

文章编号:1671-1637(2024)02-0001-19

船舶碳捕集、利用与封存技术综述

卢明剑^{1,2,3,4,5}, 董胜节^{1,2,3,4}, 严新平^{1,2,3,4,5,6}, 李珂⁷, 李晓东⁸, 周晓⁸

(1. 武汉理工大学 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063; 2. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063; 3. 武汉理工大学 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063; 4. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063; 5. 中国远洋海运集团有限公司 院士工作站, 上海 200120; 6. 东湖实验室, 湖北 武汉 420202; 7. 中国船舶集团有限公司 第七一一研究所, 上海 201108; 8. 中海环境科技(上海)股份有限公司, 上海 200135)

摘要:追踪了国内外围绕船舶碳捕集、利用与封存(CCUS)技术开展的研究,梳理了重点内容和主要研究成果;从CCUS不同技术路径的优缺点出发,分析了目前CCUS技术在船舶上的应用可行性;针对发展迅猛的液化天然气船舶,提出了开展CCUS的技术路线;总结了目前船舶CCUS技术存在的问题,针对性地提出了建议,并探讨了船舶CCUS关键技术的发展方向。研究表明:船舶CCUS技术可以在短期内显著减排,且适用于营运和新造在内的绝大多数含碳燃料船舶;国外正在积极部署船舶CCUS技术实船验证研究,但国内的研究多处于概念设计与仿真研究阶段;由于改造简单,技术成熟度高且成本低,燃烧后捕集法中的化学吸收法目前最适用于船舶碳捕集,但要解决能耗高和系统尺寸大等问题,需加快探索性能更优良的先进化学溶剂及更具革命性的捕集方法;液态存储是目前最成熟的存储方式,但还需要提升其安全性与经济性;亟需加快构建以大型CO₂运输船为主的储运方式,推进港口与海洋平台CO₂转驳、接收的基础设施建设;CO₂在海洋油气田驱油驱气、淡化海水及能源催化重整等领域应用前景广阔,但船舶CO₂利用技术亟待规模化、产业化和相关产业技术协同发展;将液态CO₂或干冰进行海洋封存是未来的发展趋势,但亟需完善相关标准和法律法规,推动封存配套装备和技术开发;需要探索出一整套标准化、系统化的碳排放管理模式,推动CCUS技术配套发展,构建完整、绿色、经济、高效的船舶CCUS产业链。

关键词:船舶工程;碳捕集;碳封存;碳排放;航运业碳减排

中图分类号:U664 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2024.02.001

Review on ship-based carbon capture, utilization and sequestration technology

LU Ming-jian^{1,2,3,4,5}, DONG Sheng-jie^{1,2,3,4}, YAN Xin-ping^{1,2,3,4,5,6},
LI Ke⁷, LI Xiao-dong⁸, ZHOU Xiao⁸

(1. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 2. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 3. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 4. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 5. Academician Workstation, China COSCO Shipping Corporation Limited, Shanghai 200120,

收稿日期:2023-11-20

基金项目:中国工程院战略研究与咨询项目(2022-HYZD-07-02);国家自然科学基金项目(51920105014)

作者简介:卢明剑(1987-),男,江苏宿迁人,武汉理工大学副研究员,工学博士,从事船舶新能源与节能减排研究。

通信作者:严新平(1959-),男,江西莲花人,中国工程院院士,武汉理工大学教授,工学博士。

引用格式:卢明剑,董胜节,严新平,等.船舶碳捕集、利用与封存技术综述[J].交通运输工程学报,2024,24(2):1-19.

Citation:LU Ming-jian, DONG Sheng-jie, YAN Xin-ping, et al. Review on ship-based carbon capture, utilization and sequestration technology[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(2): 1-19.

China; 6. East Lake Laboratory, Wuhan 420202, Hubei, China; 7. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Shanghai 201108, China; 8. China Shipping Environment Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200135, China)

Abstract: The researches on ship-based carbon capture, utilization, and sequestration (CCUS) technology conducted in both China and abroad were tracked, and key contents and main research results were sorted out. Based on the advantages and disadvantages of different CCUS technology paths, the application feasibility of current CCUS technology on ships was analyzed. The technical route to carry out CCUS was proposed for the rapidly developing liquefied natural gas ships. The problems existing in current ship-based CCUS technology were summarized, targeted recommendations were put forward, and development direction of key ship-based CCUS technology was discussed. Research results show that the ship-based CCUS technology can significantly reduce emissions in short term and is applicable to the vast majority of carbon-fueled ships, including those in operation and the newly constructed. Foreign countries are actively deploying the ship-based CCUS technology real-ship verification research, but the research in China is mostly at the stage of conceptual design and simulation research. Due to the simple transformation, high technology maturity, and low cost, the chemical absorption method in the post-combustion capture methods is most suitable for the ship-based carbon capture at present. But to solve the problems of high energy consumption and large system sizes, it is necessary to accelerate the exploration of advanced chemical solvents with better performance and more revolutionary capture methods. Liquid storage is currently the most mature storage method, but its safety and economy need improvement. There is an urgent need to accelerate the construction of storage and transportation methods dominated by large CO₂ carriers and to promote the construction of CO₂ transfer and reception infrastructure at ports and marine platforms. CO₂ has great development prospect in oil displacement and gas-freeing in offshore oil-gas fields, seawater desalination, and energy catalytic reforming, but CO₂ utilization technology for ships needs to be scaled up and industrialized and requires synergistic development of related industrial technologies. Marine sequestration of liquid CO₂ or dry ice is the future development trend, but there is an urgent need to improve relevant standards, laws, and regulations to promote the development of sequestration equipment and technology. It is necessary to explore a set of standardized and systematic carbon emission management modes to promote the mutual matching and promotion of CCUS technology and establish a complete, green, economical, and efficient ship-based CCUS industry chain. 4 tabs, 11 figs, 95 refs.

Key words: ship engineering; carbon capture; carbon sequestration; carbon emission; carbon reduction in shipping industry

Author resumes: LU Ming-jian(1987-), male, associate professor, PhD, mingjian_lu@whut.edu.cn; YAN Xin-ping(1959-), male, academician of Chinese Academy of Engineering, professor, PhD, xpyan@whut.edu.cn.

Foundation items: Strategic Research and Consulting Project of Chinese Academy of Engineering (2022-HYZD-07-02); National Natural Science Foundation of China (51920105014)

0 引 言

航运业面临温室气体排放量日益增加^[1]但国内外碳减排法规政策日趋严格的现状,绿色航运已成

为当前新的研究热点^[2]。为了应对温室气体持续增加的难题,航运业在双碳战略大背景下主要采取能源替代、节能增效^[3]及碳捕集、利用与封存等碳减排方式。绿色新能源技术的船舶应用是当前的热门发

展方向^[4],但是新能源还存在着成本高及技术不成熟等问题,缺乏满足全世界航运所需基础设施的能力。相较之下,常规化石燃料的动力系统、供应链及管理体系则更为成熟。到 2050 年,以重油、柴油及液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)等化石能源燃料选择加成仍将占据全球船队的一半以上^[5],故以化石能源为主的传统能源仍将是未来至少 30 年内船舶的主流能源。通过提升船舶能效以实现减碳的效果十分有限,不能匹配当今的碳减排压力,进而支撑减排目标。而碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Sequestration, CCUS)技术是目前实现航运业碳减排的最有效技术之一^[6-8],进行船舶 CCUS 技术研究势在必行。CCUS 技术在陆上电力、石油、化工等领域已开展商业试用,但在船舶中的应用还处于起步阶段,亟需开展船舶 CCUS 技术的研究和应用。

本文总结了国内外船舶 CCUS 技术的研究进展,分析了 CCUS 关键技术在船舶上的应用方式;针对 LNG 船舶提出了 CCUS 系统的技术路线,总结并探讨了船舶 CCUS 技术目前存在的问题及发展方向,为促进船舶 CCUS 技术的发展与应用提供参考。

1 国外船舶 CCUS 技术进展

国外较早开展了船舶 CCUS 技术研究,已经在船舶 CCUS 技术可行性、实施方案示范项目及装备研制上取得了一定的进展。其研究成果推动了船舶 CCUS 技术的发展,为船舶 CCUS 技术应用和推广奠定了理论基础。

1.1 国外船舶 CCUS 技术可行性研究

得益于陆上日益成熟的碳捕集、利用与封存技术,对于航运业碳减排,船舶 CCUS 技术被寄予厚望。Wang 等^[9]通过实船试验和计算机仿真论证了碳固化法用于船舶碳减排的可行性,认为船舶碳捕集(Ship-Based Carbon Capture, SBCC)与封存是减少航运业温室气体排放的优秀方案。Wang 等^[10]进一步研究了某散货船上采用固化法减排方案的运行成本及利润,表明 CCUS 在船舶上应用的经济可行性,同时利用仿真手段证明了 CCS 安装在某集装箱船上的可行性。Fang 等^[6]提出了一种在严格的船舶能效营运指数约束下确定船舶 CCS 容量的优化配置方法,提出的模型第 1 阶段是确定 CCS 的容量和储能系统的扩展容量,以维持 CCS 的运行,第 2 阶段是一个联合的船上发电和需求侧管理模

型,以解决 CCS 集成导致的电力短缺问题,研究表明:碳捕集系统是可再生能源成熟前减少船舶温室气体排放的可行替代方案。Stec 等^[11]分析了包括 SO₂ 脱除、碳捕集和 CO₂ 压缩在内的整个船舶碳捕集系统的能量需求,根据热带及北极环境下的情景模拟,指出燃烧后碳捕集工艺是降低船舶能效设计指数的很有前景的技术。Ros 等^[7]指出在节油措施下其他减排方法不会产生较高的碳减排率,而船舶碳捕集技术可在短时间内实施并有可能大幅减少海运部门的碳排放量。Oh 等^[12]认为新型船舶膜捕集和液化系统可以成为国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)2050 年温室气体减排目标的一个极具竞争力方案。García-Mariaca 等^[13]指出船舶碳捕集和封存系统可能是实现内燃机驱动的运载装备零碳排放的较好选择,针对内燃机为动力的运载装备开展了碳捕集案例分析,结果表明在海运及公路货物运输装备上运行 CCS 系统是可行的。Buirma 等^[14]认为基于船舶的碳捕集技术是减少大型海上 LNG 动力船碳排放的非常有效的方法,在满足边界条件下船东将有很大潜力实现 IMO 2030 与 IMO 2050 目标。PMW Technology 公司与切斯特大学等合作进行的一项研究表明:低温碳捕集过程在船舶上应用是可行的,同时可与工业集群开发的已有基础设施一同发挥有益协同作用,最大限度地减少了额外投资^[15]。

1.2 船舶 CCUS 技术路线及经济性研究

船舶 CCUS 技术路线的选择首要考虑的是高效、经济。船舶碳捕集能耗占据整个碳捕集与封存技术能耗的 70% 以上^[16-17],捕集率及能耗是评估船舶 CCUS 效率和经济性的关键指标。国外学者目前主要通过性能更优的溶剂或改进工艺等方式提升碳捕集率和降低能耗。Awoyomi 等^[18]以氨溶液作为捕集溶剂进行的 SBCC 研究结果表明:船舶主机负载在 85% 时,废气余热回收的 4 MW 能量足以满足溶剂在 90~100 kg·s⁻¹ 的再循环流速下达到 70% 的碳捕集率。Long 等^[19]在以单乙醇胺(Monoethanolamine, MEA)溶液作吸收剂的 3 MW 柴油机动力船上实现了 87.4% 捕集率,并在此基础上研究了在相同工艺配置下性能更为优良的混合溶剂和添加中冷、多级进料及热集成等改进工艺,以提高碳捕集率。Van Den Akker^[20]针对 LNG 船舶,利用 LNG 的气化冷能及尾气余热进行了船舶碳捕集流程的概念设计,在保证载货能力及稳定性的基础上进行了配备碳捕集设备的 LNG 船舶空间设计。Awoyomi 等^[21]针

对总装机功率为 10.3 MW 的 LNG 船,研究了氨水作为捕集溶剂的碳捕集技术,分析了发动机负荷对碳捕集率的影响,并针对不同 CO₂ 捕集率做了经济性评估,研究表明:在 90% 的捕集率下,每吨 CO₂ 捕集成本至少是 117 美元,而废气余热利用是大幅降低捕集成本的有效技术,在 60%~90% 捕集率范围内,废气余热都可以满足再沸器的能量需求。Luo 等^[22]首次系统研究了吸收型化学溶剂 MEA 在 3.5 万总吨参考货船上的 CO₂ 吸收工艺设计,研究表明:由于 CCS 系统热电供应有限,碳捕集率仅能达到 73%,此时每吨 CO₂ 捕集成本为 77.5 欧元,在添加燃气轮机作为公用能源设施后,碳捕集率上升到 90%,相应设备多消耗的柴油使得每吨捕集成本上升到 163.07 欧元。Feenstra 等^[23]针对柴油机动力船及 LNG 船舶提出了以 MEA 和哌嗪(PZ)作为吸收剂,利用 Aspen Plus 模拟了利用废气余热能进行碳捕集的过程,并在不同碳捕集率下对碳捕集成本进行了经济性分析,研究表明:捕集率的升高需要设备投入成本增加,但 CO₂ 单位质量捕集成本会降低,当吸收溶液由 MEA 溶液改为解吸压力更高的 PZ 溶液时,船舶碳捕集成本也会降低。Ros 等^[7]研究了 SBCC 的一般设计考虑因素(溶剂选择、热集成及船舶运动等),然后以 DerisCO2 项目中一艘名为“Sleipnir”的 LNG 船为案例研究了 SBCC 的概念集成设计及经济性分析等,研究表明:碳捕集、液化环节并不会对船舶造成重大影响。MEA 溶液虽存在高能耗及易氧化降解的缺点,但其在海洋环境下安全系数高,是当前 SBCC 的首选溶液。碳捕集率随尾气温度上升而提高,而液化 CO₂ 的量同样随液化压力增大而增加。碳捕集率虽然随吸收塔的静态倾斜角度增大而降低,但海船运动造成的吸收塔摇动并未降低碳捕集率。

船舶 CCUS 技术经济性评估是关系 CCUS 技术应用的关键研究内容,为了提高船舶 CCUS 技术路线的经济性,一些学者针对船舶 CCUS 系统中的环节进行了能耗、成本的优化设计研究。Lee 等^[24]针对 CO₂ 液化、蒸发 CO₂ 再液化及 CO₂ 卸载过程进行了建模与仿真分析,研究了最佳运行工况,结果表明:液化工艺中的每吨 CO₂ 压缩功率为 103.42 kW·h。Seo 等^[25]建立了 CCUS 系统的经济性评估模型,基于全生命周期成本从几种可调节操作条件(压缩、制冷等环节)进行了优化,并将模型应用于 2 个案例中,研究表明:运营成本在全生命周期成本中占主导地位,其主要受液化系统的影响。用于液化驳船

的成本随 CO₂ 运输规模增大而上升,而船舶 CCS 链的总成本并未随 CO₂ 运输船规模增大而降低。Seo 等^[26]从 SBCC 的全生命周期成本出发评估了 CO₂ 临时储罐的最佳容积。有研究人员从 CO₂ 吸收溶剂、膜系统、碳捕集系统尺寸等方面对经济性的影响也进行了相关研究。Zhou 等^[27]利用 NaOH 吸收废气中的 CO₂ 形成 Na₂CO₃,再利用 Ca(OH)₂ 溶液处理形成可带来经济价值的固体 CaCO₃,提供了新型、经济且更具紧凑性的船舶固态碳存储方案。Oh 等^[12]考虑到 LNG 船舶尾气中 CO₂ 摩尔分数低(约 3%)及 O₂ 摩尔分数较高(约 16%)的情况,研究了适用于船舶的紧凑、节能的膜捕集及液化系统,并与胺基系统在能耗及尺寸方面进行了比较。Güler 等^[8]通过工艺模拟手段研究了吸收塔水力设计参数对溶剂型 CCS 系统效能的影响,并对油船、Q-Max、Q-Flex 型及传统 LNG 运输船的 CCS 系统进行了成本对比分析,研究表明:在具有高速度及运费价值的 Q-Max、Q-Flex 型 LNG 运输船上,相较于航速控制、LNG 燃料使用等碳排放控制手段,CCS 技术更具成本效益。

1.3 船舶 CCUS 项目

除上述理论和试验研究外,国外还开展了船舶 CCUS 应用和示范项目,进一步推动了船舶 CCUS 技术的进步。

2010 年,挪威船级社与 Process Systems Enterprise 公司合作开展了 Eurostar 项目,该项目成功提出了一种用于船上 CO₂ 捕集、液化和临时存储的概念设计,能够实现碳减排约 65%^[28]。该方案利用化学吸收法从船舶柴油机尾气中捕集 CO₂ 并液化存储,然后通过港口进行转运。

2019 年 12 月,日本邮轮集团、Ardmore 造船厂、韩国大宇造船等共同发起 Decarbon ICE 项目^[29-30],探索 CCUS 技术在船舶上的应用。该项目面向新建船舶或改造已有船舶,预计能够减少 90% 以上的温室气体排放。该项目以已知的物理原理和技术为基础,可与新的碳中性燃料(生物燃料或合成燃料)相结合,以根除大气中的 CO₂ 排放来源,最终实现负碳航运效果。采用低温处理技术将 CO₂ 制成流线型干冰,然后进行海洋封存。其中海洋封存的技术路线如下。

(1)利用低温处理技术将捕集到的 CO₂ 制成干冰粉。

(2)利用成型设备将纯干冰粉制成质量约 1 t 的流线型干冰。

(3)将流线型干冰抛投入海并深埋入海底沉积层。

(4)液态 CO₂ (干冰融化形成)和水反应生成 CO₂ 水合物,能够稳定存在于沉积层中,可以达到至少数万年的封存效果^[31]。

日本川崎 K Line 于 2020 年 8 月 31 日宣布与三菱造船公司和日本海事协会合作 Carbon Capture on the Ocean(CC-Ocean)项目^[32]。该项目进行紧凑型碳捕集装置的开发,并验证海上碳捕集装置的可操作性和安全性,探索海上碳捕集系统的紧凑性要求及稳定运行的规格要求^[33]。CC-Ocean 项目于 2022 年完成了全球首次海洋船舶碳捕集的示范研究,在一个输出功率为 8 500 kW 的 89 000 DWT 级运煤船上安装了 50 m³ (5 m(长)×2 m(宽)×5 m(高))的碳捕集系统,完成了近 6 个月的实船测试验证。

油气行业气候倡议组织(Oil and Gas Climate Initiative, OGCI)与能源船运公司 StenaBulk 基于沙特阿美(Aramco)成功在重卡上进行碳捕集示范的经验,围绕船舶碳捕集技术进行了可行性合作研究^[34]。项目主要是评估船舶碳捕集技术可行性和经济性能,目标是为航运业 2050 年比 2008 年降低 50% 排放提供技术方案。

挪威航运公司 Solvang ASA 与瓦锡兰废气净化系统部门于 2021 年 10 月签署意向协议,计划在一艘 21 000 m³ 乙烯船“Clipper Eos”号上进行 CCS 系统的全面试点改造安装,目标是实现未来深海船队的零排放。瓦锡兰废气净化系统部门基于脱硫系统设计了船舶 CCS 系统,2022 年基于已有的溶剂研发基础完成了船舶碳捕集系统最佳吸收溶剂的选择测试。在总部挪威莫斯建立了 1 MW 陆上测试系统,初步测试表明可以实现 70% 的 CO₂ 捕集率,原计划于 2023 年试点 CCS 系统安装在“Clipper

Eos”号上^[35-36]。

挪威海工龙头企业 Aker Solution 于 2020 年 8 月宣布剥离碳捕集技术相关业务,成立专业碳捕集公司 Aker Carbon Capture。目前该碳捕集公司已经完成了模块化的碳捕集系统,可灵活组合以满足不同规模的碳捕集要求,解决方案、服务和技术涵盖了整个 CCUS 价值链^[37]。

荷兰海事技术公司 Value Maritime 开发的首套 CO₂ 捕集模块和 CO₂ 电池于 2021 年 10 月安装到了 Visser 航运公司的 1036 标准箱集装箱船“Nordica”号上。该公司将 CO₂ 捕集模块集成到一种小型预制、预安装、即插即用的气体清洁系统——Filtree 系统上^[38]。该系统可以将捕集的 CO₂ 充入电池,而此 CO₂ 电池是一种可以无限次充放 CO₂ 的存储设施。CO₂ 电池可以将存储的 CO₂ 供给岸上 CO₂ 需求客户进行利用,CO₂ 被排放后可以将 CO₂ 电池再次运回船上充入船舶捕集到的 CO₂。

韩国大宇造船于 2022 年 10 月 7 日宣布已经把碳捕集存储设备搭载在实际 LNG 运输船上并完成了性能测试。该船舶碳捕集系统通过 NaOH 溶液将船舶废气中的 CO₂ 转化为矿物,然后将 NaOH 再生重复利用^[39]。

目前已有的船舶 CCUS 示范项目都是通过燃烧后捕集技术手段实现船舶尾气的 CO₂ 减排处理,如表 1 所示。自 IMO 于 2018 年提出全球首份船舶温室气体减排初步战略以来,船舶 CCUS 项目明显增多。目前来看,船舶 CCUS 项目的实施进展与预期计划还存在差距,同时其试点性使得投入比较大,亟需通过技术进步及规模效应降低其成本。船舶 CCUS 装备的开发研究刚起步,须推动船舶 CCUS 装备研究和应用进程。

表 1 国外主要船舶 CCUS 项目

Table 1 Major foreign ship-based CCUS projects

年份	2010	2019	2020	2021	2021	2022
项目名称	Eurostar	Decarbon ICE	Carbon Capture on the Ocean	乙烯船“Clipper Eos”号 CCS 系统改造安装	Filtree 气体清洁系统	大宇造船 LNG 船舶碳捕集
技术路线	化学吸收→液化存储→转运码头	低温处理→制流线型干冰→海洋封存	利用燃烧后捕集法,聚焦于捕集装置开发	化学吸收	模块捕集→CO ₂ 电池存储→岸上利用	化学吸收→CO ₂ 矿化→吸收溶剂再生循环利用
减排效果(目标)	CO ₂ 减排 65%	减排 90% 以上	验证海上碳捕集系统紧凑性及稳定运行规格要求	深海船队零碳航行		

2 国内船舶 CCUS 技术进展

相比国外已经较成体系的研究,国内船舶

CCUS 研究存在差距。

2.1 国内船舶 CCUS 技术可行性研究

汤旺杰等^[40]分析了燃烧前、富氧燃烧、燃烧后

等碳捕集技术在船舶上应用的优缺点,认为 CCS 技术受限于成本及技术等问题而离在船舶上广泛应用还有一段距离。孙化栋等^[41]同样针对 CCUS 关键技术船舶上的应用可能性进行了分析,总结了目前船舶 CCUS 存在的安装改造困难、捕集及存储成本高昂、存储与运输安全性关注不足等问题,并从 CCUS 技术进步、多能源耦合利用及政府政策方面提出了解决方案。金鼎^[42]从 CCUS 技术出发分析了船舶 CCUS 关键技术的应用前景,认为船舶碳捕集与封存部分关键技术已有突破,但还未到商业应用阶段。吴月辉^[43]肯定了碳捕集与封存技术在固碳减排方面的巨大潜力,但认为该技术仍需要继续研究。李月清^[44]建议加强 CCUS 产业顶层设计,加强关键核心技术攻关,推动 CCUS 产业链示范及商业化应用。马玉璞^[45]根据中国碳源、碳汇分布国情指出海上碳捕集、利用与封存是实现电力及工业方面“碳中和”的可行技术选择及重要手段,发展海上

碳捕集、利用与封存装备潜力巨大。张贤等^[46]指出 CO₂ 捕集、利用与封存技术是中国实现“碳达峰、碳中和”目标技术组合中不可或缺的重要组成部分。薛龙玉^[47]表示,CCUS 技术的经济性在一定程度上取决于后续的碳排放费用,未来随着航运碳排放市场机制的逐步发展,越来越高的碳排放成本将会提升 CCUS 技术的市场竞争力,并随着应用增加进而促进技术进一步成熟发展,降低设备制造成本,带来相关配套设施的完善,进而降低运营成本。

2.2 国内船舶 CCUS 项目

中国船舶集团有限公司第七一一研究所(七一一所)提出了主要包括船舶碳捕集、分离、液化提纯、利用封存等几个方面的总体技术方案,如图 1 所示。通过吸收塔、解吸塔等设备实现船舶尾气中的 CO₂ 捕集分离,然后进行压缩、干燥等工艺以液化存储 CO₂,液态 CO₂ 可以交由 CO₂ 运输船进行陆上化工利用,也可以制成干冰进行海洋封存。

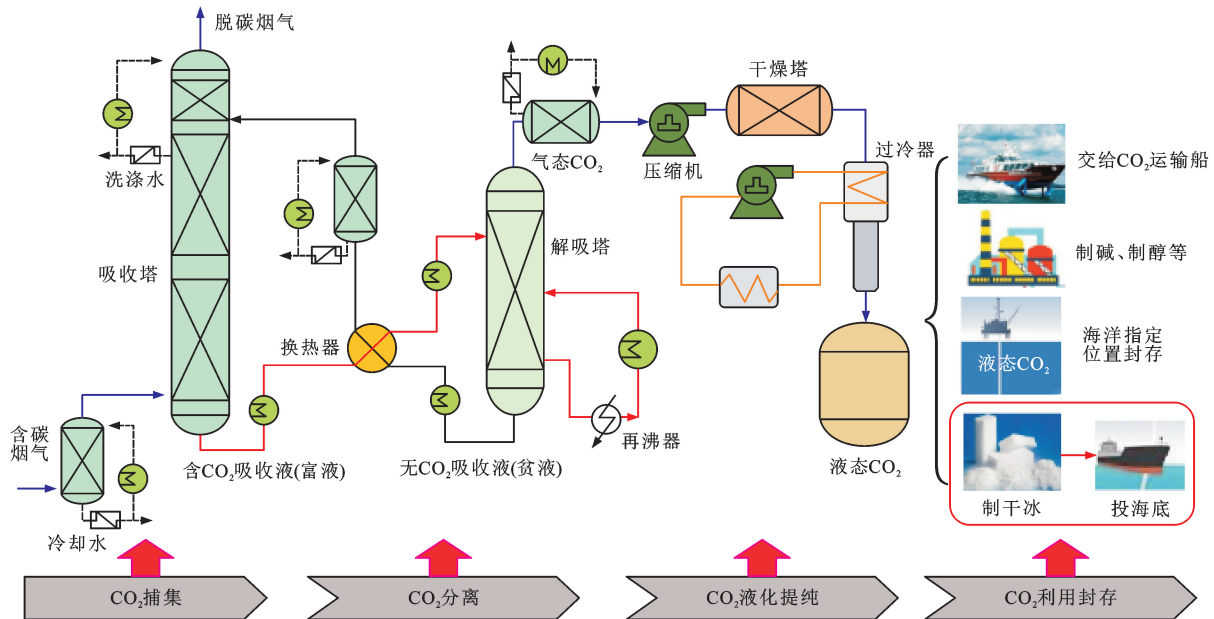


图 1 船舶碳捕集技术路线

Fig. 1 Ship-based carbon capture technology route

七一一所结合原有船舶脱硫塔设计基础开展碳捕集封存技术及实船示范验证研究,致力于船舶脱硫脱碳一体化处理的实现^[48]。七一一所于 2022 年 1 月份获得了中国船级社颁发的全球首份船舶 CO₂ 捕集与存储系统原理性认可证书^[49]。其研制的船用 CCS 系统采用燃烧后捕集方法中的化学吸收法,考虑到船舶运营空间,系统高效、紧凑,还可以根据实际减碳需求进行碳捕集率调节。七一一所围绕高效吸收、低能耗、高紧凑性 3 个核心方向重点开展了 CO₂ 高效捕集、低能耗分离液化封存、脱硫脱碳一

体化技术研究,完善技术链。此外,七一一所还针对低速机开展了 CCUS 系统试验样机研制与验证,并对技术方案进行了优化。七一一所计划选择典型远洋船舶开展实船样机研制与示范验证,对系统实船适用性、经济性、可靠性等开展长期验证。

香港华光海运联合法国 BV 船级社同七一一所针对华光船队在役运行的 2 艘散货船签署了一份关于“碳捕集装置在运营船舶的应用研究”的合作协议。七一一所基于船舶设计方案设计定制化的碳捕集装置,而 BV 则依据现有法规和规范进行合规性

检查,后续还将研究碳捕集装置在油船上的应用。七一一所与山东海运股份有限公司也签署了船舶 CO₂ 捕集装置合作框架协议。中国船级社与江南造船(集团)有限责任公司、七一一所签署了“装备 CCUS 系统的新型低碳排放大型液化气船船型研发”技术合作协议,开展 CCUS 技术应用于新型低碳排放的大型液化气船船型研发,积极推动 CCUS 技术的实船应用。

海德威科技集团(青岛)有限公司自主研发的船舶碳捕集与封存系统取得了挪威和意大利船级社授予的原理认可证书。该船用碳捕集与封存系统能够满足船舶各种负荷工作条件,自主计算、调节 CO₂ 收集量以满足 IMO 规则对于现有船舶能效指数(Energy Efficiency Existing Ship Index, EEXI)和碳强度指标(Carbon Intensity Indicator, CII)的限定值,如图 2 所示^[50]。废气经预处理单元及 CO₂ 吸收及解吸单元处理后转换为清洁气体排出,而捕集的 CO₂ 随后进入液化及存储单元,实现液化存储,各单元间可通过换热单元实现能量阶梯利用。此外,还可以结合船舶空间特点进行 CCUS 系统各部分定制化布局设计,以适用于各种船舶空间^[50-51]。

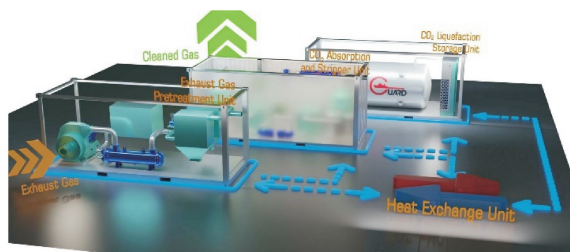


图 2 海德威船用 CCUS 系统

Fig. 2 Headway marine CCUS system

武汉理工大学和中海环境科技股份有限公司联合开展了干冰海洋封存的前沿性研究,包括干冰沉降过程及其表面换热及相态变化过程分析及干冰沉降过程动力学研究,以降低干冰相变散逸损失、提升封存效果为目标进行干冰结构优化,设计了能够满足高效经济、绿色环保要求的干冰海洋封存装置。

总体来看,国外围绕船舶 CCUS 技术在理论研究、项目立项及装备研发等多方面铺展,而中国关于船舶 CCUS 技术的研究及示范项目还比较少,也仅有极个别企业开展了船舶 CCUS 装备的开发设计,但船舶 CCUS 技术在“双碳”背景下正表现出强劲的发展势头,将有越来越多的学者、企业投入到船舶 CCUS 技术开发中。

3 CCUS 技术船舶应用方式分析

CCUS 技术虽在陆上初步实现了商业化应用,但无法直接应用于船舶。结合陆上应用经验和目前国内外船舶 CCUS 技术的研究现状,对几种典型 CCUS 中关键技术船舶上的适用性进行分析,针对 LNG 船舶提出了 CCUS 系统应用方案。

3.1 船舶碳捕集方式分析

船舶 CCUS 技术中的首要环节是碳捕集过程。船舶运营具有离岸、不断移动、变工况等特殊特性,因此,对船舶的碳捕集过程有特殊要求。不同碳捕集方法的占用空间、能耗、技术成熟度、船舶改造量及投入成本等因素都会制约船舶碳捕集方式的选择,需要综合考虑各捕集方法的优缺点。

目前碳捕集技术从技术路线上主要包括燃烧前捕集、富氧燃烧、燃烧后捕集、生物质能捕集、直接空气捕集及燃料电池转换等方式^[46]。燃烧前捕集、富氧燃烧及燃烧后捕集较为成熟,而生物质能捕集、直接空气捕集及燃料电池转换为概念较新的技术。生物质能捕集是从生物燃料的燃烧或转化过程中捕集 CO₂ 的一项负排放技术,但其还面临着技术、经济及社会的挑战^[52],还处于研发与示范阶段。直接空气捕集技术的显著优点是不受排放源种类和地理位置的限制,消除了在住宅区域及附近部署 CCUS 应用涉及的基础设施挑战,但还存在着成本较高的制约^[53]。高温燃料电池转换作为新兴技术可排除氮气进入工艺流,捕集 CO₂ 更为简便^[54],但仍处于实验室研究阶段,具体碳捕集路径如图 3 所示。

根据技术就绪水平将各种捕集技术划分为概念阶段、基础研究、中试阶段、工业示范、商业应用 5 个阶段。2021 年国内外碳捕集技术成熟度如图 4 所示^[55]。截至 2021 年,燃烧前捕集技术大多处于工业示范阶段,其中的燃烧前-物理吸收法已经可以商业应用。常压富氧燃烧技术已处于工业示范阶段,而增压富氧燃烧和化学链捕集法还分别处于基础研究和中试阶段。燃烧后捕集法中仅有化学吸收法达到商业应用阶段,其他燃烧后捕集方法多处于中试与工业示范阶段。国内在燃烧后-膜分离法、燃烧后-化学吸收法及燃烧后-化学吸附法上发展水平稍微落后于国外,而其他碳捕集技术均达到国际领先水平。

针对目前较为成熟的燃烧前捕集、富氧燃烧、燃烧后捕集等技术,主要从船舶改造量及投入成本、安全及稳定性等方面分析其在船舶上应用的适用性。

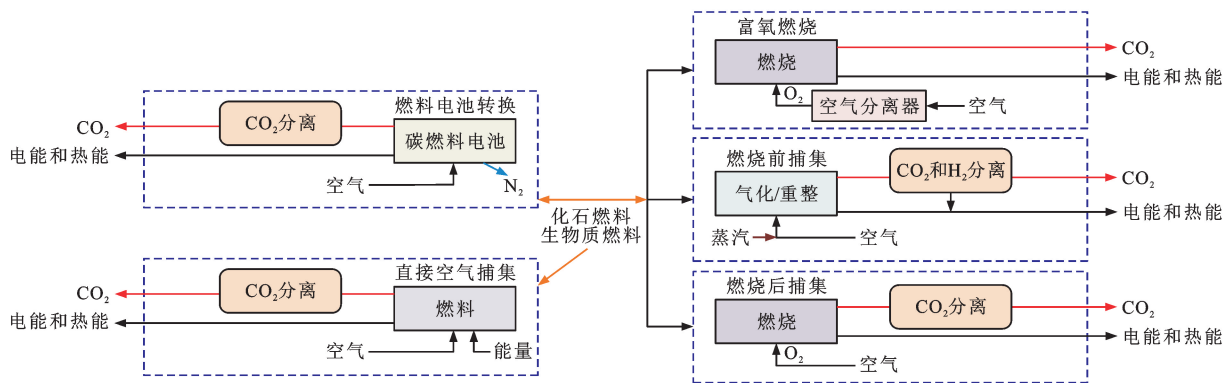


图 3 碳捕集路径

Fig. 3 Carbon capture pathways

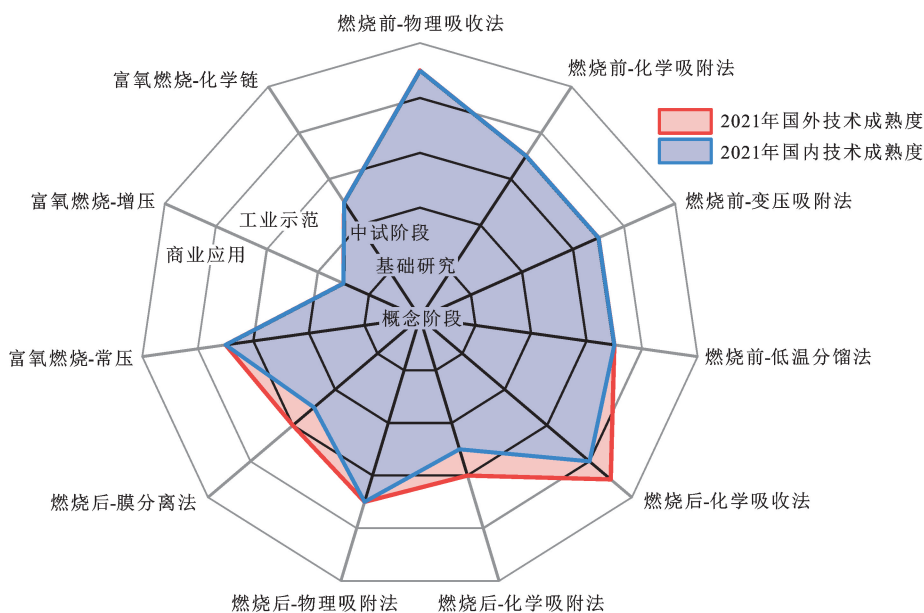


图 4 碳捕集技术成熟度国内外对比

Fig. 4 Comparison of maturities of domestic and foreign carbon capture technologies

(1)改造量及投入成本。燃烧前捕集技术产生的 H_2 可作为船舶燃料,但需要开发船舶氢燃料发动机,解决船舶氢燃料发动机应用、 H_2 泄露及安全技术^[56]等问题,还要进行动力系统整体设计改造并配备一些必备的反应罐及系统,改造量及投入成本巨大,在利用 LNG 燃料制氢使用 LNG、 H_2 混合燃料船舶上发展潜力巨大。富氧燃烧受技术及设备的限制大,其在船上应用需要对船舶的发动机结构、系统及材料进行相关改造或升级,还需解决低成本的制氧技术及复杂的工艺设备问题,目前实施困难且应用机会小。燃烧后捕集方法只需对发动机废气处理系统进行改造,相比前 2 种方式改造量小,不需对发动机和动力系统进行改造,投资少^[41]。

(2)安全及稳定性。碳捕集过程要安全,尽量避免高温、有毒等;相对于燃烧前与富氧燃烧技术,燃烧后捕集技术不需对燃烧过程进行改造处理,避免

了高温及危险性操作过程,只需对产生的尾气进行处理,工艺更为简单。以 MEA 溶液为吸收剂的化学吸收法举例,其工作最高温度仅为 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,能够较长时间稳定运行,其维护成本也远远低于前 2 种技术。

根据改造量、投入成本、安全及稳定性等评价指标,对上述碳捕集方法进行总结,见表 2。

表 2 三种碳捕集技术对比

Table 2 Comparison of three carbon capture technologies

捕集方法及评价指标	燃烧前捕集	富氧燃烧	燃烧后捕集法
改造量及投入成本	开发氢燃料发动机,增添反应罐等,投入成本大	改造发动机结构、系统及材料,投入成本大	仅改造发动机尾气处理系统,投入成本低
安全及稳定性	系统复杂,可靠性低	涉及燃烧过程改造,存在高温危险性操作	对尾气进行处理,操作风险小

通过以上分析可见,燃烧后捕集技术应用在船舶上的改造量及投入成本低,而安全性及稳定性高,是最可能应用于船舶上的 CO₂ 捕集方法;目前国内外大都采用基于燃烧后捕集的技术路线开展船舶脱碳研究。

目前燃烧后捕集技术主要包括化学吸收法、物理吸附法、膜分离法、钙循环法、低温分离法等^[57]。采用燃烧后捕集必须要考虑船舶尾气的特殊性,需要针对船舶尾气的特点从燃烧后捕集法中选择合适的碳捕集方法。船舶尾气排放量大且成分复杂,含 H₂O、CO₂、NO_x、SO_x 及固体颗粒物等,且 CO₂ 浓度与分压低,如近年来订单量激增的 LNG 船舶尾气中 CO₂ 摩尔分数约为 3%^[12]。由于钙循环法中吸附剂的再生是利用燃料在富氧环境中燃烧产生的热量^[58],其工艺也可以看为富氧燃烧捕集中的一种方法,因此,不再对其进行船舶应用的可行性分析。以下主要通过技术制约、紧凑性、能耗及经济性等方面分析其他燃烧后捕集方法在船舶上应用的适用性。

(1)技术制约。船舶必须采用合适、有效的碳捕集方法来保证足够的捕集率。采用物理吸附法 CO₂ 吸附选择性不高,分离效果较差。膜分离法对低浓度 CO₂ 分离效果差,还需开发适用于低浓度 CO₂ 捕集的耐杂质膜材料。低温分离法也比较适合较高浓度 CO₂ 的分离,能实现高达 99.17% 的高浓度 CO₂ 分离^[59]。相较其他方法,化学吸收法尾气适应性好且易工艺放大,是目前燃烧后捕集中最为成熟且得到广泛商业应用的方法^[60-62],也是针对低浓度 CO₂ 捕集的最具竞争力的解决方案。面向船舶废气中低 CO₂ 浓度的情况,化学吸收法能够达到 90% 以上的碳捕集率^[63-64]。

(2)紧凑性。船舶本身运营空间有限,不能占用

较多的载货空间,以免船舶经济效益受到影响。膜分离法紧凑性最为优异;变温吸附法系统体积大,发展较好的变压吸附紧凑性也受吸附床及压缩装置的限制;低温分离法所占空间受到压缩、冷却装置的限制;化学吸收法捕集装置紧凑性也存在不足,如醇胺溶液化学吸收法需要安装尺寸较大的吸收塔、再生塔及各种换热器等装置^[65],通过微通道反应器、旋转填充床、电加热器替代传统的吸收塔和解吸塔以提高系统的紧凑性,是化学吸收法目前的发展方向之一。

(3)能耗限制。和陆地相比,船舶能源有限,需要充分考虑碳捕集装置的能耗,不能过多使用船舶能源。此外,能耗高则经济性不佳,不利于技术推广应用。物理吸附法能耗接近基准吸收过程中的再沸器能耗,每吨 CO₂ 捕集能耗为 2.89~3.59 GJ^[66]。膜分离法每吨 CO₂ 捕集能耗为 1.96~2.85 GJ^[67],能耗随 CO₂ 浓度降低而增大。低温分离法的压缩及冷却等环节耗能很大,改进工艺每吨 CO₂ 捕集能耗仍约为 3.11 GJ^[68],结合 LNG 冷能利用是一个较有前景的发展方式^[23]。化学吸收法中的吸收剂加热再生环节能耗大,醇胺吸收剂每吨 CO₂ 捕集能耗可达 4~6 GJ^[55,69]。

(4)经济性。船舶 CCUS 系统的建设除了考虑改造量及投入成本外,还需考虑运营成本的影响。物理吸附法所用吸附剂成本低,每吨 CO₂ 捕集总成本在 40~63 美元^[70]。但对 CO₂ 分压低于 15% 的烟气处理不经济^[71-72]。膜分离法每吨 CO₂ 捕集成本约为 23 美元^[73],但分离膜的运维及换新成本高昂。低温分离法涉及到 CO₂ 压缩、液化环节,捕集分离成本很高,每吨 CO₂ 捕集成本约为 32.7 美元^[74]。化学吸收法中胺溶液每吨 CO₂ 捕集成本为 64.1~64.8 美元^[75]。

根据技术制约、紧凑性、能耗限制及经济性等指标,总结上述各种燃烧后捕集技术,见表 3。

表 3 燃烧后碳捕集方法对比

Table 3 Comparison of post-combustion carbon capture methods

捕集方法及评价指标	化学吸收法	物理吸附法	膜分离法	低温分离法
技术制约	适合船舶尾气中低浓度 CO ₂ 分离	选择性不高,分离效果差	不耐杂质,分离效果差	适用于高浓度 CO ₂ 分离
紧凑性	安装尺寸较大的吸收塔、再生塔及各种换热器等装置	变温吸附占地大,变压吸附受吸附床及压缩装置限制	占地小,紧凑性最好	压缩、制冷装置占地大
每吨 CO ₂ 捕集能耗/GJ	4.00~6.00	2.89~3.59	1.96~2.85	3.11
每吨 CO ₂ 捕集成本/美元	64.1~64.8	40.0~63.0	23.0	32.7

综合分析各捕集方法的优缺点,尽管化学吸收法目前在空间紧凑性、能耗方面并不占优势,运营成本也不是最低,但其处理低浓度 CO₂ 性能最为优异,工艺也最为成熟,因此,在船舶碳捕集方法中脱颖而出。

3.2 船舶存储方式分析

CO₂ 在船舶上捕集分离后,需要对分离出的 CO₂ 进行暂时存储。此外,通过船舶开展 CO₂ 运输对支持全球范围的 CCUS 至关重要^[28],这也必然涉及到 CO₂ 的存储问题。存储方式的选取主要受船舶

运营、后续运输、利用与封存技术的影响。船舶运输 CO₂ 的存储方式主要包括高压气态存储、液态存储及固态干冰存储。由于 CO₂ 液态存储具有成本低的优势,同时 CO₂ 液化成本在运输运营成本中占据较大比例^[76],目前围绕液态 CO₂ 船舶存储展开了较多研究。Seo 等^[77]从 CO₂ 三相点和临界点间的 7 个液化压力出发,从船舶碳捕集的全生命周期成本中得出最佳液化条件下的压力和温度分别为 1.5 MPa 和 -27 °C,此时的每吨 CO₂ 处置成本为 24.4 美元。

船舶捕集的 CO₂ 在船舶上临时存储,需要考虑存储方式的占用空间与能耗、稳定性与安全性、技术成熟度与成本等方面。

(1)空间与能耗。高压气态存储方式会占据较大的船舶运营空间,但能耗较低。液态 CO₂ 体积仅为气态 CO₂ 体积的 1/500^[78],每吨 CO₂ 在 1.5 MPa 压力下的所占货舱体积约为 2.4 m³^[77],而同等质量的 CO₂ 在 CO₂ 国标装气瓶中所占体积约为 1 020 m³ (仅计算气瓶体积)。液态、固态存储在空间上占优势,但 CO₂ 液化、固化及维持相应存储条件都需要消耗较多能量,如泵和压缩机会消耗船舶的巨大电能。应当综合考虑空间与能耗间的均衡,使得船舶电力系统保持有足够的正常运行功率。

(2)稳定性与安全性。CO₂ 存储的稳定性及安全性同样值得关注。海上极端天气频繁,CO₂ 储罐或液舱内的 CO₂ 因温度极端变化引起的相态变化可能引起船舶航行的不安全问题^[79]。低温液态 CO₂ 泄露会对船体结构及人员造成损伤^[42],液态 CO₂ 与海洋相互作用可能形成水合物和冰,温差会引起强烈的海流。部分未溶解的气体释放到大气中,在风速低及逆温影响下大气中的 CO₂ 可能导致船上人员窒息,还可能使得船舶引擎停止^[80]。储罐中的液态 CO₂ 产生的晃动效应可能会影响船舶的稳定性,降低航运性能^[10]。高压气态储罐发生罐体破裂、爆炸也可能对船员的生命财产造成巨大损失。固态干冰升华后发生排出机舱内空气的意外事故也可能使机舱船员面临窒息风险^[20]。

(3)技术成熟度与成本。目前以液态 CO₂ 存储的技术研究较多,液态 CO₂ 存储是最为成熟的方式,也是最具经济性的存储方案。干冰存储还仅仅停留在概念研究方面,未来会发挥更大的存储潜力。液态 CO₂ 在密相中具有高密度、低黏度的特点,通常通过多级压缩达到密相状态。此状态下 CO₂ 存储体积小,所需运输压力低,使得船舶运输十分方便、高效^[10],也有利于陆上通过管道方式运输。液

化存储方式有利于下一环节即 CO₂ 利用或封存的进行,CO₂ 的存储技术还可以借鉴 LNG 或液化石油气(Liquefied Petroleum Gas, LPG)船的成熟经验,液化 CO₂ 技术路线实用性优势如图 5 所示^[14]。液态 CO₂ 可以使用储罐或集装箱进行船上存储,可以直接用作船舶上 CO₂ 灭火系统原料及制作循环燃料等,多余的液态 CO₂ 也可以由专门的液态 CO₂ 运输船或海洋供给船进行海上运输,一部分液态 CO₂ 可以用于海洋油气平台,其他的液态 CO₂ 可以经由陆上的管道、公路罐车、铁路罐车及内河驳船等运输工具进行化工利用或封存。

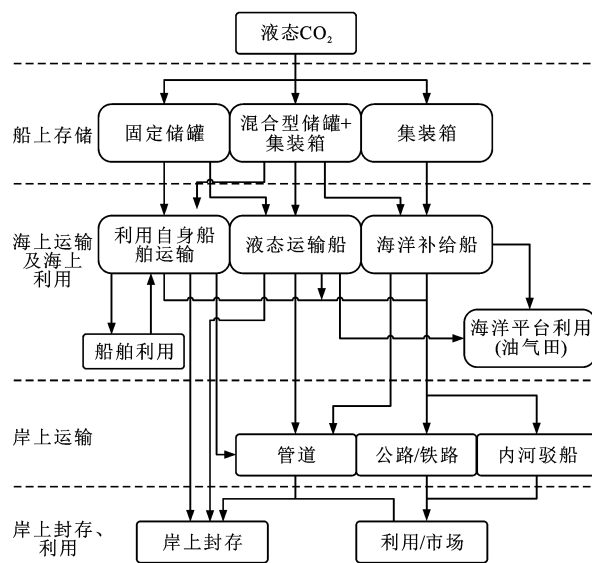


图 5 液态 CO₂ 技术路线的实用性优势

Fig. 5 Practical advantages of liquid CO₂ technology route

综合考虑存储的各个方面因素,未来以液态或固态 CO₂ 在船舶上存储的可能性更大,但需要探索更加节能、安全的 CO₂ 液化、固化及存储技术。

3.3 船舶 CO₂ 利用方式分析

CCUS 技术在传统 CCS 技术上增加了利用环节,以期产生一定的经济效益,降低运行成本。目前 CO₂ 利用主要包括 CO₂ 直接利用与转化利用 2 个方面,CO₂ 利用技术如图 6 所示^[81]。直接利用包括将 CO₂ 作为干冰、传热工质、制冷剂及食品工业应用,而 CO₂ 转化利用包括通过各种化学(如化学转化为燃料及化学品)及生物(如微藻固碳)过程将 CO₂ 转化为高价值产品^[61]。CO₂ 资源化是 CCUS 技术商业化发展的关键切入点,但当前商业化应用还主要聚集在地质利用方面。由于公众认知程度低、技术及资金获取难度大、项目运营风险大且收益慢、政策及运营体系不完善等原因,CCUS 项目商业化进程缓慢。国外在地质利用、农业、尿素、CH₃OH 及食品级 CO₂

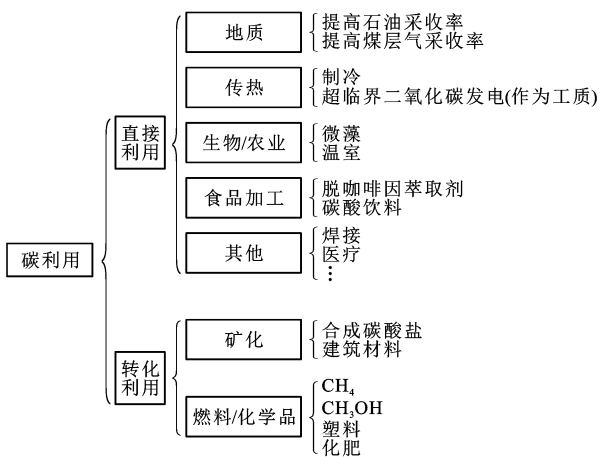


图 6 CO₂ 利用技术路线

Fig. 6 CO₂ utilization technology route

利用上取得了商业化应用成果^[82-83],但化学利用多处于工业示范阶段以下,而生物转化(制淀粉)、矿化利用甚至还处于概念及基础研究阶段。

结合船舶运营的特殊性探索船舶上捕集的 CO₂ 利用方式也是未来的一种发展方向。CO₂ 可以为船舶 CO₂ 灭火系统提供气源,一方面可以通过减少 CO₂ 气瓶的数量节省船舶的空间,另一方面可以减小船舶购买 CO₂ 气瓶的成本。CO₂ 能够应用于海洋油气田的产量提升,同时也能够封存一部分 CO₂。海洋上运营的大量船舶的碳排放可以就近用于海洋油气田的处理,是发展潜力巨大的一种利用方式。中国已经研制出兆瓦级超临界 CO₂ 发电机组及超临界 CO₂ 循环发电装置试验系统,未来超临界 CO₂ 发电技术与 CCUS 系统的联合是一个发展方向。

捕集的 CO₂ 用于去除海水中的溶解固体,生成船舶上的饮用水也是未来富有前景的利用方式^[84]。Ayyar 等^[85]提出比传统热法与反渗透工艺更节能的催化海水脱盐法。有机胺 RNH₂ 与 CO₂ 反应产生不稳定的碳酸氢盐 RNH₃HCO₃,利用 RNH₃HCO₃ 诱导与 NaCl 溶液(试验模拟海水)中的 Cl⁻ 交换生成 RNH₃Cl 和 NaHCO₃,脱除的 NaHCO₃ 经酸性树脂处理提供的 H⁺ 实现 CO₂ 再生和 Na⁺ 脱除。通过二胺或聚合物 CO₂ 响应性材料控制 RNH₃Cl 的溶解度,抑制水溶性 NH₄Cl 的形成,实现进一步脱盐,最后碱处理不溶性 RNH₃Cl,使得 RNH₂ 再生,最终实现 CO₂ 与 RNH₂ 的循环利用,如图 7 所示^[85]。这不仅减轻了饮用水费用,还节省了船舶必需的淡水舱空间,有利于增大船舶载货空间,提高运营收益。

以 CO₂ 加氢制 CH₄、CH₃OH 为代表的 CO₂ 能源催化重整技术是资源循环利用的方式,制得的 CH₄、CH₃OH 为船舶提供能源是 CO₂ 利用的新选

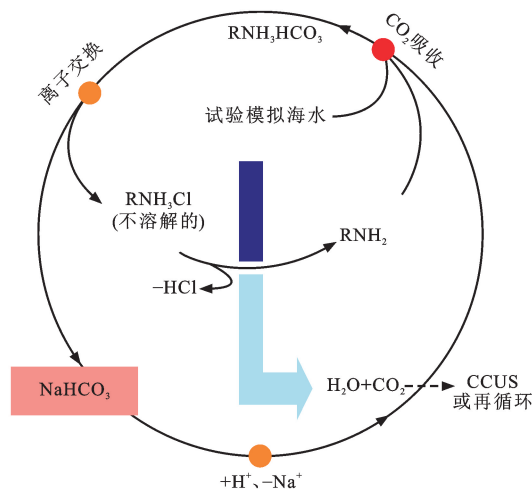


图 7 海水淡化

Fig. 7 Seawater desalination

择。CO₂ 加氢制 CH₄ 或 CH₃OH 同时是解决 H₂ 运输的一种方式。H₂ 在运输过程中风险很大,通过转化成 CH₄ 或 CH₃OH 原料运输,到目的地再通过催化重整分解为 H₂ 和 CO₂,CO₂ 可以作为工业原料利用或者封存,而分解的 H₂ 可以用作燃料。HyMethShip 概念首次利用直接空气捕集的 CO₂ 和水电解产生的 H₂ 为原料生产电甲醇,电甲醇装载并存储于船舶上,船舶可以通过预燃系统(重整器)转换为 H₂ 和 CO₂,H₂ 用于推动船舶,而 CO₂ 被液化存储运输到电甲醇生产设施中并取代直接空气捕集的 CO₂ 用于电甲醇生产,该概念利用可靠的成熟技术使船舶推进系统具有一个几乎封闭的 CO₂ 循环^[86],如图 8 所示。

目前商船三井、日本制铁等 9 家日本企业成立的船舶碳回收工作小组正在评估生产和使用 CH₄ 作为零碳排放船舶的可行性^[87],致力于实现日本航运业温室气体零排放。瑞典循环碳能源公司 Liquid Wind 联合瑞士可再生能源生产商和能源交易商 Axpo 及能源技术公司 Carbon Clean Solutions 等多家企业开展的 FlagshipONE 项目正在开发液态、碳中性的绿色甲醇燃料。

通过催化环化等化学反应将船舶运营产生的 CO₂ 转化为增值化学品亦是未来的新兴方向。Iliuta 等^[88]提出了利用中型货船动力系统尾气中的 CO₂ 氧化苯乙烯生成苯乙烯环状碳酸酯(增值化学品)的想法,该研究表明苯乙烯环状碳酸酯反应器的紧凑性优势比公开文献中提到的通过吸收过程进行碳捕集的船舶装置更为显著,其技术路线如图 9 所示。

综合来看,虽然船舶捕集 CO₂ 用于海洋油气田驱油驱气仍是目前最具应用前景的利用方式,但

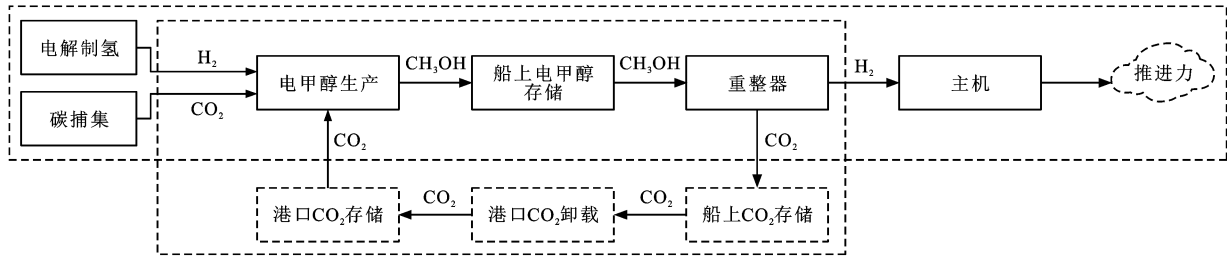
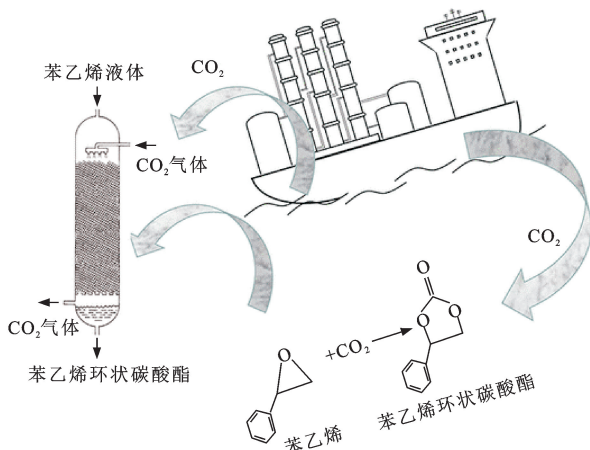


图8 HyMethShip概念

Fig. 8 Concept of HyMethShip

图9 苯乙烯氧化/CO₂环加成Fig. 9 Styrene oxidation/CO₂ cycloaddition

CO₂ 能源催化重整、催化环化转换及淡化海水也表现出巨大发展潜力。

3.4 船舶碳封存方式分析

碳封存主要有陆地封存和海洋封存 2 种方式。陆地封存是目前最广泛的一种封存方式,将液态或超临界状态的 CO₂ 注入一定深度的特定地质条件的地层进行封存。陆地封存常用技术有咸水层封存、深层不可开采煤层封存及废气油气田封存等,陆地封存往往用于强化采气或强化采油。

海洋的固碳能力大约是陆地生物圈固碳能力的 20 倍,更是大气固碳能力的 50 倍之多,其碳封存能力巨大。相较陆地封存可能面临 CO₂ 泄露引起地质活动的风险,CO₂ 海洋封存对海洋环境的影响很小,更为安全高效。利用碳捕集装置将船舶运营产生的 CO₂ 就近用于海洋封存节省了运输环节,更具流程简洁、成本低廉等优势,因此,CO₂ 海洋封存被认为是处理船舶碳排放中兼顾成本效益及封存潜力的 CO₂ 处理方案。CO₂ 海洋封存主要有海洋水柱封存、海洋沉积物封存、干冰海洋封存、海洋增肥等几种。船舶 CCUS 最后的碳封存方式需考虑船舶存储、运输技术,目前液态 CO₂ 或干冰海洋封存的方式最具应用潜力。

液态 CO₂ 海洋封存可以利用船舶管道或专用海洋平台将液态 CO₂ 注入海里,注入深度在 3 km 以下时,其密度大于海水,逐渐下沉全部溶解或在海底形成“碳湖”^[89]。此时封存效果较好,但对管道提出了更高的要求,成本也更大。采用船舶管道或海洋装备进行 CO₂ 封存时,CO₂ 的注入速率及液滴大小等因素极大地影响着 CO₂ 的逃逸速率及溶解效果^[90]。当注入速率较小且液滴较小时,CO₂ 更易在逸出水面前与海水完全形成水合物,此时 CO₂ 封存对海洋环境的负担也较小。船舶良好的移动性也将进一步稀释 CO₂,以取得更好的封存效果。

将捕集的 CO₂ 制成干冰进行海洋封存的方式简便快捷,封存量大且长期稳定,理论上也具有一定的可行性。干冰的密度比海水大,能够直接沉降到海底沉积层进行长期封存。干冰因密度大、最为稳定不易分解而成为最好的封存相态^[91],具有封存效果好、对环境影响小等显著优点,但因制备能耗高、固体成分流动性差等缺点而难以用管道运输,增大了船舶运营成本,且干冰海洋封存装备亟待开发研制。Nakashiki 等^[92]实测了 4 m 见方的固态干冰以恒定速度沉降的过程,并通过照相机系统观察了干冰立方块的溶解情况,结合大气压下和 25.5 °C 条件下干冰淡水试验的溶解率,提出了垂直方向的运动方程和溶解方程来计算干冰立方块的下降速度及溶解速率,其计算值与试验值吻合;基于试验数据和上述计算方法得出干冰沉降到 3 km 的深海中仍然能够保持一半的体积结构完整;研究还提出了将大量固态干冰立方块投入中国东海黑潮区的想法,但其数值模拟模型没有考虑到实际干冰溶解率受不同海深下不同压力和温度的影响。Guevel 等^[93]提出了完备的一体化固态 CO₂ 海洋封存系统的概念设计,该系统包括一种穿甲弹状的干冰制造装置,如图 10 所示,液态 CO₂ 从封存装置侧方注入,装置四周的盘管式换热器和双层墙换热器(容纳芯体)将芯体内的 CO₂ 制成外部干冰、内部液态 CO₂ 的结构。

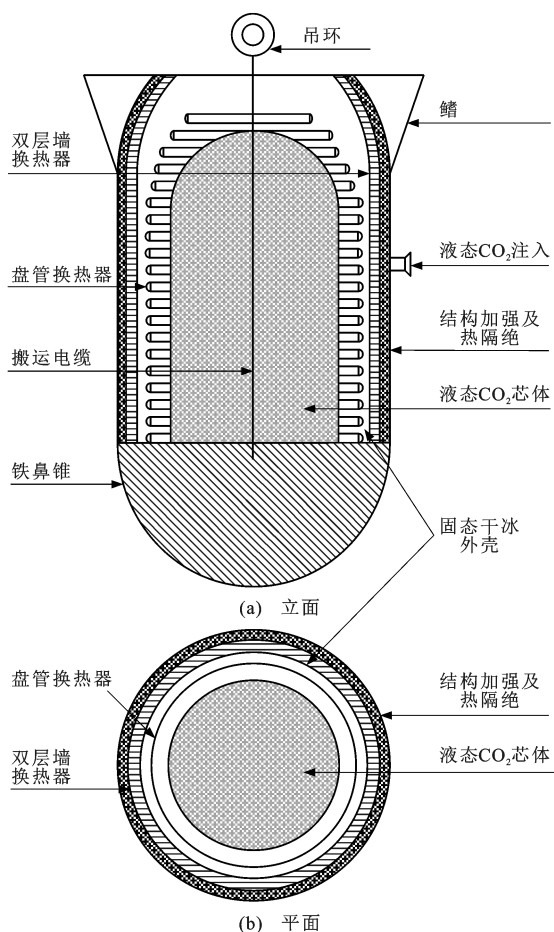


图 10 穿甲弹状干冰制造模具

Fig. 10 Armor-piercing bullet shaped dry ice manufacturing mold

由于只冷凝外部一定厚度液态 CO₂ 为干冰,所以可以节省能耗。该装置头部装有铁鼻锥,以提升总体密度,并通过尾部吊环吊起以方便运输。尾部有鳍状结构提高其下沉稳定性。可设计建造专用的干冰运输船舶,将大量干冰封存装置运输到适合封存的海边投入海洋封存。这种方式的缺点为封存装置不可回收,不够经济环保。

彭斯干^[94]提出了一种利用海水进行碳捕集封存的方法及装置,该方法首先通过海水对化工废气洗涤进行碳捕集,然后注入海洋实现 CO₂ 封存。该方法所需能量由风能、洋流能和太阳能等可再生能源来提供,实现了零能耗碳捕集及封存,同时突破了海域的限制,能够在各种海域进行安装投入运营,但该方案也存在着操作复杂及成本问题。

船舶直接将液态 CO₂ 通过管道进行海洋封存或将液态 CO₂ 制成干冰投入海底封存,节省了 CO₂ 运输船的建设及运营管理成本,减少了港口特有的接收液态 CO₂ 的设施投入,同时避免了通过船舶或罐车转运 CO₂ 途中多余的碳排放产生。实现了船舶动力系统产生的 CO₂ 的及时处理,缓解了船舶上设置的 CO₂ 存储设备占据较大船舶运营空间的压力,进一步提高了船舶的可利用空间,进而提高船舶运营收益,但还存在固态 CO₂ 冷凝成本高、相关水域不符合封存条件等问题。船舶 CO₂ 利用或封存技术优缺点总结如表 4 所示。

表 4 船舶 CO₂ 利用或封存技术优缺点

Table 4 Advantages and disadvantages of ship-based CO₂ utilization or sequestration technology

CO ₂ 存储、封存状态	利用或封存	接收或封存方式	优点	缺点
液态存储	回收利用	专用 CO ₂ 运输船、自身船舶运输到港口	液态制冷能耗低,所占船舶空间较小; CO ₂ 可以售卖给利用厂家,产生经济效益;资源循环利用,如制成 CH ₃ OH 还可以回用于船舶燃料;泄露风险较小,对人和生态环境影响较小	国际航行船舶产生 CO ₂ 量较大,需要占用载货体积;船上存储有安全隐患,需要专业的接收处置方式;IMO 尚未有这方面的规则出台;港口或运输船接收资质要求、管理要求、收费机制等尚未明确;不一定所有港口都有接收处理能力
液态封存	海洋封存	利用管道注入海洋	封存时间长,不占用船舶载货空间,不用建设专用的 CO ₂ 运输船,不用港口建设专用接收设备及运输系统,对海洋环境及生物影响小	管道注入需要航行做停留,以避免管道断裂造成泄露;注入区域限制较多(温度和压力);管道注入方案从未在航行船舶上做过论证研究
固态封存		固态抛投进入海洋		制成干冰需大量能耗;相关干冰制取方法不成熟,如气化制干冰 CO ₂ 损失较多;IMO 尚未出台关于允许干冰抛投区域、原则、评估等政策;抛投封存技术方案尚未成熟;不产生任何经济效益

3.5 船舶 CCUS 系统技术路线研究

近海、内河等非远洋船舶航行距离及航行周期较短,船舶吨位、体积也较小。考虑到目前碳捕集装置的巨大体积及高昂投资,在非远洋船舶上进行碳

捕集并不适宜。远洋船舶航行周期较长,产生的碳排放量大,因此,开发碳捕集方案是必需的。远洋船舶吨位、体积大,也更能满足碳捕集装置占地空间大及运营投资成本高的要求,较为适宜进行船舶碳捕

集装置的开发。

通过以上分析可知,燃烧后捕集法中的化学吸收法最可能应用于船舶上,然后将捕集的 CO_2 进行液态存储。远洋船舶可以采用液态 CO_2 回收利用的方式,考虑到远洋船舶具有远离人群聚集地、封存潜力广阔等条件,可以采用液态或干冰封存的方式及时处理船舶产生的 CO_2 。由国内外的研究结果来看,LNG 船舶具有碳排放量低、高品位可利用冷能大等优势,其气体燃料较为清洁,颗粒物及硫化物含量低,避免了脱硫装置的使用。由于尾气纯度高、杂质少等特点而更易脱除 CO_2 ^[47],表现出良好的 CCUS 系统适用性^[21],目前国内外多采用 LNG 船舶开展船舶 CCUS 系统研究。针对使用 LNG 燃料的远洋船舶 CCUS 系统提出了技术路线,如图 11 所示^[23,95],主要包括 CO_2 吸收分离单元、 CO_2 压缩、

液化、存储单元, CO_2 利用单元及 CO_2 封存单元,同时联合了深远海绿色能源生产及运输基地^[47]。抗台风型海上漂浮风电机组及超大型海上风电机组整体设计制造与安装试验技术的深入研究,使得建立深远海绿色能源生产及运输基地的概念日渐成为现实,未来可将船舶未能完全利用的 CO_2 通过自身船舶或 CO_2 专用运输船运输到深远海绿色能源生产及运输基地,用于耦合 H_2 制 CH_3OH 等燃料,而制得的 CH_3OH 等燃料又可以加注到船舶上实现船舶能源补充。该发展模式点明了未来船舶 CCUS 系统的技术路线,畅想了未来船舶动力系统 CO_2 排放的循环利用场景,将为深远海船舶提供燃料供给方案,还将促进海洋碳捕集设备、 CO_2 存储设备、 CO_2 运输船、 CO_2 卸载装备及 CH_3OH 等绿色能源生产、加注技术产业链一体化发展。

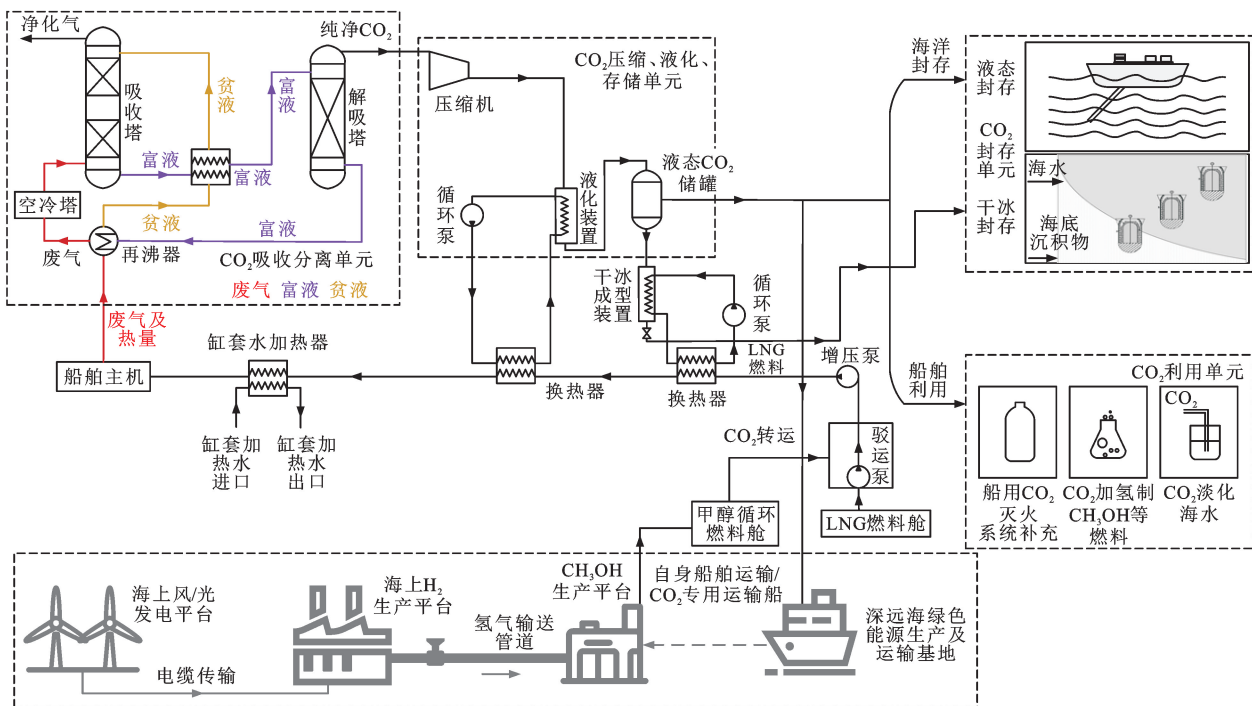


图 11 远洋船舶 CCUS 技术应用路线

Fig. 11 Application pathway of CCUS technology in ocean-going ships

4 问题与建议

目前 CCUS 在船舶上的应用仍面临着较多难题,还需加快船舶 CCUS 技术的研究进程。

4.1 船舶 CCUS 技术面临的问题

(1) 碳捕集技术经济性与空间紧凑性间的制约关系和船舶动力系统-碳捕集系统耦合特性研究空白,先进溶剂标准化研究弱。适用于船舶的化学醇胺溶液吸收法能耗及设备占用空间大,能耗、空间紧凑性、捕集率等多因素影响体系未建立。目前主要

针对某一特定因素的优化研究多,但针对多因素互相制约及影响的研究较少。船舶动力系统-碳捕集系统耦合特性研究处于空白阶段,未能针对船舶实际工况及尾气组分变化开展碳捕集动态控制及耦合影响研究。适用于船用复杂环境的化学吸收溶剂在吸收速率、碳捕集量、降解量及腐蚀性等指标上所做的平衡研究弱,暂未形成考虑性能及成本等因素的统一可评价指标。

(2) 船舶 CO_2 存储安全性及经济性问题亟待解决,港口及海洋平台 CO_2 转驳、接收基础设施规划

建设慢,大型 CO₂ 运输船储运方式有待发展。随着船舶碳捕集技术的逐渐成熟,CO₂ 运输、存储的基础设施亟需规划建设,完成由船舶移动碳源到陆上利用工厂或海洋油气利用平台的运输、存储。运输存储环节的安全性与经济性同样至关重要,亟需规避 CO₂ 泄露引起的人员窒息、船舶安全性失控及海水酸化风险。储罐内压力及温度的精准控制是目前的难点,船舶压缩制冷系统的开发、储罐空间布置、CO₂ 蒸发问题及大型 CO₂ 运输船编队运输等还需要进一步研究。

(3)CO₂ 利用技术在陆上驱油驱气等行业已经取得了巨大的商业化成果,但在船舶上的探索广度及深度略有不足。船舶 CO₂ 利用量小,船舶运输 CO₂ 到海上油气平台进行利用或封存是主要的利用方式。至于发展前景大的 CO₂ 加氢制 CH₃OH 等作为循环燃料及淡化海水技术还未达到商业化应用阶段。加氢制 CH₃OH 技术在催化剂反应机理研究方面还存在不足,亟需开发选择性及稳定性好、活性高的催化剂;同时还需要进一步研究反应机理,提高 CH₃OH 转化率,降低生产装置投入成本。而 CO₂ 淡化海水刚刚处于研究阶段,理论体系亟待完善,能耗及成本巨大,CO₂ 淡化海水的产业化进程还较缓慢。

(4)关于海洋封存的研究虽已有几十年的历史,但对封存海域要求严格,海洋封存的示范项目少,技术成熟度低。液态 CO₂ 或干冰封存需要研究换热、相变、传质及化学反应过程,使 CO₂ 尽可能在沉降中损失最小。干冰封存还需要能够达到较大的沉降速度深埋入海洋沉积物,实现长期有效封存,面临着同时保持大沉降速度及小逃逸损失的技术难题,干冰封存效果及其对环境的影响会受时间及地质活动的影响,相关海洋封存装置开发领域还处于空白。海洋封存还处于实验室研究阶段,公众对于海洋封存的认知还很低,目前国内外还没有形成完善的法律法规指导 CO₂ 海洋封存。

(5)船舶 CCUS 系统方案实船验证进展慢,国际合作交流及知识共享体制弱。国内外逐渐开展船舶 CCUS 系统方案实船验证研究,但具体进程及成果展现少,未能形成优势互补的行业合作交流及知识共享体制,使得船舶 CCUS 技术发展缓慢。

4.2 发展方向及建议

(1)探索更加节能、高效的碳捕集方法是未来的研究重点。一方面需进一步进行成熟技术的深挖,开发更加高效、节能、绿色的化学吸收溶剂,研究性

能更优、价格及维护成本更低的分离膜材料,进行船舶尾气余热、LNG 或 LPG 船舶冷能的新型节能技术集成及系统工艺优化研究。充分考虑海上风光资源的利用,推动低能耗碳捕集技术发展,促进捕集装置的标准化及模块化发展。另一方面要探索更具革命性及颠覆性的新技术,推动直接空气捕集、生物质能捕集、燃料电池转换等新技术的成熟,尽早实现新技术的商业化应用。

(2)港口或海上油气平台需要加快设置统一的 CO₂ 接收规则、标准,规划布局港口或海洋油气平台的 CO₂ 卸载、存储基础设施建设。在 CO₂ 运输规范化、标准化的基础上探索更加经济高效的船舶编队运输方案。凭借 LNG 运输经验开展大型 CO₂ 运输船的设计开发,开展 CO₂ 运输船队的示范研究及建设工作,在 CO₂ 运输规范化、标准化的基础上探索更为高效、经济的组合运输方案。

(3)探索更加多元、成熟的 CO₂ 商业化利用方式。目前借助船舶运输 CO₂ 进行海上油气平台或陆上工厂利用是其中的重要发展方向,另外船舶上 CO₂ 的循环利用及淡化海水也是未来的重要研究热点,需要开展更多研究推动船舶 CO₂ 循环利用及淡化海水技术的成熟及商业化应用。

(4)加紧建立海洋封存示范项目研究,尽快开发、扩展海洋封存潜力,推动利用与封存技术结合发展。干冰海洋封存凭借极佳的封存效果、较长的封存时间与及时处理船舶碳排放的独特优势成为未来船舶极可能采取的封存方式,因此,探索更加节能、有效的干冰制取方法也是未来的重要发展方向,目前已经形成了利用 LNG 冷能制取干冰的发展趋势,未来应继续完善该新技术,还应该重视封存与利用技术的结合,如利用 CO₂ 推动海洋油气资源的高效开发,同时实现 CO₂ 的长期封存。

(5)船舶 CCUS 技术的发展需要各国政府部门的政策和财政支持、法律法规的构建和完善、航运和海工企业多方机构积极参与、多边机制合作及知识共享加强。建议各国颁布更多的 CCUS 发展支持政策,财政补贴 CCUS 项目建设。发挥碳交易市场及碳税主导体系,完善 CCUS 行业规范,形成科学合理的 CCUS 建设、运营、监管、终止体系标准。引导航运、海工企业优势互补,激活 CCUS 技术的创新活力。深化国际交流合作及知识共享体系改革,促进 CCUS 技术的商业化、产业化发展。

(6)在“双碳”大背景下,未来船舶运营需要探索出一整套标准化、系统化的碳排放管理模式,需要碳

捕集、利用与封存技术的相互匹配、相互促进,构建完整、绿色、高效的船舶 CCUS 产业链。倡导示范性项目的领导作用,加快实现船舶和港口全套 CCUS 产业链设计与应用。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 袁裕鹏,王康豫,尹奇志,等. 船舶航速优化综述[J]. 交通运输工程学报,2020,20(6):18-34.
YUAN Yu-peng, WANG Kang-yu, YIN Qi-zhi, et al. Review on ship speed optimization[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(6): 18-34. (in Chinese)
- [2] 包甜甜,连峰,杨忠振. 航运管理研究综述[J]. 交通运输工程学报,2020,20(4):55-69.
BAO Tian-tian, LIAN Feng, YANG Zhong-zhen. Research review of shipping management[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(4): 55-69. (in Chinese)
- [3] 贺亚鹏,严新平,范爱龙,等. 船舶智能能效管理技术发展现状及展望[J]. 哈尔滨工程大学学报,2021,42(3):317-324.
HE Ya-peng, YAN Xin-ping, FAN Ai-long, et al. Development status and prospects of ship intelligent energy efficiency management technology[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(3): 317-324. (in Chinese)
- [4] 严新平,贺亚鹏,贺宜,等. 水路交通技术发展趋势[J]. 交通运输工程学报,2022,22(4):1-9.
YAN Xin-ping, HE Ya-peng, HE Yi, et al. Development trends of waterway transportation technology[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(4): 1-9. (in Chinese)
- [5] Det Norske Veritas. Maritime Forecast to 2050[R]. Oslo: Det Norske Veritas, 2022.
- [6] FANG Si-dun, XU Yan, LI Zheng-hao, et al. Optimal sizing of shipboard carbon capture system for maritime greenhouse emission control[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 5543-5553.
- [7] ROS J A, SKYLOGIANNI E, DOEDÉE V, et al. Advancements in ship-based carbon capture technology on board of LNG-fuelled ships[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2022, 114: 103575.
- [8] GÜLER E, ERGIN S. An investigation on the solvent based carbon capture and storage system by process modeling and comparisons with another carbon control methods for different ships[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021, 110: 103438.
- [9] WANG Hai-bin, ZHOU Pei-lin, WANG Zhong-cheng. Experimental and numerical analysis on impacts of significant factors on carbon dioxide absorption efficiency in the carbon solidification process[J]. Ocean Engineering, 2016, 113: 133-143.
- [10] WANG Hai-bin, ZHOU Pei-lin, WANG Zhong-cheng. Reviews on current carbon emission reduction technologies and projects and their feasibilities on ships[J]. Journal of Marine Science and Application, 2017, 16(2): 129-136.
- [11] STEC M, TATARCZUK A, ILUK T, et al. Reducing the energy efficiency design index for ships through a post-combustion carbon capture process[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021, 108: 103333.
- [12] 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.
- [13] GARCÍA-MARIACA A, LLERA-SASTRESA E. Review on carbon capture in ice driven transport[J]. Energies, 2021, 14(21): 6865.
- [14] BUIRMA M, VLEUGEL J, PRUYN J, et al. Ship-based carbon capture and storage: a supply chain feasibility study[J]. Energies, 2022, 15(3): 813.
- [15] WILLSON P M. Decarbonising the transport system—evaluation of the marine application of advanced carbon capture technology[R]. Chester: PMW Technology, 2020.
- [16] DAVISON J. Performance and costs of power plants with capture and storage of CO₂[J]. Energy, 2007, 32(7): 1163-1176.
- [17] BLOMEN E, HENDRIKS C, NEELE F. Capture technologies: improvements and promising developments[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 1505-1512.
- [18] AWOYOMI A, PATCHIGOLLA K, ANTHONY E J. CO₂/SO₂ emission reduction in CO₂ shipping infrastructure[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019, 88: 57-70.
- [19] LONG N V D, LEE D Y, KWAG C, et al. Improvement of marine carbon capture onboard diesel fueled ships[J]. Chemical Engineering and Processing—Process Intensification, 2021, 168: 108535.
- [20] VAN DEN AKKER J. Carbon capture onboard LNG-fueled vessels: a feasibility study[D]. Delft: Delft University of Technology, 2017.
- [21] AWOYOMI A, PATCHIGOLLA K, ANTHONY E J. Process and economic evaluation of an onboard capture system for LNG-fueled CO₂ carriers[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2020, 59(15): 6951-6960.
- [22] LUO Xiao-bo, WANG Meng-hong. Study of solvent-based carbon capture for cargo ships through process modelling and simulation[J]. Applied Energy, 2017, 195(C): 402-413.
- [23] FEENSTRA M, MONTEIRO J, VAN DEN AKKER J T, et al. Ship-based carbon capture onboard of diesel or LNG-fuelled ships[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019, 85: 1-10.
- [24] LEE S G, CHOI G B, YOON E S, et al. Modeling and simulation of ship transport of CO₂[C]//KARIMI I A, SRINIVASAN R. Proceedings of the 11th International Symposium on Process Systems Engineering. Amsterdam: Elsevier, 2012, 31: 785-789.
- [25] SEO Y, CHANG D. Optimization of ship-based CCS[C]//

- IEEE. 2012 Oceans-Yeosu. New York: IEEE, 2012: 1-9.
- [26] SEO Y, LEE S-Y, KIM J, et al. Determination of optimal volume of temporary storage tanks in a ship-based carbon capture and storage (CCS) chain using life cycle cost (LCC) including unavailability cost [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 64: 11-22.
- [27] ZHOU Pei-lin, WANG Hai-bin. Carbon capture and storage—solidification and storage of carbon dioxide captured on ships[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 91: 172-180.
- [28] AL BAROUDI H A, AWOYOMI A, PATCHIGOLLA K, et al. A review of large-scale CO₂ shipping and marine emissions management for carbon capture, utilisation and storage[J]. *Applied Energy*, 2021, 287: 116510.
- [29] The Naval Architect. Cryogenic technology project keeps its cool over carbon targets [EB/OL]. (2020-03-20) [2022-07-01]. https://rina.org.uk/news/cryogenic_technology_project_keeps_its_cool_over_carbon_targets-html/.
- [30] WARD J. DecarbonICE—creating a pathway to carbon negative shipping[EB/OL]. (2019-11-29) [2021-11-29]. <https://fathom.world/decarbonicetm-creating-a-pathway-to-carbon-negative-shipping/>.
- [31] Cero 2050. DecarbonICE™[EB/OL]. (2020-09-27)[2021-09-27]. <https://cero2050.es/en/decarbonice/>.
- [32] K Line. World's first small-scale CO₂ capture plant on vessel “CC-Ocean” (carbon capture on the ocean) project[EB/OL]. (2020-8-31)[2021-09-27]. [https://www.kline.com/news-and-press/2020/08/200831%20World%20E2%80%99s%20First%20Small-scale%20CO2%20Capture%20Plant%20on%20Vessel%20~%20E2%80%99CC-Ocean%20E2%80%9D%20\(Carbon%20Capture%20on%20the%20Ocean\)%20Project.pdf](https://www.kline.com/news-and-press/2020/08/200831%20World%20E2%80%99s%20First%20Small-scale%20CO2%20Capture%20Plant%20on%20Vessel%20~%20E2%80%99CC-Ocean%20E2%80%9D%20(Carbon%20Capture%20on%20the%20Ocean)%20Project.pdf).
- [33] K Line. Carbon capture on the ocean project; the first ship in the world to conduct CO₂ recovery experiments [EB/OL]. (2020-08-31) [2022-08-31]. <https://www.kline.com/news-and-press/2020/08/200831%20Carbon%20capture%20on%20the%20ocean%20project%20the%20first%20ship%20in%20the%20world%20to%20conduct%20CO2%20recovery%20experiments>.
- [34] SAMPSON J, OGGI. Stena in shipping [EB/OL]. (2020-08-16) [2022-08-31]. <https://www.gasworld.com/ogci-stena-bulk-collaborate-on-mobile-carbon-capture-in-shipping/2019984.article>.
- [35] Solvangship. Solvang signs deal to decarbonise fleet[EB/OL]. (2021-10-19) [2021-10-23]. <https://solvangship.no/2021/10/19/solvang-signs-deal-to-decarbonise-fleet-2/>.
- [36] The Maritime Executive. How much could carbon capture help shipowners meet CO₂ targets? [EB/OL]. (2022-03-18) [2022-07-01]. <https://www.maritime-executive.com/article/how-much-could-carbon-capture-help-shipowners-meet-co2-targets>.
- [37] Global CCS Institute. State of the art: CCS technologies 2022[R]. Melbourne: Global CCS Institute, 2022.
- [38] Value Maritime. Value Maritime developed a “plug and play” filteree system[EB/OL]. (2021-09-19) [2022-09-19]. <https://valuemaritime.com/services/>.
- [39] Korea Economic Daily. DSME successfully validates CO₂ capture and storage technology on a real ship [EB/OL]. (2022-10-06) [2023-10-07]. <https://www.hankyung.com/article/202210068986P>.
- [40] 汤旺杰,李鹤鸣,金华标. CCS技术在船舶上应用研究[J]. *内燃机*, 2019(3): 21-24.
- TANG Wang-jie, LI He-ming, JIN Hua-biao. Application research of CCS technology in ships[J]. *Internal Combustion Engines*, 2019(3): 21-24. (in Chinese)
- [41] 孙化栋,全永臣,李岩. CCUS技术在船舶上的应用进展研究[J]. *青岛远洋船员职业学院学报*, 2021, 42(4): 21-26.
- SUN Hua-dong, TONG Yong-chen, LI Yan. Research on the application of CCUS technology on ship[J]. *Journal of Qingdao Ocean Shipping Mariners College*, 2021, 42(4): 21-26. (in Chinese)
- [42] 金鼎. CCUS技术在船上的应用前景[J]. *中国船检*, 2021(2): 24-27.
- JIN Ding. Application prospect of CCUS technology in ships[J]. *China Ship Survey*, 2021(2): 24-27. (in Chinese)
- [43] 吴月辉,刘诗瑶,喻思南. 提升固碳能力,实现双碳目标[N]. *人民日报*, 2021-10-10(5).
- WU Yue-hui, LIU Shi-yao, YU Si-nan. Enhancing carbon sequestration capacity to achieve carbon peaking and carbon neutrality goals [N]. *People's Daily*, 2021-10-10(5). (in Chinese)
- [44] 李月清. 加速构建 CCUS 产业链和低碳循环体系[J]. *中国石油企业*, 2022(3): 33-34.
- LI Yue-qing. Accelerate the construction of CCUS industry chain and low carbon cycle system[J]. *China Petroleum Enterprise*, 2022(3): 33-34. (in Chinese)
- [45] 王建生. 马玉璞代表: 加快发展海上碳捕集利用与封存[N]. *中国经济导报*, 2022-03-08(9).
- WANG Jian-sheng. Representative MA Yu-pu: accelerate the development of offshore carbon capture and storage [N]. *China Economic Herald*, 2022-03-08(9). (in Chinese)
- [46] 张贤,李阳,马乔,等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 70-80.
- ZHANG Xian, LI Yang, MA Qiao, et al. Development of carbon capture, utilization and storage technology in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 70-80. (in Chinese)
- [47] 薛龙玉. CCUS如何改写航运脱碳[J]. *中国船检*, 2022(5): 16-19.
- XUE Long-yu. How CCUS rewrites shipping decarbonization[J]. *China Ship Survey*, 2022(5): 16-19. (in Chinese)
- [48] 国际船舶网. 七一一所与山东海运签署船舶碳捕集装置合作协议[EB/OL]. (2021-08) [2021-08-11]. http://www.eworldship.com/html/2021/Manufacturer_0810/173694.html.
- Eworldship. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute and Shandong Shipping Corporation signed a cooperation agreement on ship carbon capture devices [EB/OL]. (2021-08-10) [2022-09-10]. http://www.eworldship.com/html/2021/Manufacturer_0810/173694.html. (in Chinese)

- [49] 中国船检. 中国船级社颁发全球首份船载二氧化碳捕获与存储系统原理性认可证书[J]. 中国船检, 2022(2):1. China Ship Survey. China Classification Society issued the world's first ship borne carbon dioxide capture and storage system principle approval certificate[J]. China Ship Survey, 2022(2): 1. (in Chinese)
- [50] 海德威科技集团(青岛)有限公司. 国内首家! 海德威二氧化碳捕集与储存系统取得 RINA 原理认可[EB/OL]. (2022-07-29) [2022-08-10]. <http://www.headwaytech.com/6735.html>. Headway Technology Group (Qingdao) Co., Ltd. Headway clinched China's first RINA approval on CCS [EB/OL]. (2022-07-29) [2022-08-10]. <http://www.headwaytech.com/6735.html>. (in Chinese)
- [51] 海德威科技集团(青岛)有限公司. 行业领先! 海德威碳捕获与封存系统(CCS)取得 DNV 船级社原理认可[EB/OL]. (2022-06-23). [2023-06-23]. <http://www.headwaytech.com/6727.html>. Headway Technology Group (Qingdao) Co., Ltd. Headway CCUS Obtained DNV Approval [EB/OL]. (2022-06-23) [2023-06-23]. <http://www.headwaytech.com/6727.html>. (in Chinese)
- [52] ZHANG Di, BUI M, FAJARDY M, et al. Unlocking the potential of BECCS with indigenous sources of biomass at a national scale[J]. Sustainable Energy and Fuels, 2020, 4(1): 226-253.
- [53] KUA H W, PEDAPATI C, LEE R V, et al. Effect of indoor contamination on carbon dioxide adsorption of wood-based biochar-lessons for direct air capture[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 210: 860-871.
- [54] GÜR T M. Carbon dioxide emissions, capture, storage and utilization; review of materials, processes and technologies[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2022, 89: 100965.
- [55] 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)—中国 CCUS 路径研究[R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 2021. CAI Bo-feng, LI Qi, ZHANG Xian, et al. China carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) annual report (2021)—research on China's CCUS pathway[R]. Beijing: Environmental Planning Institute of the Ministry of Ecological Environment, 2021. (in Chinese)
- [56] 刘易明, 王甫, 王珺, 等. 燃料电池船舶应用形式及其关键技术[J]. 船舶工程, 2021, 43(3): 18-26, 33. LIU Yi-ming, WANG Fu, WANG Jun, et al. Application form and its key technology of fuel cell ship[J]. Ship Engineering, 2021, 43(3): 18-26, 33. (in Chinese)
- [57] MADEJSKI P, CHMIEL K, SUBRAMANIAN N, et al. Methods and techniques for CO₂ capture; review of potential solutions and applications in modern energy technologies[J]. Energies, 2022, 15(3): 887.
- [58] TILAK P, EL-HALWAGI M M. Process integration of calcium looping with industrial plants for monetizing CO₂ into value-added products [J]. Carbon Resources Conversion, 2018, 1(2): 191-199.
- [59] KNAPIK E, KOSOWSKI P, STOPA J. Cryogenic liquefaction and separation of CO₂ using nitrogen removal unit cold energy[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2018, 131: 66-79.
- [60] ZHANG Zhi-en, WANG Tao, BLUNT M J, et al. Advances in carbon capture, utilization and storage[J]. Applied Energy, 2020, 278: 115627.
- [61] LIN Qing-yang, ZHANG Xiao, WANG Tao, et al. Technical perspective of carbon capture, utilization, and storage [J]. Engineering, 2022, 14: 27-32.
- [62] BERNHARSEN I M, KNUUTILA H K. A review of potential amine solvents for CO₂ absorption process: absorption capacity, cyclic capacity and pKa[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2017, 61: 27-48.
- [63] LIU Fei, QI Zhi-fu, FANG Meng-xiang, et al. Pilot test of water-lean solvent of 2-(ethylamino) ethanol, 1-methyl-2-pyrrolidinone, and water for post-combustion CO₂ capture[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 459: 141634.
- [64] LIU Lian-bo, FAN Meng-xiang, XU Shi-sen, et al. Development and testing of a new post-combustion CO₂ capture solvent in pilot and demonstration plant[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2022, 113: 103513.
- [65] 王立健, 曹林, 魏志威. 船舶碳捕集技术应用前景与展望[J]. 中国船检, 2020(11): 66-71. WANG Li-jian, CAO Lin, WEI Zhi-wei. Application prospect and prospect of ship carbon capture technology [J]. China Ship Survey, 2020(11): 66-71. (in Chinese)
- [66] PLAZA M G, RUBIERA F, PEVIDA C, et al. Evaluating the feasibility of a TSA process based on steam stripping in combination with structured carbon adsorbents to capture CO₂ from a coal power plant[J]. Energy and Fuels, 2017, 31(9): 9760-9775.
- [67] HE Xue-zhong. Polyvinylamine-based facilitated transport membranes for post-combustion CO₂ capture: challenges and perspectives from materials to processes [J]. Engineering, 2021, 7(1): 263-279.
- [68] YANG Wen-chao, LI Shu-hong, LI Xian-liang, et al. Analysis of a new liquefaction combined with desublimation system for CO₂ separation based on N₂/CO₂ phase equilibrium[J]. Energies, 2015, 8(9): 9495-9508.
- [69] BOUNACEUR R, LAPE N, ROIZARD D, et al. Membrane processes for post-combustion carbon dioxide capture: a parametric study[J]. Energy, 2006, 31(14): 2556-2570.
- [70] DASHTI H, YEW L Z, LOU Xia. Recent advances in gas hydrate-based CO₂ capture[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 23: 195-207.
- [71] WANG M, LAWAL A, STEPHENSON P, et al. Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: a state-of-the-art review[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2011, 89(9): 1609-1624.
- [72] OCHEDI F O, YU Jiang-long, YU Hai, et al. Carbon

- dioxide capture using liquid absorption methods: a review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 19(1): 77-109.
- [73] MERKEL T C, LIN Hai-qing, WEI Xiao-tong, et al. Power plant post-combustion carbon dioxide capture: an opportunity for membranes[J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, 359(1/2): 126-139.
- [74] AARON D, TSOURIS C. Separation of CO₂ from flue gas: a review[J]. *Separation Science and Technology*, 2005, 40(1/2/3): 321-348.
- [75] JIANG Kai-qi, FERON P, COUSINS A, et al. Achieving zero/negative-emissions coal-fired power plants using amine-based postcombustion CO₂ capture technology and biomass cocombustion[J]. *Environmental Science and Technology*, 2020, 54(4): 2429-2438.
- [76] SEO Y, CHANG D, JUNG J Y, et al. Economic evaluation of ship-based CCS with availability[J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 2511-2518.
- [77] SEO Y, HUH C, LEE S, et al. Comparison of CO₂ liquefaction pressures for ship-based carbon capture and storage (CCS) chain[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 52(2): 1-12.
- [78] SEO Y, YOU H, LEE S, et al. Evaluation of CO₂ liquefaction processes for ship-based carbon capture and storage (CCS) in terms of life cycle cost (LCC) considering availability[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 35: 1-12.
- [79] 赵芸. 碳封存, 催生二氧化碳运输船?[J]. *船舶经济贸易*, 2021(9): 16-19.
- ZHAO Yun. Will carbon sequestration promote development of CO₂ transport ships?[J]. *Ship Economy and Trade*, 2021(9): 16-19. (in Chinese)
- [80] RUBIN E, MEYER L, DE CONINCK H, et al. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage[R]. New York: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005.
- [81] 宋欣珂, 张九天, 王 灿. 碳捕集、利用与封存技术商业模式分析[J]. *中国环境管理*, 2022, 14(1): 38-47.
- SONG Xin-ke, ZHANG Jiu-tian, WANG Can. Analysis of the business model for carbon capture, utilization and storage (CCUS) technologies[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2022, 14(1): 38-47. (in Chinese)
- [82] CHAUVY R, DE WEIRELD G. CO₂ utilization technologies in Europe: a short review[J]. *Energy Technology*, 2020, 8(12): 2000627.
- [83] CHAUVY R, MEUNIER N, THOMAS D, et al. Selecting emerging CO₂ utilization products for short- to mid-term deployment[J]. *Applied Energy*, 2019, 236: 662-680.
- [84] AL-MAMOORI A, KRISHNAMURTHY A, ROWNAGHI A A, et al. Carbon capture and utilization update[J]. *Energy Technology*, 2017, 5(6): 834-849.
- [85] AYYAR A S R, AREGAWI D T, PETERSEN A R, et al. Carbon dioxide-mediated desalination[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2023, 145(6): 3499-3506.
- [86] MALMGREN E, BRYNOLF S, FRIDELL E, et al. The environmental performance of a fossil-free ship propulsion system with onboard carbon capture—a life cycle assessment of the HyMethShip concept[J]. *Sustainable Energy and Fuels*, 2021, 5(10): 2753-2770.
- [87] 赵博. 全球低碳船舶项目大盘点[J]. *中国船检*, 2021(6): 11-22.
- ZHAO Bo. Global low-carbon ship project inventory[J]. *China Ship Survey*, 2021(6): 11-22. (in Chinese)
- [88] ILIUTA I, LARACHI F, FONTAINE F-G. Conversion of CO₂ from the energy systems on-board ships via catalytic cycloaddition to styrene oxide: modeling and numerical simulation[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2022, 61(47): 17275-17296.
- [89] 王江海, 孙贤贤, 徐小明, 等. 海洋碳封存技术: 现状、问题与未来[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(1): 17-25.
- WANG Jiang-hai, SUN Xian-xian, XU Xiao-ming, et al. Marine carbon sequestration: current situation, problems and future[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(1): 17-25. (in Chinese)
- [90] VOORMEIJ D A, SIMANDL G. Geological, ocean, and mineral CO₂ sequestration options: a technical review[J]. *Geoscience Canada*, 2004, 31(1): 11-22.
- [91] DAI Zhen-xue, ZHANG Ye, STAUFFER P, et al. Injectivity evaluation for offshore CO₂ sequestration in marine sediments[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 2921-2932.
- [92] NAKASHIKI N, OHSUMI T, SHITASHIMA T. Sequestering of CO₂ in a deep-ocean—fall velocity and dissolution rate of solid CO₂ in the ocean[R]. Chiba: Abiko Research Laboratory, 1991.
- [93] GUEVEL P, FRUMAN D H, MURRAY N. Conceptual design of an integrated solid CO₂ penetrator marine disposal system[J]. *Energy Conversion and Management*, 1996, 37(6/7/8): 1053-1060.
- [94] 彭斯干. 海水式碳捕集封存方法及装置: 中国, 201710137942. 8[P]. 2017-03-09.
- PENG Si-gan. Seawater type carbon capture and storage method and device: China, 201710137942. 8[P]. 2017-03-09. (in Chinese)
- [95] 刘成波. 船舶碳捕集与封存技术的应用分析[J]. *船电技术*, 2021, 41(10): 6-9.
- LIU Cheng-bo. Application analysis of ship carbon capture and storage technology[J]. *Marine Electric and Electronic Engineering*, 2021, 41(10): 6-9. (in Chinese)