CCS
CHINA CLASSIFICATION SOCIETY
中国船级社

船载碳捕集系统（OCCS）产业报告



白皮书

中国船级社
2026年10月

目　录

前　言 1

第一章 全球航运脱碳背景与 OCCS 发展现状 3

1.1 国际航运减排背景 3

1.2 OCCS 发展现状 8

第二章 船载碳捕集技术 30

2.1 船载碳捕集技术分类 30

2.2 OCCS 及其设备组成 38

2.3 关键技术指标 44

第三章 OCCS 在不同船型的应用 46

3.1 不同船型的应用特点 46

3.2 新造船 OCCS 设计与集成 53

3.3 营运船 OCCS 改装 60

第四章 OCCS 产业生态建设 69

4.1 全产业链及配套支撑服务体系 69

4.2 基础设施发展现状 72

第五章　OCCS 产业展望 73

5.1 技术发展趋势 73

5.2 产业生态发展趋势 74

5.3 法规与标准发展趋势 75

5.4 发展路径展望 76

结 语 78

前　言

全球气候变化是人类面临的共同挑战，推动航运业绿色低碳转型已成为国际社会的广泛共识。国际海事组织（IMO）在 2023 年海上环境保护委员会（MEPC）80 次会议上通过了修订后的《船舶温室气体减排战略》，明确了 2030 年、2040 年和 2050 年的阶段性减排目标，提出了到 2050 年左右实现国际航运温室气体净零排放的愿景。这一战略的出台，标志着全球航运业进入了深度脱碳的新阶段。

然而，航运业的脱碳之路面临诸多现实挑战。当前全球船队中，绝大多数船舶仍依赖传统化石燃料，船舶平均寿命长达 25-30 年，存量船舶的减排压力巨大。与此同时，零碳燃料如电制氨、甲醇、氢等的供应链建设尚需时日，技术成熟度和经济性仍有待提升，短期内难以大规模替代传统燃料。船载碳捕集系统（Onboard Carbon Capture System, OCCS）作为一项重要的碳减排技术，能够在不改变船舶现有动力系统的前提下，实现显著的碳排放削减，为航运界的脱碳（特别是存量船舶）提供了切实可行的解决方案。

近年来，随着航运脱碳压力的持续加大，船载碳捕集技术研发与应用加速推进，从实验室验证逐步走向实船示范应用，正迎来产业化发展的关键窗口期。作为国家船舶技术的权威机构和国际海事领域的重要参与者，中国船级社（CCS）始终致力于推动航运绿色低碳技术的创新与应用。早在 2023 年，CCS 就率先发布了《船舶应用碳捕集系统指南》和《船载碳捕集存储系统》产品检验指南，建立了较为完善的船载碳捕集技术规范体系。近年来，CCS 积极参与 IMO 相关规则制定，推动 OCCS 实船应用落地，开展船对船液态二氧化碳接卸等关键技术研究，发布《船载液态二氧化碳装卸作业指南》，填补业界技术空

白，在技术标准、检验认证、落地应用和产业链建设等方面持续发力。

船载碳捕集技术的发展绝非单一主体能够独立完成，需要国际海事组织（IMO）、政府监管部门、船东、船厂、设备厂商、港口运营商、二氧化碳封存服务商、科研机构和船级社等各方的协同努力。本白皮书站在船级社的专业视角，分析 OCCS 产业现状和发展趋势，为行业各方提供决策参考，推动 OCCS 产业链健康有序发展，助力航运业绿色低碳转型。CCS 愿与业界同仁一道，携手构建 OCCS 产业生态，共同探索航运脱碳的中国路径，为全球航运绿色发展贡献中国智慧和中国方案。

第一章 全球航运脱碳背景与 OCCS 发展现状

1.1 国际航运减排背景

OCCS 作为航运业合规脱碳的核心技术路径之一，既可对存量燃油船舶改造实现深度减排，也可与低碳燃料结合实现负排放，其技术发展与商业化应用直接由全球航运减排的顶层规则、区域政策与市场需求驱动。截至 2026 年 6 月，全球航运减排已形成“IMO 顶层战略引领、重点区域政策先行、多国产业配套跟进”的格局，整体减排节奏显著提速。

1.1.1 IMO 温室气体减排战略

国际海事组织（IMO）作为全球航运监管的核心机构，在推动航运温室气体减排方面发挥着主导作用。其温室气体减排战略经历了从“初步目标”到“净零承诺”的两次升级，是船载碳捕集技术发展的核心顶层驱动。

（1）从 2018 初步战略到 2023 年修订战略

2018年，MEPC 72 次会议通过《船舶温室气体减排初步战略》，首次提出了量化目标，即2030年船舶碳强度较2008年降低40%，力争2050年降低70%，且2050年碳排放总量较2008年降低50%。该阶段以能效提升为核心，未明确净零路径，OCCS仍处于技术研发阶段。

2023 年，MEPC 80 次会议通过《2023 年船舶温室气体减排战略》，目标大幅升级，成为当前全球航运脱碳的纲领性文件，核心目标包括：

① 绝对总量减排：以 2008 年国际航运碳排放总量为基准，2030 年减少至少 20%、力争 30%；2040 年减少至少 70%、力争 80%；2050 年前后实现国际航运温室气体净零排放。

② 运营碳强度减排：2030 年船舶碳强度较 2008 年降低不低于 40%，2040

年降低不低于70%。

③ 零或近零技术/燃料/能源使用占比：2030年零或近零技术/燃料/能源使用比例达到5%、力争10%。

（2）配套实施措施

IMO将减排措施分为短、中、长期。截至 2026 年 6 月，呈现“短期措施业已生效、中期措施谈判攻坚、长期措施方向明确”的格局：

① 短期措施（2023-2030 年）：能效管控全面落地

现有船舶能效指数（EEXI）、船舶碳强度指标（CII）、船舶能效管理计划（SEEMP）已于 2023 年 1 月 1 日正式生效，覆盖所有国际航行 5000 总吨以上船舶。截至 2026 年，CII评级门槛已完成 3 次年度收紧，D/E级低评级船舶面临营运限制、保费上涨等约束，存量船舶减排改造需求集中释放。OCCS作为存量船舶改造的核心方案之一，一旦其减排效果纳入 CII 评级核算体系，可直接提升船舶碳强度评级。

② 中期措施（2030-2040 年）：燃料标准与碳定价并行推进

船舶燃料生命周期温室气体强度标准和全球航运基于市场的温室气体定价措施共同构成IMO净零框架草案两大核心立法模块。受部分成员国强烈反对影响，净零框架草案表决进程被暂时搁置，但是相关技术和实施文件制订和完善工作仍取得实质性进展。根据现行净零框架草案文本，2028-2030 年一级补救单位（RU）底价设定为 100 美元/tCO_{2eq}。减排政策落地延后，意味着后续政策收紧的斜率将进一步加大，碳价预期或将持续上行，显著改善OCCS的经济性前景。

③长期措施（2040-2050 年）：零碳替代+碳移除协同

明确绿氢、绿氨、绿甲、可持续生物燃料等零碳燃料为核心方向，同时将船载碳捕集等直接碳移除技术列为净零目标的重要支撑，认可OCCS在难减排航段、存量船队中的补充作用。

1.1.2 全球区域与国家减排政策

除 IMO 层面的全球规则外，全球各主要航运经济体在IMO规则基础上也纷纷出台更为严格的区域性减排政策，进一步加强航运碳排放约束，形成多重合规压力。。

（1）欧盟：全球最严格的区域减排体系，双重机制倒逼脱碳

欧盟的航运减排较为激进，通过“碳排放交易+燃料碳强度标准”形成双重约束，是当前 OCCS 商业化应用的核心驱动市场。

欧盟航运碳排放交易体系（EU ETS for Maritime）是全球首个航运碳交易机制。根据规定，经认证的由 OCCS 捕集并永久封存的碳排放，可免于缴纳ETS配额，直接降低船东合规成本，是存量船舶应对欧盟ETS的主流方案，也是目前唯一明确为 OCCS 提供激励的监管框架。

《海运可再生与低碳燃料法规》（FuelEU Maritime）是全球首个船舶燃料全生命周期碳强度强制标准。该法规规定在具备可验证的碳捕集监测与核算方法的前提下对船载碳捕集技术进行审查，在船端进一步降低碳排放，帮助船舶满足区域燃料合规要求。同时，净零工业法案也将 OCCS 列为关键净零技术，推动相关产业发展。

（2）中国：双碳目标引领，技术标准与产业支持同步推进

中国作为全球第一大航运国与造船国，航运脱碳政策需要兼顾“国际合规”与“产业自主”，船载碳捕集技术是重点支持的前沿脱碳技术方向。

国家“双碳”战略明确了 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和目标，航运纳入交通领域减排总体布局。交通运输部发布了《水运领域碳达峰实施方案》，明确了 2030 年前水运领域碳达峰，提出能效提升、船队优化、替代燃料推广、前沿技术示范四大路径，明确支持 OCCS 研发与实船验证。

国内管控与试点 对标 IMO 规则，建立国内航行船舶能效管理与碳强度统计制度。长三角、粤港澳大湾区、山东半岛等绿色航运示范区，对采用减排技术的船舶给予优先靠泊等支持。

同时，工信部、科技部设立专项科研项目，支持 OCCS 核心部件攻关、系统集成与实船验证；CCS 陆续出台《船舶应用碳捕集系统指南》、《船载碳捕集存储系统》产品检验指南和《船载液态二氧化碳装卸作业指南》，为产品检验、入级提供规范依据。

（3）美国：联邦地方协同，市场化激励为主

美国航运减排呈现“联邦定底线、加州加严、税收激励”的特点，对 OCCS 市场化推广形成支撑，是驱动 OCCS 商业化的核心市场。

联邦层面，美国环保署发布新版船舶温室气体排放标准，明确认可 OCCS 捕集量计入减排核算；《通胀削减法案》45Q 条款给予工业点源碳封存 85 美元/吨税收抵免，大幅提升项目经济性。地方层面，洛杉矶、长滩等核心港口推出绿色船舶激励计划，对采用碳捕集等减排技术的船舶给予港务费减免和优先靠泊激励。监管层面，美国海事管理局设立专项基金支持 OCCS 实船示范与港口二氧化碳接驳设施建设；美国海岸警卫队针对首艘加装 OCCS 的商用船舶签发豁免许可；美国船级社（ABS）更新 OCCS 入级规范，多重政策叠加为 OCCS 合规准入扫清障碍。

（4）其他区域与国家：

新加坡作为国际航运枢纽，发布《海事脱碳蓝图》，设立海事脱碳基金，支持 OCCS 等脱碳技术的研发、试点与产业化；日韩依托本国造船工业优势，将 OCCS 列为航运脱碳核心技术，由政府牵头联合造船、能源、航运企业开展实船验证，并在 IMO 层面积极推动碳捕集技术的规则制定；挪威正在开展的北极星项目是全球首个实现全链路商业化闭环的远洋船舶 OCCS 标杆项目，已积累近 2 年的连续运营数据，加速全球统一监管规则的出台；其他小岛屿发展中国家在 IMO 层面持续推动更激进的减排目标与全球碳定价机制，加速全球航运脱碳节奏，间接放大了 OCCS 等减排技术的市场需求。

1.2 OCCS 发展现状

近年来，在全球航运净零目标驱动与技术迭代推动下，OCCS 在技术成熟度、项目落地、规则标准、产业链配套等维度均取得阶段性进展，全球产业梯度格局初步形成。

1.2.1 技术发展现状与成熟度

船载碳捕集技术通常分为燃烧后捕集、燃烧前捕集、富氧燃烧捕集三大技术路径（图 1.1）。现阶段，燃烧后捕集是商业化主流，全球船载碳捕集技术均以燃烧后捕集为核心路径，但技术发展程度各不相同，成熟度也有显著差异。燃烧前捕集和富氧燃烧捕集属于中长期潜力路线，需配套新型动力系统，多适配新造船，目前仍处于研发与验证阶段。

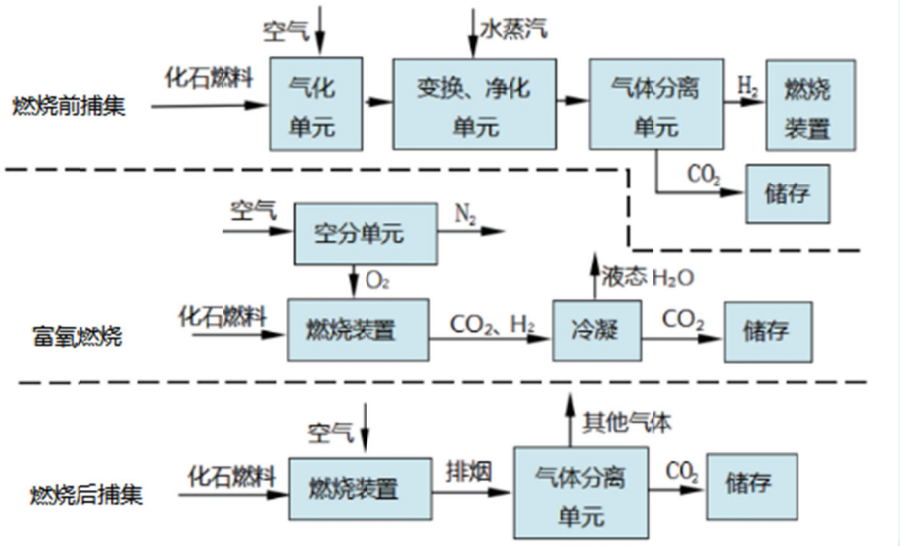

图 1.1 二氧化碳捕集技术路径示意图

以行业普遍采用的 ISO 16290《航天系统技术就绪等级定义》中的通用 TRL 分级体系来评估 OCCS 的成熟度，其核心是将航天领域通用的 9 级 TRL 框架，与 OCCS 技术特性做场景化映射，明确各级别在船舶领域的具体判定标尺，避免泛化定级。目前 IMO 和全球主流船级社等机构对 OCCS 的成熟度评估，

均遵循“ISO 16290 通用定义 + OCCS 场景适配”的模式（见表 1.1），主流技术成熟度覆盖 TRL 3~8，尚未进入大规模商业化落地阶段。

表 1.1 船载碳捕集技术成熟度场景适配

TRL 等级	等级名称	ISO 16290 通用定义	OCCS 场景适配
TRL 1	基本原理观测与报道	完成基础科学原理的观测与研究，验证底层物理/化学规律的可行性，尚未针对具体应用场景开展定向研发。	仅完成 OCCS 相关基础科学研究。如新型吸收剂反应机理等实验室基础验证，未针对船舶场景提出应用方案。
TRL 2	技术概念与应用设想形成	针对明确应用场景提出技术应用方案与核心构想，完成概念性分析论证，尚未开展实验室实物验证。	针对船舶尾气特征提出 OCCS 方案，完成概念设计与理论可行性分析。如“胺基吸收法适配散货船的布置构想，没有实际验证。
TRL 3	关键功能实验室验证	在实验室环境下完成核心部件、关键功能的原理验证，证明技术概念具备落地可行性，形成实验室级原理样机。	搭建小型实验室原理样机，验证核心捕集机理的可行性。如小试装置验证胺液对模拟船舶尾气的捕集效率，验证核心功能成立，不考虑工程化适配。
TRL 4	子系统实验室集成验证	将多个核心部件集成为功能子系统，在理想实验室环境下完成子系统级功能与性能测试，验证模块间匹配性。	将核心部件集成为功能子系统，在实验室理想环境下完成联调测试。如吸收-解吸单元连续运行，验证子系统流程与基本性能，没有模拟船用工况。
TRL 5	子系统模拟环境验证	在接近真实工况的模拟环境中，完成子系统的性能与可靠性验证，初步验证技术的环境适应性。	在岸上中试台架中，模拟船舶尾气参数、振动、温度波动等工况，完成子系统可靠性测试。如处理量 1000Nm³/h 中试装置，验证船舶变负荷捕集性能。
TRL 6	系统级原型模拟环境演示	完成完整全尺寸系统原型，在模拟真实工况的环境中开展系统级演示运行，验证整体功能、性能与工况适配性。	完成全尺寸 OCCS 原型，在岸上试验平台模拟船舶摇摆、盐雾、主机全工况负荷，完成系统级连续演示运行，验证 OCCS 整体性能、布置方案、安全逻辑，没有实船安装。

TRL 等级	等级名称	ISO 16290 通用定义	OCCS 场景适配
TRL 7	系统原型真实环境演示	完整系统原型部署于实际应用场景，在真实工况下开展示范运行，验证真实环境下的长期运行可靠性与实际性能。	全尺寸 OCCS 安装于实船且连续运行不少于 6 个月，验证真实海况、变工况下的长期可靠性、捕集效率与运维适配性，完成单船的示范应用。
TRL 8	系统定型真实环境全面验证	技术完全定型，形成标准化工业产品，在真实应用场景中完成全工况、全周期综合验证，具备批量生产与交付能力。	技术完全定型，形成标准化系列化产品，通过船级社认可，在多艘船舶、多条航线完成验证；具备批量制造、标准化安装与运维能力，故障模式与解决方案完整。
TRL 9	系统规模化商用成熟	技术经过长期实际运行检验，配套产业链成熟，实现规模化商业应用，运行数据与成本模型完全稳定。	OCCS 大规模商业化应用，产业链配套完善，港口二氧化碳卸载与陆上封存网络成熟；经过全生命周期运行检验，成本、可靠性、合规性完全满足市场化推广需求。

（1）化学吸收法

全球基于化学吸收法的 OCCS 实船示范应用主要集中在中国和欧洲区域，已完成多场景实船验证布局，覆盖集装箱船、散货船、液化气体船、海工船等多类船型。其中，具有典型代表意义的全流程实船示范项目主要包括新造散货船“山东鑫盛”轮、营运集装箱船船“长顶”轮、营运散货船“粤电 56”轮、营运乙烯运输船“Clipper Eris”轮和 LNG 双燃料半潜式起重船“Sleipnir”号，已形成“新造船一体化集成 +大型远洋船改装+老龄船舶紧凑型加装+LNG 冷能耦合优化能耗”的梯度验证矩阵，覆盖不同建造阶段与多条自主技术路线，全面验证 OCCS 的工程可行性、工况适配性与产业落地价值，取得了核心性能全面达标、多场景适配性充分验证、船岸碳减排闭环链路打通、合规性与经济性同步凸显的良好应用效果，具有技术瓶颈自主突破、行业转型示范、产业生态引领与国际规

则支撑的多重重要意义，同时也为我国船舶碳减排技术规范修订、港口码头配套设施建设提供实船数据支撑，为 OCCS 规模化推广提供核心实践支撑。

基于 ISO 16290《航天系统技术就绪等级定义》中的通用 TRL 分级体系，化学吸收法完全符合“系统原型真实环境演示”的定义，其实船示范应用满足“全尺寸 OCCS 安装于实船且连续运行不少于 6 个月，验证真实海况、变工况下的长期可靠性、捕集效率与运维适配性，完成单船的示范应用”；同时，部分头部厂商已推出标准化、系列化产品，并通过 CCS、挪威船级社（ DNV）、日本船级社（NK）等主流船级社认可，基本具备批量制造、标准化安装与运维能力，整体技术成熟度约在 TRL 7-8 级。

（2）物理吸附法

现阶段，物理吸附法的船载应用整体处于研发验证向小规模示范过渡阶段，尚未形成全尺寸全流程商用实船应用。韩国 HD 现代造船海洋联合 HD Hydrogen 启动联合工业项目，聚焦高浓度尾气场景，开发适配船舶固体氧化物燃料电池（SOFC）的 PSA 碳捕集系统，探索高浓度尾气场景下的工程化路径；欧盟科研机构在小型试验船舶上完成了变压吸附装置的上船测试，重点验证船舶摇摆、倾斜工况对吸附床层稳定性与捕集性能的影响；国内高校与科研院所已完成船用物理吸附装置的实验室原理验证与台架性能测试，针对改性活性炭、分子筛等吸附剂开展船用工况适配优化，多家单位建成船用物理吸附模拟试验台，部分企业完成小型样机的内河船舶短周期搭载测试，但尚未进入全尺寸实船示范阶段。该技术仍存在低浓度烟气吸附选择性不足、系统能耗与体积难以兼顾、船舶动态工况下性能衰减等共性瓶颈，全球研发正向高选择性新型吸附材料、抗晃动吸附床结构设计、吸附 - 膜分离耦合工艺方向演进，同时探索与

船舶废热、LNG 冷能的系统集成以降低运行能耗，持续提升船用场景适配能力。

基于 ISO 16290《航天系统技术就绪等级定义》中的通用 TRL 分级体系，物理吸附法在船用领域仅完成实验室原理验证与台架测试，部分方案完成小型上船试验，符合“系统级原型模拟环境演示”的定义，但目前落地项目数量有限。尚未实现全尺寸系统在真实远洋工况下的连续稳定运行，未形成标准化产品与主流船级社全流程认可，暂不具备大型商船应用条件，距离规模化商用仍需完成多轮实船工程验证，整体技术成熟度约在 TRL 5-6 级。

（3）膜分离法

全球膜分离法整体处于实验室验证向实船示范过渡的发展阶段，相关验证工作主要集中在东亚与欧洲区域，以概念设计认证、台架验证与小型样机测试为主，尚未落地全流程、全尺寸的商用实船示范项目，未形成覆盖新造船集成、营运船改装的多场景验证矩阵，其真实海况下的长期运行可靠性、变工况适配性与全链路工程可行性仍待进一步实船验证，距离规模化工程应用仍有较远的技术距离。日本大岛造船研发的膜式 OCCS 散货船（图 1.2）设计已获 NK 原则性认可，NK 也发布了全球首个纳入膜分离法的船载碳捕集技术指南；韩国 CEL LAB 等企业开发出改性聚酰亚胺复合膜材料，完成模拟船舶烟气环境下的长期抗污染性能验证；欧洲高校与科研机构完成多轮船用膜分离台架试验，验证单级膜工艺对柴油机尾气的适配性；国内已完成船用膜组件的实验室原理验证与台架性能测试，重点推进抗污染改性膜材料与紧凑化膜组件研发。然而，该技术仍存在低浓度烟气下分离效率与能耗难以兼顾、膜材料长期抗污染能力与使用寿命不足、多级膜系统集成度有待提升等共性瓶颈，全球研发正向高选择性高通量新型膜材料、抗污染膜表面改性、膜-化学吸收耦合工艺、能量回收

系统集成方向演进，进一步提高膜的选择性与渗透性、降低成本、增强膜的稳定性与使用寿命。



图 1.2 装备 OCCS（膜分离法）的散货船

基于 ISO 16290《航天系统技术就绪等级定义》中的通用 TRL 分级体系，膜分离法在船用领域已完成实验室原理验证与相关环境下的组件/台架测试，部分技术方案完成船级社概念设计认证与船舶环境适配试验，但尚未实现全尺寸 OCCS 在真实远洋工况下的连续稳定运行，未形成标准化、系列化产品与主流船级社的全流程系统认可，距离规模化商用仍需完成全尺寸系统的实船工程验证与长期可靠性考核，整体技术成熟度约在 TRL 4-5 级。

（4）低温冷凝分离法

全球低温冷凝法现阶段仍以技术攻关与台架验证为主，整体处于基础研究向工程原型试制过渡阶段。欧洲区域，荷兰应用科学研究院（TNO）系统开展船载碳捕集多技术路线对比评估、聚焦 LNG 动力/运输船舶低温冷凝碳捕集技术，明确了 LNG 冷能耦合是低温冷凝分离实船应用的核心前提；国内层面，中国船舶集团第七〇八研究所、中船动力（集团）有限公司已着手 OCCS 低温冷凝分离法应用于大型 LNG 运输船的新船型研发（图 1.3），江苏科技大学等科研机构也已开发出 LNG 冷能耦合的低温凝华碳捕集原理样机，台架测试捕集效

率可达 80%以上，但尚未进入全尺寸实船验证阶段。



图 1.3 装备 OCCS 的大型 LNG 运输船

基于 ISO 16290《航天系统技术就绪等级定义》中的通用 TRL 分级体系，低温冷凝分离法船载碳捕集技术已完成实验室原理验证与关键部件台架测试，部分液化单元完成实船环境下的短期验证，但尚未开展全系统、全尺寸的真实海洋环境示范，不满足“系统原型真实环境演示”的完整定义，处于基础研究向工程原型验证过渡的早期阶段，距离规模化商用仍需较长的技术迭代与工程验证周期，整体技术成熟度约在 TRL 3-4 级。

（5）矿化法

当前全球船载矿化捕集技术整体处于研发验证向小规模实船原型测试过渡阶段，欧洲企业率先实现工程化上船突破，国内仍以实验室基础研究与台架验证为主。 国际层面，英国 Seabound 公司开发的钙基矿化碳捕集技术是全球首个完成实船搭载验证的矿化法 OCCS 方案。该项目在远洋集装箱船上安装原型测试装置，采用颗粒状生石灰作为吸收介质，船舶尾气经预处理后进入填充式矿化反应器，二氧化碳与钙基颗粒发生气固反应转化为固态石灰石。实船测试结果显示，该系统二氧化碳捕集率可达 78%，同时可脱除 90%以上的硫氧化物，实现了碳与硫的协同治理。反应产物固态碳酸钙随船存储，靠港后可直接卸料

上岸，作为建筑骨料、水泥原料对外销售，无需配套二氧化碳液化单元、低温储罐与港口液态二氧化碳接收设施，大幅简化了船岸衔接流程。针对船舶运营特点，该方案采用模块化可更换料仓设计，靠港后可通过吊装快速完成废产物卸料与新吸收剂装填，适配集装箱船靠港频繁的运营节奏。此外，欧盟科研框架项目支持了海水矿化、镁基尾矿矿化等船用衍生技术研究，探索利用海水、工业尾矿等低成本原料实现船舶尾气碳固化，进一步降低原料与处置成本，但相关技术仍处于实验室小试与数值模拟阶段，尚未开展上船测试。国内层面，部分高校与科研院所已开展船用矿化捕集的基础机理与工艺优化研究，重点围绕紧凑化矿化反应器结构、船舶摇摆工况下颗粒床稳定性、船舶余热耦合强化反应效率等方向攻关，部分单位完成了实验室小试装置搭建，在模拟船舶烟气条件下验证了矿化反应的可行性与捕集效率。针对内河短途运输船舶的小型矿化捕集方案已进入概念设计阶段，探索依托港口周边建材产业消纳矿化产物的区域产业闭环模式，但尚未开展全尺寸系统的实船示范验证。

基于 ISO 16290《航天系统技术就绪等级定义》中的通用 TRL 分级体系，矿化方案已完成小型原型装置的实船短期搭载测试，验证了真实海况与船舶尾气条件下的技术可行性，但尚未实现全尺寸系统的长周期连续稳定运行，未形成标准化、系列化产品，也未获得主流船级社的全流程系统认可，距离规模化工程应用仍需突破紧凑化高效反应器、高利用率吸收剂、固态产物连续转运等核心技术瓶颈，是船载碳捕集领域中长期潜力技术路线，未来在短途船舶、内河航运等特定场景具备差异化应用价值，整体技术成熟度约在 TRL 4-5 级。

（6）甲烷热催化分解

全球甲烷热催化分解法尚未开展全尺寸实船示范应用，整体处于概念认证

向原型试制过渡的早期研发阶段。 2025 年 11 月，芬兰 Hycamite 的船载热催化裂解系统获得船级社燃烧前船载碳捕集 AiP 原理认可，依托 LNG 汽化冷能回收降低裂解供热能耗，裂解转化率稳定可达 85%以上，同时还划定了船舶防爆分区、固态碳仓储安全规范，以及热源耦合集成边界等，为后续上船改装奠定合规基础；瓦锡兰同步开展裂解装置与双燃料主机匹配仿真验证，测算氢气掺烧比例对主机燃烧、排放的影响，联合沪东中华造船(集团)有限公司和壳牌航运推出基于 LNG 运输船的概念设计（图 1.4）；国内相关科研院所也开展裂解催化剂船用工况改性台架试验，尚未形成完整的实船安装方案。现阶段该技术缺少真实海况变负荷、摇摆倾斜下的长期运行数据，港口固态碳转运产业链也尚未成型，系统集成、运维管理、海事安全规范等均处于空白状态，距离实船应用仍需完成多轮验证。

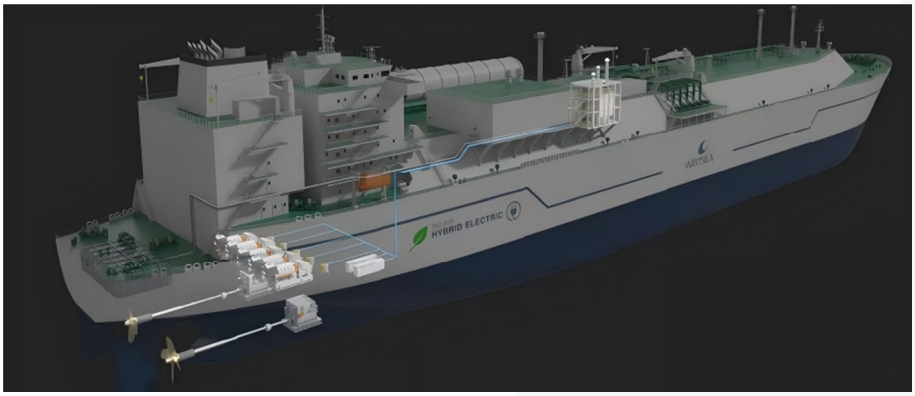

图 1.4 采用甲烷热催化分解的 LNG 运输船概念设计图

基于 ISO 16290《航天系统技术就绪等级定义》中的通用 TRL 分级体系，甲烷热催化分解法目前仅完成实验室化学反应验证、陆上台架性能测试与船舶概念设计及船级社 AiP 原理认可，未完成工程原型样机制造，也未实现全尺寸系统上船安装与海上航行测试，属于前瞻性前沿脱碳技术，距离小规模实船示范与规模化商用存在较长的技术研发于工程落地周期，整体技术成熟度约在 TRL 3–4 级。

（7）富氧燃烧

当前全球船载富氧燃烧捕集技术整体停留在陆上台架、新船概念设计、船级社原理认可阶段。现代重工 2024 年联合 Alfa Laval、DNV 开展 17.4 万方 LNG 运输船富氧燃烧 OCCS 概念设计，获得 DNV 原理认可；三菱重工 2023 年启动船用富氧燃烧专项，配套三菱自制低速柴油机改造样机，搭建 1：3 船舶尾气中试台架，模拟远洋主机 25%~100% 变负荷工况，验证氧燃配比动态调节策略， 目前仅完成台架性能数据采集，定位中长期技术储备路线。欧洲低碳基金聚焦近海甲醇动力船舶富氧捕集方案，资助搭建小型船舶陆上全流程试验平台，配套小型变压吸附空分装置，日处理二氧化碳量 5 吨，仅完成陆上闭环试验，未推进上船改装，暂无实船落地计划。

国内富氧燃烧船用技术起步较晚，目前还停留在实验室小试、机理仿真阶段，尚无船级社原理认可方案。部分科研院所和高校针对 LNG 运输船开展富氧燃烧系统仿真模拟，完成小型燃烧器样机试验，重点研究烟气循环降温、LNG 冷能耦合节能方案，以及氧浓度对 NO_x、燃烧热效率的影响等方面，仅发表理论研究论文，未搭建全流程集成中试台架。

基于 ISO 16290《航天系统技术就绪等级定义》中的通用 TRL 分级体系，船上富氧燃烧技术仅完成实验室燃烧样机、陆上缩小比例台架模拟稳态工况测试，完成新船概念设计与船级社原理认可，尚未制造全尺寸船载原型系统，未模拟船舶摇摆、盐雾、主机频繁变负荷等真实海况的复合工况，未开展任何海上实船的搭载试验，也没有任何长期规划的实船示范项目，整体技术成熟度约在 TRL 3–4 级。

1.2.2 典型示范项目进展

OCCS 产业已从早期的技术探索迈入规模化商业示范阶段，区域产业发展格局呈现明显梯度分化特征，项目覆盖液化气体运输船、集装箱船、散货船、液货船及海洋工程装备等多类船型。其中，LNG 运输船凭借气源清洁、余热资源充足的优势，成为 OCCS 示范应用的主力船型；大型集装箱船与远洋散货船的示范项目增速加快，逐步成为后续规模化应用的核心载体。

从区域发展格局看，欧洲地区国家依托成熟的陆上碳封存枢纽与完善的碳定价机制，推动船东、设备厂商与港口企业深度协同，聚焦“技术成熟度迭代+现有岸基基础设施协同适配”两大核心方向，形成了“船上捕集→港口卸载→陆上封存”的全链条闭环示范。挪威北极光（Northern Lights）封存项目已具备接收所捕集 二氧化碳的能力，为欧洲船队 OCCS 应用提供了稳定的 二氧化碳消纳渠道。同时，欧盟创新基金对多个 OCCS 示范项目给予资金支持，持续推动技术方案迭代与成本下降。新加坡凭借国际航运枢纽的区位优势，将发展重心放在 OCCS 全产业链条的运营可行性验证及国际标准协同统一上，重点布局船载二氧化碳港口中转与卸载基础设施建设，打造国际航运碳转运枢纽。目前，新加坡已启动多个港口液态二氧化碳装卸设施的规划与试点，为全球远洋船队 OCCS 应用提供港口配套支撑。北美、中东及其他地区 OCCS 进展相对缓慢，北美主要聚焦内河与近海船舶的小型捕集系统示范；中东地区依托本土油气产业基础，探索二氧化碳资源化利用与船载捕集的结合路径，但整体落地项目数量较少，仍处于前期研究阶段。以中国为核心的东北亚地区，正快速跟进新造船的 OCCS 预设技术探索，成为全球船载碳捕集技术商业化落地的关键增长极。中国在 OCCS 领域进展迅速，已完成全球首套全流程船载碳捕集、液化及船对

船卸载的实船验证，在核心设备国产化、系统集成优化、工程化应用等方面实现阶段性突破，逐步形成具备自主知识产权的技术方案体系。

（1）“EVER TOP”轮

“EVER TOP”轮是全球首艘完成 OCCS 全流程加装改造的大型远洋集装箱船示范项目（图 1.5），其核心目标是验证大型老龄集装箱船加装 OCCS 的工程可行性和远洋航线减排稳定性，同步验证捕集船二氧化碳转运全流程操作规范。该轮作为 2014 年建成的 14,000TEU 大型远洋集装箱船，以远东-西北欧主干远洋航线为主，于 2024 年 1 月在上海完成全套 OCCS 加装改造，属于典型老龄船改装案例。改装完工后即投入常态化跨洋运营。截至 2026 年 7 月，系统累计连续海试运行超 4500 小时，覆盖完整冬夏两季远洋复杂海况，整个运行周期内未出现 OCCS 相关的安全事故。



图 1.5 装备 OCCS的“EVER TOP”轮（营运船）

该项目采用“脱硫塔 + 碳捕集”一体化改造方案，依托原有脱硫系统空间与管系加装有机胺吸收式碳捕集模块，无需改动主机本体，大幅降低了改装施工量与成本，适配集装箱船尾部狭小甲板空间。船舶尾气通过 EGC 脱硫预处理单元，同步完成除尘、脱硫、降温调质，消除重油燃烧杂质对吸收剂的污染损耗；预处理后的烟气进入紧凑型立式模块化塔体的多级胺基吸收单元，适配集装箱船尾部狭窄布置空间；解吸分离出的二氧化碳经多级压缩制冷后形成液态二氧

化碳，通过密闭管路输送至甲板上的独立 C 型低温储罐，完整覆盖捕集、液化、存储全流程。

2024 年 4 月，该轮在上海洋山港完成国内首次船载液态 二氧化碳岸端卸载；2025 年 6 月，在上海洋山港盛东码头顺利通过船对船作业的方式卸载至二氧化碳运输船“德锦 26”轮，标志着全球首次液态二氧化碳船对船接卸作业安全完成，进一步丰富 OCCS 捕集的二氧化碳的卸载方式，打通 “捕集—液化—储存—转运—资源化利用”的全生态闭环，为行业提供可量化的减排数据支撑，同时也验证了存量远洋船舶通过 OCCS 改造实现低碳合规的可行性。

（2）“Clipper Eris”号

“Clipper Eris” 号是一艘 21,000 立方米的乙烯运输船，该船型具备较大的甲板预留空间和相对宽裕的远洋续航周期，是实船验证船载碳捕集技术的理想平台。2025 年 2 月，该船在新加坡完成了 OCCS 的加装工程，随后即投入北大西洋航线开展实船验证（图 1.6）。截至 2025 年 12 月，已累计完成超过 2000 小时的稳定海试运行，整个验证周期内未出现任何 OCCS 相关的船舶安全故障。



图 1.6 装备 OCCS 的“Clipper Eris”号（ 营运船）

该项目在船舶原有废气清洁系统（EGC）的基础上，额外串联了湿式电除尘器（WESP）与低压废气再循环（LP EGR）系统，先对主机、副机及锅炉产

生的所有废气进行二次脱硫与除尘降温预处理；随后将处理后的废气导入串联式碳捕集单元，以提高捕集效率、降低溶剂损耗；捕集后的二氧化碳再经制冷压缩环节，转化为低温液态二氧化碳，最终通过封闭管道输送至甲板上独立 C 型低温储罐中，完成整个捕集与液化流程。

作为支撑欧洲船载碳捕集技术验证的标杆项目，通过实船长周期运营，验证了“船载碳捕集+陆上封存”这一技术路径在远洋船舶上的适配性，以及该技术方案与欧洲现有成熟 OCCS 岸基基础设施的协同衔接能力。

（3）“山东鑫盛”轮

“山东鑫盛”轮是全球首艘装备全流程 OCCS 的卡尔萨姆型新造散货船，是中国国产化船载碳捕集新造船领域的标杆项目（图 1.7）。项目核心目标是通过新造船的一体化预装模式，验证全流程国产化 OCCS 在大型远洋干散货船场景下的空间适配性和长航程稳定运行能力，实现“船载捕集—港口过驳—资源化利用”的国产化全产业链闭环。



图 1.7 装备 OCCS 的“山东鑫盛”轮（新造船）

该项目依托新船设计阶段一体化布局优势，针对船舶摇晃、高温高湿、空间受限、电网波动等特殊工况，强化系统抗倾斜、振动隔离、余热利用、防爆与防腐要求，从根源上解决陆用技术“上船难”的诸多痛点。同时，其所安装的 OCCS 为完全自主知识产权的一体化全流程碳捕集装备，在不改动船舶原有主

机和辅机的燃烧架构的前提下实现了 OCCS 与船舶主机余热回收系统的耦合优化。系统运行时，船舶尾气先经过脱硫除尘一体化装置完成预洗涤，降低废气粉尘、SO_2等对吸收剂的损耗；经预处理后的进入多级高效吸收塔，搭配国产化专用复合胺吸收剂，吸收了二氧化碳的富液经船舶低温余热解吸后分离出高纯度二氧化碳，多级压缩制冷后形成液态二氧化碳，通过密闭管路进入甲板上的独立 C 型低温储罐，完整覆盖“吸收—解吸—压缩—液化—存储”全流程，为新造船的低碳设计提供了可批量复制的集成方案。

船载碳捕集技术在“山东鑫盛” 轮上的成功应用，标志着 OCCS 从“营运船改装”进入到“新造船化配置”阶段，对于新造船舶应用 OCCS 的技术可行性、确立工程化标杆、打通产业闭环、降低合规风险、提升中国标准与产业链话语权具有重要意义。同时，还彻底打通了从技术研发到商业运营的最后一公里，推动我国在航运脱碳领域实现从跟跑到并跑、领跑的跨越。

（4）“粤电 56”轮

“粤电 56” 轮是国内首套高速离心式 OCCS 实船改装示范项目，同时也是全球离心脱碳技术船载化标杆验证船舶（图 1.8），于 2025 年 9 月在舟山六横完成离心式 OCCS 改装。其核心目标是验证高速离心脱碳技术在中大型沿海/远洋散货船的适配性，实现小型化、低能耗改装方案突破，构建离心式 OCCS 完整的安装、检验、运维、接卸等标准体系。



图 1.8 装备 OCCS 的“粤电 56”轮（营运船）

该项目搭载国内首套高速离心脱碳系统，区别于传统的塔式碳捕集系统，它依靠高速离心力场强化气液传质效率，设备整体体积较同等处理量的塔式碳捕集系统缩小约 30%，完美适配老旧散货船甲板空间狭小、改造条件受限等特征，再加上整套系统采用撬装模块化集成设计，大幅降低老龄船舶的改造难度。船舶尾气先经一体化脱硫除尘预处理单元去除粉尘、硫化物，然后进入高速离心脱碳主机，搭配国产高性能吸收剂技术，通过高速转子形成离心力场强化二氧化碳选择性吸收，气液分离效率显著提升。吸收了二氧化碳的富液解吸后分离出高纯度二氧化碳，经压缩制冷液化后，由密闭管路输送到甲板上的独立 C 型低温储罐，实现捕集、液化、存储一体化流程，并预留标准化船岸/船船卸载接口。考虑到“粤电 56” 轮主营国内南北沿海、东南亚煤炭矿石运输航线，船上二氧化碳储罐搭载了全自动压力、液位、温度智能调控联锁系统，适配近海短途航线靠港频繁和装卸货工况启停切换操作，设备启停响应速度较快。高速离心式碳捕集技术突破传统塔式的单一技术路径依赖，形成“塔式/新造船+高速离心式/存量船” 的差异化技术体系，适配不同船型与运营场景。

“粤电 56”轮是老龄散货船低碳改造的里程碑项目，它以“离心技术突破+低成本改造+合规增效”为核心，验证了高速离心式船载碳捕集技术路线的优势，为全球存量船队低碳改造提供低成本、易落地的工程方案，进一步加速 OCCS

国产化替代与产业链成熟的步伐。

1.2.3 规范法规体系建设

OCCS 作为航运中期脱碳核心技术路径，其规范法规体系具备跨公约、跨行业、跨碳价值链的复合属性：上游覆盖 OCCS 产品设备和船舶安装；中游涵盖二氧化碳减排核算、合规抵扣、捕集二氧化碳属性界定，以及二氧化碳卸载作业等；下游衔接港口接收设施、捕集二氧化碳水上运输、二氧化碳封存利用、碳足迹全生命周期溯源等。

现阶段，船载碳捕集技术端多条捕集路线并行，商业化试点船舶持续增加，但全球统一强制监管规则尚未生效，跨环节监管空白、核算口径不统一、岸船规则割裂、跨境运输与货物属性法律障碍等问题成为制约 OCCS 大规模装船应用的核心制度瓶颈，构建系统性规范法规体系已成为全球海事界、船东、设备厂商、港口运营方和封存利用服务商等行业主体的共同刚需。OCCS 产业的快速发展需要加快构建覆盖安全、环保、减排核证、上下游监管等全维度规则体系，为产业规模化发展提供可预期的透明规则与制度保障。其完整体系建设需打通 IMO 海事安全、海洋污染防治、温室气体减排、危险货物运输四大监管板块，同步衔接陆上减排和监管政策、船级社入级规范、行业标准，以及港口岸端配套规则，形成“国际顶层公约→统一技术导则→船级社落地规范→国家配套标准→港口装卸与封存操作细则”的递进发展框架。

（1）IMO 层面

IMO 作为 OCCS 全球统一法规体系的核心制定主体，工作分为 MEPC 温室气体减排规则、海上安全委员会（MSC）货物安全规范、CCC 货物运输分委会危险货物细则三大并行路线同步推进，形成双委员会协同立法格局。

MEPC 83 次会议正式审议并全票通过《OCCS 系统使用监管框架编制工作计划》，并设立 OCCS 专项工作组，明确 2028 年前形成完整监管框架的路线图，重点推进《国际防止船舶造成污染公约》（MARPOL）、《国际海上人命安全公约》（SOLAS）相关修正案的研究制定。MEPC 84 次会议吸收中国、挪威、日本、韩国、东盟联合提案，重点突破两大关键制度缺口：一是新增二氧化碳矿化永久封存法定认可路径，打破原有法规仅承认地下地质封存的单一处置限制；二是收录我国洋山港 OCCS 船对岸卸载全流程实操案例，为全球港口提供液态二氧化碳接收作业范本。

MSC 第 110 次会议明确将 OCCS 安全规范列为 CCC 分委会最高优先级议题，自 CCC 12（2026 年 9 月）启动专项编制，聚焦 SOLAS 公约（安全要求）和 IMDG 危险货物规则（捕集二氧化碳的定性）的适配修订。当前规则制定的核心方向包括：OCCS 船舶安全技术要求、液态二氧化碳船载存储与装卸作业安全规范、捕获二氧化碳的减排量核算与核查方法、OCCS 减排效果在 CII 中的抵扣机制等。此外，针对二氧化碳海上转运与封存的跨界监管问题，IMO 正协同《伦敦公约》/《伦敦议定书》缔约方开展相关条款的适配修订，以进一步明确船载二氧化碳海上转运与离岸封存的监管边界。截至目前，IMO 层面已发布 OCCS 临时导则，为全球试点项目提供了基础合规依据，但减排量核算、CII 抵扣等核心机制仍处于研究论证阶段，尚未形成统一的强制规则。

（2）区域减排和监管政策层面

以欧盟为代表的全球多个国家/区域纷纷出台区域温室气体减排政策，先于 IMO 建立包含经济要素的监管体系，提前影响 OCCS 商业经济性与合规价值。

欧盟率先将航运业纳入碳排放交易体系，是当前唯一对 OCCS 捕集碳提

供碳信用抵扣的区域性规则，但用于地质封存、工业利用、矿化封存的不同抵扣比例尚未完全统一核算标准。目前，欧盟已同步配套港口 OCCS 基础设施强制建设时间表，计划 2030 年前主要集装箱港、散货港配备液态二氧化碳接收终端，并出台港口 OCCS 卸载作业安全规范，间接推动船载碳捕集技术的商业化应用。

中国依托“双碳”顶层战略，构建“海事船舶监管+船级社规范+港口危货细则”规范体系。交通运输部、生态环境部同步研究船舶 OCCS 配套管理规定，明确捕集二氧化碳港口申报、存储、转运监管要求；《船舶大气污染物排放控制区管理办法》预留 OCCS 协同治理条款；陆上《二氧化碳捕集、利用与封存（CCUS）标准体系》与船载 OCCS 规则打通封存、计量、溯源通用技术要求；上海、浙江、广东等航运先行地区出台港口液态二氧化碳接收设施建设指引，支撑上海洋山港、宁波舟山港 OCCS 试点应用落地。

挪威依托北极光跨境二氧化碳封存项目，建立全球船岸一体化监管细则，制定液态二氧化碳海上运输、港口中转、海底封存全链条法律，为远洋 OCCS 航线提供完整制度范本；新加坡依托国际航运中心定位，出台 OCCS 试点补贴政策、港口卸载专项操作规范，同步向 IMO 提交联合提案，推动亚洲航线 OCCS 监管协调统一。

（3）船级社层面

在 IMO 统一强制规则落地前，国际船级社协会（IACS）已启动 OCCS 统一要求的研究制定工作，协调各船级社之间的技术标准与检验要求。全球主流船级社已先行建立 OCCS 入级的规范标准体系，明确了系统设计、设备认证、船舶改装、检验发证等环节的具体技术要求，并推出对应附加标志，是当前装

备 OCCS 船舶设计、建造/改造与检验的直接执行依据，体系覆盖设计、设备、安装、试验与营运全生命周期检验要求，技术框架具备高度互通性，同时存在细节技术要求差异化问题。其中，针对液态二氧化碳低温储罐、捕集二氧化碳卸载系统等关键设备，各船级社已形成相对成熟的安全检验框架，为试点项目提供技术服务，切实保障实船应用的本质安全。

CCS 率先发布《船载碳捕集存储系统》产品检验指南和《船舶应用碳捕集系统指南》，推出了“OCCS”和 “OCCS Ready” 附加标志，形成了 “规范指南+附加标志+认可程序” 的完整分层标准体系，全面覆盖 OCCS 图纸审查、设备制造、实船安装、建造检验和安全运维全流程技术要求，已成功应用于多艘装备 OCCS 的实船入级服务，构建起适配国内船舶工业、航运运营场景的入级标准体系。同时配套出台《船载液态二氧化碳装卸作业指南》，补齐了船上捕集二氧化碳卸载环节的技术空白。此外，CCS 还向 IMO 输出实船示范应用案例和矿化封存提案等，支撑国际规则制定。DNV 发布了船载碳捕集专项规范，建立覆盖新船一体化设计和营运船改造的完整框架，重点完善低温储罐绝热、海上二氧化碳转运安全细则等；ABS 推出 EGC-OCCS 附加标志（含预设），将 OCCS 与船舶脱硫系统一体化设计要求合并；LR、BV、NK 等船级社均发布了 OCCS 相关的规范指南，给出了船舶安装 OCCS 的安全技术要求。各船级社发布的 OCCS 入级规范在船舶布置方案、储罐安全冗余、卸载接口标准等技术细节存在差异，这也是 IMO 统一导则需要重点协调解决的内容。

（4）行业标准方面

OCCS 行业标准覆盖存在诸多短板，多技术路线、全产业链标准体系有待完善，全球通用、全覆盖的 OCCS 国际行业标准仍处于碎片化构建阶段，标

准体系建设规划还需要持续深化，进而推动国内标准国际化、全链条配套标准化。

目前多以有机胺的化学吸收法为核心适用对象，对膜分离、物理吸附等新型船载碳捕集技术仅作原则性特殊考量，缺少针对性的细化设计与检验标准；标准重心集中于船载碳捕集设备本身，上下游配套标准存在断层，二氧化碳港口接收、跨境运输、封存利用等产业链环节行业规范缺失，难以支撑 OCCS 规模化商业落地。此外，国内船舶配套设备、核心零部件、在线监测仪器的统一行业技术标准、检测评定规范尚未配套建立，产品制造一致性、第三方性能核验缺少统一标尺，也在一定程度上制约了 OCCS 装备产业化、标准化推广应用。

（5）港口/岸端配套规则方面

围绕 OCCS 捕集二氧化碳的船岸装卸、岸上存储与运输、封存/利用等全链条构建专项管理与操作标准，建立捕集二氧化碳永久封存核查制度，从港口作业、安全管控、物流衔接、封存核验、政策激励等多维度形成配套保障机制。

同时，建议增设船舶碳捕集产物的上岸处置条款，明确搭载 OCCS 船舶靠港专用作业泊位划定、二氧化碳装卸设备配置标准、船岸连接管路安全操作流程，制定岸基接收设施建设准入要求、卸载标准化操作标准和泄漏应急处置流程；同步完善港口安全监管规则，划定二氧化碳储存处所超压防爆、防泄漏、通风监测等管控标准，明确海事、港口、应急管理多部门联合查验流程，规范船上捕集碳介质上岸计量；在绿色港口扶持政策规则中将 OCCS 配套岸基接收设施纳入港口低碳改造补贴范围，简化搭载 OCCS 船舶进出港、装卸碳产物作业审批流程，同时衔接碳交易相关配套细则，明确船舶 OCCS 交付碳汇计量、登记流程，打通船上捕集二氧化碳岸端资源化利用通道，从作业规范、安全监

管、政策激励三方面形成完整岸端配套规则体系，构建覆盖船舶、港口、封存利用的全流程数字台账，实现 OCCS 全生命周期可追溯、可核查，解决 OCCS 船上捕集碳产物上岸处置的关键堵点，全方位支撑船舶 OCCS 规模化落地应用。

（6）小结

OCCS 规范法规体系是支撑船载碳捕集技术从试点示范走向规模化商业应用的核心制度底座。当前全球处于“船级社规范指南先行、IMO 顶层框架编制加速、国内配套标准跟进”的过渡期，已形成覆盖船舶设备安全、海洋污染防控、温室气体减排、区域碳交易的基础规则雏形，但仍存在顶层强制规则滞后、船岸标准割裂、法律属性模糊、激励机制缺失等结构性短板。

未来体系建设需要坚持国际协同推进与国内自主完善双向并行，对外深度参与 IMO 立法进程，输出我国实船实践与矿化封存、利用创新方案，推动全球统一、技术中性、全链条闭环的海事法规落地；对内统筹海事、船检、港口码头多部门协同，建成适配我国航运产业、对接国际规则的国内标准体系，充分释放 OCCS 在航运中期脱碳阶段的减排价值，支撑全球航运业稳步迈向 2050净零排放目标。

第二章 船载碳捕集技术

2.1 船载碳捕集技术分类

2.1.1 燃烧后捕集

燃烧后捕集是指在燃料燃烧后，从船舶尾气中分离去除二氧化碳的技术。该技术路线无需改变船舶原有的动力类型，改装相对简单，而且可以根据船舶减排需求选择适配的 OCCS，对营运船舶改造友好，是目前应用最广泛的船载碳捕集技术。

（1）化学吸收法

化学吸收法是当前全球船载碳捕集领域技术成熟度最高、实船应用最广泛的主流技术路线，以“醇胺溶液化学吸收+热解吸工艺”为核心，是存量燃油船舶无需更换动力系统即可实现减碳的核心可行方案。其技术原理是利用低温下吸收剂与二氧化碳的可逆化学反应实现捕集，即在常压低温下，船舶尾气中的二氧化碳与吸收剂在吸收塔内反应生成饱含二氧化碳的富液；富液进入解吸塔加热分解，释放出高纯度二氧化碳，解吸后的贫液进入吸收塔循环使用（图 2.1）。

船用适配性方面，化学吸收法是目前唯一被实船验证可在柴油机常压低浓度二氧化碳尾气下实现稳定高捕集效率的技术路线，工艺成熟度高；其劣势在于系统体积大（塔式，高速离心式略小）、重量重，解吸能耗较高；以及运维过程中胺液腐蚀/降解和废液处置等船用特殊问题。

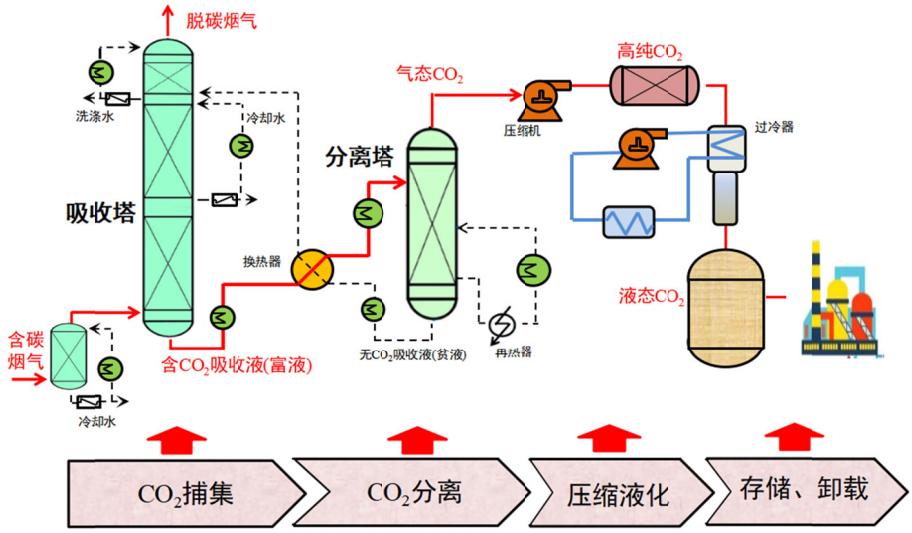

图 2.1 化学吸收法工作原理示意图

（2）物理吸附法

物理吸附法是船载碳捕集技术体系中重要的备选技术路线，以“多孔固体吸附剂物理吸附+变压/变温解吸工艺”为核心，全过程不涉及化学反应与化学药剂消耗，是运维复杂度最低的船舶减碳技术方向之一。其技术原理是利用活性炭、沸石分子筛、金属有机框架（MOF）等吸附材料在不同压力或温度下对 二氧化碳的吸附容量差异，通过压力或温度的周期性调控实现分离，即在加压/低温条件下，船舶尾气中的二氧化碳分子被吸附剂孔隙选择性吸附，氮气、氧气等组分穿透吸附床排出，吸附饱和后通过降压/升温实现吸附剂再生，释放出富集后的 二氧化碳气体，吸附剂可循环重复使用（图 2.2）。

船用适配性方面，物理吸附法具备启停响应速度快、无胺液腐蚀与降解风险、无化学废液处置压力、日常运维流程简便等优势，适配船舶工况波动频繁、船上运维条件有限的应用场景；其劣势在于对柴油机常压低浓度二氧化碳尾气的吸附选择性弱于化学吸收法，捕集效率普遍偏低，变压吸附需配套多级压缩与真空系统，运行能耗偏高，同时变温吸附循环周期长、设备体积偏大，且对烟气中硫氧化物、颗粒物等杂质敏感度高，烟气预处理要求相对严苛。

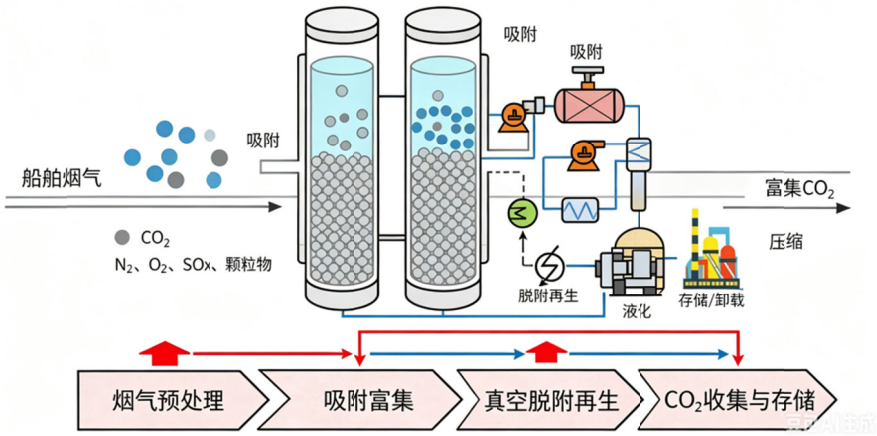

图 2.2 物理吸附法工作原理示意图

（3）膜分离法

膜分离法是船载碳捕集领域兼具紧凑化与低运维特性的重要技术路线，以“高分子选择性渗透膜 + 压差驱动分离工艺”为核心，属于纯物理分离路径，全程无化学药剂参与反应，是适配船舶狭小空间与轻量化需求的差异化减碳方案。其技术原理是利用不同气体分子在膜材料中的溶解扩散速率差异，以膜两侧的压力差为驱动力实现 二氧化碳选择性分离：即在设定压差作用下，船舶尾气中的二氧化碳分子优先透过分离膜形成富集渗透气，氮气、氧气等非目标组分无法穿透膜层并随尾气排出；通过单级或多级膜组件串联可逐步提升二氧化碳纯度，膜组件无需再生工序，可实现连续稳定运行（图 2.3）。

船用适配性方面，膜分离法具备系统体积小、重量轻、模块化程度高、启停响应迅速、无胺液腐蚀与化学废液处置压力、日常运维复杂度低等优势，适配船舶空间受限、工况波动频繁、运维条件有限的应用场景；其劣势在于对柴油机常压低浓度二氧化碳尾气的分离选择性弱于化学吸收法，为实现高捕集率与高产品纯度需配置多级膜串联系统，且渗透侧需配套真空或加压单元，存在较高的能耗代价，同时膜材料对烟气中硫氧化物、颗粒物、水汽等杂质敏感度高，长期运行易出现膜污染与性能衰减，对前端烟气预处理系统的净化精度要

求非常严苛。

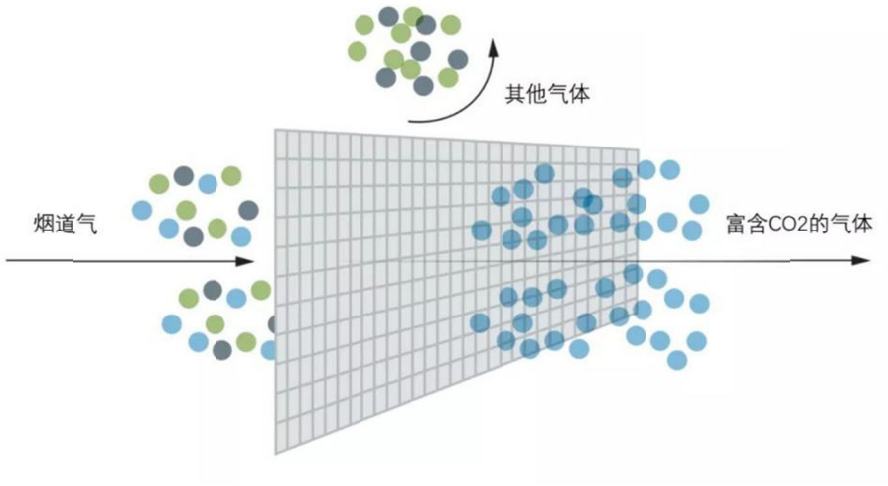

图 2.3 膜分离法工作原理示意图

（4）低温冷凝分离法

低温冷凝分离法是船载碳捕集领域典型的纯物理分离技术路线，以“烟气增压预处理+低温深冷相变分离”为核心工艺，依托 LNG 冷能耦合利用实现低能耗碳捕集，是适配 LNG 动力/运输船舶的特色化减碳技术方案。其技术原理是利用二氧化碳与氮气、氧气等烟气主要组分的沸点特性差异实现选择性分离，分离得到的液态二氧化碳纯度最高可达 99.9% 以上，品质稳定、杂质含量极低，可直接送入船载低温压力储罐储存，无需额外提纯液化工序。

船用适配性方面，低温冷凝分离法全程无需化学吸收药剂，不存在吸收剂降解、氧化腐蚀、废液处置等运维难题，系统运行稳定、运维流程简单，产出液态二氧化碳可直接匹配现有船岸储运体系；其核心劣势在于常规燃油船舶场景下系统能耗高、经济性差，柴油机常压低浓度二氧化碳尾气进行深冷分离不仅捕集效率偏低，还需配套大功率压缩制冷机组，能耗占比显著高于化学吸收路线。同时，烟气中的水汽、硫氧化物与颗粒物易在低温环境下结冰结霜，存在换热通道冻堵风险，对烟气预处理精度与系统运行控制要求较高。

低温冷凝分离法的核心适配场景为 LNG 动力/运输船，全球研发主要围绕 LNG 冷能梯级利用（理论上可降低系统总能耗 30%~50%）、紧凑型高效换热器、烟气预浓缩耦合深冷工艺等方向迭代优化，重点聚焦 LNG 动力/运输船舶场景的工程化落地突破。

（5）矿化法

矿化法是燃烧后船载碳捕集技术体系中兼具碳捕获与永久固化属性的特色技术路线，以钙基、镁基碱性矿物/化合物为吸收介质，通过多相化学反应将尾气中的二氧化碳直接转化为稳定的固态碳酸盐，无需后续液化、高压储运环节即可实现碳的永久封存，是简化 OCCS 产业链、规避液态二氧化碳安全风险的前沿技术方向。其核心反应机理基于碱性氧化物与酸性气体二氧化碳的自发矿化反应，目前船用场景研究以钙基矿化路线为主流，以氧化钙或氢氧化钙为吸收原料，在常压、中低温条件下与船舶尾气中的二氧化碳接触反应，生成性质稳定的固态碳酸钙，反应产物碳酸钙化学性质稳定，常温常压下无分解与泄漏风险，可等同于实现碳的永久固化；部分工艺配套高温煅烧再生环节，将碳酸钙分解为氧化钙循环使用，但船用场景受空间与能耗约束，多采用产物靠港卸载的轻量化路径。除钙基路线外，镁基矿物矿化、海水间接矿化等衍生技术也处于实验室研究阶段，依托天然矿物或海水资源降低原料成本，但反应速率更慢，工程化难度更高。

船用适配性方面，矿化法具备差异化优势，主要体现在：① 碳封存属性突出，产物为固态碳酸盐，无气态/液态二氧化碳泄漏风险，无需配置高压低温储罐、压缩液化单元，系统安全风险显著降低，同时省去了下游二氧化碳提纯、储运的产业链配套要求，尤其适配港口基础设施不完善的航线；② 反应条件温

和，全过程常压运行，对设备承压、密封要求低，系统运维难度较小；③ 碱性吸收剂可同步脱除尾气中的 SO_2、NO_x等酸性污染物，可部分替代船舶脱硫装置，兼具多污染物协同治理能力，实现多污染物一体化脱除；④ 氧化钙原料来源广泛、成本低廉，反应产物碳酸钙可作为建筑材料、水泥原料外销，具备资源化收益空间。同时，矿化法的船上应用也存在明显的场景局限：① 反应动力学速率慢，传统气固接触模式传质效率低，为达到目标捕集率所需反应器体积庞大，船舶狭小空间适配性差；② 吸收剂利用率偏低，单位二氧化碳捕集量对应的原料消耗量大，需频繁靠港补给吸收剂、卸载固态产物，对港口配套的装卸与消纳体系依赖度高；③ 对于吸收剂循环再生路线，高温煅烧环节能耗显著高于胺法解吸过程，系统额外燃料消耗大幅提升，船用场景经济性劣势明显；④ 固态产物的连续排出、密闭收集与船岸转运体系尚未成熟，船上自动化连续运行难度大，船舶摇摆、倾斜工况下颗粒床层的稳定性与反应均匀性仍待进一步验证。

2.1.2 燃烧前捕集

燃烧前捕集是指在燃料燃烧前，将燃料中的碳元素转化为二氧化碳并分离去除，剩余的氢气等清洁气体用于燃烧发电或动力输出。该技术系统设备复杂，改造成本高，不适用于传统燃油发动机船舶，但可与燃料电池系统集成，目前在船舶领域应用较少。

甲烷热催化分解法是燃烧前船载碳捕集的创新技术路线。它以甲烷无氧热裂解催化反应为核心工艺，仅适配 LNG 动力/运输船，从源头阻断二氧化碳生成，区别于其余尾气端的脱碳方案，是 LNG 船队长期深度脱碳的前沿首选路径。其技术原理是在高温无氧密闭反应器内，依托镍基等专用催化剂催化甲烷发生

裂解反应，将甲烷直接分解为氢气和固态单质碳，全过程无氧气参与燃烧，不产生一氧化碳、二氧化碳等气态碳氧化物，固态碳产物直接在船上密闭存储，实现甲烷就地重整与碳固态封存一体化。

船用适配性方面，该技术最大的优势为源头零二氧化碳生成，碳以固态形式直接从体系中分离，脱碳过程本身近零排放，仅系统加热、辅助设备运行存在间接碳排放，无需配套脱硫脱硝前端预处理、无需胺液循环、无二氧化碳液化低温储罐，储运与卸载安全性更高，且产出氢气可掺烧或纯燃，同步降低LNG 动力/运输船甲烷逃逸造成的温室效应；其劣势为应用场景高度受限，仅适配 LNG 动力/运输船舶，无法用于常规燃油动力的存量船舶，裂解反应需要稳定高温热源，系统附加能耗偏高，催化剂长期高温工况下易积碳降低活性。全球研发方向多聚焦抗震动紧凑型裂解反应器、长寿命低成本催化剂、LNG 冷能深度耦合供热、粉尘密闭收集储运系统优化等方面。

2.1.3 富氧燃烧捕集

富氧燃烧捕集是船载三大碳捕集核心路线之一，区别于主流的燃烧后捕集和燃烧前捕集，其核心逻辑为摒弃常规空气助燃，通过空分单元分离空气产出高纯氧气，将部分低温循环烟气与纯氧混合形成低氮助燃气送入主机/锅炉，燃料充分燃烧后烟气仅含水蒸气与高浓度二氧化碳（体积浓度高达 60%~90%），无大量氮气杂质，通过简单冷凝分离即可获得高纯度二氧化碳，无需胺液、固体吸附剂等复杂分离介质，是适配 LNG、甲醇等低碳燃料新造船的中长期潜力船载碳捕集技术路线。

船用适配性方面，其核心技术优势主要在于前端船舶尾气的预处理比较简单，没有吸收塔、解吸塔、贫富液换热器等大型塔式设备，也没有吸收剂的运

维负担，同时还兼容 LNG、甲醇、柴油等多种燃料类型，船舶尾气中的二氧化碳浓度高，分离能耗显著降低（若搭配 LNG 冷能耦合，可进一步优化 25% 以上）。然而，该技术的船用短板也较为明显，主要包括空分装置体积大、空分单元能耗高、烟气循环系统复杂，且富氧环境下发动机燃烧温度过高，对缸体材料与排气系统耐腐蚀要求极高（纯氧燃烧火焰温度超 2200℃，需要大量循环烟气降温），安全管控体系不完善等方面，对于营运船舶改造可行性低，多适用于新造船。目前，船用领域仅完成概念设计与仿真研究，尚未进入实船试验阶段，短期内尚不具备规模化应用条件，属于远期储备型脱碳技术。

2.2 OCCS 及其设备组成

市场上主流的燃烧后化学吸收法的 OCCS 通常由废气预处理单元、二氧化碳吸收/解吸单元、二氧化碳压缩液化单元、二氧化碳存储单元以及辅助单元构成。各个单元在船舶摇晃、盐雾腐蚀与空间受限的严苛环境下协同运转，共同构成了船载碳捕集技术船用适配性的核心要素。

2.2.1 废气预处理单元

废气预处理单元是 OCCS 的前端净化模块，使船舶尾气能够满足 OCCS 的进气要求，以提升吸收剂的活性和 OCCS 吸收二氧化碳的效率。船舶主机排出的废气温度高达 200-400℃，且夹杂大量颗粒物与硫氧化物等杂质，若不经过预处理直接进入吸收塔很可能会导致吸收剂降解、设备堵塞与腐蚀。因此，废气预处理单元必须完成降温、除尘、脱硫与除雾的复合净化任务，使船舶尾气满足后续捕集工艺的严苛进气要求。其核心设备包括废气冷却器/洗涤塔、除雾器、除尘器和引风机（如需）等。

应用于船舶，废气预处理单元必须严格控制废气背压，安装后排气背压应始终维持在主机制造厂规定的限值内，避免影响发动机输出功率与可靠性。同时，系统必须设置废气旁通管路或其他等效措施，确保在 OCCS 故障、停机或检修时，废气能够直接排放，不危及船舶的运营安全。对于使用低硫燃料的船舶，预处理要求可适当简化。

2.2.2 二氧化碳吸收/解吸单元

二氧化碳吸收/解吸单元是 OCCS 化学吸收法的工艺核心，负责从预处理后的船舶尾气中选择性分离二氧化碳并实现吸收剂的再生循环：尾气中的二氧化碳在吸收塔内与胺基吸收剂反应生成富液；富液进入解吸塔加热分解，释放出

高纯度二氧化碳，解吸后的贫液冷却后重返吸收塔循环使用。

吸收塔与解吸塔是传统工艺的两大支柱设备。吸收塔按气液接触形态主要分为填料塔与板式塔。填料塔内吸收剂沿填料表面呈膜状流动，与逆流而上尾气连续接触传质，具有压降较低、持液量小的优势，但在低液流量时易出现沟流现象影响效率。板式塔则依靠按一定间距水平布置的塔板进行分级接触传质，液体在重力下逐板下流，气体在压差下穿过塔板液层，其操作弹性较大，但结构相对复杂。在 OCCS 实船应用中，填料塔因压降优势更为常见。

解吸塔与再沸器构成吸收剂的再生回路。富液在解吸塔内被再沸器加热至100-120℃分解释放二氧化碳。再沸器是系统的能耗巨头，其热源入口需设置切断阀与调节阀，具备远程与现场手动双重控制功能。当塔内压力超限或发生泄漏时，必须立即启动应急切断程序，逐步降低热源负荷以避免设备热应力损坏。为降低解吸能耗，业内持续优化换热网络配置，例如采用余热利用与多段式富液加热耦合闪蒸工艺，或设置填料换热器结合贫富液换热器协同回收热量，显著提升解吸性能。

贫富液换热器与贫液冷却器是热量管理的关键点。高温贫液与低温富液在贫富液换热器中完成热量回收，随后贫液经贫液冷却器降温至吸收所需温度再由贫液泵送回吸收塔。这一循环回路的设计需充分考虑船舶倾斜工况对舱柜液位的影响，吸收剂循环舱需设置液位监测与报警，报警点设置必须覆盖船舶运营中的最大倾角，同时管系需设置残渣柜与止回阀以防止杂质回流。

2.2.3 二氧化碳压缩液化单元

从解吸塔释放的二氧化碳气体需经过压缩液化单元转化为液态，以便于船上储存与后续的卸载运输。该单元由多级压缩机、制冷循环系统、干燥脱水装

置与不凝气脱除装置组成，是 OCCS 能耗集中与工艺控制最为复杂的环节之一。

多级压缩机是将低压二氧化碳气体提升至液化所需压力的核心动力设备。由于压缩过程产生大量热量，通常采多级压缩并配置级间冷却系统。这些压缩热具有显著的回收价值，可通过压缩热回收换热器与吸收式制冷机形成闭合回路，将回收的热量用于驱动制冷循环，从而节约系统整体能耗。

制冷循环系统负责为高压二氧化碳提供冷量实现相变液化。目前船用液化工艺主要存在中压液化与低压液化两种方案对比。制冷技术路线主要包括节流制冷、制冷剂循环与混合制冷。其中，二氧化碳跨临界制冷循环作为一种特殊技术，在低压侧亚临界条件下蒸发吸热，高压侧超临界条件下放热，具有环保与单位制冷量大的优势，但其运行压力较高（临界压力达 7.38MPa），对系统材料与部件耐压要求严苛。为进一步降低能耗，业内正攻关采用兆瓦级级联制冷机替代传统复叠式系统。

干燥脱水装置与不凝气脱除装置是保障液化过程不发生“冰堵”并提升产品纯度的净化子系统。干燥装置去除二氧化碳中的水分，防止其在后续深冷环节结冰冻堵换热通道；脱除装置则分离氮气、氧气等不凝性气体，避免其降低液化效率与二氧化碳纯度。先进的工艺设计中，低温闪蒸器顶部排出的不凝气可作为冷源引入预冷换热器对原料气进行预冷，实现废气的能量回收利用。

应用于船舶，二氧化碳管路应避免通过起居、服务等人员密集处所，且该单元所在围蔽处所必须满足严苛的通风要求，以防泄漏导致人员窒息风险。同时，管系设计与布置需满足相关规范对压力与温度的控制要求。

2.2.4 二氧化碳存储单元

液化后的二氧化碳需要临时储存在船上，待船舶靠港或锚泊后卸载转运。

存储单元的设计直接关乎船舶稳性、结构强度与人员安全。考虑到二氧化碳多以液态存储，存储单元需要承载一定的压力，通常采用独立 C 型液货罐储存。

独立 C 型液货罐是目前 OCCS 应用最广泛、技术最成熟的储罐类型，自身支撑且不构成船体结构一部分，其设计蒸气压力及板厚等需满足《国际散装运输液化气体船舶构造和设备规则》（IGC 规则）的相关要求。在船用布置上，独立 C 型液货罐通常布置在甲板空闲区域，通过鞍座支撑在船体结构上。罐体与鞍座间敷设层压木与环氧胶泥，并进行贴合验证与硬度测试；同时需设置防浮和防自转装置。特别的，针对独立 C 型双耳罐，对结构不连续区域（如双体罐 Y 型接头、壳体与蝶形封头连接区）需要额外关注。同时，为便于利用港口起重设备快速更换与转运，也有部分采用可吊装的罐式集装箱，但其容量相对偏小。

应用于船舶，独立 C 型液货罐的设计需特殊考虑重量分布（近似于集中线载荷），以及液货舱液位高度的频繁变化对晃荡载荷的影响，评估在不同装载工况下的船舶稳性和结构强度，必要时还需要调整不同工况的压载，以确保船舶在营运过程中的航行安全。

2.2.5 控制、监测与安全系统

控制、监测与安全系统相当于 OCCS 的大脑与护盾，确保设备可靠运行、减排目标可核查且船上人员环境安全。

控制系统具备自动启停、运行调节与故障诊断功能。控制单元能有效监测吸收、解吸、压缩及液化存储等主要部件运行状态，根据工艺需求自动控制引风机、胺基吸收剂循环量等关键参数以维持系统稳定；同时保留手动控制功能以便人工干预。控制系统可设计为独立系统或集成至船舶自动化系统，能够识

别运行异常并执行自动逻辑响应，如自动打开旁通管路切断 OCCS 与主机连接，避免背压飙升导致发动机停机。对于周期无人值班机器处所的船舶，其监测报警系统可与船舶集中监测报警系统合并。

监测系统通过实时数据采集与计算验证捕集效果并监控介质状态。核心监测项目包括吸收装置进口与出口废气的二氧化碳浓度、解吸装置出口的二氧化碳纯度等。此外，还需要记录胺基吸收剂的类型、主要成分、pH 值，以及监测处理后的溶液浑浊度，进而评估降解与消耗情况，确保可追溯与核查。

安全系统在危险工况或设备故障时能够通过自动保护、消防防爆与人员防护防止事故升级。OCCS 配备安全装置，在发生既定故障时自动停止系统运行；若安装旁通管路装置，在特定故障（如废气冷却装置入口压力异常升高）时应能自动打开旁通。在消防防爆方面，需合理划分危险区域，电气设备满足防爆等级要求，配备相应消防设施与灭火器材；在人员防护方面，需设置明显安全警示标识，配备快速自给式呼吸器（30 分钟）、洗眼药水、担架等防护与应急设备，加强通风防止二氧化碳在密闭空间积聚，并制定应急处置预案。

2.2.6 辅助单元

辅助单元是保障 OCCS 持续运转的血脉与动力源，主要包括脱碳剂供应系统、冷却水系统和电气系统，其核心挑战在于与船舶原有系统的深度耦合与容量适配。

脱碳剂供应系统涵盖吸收剂的储存、加注、净化回收与过滤功能。吸收剂储存罐容量通常按 30 天消耗量设计，远离热源且通风良好；加注口多位于开敞甲板，设置关闭阀与盲板法兰；净化回收装置与过滤器处理吸收剂长期循环产生的降解产物与固体颗粒物，维持其活性与纯度。系统运行时持续向循环回

路补充吸收剂，停机时富余吸收剂需安全返回储存罐防止管路沉淀变质。考虑到船舶空间狭小，该系统设计趋向紧凑化与模块化。

冷却水系统是 OCCS 各工艺单元维持适宜操作温度的保障。废气冷却、贫液冷却、压缩机级间冷却与液化冷凝等多个环节均需大量冷量。在船舶集成方案上，OCCS 冷却水系统通常接入船舶中央冷却系统的低温淡水回路，通过调节阀控制旁通量实现温度稳定。这种耦合方案避免了单独配置海水冷却管路，降低了腐蚀风险，但必须精确评估 OCCS 满负荷运行时的最大冷却热负荷，确保船舶中央冷却器及低温淡水泵容量裕度充足，不影响主机及其他关键设备冷却需求。

电气系统为压缩机、泵、风机与控制仪表提供动力，其与船舶电站的集成是 OCCS 设计的能耗痛点。OCCS 电气负荷集中于压缩与液化环节，运行功率大，对船舶电网冲击显著。为保障 OCCS 满负荷运行时仍能安全超负荷脱开而不导致全船断电，船舶电站冗余容量通常会从常规的 30%提升至 50%。同时，电气系统还需与船舶主配电板深度集成，优化供电可靠性，并考虑能量回收与节能措施。未来船舶电网兼容岸电、电池与绿色甲醇等多种清洁能源，OCCS 与这些能源的电气耦合可进一步摊薄运行成本。同时，电气设备还必须满足船舶危险区域的防爆等级要求。

2.3 关键技术指标

2.3.1 核心性能参数

OCCS 的性能评估需依托可量化、可验证的工程指标体系，通常在额定负荷与规定工况下测定，涵盖捕集率、系统能耗和产物纯度等方面。

（1）二氧化碳捕集率

二氧化碳捕集率是衡量 OCCS 减排效果的核心指标，指系统捕集的 CO_2 量占进入系统的 CO_2 总量的百分比：

$$\text{捕集率}=\frac{\text{捕集的 } CO_2 \text{ 质量}}{\text{进气中 } CO_2 \text{ 总质量}}\times 100\%$$

净捕集率是考虑整个 OCCS 的能耗带来的额外排放后的净捕集效果：

$$\text{净捕集率}=\frac{\text{捕集的 } CO_2 \text{质量 - OCCS 额外产生的 } CO_2 \text{质量}}{\text{船舶排放的 } CO_2 \text{总质量- OCCS 额外产生的 } CO_2 \text{质量}}\times 100\%$$

（2）二氧化碳纯度

指捕集得到的 CO_2 产品中 CO_2 的体积或质量百分比。高纯度 CO_2 更有利于后续的运输、封存和利用。目前，采用胺吸收法捕集的 CO_2 纯度通常可达到 99%以上。

（3）系统运行能耗

系统运行能耗是衡量船载碳捕集技术经济性与实际减排效益的核心指标，分为总能耗与净输入能耗两个层级。总能耗反映系统自身的能效水平，通常由热能和电能两部分组成。净输入能耗是指结合船舶动力系统与布置条件，扣除船舶可回收的余热、冷能等冗余能量后，需要船舶额外供给的净能量。二者的核心差异在于前者反映设备自身技术水平，后者反映船舶安装后的真实能源代价。

（4）系统体积和重量

系统体积和重量是指 OCCS 及其设备组成所需要占用的船舶空间和载重，这会影响船舶的载货能力和经济性。对于存量船舶改造，空间限制往往是重要约束条件。

（5）运维可靠性

平均无故障时间（MTBF）；系统可用率；维护周期和维护工作量。

2.3.2 减排效果评估

OCCS 运行本身需要消耗能源，产生额外的 CO_2 排放，因此评估其实际减排效果时需要考虑净减排量。

净减排量计算公式：

净减排量=捕集的 CO_2 量-OCCS 额外产生的 CO_2 排放量

影响净减排效果的因素包括：

（1）净捕集率：净捕集率越高，净减排量越大；

（2）系统净能耗：能耗越低，额外排放越少，净减排效果越好；

（3）燃料类型：不同燃料的碳排放因子不同；

（4）船上资源综合利用：充分利用船上资源（如发动机余热）可显著降低系统的额外燃料消耗。

减排效果的合规价值依赖于国际海事规则与碳定价机制的抵扣认可。为确保净减排量核算的真实可信，CCS 正在推动建立统一的覆盖捕集、运输、封存/利用全链条的监测、报告与核查体系，确保每一吨被认可的减排量都真实、安全且永久，为国际规则制定输出中国方案与数据支撑。

第三章 OCCS 在不同船型的应用

3.1 不同船型的应用特点

OCCS 的实船应用并非"一刀切"方案，不同船型因主尺度、船舶布置、空间布局、动力配置、系统集成、运营模式等差异，其技术路径、船型方案和技术要求也各不相同。

3.1.1 LNG 运输船

LNG 运输船是航运业中与 OCCS 适配性最佳的船型之一，其独特的船型结构和货品禀赋为碳捕集系统的能耗优化提供了天然优势。

（1）冷能资源禀赋独特

LNG 冷能与 OCCS 的耦合是 LNG 运输船最具特色的技术优势。LNG 储存温度约-162℃，在气化过程中释放大量高品位冷能，这是其他船型完全不具备的"免费"冷源，可回收应用于二氧化碳液化，以大幅降低二氧化碳液化的制冷能耗。

（2）余热资源充足

LNG 运输船排烟余热资源密度显著高于常规燃油船舶，余热资源相对更为丰富，可满足基于胺基的化学吸收法解吸所需的大量蒸汽需求。同时，若采用余热-冷能协同集成方案，还可通过有机朗肯循环（ORC）利用中低温余热发电，补充压缩液化单元的电力需求，进一步降低系统整体能耗。

（3）低温系统运维经验成熟

LNG 运输船船员日常多承担 LNG 液货装卸、蒸发气（BOG）处理、低温储罐运维等作业，对低温流体储存、绝热系统维护、压力容器检测、泄漏应急处置等技能有成熟的操作体系和培训机制，与 OCCS 液态二氧化碳存储系统的

运维要求高度适配。船员已掌握的低温管道保冷检查、储罐压力调控、冷泄漏处置等技能，可直接复用至 OCCS 运维管理，无需从零搭建全新培训体系，大幅降低了系统长期运行的人员能力门槛与安全风险。基于现有 LNG 液货安全管理体系，仅需补充二氧化碳介质特性、卸载作业流程等针对性内容，即可快速建立 OCCS 全生命周期运维规程，缩短新系统适配周期。

（4）甲板空间相对充裕

LNG 运输船的甲板布局中，液货舱穹顶区域占比约 40%，剩余管廊区、上层建筑周边、舷侧等区域仍有较多空间可容纳 OCCS 的吸收/解吸塔、低温储罐等核心设备，无需占用货舱容积。以典型的 17.4 万方 LNG 运输船为例，可布置甲板空间超 1000 平方米，能够轻松容纳日捕集量约 100 吨级的全流程 OCCS 设备，结构加强重量可控制在 3%以内，且甲板原有的管路系统可与 OCCS 废气、胺液、蒸汽等管系协同布置，大幅缩短管路的长度与压损。

3.1.2 集装箱船

集装箱船是专为高航速与大运量设计的船型，主机功率大，燃料消耗多，二氧化碳排放量高。其船型特点多采用大开口货舱设计，甲板大面积用于堆叠集装箱，船体线型修长、长宽比大，方形系数偏小，干舷较高，整体结构规整，艏部常采用球鼻艏优化高速阻力，尾部多为双桨或单桨大马力推进配置。超大型集装箱船通常具有更为开阔的甲板，但空余空间极度稀缺，基本全部被箱位所覆盖，仅艉部、机舱上方存有少量闲置空间。

相较于散货船、油轮等常规船型，集装箱船在 OCCS 应用中具备显著的运营与工况优势。首先，动力工况适配性更强。集装箱船多以远洋干线运输为主，主机功率大、工况平稳，航行过程中负载波动小、持续高负荷运行，废气排量

稳定且流量充足，可稳定为 OCCS 提供热源与气源，捕集效率高，适配连续式碳捕集作业需求。其次，航线与港口配套优势突出。干线集装箱船多执行欧亚、跨太平洋等固定航线，港口挂靠体系成熟、航行周期规律，船舶在港、航行时间可控，作业标准化程度高，且多数核心枢纽港已试点液态二氧化碳接收、储存设施，具备常态化碳捕集产物卸岸的基础条件。另外，设备集成适配性好。集装箱船没有复杂的液货管系和装卸设备的干扰，废气处理系统布局简洁，可实现脱硫与碳捕集的一体化集成，改造难度相对较低，改造成本与施工周期更具优势。

但是，集装箱船的结构性短板不可避免的成为 OCCS 规模化应用的核心瓶颈。第一，集装箱船甲板、货舱完全服务于集装箱装载，空余空间极其有限，加装储罐与捕集设备必然会挤占箱位，直接降低船舶载货量，造成经济损失。第二，集装箱船对载重、稳性敏感度极高，OCCS 设备及储罐（含液态二氧化碳）会改变船舶的重量重心，影响航行稳性。第三，余热利用效率受限。虽然集装箱船的废气排量稳定，但机舱布置紧凑，余热回收设备布置空间不足，充分高效回收余热资源存在较大的挑战。此外，集装箱船甲板上层层堆叠的集装箱也会遮挡设备通风空间，易造成 OCCS 设备散热不良，增加设备故障风险。

总的来说，集装箱船凭借稳定的动力工况与成熟的港口配套，具备良好的 OCCS 应用基础，但结构性空间与载货约束在一定程度上影响其规模化推广。未来 OCCS 优化需聚焦系统设备小型化、集成化、轻量化与场景适配化，充分发挥其工况优势，以破解应用短板，成为在航运脱碳中 OCCS 应用的主力船型。

3.1.3 散货船

散货船是干散货远洋主力运输船型，涵盖灵便型、巴拿马型、好望角型等

细分船型，核心设计围绕矿石、煤炭、粮食等大宗散货装卸、存储开展，与LNG 运输船、集装箱船、油船存在显著结构差异。散货船甲板空间呈碎片化布局，船体中部甲板区域多被舱口盖、克令吊、物料通道等设施占用，仅船艉机舱周边存在零散空余，难以布置大型塔式 OCCS 机组与液态二氧化碳储罐。

优势方面，散货船货舱改造兼容性相对较强，可牺牲局部货舱空间用于布置 OCCS 及其设备。对于大型/超大型散货船，其尾部上建两侧的平台甲板和尾部货舱甲板区域的空间也是可以利用的。其次，散货船的横纵交错的船体结构特点决定了加装 OCCS 的改装施工量相对较少（特别是高速离心式 OCCS）。最后，散货船主机燃油硫分管控成熟，烟气杂质含量相对较低，吸收剂的降解损耗更小，能够节省运部分维耗材成本。

同时，散货船运营工况波动较大，船舶空载、压载、满载工况吃水差值大，主机负荷随装卸货、跨洋航行、减速避浪波动频繁；进出港、候泊阶段长期低负荷运行，主机排气流量、温度和二氧化碳浓度的波动幅度不规律，余热输出不稳定，OCCS 解吸环节需辅助锅炉等额外供能，进而导致系统整体能耗提升，净捕集率下降。另外，散货船航线运营不确定性高，挂靠港口不固定，大部分中小型港口无液态 二氧化碳接收、过驳设施，捕集产物的卸岸配套保障不足。最后，散货船船员日常作业聚焦散货装卸、压载水调节等，缺少 OCCS 相关操作基础，吸收剂泄漏、低温伤害、人员窒息等应急处置能力不足，安全运维管理成本更高。

基于上述分析，散货船应用 OCCS 的未来优化方向主要包括以下方面：

（1）优先推广小型化、撬装式碳捕集技术。如高速离心式 OCCS，设备占地面积可缩减 30%左右，适配碎片化甲板，改装适应性更强；集装箱式模块化

单元，可零散布置于吊机间隙、机舱两侧空地，无需大范围改造船体结构。

（2）变负荷自适应余热耦合系统优化。研发蓄热缓冲装置，存储主机高负荷阶段多余余热，补偿低负荷航行热量缺口，同步配套热泵辅助解吸技术，有效降低系统能耗，提升二氧化碳净减排效率。

（3）航线分级运营调度优化。针对固定矿砂、煤炭等专线散货，可匹配沿线港口二氧化碳接收点，缩小船上储罐容积、减少载货损失。对于远洋不定期散货船可搭载智能负荷调控系统，低负荷时段自动下调捕集率，优化系统能耗。

3.1.4 油化船

油化船包含成品油船、化学品运输船、VLCC 原油船等细分船型，以密闭液货舱运输液态油气、化工原料为核心，船型布局、能源配套、运维体系天然适配低温、高压设备，是 OCCS 适配性仅次于 LNG 运输船的船型。油化船甲板连续可用空间充裕，船体中部、艏部拥有大面积无遮挡的开敞甲板，管路通道宽阔，可完整布置吸收塔、解吸塔、多级压缩液化机组等 OCCS 设备，布局自由度高。液态二氧化碳储罐可布置于上层甲板区域，不占用下方液货舱容积，仅小幅改变船舶重量分布，通过压载水微调即可平衡稳性，载货吨位的损失几乎可以忽略。

船舶布置方面，油化船完整划分防爆危险区，配备可燃、有毒、窒息气体监测报警系统，消防通风、洗眼淋浴和防寒防护等装备齐全，安全管理体系完善，与 OCCS 低温储罐、胺液系统安全要求高度匹配。同时，油化船蒸汽与余热资源充沛稳定，标配的大容量蒸汽锅炉可稳定产出高温蒸汽，且主机高负荷运行时废气余热充足（余热锅炉可补充蒸汽供给），双热源保障 OCCS 胺液循环持续供热，极大优化了系统整体能耗。船员操作方面，低温压力容器运维体

系成熟，熟练掌握低温介质管控、压力容器巡检、泄漏应急处置等操作，人员培训成本极低。

由于油化船的危险区域要求相较于 OCCS 更为严苛，这使得 OCCS 及其主要设备（如压缩机、电气仪表、储罐附件等）可能需要满足高标准防爆要求；有些化学品舱与液态二氧化碳储罐需设置防火/气密隔离，相应管路、电气独立分区布置，成本相对更高。对于中小型化学品船，其甲板管线密集、设备繁多，空余空间有限，设备布置相对困难。此外，油化船甲板上可能存在的各类酸碱和有机溶剂的挥发会加速 OCCS 设备腐蚀，导致防腐维护周期缩短，运维耗材成本提高。

综合以上，OCCS 应用于油化船，还需在锅炉/余热协同集成和防爆系统一体化复用方面进行优化。首先，在设计阶段打通锅炉、主机废气余热与 OCCS 解吸设备间的蒸汽管网，增设蒸汽分级阀，高负荷时优先利用主机废气余热，低负荷时自动切换锅炉，同步配套余热发电模块为压缩液化单元供电，进一步降低系统能耗。其次，系统统筹船舶原有惰气、气体探测、消防系统与 OCCS 安全联锁，尽可能共用通风、报警、应急喷淋设施，减少设备重复配置，降低改造投资与维护成本。

3.1.5 小结

上述分析基本覆盖了现阶段市场主力船型的 OCCS 应用全貌。整体来看，LNG 运输船是航运业中与 OCCS 适配性最佳的船型，油化船次之，集装箱船的空间受箱位损失制约但班轮模式有利于液态二氧化碳的卸载，散货船挑战最大，但高速离心式等紧凑型技术正在加速破局。随着 EU ETS 等碳定价机制对 OCCS 减排贡献度的逐步认可，船载碳捕集技术正从示范验证阶段加速迈向规

模化商业化部署。

3.2 新造船 OCCS 设计与集成

3.2.1 设计理念与原则

新造船安装 OCCS 的核心设计逻辑区别于营运船改装的被动适配，一般采用**源头一体化统筹**、**能效最优**、**安全前置**、**全生命周期经济**四项设计理念与原则，将所有设计环节同步纳入船舶总体方案、动力系统集成、船体结构/船舶稳性校核等方面，规避存量船改装空间受限、结构补强成本高、能源耦合效率低等先天缺陷，同时适配 CII、GFI、EU ETS、FuelEU 等短、中期航运减排监管要求，为船舶在其生命周期内的营运提供稳定的二氧化碳减排能力支撑。

（1）源头一体化统筹理念

源头统筹是新造船区别于营运船的核心底层逻辑。在船舶初步设计阶段即同步引入 OCCS 全套设备参数、重量、占用空间、热源需求，联动船体、轮机、电气、碳捕集设备厂商多专业协同，同步校核主机排气背压、余热产出、甲板承载、舱容占用、重心变化等约束条件，优化总体布局。

同时，新造船设计能够统筹覆盖全船资源匹配。热源上提前规划主机废气锅炉、辅助锅炉蒸汽分配管网；冷源预留中央冷却系统扩容接口；电力系统预先核算压缩机、循环泵、制冷机组峰值负荷；货舱/甲板空间根据目标捕集率预留充足安装空间，实现船舶运营与碳捕集减排各尽所能。

（2）能效最优原则

能效优化贯穿新造船 OCCS 全流程设计，通过与船舶动力系统、电气系统和控制系统的深度集成，充分利用船舶综合资源，降低系统实际运行能耗，提升二氧化碳净捕集率，适配碳强度管控指标。

首先是余热梯级利用优先原则。根据主机排烟温度梯度分层匹配 OCCS 各

个模块的热能需求：高温烟气优先供给解吸塔再沸器，中温余热用于贫富液换热器预加热，低温余热回收用于供暖和淡水制备等，最大限度减少辅助锅炉燃油消耗。对于新造 LNG 运输/LNG 动力船，同步规划 LNG 气化冷能与二氧化碳液化单元耦合换热系统，利用-162℃低温冷源替代大功率制冷机组，可极大降低 OCCS 的液化能耗。其次是低阻力烟气通路设计。主机废气至预处理单元管路尽可能直线化布置，减少弯头、变径带来的压力损失，严格控制 OCCS 全流程排气背压在主机厂商允许限值内，避免主机功率折损。第三是能量回收集成。在压缩液化单元配套压缩热回收装置，回收多级压缩产生的高温热量反哺胺液再生，形成船上能量循环。最后，能效设计还需要根据船型的不同进行差异化适配，实现信息共享和协同控制：LNG 运输船、油化船依托充足的甲板空间和锅炉蒸汽，相对适配常规塔式 OCCS 方案；集装箱船、散货船需兼顾载货需求，且机舱布置较为紧凑，相对适配小型高速离心式 OCCS 方案。

（3）安全前置原则

新造船可以将 OCCS 安全标准嵌入船体初步设计，而非后期追加防护设施，全面覆盖船体结构强度、低温压力容器、腐蚀性胺液、二氧化碳窒息、船舶稳性和 防爆等核心风险源，严格遵循 IMO 国际规则与船舶拟航行区域的法规要求。

此外，初始设计阶段可以精准划分 OCCS 危险区域，主要包括胺液存储间、压缩液化单元、液态二氧化碳储罐区域等，防爆区域内的电缆、照明、控制仪表等选用对应的防爆等级设备；密闭设备间强制配套机械通风系统，设置高低浓度二氧化碳、有毒胺蒸气二级在线监测报警装置，报警信号同步接入船舶综合监控系统；设置防泄漏收集围堰、洗眼喷淋、防寒防护设备固定点位；管路

保温、绝热支撑结构等在船体建造阶段一体成型，避免后期加装占用通行空间。最后，船舶横摇、纵摇等极限工况下的结构强度和设备稳定性均纳入校核，确保 OCCS 的运维适配远洋复杂海况。

（4）全生命周期经济原则

新造船在设计阶段可以通过平衡初始建造成本（CAPEX）与长期运营成本（OPEX），兼顾短期建造投入与寿命期内的营运碳收益。

一是采用模块化标准化设计（如预制撬装单元），船上仅完成设备安放、管线对接等相对简单施工，大幅缩短 OCCS 的安装周期；二是预留拓展空间，同步推行“OCCS Ready”预设设计方案，分为完整预装、半预装、纯预留三档方案，对于短期无大规模减排需求的船舶仅为设备管路预留空间和电力扩容，后期碳价上涨、法规收紧时可快速完成设备加装，适配不同船东投资节奏；三是设备材料轻量化。吸收塔、解吸塔、压缩液化单元、低温储罐等大型设备材质采用高强度耐高/低温、耐腐蚀合金钢，减少船舶增重，简化压载水调节，降低载货量损失；四是安全运维友好设计。所有阀门、检修口、取样点位尽可能布置在通行甲板高度，预留吊装通道，减少高空作业和密闭舱室检修作业频次，降低人工操作风险和系统运维成本。

3.2.2 总体布置核心要素（含预设）

新造船总体布置需针对不同船型进行差异化统筹规划，聚焦船船舶空间禀赋、载运需求、安全分区、强度和稳性等方面，主要分为核心碳捕集单元、液态二氧化碳储罐、辅助单元和预留设计四大模块。

（1）核心碳捕集单元

吸收塔、解吸塔等核心碳捕集单元的布置优先选择在靠近主机排烟出口，

缩短烟气输送管路，降低排气阻力，减少不必要的风险。LNG 运输船、油化船上层建筑两侧的平台甲板可用于布置上述碳捕集单元；集装箱船则受尾部狭小甲板约束，可采用烟囱一体化集成方案，将碳捕集单元与烟囱侧平台整合，避免占用箱位；散货船可优先考虑船艉上层建筑两侧的平台甲板，远离货舱区域，避开克令吊作业范围，不干扰货舱装卸操作。

人员通行与检修空间方面，设备四周应预留安全操作通道，塔体顶部应设置检修平台与直梯，周边避免布置救生艇、救生筏、应急通道等关键救生设备，以防运维作业与船舶应急操作冲突；通风方面，解吸塔、压缩机单元等高温模块布置应避开上层建筑的封闭舱壁、集装箱堆叠等围蔽/半围蔽区域，保证自然通风；结构强度方面，所有大型设备的基座应与船体纵桁、强横梁等强构件对齐，并根据局部结构强度校核结果视情增加甲板厚度、增设局部加强筋，确保船体结构强度满足要求。

（2）液态二氧化碳储罐

液态二氧化碳储罐是全船重量集中单元，其布置位置直接影响船体重量分布、船舶稳性、载货能力等方面，是新造船布置设计的核心关注点。

首先，液态二氧化碳储罐布置应优先考虑对船舶总纵强度的影响降至最低，并尽可能减少船舶横摇、纵摇等恶劣工况带来的晃荡载荷干扰。同时，通过测算储罐满载、空载两种极端工况下的全船重心高度，优化压载水方案，避免重心过高导致船舶横摇加剧。对于双储罐设计，建议左右舷对称布置以降低对船舶稳性的影响。其次，储罐与起居处所、明火源等区域的最小安全距离应满足相关法规规范的要求，储罐下方应设置集液盘，收集的液态介质通过废液输送管路至专用回收舱。此外，可能存在二氧化碳泄漏的区域应设置机械通风，配

备二氧化碳浓度检测和报警系统；储罐周边考虑预留船岸连接管路接口、液态二氧化碳装卸管路等，减少后期的施工改造。

（3）辅助单元

脱碳剂供应系统、冷却水系统和电气系统等作为不可或缺的配套辅助单元，对于 OCCS 的安全运维同样至关重要。胺液舱应选用密闭液舱，远离高温热源，配套液位、温度、泄漏在线监测；OCCS 全套监控设施应布置于通风良好的非防爆区域，与船舶机舱集控室互联互通，并设置安全通道和应急逃生路线；废水废液收集舱就近布置于各设备下方，管路采用重力回流设计，减少输送泵能耗；所有辅助舱与货舱/液货舱设置有效隔离，避免介质交叉污染风险。

（4）预留设计体系

OCCS 的预留设计是新造船过渡型的主流布置方案，分为三级预设标准，在船体建造阶段同步实施，可申请对应的“OCCS Ready”附加标志。预留设计的核心优势主要在于相比营运船后期改造，能够大大减少船体钢板切割、局部结构加强、管路重新布置等施工环节，大幅缩短船厂施工周期和船舶停航时间，同时，预设方案的建造成本相对较低，远低于后期改造的资金投入。

OCCS Ready1：初期设计阶段即综合考虑船舶安装 OCCS 所需布置和维修的空间，以及可能对船舶布置、设备、电力负荷、结构强度、稳性、吨位和载重量等方面带来的影响，船上实际并未安装 OCCS 及其相关设备，仅需在船上预留空间和电力负荷裕量，不做结构与管路预埋，适用于短期无减排需求、预算有限的船东。

OCCS Ready2：在 OCCS Ready1 的基础上，预留设计方案更为全面，需完成相关图纸资料的详细设计，但船上可以暂不安装 OCCS 及其相关设备，建议

完成吸收塔、解吸塔、液态二氧化碳储罐等主要设备的局部结构加强与主要管路的预埋，减少后期实际改装的工作量和施工周期。该方案适用于对 OCCS 前景看好，基本确定在不久的将来进行安装的船东。

OCCS Ready2(X)：在 OCCS Ready2 的基础上，船上实际安装了 OCCS 相关的主要设备，如船体结构和相关支撑结构已进行加强（S）；吸收塔、解吸塔及吸收剂循环系统已安装（A）；二氧化碳压缩液化系统已安装（L）；液态二氧化碳储罐已安装（T）等，极大的降低了后期 OCCS 的加装成本。该方案适用于对减排有迫切需求，确定在近期进行 OCCS 安装的船东。

3.2.3 新造船 OCCS 系统集成优化

新造船可实现 OCCS 与船舶动力、余热资源、电气系统、监控报警、消防安保五大系统深度原生集成，不存在管路布置冲突、电气负荷不足、信号不兼容等痛点，能够保障系统长期运行的稳定性。

（1）动力系统与余热资源集成优化

首先，主机、辅机、锅炉排烟总管预留标准化三通，配套自动切换废气旁通阀，OCCS 停机时烟气直接排出，不影响主机正常工作。其次，余热梯级耦合集成设计，高温烟气优先供给解吸塔再沸器，中温余热用于贫富液换热器预加热，低温余热回收用于供暖和淡水制备等。第三，配套余热回收增效装置，在二氧化碳多级压缩单元增设压缩热回收换热器，回收压缩产生的热量回流至解吸再生回路，减少辅助锅炉蒸汽消耗。最后，在船舶低航速航行、进出港低负荷工况下，余热不足时系统可自动下调二氧化碳捕集负荷，同步启动辅助锅炉补热，实现主机与 OCCS 负荷动态匹配。

（2）电气系统集成优化

在船舶电站选型计算中，可将 OCCS 压缩机、循环泵、制冷机组峰值负荷纳入总用电核算，辅机发电机组预留 40%~50%冗余容量，电站容量前置匹配，避免改装船后期新增辅机、扩容配电板。同时，采用高低压分区供电，防爆区域采用独立防爆配电回路，与机舱常规动力回路物理隔离，设置独立短路、过载保护。对于大功率压缩机可配置变频节能模块，随二氧化碳产出量自动调节转速，降低平均电耗。余热回收发电方面，大型新造船可配套 ORC 有机朗肯循环发电装置，利用主机低温余热、压缩余热发电，进一步减少船舶燃油消耗，提升 OCCS 全流程净捕集率。

（3）船舶综合监控系统集成优化

新造船的船载碳捕集控制系统可原生接入船舶机舱集中监控报警系统，实现数据互通和联动保护。首先，实现全参数统一监测。二氧化碳进出口浓度、捕集效率、胺液 pH 值、储罐压力温度等相关运行参数统一传至船舶数据平台，并同步对接 CII 碳排放核算系统，自动生成碳减排周期报告，满足 IMO MRV 监测核查要求。其次，采用多级联动保护逻辑。当主机超背压、储罐超压、胺液泄漏、二氧化碳浓度超标时，系统自动执行分级保护，按照先下调捕集负荷，再切断烟气进气，最后开启废气旁通的流程，确保主机安全。最后，设置远程运维接口预留。新造船控制系统可内置船岸无线传输模块，向公司总部、设备厂商实时推送运行数据，实现远程故障诊断、参数优化调整，提升船上运维安全，降低系统运行能耗。

（4）消防、通风、安全系统一体化集成

新造船一般不单独增设 OCCS 相关安全设备，而是在船舶原有消防、通风、安全系统的基础上拓展适配 OCCS 防护需求，控制设备增量成本。如原有固定

二氧化碳消防系统管路预留拓展接口，可覆盖碳捕集单元、二氧化碳储罐等区域。对于全船有毒/可燃气体探测网络须新增胺蒸气和二氧化碳监测点位，报警阈值分级设定；对于机械通风系统，风量按 OCCS 密闭舱室最大介质泄漏量核算，正常运行与事故排风双模式自动切换；对于洗眼器、应急喷淋、防寒防护装置，可统一纳入船舶应急物资规划，与救生设备协同布置，减少安装成本。

3.2.4 小结

新造船 OCCS 设计与集成是船舶应用船载碳捕集技术落地的核心场景，依托新造船的源头一体化设计优势，可从船体总体布置、系统集成优化等方面规避营运船改装的结构性短板，前置开展强度计算、稳性校核、风险评估等，统筹考虑系统能耗对船舶续航、燃料消耗、电力负荷的影响，同时搭配 OCCS Ready 分级预设方案，兼顾短期建造成本、中长期航运合规和碳收益需求等因素，是未来远洋船舶规模化配套碳捕集的主流技术路线。

目前，已经成功交付营运的新造示范船（“山东鑫盛”轮）已验证全套设计方案的工程应用可行性，为后续不同船型新造船的 OCCS 设计与集成提供成熟工程参考。

3.3 营运船 OCCS 改装

营运船加装船载碳捕集系统受既有船体结构、空间布局、动力配置、电气系统约束，改装存在空间受限、结构补强、能源裕度不足、风险防控等多重痛点，需重点关注改装方案**可行性评估**、改装**实施核心要素**、改装**风险与防控对策**等方面。

3.3.1 可行性评估

可行性评估是营运船改装前置核心工作，所有加装工程必须完成技术、经

济、法规、运营四维综合评审，评估体系覆盖船舶自身硬件、航线运营、全周期成本、海事合规四大板块，单一板块评估不合格即可认为暂不具备改装条件，整体评估逻辑区别于新造船设计。

（1）船舶硬件可行性评估

首先是有效改装空间评估。核算拟安装的 OCCS 及其设备最小占地需求，实测尾部结构、机舱区域、上层建筑区域、主甲板等可利用区域是否有空间可以容纳。然后，基于 OCCS 及其设备的初步改装方案，同步核查船体结构强度是否需做加强、船舶稳性是否满足衡准要求、驾驶室视线是否不受影响，并同时对改装方案的消防通风进行评估，包括甲板防爆危险区域划分，可燃气体、二氧化碳气体和有毒气体监测点位覆盖范围核查，以及机械通风、应急喷淋、防火分隔等是否满足法规规范要求。

其次是动力系统与余热资源校核。根据主机全工况排烟流量、温度、背压上限，核算 OCCS 工作所需热负荷，评估船舶可供利用的余热资源，初步估算系统运行能耗。对于 LNG 运输船/LNG 动力船，LNG 冷能的利用潜力也是需要额外考虑的。同时，还应校核排烟管路改造的可行性，新增废气旁通管路或等效替代措施以确保 OCCS 故障时不会影响船舶的正常营运。

第三是船舶稳性与结构强度校核。按照船舶装载手册/倾斜试验报告测算 OCCS 设备重量、液态介质满载重量、重心高度变化等，同时对满载、空载、压载等典型工况进行配载计算，确认船舶稳性和结构强度均满足规范要求。此外，还应对二氧化碳储罐等较重的设备所在位置处进行局部结构强度校核，并根据计算结果视情对船舶进行结构加强。

最后是电气系统裕度核算。加装 OCCS 将显著增加船舶电站负荷，其配套

的二氧化碳压缩机、制冷机组及循环泵等设备在运行中持续耗电，其中二氧化碳液化设备占比较高。若电站余量不足，应评估新增辅机或加装轴带发电机的可行性，并同步核定配电板扩容、电缆敷设及保护装置调整等配套改造工程量。

（2）航线运营可行性评估

港口配套设施匹配方面，系统梳理船舶全年挂靠港口，统计具备液态二氧化碳船对岸/船对船卸载设施码头占比。对于多数港口无接收终端的场景，二氧化碳储罐容积需考虑扩容，且载货损失显著，运营成本偏高。航行工况特征方面，长期远洋高负荷船舶余热稳定，净捕集率相对更高；近海短途、频繁进出港船舶主机低负荷占比高，余热供给波动大，系统能耗相对更高。如矿砂、煤炭专线散货船运营工况稳定，改装收益优于不定期散货船。船舶剩余寿命方面，需根据改装后的船舶营运周期进行碳收益和 OCCS 成本核算，评估改装价值。一般船龄在 10 年左右的大型远洋船舶改装价值相对较高。

（3）经济性可行性评估

构建船舶改装 OCCS 的全生命周期成本收益测算模型，核心指标包含 OCCS 改装投资成本、年度运维成本、碳减排收益、停航损失、载货损失等。

其中，改装投资成本涵盖设备购置、船体改造、安装施工、检验认证和船员培训等费用。运营成本则包含额外燃料消耗、吸收剂更换、设备维保、液态二氧化碳卸载处置，以及人工、保险等费用。收益来源主要为碳减排收益、EU ETS 配额节省、CII 评级提升等方面。同时，按当前碳价据实测算 OCCS 投资回收期，并视情对比不同碳捕集设备配置、不同碳捕集能力，以及不同技术路线下的单位减排成本，优先选择与目标船舶最为适配的改装方案。

（4）法规合规可行性评估

对照 MARPOL、SOLAS 等国际法规和船级社入级要求，审核 OCCS 改装相关的船体、轮机、电气等全套图纸资料，更新总布置图、装载手册、防火控制图等，重点核查加装 OCCS 后新增的塔体设备高温、吸收剂泄露、二氧化碳低温、窒息等风险要素及对应的风控措施和应急预案，确保满足相关法规规范的安全要求。

3.3.2 改装实施核心要素

营运船改装受原有船体、设备边界约束，无法像新造船实现一体化统筹，方案设计通常遵循模块化优先、船体最小改动、系统设备共用等思路，主要涵盖总体布置、动力余热、电气控制、辅助系统、安全防护等核心要素。具体改装实施立足船型差异化适配布局，严控船体改造与载货损失，优化船舶综合资源利用及电气防爆联动体系，升级安全监测应急设施，压缩船舶停航周期，实现 OCCS 的营运船改装安全、高效、经济落地。

（1）总体布置方面

优先选用预制一体化撬装单元，将吸收、解吸、贫富液换热等集成单套模块，大幅缩减现场切割、焊接工程量，提高安装效率。但应注意避开船体应力集中区，基座与强横梁、纵桁等强构件对齐，尽可能减少局部补强工作量。液态二氧化碳储罐根据营运船船型特点和原有船舶布置，调整罐体尺寸参数进行差异化布置，同时注意其与起居处所、明火源等区域的最小安全距离应满足相关法规规范的要求，储罐下方应设置集液盘，并同步铺设废液回收管路。废液舱利用原有闲置压载水舱改造，不新增独立舱室占用载货空间。此外，排烟、冷却水管路优先复用船舶原有管路，新增管路多沿舷侧、机舱外壁铺设；甲板开孔仅保留设备吊装、管路接驳点位，开孔完成后同步加厚补强板，恢复原甲

板的水密、气密完整性；电缆沿原有电缆通道敷设，新增防爆电缆独立桥架，不占用原有动力线缆空间，尽可能减少对原有船体结构和管路系统的改造。

（2）资源利用方面

优先改造船舶原有的废气锅炉管路，增设蒸汽分流支路供给解吸再沸器；余热不足的船舶可配套小型辅助锅炉，不改动原有锅炉本体。对于 LNG 营运船可增设冷能换热管路，连接 LNG 气化回路与二氧化碳液化单元，降低制冷机组负荷。同时，考虑配套余热储能缓冲罐，解决低航速余热不足问题。此外，主机额定工况下排气背压增幅控制在厂家允许上限以内，超标船舶可加装变频引风机，与捕集模块一体化布置，视情设置减振基座，避免与船体共振。

（3）电气系统方面

防爆区域采用独立防爆配电盘，与机舱常规动力回路物理隔离；大功率压缩机配置变频模块以降低平均用电负荷；原有辅机余量不足时，可增设小型轴发或柴油辅机。新增的 OCCS 设备注意防爆、接地防静电等安全要求，能够实现主机超背压、储罐超压、胺液泄漏等分级联锁停机，原有报警屏幕拓展二氧化碳浓度、捕集率等参数显示，不单独增设大型独立控制台占用空间。

（4）安全系统方面

在碳捕集单元、液态二氧化碳储罐区域新增二氧化碳、胺蒸气、可燃气体多点探测器，报警信号同步推送驾驶台、机舱、消防控制室，高风险区域增设声光高分贝报警装置。通风方面，密闭设备间强制通风要求，事故工况时自动切换最大风量，甲板开放区域增设移动式通风设备存放点位。消防防护方面，原有固定二氧化碳消防系统拓展覆盖 OCCS 区域，新增防寒服、空气呼吸器存放柜，洗眼喷淋装置布置于储罐两侧舷边位置处，改造阶段同步完成防火分隔。

（5）施工分阶段管控

考虑到营运船停航时间有限，OCCS 改装可规划为坞内改造、锚泊吊装、海上调试三个阶段。坞内阶段完成甲板加强、管路开孔、电气桥架预埋等施工；锚泊阶段吊装预制一体化模块，完成管路接头连接；海上调试阶段进行工况联调，同步完成改装检验，最大限度压缩船舶停航周期。

3.3.3 风险与防控对策

营运船改装区别于新造船安装，存在船体结构/稳性、船厂施工、船舶运营和经济收益的多重风险。结合实船改装示范案例，梳理风险诱因、主要危害及分级防控对策。

（1）船体结构与船舶稳性

营运船加装 OCCS，通常基于已有船体结构开展，但原有船体并未针对碳捕集设备的重量、载荷分布、开孔接管等进行设计校核，是改装的首要风险点。其风险诱因主要包括 OCCS 核心设备（吸收塔、解吸塔、二氧化碳储罐等）和管路附属设备增加船舶局部重量，改变船舶重量分布，可能会造成船体总纵强度和局部结构强度不足；甲板及舱壁开孔、接管穿越破坏原有船体结构连续性，可能会形成局部应力集中。导致结构变形、构件开裂；部分老旧船船体构件存在腐蚀减薄，叠加新增载荷易引发结构失效。同时，新增设备对船舶重量重心的影响可能会对船舶稳性产生扰动，使得部分稳性参数不满足 SOLAS 要求，影响船舶航行安全（特别是极端工况下）。

防控对策：改装前期开展船体结构与船舶稳性计算，结合相关法规规范要求，对设备布置位置进行优化，尽量分散重量对称布置，避免形成局部集中载荷；针对甲板开孔、舱壁贯穿部位开展结构加强设计，对腐蚀严重构件同步修

复补强（老旧船舶视情开展测厚评估）；核算装载手册中的所有工况，计算结果不满足对应强度和稳性衡准的船舶不建议改装。

（2）船厂改装施工

营运船加装 OCCS 通常依托坞修窗口期开展，施工工期紧张、作业空间受限，相比新造船，改装施工风险更加突出。其风险诱因主要包括船上空间狭小，原有的管路、电缆密集，OCCS 新增的管路设备穿插施工易发生管线误切割、电缆误损伤等；坞修周期固定，多专业交叉作业，为赶工期可能会简化焊接、气密、绝等操作流程，部分特殊管路（如二氧化碳介质管路）焊接工艺管控不到位，存在安全隐患。同时，大部分船厂 OCCS 改装工程经验匮乏，作业人员未进行专项培训，一旦造成管路泄漏、电气故障，甚至会引发船上火灾、人员伤害等事故。

防控对策：改装前详细开展实船勘测，明确各专业接口边界，严格按图施工；合理规划坞修工序，错开高危交叉作业；对二氧化碳等特殊介质的管路焊接、无损检测、气密试验设置专项质控点，对关键工序签证确认。同时组织船厂施工人员提前开展 OCCS 相关介质特性、设备安装、应急处置专项培训，并预留合理调试周期，坚决杜绝为压缩工期而省略试验环节。

（3）船舶运营

营运船完成 OCCS 加装后，相当于在船上新增了一套集二氧化碳捕集、压缩液化、储存、卸载于一体的复杂系统，改变了船舶原有的操作逻辑，可能会给船舶带来新的运营风险。其风险诱因主要包括船员未掌握 OCCS 安全运维操作流程，误操作导致吸收剂/二氧化碳泄漏；海上航行恶劣工况造成管路接头松动泄漏；海上高盐高湿环境造成设备腐蚀；OCCS 产生的废液废渣处置不当；

船舶应急预案未补充吸收剂/二氧化碳泄漏等新增场景等。主要危害可能会造成加装的 OCCS 无法正常使用、船体结构损伤、人员冻伤/窒息等，影响船舶的正常航行与履约碳减排任务。

防控对策：船上存放 OCCS 操作手册、维保清单，完善船舶应急处置预案，开展船员专项实操培训，配备 OCCS 防护装备；设备选型充分考虑船上恶劣环境，定期巡查管路接头、材料防腐；规范液态二氧化碳卸载作业流程，明确船岸通信、安全对接要求；建立 OCCS 远程监测机制，岸基技术团队提供故障技术支持；明确废液、废渣船上收集处置要求，杜绝违规海上排放；定期开展船上应急演练，确保 OCCS 安全运维、船舶正常营运。

（4）投资回报周期

营运船加装 OCCS 的初始投资成本较高，后期运维存在持续成本，回报周期有一定的不确定性，是 OCCS 推广过程中的核心经济风险。其风险诱因主要包括改装设备采购、船厂施工、检验认证等一次性资本投入较高；OCCS 运行会增加船舶能耗，带来额外的燃料消耗成本、吸收剂使用成本、系统运维成本、二氧化碳卸载处置成本，以及操作培训、维修保养等人工成本。同时，现阶段二氧化碳的岸基接收、运输、封存利用等配套产业链尚未完全成熟，大部分港口不具备接收条件，增加后端处置成本；碳减排收益、政策补贴机制尚未统一，不同地区的碳核算、碳交易规则存在差异；设备故障停机降低系统年运行小时数，导致二氧化碳捕集量降低，减少碳减排收益。主要危害可能会造成项目投入产出失衡，投资回报周期较长，船东投资意愿下降，进而制约 OCCS 实船应用的规模化推广。

防控对策：改装前期结合船舶剩余服役年限、运营航线、停靠港口配套条

件等开展项目的经济可行性评估，充分对接各地航运减排激励政策，争取专项补贴和税收优惠；通过耦合设计，综合利用船上资源优化系统运行能耗；优先选择具备二氧化碳接收能力港口的航线运营，减少卸载处置成本（同步布局矿化固态产物处置路线，降低港口依赖）；规范留存 OCCS 运行数据，保障碳减排收益可认定、可交易；行业层面推动完善二氧化碳岸基接收、转运、封存利用产业链，统一航运碳减排核算规则，提升 OCCS 实船应用的整体经济性。

3.3.4 小结

营运船 OCCS 改装是存量船队实现短期减排、应对海事法规约束的可行路径。受原船空间布局、结构强度、船舶稳性等因素约束，改装方案需统筹总体布置、船厂施工、船舶运营、系统运维等安全风险。现阶段实船试点示范验证了改装技术的可行性，但仍面临改造成本偏高、港口二氧化碳接收基础设施不足、碳核算规则尚未完全明确等瓶颈。

基于此，营运船改装应筛选剩余运营周期较长、航线稳定、具备二氧化碳卸载条件的船型优先开展示范应用。后续需持续优化紧凑型系统低能耗运行方案，同步推进港口配套与全产业链机制建设，稳步提升营运船 OCCS 改装的经济性与规模化应用条件。

第四章 OCCS 产业生态建设

4.1 全产业链及配套支撑服务体系

OCCS 产业生态全价值链完整覆盖上游核心材料与研发装备制造、中游方案设计、系统集成与实船应用、下游港口接收、中转储运与封存/利用三方面，同步配套检验认证、碳计量核查、海事法规、投融资、标准规范等支撑服务体系，形成从设备研发制造、船上安装应用到二氧化碳卸载、转运、封存/利用的闭环链条。当前产业瓶颈集中在下游港口接收设施不足、跨区域转运体系缺失、碳信用确权机制尚未统一，制约 OCCS 全价值链规模化落地。

4.1.1 核心材料与装备研制能力（上游）

产业上游聚焦碳捕集设备专用材料与核心装备研发制造，是构建船载碳捕集能力的硬件基础。目前，全流程 OCCS 国产化样机落地，初步具备工程化供货能力。胺基吸收剂、吸收塔、解吸塔、压缩机、低温液化装置、船载液态二氧化碳储罐等关键设备已完成多艘实船示范验证，燃烧后化学吸收法的成熟度已达到 TRL7-8，膜分离法、矿化法等新兴技术持续向前。然而，产业短板也相对明显，集中体现在四个维度：

（1）适配船舶复杂工况的高性能低降解吸收剂量产供给不足，满足船舶摇摆、高湿、含硫尾气工况的耐腐蚀特种材料品类稀缺；

（2）系统设备轻量化、紧凑化水平不足，体积与自重偏大，难以适配存量船舶改装需求；

（3）产业链协同不足，上下游缺乏统一的产品标准与技术规范，尚未形成标准化、系列化产品，核心零部件批量配套能力薄弱，单个项目定制化程度高，推高制造成本与交付周期；

（4）实船示范应用数据积累较少，叠加初期市场规模有限，导致 OCCS 成本居高不下，延缓上游技术迭代与产能规模化释放。

4.1.2 系统集成与实船工程应用（中游）

产业中游涵盖 OCCS 方案设计、系统集成、实船工程落地，是衔接装备研制与船舶运营的核心枢纽。当前全球多家设计单位、船厂、设备厂商联合开展集装箱船、散货船、气体运输船等多种市场主力船型的示范项目，形成了新造船安装（含预设）和营运船改装两条技术路线，船级社也陆续出台船舶应用 OCCS 的指导性技术标准，构建入级检验规范体系。但现阶段产业发展痛点突出，主要包括：

（1）系统与船舶之间的耦合优化设计体系尚需完善，设备接口、安全联锁缺乏统一标准，难以形成通用型集成方案；

（2）实船防爆布置、安全运维、应急处置等工程方案尚未成熟，专业工程总包与运维人才短缺；

（3）商业模式尚不清晰，单一船型改造投资规模大、投资回报周期长，船东主动投资意愿偏弱；

（4）深度依赖下游港口配套设施，若缺少稳定液态二氧化碳卸载保障，即便完成安装也难以形成完整运营闭环，阻碍中游项目批量商业化落地。

4.1.3 港口储运与碳封存/利用体系（下游）

产业下游包含港口接收、跨区域储运、碳封存与资源化利用，是构建产业生态端到端闭环的关键环节，同时也是当前全价值链中最突出的短板。目前全球仅有少量北欧港口具备液态二氧化碳的接收能力，新加坡、鹿特丹等国际航运枢纽多处于规划阶段，挪威北极光等离岸封存项目搭建了液态二氧化碳的海

运通道，碳矿化、驱油封存、化工利用等消纳路径已完成技术验证，但整体仍处于示范起步阶段。其核心发展瓶颈主要表现在以下三方面：

（1）港口专用装卸、存储基础设施严重不足（如专用装卸臂、低温储罐等），现有设施与 OCCS 捕集二氧化碳的卸载要求不兼容；

（2）跨区域液态二氧化碳多式联运体系尚未成型，专用运输船队规模有限，船对船转运/江海联运标准、计量规范缺失，物流成本偏高；

（3）全球碳价值确权机制尚未统一，难以形成稳定的商业收益预期，同时叠加碳封存途径不足、资源化利用渠道有限，商业资本投资意愿谨慎，滞后 OCCS 全链条规模化推广。

4.1.4 配套支撑服务体系

OCCS 配套支撑服务涵盖规范标准、检验认证、碳计量核查、海事法规、投融资及专业运维等领域，是保障产业链有序运转、打通商业闭环的软性基础设施。当前，IMO 围绕船舶碳捕集出台相关规则研讨和监管框架文件，各家船级社持续完善 OCCS 入级检验、安全评估与认证体系，二氧化碳封存/利用监测核查方法也处于持续完善阶段，但整体服务体系建设仍存在明显短板，滞后于产业发展速度：

（1）行业统一标准碎片化，港口卸载、转运、计量等监管法规存在空白，权责划分不清晰；

（2）碳计量、碳核查、跨境碳信用确权互认机制尚未落地；

（3）适配 OCCS 的金融投资产品、风险评估体系、收益测算工具尚不完善，兼具海事运营、港口作业和船载碳捕集专业能力的复合型人才缺口较大，第三方配套支撑服务体系建设明显滞后，制约 OCCS 规模化商业化进程。

4.2 基础设施发展现状

OCCS 基础设施包含港口接收转运设施、跨区域储运体系、封存/利用设施及配套支撑服务体系，是实现船舶捕集二氧化碳闭环运营的硬件基础。

港口接收转运是 OCCS 产业链最突出短板。欧洲规划了部分适配二氧化碳转运的港口，依靠专用液态二氧化碳接卸、储罐、船岸输送设备构建转运枢纽，配套液态二氧化碳专用运输船队。目前，全球范围内仅北欧少数港口具备液态二氧化碳接收能力，其余国际大港多处于规划阶段。上海、宁波舟山、深圳等主要港口已开始规划二氧化碳卸载设施；部分港口结合现有LPG/LNG 终端进行改造升级；国家层面也正在研究制定港口基础设施建设指导意见。

跨区域储运与封存/利用基础设施尚未成型。北海是欧洲核心海上封存库区，依靠二氧化碳运输船将各地二氧化碳输送至封存港口，再注入海底地质储层。中国地质封存潜力巨大，但全球可对外开放的商用海上封存项目数量稀缺，资源化利用渠道规模有限。目前，挪威北极光项目成功实现二氧化碳封存的商业运营，验证了完整储运的封存路径；资源化利用方面，Project CAPTURED 项目验证了 OCCS 捕集液态二氧化碳经卸载转运后以化学键合的方式矿化，获准用于抵扣欧盟碳排放交易体系配额。

总体来看，OCCS 捕集端装备技术已经实现示范突破，但下游港口接收、储运、封存/利用等基础设施尚不完善，未来需要优先布局港口液态二氧化碳接收示范应用，完善船岸转运技术标准，打通储运-封存/利用路径，同步补齐法规规范、人员培训等软性支撑，进而推动 OCCS 从示范走向规模化商业应用。

第五章　OCCS 产业展望

OCCS 作为航运中期脱碳的核心技术路径，正处于从示范验证向规模化商业应用过渡的关键窗口期。随着技术迭代加速、法规框架完善、基础设施建设推进和碳价持续上行，OCCS 将迎来产业格局的深刻变革。

5.1 技术发展趋势

5.1.1 主流技术路线持续优化

化学吸收法作为当前唯一实现全流程实船验证的技术路线，未来将向小型化、低能耗、高可靠性方向加速迭代。高速离心式化学吸收工艺已在"粤电 56"轮完成实船验证，设备体积较同等处理量的塔式系统缩小约 30%，未来将进一步优化离心传质效率、降低解吸能耗，推动紧凑型标准化系列产品成熟。同时，吸收剂研发将聚焦低毒、低挥发、高稳定性、抗降解的复配配方，降低运维成本和环境风险。系统集成方面，余热梯级利用、LNG 冷能耦合等能效优化技术将成为标配。

5.1.2 新兴技术路线逐步突破

矿化法因无气态/液态二氧化碳泄漏风险、无需高压低温储罐、产物可永久封存的差异化优势，已获 IMO 原则认可和欧盟 ETS 抵扣。钙基矿化技术已完成实船搭载验证，未来将重点突破紧凑化高效反应器、高利用率吸收剂、固态产物连续转运等瓶颈，有望成为港口基础设施不完善航线的优选方案。膜分离法凭借体积小、重量轻、模块化优势，目前已完成概念设计认证，未来随高性能膜材料突破，在中小型船舶和特定场景具备应用潜力。低温冷凝分离法依托 LNG 冷能耦合（降低能耗约 30%以上），在 LNG 运输/LNG 动力船舶场景具备工程化落地前景。甲烷热催化分解法已获船级社 AiP 认可，裂解转化率达 85%

以上。作为前瞻性技术，仍需较长周期的研发和验证。

5.1.3 系统集成与智能化创新

未来 OCCS 将从单一设备集成向船舶全系统能源管理深度融合演进，构建"余热驱动解吸、冷能驱动液化、ORC 余热发电补充电力"的能源闭环。智能化控制方面，船载碳捕集控制系统将原生接入船舶机舱集中监控系统，实现全参数统一监测、多级联动保护和 CII 碳排放自动核算，基于 AI 算法的变负荷自适应调控将提升船舶工况波动下的运行效率。模块化、标准化、撬装化设计将大幅缩短安装周期、降低建造成本。

5.2 产业生态发展趋势

5.2.1 下游基础设施加速建设

港口液态二氧化碳接收终端是当前产业链最突出的短板。挪威北极光项目已建立船岸一体化接收能力，新加坡、鹿特丹等枢纽港处于规划阶段。中国将优先在长三角、粤港澳大湾区、山东半岛等绿色航运示范区布局港口接收示范节点，逐步形成覆盖主要港口的接收网络。跨区域液态二氧化碳多式联运体系将逐步成型，专用运输船队规模扩大，船对船转运（"EVER TOP"轮已完成全球首次验证）、江海联运标准和计量规范将逐步完善。

5.2.2 全产业链协同与成本下降

随着全球在航 OCCS 示范船数量的不断增加，规模化效应将逐步显现。上游核心材料与装备的标准化、系列化程度提升，定制化成本下降；中游系统集成方案成熟，工程总包能力增强；下游封存与利用渠道多元化（地质封存、EOR 驱油、化工利用、矿化封存、食品级利用等）。预计未来几年 OCCS 的 CAPEX 有望下降 20%-30%，核心设备完全国产化可进一步降低成本。中国凭

借完整的船舶工业体系和 OCCS 全流程自主知识产权，有望在全球 OCCS 产业链中占据领先地位。

5.2.3 商业模式多元化创新

碳资产运营、设备租赁、港口服务、资源化利用一体化等创新商业模式逐步成熟，降低船东投资门槛和技术风险。绿色金融产品（绿色信贷、绿色债券、碳质押融资、绿色保险等）将为 OCCS 项目提供多元化融资渠道。船东、设备厂商、港口企业、碳资产管理公司、金融机构之间的协同合作将日益紧密，形成多方共赢的产业生态。

5.3 法规与标准发展趋势

5.3.1 IMO 全球监管框架逐步完善

MEPC 83 已通过 OCCS 监管框架编制工作计划，明确 2028 年前形成完整监管框架的路线图，重点推进 MARPOL 和 SOLAS 相关修正案。MSC 110 将 OCCS 安全规范列为 CCC 分委会最高优先级，CCC 12 启动专项编制。未来法规将坚持技术中性原则，覆盖化学吸收、物理吸附、膜分离、矿化等多条技术路线，明确 OCCS 船舶安全技术要求、液态二氧化碳存储与装卸作业安全规范、减排量核算与核查方法、CII 抵扣机制等核心制度。全球航运碳定价机制将进一步为 OCCS 提供稳定的经济激励。

5.3.2 船级社规范与行业标准成熟

IACS 启动 OCCS 统一要求研究制定，发布“ Rec.199 Installation of Carbon capture and storage Systems onboard ships ”。CCS 已形成"规范指南+附加标志+认可程序"完整分层标准体系，未来将持续扩充细分领域标准，针对多元捕集技术、不同船型适配、二氧化碳全流程储运补充专项标准，出台台架试验与实船

试航验证统一测试方法。DNV、ABS、NK 等主流船级社也将持续完善 OCCS 入级规范，形成国际先行落地标准矩阵。

5.3.3 碳计量与 MRV 体系统一

覆盖二氧化碳捕集、运输、封存/利用全链条的监测、报告与核查（MRV）体系将逐步建立，确保每一吨被认可的减排量真实、安全且永久。跨境碳信用互认机制将逐步推进，解决当前欧盟 ETS 等区域性规则中不同消纳路径抵扣比例不统一的问题。目前，CCS 正在推动建立统一的全链条 MRV 体系，为国际规则制定输出中国方案与数据支撑。

5.4 发展路径展望

5.4.1 示范推广阶段

以 EU ETS 合规驱动为主要动力，聚焦 LNG 运输船、大型集装箱船、远洋油化船等适配性较好的船型，在欧洲航线和具备港口接收条件的航线上扩大示范应用规模。化学吸收法持续优化迭代，高速离心式技术推广应用，矿化法完成工程化验证。IMO 监管框架逐步成型，港口接收示范节点布局启动。

5.4.2 规模化应用阶段

随着 IMO 全球碳定价机制实施，碳价整体上行趋势明确，OCCS 在多数主流船型上具备商业经济性。下游基础设施网络基本建成，跨区域储运体系成熟；多元化技术路线并行发展，系统能效显著提升；创新商业模式广泛应用，船载碳捕集技术稳定成为航运业中期脱碳的主流技术选择之一。

5.4.3 全面应用阶段

船载碳捕集技术与零碳燃料替代技术协同发展，共同支撑航运业 2050 净零目标。存量船改造和新造船预装全面推进，全产业链高度成熟，成本降至可接

受水平，法规标准体系完善。OCCS 在全球航运脱碳场景下发挥不可替代的过渡性和补充性作用，与甲醇、氨、氢等零碳燃料技术共同构建航运业多元化脱碳技术体系。

结 语

船载碳捕集系统（OCCS）作为航运业应对气候变化、实现绿色转型的重要技术路径，正迎来前所未有的发展机遇。从技术验证到示范应用，从单点突破到全链条贯通，船载碳捕集技术正在快速成熟，产业化发展大幕已经拉开。

作为船舶检验国家队和船舶技术权威机构，中国船级社（CCS）始终站在航运绿色发展的前沿，致力于推动船载碳捕集技术的安全、规范、有序发展。我们率先发布了《船载碳捕集存储系统》、《船舶应用碳捕集系统指南》、《船载液态二氧化碳装卸作业指南》等一系列规范标准，建立了完善的检验认证体系，支持了多项关键技术突破和示范项目，为中国 OCCS 产业发展提供坚实的入级技术标准。

展望未来，OCCS 的发展之路依然任重道远。技术上，我们需要持续突破能耗优化、系统小型化、运行可靠性等关键瓶颈，不断提升技术性能和经济性；政策上，我们需要完善规范指南标准和激励政策，为产业发展营造良好环境；基础设施上，我们需要加快港口卸载、运输网络、封存场地等建设，打通全链条瓶颈；产业生态上，我们需要加强产业链协同，创新商业模式，形成共建共享的发展格局。

站在新的历史起点上，中国船级社将继续秉持"安全、环保、为客户和社会创造价值"的宗旨，充分发挥技术优势和行业影响力，与政府部门、船东企业、科研院所、港口运营商等各方携手并进，共同推动船载碳捕集技术创新和产业发展，为航运业绿色低碳转型贡献力量，为实现全球航运 2050 年净零排放目标、构建人类命运共同体作出新的更大贡献！

绿色航运，未来已来。让我们携手共建 OCCS 生态，共同引领绿色航运的美好未来！



中国船级社
CHINA CLASSIFICATION SOCIETY