

屈紫懿,孔存金,印洪浩,等.远洋船舶尾气碳捕集技术及发展趋势研究[J].环境工程技术学报,2024,14(1):17-24.

QU Z Y,KONG C J,YIN H H,et al.Study on carbon capture technology and development trend of exhaust gas from ocean-going ships[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(1): 17-24.

远洋船舶尾气碳捕集技术及发展趋势研究

屈紫懿,孔存金*,印洪浩,张德荣,杜敏

重庆交通大学航运与船舶工程学院

摘要 二氧化碳(CO₂)作为主要的温室气体,减排的迫切性日益凸显,一系列国际航运碳减排措施已逐步进入强制执行阶段。碳捕集技术被认为是最直接有效的碳减排技术。然而,船舶尾气碳捕集技术的研究和应用还处于起步阶段,亟需大量深入的针对性研究。因此,针对远洋船舶的尾气碳捕集技术及其发展趋势进行了探讨。首先,介绍船舶尾气碳捕集技术的背景及现状,对当前工业源尾气处理方案及主流的碳捕集技术进行分析和研究。其次,量化国际海事组织对航运业的碳排放要求,对比各种碳减排技术在船舶领域中的可行性和适用性,详细研究了远洋船舶使用碳捕集技术的影响因素与面临的挑战,包括技术要求、技术成本、设备可靠性、能源消耗、二次污染等。最后,结合历史数据和未来趋势预测,对远洋船舶尾气碳捕集技术的发展趋势做出展望,并提出改进方法,以帮助减少船舶排放的碳足迹。

关键词 船舶尾气;二氧化碳(CO₂);航运减排;远洋船舶;碳捕集

中图分类号:X51 文章编号:1674-991X(2024)01-0017-08 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20230303

Study on carbon capture technology and development trend of exhaust gas from ocean-going ships

QU Ziyi, KONG Cunjin*, YIN Honghao, ZHANG Derong, DU Min

School of Shipping and Naval Architecture, Chongqing Jiaotong University

Abstract The urgency of reducing carbon dioxide as the main greenhouse gas is becoming increasingly prominent, and a series of international shipping carbon reduction measures have entered the stage of compulsory enforcement. Carbon capture technology is the most direct and effective technology for reducing carbon dioxide emissions. However, the research and application of carbon capture technology for ship exhaust is still in its infancy, and there is an urgent need for a large amount of in-depth targeted research. Therefore, the carbon capture technology and its development trend for the exhaust gas of ocean-going ships were discussed. Firstly, the background and current status of carbon capture technology for ship exhaust were introduced, and the current industrial source exhaust treatment schemes and mainstream carbon capture technologies were analyzed and studied. Then, the carbon emission requirements of the International Maritime Organization for the shipping industry were quantified, and the feasibility and applicability of various carbon reduction technologies in the field of shipping were compared. A detailed study was conducted on the challenges and influencing factors encountered by ocean-going vessels using carbon capture technology, including technical requirements, technical costs, equipment reliability, energy consumption, secondary pollution, etc. Finally, based on the combination of historical data and future trend prediction, prospects were made for the future development of carbon capture technology for ocean-going ship exhaust, and improvement methods were proposed to help reduce the carbon footprint of ship emissions.

Key words ship exhaust; carbon dioxide (CO₂); shipping emission reduction; ocean-going ship; carbon capture

全球温室效应逐年加剧,二氧化碳(CO₂)占温室气体总量的72%,其温室效应当量占总温室效应的55%^[1-3]。2015年,包括中美在内的近200个缔约方

联合签署《巴黎协定》,并制定2020年后适用于所有国家的碳减排机制框架^[4]。航运业承担了全球约90%的贸易运输量,主要使用含碳量87%的船用柴

收稿日期:2023-04-18

基金项目:重庆市教委科学技术研究项目(201902194007)

作者简介:屈紫懿(1981—),女,副教授,主要研究方向为船舶尾气排放控制技术,quziyi@163.com

*通信作者:孔存金(1997—),男,硕士,主要研究方向为船舶绿色动力技术,jfdyx178@163.com

油和含碳量 85% 的重燃料油^[5-6]。随着世界经济迅速发展,国际贸易不断深入,船舶数量快速上升,航运业产生的温室气体排放量随之大幅增加。国际海事组织(International Maritime Organization, IMO) 2020 年的数据显示^[7],航运业产生的碳排放约占全球碳排放总量的 3%。IMO 预测随着国际贸易的增长,如不采取有效措施,航运业在 21 世纪中叶产生的 CO₂ 排放量将增至 16 亿 t/a(图 1)^[8]。为了遏制航运 CO₂ 的过度排放,IMO 于 2018 年 4 月通过国际航运温室气体排放初步战略(Initial GHG Strategy),要求 2050 年将国际航运业每单位运输量产生的 CO₂ 较 2008 年减排 70%;同年 10 月,中国船级社发布《船舶 CO₂ 排放监测、报告和验证实施指南》^[9]。为了推动航运业尽快实现碳减排目标,IMO 不断制定出台节能减排的强制性规定,提高碳减排标准^[10],其中,营运碳强度指标(CII)已于 2023 年 1 月 1 日正式生效^[11]。随着一系列减排措施进入强制执行阶段,开展航运业碳减排工作已刻不容缓。

1 碳捕集技术概述

根据国际能源署(International Energy Agency,

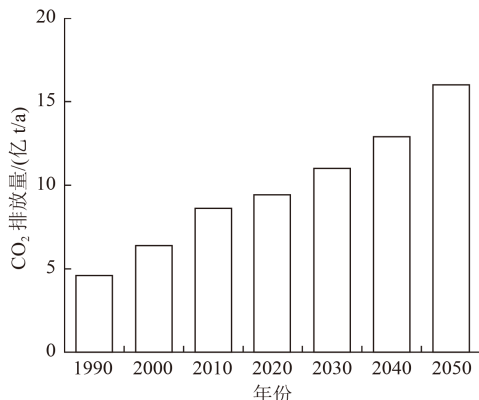


图 1 国际航运业 CO₂ 排放趋势^[8]

Fig.1 Trends in CO₂ emissions from international shipping industry^[8]

IEA)在 2019 年的保守预测,2040 年全世界占主导地位的能源仍是以石油、天然气、煤为主的化石燃料^[12]。碳捕集技术作为实现化石能源大规模低碳利用的重要技术,得到了全球的广泛关注,在陆上工业领域已实现较为成熟的应用^[13-14]。根据碳捕集工艺所处燃烧流程的位置,分为燃烧前碳捕集、燃烧中碳捕集(包括富氧燃烧技术、化学链燃烧技术)、燃烧后碳捕集^[2],各碳捕集技术的基本特性如表 1 所示。

表 1 碳捕集技术基本特性

Table 1 Basic characteristics of carbon capture technology

碳捕集技术	捕集原理 ^[15]	优点	缺点	捕集效率/%
燃烧前	化石燃料在燃烧前经过气化、重整等过程,生成CO ₂ 和H ₂ ,将CO ₂ 分离、收集后,H ₂ 单独作为燃料使用	捕集过程中CO ₂ 分压较高,捕集成本相对较低 ^[16-18]	配套的氢燃料发动机技术不成熟,应用场景具有局限性 ^[19]	85~95 ^[16]
燃烧中	在燃料燃烧过程中注入O ₂ ,生成高浓度的CO ₂ ,促进CO ₂ 气体的分离和捕集	CO ₂ 捕集能耗相对较低 ^[20]	需额外加装制氧装置,制氧成本较高,对原有设备改动较大 ^[13]	>95 ^[21-22]
燃烧后	在燃料燃烧装置后加装捕集装置,对废气中的CO ₂ 进行捕集	对原有设备改动小,适用于低CO ₂ 分压的气源 ^[23-24]	捕集成本相对较高 ^[25]	85~95 ^[26-28]

综上所述,燃烧后碳捕集技术是兼容性最好的碳捕集技术,也是目前最成熟、适应工况最广的碳捕集技术,能够在当前的能源系统中快速部署。

2 船用碳捕集技术

当前航运业的碳减排压力已日益凸显,2021 年 6 月,国际海事组织环境保护委员会对所有 5 000 总 t 及以上适用于能效指数(EEDI)的国际航行船舶(无论交船时间先后)提出强制要求:在 2023 年及之后的每个日历年结合 IMO 燃油消耗数据收集(DCS)进行船舶的 CII 计算和评级(A~E 级),对此后年度 CII 评级为 E 或者连续三年评级为 D 的船舶,需制定能效改进计划并纳入船舶能效管理(SEEMP)中。船舶低碳减排技术主要有 3 种途径,包括提高能源

利用效率、使用低碳和可再生零碳能源以及尾气碳捕集技术^[15],其中尾气碳捕集技术是应对当前船舶减排最直接有效的方法^[29]。从工业碳捕集技术发展经验来看,在没有彻底改变化石燃料在航运界的主导地位前,船用碳捕集技术是唯一能有效降低全球航运碳排放的实用技术。远洋船舶的寿命一般在 30 年左右,相比于建造新船来满足航运碳排放法规,旧船改造的体量也不容忽视。2022 年美国船级社(ABS)发布《船用碳捕集和储存要求》,为安装燃烧后船用碳捕集与存储设备的船舶提供入级标准。船舶不同于陆上工业,有其运营环境的特殊性和局限性,因此需要更具针对性的技术方案。

2.1 船用碳捕集技术研究现状

近几年,各研究机构正积极开展船用碳捕集技

术的探索,主要研究结果如表 2 所示。2021 年以后,各国机构加快了船用碳捕集技术的研究进程,燃烧后碳捕集技术由于较高的碳捕集效率和较好的适应性成为当下的研究热点。虽然部分研究者开始探索膜分离法、碳基吸附法等燃烧后碳捕集方法在船上的应用,但在现有技术条件下,化学吸收法在捕集效率、安装成本等方面仍有较大优势。各机构多采用模拟仿真研究方法,亟需大量有针对性的试验研究。

表 2 全球代表性机构船用碳捕集技术研究现状
Table 2 Current status of research on marine carbon capture technologies by global representative institutions

区域	第一作者单位	第一作者	发表年份	研究方法	主要研究内容	研究结果
国外	谢菲尔德大学(英国)	Luo ^[30]	2017	模拟仿真计算	以乙醇胺(MEA)为吸收剂,研究船用燃烧后碳捕集技术脱除船基CO ₂ 的潜力	碳捕集效率可达73%
	荷兰国家应用科学院(荷兰)	Feenstra ^[31]	2019	模拟仿真计算	分别以MEA和哌嗪(PZ)为吸收剂,对船用柴油发动机和船用LNG发动机脱除船基CO ₂ 进行经济分析	在60%碳捕集效率的条件下,柴油机最低碳捕集成本为389欧元/t, LNG发动机最低碳捕集成本为323欧元/t
	克兰菲尔德大学(英国)	Awoyomi ^[32]	2019	模拟仿真计算	以氨水为吸收剂,研究10.3 MW LNG船燃烧后碳捕集系统的捕集效果,并进行了经济分析	在90%的碳捕集效率前提下,最低碳捕集成本为117美元/t,液化天然气在气化过程中获得的冷能可以用于液化捕集后的CO ₂
	波兰煤化学加工研究所(波兰)	Marcin ^[6]	2021	模拟仿真计算	基于一艘47 000 t油轮,以MEA为吸收剂,研究燃烧后碳捕集技术降低船舶EEDI的潜力	燃烧后碳捕集技术具有巨大的降低EEDI潜力,且MEA溶液可同时脱除尾气中的含硫气体
	阿德莱德大学(澳大利亚)	van Duc Long ^[33]	2021	模拟仿真计算	针对3 000 kW的船舶柴油发动机,以混合醇胺溶液为吸收剂,探究改进后的船用碳捕集技术的优化效果	与单一醇胺溶液相比,混合醇胺溶液有更高的碳捕集效率、更低的能耗
	挪威科技工程研究院(挪威)	Einbu ^[34]	2021	模拟仿真计算	基于MEA的燃烧后碳捕集系统,对船舶发动机上捕集CO ₂ 所需能量进行综合评估	燃烧后碳捕集系统会增加船舶燃料消耗, LNG船会增加6%~9%的燃料消耗,传统柴油船会增加8%~12%的燃料消耗
	皮里雷斯海事大学(土耳其)	Engin ^[35]	2021	模拟仿真计算	基于一艘全球运营的船舶管理公司提供的数据,建立数学模型,从燃料价格、碳税等方面分析船用碳捕集技术的应用前景	更换替代能源、缴纳碳税的支出远远高于安装碳捕集系统的成本,船用碳捕集技术是一种具有成本效益的航运碳减排方案
国内	韩国科学技术院(韩国)	Lee ^[36]	2021	模拟仿真计算	基于一艘18.2 MW的集装箱船,以PZ活化的N-甲基二乙醇胺(MDEA)为吸收剂,研究船用碳捕集技术降低EEDI的潜力	该技术可减少船舶尾气中70%以上的CO ₂ ,可满足当前在IMO规划中2050年EEDI的要求
	首尔国立大学(韩国)	Oh ^[37]	2021	模拟仿真计算	基于一艘LNG船,设计了一套膜吸收系统,用于船舶尾气中CO ₂ 的捕集	与醇胺法相比,该捕集系统的主尺寸较小,但捕集能耗和维护成本较高
	上海海事大学	王忠诚 ^[38-39]	2021	模拟仿真计算+试验研究	优化船用6135型脱碳塔性能	当入口倾斜角度为15°、喷嘴喷雾锥角为90°、最上部的喷嘴向上喷射且高度与中部喷嘴位于同水平面时,碳捕集效率能够提高4.42%
	哈尔滨工程大学	吴云金 ^[40]	2022	模拟仿真计算	提出一种碳捕集、有机朗肯循环(ORC)等后处理方式与LNG发动机集成的方案,研究发动机不同工况下排气热量与碳捕集系统集成的可行性	当发动机以90%以上负荷运行时,可实现80%以上的碳捕集效率;计算结果表明ORC系统所输出净功满足联合系统用电设备需求
	中国船级社	简炎钧 ^[41]	2022	理论研究	研究废气碳捕集系统对EEDI的影响	提出安装碳捕集系统的船舶的EEDI计算公式
	武汉理工大学	Zhang ^[42]	2023	模拟仿真计算	研究碳基材料吸附脱除LNG船舶尾气中CO ₂ 的能力,分析尾气中其他成分对CO ₂ 吸附效果的影响	大的碳质表面材料具有明显的CO ₂ 吸附作用,低浓度的CH ₄ 、H ₂ O、NO可以促进CO ₂ 的吸附,O ₂ 、NO ₂ 会抑制CO ₂ 的吸附

为了在低碳航运市场抢占先机,2021 年以后,全球各船级社和船企在特定船型上开展了船用碳捕集技术的实船验证^[43-44],以满足各项严格的船舶碳排放法规要求。主要应用案例如图 2 所示。当前业界主要基于成熟的船舶废气脱硫技术,开展相关的碳捕集研究。如芬兰的瓦锡兰废气净化部门与挪威 Solvang ASA 公司合作设计了一种基于船舶脱硫装

置的碳捕集系统,并成功应用在一艘 21 000 m³ 乙烯运输船上。中船集团七一一所使用醇胺溶液作为吸收剂,获得了国内首个船载 CO₂ 捕集与封存系统(CCS)原理性认可证书。各国实船应用中大多采用传统的吸收剂,可达到极佳的碳捕集效果,但在船舶尾气中捕集的 CO₂ 质量比捕集系统消耗的燃料质量更大,需要消耗更多的能源将其运到港口进一步处

参与国家	研究单位	研究时间	研究成果
韩国 希腊 美国	韩国大宇造船 希腊海运公司 Gaslog 美国船级社 (ABS)	2021 年 6 月	签订合作开发 LNG 船舶载 CO ₂ 捕集及储存技术协议
日本	日本三菱重工 日本川崎汽船 日本船级社 (NK)	2021 年 8 月	在煤炭运输船“CORONA UTILITY” 上安装小规模尾气碳捕集装置, 测试捕集的 CO ₂ 纯度在 99.9% 以上
韩国	韩国大宇造船 Hi Air Korea	2021 年 9 月	合作开发的船用 CO ₂ 捕集与储存技术, 成功完成实船 验证, 并完成碳捕集与封存相关的 20 多件专利申请
挪威 芬兰	Solvang ASA 瓦锡兰废气净化部门	2021 年 10 月	合作设计了一种基于船舶脱硫装置的碳捕集系统, 成功应用在一艘 21 000 m ³ 的乙烯运输船上
中国	中船集团七一一所	2022 年 1 月	中国船级社为其颁发国内 首个船载 CO ₂ 捕集与封存系统 (CCS) 原理性认可证书
荷兰	Value Maritime	2022 年 9 月	英国劳氏船级社 (LR) 批准 Value Maritime 开发的船用碳捕集与封存系统
中国	中国华光海运集团 中船集团七一一所	2023 年 4 月	法国必维船级社 (BV) 为 双方合作开发的船用碳捕集联合项目 颁发实船应用可行性 AIP 认可证书
中国	中船集团七一一所 上海外高桥造船公司	2023 年 6 月	英国劳氏船级社 (LR) 为 双方合作实施的碳捕集系统实船应用项目 颁发 AIP 认可证书

图 2 各国船用碳捕集技术实船应用代表性研究成果

Fig.2 Representative research achievements on the application of marine carbon capture technologies in various countries

理。因此,需针对远洋船舶的运行特点,对船用碳捕集技术进行技术优化及创新。

从当下各研究机构及各船企的实船验证的现状来看,船用碳捕集技术仍处于起步阶段,目前缺乏对不同船型运行工况、运行参数等全方位深入的试验研究和实船验证。由于不同船型的尾气特性和运行工况不同,如何根据具体情况选择合适的碳捕集技术方案,以达到较高的碳捕集效率并降低能耗,是实际应用中需要解决的关键问题。特别是远洋船舶的碳捕集技术方案,由于其运行工况的复杂和特殊性,需要探索更加高效的吸收剂,研发高捕集效率、低能耗、无二次污染的船用碳捕集系统。此外,碳捕集系统的运行成本,捕集后的碳储存及利用也是有效促进远洋船舶碳捕集技术发展的关键。

2.2 船用碳捕集技术的要求

远洋船舶以货运为主,货舱以外的空间有限。远洋船舶尾气成分十分复杂,含有 CO₂、SO_x、NO_x 等气态物,以及炭粒、烟尘等颗粒物^[45-46]。正常负荷下的远洋船舶排气总管温度在 500 ℃ 以上,经余热

回收系统后尾气温度仍在 150 ℃ 以上,排气压力一般为 0.1~0.2 MPa^[47]。排气总量大,CO₂ 气体分压低,多数船型的 CO₂ 体积占比为 3%~7%,理论最高体积占比不超过 15%,尾气中含有大量的 N₂(>70%) 以及其他气体。基于以上远洋船舶的尾气排放特性,其尾气碳捕集系统需符合以下要求:1)对低压、低 CO₂ 浓度、高温、成分复杂的气源有良好的适应性,以保证高效稳定的碳捕集效果;2)具有经济性,包括碳捕集能耗、系统投资及运行成本,保证经济性运行;3)碳捕集产物要无毒、无腐,便于保存,或可以直接排放,保证无二次污染;4)碳捕集系统结构紧凑,尽可能少占用船舶空间,保证船型适用性广;5)设备抗震性好,远洋船舶长时间在海上受风浪冲击,须保证捕集设备安全稳定运行。

2.3 船用碳捕集适用技术

以一艘远洋航行的集装箱船为例,根据该船的相关数据(表 3),基于 MARPOL 公约附则 VI 修正案中 CII 评级的规定^[48],按照该船 2023 年和 2026 年度碳强度指标各级别的边界,在不改变油品的前提下

以类似参数的航线保持营运, 若想在相关年份达到 C 以上的评级, 2023 年碳捕集效率最低要求为 19.84%, 在 2026 年快速上升至 49.17%。

化学吸收法是一种适用于远洋船舶上的碳捕集方法, 目前化学吸收法所使用的吸收剂主要有有机胺类、氨水、热钾碱、强碱, 各种吸收剂的特点对比如表 4 所示^[49-52]。

各化学吸收剂已实现较为成熟的工业应用, 各有利弊。针对船舶尾气烟气体量大、烟气压力低、CO₂ 的浓度低(大部分在 10% 以下, 不超过 15%)等特点, 胺类吸收剂和强碱类吸收剂较为适合船舶上的应用。有机胺类吸收剂技术最为成熟, 可以与船舶余热回收系统相结合, 解决解吸能耗高的问题, 实现在船舶上的应用, 但同时应考虑胺类吸收剂易降解的问题。相较于胺类吸收剂, NaOH 等强碱类吸收剂具有反应稳定、吸收速率快、设备体积小、操作简单等特点, 一些研究者^[39]已经尝试使用 CaO 实现 NaOH 的再生, 并完成 CO₂ 的固态封存, 解决了强碱

表 3 船舶碳捕集相关参数	
Table 3 Relevant parameters of ship carbon capture	
参数	数值
夏季载重线吃水的载重/t	91 400
主机最大持续功率/kW	27 180
主机油耗率/[g/(kW·h)]	205
主机台数	1
辅机最大持续功率/kW	2 130
辅机油耗率/[g/(kW·h)]	280
辅机台数	2
集装箱船CII计算公式参数	$a=1\ 984, c=0.489$
集装箱船CII评级边界线参数	$d_1=0.83, d_2=0.94, d_3=1.07, d_4=1.19$

注: a 、 c 为集装箱船的CII参考基线计算参数; d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 为集装箱船CII评级边界参数(以2019年IMO收集的集装箱船数据为样本, 采用分位数回归方法估算得出)。

类吸收剂无法重复使用的问题, 尚需要考虑的是强碱的潮解。因此, 胺类吸收剂和强碱类吸收剂可作为船舶碳捕集吸收剂。

表 4 不同化学吸收剂对比				
Table 4 Comparison of different chemical absorbents				
吸收剂	特点	适用工况	解吸能耗/(GJ/t)	碳捕集效率/%
有机胺类 (MEA、AMP等)	优点: 吸收效率高, 处理能力大, 可循环利用, 技术成熟。缺点: 吸收剂不能完全再生, 解吸能耗高, 设备腐蚀问题, 胺类降解问题	20~40 ℃、常压、低CO ₂ 浓度(20%以下)的气体	3.7	90以上
冷氨水溶液	优点: 吸收速率快、吸收容量大, 再生能耗低, 可同时吸收多种酸性污染物, 无污染。缺点: 氨水具有高挥发性, 要考虑防漏、防爆问题	0~10 ℃、常压、低CO ₂ 浓度(20%以下)的气体	2.5	80~99
热钾碱	优点: 可用于多污染物捕集, 毒性低, 无挥发性, 对设备腐蚀性小, 无管路系统污染。缺点: 吸收速率较低, 设备体积大, 解吸能耗高	40~110 ℃、加压、CO ₂ 浓度在10%以上的气体	2.5	
强碱(NaOH、KOH等)	优点: 碱性强, 吸收效果好, 价格低廉, 反应不可逆, 反应稳定。缺点: 吸水性强, 易潮解, 再生困难	常温、常压气体	无需解吸	85以上

3 船用碳捕集技术发展趋势

在“双碳”目标的倒逼下, 碳捕集技术作为一种行之有效的减碳措施, 已逐渐获得了行业认可。以化学吸收法为代表的燃烧后捕集技术在陆上已实现成功的商业示范, 但其碳捕集能耗、碳捕集成本一直是工程应用中需要解决的关键问题。船舶碳捕集不同于陆上工业环境, 受到工况、场地等因素的影响和制约, 不能直接搬用陆上的工业系统及方案。船用碳捕集技术的广泛应用, 还有大量问题亟需解决。

3.1 面临的问题

3.1.1 系统结构

船舶的主要功能是运输货物, 空间相对局促, 尤其是船舶的机舱, 可分给碳捕集系统的空间极其有限。除捕集系统外, 大部分燃烧后捕集方法在吸收系统后还要加装解吸系统。此外, 若需要将捕集后的 CO₂ 加以利用, 还需要加装压缩机、冷凝器以及一定的储存空间, 因船舶空间有限, 实现起来会有一

定的困难。

3.1.2 捕集成本

碳捕集系统必然加大船舶初始投资成本, 在实际运行过程中又增加了船舶能耗, 造成捕集成本过高, 主要原因如下: 船舶尾气中的 CO₂ 浓度(3%~7%)较低, 导致捕集产物在进行解吸时存在再生能耗较高、溶剂损失较大等问题; 捕集系统的动力装置需要与原有船舶动力装置进行集成, 这会降低原有船舶动力系统的效率; CO₂ 的储存会占用部分货舱, 降低船舶的运输能力; 目前 CO₂ 的封存与利用技术尚不完善, 尤其是对于长时间在海面移动的远洋船舶。此外, 船舶碳捕集及储存的成本高于当前碳交易市场碳价, 船舶合法持有者对于船舶改装碳捕集系统的积极性不高。

3.1.3 CO₂ 后处理

捕集后的 CO₂ 若不能合理处理, 会导致 CO₂ 重新进入大气。无论高压气态储存还是液态储存都存

在一定的安全隐患: 高压气态 CO_2 在恶劣海况下可能会发生爆炸, 造成人员窒息或设备损坏; 液态 CO_2 若发生泄漏, 骤冷的低温会对船体结构或船员造成危害。此外, 液态 CO_2 高温下会气化, 造成储存罐内压力升高, 有爆炸风险。可见, CO_2 船上储存会对船舶的安全性和稳定性造成一定的影响, 目前的航运界尚无专门的 CO_2 储运规范指南。

3.1.4 二次污染

目前对于化学吸收法捕集 CO_2 系统对环境的影响评价, 主要以模拟和试验数据作为评价基础, 尚未与实际的项目结合。另外, 化学吸收法捕集 CO_2 需要消耗大量的淡水资源, 这一点也鲜有文献报道。化学吸收法所使用的化学吸收剂在捕集过程中会产生某种排放(溶剂蒸汽、 NH_3 、醛类等), 化学吸收剂的降解也会产生固体废物, 这些都会对环境造成危害。

3.2 解决途径

解决船舶碳捕集技术所面临的各种问题, 应针对船舶尾气特性, 开展碳吸收剂、吸收塔结构等碳捕集技术的深入研究, 探索更高效的运行模式。优化捕集工艺、研发更为环保高效的吸收剂既能降低捕集成本, 又可使系统更为紧凑。对船舶空间进行统筹布局, 做到合理利用, 与船舶已有的尾气脱硫系统进行耦合也是一个值得探究的方向, 船舶尾气一体化的处理系统既可以同时进行脱硫和碳捕集, 又避免对船舶空间的过多占用。要充分重视 CO_2 的储运安全, 积极研发船用新型 CO_2 储存、运输技术, 制定 CO_2 运输指南及技术标准, 规范海事监管。捕集后的 CO_2 可便利地直接海洋封存, 也可作为重要原料用于饮料碳酸化、物品干燥、建筑材料等行业, 从而产生经济效益。此外, 近年来 CO_2 驱油与碳捕集系统结合而成的 CO_2 -EOR 技术取得了重大进展, 已被证明 CO_2 具有较大的驱油潜力^[53]。

4 结语

尾气碳捕集技术是应对全球气候变化最直接有效的技术之一, 是当前唯一能够不改变现有能源格局的有效减碳技术, 在航运业中具有广泛应用的巨大潜力。各研究机构及各国船企经过分析论证, 均表明燃烧后碳捕集技术因其适用于低 CO_2 分压、排气量大的气源, 且对原有系统改造小、投资少, 是最有可能在船舶上广泛应用的碳捕集技术。目前该方法存在捕集能耗高的缺点, 且不同船型排放的尾气特性存在巨大差异性, 特别是远洋船舶, 缺乏各船型不同工况下的具体数据, 大规模推广使用碳捕集技术还需要进一步深入探索和研究。可从吸收剂的改

良、捕集工艺优化两方面降低捕集能耗, 同时可以考虑船舶尾气余热回收, 弥补碳捕集过程中的高能耗。捕集后的 CO_2 可利用船舶在海上运行的便利性进行海洋封存, 也可利用捕集后的 CO_2 产生经济效益, 弥补碳捕集系统在安装、使用过程中产生的成本。

针对船舶碳捕集技术所面临的各种问题, 需要继续开展大量有针对性的深入探索, 从理论研究、潜力评估、仿真计算向试验研究、示范验证过渡, 积极探索碳捕集技术优化路径; 从捕集效率、捕集成本、捕集过程中造成的 CO_2 排放、捕集后 CO_2 处理方式、总能耗等多个方面进行全生命周期的碳减排评价, 研究适用于远洋船舶的碳捕集、储存、运输、利用四位一体的全链远洋船舶碳捕集技术, 以推进船舶碳捕集技术的工业化应用进程。

参考文献

- [1] Climate change: atmospheric carbon dioxide[EB/OL]. [2023-04-23]. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide.html>.
- [2] 吴佳阳. 燃烧后二氧化碳捕集系统的全生命周期环境影响评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [3] BP. BP energy outlook 2019[EB/OL]. [2023-04-23]. <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-energy-outlook-2019>.
- [4] ARI I, SARI R. Differentiation of developed and developing countries for the *Paris Agreement*[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2017, 18: 175-182.
- [5] 黄连城, 张贤勇, 阚安康, 等. 中国航运业碳减排变化趋势与碳中和措施[J]. 青岛远洋船员职业学院学报, 2021, 42(3): 48-52.
HUANG L C, ZHANG X Y, KAN A K, et al. China's shipping industry carbon emissions status, changing trends and carbon neutral measures[J]. *Journal of Qingdao Ocean Shipping Mariners College*, 2021, 42(3): 48-52.
- [6] MARCIN S, ADAM T, TOMASZ I, 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.
- [7] IMO. Fourth greenhouse gas study 2020 [EB/OL]. [2023-04-23]. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>.
- [8] JOUNG T H, KANG S G, LEE J K, et al. The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas (GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050[J]. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 2020, 4(1): 1-7.
- [9] 中国船级社. 船舶 CO_2 排放监测、报告和验证实施指南[EB/OL]. [2023-04-25]. <https://www.ccs.org.cn/ccswz/specialDetail?id=201900001000008822>.
- [10] Marine Environment Protection Committee. Further shipping

- GHG emissions reduction measures adopted[EB/OL]. [2023-04-23]. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/MEPC76.aspx>.
- [11] IMO. IMO's work to cut GHG emissions from ships[EB/OL]. [2023-04-23]. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx>.
- [12] BOB D. BP statistical review of world energy 2019[R/OL]. [2023-04-23]. <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-statistical-review-of-world-energy-2019.html>.
- [13] 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, 2018.
- [14] 汪旭颖, 李冰, 吕晨, 等. 中国钢铁行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 339-346.
- WANG X Y, LI B, LÜ C, et al. China's iron and steel industry carbon emissions peak pathways[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 339-346.
- [15] 王丹. 二氧化碳捕集、利用与封存技术全链分析与集成优化研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2020.
- [16] 宋阳, 何少林, 薛华, 等. 二氧化碳捕集、地质利用与封存项目环境管理研究[J]. 中国环境管理, 2022, 14(5): 28-36.
- SONG Y, HE S L, XUE H, et al. Environmental management of carbon dioxide capture, geological utilization and storage projects[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2022, 14(5): 28-36.
- [17] 陈兵, 肖红亮, 李景明, 等. 二氧化碳捕集、利用与封存研究进展[J]. 应用化工, 2018, 47(3): 589-592.
- CHEN B, XIAO H L, LI J M, et al. Advances in research on carbon capture, utilization and storage[J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(3): 589-592.
- [18] 桂霞, 王陈魏, 云志, 等. 燃烧前 CO₂ 捕集技术研究进展[J]. 化工进展, 2014, 33(7): 1895-1901.
- GUI X, WANG C W, YUN Z, et al. Research progress of pre-combustion CO₂ capture[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(7): 1895-1901.
- [19] 何卉. 二氧化碳化学吸收系统的工艺流程改进和集成优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [20] 武永健. 化学链燃烧的特性及应用研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
- [21] ADÁNEZ J, ABAD A. Chemical-looping combustion: status and research needs[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(4): 4303-4317.
- [22] NANDY A, LOHA C, GU S, et al. Present status and overview of chemical looping combustion technology[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 59: 597-619.
- [23] KOHLE E E. Petra Nova carbon capture project successfully completed the 240 MW efacility is the largest post-combustion carbon capture project in the world CO₂ to enhance oil recovery[J]. Erdol Erdgas Kohle, 2017(6): 133.
- [24] 刘珍珍. 燃煤烟气二氧化碳捕集吸收剂的研究及工艺优化运行模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [25] 陆诗建, 张娟娟, 刘玲, 等. 工业源二氧化碳捕集技术进展与发展趋势[J]. 现代化工, 2022, 42(11): 59-64.
- LU S J, ZHANG J J, LIU L, et al. Progress and development trend of industry-sourced carbon dioxide capture technology[J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(11): 59-64.
- [26] 李红. 醇胺溶液捕集 CO₂ 过程的氧化、热降解研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [27] 张楠, 吕连宏, 王斯一, 等. 基于文献计量分析的碳中和研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(2): 464-472.
- ZHANG N, LÜ L H, WANG S Y, et al. Analysis of research progress in carbon neutrality based on bibliometrics[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(2): 464-472.
- [28] 吐尔逊·吐尔洪, 苏比努尔·吾麦尔江, 阿不都热依木·卡德尔, 等. 葡萄树基活性炭的制备及其 CO₂ 吸附特性[J]. 环境科学研究, 2021, 34(7): 1621-1629.
- TUERXUN T, SUBINUER W, ABUDOUREYIMU K, et al. Preparation of grape tree based activated carbon and its CO₂ adsorption capacity[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(7): 1621-1629.
- [29] WILBERFORCE T, BAROUTAJI A, SOUDAN B, et al. Outlook of carbon capture technology and challenges[J]. Science of the Total Environment, 2019, 657: 56-72.
- [30] LUO X B, WANG M H. Study of solvent-based carbon capture for cargo ships through process modelling and simulation[J]. Applied Energy, 2017, 195: 402-413.
- [31] 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.
- [32] 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, 2020, 59(15): 6951-6960.
- [33] van DUC LONG N, 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.
- [34] EINBU A, PETTERSEN T, MORUD J, et al. Energy assessments of onboard CO₂ capture from ship engines by MEA-based post combustion capture system with flue gas heat integration[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2022, 113: 103526.
- [35] ENGIN G, SELMA E. 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.
- [36] LEE S, YOO S, PARK H, et al. Novel methodology for EEDI calculation considering onboard carbon capture and storage system[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021, 105: 103241.
- [37] 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.
- [38] 王忠诚, 李品友, 李珂, 等. 船用 6135 型脱碳塔的性能优化 [J]. 推进技术, 2021, 42(6): 1425-1434.
- WANG Z C, LI P Y, LI K, et al. Performance optimization of marine 6135 decarbonization tower[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(6): 1425-1434.
- [39] 王忠诚, 刘晓宇, 周培林, 等. 基于碱法机理减少船舶 CO₂ 排放研究 [J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(3): 241-246.
- WANG Z C, LIU X Y, ZHOU P L, et al. Reducing CO₂ emission from ship based on alkali mechanism[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(3): 241-246.
- [40] 吴云金, 冯永明, 刘俊廷, 等. 基于能量综合回收利用的船舶碳捕获集成系统 [J]. 船舶工程, 2022, 44(7): 47-53.
- WU Y J, FENG Y M, LIU J T, et al. Integrated ship carbon capture system based on comprehensive energy recovery and utilization[J]. Ship Engineering, 2022, 44(7): 47-53.
- [41] 简炎钧, 傅夏明, 杨培青. 废气碳捕集系统对 EEDI 的影响分析 [J]. 中国船检, 2022(10): 71-74.
- JIAN Y J, FU X M, YANG P Q. Analysis of the influence of exhaust gas carbon capture system on EEDI[J]. China Ship Survey, 2022(10): 71-74.
- [42] ZHANG Y, LI G S, ZHANG Z H, et al. Insights into CO₂ removal mechanism via the carbonaceous surface in the exhaust gas of marine NG engines: a first-principles study[J]. Applied Surface Science, 2023, 617: 156542.
- [43] 邝展婷. 全球船企抢占 CCUS 风口 [N]. 中国船舶报, 2022-02-18(5).
- [44] IEA. Energy technology perspectives 2020[EB/OL]. [2023-04-23]. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020.html>.
- [45] 刘东宇. 船舶柴油机废气模拟系统的设计与测试 [D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
- [46] 袁勤辉. 大型集装箱船舶柴油机余热利用系统建模及优化 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [47] 穆振仟. 大型船用柴油机进排气性能的模拟仿真与试验研究 [D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [48] 薛树业, 何利东. 国际航运碳强度规则下的船舶分类 [J]. 世界海运, 2022, 45(8): 23-27.
- XUE S Y, HE L D. Classification of ships under the carbon intensity rules of international shipping[J]. World Shipping, 2022, 45(8): 23-27.
- [49] 张亚萍. 燃煤 CO₂ 的回收利用技术研究进展 [J]. 化工时刊, 2022, 36(4): 25-27.
- ZHANG Y P. Research progress of coal-fired CO₂ recovery and utilization technology[J]. Chemical Industry Times, 2022, 36(4): 25-27.
- [50] 丁洁. 燃料发电厂燃烧后 CO₂ 捕获技术研究进展 [J]. 广东化工, 2022, 49(8): 100-101.
- DING J. Study on the capture of carbon dioxide of post-combustion from fossil fuel fired power plants[J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(8): 100-101.
- [51] 于伟. 纳米颗粒强化的二氧化碳吸收剂及新型再生工艺研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [52] LI J H, SHI C, BAO A. Design of boron-doped mesoporous carbon materials for multifunctional applications: dye adsorption and CO₂ capture[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(3): 105250.
- [53] LU S J, LIU H, ZHAO D Y, et al. The research of net carbon reduction model for CCS-EOR projects and cases study[J]. International Journal of Simulation and Process Modelling, 2017, 12(5): 401. □