



移动扫码阅读

周镇港, 伍致承, 柳伟杰, 等. 船舶碳减排关键技术与应用研究进展 [J]. 能源环境保护, 2025, 39(5): 1-16.

ZHOU Zhengang, WU Zhicheng, LIU Weijie, et al. Advances in Key Technologies and Applications for Ship Carbon Emission Reduction [J]. Energy Environmental Protection, 2025, 39(5): 1-16.

## 船舶碳减排关键技术与应用研究进展

周镇港<sup>1,2</sup>, 伍致承<sup>1,2</sup>, 柳伟杰<sup>1,2</sup>, 姚栋伟<sup>1</sup>, 潘诚晋<sup>1,2</sup>, 林赛赛<sup>1,2</sup>, 沈海涛<sup>3</sup>,  
张涌新<sup>1,2</sup>, 范海东<sup>4</sup>, 张士汉<sup>5</sup>, 郑成航<sup>1,2,4,\*</sup>, 高翔<sup>1,2,4,5,\*</sup>

(1. 浙江大学能源高效清洁利用全国重点实验室, 浙江杭州 310027; 2. 浙江大学碳中和研究院, 浙江杭州 310027; 3. 浙江浙能迈领环境科技有限公司, 浙江杭州 311200; 4. 浙江省白马湖实验室有限公司, 浙江杭州 310051; 5. 浙江工业大学能源与碳中和学院, 浙江杭州 310014)

**摘要:** 在碳达峰碳中和战略目标驱动下, 国际海事组织和各国政府正加快制定并实施严格的航运业碳排放管控政策和法规。为应对船舶受限空间下高效、低成本碳减排的挑战, 综述了国内外船舶航运领域的碳减排政策、关键技术及实船应用现状, 深入分析了航运业从高碳向低碳、零碳转型的技术路径, 以及相关技术在低碳/零碳船舶工艺开发中的应用前景。节能降碳技术主要依托船体设计与运营策略优化, 以提高船舶能源利用效率, 可在一定程度上减少碳排放。同时, 快速发展的清洁能源替代技术和尾气碳捕集技术为船舶碳减排技术的研发和应用带来了变革机遇。通过节能降碳、清洁能源替代和尾气碳捕集等技术有机结合, 可显著削减船舶全生命周期碳排放。在此基础上, 展望了航运业综合运用从源头减排到末端治理的碳减排技术, 逐步实现船舶净零排放的发展路径和目标, 为推动船舶碳减排技术的规模化应用与航运领域的绿色低碳转型提供参考。

**关键词:** 船舶; 碳减排; 节能降碳; 清洁能源替代; 尾气碳捕集

中图分类号: X505

文献标识码: A

文章编号: 2097-4183(2025)05-0001-16

## Advances in Key Technologies and Applications for Ship Carbon Emission Reduction

ZHOU Zhengang<sup>1,2</sup>, WU Zhicheng<sup>1,2</sup>, LIU Weijie<sup>1,2</sup>, YAO Dongwei<sup>1</sup>,  
PAN Chengjin<sup>1,2</sup>, LIN Saisai<sup>1,2</sup>, SHEN Haitao<sup>3</sup>, ZHANG Yongxin<sup>1,2</sup>,  
FAN Haidong<sup>4</sup>, ZHANG Shihan<sup>5</sup>, ZHENG Chenghang<sup>1,2,4,\*</sup>, GAO Xiang<sup>1,2,4,5,\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Institute of Carbon Neutrality, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Zhejiang Energy Marine Environmental Technology Co., Ltd., Hangzhou 311200, China; 4. Zhejiang Baima Lake Laboratory Co., Ltd., Hangzhou 310051, China; 5. College of Energy and Carbon Neutralization, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** In alignment with the global net-zero emissions target by 2050, the International Maritime Organization (IMO) and its member states are advancing regulatory frameworks such as the Carbon

收稿日期: 2024-12-15

修回日期: 2025-01-09

接受日期: 2025-01-20

DOI: 10.20078/j.eep.20250205

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LDT23E0601); 浙江省“尖兵领雁+X”研发攻关计划(2024SSYS0072, 2024SSYS0073)

第一作者: 周镇港(1997—), 男, 湖南娄底人, 博士研究生, 主要研究方向为船舶碳减排。E-mail: zgzhou@zju.edu.cn

\*通讯作者: 郑成航(1984—), 男, 浙江衢州人, 教授, 主要研究方向为能源利用过程污染物及二氧化碳减排。E-mail: zhengch2003@zju.edu.cn

高翔(1968—), 男, 浙江杭州人, 院士, 主要研究方向为能源与环境领域减污降碳的基础和应用。E-mail: xgaol@zju.edu.cn

Intensity Indicator (CII) and Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) to reduce greenhouse gas emissions in maritime operations. These frameworks mandate a 40% reduction in carbon intensity by 2030 compared to 2008 levels, a crucial step toward the sector's long-term decarbonization goals. Current research focuses on retrofitting existing fleets with energy-efficient propulsion systems, including waste-heat recovery technologies and hull optimization designs, which can reduce fuel consumption by 15%–20%. Simultaneously, the adoption of low-carbon fuels like liquefied natural gas (LNG) and green methanol is accelerating. This study evaluates the efficacy of maritime decarbonization policies and technologies, tracking the sector's transition from high-carbon practices to zero-carbon operations. Key innovations include closed-loop carbon management systems achieving up to 80% onboard carbon capture, demonstrated in pilot projects integrating exhaust gas treatment with renewable energy sources. Sustainable decarbonization further depends on hybrid solutions that combine low-emission fossil fuels, renewable energy systems, and resilient carbon capture infrastructure, including port-based carbon dioxide storage hubs. Recent advancements have focused on optimizing vessel operations through propulsion upgrades and fuel flexibility, supported by compliance with the CII and EEXI frameworks. These policies incentivize energy efficiency and emissions transparency, seen in the widespread adoption of dual-fuel engines capable of switching between LNG and methanol. Lifecycle management of carbon sequestration infrastructure ensures long-term emissions reductions across the supply chain, from fuel production to end-use. By integrating energy-efficient retrofits such as air lubrication systems, fuel transition roadmaps blending LNG and methanol, and carbon capture solutions, the industry achieves cost-effective emission reductions while moving from fragmented measures to unified strategies. For example, digital twin modeling for hull design enables real-time vessel performance optimization, reducing drag by up to 10% in simulated environments. Additionally, ammonia-fueled engines offer promising zero-carbon propulsion for deep-sea vessels, though challenges related to fuel storage and safety protocols still need further standardization. Looking ahead, future advancements will prioritize holistic vessel optimization through renewable energy integration, such as wind-assisted propulsion. Resilient supply chains for alternative fuels, along with standardized carbon accounting frameworks, will guide the shipbuilding industry toward achieving IMO's 2050 net-zero targets. For example, the EU's inclusion of maritime emissions in its carbon market from 2024 incentivizes investment in green fuel production and carbon capture infrastructure. This integrated approach aligns with global decarbonization strategies, emphasizing the synergy between regulatory mandates-such as IMO's revised GHG strategy-and technological breakthroughs in fuel flexibility, energy efficiency, and carbon management.

**Keywords:** Ships; Carbon reduction; Energy saving and carbon reduction; Clean energy alternatives; Carbon capture

## 0 引 言

国际航运承担着超过 80% 的全球贸易, 是全球经济发展的重要支柱。然而, 为满足日益增长的国际贸易需求, 船舶的数量和总载重不断增长, 导致航运业温室气体排放量持续上升(图 1(a)(b))。英国航运经纪公司 Simpson Spence & Young 的数据显示<sup>[1]</sup>, 2022 年国际航运业的 CO<sub>2</sub> 排放量

约为 8.85 亿吨, 约占全球 CO<sub>2</sub> 排放总量的 3%, 同比增长 6.2%。降低航运碳排放已成为行业面临的核心挑战之一。从船东碳排放量占比分析, 法国凯致商学院提供的数据显示, Sovcomflot JSC 公司以年排放近 100 万吨 CO<sub>2</sub> 位居首位(图 1(c)), 其中 62% 的排放来自欧洲内部贸易活动<sup>[2]</sup>。从船型分布来看, 集装箱船、散货船和油船是主要的温室气体排放源, 燃料消耗及 CO<sub>2</sub> 排放量分别占整

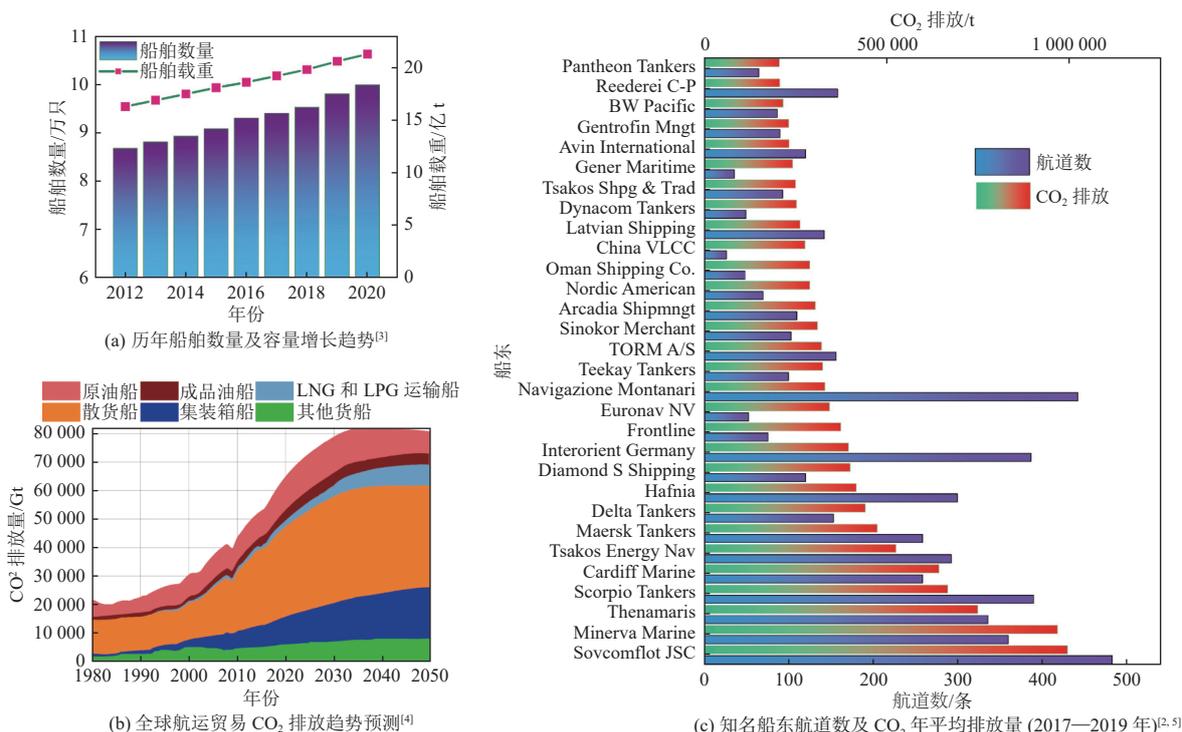


图 1 全球航运及船舶碳排放的发展现状和趋势

Fig. 1 Current status and trends in global shipping and ship carbon emissions

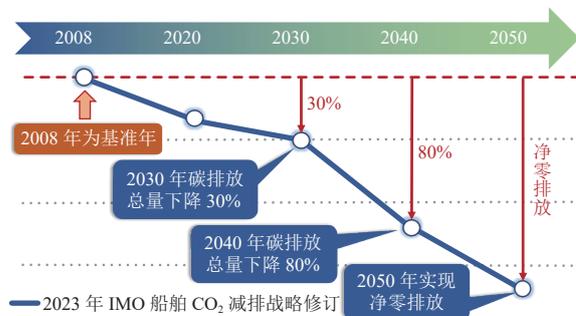
个航运业的 80% 和 70%<sup>[3]</sup>。国际海事组织(IMO)预测,若不采取有效措施,到 21 世纪中叶,航运业的 CO<sub>2</sub> 年排放量将增至 16 亿吨,因此迫切需要通过政策与技术创新协同破解航运业减排难题。

化石能源清洁高效利用、可再生能源规模化应用、CO<sub>2</sub> 捕集与资源化利用等技术是可持续发展战略和循环经济的核心驱动力,同时也是推动航运业低碳发展的重要支撑。目前,船舶碳减排技术的研发已从改善船体设计和提高推进效率等节能降碳技术,扩展到清洁能源替代和尾气碳捕集等净零排放技术。系统集成源头碳减排和尾气碳捕集技术可加速先进低碳工艺研发,在能源与环境领域展现出广阔的应用前景。加快实现低碳工艺的按需设计以及面向复杂航运环境的低碳技术研发,提高碳减排效率并降低碳减排成本,推动船舶低碳技术由单一碳减排模式向多种低碳技术融合模式转变,为缓解温室效应和解决海洋酸化问题提供了有效途径。

本文从国内外船舶低碳政策、节能降碳技术、清洁能源替代技术、尾气碳捕集技术以及全流程低碳技术等方面综述船舶碳减排关键技术与应用研究进展,重点分析不同碳减排措施对应的减排前景以及应用方向,从而为船舶碳减排技术在能源与环境领域的进一步应用提供技术参考。

## 1 国内外船舶低碳政策

2018 年,IMO 在海洋环境保护委员会(MEPC)会议中提出了 CO<sub>2</sub> 等温室气体减排的初步战略<sup>[6]</sup>,并于 2023 年 7 月通过了《2023 年 IMO 船舶温室气体减排战略》,确定了温室气体减排新目标及阶段性措施,明确提出到 2030 年国际航运温室气体年度排放总量相比 2008 年至少降低 20%,力争降低 30%;到 2040 年相比 2008 年至少降低 70%,力争降低 80%;到 2050 年实现净零排放的目标<sup>[6-8]</sup>(图 2)。

图 2 IMO 船舶温室气体减排战略<sup>[7]</sup>Fig. 2 Ship greenhouse gas emission reduction planning<sup>[7]</sup>

当前,IMO 航运碳减排政策主要包括三大类别的系统性框架<sup>[16]</sup>:首先是规划引导类政策,包括

“IMO 初步战略”和“2023 战略”，为行业制定了明确的减排路线图；其次是强制约束类政策，通过《国际防止船舶造成污染公约》(MARPOL 公约)实施船舶能效设计指数(EEDI)、船舶能效管理计划(SEEMP)、船舶能效指数(EEXI)和碳强度指标(CII)等技术性指标，对各缔约国船舶形成强制性约束；最后是支持保障类政策，如鼓励成员国制定自愿国家行动计划，推动各国完善航运减排的立法和制度安排。这一政策体系展现了 IMO 推动航运业绿色转型的坚定决心。2025 年 4 月，IMO 在 MEPC83 会议上通过的 MARPOL 公约附件六修正案草案，建立了全球首个行业强制性净零排放框架，将排放限制与碳定价机制相结合，对超标船舶实施分级罚款制度(100 美元/吨或 380 美元/吨)。

为积极响应 IMO 提出的减排目标，世界各国政府及重要组织纷纷出台船舶低碳发展战略、政策与规划等(表 1)。欧盟最早提议征收海运碳税。2020 年 9 月，欧洲议会通过投票决定从 2022

年开始将国际海运温室气体碳排放纳入欧盟碳排放交易系统(EU ETS)。2022 年 12 月，欧洲议会和欧盟理事会关于“Fit for 55”欧盟碳市场改革达成初步协议，明确从 2024 年起，欧盟内部及出入欧盟港口的航运业将全面纳入 EU ETS 管控，要求 5 000 总吨及以上的国际航运船舶每排放 1 吨 CO<sub>2</sub> 交纳 1 个碳配额(EUA)，价格约为 95 欧元。这意味着这些船舶每消耗 1 吨燃料，成本上升近 300 欧元。这一举措无疑对拥有全球第二大船队规模的中国航运业产生重大影响。此外，欧盟还在 2023 年陆续发布了《欧盟海运燃料条例》(Fuel EU Maritime)和《可再生能源指令》(RED III)等气候立法与政策，对船舶排放的温室气体强度限值进行了更加严格的要求。除欧盟外，挪威于 2020 年发布了《绿色航运计划》(Green Voyage 2050)，提出到 2030 年将国内航运和渔船的碳排放量削减 50%，2026 年前在挪威峡湾地区航行的船舶实现净零排放。此外，新加坡、日本、英国、

表 1 世界各国航运业碳减排相关政策措施<sup>[9-13]</sup>

Table 1 Typical ship CO<sub>2</sub> emission reduction planning in various countries around the world<sup>[9-13]</sup>

国家/机构	年份	规划	措施内容
IMO	2023	《2023年船舶温室气体减排战略》	2030年温室气体年排放总量比2008年减少至少20%，2040年国际航运业温室气体排放总量降低至少70%，2050年左右净零排放
	2025	《国际防止船舶造成污染公约》	对超标船舶实施分级罚款制度(100美元/吨或380美元/吨)
韩国	2020	《2030年绿色船舶推进倡议》	建设基于清洁替代燃料的低碳船舶，构建2050碳中和型产业生态系统，航运业温室气体到2050年减少70%
日本	2020	《国际航运零排放路线图》	到2028年推出第一代“零排放生态船”
挪威	2020	《绿色航运计划》	到2030年将国内航运和渔船的碳排放量削减50%，2026年前在挪威峡湾地区航行的船舶实现净零排放
美国	2021	《美国长期战略：2050年实现温室气体净零排放的途径》	设置加利福尼亚排放控制区、芝加哥气候交易所
	2022	Fit for 55	增加对可再生和低碳燃料的需求和持续使用，并减少航运业的温室气体排放
欧盟	2022	《欧盟排放交易体系指令》(EU ETS)	提出海运业将被纳入EU ETS，适用于5 000总吨及以上货船和客船，按欧盟碳排放配额价格约95欧元/吨
	2023	《欧盟海运燃料条例》	提出船舶使用能源的年平均温室气体强度限值将以2020年为基线，按2%、6%、14.5%、31%、62%和80%的比例分阶段折减
新加坡	2022	《新加坡海洋脱碳蓝图：迈向2050》	重点支持海运业的7个关键领域，并增加超过3亿美元的额外资金来保障蓝图实施
中国	2022	《船舶能耗数据和碳强度管理办法》	要求海船、内河船分别按航次、年度填写船舶能耗数据，构建船舶碳排放监测、报告和核查(MRV)体系
	2023	《船舶制造业绿色发展行动纲要(2024—2030年)》	到2025年，液化天然气(LNG)、甲醇等绿色动力船舶国际市场份额超过50%，到2030年，船舶制造业绿色发展体系基本建成
	2023	《船舶应用碳捕集系统指南》	船载碳捕集系统的设计与布置、CO <sub>2</sub> 吸收以及船载碳捕集系统预设等

澳大利亚、美国、韩国等国家也纷纷出台航运业碳减排相关措施。

我国作为航运和港口大国,在“双碳”目标框架下构建了系统性航运减排政策体系。交通运输部于2021年10月印发《绿色交通“十四五”发展规划》,明确到2025年,营运船舶单位运输周转量的CO<sub>2</sub>排放相比2020年下降3.5%的政策目标,对船舶节能减排进行量化管控;在此基础上,2022年1月公开的《水运“十四五”发展规划》,强调聚焦绿色转型,构建清洁低碳的港口船舶能源体系,鼓励LNG、电动、氢能等新能源和清洁能源船舶研发应用。为加速内河船舶的绿色智能发展,工业和信息化部、发展改革委、财政部、生态环境部和交通运输部于2022年9月联合发布《关于加快内河船舶绿色智能发展的实施意见》,提出到2025年,LNG、电池、甲醇、氢燃料等绿色动力关键技术取得突破。配套管理技术方面,同年11月,交通运输部海事局发布《船舶能耗数据和碳强度管理办法》,并宣布中国于2023年全面实施船舶温室气体短期减排措施。

## 2 船舶碳减排技术发展现状

面对日益严格的船舶碳排放管控要求,亟须发展先进船舶碳减排技术,助力实现航运业净零排放。通过推进系统改进、船体设计优化、航速优化和动力辅助优化等节能增效措施,可以减少燃料消耗,实现一定程度的碳减排;采用可再生能源驱动制取的氢、氨、甲醇等绿色燃料替代传统化石燃料,可从源头上减少船舶航行的全生命周期碳排放;在现有船舶上加装尾气碳捕集设备,可在不改变船舶动力系统的情况下有效减少碳排放。同时,通过耦合多种碳减排技术,可提升碳减排技术在多类船型/复杂航道船舶应用的适应性,降低碳减排成本,提高碳减排效率。

### 2.1 节能降碳技术

节能降碳技术主要包括优化船体形状和尺寸、提升船舶动力系统能效、改善船舶运行方式等,旨在减少船舶燃料消耗,在提高经济效益的同时减少碳排放。表2总结了不同船舶节能增效技术特点及其碳减排潜力。

在改善低阻船体设计方面,可通过船体结构优化、尺寸优化、微气泡控制船体摩擦力等策略削减船舶能耗。KUMAGAI等<sup>[51]</sup>开发了一种利用微气泡减少船体阻力的新型节能装置,并在小型

拖曳水池中进行了实验,结果表明减阻设备可使船舶节能5%~15%。YANUAR等<sup>[52]</sup>研究了微气泡对自行驳船模型的减阻规律,水池实验结果表明,在船头部和中部微气泡注入比为0.3时,采用三角船尾可获得5%~40%的减阻效果。GAMAL等<sup>[53]</sup>进行了微气泡减阻三维数值模拟研究,结果表明,在弗鲁德数 $Fr$ 为0.282、空气体积分数为4.8%时,减阻效果最优,减阻率可达27.6%。Silverstream Technologies公司提出的空气润滑系统(ALS)技术方案已较为成熟,以巴西淡水河谷公司的超大型矿石运输船为例,当船体吃水深度在10~11 m内,运行速度在17节以上时,应用该技术预计可减少5%~8%的燃料消耗和碳排放<sup>[54]</sup>。招商局重工(深圳)有限公司<sup>[55]</sup>在325 000 DWT矿砂船上安装空气润滑系统,通过利用空气压缩机产生压缩空气,压缩空气经过储气室从船底部溢出,产生蜂巢状气泡,进而在船底部形成气泡层,从而有效减小了船舶阻力,可为船舶节省5%~10%的燃料消耗。现代重工在液化天然气运输船上使用TMC Compressors公司提供的船用空气润滑系统,基于压缩空气产生气泡流,减少船体与水的摩擦阻力,降低约8%的燃料消耗,节能效率可达5%~7%。新加坡GILLS PTE公司开发了一种喷射气体的液体润滑系统(GILLS),该系统能自生空气微气泡,可节约10%的燃料消耗量。地中海航运(MSC)公司将空气润滑减阻系统和轴带发电机系统应用于超大型集装箱船,可减少3%~4%的碳排放。

在提高推进效率方面,采用先进的推进器和传动装置可提高推进效率和灵活性,从而降低船舶能耗和碳排放。研究发现,不同类型的节能装置具有不同的效能。具体而言,对转螺旋桨(CRP)技术能够实现2%~15%的能源节约,混合式对转螺旋桨(Hybrid CRP)技术的节能效果可达7%~15%,尾流收缩叶梢有载螺旋桨(CLT)技术的节能效率为1%~3%,新式外形技术(NPT)的节能效率能够达到3%~6%。依据安装位置可将节能装置分为两类:安装在螺旋桨前和安装在螺旋桨后的节能装置。对于前者,如反应鳍、Mewis导管和前置导管,不仅适用于新建船舶,还适用于改装船舶,每艘船耗费5万~12万美元,预计能够节省3%~9%的燃油消耗。另外,扭曲舵的设计旨在减少舵叶吸力面的片状空泡现象,从而提高船舶的操纵性和推进效率,实船测试结果表明其节能效

表 2 节能降碳技术及 CO<sub>2</sub> 减排潜力<sup>[14-50]</sup>Table 2 Energy-saving and carbon-reduction technologies and their CO<sub>2</sub> emission reduction potential<sup>[14-50]</sup>

技术	主要措施	特点	CO <sub>2</sub> 减排潜力
设计低阻船体	减轻材料重量	泡沫芯材、玻纤纱、碳纤维材料	0~10% <sup>[14]</sup> , 0.1%~22.0% <sup>[15]</sup> , 4.5% <sup>[16]</sup>
	减轻压舱水重量	优化压舱水分布、镇流器尺寸等	0~10% <sup>[15]</sup> , 0~7% <sup>[17]</sup>
	优化船舶尺寸	平底、深V、Modified-V型等船体	0~30% <sup>[18]</sup> , 10%~15% <sup>[14]</sup> , 2%~30% <sup>[15]</sup> , 15%~25% <sup>[19]</sup> , 9%~27% <sup>[20]</sup>
	改良船体形状	线型优化, 球鼻艏设计	2%~7% <sup>[14]</sup> , 9.5% <sup>[21]</sup> , <4.9% <sup>[22]</sup>
	使用船体涂料	水凝胶集水, 流变控制	1%~4% <sup>[14]</sup> , 1%~10% <sup>[15]</sup>
	使用空气润滑	微气泡发生器引入空气形成润滑层	1%~5% <sup>[14]</sup> , 1%~15% <sup>[15]</sup> , 5%~6% <sup>[23]</sup> , 10%~20% <sup>[24]</sup> , 4%~16% <sup>[25]</sup> , 0~15% <sup>[17]</sup>
	增加减阻装置	附体减阻, 断级减阻, 网状射流	2%~15% <sup>[15]</sup>
提高推进效率	高效推进	推进优化, 螺旋桨优化	3%~6% <sup>[17]</sup>
	改进尾流分布	使用对转螺旋桨和管道螺旋桨	2%~3% <sup>[26-27]</sup> , 0~12% <sup>[17]</sup> , 1%~25% <sup>[14-15]</sup>
	使用节能设施	前后涡流, 固定翅片、叶片轮	5.4% <sup>[28]</sup> , 1.3% <sup>[29]</sup>
内燃机优化	改进燃烧系统	改进进气系统、喷油系统和燃烧室结构	0~12% <sup>[17]</sup> , 2%~45% <sup>[15]</sup>
改善运行方式	优化航速	量化船速, 减少能量消耗	0~60% <sup>[14-15]</sup> , 0~51% <sup>[30]</sup> , 19%~28% <sup>[31]</sup> , 19%~34% <sup>[32]</sup> , 20%~30% <sup>[33]</sup> , 0~3% <sup>[14]</sup> , 3%~10% <sup>[15, 34]</sup> , 40% <sup>[35]</sup>
	有机朗肯循环	由余热锅炉、透平、冷凝器和工质泵组成	0~4% <sup>[14]</sup> , 1%~20% <sup>[15]</sup> , 10%~15% <sup>[36]</sup> , 1.83%~3.50% <sup>[37]</sup> , 4%~16% <sup>[38]</sup> , 2%~3% <sup>[39]</sup> , 7.3%~11.4% <sup>[40]</sup> , 5%~15% <sup>[41]</sup> , 6.06% <sup>[42]</sup>
	设备辅助节能	变速发动机, 混合动力发电	0.1%~3.0% <sup>[15]</sup>
使用电能	优化电能使用	海上电厂, 电力推进, 岸电	2%~45% <sup>[15]</sup> , 16%~34% <sup>[43]</sup> , 0~3% <sup>[14]</sup> , 3%~10% <sup>[15]</sup> , 40% <sup>[35, 44]</sup>
优化运营	合理规划船布局	船舶空间合理使用	4%~83% <sup>[15]</sup> , 0~30% <sup>[14, 18]</sup> , 5%~50% <sup>[15]</sup> , 5.5% <sup>[45]</sup>
	优化贸易路线	优化内河/海运航线、优化接驳方案	1.02% <sup>[46]</sup> , 27% <sup>[47-48]</sup>
	港口设施	优化泊位和码头起重机分配	0~1% <sup>[14]</sup> , 1% <sup>[49]</sup>
培训船员	船体清洁及维护	节能增效辅助措施	1%~10% <sup>[15]</sup>
	增强节能意识	定期开展船员培训	1%~10% <sup>[50]</sup>

率为 2%~3%。对于安装在螺旋桨后的节能装置, 舵、舵球及艏帽组合体同样适用于新建船舶, 且由于其成本较低, 实船测试结果显示节能效率为 2%~3%。2017 年 DNV GL 船级社推出了不对称船尾造型, 该造型可使船舶适应螺旋桨每侧不同的流动条件。据中国船检报道, 瑞典螺旋桨制造企业 Berg Propulsion 研发了高推进效率新型螺旋桨叶片, 并在 2021 年对一艘 1 118 TEU 型船进行了推进系统优化, 当航速为 12 节时, 实现了新叶片的工作效率提高 50%, 燃油效率提高 22% 的同时减少 CO<sub>2</sub> 排放。

在提升燃烧效率方面, 优化船舶内燃机动力系统设计与运行策略, 有助于显著提高热效率并

减少碳排放。进气参数控制、燃油喷射方式以及燃烧室构型等因素对内燃机动力系统整体性能提升发挥着关键作用。在控制进气参数方面, AHMED 等<sup>[56]</sup>采用数值模拟方法对轴对称进气道在气门和气缸内部的空气流动特性进行研究, 通过评估不同气门开启程度的流量系数, 发现在较高升程条件下, 流量系数展现出显著的波动性, 而在较低升程条件下, 稳定的空气流动可显著提升燃烧效率。GODRIE 等<sup>[57]</sup>结合数值模拟与实验方法, 对比研究了各气门位置的缸内气流状况, 并探讨了在稳定流动条件下涡流形成的原理, 为内燃机高效运行提供了机理解释。在控制燃油喷射方式方面, GERPEN 等<sup>[58]</sup>的研究表明, 通过调节喷孔直

径和涡流比可以显著影响燃烧过程和碳排放。油束间距短可能导致油束相互干扰和雾化效果恶化,较小的喷孔直径和较高的涡流比有助于减小油束穿透距离,进而减少碳排放。LEE等<sup>[59]</sup>通过数值模拟与实验相结合的方法,研究了某重型柴油机的喷油压力、喷油定时和进气压力等参数对污染物排放的影响,通过参数优化减少了 $\text{NO}_x$ 、HC、PM排放。在优化燃烧室构型方面,SENECAL等<sup>[40,60]</sup>使用多模式遗传算法对小缸径柴油机的燃烧室进行形状优化,证明了多点喷射和EGR的应用能有效减少温室气体排放。同时,KEGL等<sup>[61]</sup>以喷雾索特平均直径(SMD)作为优化目标,调整喷油系统中的喷孔直径、喷油时机和凸轮型线,基于发动机实时工况数据进行了燃油喷射参数优化。

在改善运行方式方面,可基于船舶运行环境使用电能、优化运营和改善人为因素等辅助手段减少船舶碳排放,在港口停靠时使用清洁能源或采用海上风电供能作为辅助动力可减少化石能源

的使用。2021年天津港某智能化集装箱码头投产运营,其风力光伏发电系统年发电近1200万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ,在满足码头装卸生产电力需求的同时减少 $\text{CO}_2$ 间接排放约7000t。2024年宁波舟山港建成“绿色码头”,通过集成风电、光伏发电、储能和智能能源管理系统等,实现清洁能源在港口码头的高效利用和优化配置,测算可实现年碳减排量约2.26万t。船舶运营优化包括信息化与智能化技术的运用、港口管理优化、岸电设施推广及绿色政策的制定等多维策略,旨在综合提升船舶能效并使得碳排放最小化。据报道,长江经济带覆盖的11个省(市)船只在2023年累计使用岸电总量为1.2亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。这一举措节省燃油2.76万t,减少 $\text{CO}_2$ 排放8.76万t。

## 2.2 清洁能源替代技术

清洁能源替代技术是使用LNG、生物柴油、绿色甲醇、绿氢、绿氨等清洁低碳能源代替传统化石燃料<sup>[15,17,62-69]</sup>,实现船舶 $\text{CO}_2$ 减排的技术,不同的清洁能源替代技术及减排潜力见表3。

表3 使用不同类型替代能源的潜在减排量

Table 3 Potential emission reductions using different types of alternative energy

项目	LNG	甲醇	生物柴油	氢	氨	电动船	太阳能和风能
	液化天然气	甲醇混合其他燃料	植物油/生物柴油混合	内燃机掺烧或燃料电池	内燃机掺烧或燃料电池	使用电能作为动力来源	因地制宜取用,可再生能源
减排潜力	5.0%~30.0% <sup>[15,62]</sup> , 10.0% <sup>[17]</sup>	70%~80% <sup>[15,63]</sup>	9.0%~38.0% <sup>[49,64]</sup>	70% <sup>[65]</sup> , 0~100% <sup>[66]</sup>	0~100% <sup>[66]</sup> , 75% <sup>[65]</sup>	20%~100% <sup>[66]</sup>	0.86%~4.88% <sup>[67-68]</sup> , 0.2%~12.0% <sup>[15,69]</sup>
优点	价格低廉,基于现有设施技术改进	常温下呈液态	兼容现有发动机	可实现燃料电池零排放	可在常温加压下储存	清洁,环境效益好	清洁,环境效益好,可再生
不足	储存困难,减排潜力有限	需防止泄漏,热值较低	成本高,自然界植物油总量不足	燃料价格高,储存温度低	氨泄漏危害环境,且需使用氢气引燃	多用于小型船	受天气和现有能源转化水平限制,不稳定
实船图							

LNG作为航运业应用最广的清洁能源,其技术路线主要包含燃料供应系统改造与双燃料发动机复合掺烧技术研发,具有5%~30%的减排潜力。船用LNG燃料舱、供气系统和发动机等技术已较为成熟,当前研究聚焦于甲烷逃逸控制、动力性能提升及高锰钢材料成本优化<sup>[70]</sup>。气体组分是影响放热量的关键因素。丙烷混合气体的放热率高于乙烷和甲烷,使用丙烷混合气体的发动机性能较好。ULISHNEY等<sup>[71]</sup>揭示了气体组分对天

然气/柴油双燃料发动机负荷燃烧特性的影响机制。在天然气/柴油双燃料发动机中,提高天然气中的丙烷含量可实现 $\text{CO}_2$ 排放量下降6.8%。邓斌静等<sup>[72]</sup>在一台六缸天然气/柴油双燃料发动机上研究了喷射参数对发动机性能和碳排放的影响。结果表明提高柴油喷射压力或提前柴油喷射正时,可显著提高发动机热效率,同时降低 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 和颗粒物排放;适当提前柴油喷射正时,可延长柴油滞燃期,增加预混燃烧度,促进天然气完全燃

烧, 进而提高发动机热效率, 但过早的喷射正时将导致热效率下降。

船用甲醇/柴油双燃料发动机采用缸内直喷柴油引燃气道, 有助于减少  $\text{CO}_2$  排放。AGARWAL 等<sup>[73]</sup> 在改装的动力系统上进行甲醇掺烧, 在低、中、高柴油替换率下改变柴油的燃油喷射参数(喷油时间和压力), 以获得不同发动机负荷下最佳燃油喷射策略。在 9 kW 发电负载下, 甲醇替换 30% 柴油将大幅提高热效率, 相对于相同负载的柴油供油模式可有效减少  $\text{CO}_2$  排放, 而替换 80% 柴油时热效率略有降低。黄粉莲等<sup>[74-75]</sup> 在一台进气管改造的甲醇/柴油双燃料发动机上, 研究了额定转速下不同负荷甲醇替代率对发动机有效等量燃油消耗率和有效热效率的影响规律。结果表明在中到低负荷下, 有效等量燃油消耗率随甲醇替代比例的提高在初期下降后小幅回升, 而有效热效率则是先增加随后略有减少; 在中到高负荷运行条件下, 甲醇替代比例的增加导致有效等量燃油消耗率及排气温度降低, 并促进有效热效率的提升, 进而削减  $\text{CO}_2$  排放。工程化突破方面, 浙江大学与浙江浙能迈领环境科技股份有限公司合作的绿色甲醇燃料工程化研究, 完成了国内首台散货船甲醇-柴油双燃料主机改造(图 3), 开发了远洋大型船舶发动机甲醇-柴油双直喷高效燃烧技术, 解决了柴油机改甲醇双燃料机的甲醇腐蚀性、低温启动、热值较低、溶胀等技术难点。相比传统气道喷射双燃料机型, 甲醇替代率可达 70% 以上, 并于 2024 年 7 月完成船舶系泊试验主机性能现场测试。

生物柴油作为可再生燃料, 具有十六烷值高, 不含硫和芳香族化合物等特性, 其燃烧特性与柴油类似, 仅需对原柴油机进行较小程度改造即可实现燃料替代, 减排潜力可达 70%~80%。生物燃料油可分为氢化植物油(HVO)和脂肪酸甲酯



图 3 浙能迈领 2 600 t 级甲醇动力船舶

Fig. 3 ZEME 2 600-ton class methanol-powered ship

(FAME), 由于 HVO 成分和理化特性与船用柴油基本相同, 可在现有发动机、燃油供应系统上直接使用; 而 FAME 在应用时需对发动机、燃料供应系统、燃料舱进行适当调整或改造<sup>[76]</sup>。ZAPATA MINA 等<sup>[77]</sup> 研究了在压燃式发动机中使用不同比例的棕榈油甘油酯与柴油混合物作为燃料, 并评估了不同混合比例下的燃烧和排放表现。研究发现, 随着生物柴油在燃料中的比例提高,  $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$  的排放显著减少。船用生物柴油在全球航运领域已逐渐普及, 2023 年 2 月, 达飞轮船有限公司公布其 32 艘船已切换使用 30% 生物燃料(B30)混合物; 2023 年 8 月, 中燃远邦石油化工有限公司向川崎汽船株式会社提供了 ISCC-EU 认证的 B24 生物燃料油; 2024 年 6 月, 中石化中海船舶燃料供应有限公司在广州为中远海运散货的船舶充填了同规格的 B24 生物燃料油, 实现了国内生物燃料油的实船应用。

基于可再生能源制取的氢/氨可实现  $\text{CO}_2$  净零排放。与氢相比, 氨具有更高的体积能量密度和辛烷值; 因凝固点低( $-77.3\text{ }^\circ\text{C}$ )适合作为极端寒冷条件下的燃料。然而, 由于氨着火界限窄, 点火困难, 不易实现高效燃烧<sup>[78]</sup>。MØRCH 等<sup>[79]</sup> 实验表明, 纯氨燃料运行过程中存在严重熄火倾向, 在发动机转速 2 000 r/min 下, 采用纯液氨燃料作为动力源的发动机需要使用甲醇燃烧预热, 并逐渐喷射液氨才能点燃。实验中仅在压缩比 15 : 1 且空气当量比 0.88~1.15 的范围内点燃成功, 逐步加大氨燃料占比最终实现了纯氨发动机运行。YOUSEFI 等<sup>[80-81]</sup> 在四冲程 CI 发动机中采用柴油缸内直喷和氨气进气道喷射的方式, 研究了氨替代率和柴油喷射正时对发动机性能的影响。结果表明, 发动机在氨替代率为 40% 及最佳喷射正时下的热效率与纯柴油模式相近, 且  $\text{CO}_2$  排放显著减少。ZHU 等<sup>[82]</sup> 通过数值模拟研究大型低速二冲程发动机进行低压喷射氨/柴油燃烧的减碳潜力, 研究结果表明, 当氨替代率不超过 40% 时,  $\text{CO}_2$  的排放量随着氨替代率的增加而直线下降。由于氢/氨燃料安全储存困难和能量密度的局限性, 目前该燃料仅适用于小功率、短航程船舶。劳埃德集团与大连船舶重工集团有限公司于 2021 年联合推出了氨动力 7 100 TEU 集装箱船建造计划, 大禹航运有限公司推出的氨燃料 23 000 TEU 集装箱船设计方案, 以及韩国船级社发布的氨燃料船报告, 共同揭示了氨作为清洁能源在航运业

中的潜力和应用前景<sup>[83]</sup>。

电动推进技术相较于传统燃油动力系统展现出零排放、低噪声、高效能等优点,技术发展呈现“示范应用-商业推广”的路径。2015年,全球第一艘纯电力驱动的客运渡船 MF Ampere 正式启用。该船的主动动力源电池容量达 1.86 MW·h, 10 min 快充可支撑搭载 360 名乘客穿越松恩峡湾,标志着船舶电动化的实质性突破。在邮轮方面,海达路德运营的 MS Roald Amundsen 号配置了大型电池组,相较于同类邮轮可减少 20% 以上的碳排放。2019 年 11 月,美国长滩和洛杉矶港部署的 Carolyn Dorothy 号全电力拖船,验证了港口作业船舶的电动化可行性。在欧洲,电动技术已广泛应用于渡轮、游艇及邮轮,而适合于固定航线和短航程的近海小型船只也在逐步实现电动化。由雅苒国际集团与康士伯海事联合开发的纯电动货船 Yara Birkeland 号,船长约 80 m,宽约 15 m,电池容量为 7 MW·h,载箱量为 103 TEU,最大航速可达 13 节,于 2021 年完成首航验证,展现了电动船舶在现代货运中的广泛应用潜力。我国新能源电池动力系统已形成“客船主导、货船突破”的发展格局。在客船领域,截至 2024 年 6 月,我国已建及在建的纯电动动力船舶数量已超过 440 艘,典型代表如全电动观光游轮“长江三峡 1 号”配备了 7 500 kW·h 的高容量电池,该游轮已作为一艘实现“零污染、零排放”的纯电动船投入运营。其零排放运营模式为内河绿色货运提供示范。2017 年 11 月,2 000 t 级的纯电动散货船在广州顺利进行首航。2022 年 2 月,电动货船“船联 1 号”在南京首航,并将电动货船的载重能力提升至 3 000 t。

基于可再生能源的船舶动力系统革新已成为航运业低碳转型的重要路径。典型案例包括东京大学于 2009 年牵头启动的“风之挑战项目”,研究了由轻质复合材料制成的大型刚性帆在货船上层甲板集成,结果显示 30% 的推进能量可从风能中获得。在 2010 年 3 月,瑞士推出了一艘完全由太阳能驱动的双体船,名为“星球太阳能”号,其 14 节航速与 50 人载客量验证了太阳能船舶的实用价值。此外,该船长度为 31 m,宽度为 15 m,排水量达 60 t,船体顶部覆盖 500 m<sup>2</sup> 高效光伏阵列。在缺乏阳光的情况下,该船仍可依靠储存的能量继续航行 3 d。尽管风能与太阳能在船舶应用领域具有环境友好特性,但由于其在时空分布不均,通常只能作为辅助动力来源,或依赖高效储能体

系。因此,当前风能和太阳能的碳减排贡献率普遍低于 50%。未来需进一步构建多能互补体系以实现航运业 2050 年净零排放目标<sup>[5]</sup>。

### 2.3 尾气碳捕集技术

船舶尾气碳捕集技术通过吸收/吸附实现 CO<sub>2</sub> 分离,按原理可分为化学吸收/吸附法、物理吸收/吸附法(变温或变压吸附)、膜分离法(图 4)。物理吸收/吸附法适用于 CO<sub>2</sub> 分压较高的场合,具有能效高、操作简便的优势。膜分离法设备体积小、结构紧凑,但烟气中颗粒物容易造成膜堵塞,从而导致 CO<sub>2</sub> 捕集效率降低。化学吸收法是目前应用最广泛的碳捕集技术之一,凭借其相对可靠的技术、较强的处理能力和长期的工业运行经验而成为化工、燃煤发电等行业 CO<sub>2</sub> 减排的主流技术方案,用于船舶尾气脱碳可行性高。

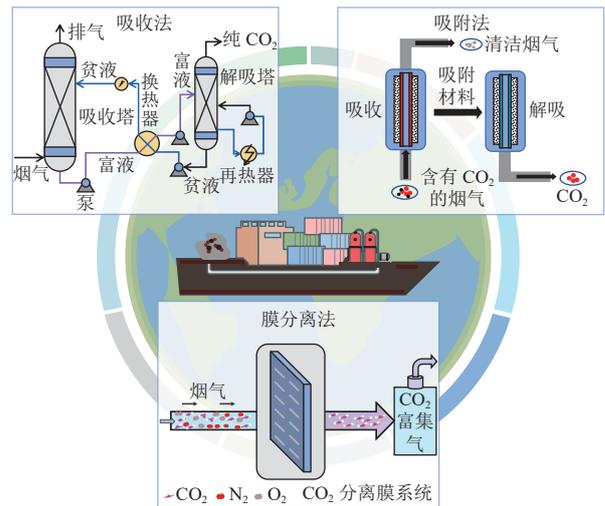


图 4 船舶尾气碳捕集技术

Fig. 4 Ship exhaust carbon capture technology

船舶尾气碳捕集系统受限于机舱空间布局与航行安全规范,需满足小塔径、低塔高、高气速( $\geq 1.5$  m/s)的紧凑型结构特征。此外,船舶尾气 CO<sub>2</sub> 分压低(3~5 kPa),负荷波动大,在吸收塔紧凑化设计要求和适应船舶低分压工况吸收剂筛选等方面与化工、燃煤发电碳捕集技术差异显著。当前技术研发聚焦于三大核心方向:①开发适用于船舶发动机尾气且海水适应性强的高性能 CO<sub>2</sub> 吸收剂;②开展基于宽负荷波动自适应的高效低能耗船舶尾气碳捕集工艺优化研究;③推进远洋船、沿海船、内河船示范验证与标准建设。目前国内外船企代表性研究结果见表 4。例如中国船舶集团有限公司第七一一研究所(以下简称“中船七一

一所”) 在 14 000 TEU 大型集装箱船上搭建了船舶碳捕集系统, 包含 CO<sub>2</sub> 吸收、分离、压缩、液化及存储等流程, 并成功实现全流程闭环, 预计每年碳减排 4.4 万 t。然而, 现有船舶碳捕集技术仍面

临捕集效率较低、能耗偏高以及在复杂航道摆动工况下难以实现高效稳定脱碳等瓶颈。为了克服这些挑战, 亟须开发高性能吸收剂与工艺优化来推动技术的进一步突破。

表 4 船舶尾气碳捕集系统研究现状

Table 4 Current research status of ship exhaust carbon capture systems

国家	年份	单位	项目名称	捕集效率	功率/气量
挪威	2010	挪威船级社	Eurostar	65.0%	—
日本	2021	川崎汽船和三菱重工	Corona Utility	85.7%	8 500 kW
荷兰	2022	荷兰海事技术公司	Filtree	40.0%	—
韩国	2022	大宇造船	—	—	174 000 m <sup>3</sup>
挪威	2023	Solvang ASA	Clipper Eos	—	21 000 m <sup>3</sup>
中国	2023	中船七一一所	14 000 TEU OCCS	80.0%	200 000 m <sup>3</sup>
中国	2024	浙江浙能迈领环境科技有限公司和白马湖实验室、浙江大学	—	90.0%	1 200 kW

化学吸收剂是化学吸收法碳捕集技术的核心。常用吸收剂类型包括有机胺、氨水、氨基酸盐、无机盐及离子液体等。尽管有机胺等吸收剂在燃煤、天然气、化工合成等工业碳捕集中已实现商业应用, 但船舶尾气因烟气流速高、CO<sub>2</sub> 浓度低, 要求吸收剂具备快速传质动力学特性, 因此具有较高吸收速率的吸收剂成为船舶 CO<sub>2</sub> 捕集吸收剂的潜在选择。值得注意的是, 船舶空间限制引发的吸收塔小型化与高背压工况, 使得高黏度吸收剂面临流动分布不均和雾沫夹带率上升的工程难题, 亟待开发低黏度功能化复合型吸收剂。优化碳捕集系统工艺流程能强化吸收、降低能耗。在吸收端, 通过级间冷却与吸收剂再循环等工艺能提升低压 CO<sub>2</sub> 吸收效率, 提高富液负荷; 在解吸端, 通过富液分流、闪蒸压缩与多压力解吸等工艺可大幅降低解吸能耗<sup>[84]</sup>。针对船舶尾气特性, 余热驱动吸收剂富液再生技术展现显著优势, 若换热器设计得当, 船舶尾气余热利用率可达 65% 以上<sup>[85]</sup>。

在性能评估体系方面, CO<sub>2</sub> 吸收速率和吸收容量是评估船舶碳捕集吸收剂性能的关键指标。CHEN 等<sup>[86]</sup> 通过湿壁塔对哌嗪(PZ)及其衍生物的液相传质系数和气液平衡进行了评估, 通过将入口 CO<sub>2</sub> 浓度控制在 5%~10%, 且吸收剂的平衡分压在 5 kPa 以内来确保符合船舶尾气工况。研究发现, 氨乙基哌嗪(AEP)在较低负载和低平衡分压条件下表现出最高的吸收速率, 可达  $4.72 \times 10^{-5} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ , 而随着负载的增加, 吸收速率迅速下降, 而 PZ 在平衡分压为 5.44 kPa 时吸收速率仍可达  $4.3 \times 10^{-7} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 。在吸收容量的

研究方面, SINGH 等<sup>[87]</sup> 在研究中探讨了低 CO<sub>2</sub> 分压(10 kPa)条件下不同种类和浓度有机胺的吸收容量, 如图 5 所示。结果表明多元胺的吸收容量最高, 其中二乙烯三胺(DETA)的负载能力超过了 1.4 mol CO<sub>2</sub>/mol 胺。当前, 针对船舶尾气碳捕集吸收剂本身性能变化的实验研究相对较少, 研究多聚焦于采用化工过程模拟软件对碳捕集系统进行建模, 船舶碳捕集吸收剂的相关研究汇总于表 5。现有船舶碳捕集吸收剂多采用常规配方组合, 碳捕集成本仍处于较高水平。因此, 开发适用于船舶的新型高效、低能耗复合吸收剂具有重要意义。

在紧凑型船舶尾气碳捕集系统工程化验证研究方面, 中船七一一所自主研发 OCCS 系统(图 6(a)), 于上海洋山港完成船对船液态 CO<sub>2</sub> 接卸作业, 形成“CO<sub>2</sub> 捕集-存储-船对船接卸-转运-再利用”完整闭环。该系统 CO<sub>2</sub> 综合捕集率超 80%、纯度达 99.9%。此外, 浙江浙能迈领环境科技股份有限公司和白马湖实验室、浙江大学等合作搭建了 1 200 kW 船舶尾气碳捕集系统中试平台(图 6(b)), 研发了高性能船用复合吸收剂耦合尾气余热高效利用的低能耗船舶尾气碳捕集技术, 50% 负荷下系统稳态 CO<sub>2</sub> 捕集效率超 90%, 再生能耗可降至 3.0 GJ/t CO<sub>2</sub> 以下。相关研究为实现船舶尾气碳捕集系统的能效提升与航运脱碳减排目标提供了重要支撑。

## 2.4 全流程低碳技术耦合工艺

提高船舶碳减排技术对多船型及复杂航道场景的适应能力, 构建融合船舶节能降碳、清洁燃料

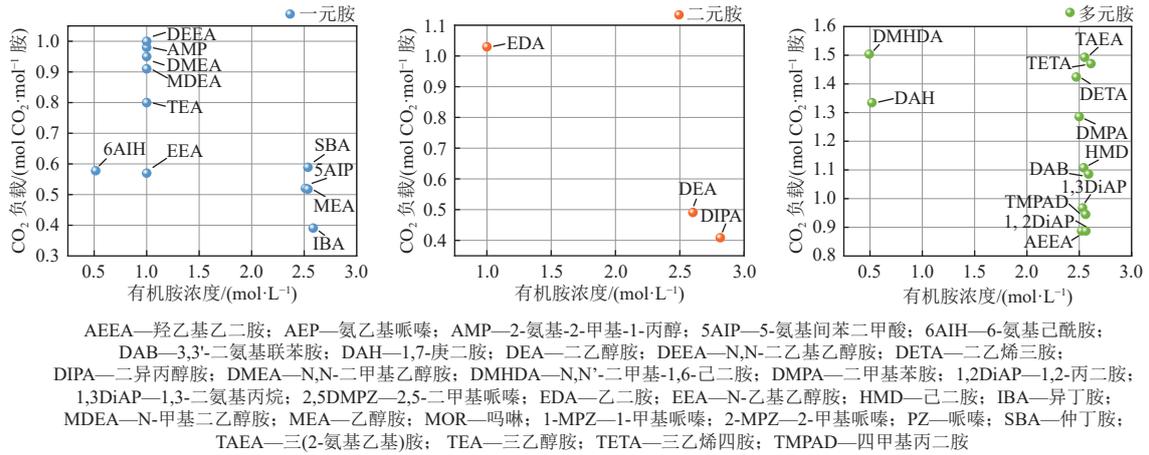


图 5 不同有机胺在 10 kPa 分压下的吸收容量<sup>[87-96]</sup>

Fig. 5 Absorption capacities of different organic amines at a partial pressure of 10 kPa<sup>[87-96]</sup>

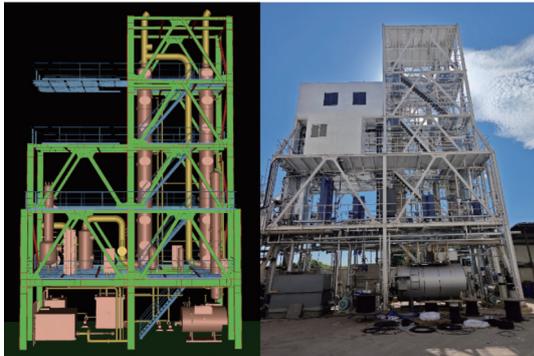
表 5 部分船舶碳捕集吸收剂研究<sup>[97-103]</sup>

Table 5 Research on carbon capture absorbents for selected ships<sup>[97-103]</sup>

船舶类型	吸收剂	碳捕集效率	碳捕集成本	文献
17 MW 柴油机船	MEA	73%; 90%	77.50 €/t CO <sub>2</sub> ; 163.1 €/t CO <sub>2</sub>	[97]
1.28 MW 内陆船	30% MEA/30% PZ	90%	120 €/t CO <sub>2</sub>	[98]
1 MW 内陆船	MEA	75%	301 €/t CO <sub>2</sub>	[99]
18.2 MW 货轮	22% MDEA+8% PZ	约70%	—	[100]
3 MW 柴油机船	MEA+PZ/MDEA+PZ	90%	—	[101]
10.3 MW LNG 船	NH <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O	60%	117 \$/t CO <sub>2</sub>	[102]
5.675 MW LNG 船	MEA	50%	—	[103]



(a) 3 570 kW 船舶尾气碳捕集系统中试平台<sup>[104]</sup>



(b) 1 200 kW 船舶尾气碳捕集系统中试平台

图 6 船舶尾气碳捕集系统中试平台

Fig. 6 Onboard carbon capture pilot platform

替代与尾气碳捕集的协同减排技术体系,是加速达成航运减排目标的关键。因此,未来船舶低碳化转型需依托“节能增效-源头降碳-末端治理”全流程低碳技术耦合工艺(图 7)。通过流体动力学优化-清洁燃料掺烧-传质反应强化的技术链耦合,实现 CO<sub>2</sub> 的净零排放;通过热力学循环、余热梯级利用等能量流耦合,实现全船能量利用率提升 25% 以上,CO<sub>2</sub> 捕集能耗降低 60% 以上。依托绿色甲醇动力船舶开展集成化示范工程,最终形成覆盖“动力系统-排放控制-能源管理”的船舶低碳解决方案,为全球航运业提供全流程碳减排技术范式。

### 3 结论及展望

船舶低碳技术发展以 IMO 2050 减排目标为导向,通过建立“政策驱动-技术创新-产业协同”三维框架,聚焦船体优化、动力变革、绿色燃料开发利用、碳捕集与储存与供应链体系完善等核心

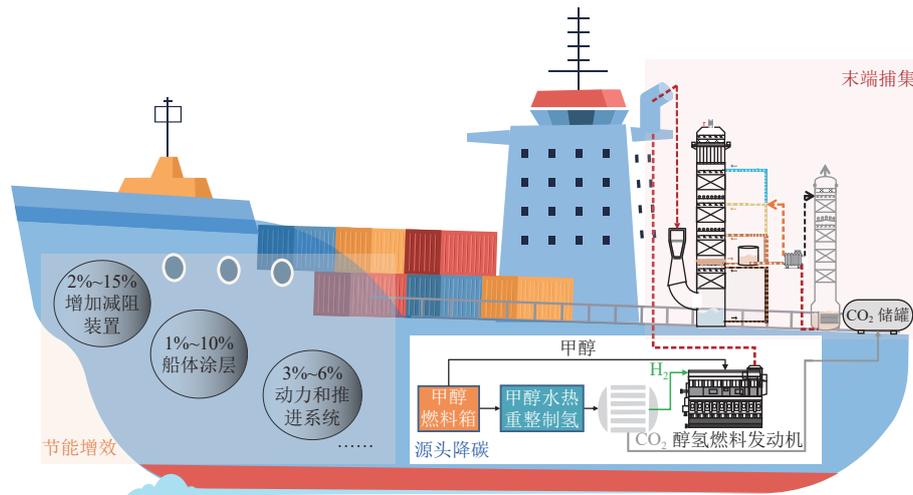


图7 船舶全流程低碳技术耦合

Fig. 7 Coupling of low-carbon technologies in ships

技术,推动航运业深度脱碳。这些技术将共同推动船舶工业向更加绿色、低碳、可持续发展的方向。本文从国内外船舶低碳政策、节能降碳、清洁能源替代和尾气碳捕集技术等角度讨论了船舶航运碳减排在相关政策下的研究进展,分析了不同碳减排途径对应的低碳方法及其适用的低碳工艺研究应用方向。多种减排方式耦合的船舶低碳工艺已在促进国际贸易可持续发展、减缓温室效应、预防海洋酸化等方面展现出独特价值,有望构建“能效提升-能源替代-尾气捕碳”的多技术耦合体系,为国际航运业碳中和提供系统性解决方案。

船舶高效低成本、低碳技术发展方向主要包括以下几个方面:

(1)制定适合不同区域和船型的技术路线。针对内河、近海、远洋等不同区域,结合集装箱船、散货船、油船等不同类型船舶,构建涵盖不同船型-航线-环境的碳减排技术路线体系。同时,开发数值模拟与工程应用相结合的研究方法,进一步推进核心材料、关键技术、成套装备在新型船舶低碳技术的适用性研究。

(2)研发面向船舶空间受限的关键技术与装备。针对节能降碳、清洁能源替代和尾气碳捕集等船舶低碳技术,改良碳减排材料与装备,优化绿色燃料制取与高效掺烧,设计紧凑型尾气碳捕集塔并强化塔内气液传质,耦合余热利用降低运行能耗,形成从源头到末端的船舶碳减排解决方案。

(3)推动紧凑、高效、低成本的船舶低碳技术装备示范。加快船用新能源清洁绿色生产、储

运、加注等布局规划和建设,完善绿色能源从产地到沿海沿江港口运输体系;积极推动岸基内河船用绿色燃料加注设施建设,加速推进充换电设施的集约化建设,发展完备的内河至近海支持设施网络。构建因地制宜、因船制宜、因标准制宜的碳减排及快速检测技术体系,推动包括节能增效、燃料替代、尾气碳捕集的一批船舶碳减排新技术装备的示范应用。

(4)规划形成船舶全流程低碳技术指南和政策支撑文件。针对远洋船、近洋船、沿海船和内河船等复杂航道环境,构建“分类适配-全链管控-国际互认”的低碳技术标准体系。推进船舶工业碳排放核算、碳足迹核算、船舶设备能效评价等标准的修订,建立绿色低碳技术团体标准的采信机制。加强船舶工业绿色低碳技术标准的实施监督,健全标准质量评估和维护更新机制。同时,积极推动各国船舶采用统一的碳减排领域相关标准,共同推动全球航运业绿色低碳转型。

#### 参考文献 (References):

- [1] Simpson Spence & Young. SSS Weekly Technical Update[EB/OL]. [2024-12-02]. <https://www.ssonline.com>.
- [2] CARIU P, LINDSTAD E, JIA Haiying. The impact of an EU maritime emissions trading system on oil trades[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 99: 102992.
- [3] WANG Yang, CAO Qun, LIU Long, et al. A review of low and zero carbon fuel technologies: Achieving ship carbon reduction targets[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 54: 102762.
- [4] 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 Lijian, CAO Lin, Wei Zhiwei. The application prospects and future outlook of shipboard carbon capture technology[J]. *China Ship Inspection*, 2020(11): 66–71.
- [5] WANG Xiaotong, LIU Huan, LYU Zhaofeng, et al. Trade-linked shipping CO<sub>2</sub> emissions[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11: 945–951.
- [6] International Maritime Organization. IMO Summary of Internal Oversight and Ethics Activities[EB/OL]. [2024-12-01]. <https://www.imo.org>.
- [7] 中国船级社. 航运低碳发展展望 [N]. 2023. China Classification Society. Shipping low-carbon development prospects[N]. 2023.
- [8] DONG Junjie, ZENG Jia, YANG Yanbin, et al. A review of law and policy on decarbonization of shipping[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 1076352.
- [9] 于莹, 刘大海. 日本海洋科技发展战略布局分析与启示——基于《联合国“海洋十年”日本倡议》[J]. *世界科技研究与发展*, 2023, 45(1): 14–25.
- YU Ying, LIU Dahai. Japanese marine science and technology development strategic analysis and its implication for China based on Japan's initiatives for UN decade of ocean science[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2023, 45(1): 14–25.
- [10] HESSEVIK A. Green shipping networks as drivers of decarbonization in offshore shipping companies[J]. *Maritime Transport Research*, 2022, 3: 100053.
- [11] FAM A, FAM S. Review of the US 2050 long term strategy to reach net zero carbon emissions[J]. *Energy Reports*, 2024, 12: 845–860.
- [12] 周旭, 王楠. 基于“Fit for 55”草案的大型集装箱船营运碳排放分析 [J]. *船舶*, 2023, 34(4): 62–68.
- ZHOU Xu, WANG Nan. Analysis of carbon emissions for large container ship operations based on "fit for 55" draft[J]. *Ship & Boat*, 2023, 34(4): 62–68.
- [13] 王智强, 曹哲, 张程, 等. 上海市推动国际航运燃料绿色转型政策研究 [J]. *上海节能*, 2025(1): 8–15.
- WANG Zhiqiang, CAO Zhe, ZHANG Cheng, et al. Research on policies to promote green transformation of international shipping fuel in Shanghai[J]. *Shanghai Energy Saving*, 2025(1): 8–15.
- [14] HALIM R, KIRSTEIN L, MERK O, et al. Decarbonization pathways for international maritime transport: A model-based policy impact assessment[J]. *Sustainability*, 2018, 10(7): 2243.
- [15] BOUMAN E A, LINDSTAD E, RIALLAND A I, et al. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping—A review[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 52: 408–421.
- [16] ANDRIC J, KITAROVIC S, RADOLOVIC V, et al. Structural analysis and design of a car carrier with composite sandwich deck panels[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2019, 14(sup1): 171–186.
- [17] GILBERT P, BOWS LARKIN A, MANDER S, et al. Technologies for the high seas: Meeting the climate challenge[J]. *Carbon Management*, 2014, 5(4): 447–461.
- [18] LINDSTAD H, ASBJØRNSLETT B E, STRØMMAN A H. The importance of economies of scale for reductions in greenhouse gas emissions from shipping[J]. *Energy Policy*, 2012, 46: 386–398.
- [19] LINDSTAD H, JULLUMSTRØ E, SANDAAS I. Reductions in cost and greenhouse gas emissions with new bulk ship designs enabled by the Panama Canal expansion[J]. *Energy Policy*, 2013, 59: 341–349.
- [20] LINDSTAD H, SANDAAS I, STEEN S. Assessment of profit, cost, and emissions for slender bulk vessel designs[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 29: 32–39.
- [21] YU J W, LEE C M, LEE I, et al. Bow hull-form optimization in waves of a 66 000 DWT bulk carrier[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2017, 9(5): 499–508.
- [22] LEE C M, YU J W, CHOI J E, et al. Effect of bow hull forms on the resistance performance in calm water and waves for 66k DWT bulk carrier[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2019, 11(2): 723–735.
- [23] JANG J, CHOI S H, AHN S M, et al. Experimental investigation of frictional resistance reduction with air layer on the hull bottom of a ship[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2014, 6(2): 363–379.
- [24] MÄKI HARJU S A, PERLIN M, CECCIO S L. On the energy economics of air lubrication drag reduction[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2012, 4(4): 412–422.
- [25] BUTTERWORTH J, ATLAR M, SHI Weichao. Experimental analysis of an air cavity concept applied on a ship hull to improve the hull resistance[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 110: 2–10.
- [26] GHASSEMI H. Hydrodynamic performance of coaxial contra-rotating propeller (CCRP) for large ships[J]. *Polish Maritime Research*, 2009, 16(1): 22–28.
- [27] SONG Kewei, GUO Chunyu, GONG Jie, et al. Influence of interceptors, stern flaps, and their combinations on the hydrodynamic performance of a deep-vee ship[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 170: 306–320.
- [28] SHIN H J, LEE J S, LEE K H, et al. Numerical and experimental investigation of conventional and un-conventional preswirl duct for VLCC[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2013, 5(3): 414–430.
- [29] MIZZI K, DEMIREL Y K, BANKS C, et al. Design optimisation of Propeller Boss Cap Fins for enhanced propeller performance[J]. *Applied Ocean Research*, 2017, 62: 210–222.
- [30] CHANG C C, CHANG C H. Energy conservation for international dry bulk carriers via vessel speed reduction[J]. *Energy Policy*, 2013, 59: 710–715.
- [31] LINDSTAD H, ASBJØRNSLETT B E, STRØMMAN A H. Reductions in greenhouse gas emissions and cost by ship-

- ping at lower speeds[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(6): 3456–3464.
- [32] LINDSTAD H, ASBJØRNSLETT B E, JULLUMSTRØ E. Assessment of profit, cost and emissions by varying speed as a function of sea conditions and freight market[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2013, 19: 5–12.
- [33] CORBETT J J, WANG Haifeng, WINEBRAKE J J. The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2009, 14(8): 593–598.
- [34] CHANG C C, WANG C M. Evaluating the effects of green port policy: Case study of Kaohsiung harbor in Taiwan[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2012, 17(3): 185–189.
- [35] SCIBERRAS E A, ZAHAWI B, ATKINSON D J, et al. Cold ironing and onshore generation for airborne emission reductions in ports[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2016, 230(1): 67–82.
- [36] MONDEJAR M E, ANDREASEN J G, PIEROBON L, et al. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 91: 126–151.
- [37] SOFFIATO M, FRANGOPOULOS C A, MANENTE G, et al. Design optimization of ORC systems for waste heat recovery on board a LNG carrier[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 92: 523–534.
- [38] BALCOMBE P, BRIERLEY J, LEWIS C, et al. How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 182: 72–88.
- [39] KALIKATZARAKIS M, FRANGOPOULOS C A. Thermo-economic optimization of synthesis, design and operation of a marine organic Rankine cycle system[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2017, 231(1): 137–152.
- [40] BALDI F, LARSEN U, GABRIELII C. Comparison of different procedures for the optimisation of a combined diesel engine and organic Rankine cycle system based on ship operational profile[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 110: 85–93.
- [41] BALDI F, GABRIELII C. A feasibility analysis of waste heat recovery systems for marine applications[J]. *Energy*, 2015, 80: 654–665.
- [42] CHOI B C, KIM Y M. Thermodynamic analysis of a dual loop heat recovery system with trilateral cycle applied to exhaust gases of internal combustion engine for propulsion of the 6800 TEU container ship[J]. *Energy*, 2013, 58: 404–416.
- [43] KANELLOS F D. Optimal power management with GHG emissions limitation in all-electric ship power systems comprising energy storage systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(1): 330–339.
- [44] WALLER L, MESIKÄMMEN E, BURKETT B. Rural radio and the everyday politics of settlement on Indigenous land[J]. *Media, Culture & Society*, 2020, 42(6): 805–822.
- [45] GUCWA M, SCHÄFER A. The impact of scale on energy intensity in freight transportation[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2013, 23: 41–49.
- [46] CARRAL L, FERNÁNDEZ GARRIDO C, VEGA A, et al. Importance of the Panama canal in the reduction of CO<sub>2</sub> emissions from maritime transport[J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2020, 14(11): 819–832.
- [47] SCHØYEN H, BRÅTHEN S. The northern sea route versus the Suez canal: Cases from bulk shipping[J]. *Journal of Transport Geography*, 2011, 19(4): 977–983.
- [48] WAN Zheng, GE Jiawei, CHEN Jihong. Energy-saving potential and an economic feasibility analysis for an Arctic route between Shanghai and Rotterdam: Case study from China's largest container sea freight operator[J]. *Sustainability*, 2018, 10(4): 921.
- [49] EIDE M S, CHRYSSAKIS C, ENDRESEN Ø. CO<sub>2</sub> abatement potential towards 2050 for shipping, including alternative fuels[J]. *Carbon Management*, 2013, 4(3): 275–289.
- [50] JENSEN S, LÜTZEN M, MIKKELSEN L L, et al. Energy-efficient operational training in a ship bridge simulator[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 171: 175–183.
- [51] KUMAGAI I, TAKAHASHI Y, MURAI Y. Power-saving device for air bubble generation using a hydrofoil to reduce ship drag: Theory, experiments, and application to ships[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 95: 183–194.
- [52] YANUAR, WASKITO K T, RAHMAT B A, et al. Micro-Bubble drag reduction with triangle bow and stern configuration using porous media on self propelled barge model[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 105: 012094.
- [53] GAMAL M, KOTB M, NAGUIB A, et al. Numerical investigations of micro bubble drag reduction effect for container ships[J]. *Marine Systems & Ocean Technology*, 2021, 16(3): 199–212.
- [54] SILBERSCHMIDT N, TASKER D, PAPPAS T. Silverstream® System – Air lubrication performance verification and design development[J]. Noah Silberschmidt, 2016, 16: 1–12.
- [55] 许正杰, 林丰财. 325 000 DWT 矿砂船空气润滑系统设计与安装[J]. *广东造船*, 2022, 41(2): 54–57.  
XU Zhengjie, LIN Fengcai. Design and installation of 325 000 DWT ore ship air lubrication system[J]. *Guangdong Shipbuilding*, 2022, 41(2): 54–57.
- [56] AHMED A M Y, GOSMAN A D. Measurement and multi-dimensional calculation of flow in an axisymmetric symmetric port/valve assembly[J]. *SAE transactions*, 1987, 87: 853–873.
- [57] GODRIE P, ZELLAT M. Simulation of flow field gener-

- ated by intake port-valve-cylinder configurations-comparison with measurements and applications[C]//SAE Technical Paper Series. SAE International, 1994: 803-823.
- [58] GERPEN J H V. The effect of air swirl and fuel injection system parameters on diesel combustion[D]. Wisconsin: The University of Wisconsin-Madison, 1984: 65-70.
- [59] LEE T, REITZ R D. Response surface method optimization of a high-speed direct-injection diesel engine equipped with a common rail injection system[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2003, 125(2): 541-546.
- [60] SENECA P K, REITZ R D. Simultaneous reduction of engine emissions and fuel consumption using genetic algorithms and multi-dimensional spray and combustion modeling[C]//SAE Technical Paper Series. SAE International, 2000: 1378-1390.
- [61] KEGL B. Injection system design optimization by considering fuel spray characteristics[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2004, 126(4): 703-710.
- [62] LINDSTAD E, ESKELAND G S, RIALLAND A, et al. Decarbonizing maritime transport: The importance of engine technology and regulations for LNG to serve as a transition fuel[J]. *Sustainability*, 2020, 12(21): 8793.
- [63] WANG Bei, LIU Qing, WANG Lei, et al. A review of the port carbon emission sources and related emission reduction technical measures[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 320: 121000.
- [64] VLEUGEL J, BAL F. Cleaner fuels to reduce emissions of CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and PM<sub>10</sub> by container ships: A solution or a Pandora's Box[J]. *Ravage of the Planet IV*, 2015, 199: 195-206.
- [65] BICER Y, DINCER I. Clean fuel options with hydrogen for sea transportation: A life cycle approach[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(2): 1179-1193.
- [66] ISSA M, ILINCA A, MARTINI F. Ship energy efficiency and maritime sector initiatives to reduce carbon emissions[J]. *Energies*, 2022, 15(21): 7910.
- [67] WANG Kai, XUE Yu, XU Hao, et al. Joint energy consumption optimization method for wing-diesel engine-powered hybrid ships towards a more energy-efficient shipping[J]. *Energy*, 2022, 245: 123155.
- [68] YUAN Yupeng, WANG Jixiang, YAN Xinping, et al. A design and experimental investigation of a large-scale solar energy/diesel generator powered hybrid ship[J]. *Energy*, 2018, 165: 965-978.
- [69] INAL O B, CHARPENTIER J F, DENIZ C. Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 156: 111965.
- [70] 尹琳. 内河油轮 LNG 燃料动力的应用分析 [J]. *船舶*, 2020, 31(3): 28-32.
- YIN Lin. Application of LNG fuel power on inland oil tanker[J]. *Ship & Boat*, 2020, 31(3): 28-32.
- [71] ULISHNEY C J, DUMITRESCU C E. Effect of gas composition on the performance and emissions of a dual-fuel diesel-natural gas engine at low load conditions[J]. *Fuel*, 2022, 324: 124531.
- [72] 邓斌静, 郭晓宇, 陈英杰, 等. 喷射策略对双燃料发动机热效率影响的研究 [J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2022, 47(5): 1244-1252.
- DENG Binjing, GUO Xiaoyu, CHEN Yingjie, et al. Study on influence of injection strategy on dual fuel engine[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2022, 47(5): 1244-1252.
- [73] AGARWAL A K, KUMAR V, JENA A, et al. Fuel injection strategy optimisation and experimental performance and emissions evaluation of diesel displacement by port fuel injected methanol in a retrofitted mid-size genset engine prototype[J]. *Energy*, 2022, 248: 123593.
- [74] 黄粉莲, 周长登, 申立忠, 等. 过量空气系数对甲醇/柴油反应活性控制压燃发动机性能的影响 [J]. *内燃机工程*, 2022, 43(2): 30-40+48.
- HUANG Fenlian, ZHOU Changdeng, SHEN Lizhong, et al. Effects of excess air coefficients on performances of methanol/diesel reactivity controlled compression ignition engines[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2022, 43(2): 30-40+48.
- [75] 黄粉莲, 杨群, 王正江, 等. 甲醇替代率对柴油/甲醇反应活性控制压燃发动机性能的影响 [J]. *内燃机工程*, 2022, 43(1): 48-57.
- HUANG Fenlian, YANG Qun, WANG Zhengjiang, et al. Effects of methanol substitution rate on performance of diesel-methanol reactivity controlled compression ignition engines[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2022, 43(1): 48-57.
- [76] ESTEVEZ R, AGUADO DEBLAS L, LÓPEZ TENLADO F J, et al. Biodiesel is dead: Long life to advanced biofuels—A comprehensive critical review[J]. *Energies*, 2022, 15(9): 3173.
- [77] ZAPATA MINA J, RESTREPO A, TIBAQUIRÁ J E. Assessment of the exergy, emissions, and combustion characteristics of a diesel engine operating on low-glyceride biodiesel blended with diesel fuel[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 41: 102636.
- [78] GRANNELL S M, ASSANIS D N, BOHAC S V, et al. The operating features of a stoichiometric, ammonia and gasoline dual fueled spark ignition engine[C]//Energy Conversion and Resources. ASMEDE, 2006: 15-27.
- [79] MØRCH C S, BJERRE A, GØTTRUP M P, et al. Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engine: Engine performance and analysis of a proposed fuel system[J]. *Fuel*, 2011, 90(2): 854-864.
- [80] YOUSEFI A, GUO Hongsheng, DEV S, et al. A study on split diesel injection on thermal efficiency and emissions of an ammonia/diesel dual-fuel engine[J]. *Fuel*, 2022, 316: 123412.
- [81] YOUSEFI A, GUO Hongsheng, DEV S, et al. Effects of ammonia energy fraction and diesel injection timing on combustion and emissions of an ammonia/diesel dual-fuel

- engine[J]. *Fuel*, 2022, 314: 122723.
- [82] ZHU Jizhen, ZHOU Dezhi, YANG Wenming, et al. Investigation on the potential of using carbon-free ammonia in large two-stroke marine engines by dual-fuel combustion strategy[J]. *Energy*, 2023, 263: 125748.
- [83] 张运秋, 杨倩倩. 氨燃料在商船上的应用分析[J]. *船舶与海洋工程*, 2023, 39(1): 34–38.  
ZHANG Yunqiu, YANG Qianqian. Analysis of ammonia fuel applied on merchant ships[J]. *Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2023, 39(1): 34–38.
- [84] 林海周, 裴爱国, 方梦祥. 燃煤电厂烟气二氧化碳胺法捕集工艺改进研究进展[J]. *化工进展*, 2018, 37(12): 4874–4886.  
LIN Haizhou, PEI Aiguo, FANG Mengxiang. Progress of research on process modifications for amine solvent-based post combustion CO<sub>2</sub> capture from coal-fired power plant[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2018, 37(12): 4874–4886.
- [85] 罗力, 范宇航, 邹栋林, 等. 中小型船舶柴油机尾气余热回收试验[J]. *船舶工程*, 2021, 43(12): 99–105.  
LUO Li, FAN Yuhang, ZOU Donglin, et al. Experimental study of waste heat recovery of diesel exhaust gas from small and medium-sized ships[J]. *Ship Engineering*, 2021, 43(12): 99–105.
- [86] CHEN Xi, ROCHELLE G T. Aqueous piperazine derivatives for CO<sub>2</sub> capture: Accurate screening by a wetted wall column[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2011, 89(9): 1693–1710.
- [87] SINGH P, BRILMAN D W F, GROENEVELD M J. Evaluation of CO<sub>2</sub> solubility in potential aqueous amine-based solvents at low CO<sub>2</sub> partial pressure[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(1): 61–68.
- [88] ARONU U E, GONDAL S, HESSEN E T, et al. Solubility of CO<sub>2</sub> in 15, 30, 45 and 60 mass% MEA from 40 to 120 °C and model representation using the extended UNIQUAC framework[J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66(24): 6393–6406.
- [89] CONWAY W, BRUGGINK S, BEYAD Y, et al. CO<sub>2</sub> absorption into aqueous amine blended solutions containing monoethanolamine (MEA), *N,N*-dimethylethanolamine (DMEA), *N,N*-diethylethanolamine (DEEA) and 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) for post-combustion capture processes[J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 126: 446–454.
- [90] CHANG Yanchi, LERON R B, LI Menghui. Equilibrium solubility of carbon dioxide in aqueous solutions of (diethylenetriamine+piperazine)[J]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2013, 64: 106–113.
- [91] CHOWDHURY F A, YAMADA H, HIGASHI T, et al. CO<sub>2</sub> capture by tertiary amine absorbents: A performance comparison study[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(24): 8323–8331.
- [92] HARTONO A, VEVELSTAD S J, CIFTJA A, et al. Screening of strong bicarbonate forming solvents for CO<sub>2</sub> capture[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 58: 201–211.
- [93] KIM Y E, YUN S H, CHOI J, et al. Comparison of the CO<sub>2</sub> absorption characteristics of aqueous solutions of diamines: Absorption capacity, specific heat capacity, and heat of absorption[J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29: 2582–2590.
- [94] LI Jie, LIN Xiao, NING Pengge, et al. Measurement and modelling of the solubility of carbon dioxide in aqueous 1, 8-p-menthane-diamine solution[J]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2014, 71: 64–70.
- [95] NOUACER A, BELARIBI F B, MOKBEL I, et al. Solubility of carbon dioxide gas in some 2.5M tertiary amine aqueous solutions[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2014, 190: 68–73.
- [96] YAMADA H, CHOWDHURY F A, GOTO K, et al. CO<sub>2</sub> solubility and species distribution in aqueous solutions of 2-(isopropylamino)ethanol and its structural isomers[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 17: 99–105.
- [97] LUO Xiaobo, WANG Meihong. Study of solvent-based carbon capture for cargo ships through process modelling and simulation[J]. *Applied Energy*, 2017, 195: 402–413.
- [98] 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.
- [99] 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.
- [100] 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.
- [101] 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.
- [102] AWOYOMI A, PATCHIGOLLA K, ANTHONY E J. Process and economic evaluation of an onboard capture system for LNG-fueled CO<sub>2</sub> carriers[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59(15): 6951–6960.
- [103] EINBU A, PETERSEN T, MORUD J, et al. Energy assessments of onboard CO<sub>2</sub> 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.
- [104] WANG Zhonghao, LU Mingjian, DONG Shengjie, et al. Study of ship-based carbon capture optimization considering multiple evaluation factors and main engine loads[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 478: 143996.