

绿色船舶理念下船载碳捕集技术现状及展望

张鑫琦, 李俊, 黄信男, 郑凯

(上海船舶研究设计院, 上海 201203)

摘要: [目的]为应对航运业的化石燃料依赖给环境带来的严峻挑战,响应国际海事组织(IMO)提出的2050年净零排放目标, [方法]航运业引入了具有即时减排效能的船载碳捕集技术。该技术因能填补传统能效优化与燃料替代技术“空窗期”,已成为关键过渡方案。为深入了解该技术的作用机理、性能优势和应用情况等,在简要阐述低碳发展趋势下的绿色船舶理念的基础上,基于陆基碳捕集与封存(CCUS)技术框架,系统梳理船载碳捕集材料体系的研究进展情况和工艺流程,并对其在船舶特殊环境下的适应性进行分析。在此基础上,追踪国内外船载碳捕集、利用与封存全流程技术的研究动态,梳理当前该技术研究的核心内容和主要成果,论证在现有化石燃料主导格局下将船载碳捕集技术作为过渡方案的可靠性。[结果]总结船载碳捕集系统商业化应用面临的风险和挑战,并对其未来发展方向进行展望, [结论]为航运业实现碳中和目标提供参考。

关键词: 绿色船舶; 船载碳捕集技术; 航运业减排; 碳排放强度; 化学吸收法

中图分类号: U664 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2026.08.01

Status and Prospects of Shipboard Carbon Capture Technology Under Green Shipping Concept

ZHANG Xinqi, LI Jun, HUANG Xinnan, ZHENG Kai

(Shanghai Merchant Ship Design and Research Institute, Shanghai 201203, China)

Abstract: [Purpose] In response to the severe environmental challenges posed by the shipping industry's reliance on fossil fuels, and in alignment with the International Maritime Organization's (IMO) net-zero emissions target by 2050, [Method] the shipping industry has introduced on-board carbon capture technology with immediate emission reduction efficiency. This technology has become a key transitional solution as it can bridge the "gap period" between traditional energy efficiency optimization and fuel substitution technologies. Ship-based carbon capture technology has emerged as a critical transitional solution to bridge the implementation gap between conventional energy efficiency optimizations and alternative fuel technologies, owing to its immediate emission reduction capabilities. This study systematically examines the adaptability of carbon capture systems in maritime applications, building upon the framework of land-based carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies through comprehensive analysis of advancements in material systems and process engineering. [Result] It critically reviews global research progress encompassing the entire ship-based carbon capture, utilization, and sequestration chain, synthesizing key research foci and principal achievements. The investigation culminates in identifying prevailing commercialization barriers and operational challenges, [Conclusion] while proposing strategic directions for optimizing shipboard carbon capture systems in alignment with maritime decarbonization objectives.

Key words: green ship; shipborne carbon capture technology; shipping industry decarbonization; carbon emission intensity; chemical absorption method

收稿日期: 2025-05-20; 修回日期: 2025-11-09; 录用日期: 2025-11-25

作者简介: 张鑫琦(1997—), 男, 硕士、助理工程师。研究方向: 碳捕集材料改性及其热力循环构建。

0 引言

近年来，全球经济快速发展给环境带来了严峻考验，环境污染与气候恶化议题逐渐成为国际社会关注的焦点。尽管绿色低碳发展理念已被广泛认可，但长期依赖传统化石能源的消费格局在短期内改变仍面临诸多挑战。据国际能源署 *Global Energy Review 2026*^[1] 统计，2025年全球与能源相关的二氧化碳 (CO₂) 排放量达到了创纪录的38.4 Gt，较2024年年增幅约0.4%，再创历史新高。CO₂对温室效应的贡献率占55%，若任由此排放趋势发展，全球平均气温上升很快会超过1.5 K。

在此背景下，各国或国际组织陆续出台了一系列新公约、新法规，如《巴黎协定》和《欧盟气候法》等。2021年在英国格拉斯哥缔结的《联合国气候变化框架公约》加强了各国应对气候变化的紧迫性，并敦促落实《巴黎协议》承诺。《全球碳市场协定》允许各国家和企业通过碳排放权交易市场买卖减排配额，以经济手段激励能源领域脱碳。然而，当前碳排放引发的连锁反应仍在扩大，距离《巴黎协定》的温控目标也渐行渐远。

航运是全球商品的主要运输方式，其货运量约占全球货物运输总量的90%，海上航运次数增加会

导致温室气体排放加剧^[2]。据2020年Clarksons船舶数据库的统计数据，全球船舶每年的CO₂排放量高达12亿t，约占全球碳排放量的6%^[3]。国际海事组织 (International Maritime Organization, IMO) 预计，若以2008年为基准，随着船舶贸易量的增长，到2050年碳排放量将增加约3.46倍^[4]。为推动船舶航运业尽快实现减排目标，IMO于2023年公布了经修订的温室气体减排战略，确定了量化目标和各阶段减排措施 (见图1)。2023年中国船级社 (China Classification Society, CCS) 发布了关于船舶应用碳捕集技术的指南，旨在为船舶行业提供实施碳捕集技术的框架和指导。在该背景下，“绿色船舶”理念应运而生，逐渐被行业认可。液化天然气 (Liquefied Natural Gas, LNG)、氨和甲醇等绿色燃料技术在船上应用是当前航运业的热门发展方向，但新能源还存在成本高和技术不成熟等问题，无法满足世界航运所需。通过提升船舶能效来实现碳减排的效果十分有限，不能匹配当前面临的降碳压力。船载碳捕集系统 (Onboard Carbon Capture System, OCCS) 是目前实现航运业碳减排的最有效技术之一，在陆地电力、石油和化工等领域已实现商业试用，在船上的应用还处在起步阶段，亟须开展OCCS研究和应用。

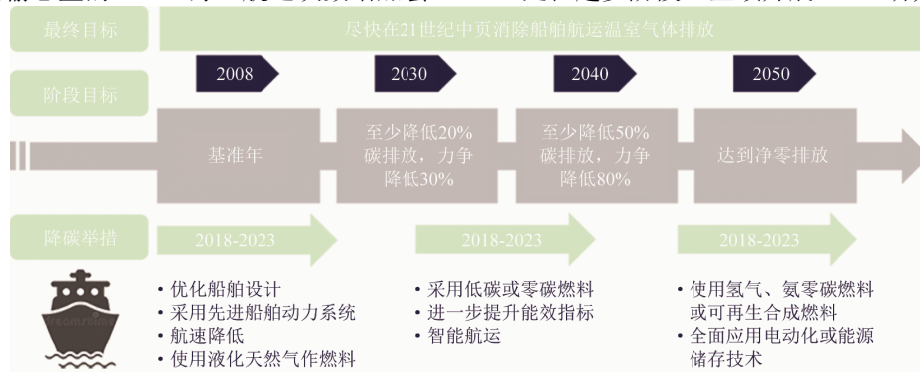


图1 航运业降低温室气体排放战略

Fig. 1 Strategies for Reducing Greenhouse Gas Emissions in Shipping Industry

1 低碳发展趋势下的绿色船舶理念

1.1 绿色船舶概念

“绿色船舶”作为航运业低碳转型的核心载体，其核心理念是通过技术创新实现船舶全生命周期的环境友好。尽管国际范围内尚未形成统一的定义，但业界共识强调其在能源效率、温室气体减排和生态保护等方面的协同优化作用。CCS在《绿色船舶生态规范 (2022)》中提出，绿色船舶须以全生命周期视角整合“节能-减排-循环”技术体系，其核心目标包括能源结构清洁化、碳排放强度最小化和资源利用闭环化^[5]。

1.2 绿色船舶实现举措

随着航运业的降碳压力日益凸显，IMO通过了《国际防止船舶造成污染公约》 (International

Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL)，并在后续修订中引入了船舶能效设计指数 (Energy Efficiency Design Index, EEDI) 等创新性法规，通过建立全球船舶减排的强制性框架，促使绿色船舶由理念转化为行业标准，开启了海运业低碳转型的实践进程。特别是2023年生效的碳强度指标 (Carbon Intensity Index, CII) 分级制度和《船舶能效管理计划》 (Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP)，强制要求5 000总吨及以上的所有适用船舶 (无论新旧) 都须基于年度燃料消耗数据计算碳排放强度，并根据结果将船舶划分为A、B、C、D和E 5个等级；评级为E或连续3年为D的船舶必须制订能效改进计划，通过技术改装或运营优化实现减排目标，且计划须纳入SEEMP并

接受监管审查，以此倒逼航运业在2030年之前实现碳排放强度相比2008年下降40%的阶段性目标^[6,84]。

为满足船级社的强制要求，当前绿色船舶的降碳技术路径已形成“能效优化-碳捕集-燃料替代”多维协同体系，即短期举措聚焦船舶能效提升和作业管理优化，通过低阻力线型设计和余热回收系统等降低单船能耗15%~20%；借助智能航速控制和航线规划，减少无效碳排放^[7]。然而，此类技术受船舶固有设计参数和运营场景限制，其减排潜力存在天花板效应^[8]。长期路径依赖绿色燃料替代，如LNG和氨/氢等零碳燃料可助力船舶实现全生命周期碳中和，但其规模化应用仍受制于燃料供应链成熟度、储运安全风险和改造成本^[9,85]。

从陆地工业碳捕集的发展规律来看，在航运业

以化石燃料为主导能源的格局未改变之前(见图2)，OCCS是实现全球船队碳排放强度快速下降的唯一实用技术。OCCS凭借“即装即用”兼容性和快速减排效能，成为填补传统能效技术和新能源替代“空窗期”的关键方案。据美国船级社(American Bureau of Shipping, ABS)《船用碳捕集和储存要求(2022)》测算，对现有船舶加装OCCS可削减尾气碳排放量达30%~50%，且无须颠覆性改造动力系统^[10]。尤其是对于船龄10年以上的在航船舶，OCCS可规避高额的新船建造成本，显著提升船队合规的灵活性。当前，全球已有23艘试验船舶完成OCCS装置试点应用^[6]，其技术可行性验证为绿色船舶技术应用提供了可靠依据。

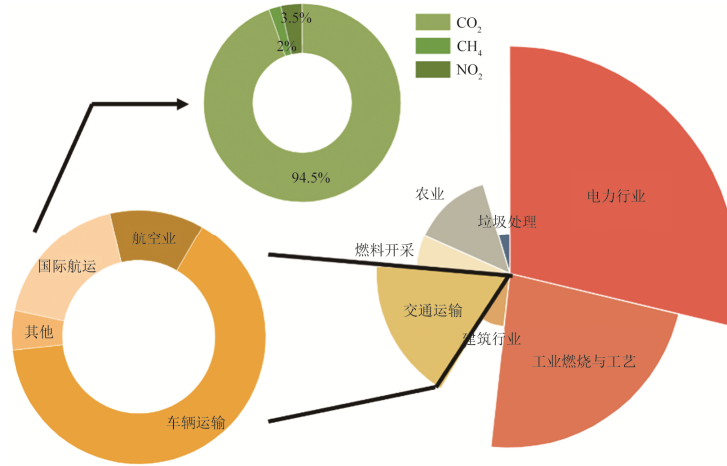


图2 全球航运业碳排放占比示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Carbon Emissions Share in Global Shipping Industry.

2 OCCS 研究现状

2.1 碳捕集路径

目前碳捕集与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)技术在火电和煤化工领域已取得重大应用进展^[11]。OCCS的原理是将CCUS中的碳捕集部分应用于船舶领域，分离和纯化废气中的

CO₂，随后将其运输到特定场所，以进行资源化利用或永久性封存，防止其进入大气^[2]。根据OCCS在燃烧流程中所处位置，可将其分为燃烧前捕集、富氧燃烧和燃烧后捕集3种(见图3)^[12]，各种碳捕集技术的特征见表1。

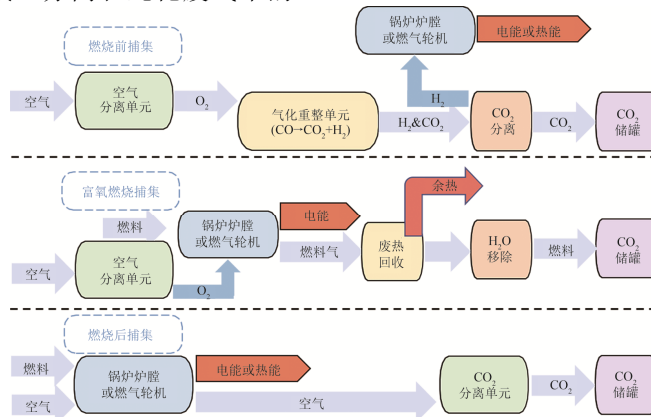


图3 3种碳捕集路径示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of Three Carbon Capture Pathways

燃烧后，碳捕集无须对现有电厂进行大幅升级改造，是最成熟、兼容性最好和适用范围最广的技术，也最适合作为OCCS在当前船舶系统中部署^[2]。

表 1 3 种碳捕集路径综合对比

Tab. 1 Comparative Assessment of Three Carbon Capture Strategies

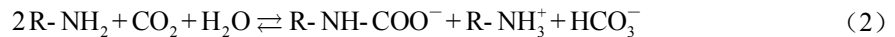
碳捕集路径	捕集原理	优点	缺点	捕集效率
燃烧前捕集	将燃烧前合成煤气中高富集度的 CO 转化为 CO ₂ 和氢气，转化后的 CO ₂ 富集体积分数可高达 30%~40%，易分离得到较纯的 CO ₂ 供后续利用 ^[13]	捕集过程中 CO ₂ 体积分数较高，捕集成本相对较低 ^[14]	配套的氢燃料发动机不成熟，应用场景具有局限性 ^[15]	85%~95% ^[16]
富氧燃烧	将氧气混合燃料运送到专门的纯氧燃烧炉燃烧，产生的烟气主要包含 CO ₂ 和水蒸气，通过将部分烟道气重新回注燃烧炉，可以降低燃烧温度，提高尾气中 CO ₂ 的体积分数 ^[17-18]	CO ₂ 捕集能耗相对较低 ^[19]	须额外加装制氧装置，制氧成本较高，对原设备 ^[20] 改动较大	>95% ^[21]
燃烧后捕集	在燃料燃烧废气后加装捕集装置，对废气中的 CO ₂ 进行捕集 ^[22]	对原设备改动较小，适用于低 CO ₂ 分压气源 ^[22]	捕集成本 ^[23] 相对较高	85%~95% ^[23-24]

2.2 燃烧后碳捕集技术机理、材料和工艺研究进展

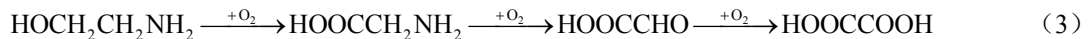
研究人员针对燃烧后碳捕集技术提出了多种实现途径，主要包括基于固体吸附剂的物理或化学吸附法、依靠分离膜渗透特性的膜分离法、利用化学溶剂与CO₂可逆反应的溶液吸收法和依靠温度差实现组分分离的低温冷凝与分离法。不同技术的特点有所不同，适用条件和发展前景也有所差异。下面对这些典型燃烧后碳捕集技术的机理、材料体系和应用进展进行介绍。

2.2.1 吸收法

目前，化学吸收法因具有较高的成熟度和典型的工业化应用基础，在OCCS研究中得到了广泛关注。该方法通过化学键与CO₂分子快速、特异性结合，实现高纯度的燃烧后烟气碳捕集。该方法的机理可表示为



值得注意的是，源排中O₂的体积分数较高可能会导致吸收剂发生不可逆的氧化。以质量百分比为40%的乙醇胺溶液为例，当O₂的体积分数为15%时，



提升化学吸收法碳捕集技术性能的关键在于对化学吸收剂进行创新和优化，相关材料的研发主要聚焦于分子结构设计、吸收容量提升、反应动力学优化和抗降解性能提升等。对于OCCS而言，吸收剂的开发还要格外关注平衡高效CO₂捕集能力与船舶特殊工况的适配性（典型胺类物质的吸收特性见表2^[11]）。乙醇胺（Monoethanolamine, MEA）等醇胺类吸收剂是最基础的吸收剂之一，虽然具有 $2.5 \times 10^6 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 高吸收溶解常数和大于90%的脱碳效率^[26]，但其腐蚀性^[27]、易氧化降解特性（大于12%/200 h）和高吸收热特性（85 kJ/mol~90 kJ/mol）严重制约船舶能效^[28-29,86]。为此，研究人员在分子维度探究不同碳链和构型的单一胺类结构，通过在甲基二乙醇胺（Methyldiethanolamine, MDEA）

每捕集1 t的CO₂，约造成1.5 kg吸收剂降解损失^[25]，氧化降解机理为

中引入甲基位阻抑制氨基甲酸盐的生成，使吸收容量提升至1.2 mol CO₂/mol，利用碳酸氢盐的易分解特性显著优化MDEA溶液的能耗，但传质系数骤降至MEA的25%^[30]。哌嗪（PZ）的环状结构刚性保护能有效抑制氧化降解（小于5%/200 h），双胺基团双位点活化机制能促进氨基甲酸盐向碳酸氢盐转化，使汽提能耗相比MEA由0.37 (MW·h)/t的CO₂降至0.24 (MW·h)/t的CO₂^[31]。尽管单一溶液体系研究已取得阶段性成果，其性能瓶颈仍难以满足船舶尾气低分压CO₂（3 kPa~5 kPa）快速捕集需求，这推动了活化胺复配体系的发展。KHAN等^[32]研究了MDEA与PZ的协同体系，PZ作为活性组分，优先与CO₂形成氨基甲酸盐，并通过质子转移至MDEA完成再生。试验数据显示，当PZ添加量为10%时，体

系吸收速率达到 $3.016 \times 10^{-5} \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 相比基准MDEA体系提升3.2倍, 同时能维持 $0.78 \text{ mol CO}_2/\text{mol}$ 的高吸收量。热再生阶段(284 K)的溶液恢复效率达92.24%, 且再生能耗控制在 $3.0 \text{ MJ/kg CO}_2 \sim 4.1 \text{ MJ/kg CO}_2$, 证实胺复配体系在动力学-高效再生方面具有一定的技术优势^[32]。近期研究表明, 具有5个活性氨基的四乙烯五胺(Tetraethylenepentamine,

TEPA)通过分子内多胺基协同机制突破传统胺类的局限, 与MEA形成的复配溶液的吸收量相比MEA提升7%, 核磁分析表明, 通过碳酸氢根/碳酸根释放 CO_2 的路径能优化动力学性能, 使热耗下降18.1%^[33], 为船舶提供兼具高容量、低能耗和稳定性的新一代解决方案。

表2 典型单一胺与复配胺吸收剂的吸收特性

Tab. 2 Absorption Characteristics of Typical Single and Blended Amine Solvents

吸收剂	$m/$ (mol/L)	吸收速度/ [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]	吸收容量/ (mol CO_2 /mol)	吸收热/(kJ/mol)	$T_{\text{max}}/^\circ\text{C}$	$P_{\text{max}}/\text{MPa}$	$P_{\text{H}_2\text{O}}/P_{\text{CO}_2}$
MEA	7.0	2.50×10^6	0.550	85~90	121	0.220	0.81
DEA	4.0	$0.33 \times 10^6 \sim 1.27 \times 10^6$	0.658	70~80	110	0.180	0.85
MDEA	5.0	0.26×10^6	1.000~1.680	60~70	120	0.108	0.85
AMP	5.0	0.70×10^6	0.930~1.250	50~65	140	0.610	0.49
PZ	8.0	6.50×10^6	0.870~0.920	110~110	163	1.430	0.33
MEA/PZ	7.0/2.0	1.80×10^6	0.620	80	104	0.070	0.55
AMP/PZ	2.3/5.0	2.40×10^6	0.700	71	134	0.450	0.41
2-Methyl PZ	8.0	5.80×10^6	0.930	72	151	0.990	0.28
2-Methyl PZ/PZ	4.0/4.0	6.20×10^6	0.840	70	155	1.030	0.25

胺溶液吸收式碳捕集技术的典型工艺流程见图4(c), 具体有以下3点。

1) 高温烟气预冷至 $40^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$, 防止溶剂热降解。

2) 贫胺液与烟气在填料塔内逆流接触, 通过胺化合物与 CO_2 的可逆羧化反应实现捕集(压降能耗占系统总能耗的 $30\% \pm 2\%$)。

3) 富液经预热后进入汽提塔, 以温度为 $120^\circ\text{C} \sim 140^\circ\text{C}$ 的蒸汽驱动 CO_2 解吸(再沸能耗占比为 $70\% \pm 2\%$, CO_2 纯度大于99.5%), 总能耗高达 $2.5 \text{ GJ/t CO}_2 \sim 3.2 \text{ GJ/t CO}_2$ 。

该技术在实际船舶中的应用研究已较为成熟。LUO等^[29]利用Aspen Plus建模探究了基于质量百分数为35%的MEA溶液的OCCS的性能, 结果表明该系统可取得90%的捕集效率(按文中所述数据计算, CO_2 捕集能耗为 $3.77 \text{ GJ/t} \sim 3.85 \text{ GJ/t}$), 且 CO_2 的捕集成本约为163.07欧元/t。但是, 受船上热/电供应不足约束, 实现高捕集率须额外供能, 因此船舶的柴油消耗量增加了21.41%。然而研究指出, 若采用更先进的吸收剂, 减排成本可降低约10%。AWOYOMI等^[34]通过研究进一步证实了将胺法燃烧后捕集技术应用到柴油或LNG船上可行的过渡方案, 通过烟气余热与再生器进行热集成, 并在LNG船上利用LNG冷量使 CO_2 液化, 可将捕集成本压到约98欧元/t量级。这是因为该研究采用的PZ溶液能高压解吸, 相比MEA更有利于降低后续压缩/液化功。

TAVAKOLI等^[35]结合实船数据系统分析了吸收法“近期落地”的可行性, 认为在若干主流船型上(改装和新造均考虑)具有技术成熟度, 在合理集成下70%的减排率是能达成的目标, 但能否实施还须综合考虑空间/质量、热/电能源供给、 CO_2 后处理和港口卸载等因素。

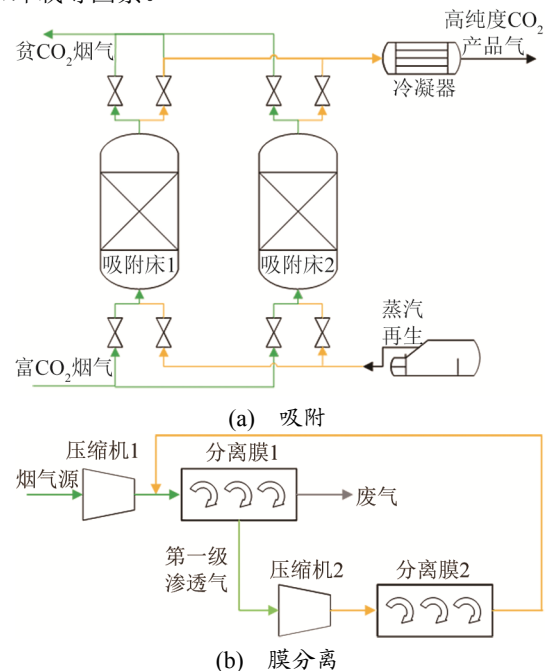


图4 4种典型船载碳捕集工艺

Fig. 4 Four Typical OCCS Processes

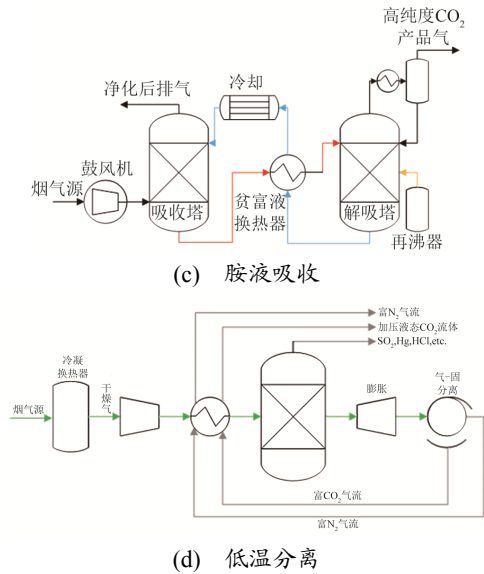


图4 4种典型船载碳捕集工艺(续)

Fig. 4 Four Typical OCCS Processes (Continued)

2.2.2 吸附法

CO₂吸附法根据固体材料表面对气体分子的选择性作用实现分离,主要包括物理吸附和化学吸附2种机理。其中,物理吸附主要依靠固体吸附剂骨架与CO₂分子之间的范德华力产生相互作用;化学吸附主要依靠材料与CO₂之间形成的稳定化学键实现对CO₂的吸附。相比物理吸附材料的吸附热(8 kJ/mol~25 kJ/mol),化学吸附材料的吸附热(40 kJ/mol~200 kJ/mol)较大,能耗较高。在吸附速率和再生性方面,物理吸附材料的性能优于化学吸附材料,但化学吸附材料的CO₂分离选择性优于物理吸附材料^[36-37]。在CO₂吸附领域,常用的物理吸附材料有活性炭、沸石分子筛和MOFs等,化学吸附材料以金属氧化物和胺基改性的多孔材料为主。相比化学吸收,吸附法在相同纯度和捕集率下的再生能耗更低,能源效率更高。吸附剂可通过压力摆动吸附(Pressure Swing Adsorption, PSA)、真空摆动吸附或温度摆动吸附(Temperature Swing Adsorption, TSA)实现再生,工艺可围绕烟气的温湿度、CO₂的体积分数、允许背压和可用热/电灵活

定制。对于船舶内燃机尾气,TSA可充分利用烟气和设备余热完成再生,兼具可操作性和能效优势。工程上常采用双固定床交替运行(见图4(a)),一床低温吸附,另一床加热解吸并再生,随后切换实现连续高纯CO₂气流。相比之下,流化床等反应器在船用场景中受压降、抗振和空间布置等因素影响,应用较少。

目前,已有很多关于吸附法在汽车尾气碳捕集领域的应用研究。GARCIA-MARIACA等^[38]从能量视角论证了重型发动机尾气的TSA捕集在与ORC热回收耦合并选用合适的吸附剂时的可行性,结果显示,CO₂捕集能耗最低达631 kJ/kg,在100%捕集率下发动机惩罚功率为1.9%~23.5%,表明通过热集成和材料适配可将能耗控制在可接受范围内。KIM等^[39]通过研究进一步证实了将发动机余热与TSA耦合是降耗的关键,吸附式碳捕集系统在车辆尾气碳捕集领域应用可行,且捕集率能达约90.0%。LARKIN等^[40]用碳凝胶负载陶瓷中空纤维吸附单元替代固定床进行尾气TSA捕集,实测表明设备体积缩小约71.4%,质量减轻约82.5%,成本下降约84.8%。最近,吉利在试制的甲醇卡车上搭载了吸附碳捕集单元,实现了99%的CO₂捕集率^[41]。陆基柴油机碳捕集对船载碳捕集有启发价值。ERTO等^[42]探索了变温吸附/再生的船载碳捕集工艺,测试了碱金属碳酸盐对船用柴油发动机尾气捕集的适用性,结果显示:在燃烧尾气余热驱动下,湿法浸渍的K₂CO₃多孔氧化铝材料实现了0.66 mmol/g的捕集能力;在设定的安装有双塔TSA装置和4.35 MW船用柴油发动机的滚装客船案例中,实现了30.0%的CO₂减排率。LARKIN等^[43]通过在中空纤维支撑的通道中浸渍CaO(见图5(a)),实现了比填充相同质量CaO的填充式吸附床更小的体积(体积减小92.0%)、更低的成本(成本下降,得益于CaO用量减少23 wt.%)以及更低的压降(压降下降72.0%)。PEZZELLA等^[44]基于高选择性的KAUST-1和高度多孔的Al-soc-MOF-1(见图5(b))2种新颖的MOF探索了OCCS的可行性。

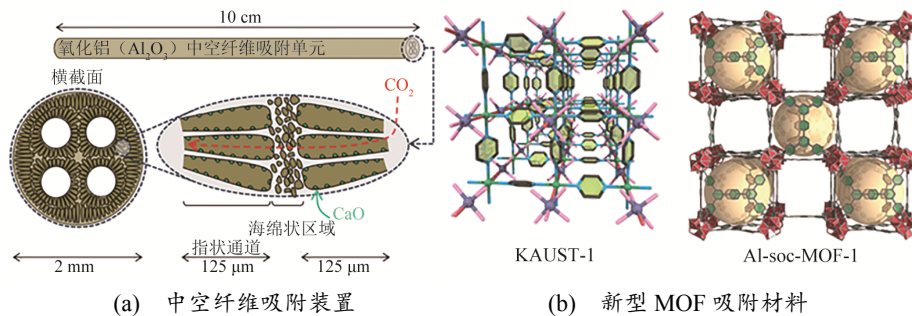


图5 吸附式船载碳捕集技术代表性研究

Fig. 5 Representative Studies on Adsorption-Based Shipboard Carbon Capture Technology

结果显示, 在船舶额外功耗仅增加 7.6% 的情况下, 优化的 TSA 循环取得了 90.0% 的 CO₂ 纯度和 53.0% 的回收率。GARCIA 等^[38]采用 TSA 与 ORC 相结合的方式, 在发动机余热驱动下对 MOF-74-Mg、PPN-6-CH₂-DETA 和活性炭 3 种吸附剂进行了模拟测试, 结果显示, 当填充 MOF-74-Mg 时, CCS-ORC 系统引起的功耗损失最多增加 6.14%, 比其他研究采用的 TSA 低, 若未来能进一步提升吸附剂的吸附量并降低材料制备成本, 该方法在船舶降碳领域具有较强的商业竞争力。

2.2.3 膜分离法

膜分离依托对分子的选择性透过实现混合气高效分离和纯化, 可基于分子/离子的大小、形状、电荷和溶解度差异对目标组分进行区分。在船载燃烧后捕集场景中, 膜分离利用 CO₂ 与其他气体组分的渗透性差异, 实现 CO₂ 选择性分离和富集。膜通常可按材料体系分为有机(聚合物)膜、无机膜(如碳、沸石和陶瓷等)和混合基质膜(Mixed-Matrix Membranes, MMMs) 3 种, 不同组成赋予膜不同的传质通道和稳定性。膜的性能通常由渗透率/通量和选择性表征, 受膜材的本征性质与操作条件(如温度、压力和目标组分体积分数/分压等)的共同影响^[45]。在以溶解和扩散为主的透过机理下, 渗透率/通量与选择性存在经典的权衡关系, 即选择性提高往往伴随渗透率下降, 反之亦然。鉴于这 2 项指标具有内在耦合关系, 同时显著提升这两项指标具有挑战性, 因此膜改性和结构工程是当前研究的重点方向。常用采用的策略包括通过复合/掺杂构建 MMMs、调控孔隙结构和取向以及实施界面和表面工程等, 以优化传质路径, 减少界面缺陷并抑制塑化和老化。在上述体系中, 聚合物膜及其 MMMs 因兼具较高的 CO₂ 选择性、良好的制膜可加工性和成本优势而得到广泛关注。

LI 等^[46]通过气液界面聚合和填料改性 2 个独立的调控策略, 制备了改性聚酰胺有机聚合物膜(见图 6(a)^[46]), 实现了 320 GPU (Gas Permeation Unit) 的通量和高达 54 的 CO₂ 选择性, 性能优于传统聚合物膜。进一步研究表明, 此类材料在船舶碳捕集领域也具有应用前景。氧化石墨烯(GO)富含多种氧活性官能团, 便于实施表面化学修饰, 从而构筑结构新颖、分离性能更优的复合膜。WU 等^[47]采用聚乙二醇(PEG)和聚乙烯亚胺(PEI)对 GO 进行表面改性, 获得了 PEG-PEI-GO 纳米填料; 同时, 采用溶液浇筑法制备了“多重选择性”高性能复合膜。GO 具有高长径比, 能显著增加气体在膜内的迂曲传递路径; PEI 的氨基与 CO₂ 发生可逆反应, 能进一步增强对 CO₂ 的反应选择性(在 10 wt% 纳米填料负载下实现 CO₂ 渗透率约为 1 330 Barrer, CO₂/N₂ 选择性

约为 120, CO₂/CH₄ 选择性约为 45, 并跨越 2008 年 Robeson 上限)。离子液体(IL)具有挥发性低、对 CO₂ 的亲性和稳定性强等优点, 将其与二维层状材料相结合, 可显著改善气体的分离性能。PENG 等^[48]将 IL 纳米限域于层状 Ti₃C₂T_x (MXene) 纳米狭缝中构建支持液体膜, 实现了对 CO₂ 的显著选择性(在室温接近 100 Pa 情况下测得 CO₂ 渗透通量约为 26.35 GPU, CO₂/N₂ 选择性约为 319, CO₂/CH₄ 选择性约为 249, CO₂/H₂ 选择性约为 12, 表明“MXene 层状限域、IL 促进传质”的协同机制可在中等通量下获得极高的选择性, 用于高效分离)。OH 等^[49]提出了一套可在 LNG 燃料船上应用的膜碳捕集系统, 并与胺吸收脱碳系统进行了对比, 结果发现: 膜碳捕集系统模块的体积显著小于胺吸收脱碳系统, 渗透率为 2 000 GPU 时膜碳捕集系统的设备尺寸仅为胺吸收脱碳系统的 28%, 渗透率为 3 000 GPU 时膜碳捕集系统设备尺寸更是可降至胺吸收脱碳系统的 20%, 能极大缓解船舶空间限制问题; 膜碳捕集系统在合适的工况下具有能耗优势, 当 CO₂/N₂ 选择性提升至 150 时, 两级膜分离的总能耗(2.82 GJ/t CO₂) 低于胺基系统(3.07 GJ/t CO₂), 但当 CO₂/N₂ 选择性为 50 时, 膜碳捕集系统的能耗达到 3.98 GJ/t CO₂, 显著高于胺吸收脱碳系统。在船舶排气场景中, CO₂ 组分含量低, 烟气成分复杂, 使得膜材料难以具有高选择性, 这将导致捕集成本较高。因此, 未来须进一步探索研究, 以评估膜碳捕集系统是否满足航运业要求^[50]。

膜分离系统分离工艺(见图 6(b)^[51])通常采用多级串联架构提升捕集率(可达 85%), 但须通过压缩进气(0.8 MPa~2.0 MPa)或渗透侧真空维持驱动压差, 综合能耗通常为 1.2 GJ/t CO₂~1.8 GJ/t CO₂。膜组件成本占总投资的 45%~60%, 且长期运行存在膜污染导致的通量衰减问题。因此, 尽管膜分离技术在材料研发层面已取得很多进展, 但就船舶应用而言, 多数膜技术仍处于工程放大和长期稳定性验证阶段, 面临诸多挑战。

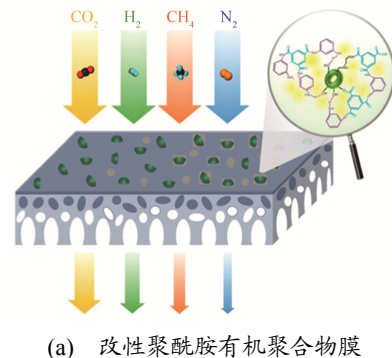
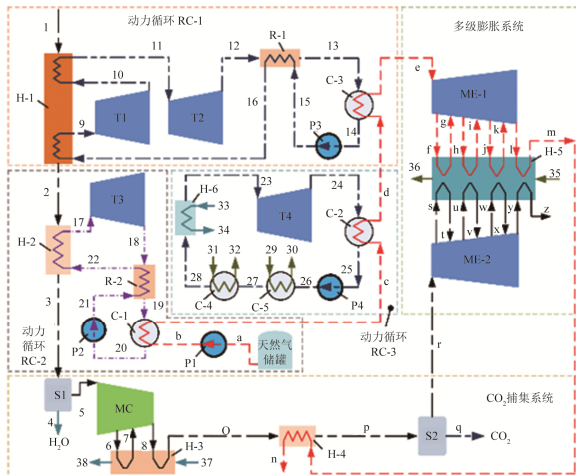


图 6 吸附式船载碳捕集技术代表性研究

Fig. 6 Representative Studies on Adsorption-Based Shipboard Carbon Capture Technology



(b) LNG冷能利用和烟气余热回收的船载碳捕集系统

图6 吸附式船载碳捕集技术代表性研究(续)

Fig. 6 Representative Studies on Adsorption-Based Shipboard Carbon Capture Technology (Continued)

2.2.4 低温分离法

低温碳捕集是基于气体沸点异质性在极端工况(温度为 $-135\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 压力为 $10\text{ MPa}\sim 20\text{ MPa}$)下实现 CO_2 与 N_2 和 O_2 等非凝性气体选择性相变分离的技术^[52]。相比传统胺溶液吸收技术, 低温碳捕集技术能避免具有环境毒性的吸收剂, 实现 CO_2 超高纯化(纯度达 99.99%)和高回收率^[53]。XU等^[54]提出了一种低温分离与蒸馏协同的 CO_2 纯化系统, 先通过多级压缩-分离实现混合气体中 82.3% 的 CO_2 液化(纯度为 96.90%), 结合近常温高压精馏将 CO_2 纯度提纯至 99.90% , 但其能耗大($650\text{ (kW}\cdot\text{h)/t CO}_2$)的局限性难以克服^[55]。

此外, 低温分离仅在气流中 CO_2 体积分数较高(大于 50%)的情况下具有经济可行性^[56], 因此仅使用该技术无法满足 CO_2 体积分数较低(小于 15%)情况下的排气需求^[57]。不过, LNG动力船具有冷能梯级利用优势, 能通过集成LNG再气化过程与深冷工艺, 在实现减排目标的同时, 显著降低能耗^[58]。LIU等^[51]构建了冷热电联产(Combined Cooling, Heating and Power, CCHP)系统(见图6(b)), 通过LNG冷能回收、烟气余热利用和深冷碳捕集三重耦合, 在最优工况下实现了 90.65 MW 的发电量和 7.92 t/h 的捕集量。

低温分离法工艺的核心思路如下: 1) 将含有 CO_2 的烟气(或尾气)冷却到 CO_2 结霜温区, 使 CO_2 直接由气相反升华为固体霜冻结在冷表面; 2) 切换工况

升温/释压, 使固体 CO_2 融化/升华并收集为高纯 CO_2 。该工艺的典型流程见图4(d): 1) 对混合气进行预处理/预冷(包括除尘和冷凝除水), 避免结冰堵塞; 2) 该预处理后的混合气进入结霜器, 温度降至 $-135\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 形成 CO_2 霜层; 3) 切换到“解霜/再生”阶段, 使该 CO_2 霜层升温至接近三相点(温度为 $-56.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 压力为 $500\text{ Pa}\sim 600\text{ Pa}$), 融化为液态 CO_2 。

早期捕集能耗经评估给出约 $650\text{ kJ/kg CO}_2\sim 1\,250\text{ kJ/kg CO}_2$ 的范围(与工况和热回收强度相关), 在工程化实现中, 常通过小型外置制冷回路和换热网络回收解霜潜热/显热以降耗。

2.3 主流碳捕集路径的性能对比

当前特定工况下有关各种碳捕集路径的材料体系和工艺流程的研究已有很多, 但很少对各技术路线进行横向对比分析。因此, 对4种典型碳捕集路径的关键工艺参数进行对比, 结果见表3。由表3可知:

1) 化学吸收法相比另外3种方法, 在航运领域具有较高的技术成熟度和应用可行性。

2) 吸收(胺法)的捕集率通常为 $85\%\sim 95\%$, 气体量和系统复杂度最大, 再生热耗较高(通常为 $2.5\text{ GJ/t CO}_2\sim 3.0\text{ GJ/t CO}_2$), 但整体成本控制较优, 多在 $44\text{ 美元/t CO}_2\sim 103\text{ 美元/t CO}_2$ 。

3) 吸附(TSA/VSA)的性能与成本受吸附剂类型、再生方式等影响显著, 变温与变压协同的吸附技术的常规运行成本高达 $80\text{ 美元/t CO}_2\sim 150\text{ 美元/t CO}_2$, 不过若其材料体系能进一步迭代, 则其成本有望随材料制备工艺的成熟而大幅下降。此外, 该技术受材料和湿度影响显著, 小试/中试给出的能耗为 $0.34\text{ GJ}_e/\text{t CO}_2\sim 0.58\text{ GJ}_e/\text{t CO}_2$, TSA纯度和回收率分别约为 86% 和 82% , VSA可达 $92\%\sim 100\%$, 但多塔阀序使装置的复杂度介于中与高之间, 对水汽敏感。

4) 低温分离(冷凝/反升华)在深冷与换热完善的情况下可实现 $90\%\sim 99\%$ 高纯捕集, 电耗为 $0.54\text{ GJ}_e/\text{t CO}_2\sim 1.18\text{ GJ}_e/\text{t CO}_2$ (若包含产液态和深度压缩, 可至 $600\text{ (kW}\cdot\text{h)/t CO}_2\sim 660\text{ (kW}\cdot\text{h)/t CO}_2$), 体量和复杂度介于中与高之间, 但可借LNG冷能显著降耗。

5) 就船载应用而言, 虽然由于陆上改造或对“确定性”要求高的场景下仍以胺法为基准, 但其他技术路线也有独特优势。在空间和运维约束下, 膜分离和低温路线(尤其是与冷能耦合)更具布置和能效优势; 吸附路线在材料和湿度管理优化后具有潜在性价比。

表3 4种碳捕集路径的性能对比

Tab. 3 Performance Comparison of Four CO₂ Capture Pathways

碳捕集路径	能耗/(GJ _{th} /t CO ₂)	典型捕集率/纯度	体积/占地	设备复杂度	适应性
吸收(胺法)	2.46 GJ _{th} /t CO ₂ ~ 3.00 GJ _{th} /t CO ₂ ^[59] ; 2.53 GJ _{th} /t CO ₂ ^[60]	大型示范: 85%~95%或90%以上 ^[61]	大(吸收塔/解吸塔规模庞大) ^[62]	高: 溶剂循环、换热设备、再沸器、尾气洗涤、腐蚀与降解管理	对 SO _x /NO _x 敏感, 须提前处理
吸附(TSA/VSA等)	0.34 GJ _e /t CO ₂ ~0.58 GJ _e /t CO ₂ ^[63] (部分 VSA/TSA 中试); 1.5 MJ/kg ~ 2.5 MJ/kg ^[64] (取决于再生方式/材料)	TSA 纯度约为86%, 回收率约为82%; VSA 纯度约为92%, 回收率可至100% ^[63]	中(多塔交替, 床层与管阀矩阵占空间) ^[66]	介于中与高之间: 加热/抽真空循环、阀序控制、热管理	对水汽敏感(共吸附增加再生能耗), 须除湿或选亲水稳定材料
膜分离	150 kW·h _e /t CO ₂ ~ 500 kW·h _e /t CO ₂ (0.54 GJ _e /t CO ₂ ~ 1.8 GJ _e /t CO ₂ , 含压缩/真空) ^[67]	单级难取得高回收率; 两级及以上可实现80%~90%回收率, 后段冷凝可得高纯 ^[68]	小-中(模块化, 单位体积处理通量高) ^[69]	中: 鼓风机、压缩机/真空泵、多级流程优化	对于粉尘冷凝物, 须进行预处理
低温分离	0.54 GJ _e /t CO ₂ ~1.18 GJ _e /t CO ₂ ^[70] ; 若产液态 CO ₂ 并深冷, 能耗为 600 kW·h _e /t CO ₂ ~660 kW·h _e /t CO ₂ ^[70]	90%~99% (工艺设计允许高纯) ^[71]	中(冷箱/换热器/压缩制冷机组; 与 LNG 冷能耦合可减负) ^[53]	介于中与高之间: 低温换热网络、防霜管理、序间压缩	针对高 CO ₂ 体积分数、高水分含量或含杂质的气体, 其预处理要求须进行评估

3 船载碳捕集技术应用进展

3.1 国内外船载碳捕集技术实船应用进展

在陆基碳捕集材料开发和工艺体系持续突破背景下, 叠加CII等强制性减排法规的倒逼机制, 船载碳捕集技术正加速由陆域验证向实船集成转化, 其商业化应用被视为实现航运业碳中和的关键性过渡方案。值得关注的是, 自2021年以来, 多种船型已相继完成大型OCCS实船改装及测试, 标志着该技已到达工程化应用的临界点。

船载碳捕集技术的初期研究以国外科技公司与造船厂合作研究为主, 其中DecarbonICE是船载碳捕集技术领域的一个重要国际合作项目, 由日本邮船集团(Nippon Yusen Kaisha, NYK)、Ardmore造船厂和韩国大宇造船(Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd., DSME)联合发起, 丹麦海事发展中心(Maritime Development Center, MDC)主导推进^[72]。DecarbonICE致力于通过低温碳捕集和海洋封存, 将船舶废气中的CO₂转化为干冰, 借助成熟的海上作业将其注入海底沉积层, 目标是减少90%的航运温室气体排放^[73]。该项目创新性地提出了与生物燃料等碳中和能源相结合, 进一步实现“负碳运输”。然而, DecarbonICE在能效经济性方面尚未形成显著优势, 这或许是其未获得大规模应

用的关键制约因素。2020年, OCCS船载模块化技术取得突破, 由Aker Solution剥离碳捕集业务成立的独立公司Aker Carbon Capture (ACC) 基于在海上油气田的长期技术积累(如1996年全球首个海上碳封存项目Sleipner), 开发出了集装箱式模块化碳捕集设备, 可灵活组合成不同规模的解决方案, 尤其适用于空间受限的船载或海上平台场景。2024年, ACC与能源科技公司SLB成立合资企业, 整合SLB的非水溶剂技术与ACC的胺基捕集系统(如专为海上燃气轮机设计的Just Catch Offshore™模块), 加速相关技术的商业化进程^[74]。

随着对OCCS技术的研究不断深入, 实船验证项目不断涌现。日本川崎汽船(K Line)联合三菱造船株式会社和日本海事协会(ClassNK)于2021年启动了全球首个船载紧凑型CO₂捕集工程化示范项目(Carbon Capture on the Ocean Project, CC-OCEAN)。该项目基于陆基电厂胺液吸收法技术, 通过模块化重构开发出了与海洋环境适配的紧凑捕集装置, 并在K Line旗下的28 535载重吨煤炭运输船Corona Utility号上进行了实际应用。2022年6月, 三方完成了有关OCCS设备的实船测试, Corona Utility号搭载的体积50 m³小型捕集装置成功从船舶排放的废气中回收了CO₂, 纯度达99.9%以上。此外, 该项目探索了CO₂资源化利用路径, 包括甲烷化合

成燃料或强化采油碳化应用^[75]。荷兰瓦锡兰废气处理公司与挪威Solvang ASA合作的CCS-Ready洗塔改造项目是航运业脱碳技术落地的重要里程碑，双方自2021年开始合作，以21 200 m³乙烯船Clipper Eris号为载体，于2025年2月完成全球首套商业化碳捕集系统部署。该系统采用瓦锡兰的胺净化技术，集成脱硫装置与碳捕集模块，在动态航行情境下实现了70%的CO₂捕集率，液化后储存于甲板特制储罐中（纯度大于99.5%）^[76]。2025年，韩国大宇造船公司与Hi Air合作的OCCS项目在航运业脱CO₂减排和资源化利用领域取得突破性进展。该项目将希腊Gaslog公司订造的17.4万m³ LNG运输船作为实证平台，完成了全国首例集成湿法捕集与矿物碳化技术的实船性能验证。该项目的技术路径是利用NaOH溶液吸收尾气中的CO₂，可将其转换为碳酸盐矿物实现永久封存。此外，该项目的系统能耗相比传统方案下降30%，设备体积相比传统方案缩小40%，适配LNG运输船有限的甲板空间^[77]。

荷兰海事技术公司Value Maritime在OCCS技术方面成果显著，其于2021年提出的核心解决方案Filtree系统采用模块化设计，可过滤硫化物和99%的颗粒物，同时集成碳捕获模块，通过化学物质吸收废气中的CO₂（吸收量高达40%）。捕获的CO₂储存在CO₂电池中，卸载后可供温室农业或合成燃料生产使用，形成循环利用链条^[78]。2023年，该公司与东太平洋航运（EPS）合作，首次在MR型油船上完成全流程碳捕集系统改造，单航次储存量超过200 t^[79]。2025年，该公司最新研发的ME2CC项目进一步优化系统体积，通过紧凑型设计将装置高度和占地面积减少2/3，适配LNG动力船，并计划在鹿特丹至挪威的固定航线上进行示范应用。目前，该技术已成功应用于集装箱船、滚装船和油船等多种船型中，累计完成10余艘船舶改装，展现了在现有船舶脱碳改造中的高适用性和可扩展性^[80]。

近年来，随着我国造船业的不断发展，国内研究团队在OCCS全流程技术创新和产业化应用验证

方面取得了很多研究成果。中国船舶集团有限公司第七一一研究所在船载碳捕集领域实现重大突破，成功构建了全球首个覆盖“捕集-分离-液化提纯-利用封存”全流程的OCCS技术体系^[81]。该团队于2024年1月在服役10年的旧船上完成全球首套全流程系统加装，于5月在上海洋山港完成实船验证，并于次年1月在荷兰鹿特丹港完成海外首次CO₂卸岸，为全球航运业的绿色转型提供了创新的解决方案。在碳捕集环节，针对船舶尾气中的低体积分数CO₂（5%~10%）处理难题，研发了高效复合吸收剂，通过分子模拟技术筛选多组配方，在国内首个船用实验台中实现了80%的吸收效率（瞬时峰值达90%）。在分离技术方面，采用变压解吸工艺和低温催化剂，将解吸温度降至100℃以下，结合热集成技术降低能耗，突破了传统工艺的瓶颈。液化提纯环节选用环保R744制冷剂，实现了CO₂液化率99.0%和纯度超99.8%，满足环保和经济性需求。在利用封存方面，通过岸基设施回收液态CO₂，推动碳循环产业链的发展，并实现全球首例船舶CII评估中实现CO₂排放量实际扣除，使单船年减排4.4万t，CII评级有望提升至C级，延长船舶使用寿命12年^[82]。同时，改造成本仅为燃料替代方案的50%。该技术方案已在14 000 TEU大型集装箱船上应用，完成了“捕集-卸岸-再利用”闭环验证，标志着我国在全球船舶碳捕集领域达到了领先水平。山东海洋集团旗下的华宸融资租赁公司打造的8.2万t散货船也将配备该全流程OCCS。新船计划于2025年交付，将是全球首个新造散货船OCCS工程案例。上海中远海运重工有限公司在海上浮式生产储油卸油装置（Floating Production Storage and Offloading, FPSO）上集成燃烧后的OCCS，采用模块化设计解决空间限制问题，捕集的CO₂可封存或用于工业合成，同时，回收余热提升能源利用率。中船动力（集团）有限公司和海德威科技等企业也已完成多艘船舶的改装项目，并取得了船级社的技术认证^[83]。具体案例汇总见表4。

表4 国内外主要 OCCS 实船案例对比汇总

Tab. 4 Comparative Summary of Major Domestic and International In-Service OCCS Projects

案例/公司	船型	技术路线	阶段/时间	捕集效率/ 纯度	能耗/体积/ 复杂度	CO ₂ 处理链条	适应性/ 经济性
DecarbonICE (NYK/Ardmore/ DSME, MDC 牵头)	概念 / 多船型	低温捕集→ 干冰→海底 沉积层封存	2019 年项目 启动，处于 概念和工程 化方案设计 阶段	减排目标高 (约 90% GHG)，实 船量化未公 开	须低温、储 运与注入 体系，系统 复杂度高	目标是干 冰注入海 底沉积层	对海上封存 基础设施有 很强依赖， 经济性仍待 验证
Aker Carbon Capture(与 SLB 合 资；Just Catch/Just Catch Offshore)	海上平 台 / 船 舶可用 的模块 化装置	胺法(模块化 与非水溶剂 协同)	2024 年组建 合资企业； JCO 于 2022 年获 DNV 认 可	约 90%捕集 率(产品资 料)	标准化集 装箱模块； 能耗降幅 可达约 35%	可与液化/ 储存集成	模块化、交 付期短，利 于在受限空 间应用

表 4 国内外主要 OCCS 实船案例对比汇总（续）

Tab. 4 Comparative Summary of Major Domestic and International In-Service OCCS Projects (Continued)

案例/公司	船型	技术路线	阶段/时间	捕集效率/ 纯度	能耗/体积/ 复杂度	CO ₂ 处 理链条	适应性/ 经济性
CC-OCEAN (K Line+三菱 造船+ClassNK)	煤炭运输 船 Corona Utility	胺液吸收(紧 凑型)	2021 年 8 月 —2022 上半年 海上示范	CO ₂ 纯度大 于 99.9% (实船)	小型示范装 置, 海工适 配改造	捕集→ 高 纯 CO ₂	以示范为 主, 工程 经验可复 用
Wärtsilä+Solvang (Clipper Eris)	21 000 m ³ 乙烯船	胺法与尾气 治理一体化 (CCS-Ready 洗涤塔演进)	2025 年 2 月完 成全尺寸装船 并海上运行	捕集率约为 70% (实 船); 实验 室纯度测试 接近 99.9% (仍 在 验 证)	集成既有脱 硫/降尘系 统, 系统一 体化度高	液化储 存与甲 板罐; 已 开展离 岸卸载 筹备	厂商宣布 商业化推 出, 面向 多燃料兼 容
Hanwha Ocean (原 DSME) + Hi Air (GasLog LNG)	174 000 m ³ LNG 船 (新造)	NaOH 湿法 吸收+矿物碳 酸化(永久固 化)	2024 年 获 AIP; 实船验证 推进中	捕集率与纯 度未公开 (AIP 阶 段)	通过“捕集 即固化”降 低船上 LCO ₂ 储运 需求; 系统 集成仍复杂	碳酸盐 矿物在 岸或船 上交付	LNG 甲板 空间受限 场景的方 向性方案
Value Maritime (Filtree/CO ₂ Battery) + EPS (MR 油轮 Pacific Cobalt/Gold)	MR 油 船 (49 700 载重吨)	洗涤塔+化学 吸收模块 (CO ₂ 电 池循环)	2022—2023 年 改装并投入航 线	捕集比例最 高 可 达 40%; 单航 次储量大于 200 t	模块化、低 压降; 与既 有洗涤塔一 体化, 改装 周期短	CO ₂ 电 池在港 口卸岸 后, 可用 于温室 气体供 应、合成 燃料生 产或地 质封存	已有多船 实施, 靠 岸利用链 条逐步成 型
SMDERI(中船集 团第七一一研究 所/启尧环境, 14 000 TEU EVER TOP 等)	集装箱船 (改装)	捕集-压缩-液 化-储存全流 程	2024 年 1 月完 成全流程加 装; 2025 年 1 月在鹿特丹完 成首次海外卸 岸; 2025 年 6 月完成 25.44 t 船对船 (STS) 转运与端用打 通	纯度/液化 率工程细节 多来源提 及, 实船链 路关键量化 为 STS 25.44 t	采用 R744 制冷剂的液 化链; 热集 成降耗	已完成 岸罐/卡 车/终端 利用闭 环	已在国内 外完成多 次卸岸与 价值链打 通, 具有 规模化潜 力
华宸融资租赁 (山东海洋集 团) 新造 8.2 万 t 散货船	散货船 (新 造)	全流程 OCCS 预集成	计划 2025 年 交付	—	新造阶段集 成, 布局空 间优化	规划与 岸基协 同链路 配套	面向批量 化复制的 “首艘新 造应用”

大量实船案例表明,当前OCCS存在一些共性问题,即:实船应用落地链路大多是“捕集→液化/储存→卸岸再生/利用”,优先与现有洗涤塔/尾气治理系统一体化;模块化和紧凑化是系统落地的核心(ACC、VM、三菱和瓦锡兰均有强调);岸基协同决定经济性与闭环运行可行性,鹿特丹港、中国东部港口及内陆终端等卸岸利用链条的打通,是影响OCCS从示范走向规模化应用的重要拐点。此外,在技术偏好层面,当前OCCS实船验证以燃烧后处理技术为主导,受益于其成熟的工业应用基础,其中胺基化学吸收法的应用占比为90%(K Line、Wärtsilä、ACC/SLB和Value Maritime均采用该方法)。吸附法和膜分离技术尚处实验室验证阶段,低温液化方案仅在欧洲个别项目在完成初步测试(DecarbonICE/Hi Air)。据IMO统计,截至2025年初,在全球实施的实船验证项目中,改造的新建船型以集装箱船、散货船和游船为主,汽车运输船和FPSO等特殊船型占比相对较小。此外,OCCS工程化应用仍处于技术探索期,2024年启动实船验证,尚未建立多船型的完整数据库,特别是船舶排放特征差异化与碳捕集工艺参数的匹配性缺乏系统性论证。未来OCCS的应用仍面临三重制约,分别是:传统吸收剂的捕集率低,能耗高,腐蚀性强,这些仍是关键应用瓶颈;液化成本高;缺乏配套的岸基协同储运体系及后续转化装置,难以实现捕集CO₂的资源化利用。

3.2 潜在挑战和风险

随着OCCS研究的不断深入,其技术方案日趋成熟。然而,受船舶功能需求与海洋环境特殊性双重制约,相关技术体系的构建仍面临很多挑战。

1) 在技术挑战方面,船舶作为特殊的功能载体,其动力装置的紧凑型设计和有限空间对OCCS实施形成显著制约。以燃烧后捕集方案为例,除了吸附装置以外,还须配置解吸装置,且为实现CO₂的回收利用,必须加装压缩冷凝单元和封存系统。这对现有船舶的改装工程提出了严苛要求,执法人员往往须通过大规模的设备压缩改造来实现系统集成。对于新建船舶而言,须开展前置性空间规划,以预留各类碳捕集装置的安装区域。

2) 经济因素制约体现在全流程成本控制维度。当前OCCS改造费用高昂,CO₂捕集、分离和液化储存等环节的能耗问题尤为突出,系统运行成本占减排总成本的67%以上。尽管国际碳交易市场已逐步形成,但碳价波动性与区域性碳税政策非对称性的存在使得船舶碳交易收益存在显著不确定性,直接影响到OCCS设备投资的经济回报。

3) 环境二次污染问题须引起重视。现有研究对OCCS的环境影响评估多基于实验室模拟数据开展,

很少进行系统级实测验证。研究表明:该技术虽能显著降低全船动力场景下的温室气体排放强度(降幅达54%~68%),但其运行伴随的甲烷逃逸和燃料增量损耗仍会折损约12%的减排效能^[65]。为满足IMO排放标准的要求,OCCS须发展兼顾辅助锅炉与发电机的多源碳捕集技术。值得注意的是,化学吸收法采用的胺类溶剂在循环过程中会产生气态排放物(如NH₃和醛类物质),同时溶剂化学降解可能生成含氮固体废弃物,在其后续处理中,须开发针对性的环境治理方案。

4 OCCS 未来展望

相比陆基系统,船舶在实施碳捕集技术时面临严苛资源约束:能源供应系统须满足动力与碳捕集的双重消耗。针对该工程化瓶颈,提出多技术耦合与CO₂捕集、转化一体化的新技术,以推动OCCS的商业化应用。

1) 多技术耦合协同降耗是实现船舶能源高效利用和低碳化发展的关键技术路径。在LNG运输船等特殊船舶中,余热和冷能资源的综合开发具有很大潜力。具体而言,LNG再气化过程中释放的深冷能量(-163℃~0℃)可被深度整合至OCCS中,通过深冷分离技术实现对气相组分(如CO₂)的高效液化捕集,相比传统工艺可降低30%~50%的能耗。同时,船舶动力系统排烟余压(通常为0.5 MPa~2.0 MPa)可作为驱动压力源,与膜分离技术形成动态耦合,利用压力差驱动气体渗透过程,进一步减少分离工艺的外部能量输入需求(见图7)。

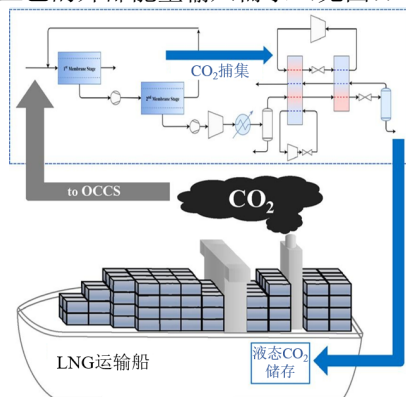


图7 膜分离与低温分离技术耦合的OCCS

Fig. 7 Integrated Membrane and Cryogenic Separation Technology for OCCS

2) CO₂捕集与转化一体化,是船舶绿色化转型放眼于未来的解决方案,其核心在于将碳捕集与电化学还原过程协同耦合,实现船舶排放CO₂的闭环资源化利用。航运业能源结构的低碳化转型为该技术提供了重要支撑:

1) 随着岸电技术、纯电/混动船舶和船载光伏

系统的推广, 构建了以可再生能源为主导的电力供给体系, 为电化学还原反应提供了稳定的清洁能源输入。

2) 基于胺溶液(如MEA和PZ等)的船舶尾气碳捕集技术已相对成熟, 其富液态CO₂负载特性为原位电催化转化提供了反应基质。该一体化体系通过电催化界面设计, 可直接将胺溶液捕集的CO₂在液相环境中还原为甲醇(CH₃OH)和甲酸(HCOOH)等液态燃料(反应式为 $\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{HCOOH}$), 突破了传统胺法碳捕集技术中热解吸再生环节的能耗瓶颈。相比须120℃~150℃高温蒸汽驱动的热解吸工艺, 电化学路径的能量效率提升显著(理论能耗下降约40%), 同时产物分离流程的简化进一步降低系统运行成本。

5 结论

本文基于国际航运业绿色低碳转型战略背景, 系统回顾了不同船载碳捕集技术的研究进展, 探讨其发展路径。通过分析和论证, 揭示了最佳技术体系的竞争优势和实施面临的挑战, 同时提出了面向未来的技术发展建议。

通过对绿色船舶理念进行系统分析, 论证了船载碳捕集技术在现有化石燃料主导格局下作为过渡性技术方案的可靠性。在技术体系构建方面, 依托陆基CCUS技术框架, 系统梳理了船舶适用性碳捕集材料体系和工艺流程的研究进展情况。通过技术评估发现, 燃烧后碳捕集的胺基化学吸收法凭借改造成本低和技术成熟度较高等特性, 在船载场景中展现出了应用可行性。但是, 进一步分析表明, 须突破能耗高和系统尺寸大双重技术瓶颈, 建议重点攻关新型复合吸收剂开发和膜分离技术集成创新。

研究表明, 国际研究机构的研究成果已跨越理论探索、实船验证和全流程体系构建3个阶段。然而, 当前的技术发展仍处于产业化初级阶段, 系统优化须统筹考量捕集效率、能源消耗和环境兼容性等因素。对此, 提出“短期内构建多技术耦合协同降耗体系, 中长期内前瞻性布局捕集和转化一体化技术”的突破性发展路径, 为航运业实现碳中和目标提供可持续的解决方案。

参考文献:

- [1] International Energy Agency. Global Energy Review 2026: CO₂ Emissions[R]. 2026.
- [2] HUA W, SHA Y, ZHANG X, et al. Research Progress of Carbon Capture and Storage (CCS) Technology Based on the Shipping Industry[J]. Ocean Engineering, 2023, 281: 114929.
- [3] 白雪. 国内 LNG 船用市场发展为何很“骨感”[J]. 中国石化, 2016(11): 79-80.
- [4] BAI X. Why is the Development of the Domestic LNG Marine Market So "Bone Like"[J]. Sinopec Monthly, 2016(11): 79-80.
- [5] LEE S S. Analysis of the Effects of EEDI and EEXI Implementation on CO₂ Emissions Reduction in Ships[J]. Ocean Engineering, 2024, 295: 116877.
- [6] 中国船级社. 绿色生态船舶规范 2022[S]. 2022.
- [7] CCS. Green Ecological Ship Regulations 2022[S]. 2022.
- [8] IMO. Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI)[S]. 2023.
- [9] KORBERG A D, BRYNOLF S, GRAHN M, et al. Techno-Economic Assessment of Advanced Fuels and Propulsion Systems in Future Fossil-Free Ships[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 142: 110861.
- [10] IMO. Guidelines for Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)[S]. 2023.
- [11] DNV. Maritime Forecast to 2050[S]. 2023.
- [12] ABS. Requirements for Marine Carbon Capture and Storage Systems[S]. 2022.
- [13] BOOT-HANDFORD M E, ABANADES J C, ANTHONY E J, et al. Carbon Capture and Storage Update[J]. Energy & Environmental Science, 2014, 7(1): 130-189.
- [14] BAINS P, PSARRAS P, WILCOX J. CO₂ Capture from the Industry Sector[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2017, 63: 146-172.
- [15] SMITH K H, ASHKANANI H E, MORSI B I, et al. Physical Solvents and Techno-Economic Analysis for Pre-Combustion CO₂ Capture: a Review[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2022, 118: 103694.
- [16] AKEEB O, WANG L, XIE W, et al. Post-Combustion CO₂ Capture Via a Variety of Temperature Ranges and Material Adsorption Process: a Review[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 313: 115026.
- [17] RAGANATI F, AMMENDOLA P. CO₂ Post-Combustion Capture: a Critical Review of Current Technologies and Future Directions[J]. Energy & Fuels, 2024, 38(15): 13858-13905.
- [18] DINCA C, SLAVU N, BADEA A. Benchmarking of the Pre/Post-Combustion Chemical Absorption for the CO₂ Capture[J]. Journal of the Energy Institute, 2018, 91(3): 445-456.
- [19] YADAV S, MONDAL S. A Review on the Progress and Prospects of O_{xy}-Fuel Carbon Capture and Sequestration

- (CCS) Technology[J]. *Fuel*, 2022, 308: 122057.
- [18] NEMITALLAH M A, HABIB M A, BADR H M, et al. Oxy-Fuel Combustion Technology: Current Status, Applications, and Trends[J]. *International Journal of Energy Research*, 2017, 41(12): 1670-1708.
- [19] PARK S K, KIM T S, SOHN J L, et al. An Integrated Power Generation System Combining Solid Oxide Fuel Cell and Oxy-Fuel Combustion for High Performance and CO₂ Capture[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(4): 1187-1196.
- [20] 翟明洋. 二氧化碳捕集、利用与封存全流程系统优化模型的开发及应用[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2018.
- ZHAI Mingyang. Development and Application of an Optimization Model for the Full-Chain System of Carbon Capture, Utilization and Storage[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [21] ADÁNEZ J, ABAD A. Chemical-Looping Combustion: Status and Research Needs[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(4): 4303-17.
- [22] 金伟, 李贵弘, 阮虹嘉, 等. 碳中和目标下二氧化碳捕集路径及技术研究进展[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2024, 49(3): 265-274.
- JIN W, LI G H, RUAN H J. Research Progress on Carbon Dioxide Capture Pathways and Technologies under Carbon Neutrality Targets[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 49(3): 265-274.
- [23] CHAO C, DENG Y, DEWIL R, et al. Post-Combustion Carbon Capture[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 138: 110490.
- [24] 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.
- [25] MORKEN A K, PEDERSEN S, KLEPPE E R, et al. Degradation and Emission Results of Amine Plant Operations from MEA Testing at the CO₂ Technology Centre Mongstad[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 1245-1262.
- [26] RIEMER P W F, ORMEROD W G. International Perspectives and the Results of Carbon Dioxide Capture Disposal and Utilisation Studies[J]. *Energy Conversion and Management*, 1995, 36(6): 813-818.
- [27] GUO C, CHEN S, CHEN S, et al. Mixture Absorption System of Non-Aqueous MEA Solution for CO₂ Capture[J]. *Modern Chemical Industry*, 2014, 34(8): 107-109.
- [28] ZHANG C. Absorption Principle and Techno-Economic Analysis of CO₂ Absorption Technologies: A Review[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021.
- [29] LUO X, WANG M. Study of Solvent-Based Carbon Capture for Cargo Ships Through Process Modelling and Simulation[J]. *Applied Energy*, 2017, 195: 402-413.
- [30] ZHANG R, ZHANG X, YANG Q, et al. Analysis of the Reduction of Energy Cost by Using MEA-MDEA-PZ Solvent for Post-Combustion Carbon Dioxide Capture (PCC)[J]. *Applied Energy*, 2017, 205: 1002-1011.
- [31] ROCHELLE G T. Amine Scrubbing for CO₂ Capture[J]. *Science*, 2009, 325: 1652-1654.
- [32] KHAN A A, HALDER G, SAHA A. Experimental Investigation on Efficient Carbon Dioxide Capture Using Piperazine (PZ) Activated Aqueous Methyldiethanolamine (MDEA) Solution in a Packed Column[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 64: 163-73.
- [33] ZHOU S, ZHU Y, XI H, et al. Research on CO₂ Capture Performance and Reaction Mechanism Using Newly Tetraethylenepentamine (TEPA) + Monoethanolamine (MEA) Mixed Absorbent for Onboard Application[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 485: 149790.
- [34] AWOYOMI A, PATCHIGOLLA K, ANTHONY E J. Process and Economic Evaluation of an Onboard Capture System for LNG-Fueled CO₂ Carriers[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 59(15): 6951-6960.
- [35] TAVAKOLI S, GAMLEM G M, KIM D, et al. Exploring the Technical Feasibility of Carbon Capture Onboard Ships[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 452: 142032.
- [36] LIU R S, SHI X D, WANG C T, et al. Advances in Post-Combustion CO₂ Capture by Physical Adsorption: from Materials Innovation to Separation Practice[J]. *Chem Sus Chem*, 2021, 14(6): 1428-1471.
- [37] ZHANG X, ZHANG D, ZHANG C, et al. Enhancing CO₂ Solubility for Efficient Carbon Capture via Self-Assembly Deep Eutectic Solvents on MOF-808[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 358: 130331.
- [38] GARCÍA-MARIACA A, LLERA-SASTRESA E, MORENO F. CO₂ Capture Feasibility by Temperature Swing Adsorption in Heavy-Duty Engines from an Energy Perspective[J]. *Energy*, 2024, 292: 130511.
- [39] KIM J, YOO Y, KIM S, et al. Design and Assessment of a Novel Mobile Carbon Capture System: Energy and

- Exergy Analyses[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 300: 117934.
- [40] LARKIN C, LAMPRI K, MAZZONE S, et al. Retrofitting Hollow Fibre Carbon Capture Systems to Decarbonise Surface Transport[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2023, 67: 102336.
- [41] 浙江吉利控股集团有限公司. 吉利控股集团 2024 可持续发展报告[R]. 2025.
Zhejiang Geely Holding Group Co., Ltd. Geely Holding Group 2024 Sustainability Report[R]. 2025.
- [42] ERTO A, BALSAMO M, PADUANO L P, et al. Utilization of Alumina-Supported K₂CO₃ as CO₂-Selective Sorbent: a Promising Strategy to Mitigate the Carbon Footprint of the Maritime Sector[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2018, 24: 139-148.
- [43] LARKIN C, MORRISON J, HEMMINGS M, et al. Hollow Fibre Adsorption Unit for On-Board Carbon Capture: The Key to Reducing Transport Emissions[J]. Carbon Capture Science & Technology, 2022, 2: 100034.
- [44] PEZZELLA G, BHATT P M, ALHAJI A, et al. Onboard Capture and Storage System Using Metal-Organic Frameworks for Reduced Carbon Dioxide Emissions from Vehicles[J]. Cell Reports Physical Science, 2023, 4(7): 101467.
- [45] WIJMANS J G, BAKER R W. The Solution-Diffusion Model: A Review[J]. Journal of Membrane Science, 1995, 107(1): 1-21.
- [46] LI X, JIAO C, ZHANG X, et al. Dual-Modulated Polyamide Membranes Based on Vapor-Liquid Interfacial Polymerization for CO₂ Separation[J]. Chemistry of Materials, 2024, 36(1): 461-470.
- [47] LI X, CHENG Y, ZHANG H, et al. Efficient CO₂ Capture by Functionalized Graphene Oxide Nanosheets as Fillers to Fabricate Multi-Permeable Mixed Matrix Membranes[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(9): 5528-5537.
- [48] LIN H, GONG K, HYKYS P, et al. Nanoconfined Deep Eutectic Solvent in Laminated MXene for Efficient CO₂ Separation[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 405: 126961.
- [49] OH J, ANANTHARAMAN R, ZAHID U, et al. Process Design of Onboard Membrane Carbon Capture and Liquefaction Systems for LNG-Fueled Ships[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 282: 120052.
- [50] DAMARTZIS T, ASIMAKOPOULOU A, KOUTSONIKOLAS D, et al. Solvents for Membrane-Based Post-Combustion CO₂ Capture for Potential Application in the Marine Environment[J]. Applied Sciences, 2022, 12(12): 6100.
- [51] LIU Y, HAN J, YOU H. Exergoeconomic Analysis and Multi-Objective Optimization of a CCHP System Based on LNG Cold Energy Utilization and Flue Gas Waste Heat Recovery with CO₂ Capture[J]. Energy, 2020, 190: 116201.
- [52] SONG C, LIU Q, DENG S, et al. Cryogenic-Based CO₂ Capture Technologies: State-of-the-Art Developments and Current Challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 101: 265-78.
- [53] ANEESH A, SAM A A. A Mini-Review on Cryogenic Carbon Capture Technology by Desublimation: Theoretical and Modeling Aspects[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1167099.
- [54] XU G, LIANG F, YANG Y, et al. An Improved CO₂ Separation and Purification System Based on Cryogenic Separation and Distillation Theory[J]. Energies, 2014, 7(5): 3484-3502.
- [55] WANG Z, HAN F, JI Y, et al. Analysis on Feasibility of a Novel Cryogenic Heat Exchange Network with Liquid Nitrogen Regeneration Process for Onboard Liquefied Natural Gas Reliquefaction[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2020, 22: 100760.
- [56] MONDAL M K, BALSORA H K, VARSHNEY P. Progress and Trends in CO₂ Capture/Separation Technologies: a Review[J]. Energy, 2012, 46(1): 431-441.
- [57] ZHAO J, WEI Q, WANG S, et al. Progress of Ship Exhaust Gas Control Technology[J]. Science of the Total Environment, 2021, 799: 149437.
- [58] KIM Y, LEE J, AN N, et al. Advanced Natural Gas Liquefaction and Regasification Processes: Liquefied Natural Gas Supply Chain with Cryogenic Carbon Capture and Storage[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 292: 117349.
- [59] R I E A G G, PROGRAMME D. Further Assessment of Emerging CO₂ Capture Technologies for the Power Sector and Their Potential to Reduce Costs[R]. 2019.
- [60] ALALAIWAT D, KHAN E. Post-Combustion Carbon Capture Process Modeling, Simulation, and Assessment of Synergistic Effect of Solvents[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2024, 135: 104145.
- [61] BUI M, FLØ N E, DE CAZENOVE T, et al. Demonstrating Flexible Operation of the Technology Centre Mongstad (TCM) CO₂ Capture Plant[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2020, 93: 102879.

- [62] AGBONGHAE E O, HUGHES K J, INGHAM D B, et al. Optimal Process Design of Commercial-Scale Amine-Based CO₂ Capture Plants[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(38): 14815-14829.
- [63] AKDAG A S, DURAN I, GULLU G, et al. Performance of TSA and VSA Post-Combustion CO₂ Capture Processes with a Biomass Waste-Based Adsorbent[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(6): 108759.
- [64] THIEDEMANN T M, WARK M. A Compact Review of Current Technologies for Carbon Capture as Well as Storing and Utilizing the Captured CO₂[J]. *Processes*, 2025, 13(1): 283.
- [65] OH J, KIM D, ROUSSANALY S, et al. Optimal Capacity Design of Amine-Based Onboard CO₂ Capture Systems Under Variable Marine Engine Loads[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 483: 149136.
- [66] BHADOLA A, PATEL V, POTDAR S, et al. Technology Scouting-Carbon Capture: From Today's to Novel Technologies[R]. 2020.
- [67] WATSON J C, PENNISI K J, PARRISH C, et al. Techno-Economic Process Optimization for a Range of Membrane Performances: What Provides Real Value for Point-Source Carbon Capture?[J]. *Carbon Capture Science & Technology*, 2024, 11: 100182.
- [68] PARK J W, HEO S, YEO J G, et al. Membrane-Based CO₂ Capture Across Industrial Sectors: Process Conditions, Case Studies, and Implementation Insights[J]. *Membranes*, 2025, 15(7): 200.
- [69] FAVRE E. Membrane Separation Processes and Post-Combustion Carbon Capture: State of the Art and Prospects[J]. *Membranes*, 2022, 12(9): 884.
- [70] SONG C F, KITAMURA Y, LI S H. Evaluation of Stirling Cooler System for Cryogenic CO₂ Capture[R]. Tsukuba, Japan: University of Tsukuba, 2012.
- [71] CHART INDUSTRIES INC. Cryogenic Carbon Capture™ (CCC)[R]. 2025.
- [72] SAFETY4SEA. Onboard carbon capture system under development[R]. 2019.
- [73] WORLD MARITIME N. DecarbonICE: New Carbon Capture Project Gains High-Level Traction[C]// *Offshore Energy*. 2019.
- [74] SLB. SLB and Aker Carbon Capture Announce Closing of Carbon Capture Joint Venture[R]. 2024.
- [75] KAWAMATA S, WATANABE Y, UNSEKI T. Development of Onboard CO₂ Capture System -"CC-Ocean Project" for verification Testing of Onboard CO₂ Capture System[J]. *ClassNK Technical Journal*, 2022, 5(1): 15-21.
- [76] WÄRTSILÄ. Clipper Eris: How Solvang cut CO₂ Emissions by 70% with Wärtsilä Carbon Capture Solution[R]. Wärtsilä Marine-Customer References (Merchant). 2025.
- [77] OVCINA MANDRA J. DSME Verifies its Onboard Carbon Capture System on an LNG Carrier[R]. 2022.
- [78] RIVIERA N. EPS Installs First of Two Carbon-Capture Systems on Board MR Tankers[R]. 2023.
- [79] VALUE M. EPS and Value Maritime Install First-of-Its-Kind Fully Integrated Carbon Capture Solution Onboard MR Tanker M/T Pacific Cobalt[R]. 2023.
- [80] VALUE M. Value Maritime and ME2CC Consortium Partners Announce Maritime Masterplan 2024 Funding for Carbon Capture System on LNG Vessel[R]. 2025.
- [81] 中国船舶工业行业协会. 全球首套全工艺流程船用碳捕集系统顺利交付[R]. 2024.
China Association of the National Shipbuilding Industry. The world's First Full-Process Shipboard Carbon Capture System Successfully Delivered[R]. 2024.
- [82] 国际船舶网. 再创世界首例！七一一所自研船舶碳捕集设备实现 CII 扣除[R]. 2024.
International Ship Network. Another World First: Shipboard Carbon Capture Equipment Independently Developed by the 711 Research Institute achieves CII deduction[R]. 2024.
- [83] SI K. DNV Grants AiP to Headway for Carbon Capture Technology[C]// *Seatrade Maritime News*. 2022.
- [84] 周薇薇, 张杰, 赵天翔, 等. 绿色船舶国际法规与技术发展综述[J]. *船舶工程*, 2025, 47(8): 28-39.
ZHOU W W, ZHANG J, ZHAO T X, et al. Overview of International Regulations and Technological Development for Green Ships[J]. *Ship Engineering*, 2025, 47(8): 28-39.
- [85] 王娜娜, 田立群, 郑颖青. 船舶清洁能源技术发展现状[J]. *船舶工程*, 2025, 47(8): Z4-Z11.
WANG N N, TIAN L Q, ZHENG Y Q. Development Status of Ship Clean Energy Technology[J]. *Ship Engineering*, 2025, 47(8): Z4-Z11.
- [86] 李鸣祺, 陈瑞侃, 姚金果, 等. 船舶碳捕集系统中醇胺吸收剂劣化机制[J]. *船舶工程*, 2025, 47(8): Z12-Z27.
LI M Q, CHEN R K, YAO J G, et al. Degradation Mechanism of Alkanolamine Absorbents in Shipboard Carbon Capture Systems[J]. *Ship Engineering*, 2025, 47(8): Z12-Z27.