 63(41): e202407612.
- [69] Zhang Z, Huang X, Chen Z, et al. Membrane electrode assembly for electrocatalytic CO₂ reduction: Principle and application [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2023, 62(28): e202302789.
- [70] He X Y, Lin L, Li X Y, et al. Roles of copper(I) in water-promoted CO₂ electrolysis to multi-carbon compounds [J]. Nature Communications, 2024, 15: 9923.
- [71] Fang S Y, Rahaman M, Bharti J, et al. Photocatalytic CO₂ reduction [J]. Nature Reviews Methods Primers, 2023, 3: 61.
- [72] Stanley P M, Ramm V, Fischer R A, et al. Analysis of metal–organic framework-based photosynthetic CO₂ reduction [J]. Nature Synthesis, 2024, 3(3): 307–318.
- [73] Wang J Y, Li X Y, Chang C H, et al. Engineering single Ni sites on 3D cage-like cucurbit [n] uril ligands for efficient and selective CO₂ photocatalytic reduction [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2025, 64(5): e202417384.
- [74] Kaur J, Peter S C. Two-dimensional perovskites for photocatalytic CO₂ reduction [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2025, 64(17): e202418708.
- [75] Tang Q J, Li T H, Tu W G, et al. Recent advances in diverse MXenes-based structures for photocatalytic CO₂ reduction into renewable hydrocarbon fuels [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(19): 2311609.
- [76] Ye J Y, Dimitratos N, Rossi L M, et al. Hydrogenation of CO₂ for sustainable fuel and chemical production [J]. Science, 2025, 387(6737): eadn9388.
- [77] Sun H M, Sun S Z, Liu T, et al. Integrated CO₂ capture and utilization: Selection, matching, and interactions between adsorption and catalytic sites [J]. ACS Catalysis, 2024, 14(20): 15572–15589.
- [78] Lv Z Z, Du H, Xu S J, et al. Techno-economic analysis on CO₂ mitigation by integrated carbon capture and methanation [J]. Applied Energy, 2024, 355: 122242.
- [79] Qiao Y T, Liu W S, Guo R N, et al. Techno-economic analysis of integrated carbon capture and utilisation compared with carbon capture and utilisation with syngas production [J]. Fuel, 2023, 332: 125972.
- [80] Sun S Z, Chen Z, Xu Y K, et al. Potassium-promoted limestone for preferential direct hydrogenation of carbonates in integrated CO₂ capture and utilization [J]. JACS Au, 2024, 4(1): 72–79.
- [81] Zhou Z J, Sun N N, Wang B D, et al. 2D-layered Ni–MgO–Al₂O₃ nanosheets for integrated capture and methanation of CO₂ [J]. ChemSusChem, 2020, 13(2): 360–368.
- [82] Zhang Y R, Li L J, Zhao S, et al. Effects of Ni loading and Ce doping on a CaO-based dual function material for integrated carbon capture and *in situ* methanation [J]. Catalysis Science & Technology, 2024, 14(5): 1255–1265.