

低VOC舾装选材与节能设备集成研究

顾峰 卢馨迪 马洪猛

上海船舶研究设计院, 中国·上海 201203

摘要: 在全球低碳目标与国际海事组织绿色船舶法规的双重驱动下, 船舶行业正在逐渐向低碳、环保方向转型升级。而舾装系统作为船舶建造成本与能耗占比超 30% 的核心环节, 其绿色化升级开始成为关键突破口。基于此, 本文首先分析了全球绿色船舶发展趋势, 在了解全球绿色船舶发展情况之后, 讨论低 VOC 舾装材料的研究进展, 最后提出低 VOC 舾装材料与节能设备的协同效应研究, 希望本文的分析可以起到参考的作用。

关键词: 绿色; 船舶; 低 VOC; 舾装; 材料

Construction of a Low-VOC Outfitting Material Selection System for Green Shipbuilding and Research on Integrated Energy-Saving Outfitting Equipment

Gu Feng, Lu Xindi, Ma Hongmeng

Shanghai Merchant Ship Design and Research Institute, China Shanghai 201203

Abstract: Driven by the dual forces of global low-carbon goals and the International Maritime Organization's (IMO) green ship regulations, the shipbuilding industry is steadily transforming towards low-carbon and eco-friendly practices. As outfitting systems account for over 30% of both construction costs and energy consumption, their green upgrade has become a critical breakthrough. Against this backdrop, this paper first analyzes global trends in green shipping. Building on this overview, it discusses recent advances in low-VOC outfitting materials and finally explores the synergistic effects between these materials and energy-saving equipment. It is hoped that this analysis will serve as a valuable reference.

Keywords: Green; Ships; Low VOC; Outfitting; Materials

0 引言

近年来, 全球气候变化引发的环境问题越发严峻, 碳达峰、碳中和已经开始成为各国的广泛共识, 而船舶作为国际贸易的主要载体, 其能源消耗与污染物排放问题备受关注。根据 IMO 统计之后可以发现, 全球船舶每年碳排放超过 10 亿吨, 占全球人为碳排放的 3%, 并且传统船舶舾装的过程中, 舾装材料释放的 VOC 占船舶总 VOC 排放量的 45%, 远超陆域工业领域的平均水平。在这一背景下, 传统舾装模式的高污染、高能耗短板越发明显, 低 VOC 舾装材料选型与节能型舾装设备集成开始成为绿色船舶研发的核心需求。

1 全球绿色船舶发展趋势

1.1 IMO 环保法规升级

国际海事组织近年来通过多轮法规迭代, 推动航运业从被动减排向主动脱碳转型升级。2023 年 MEPC80 会议通过的《2023 年船舶温室气体减排战略》, 首次明确提出接近 2050 年实现净零排放的核心目标, 设置 2030 年减排 20%、2040 年减排 70% 的指示性校验点。这一战略要求船舶能效设计指数持续升级, 例如 2025 年新建集装箱船需要满足 EEDI 第三阶段标准, 并且引入燃料生命周期

温室气体强度监管框架, 通过直接合规目标与基础目标两级机制达成差异化管控。2025 年 MEPC 83 会议进一步批准《MARPOL 附则 VI》修正案, 打造出全球首个强制性排放限值与温室气体定价结合的发展框架。例如并未达标的船舶需要按照 100-380 美元 / 吨购买补救单位, 资金纳入到 IMO 净零基金, 用于支持绿色技术研发与发展中国家转型^[1]。

1.2 国际海事环保共识

全球海事利益相关方正在通过行业联盟、绿色走廊与燃料革命形成协同脱碳网络, 国际航运工会与国际燃料工业协会联合提议打造出能源集中合规机制, 允许船舶共享合规额度从而应对绿色燃料供应不足的问题, 这一机制与欧盟法规当中的“合规单位池”形成呼应, 推动全球标准走向统一。在替代能源领域, LNG、甲醇、氨、氯成为转型的核心方向。克拉克森数据显示, 2025 年第一季度全球新造 LNG 动力船订单达 980 万总吨, 占替代燃料船舶订单的 65%。韩国启动 4400 万美元液氮运输船研发计划, 目标在 2027 年之前建成全球最大的液氮船, 使用超低温存储与电力推进技术达成全程航运零碳运营。同时, 全球目前已经建成 62 条绿色航运走廊, 例如北欧四国推送的波罗的海绿色走廊, 要求 2030 年前达成区域内船舶 100% 使用绿

色燃料^[2]。

1.3 各国绿色船舶政策

主要航运国家通过法规约束、资金扶持、标准引领三措并举,推动绿色船舶产业顺利落地。欧盟从 2024 年开始将航运纳入到碳排放交易体系范畴,2025 年清缴比例提升到 70%,预计每艘 2 万 TEU 集装箱船年均摊成本增加 180 万美元,倒逼船东加速 LNG 动力船改造。欧盟还通过《FuelEU Maritime》法规,要求 2030 年船用燃料中可持续燃料占比达到 6%,并且对使用绿色甲醇的船舶提供税收减免支持。中国发布的《船舶制造业绿色发展行动纲要》明确,2025 年 LNG、甲醇动力船舶国际市场份额超过 50%,并且设立专项基金支持甲醇/氨动力船的研发。例如,中远海运集团联合中国石化打造的 12.5 万立方米 LNG 运输船,使用双燃料主机与岸电接入技术,相比较于传统船型能效提升 25%。地方层面,上海推出《国际航运燃料绿色转型工作方案》,对用户加注绿色甲醇的船舶,提供 300 元/吨的补贴,目标 2027 年建成亚洲最大的绿色燃料加注中心。韩国、日本则是聚焦氢能与氨燃料技术壁垒突破,韩国政府投入 555 亿韩元支持液氢船研发,重点攻关 -253℃超低温存储系统与国产耐低温不锈钢材料。

2 低 VOC 舾装材料研究进展

2.1 船舶常用舾装材料 VOC 排放现状分析

船舶舾装材料的 VOC 排放问题已经开始成为绿色船舶发展的核心瓶颈限制,在主流材料当中,溶剂型涂料、脲醛树脂绝缘材料、PVC 地板及传统胶粘剂是主要的污染源。根据国际海事组织数据,船舶舾装期间的 VOC 排放量占全船总排放的 45%,远超陆域工业平均水平。例如,传统溶剂型传播涂料 VOC 含量普遍超过 400g/L,部分绝缘材料甲醛释放量达到 0.3mg/m³,远超 IMO MEPC.331 (76) 决策规定的 0.1mg/m³ 限制要求^[3]。

从材料分类角度上来看,涂料是 VOC 排放的主要源头。溶剂型防腐涂料由于含苯系物、酮类等有机溶剂,施工期间 VOC 挥发率高达 60-80%,而压载舱涂层维护期间二次释放的 VOC 占全生命周期排放的 35%。绝缘材料方面,脲醛树脂虽然成本较低,但是其热分解产生的甲醛与氨类物质长期威胁船员的健康水平,并且燃烧释放的氰化氢毒性非常强。地板与胶粘剂领域,传统 PVC 地板增塑剂残留的辛醇与醛类杂质在高温下持续挥发,溶剂型胶粘剂 VOC 含量普遍超过 500g/L,施工需要 3-6 个月才能够达标。行业实践期间,VOC 排放问题目前呈现出三高一低的趋势,分别是高毒性、高逸散性、高治理成本、低协同性,进一步加剧了污染。尽管水性涂料、高固体分涂料等替代

材料已经逐步应用,但是受限于性能与成本,渗透率依旧有所不足。

2.2 低 VOC 舾装材料选型指标体系构建

科学的选型体系需要平衡环保、性能、经济、合规的四大维度,环保性作为核心指标,其中包括 VOC 含量、甲醛释放量、重金属含量以及生物毒性。例如,海隆赛能的低表面处理环氧涂料通过改性树脂与纳米缓释技术,VOC 含量仅为 35g/L,并且可带锈涂装,显著减少施工阶段的 VOC 逸散。力学性能需要针对船舶的特殊环境设计,涂料需要通过 500 小时中性盐雾测试,绝缘材料需要耐受零下 40 摄氏度到八十摄氏度的温差循环,地板需要满足干态或湿态摩擦系数 ≥ 0.6 。经济性层面,全生命周期成本模型需要涵盖材料采购、施工能耗、维护周期、回收价值。例如,生物基环氧树脂涂料虽然单价高 20%,但是碳足迹减少 40%,维护周期延长到 10 年,综合成本降低 12%。合规性则是需要满足多层次标准,国际层面需要符合 IMO MEPC.289 (71) 决议和欧盟 REACH 法规,国内需要遵循《船舶涂料中有害物质限量》,而军工船舶还需要通过 GJB 9001C2023 认证标准。除此之外,工艺适配性也非常重要,例如 UV 固化涂料需要配套紫外光源使用,而高固体分涂料则是需要高压无气喷涂设备,设备改造成本较高^[4]。

2.3 低 VOC 舾装材料选型方法与验证

多准则决策模型属于核心方式,首先通过文献调研与实验测试的方式打造出材料数据库,例如使用气相色谱-质谱联用的方式检测 VOC 成分,通过 QUV 加速老化模拟 10 年耐候性。随后,使用 AHP 与模糊综合评价法来量化指标。例如,针对某案例当中对 3 类候选涂料进行评估分析,最终筛选出 VOC 含量 42g/L、附着力 5B、全生命周期成本降低 12% 的水性聚氨酯涂料。实船验证是关键环节,例如 PPG 与中远海运合作的“远春湖”号邮轮使用静电喷涂技术与 SIGMAGLIDE 防污物料,实船测试显示燃油效率提升 8%,VOC 排放相比较于传统工艺减少 35%。对于绝缘材料,中国船舶集团第 725 研究所开发的无机纤维绝缘板通过零下 40 摄氏度到六十摄氏度的温差循环测试,甲醛释放量始终稳定在每立方米 0.005mg,现如今已经应用于 LNG 运输船。

数字化工具也加速了验证进程,MATLAB 能耗仿真模型可以模拟材料与设备的协同效应,例如在某集成方案当中,低 VOC 涂料与智能通风系统联动,从而让舱室 VOC 浓度在 2 小时内降低每立方米 10mg 以下,相比较于传统方案快 40%。此外,数字孪生技术可以实时监测材料性能衰减问题,例如等离子沉积涂层在 500 次冷热循环之

后结合强度依旧保持 23.5MPa，远超行业的普通标准。

3 低 VOC 舾装材料与节能设备的协同效应研究

3.1 协同效应机理分析

低 VOC 舾装材料与节能设备的协同效应，本质在于通过材料特性优化→设备负荷降低→效能双向提升的关联机制，达成环保与技能的叠加收益，核心机理主要分为三方面。

首先是材料环保性降低设备运行负荷，低 VOC 材料的 VOC 排放速率仅为传统材料的五分之一到三分之一，符合 IMO MEPC.331 (76) 决议 $\leq 50\text{g/L}$ 要求，无需智能通风系统长时间高功率运行稀释污染物。例如，某散货船使用低 VOC 地板之后，通风系统日均运行时长从 12 小时缩短到 8 小时，风机能耗降低 33%，同时避免 VOC 与设备部件的化学反应，进一步延长设备寿命 20%。其次则是材料热工性能优化设备能耗效率，低 VOC 绝缘材料的导热系数低至 $0.018\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，相比较于传统的脲醛树脂绝缘材料降低 40%，可以减少空调或者加热设备的冷热损耗。某 LNG 运输船应用这一材料之后，舱室温度波动幅度从 $\pm 3^\circ\text{C}$ 收窄到 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，变频空调的启停频率下降 50%，年耗电量降低 1.2 万 kWh。最后则是材料耐久性减少设备运输能耗，低 VOC 涂料的附着力达 5B 级，维护周期从 5 年延长到 8 年，避免由于涂层修复而导致的照明、焊接设备频繁启停。

3.2 协同效益评价模型构建

为了量化协同效应，需要构建出多维度 - 全周期的评价模型，核心包括指标体系、权重分配、计算方法三部分。指标体系设计需要聚焦三大维度，首先是环保效益指标，包括 VOC 协同减排量、碳排放降低率。其次则是能耗效益指标，涵盖设备功率下降率，例如通风或者空调额定功率差值，也包括运维能耗节能量，也就是维护阶段设备耗电量减少值。最后则是经济效益指标，包括全生命周期成本，材料采购 + 设备投资 + 运维费用，以及投资回收期。

权重分配则是需要使用层次分析法，经过分析之后确定权重。环保效益 35%、能耗效益 35%、经济效益 30%。例如，VOC 协同减排量 15%、设备功率下降率 15%、全生命周期成本 20% 为核心子指标。

计算方法融合模糊综合评价与生命周期评价，先通过模糊评价将定性指标转化成为 0-100 分的定量值，再使用 LCA 计算全周期数据，最终输出协同效益系数。公式为：协同总收益 / (材料单独效益 + 设备单独效益)，系数如果大于 1，就可以判定存在正向协同，系数越高协同效果越强。

3.3 协同效应案例验证

以某船厂 2024 年建造的 13000TEU 集装箱船作为案例，验证低 VOC 材料与节能设备的协同效果，具体来说是“低 VOC 水性甲板涂料 + 智能变频通风系统”“无机纤维绝缘材料 + 变频空调系统”。

首先开展环保协同验证，传统方案当中，溶剂型涂料 VOC 排放量 82kg，普通通风系统减排 25kg，总减排 47kg。协同方案当中，低 VOC 涂料排放量 28kg，智能通风系统由于 VOC 浓度较低，可以动态调节风量，额外减排 18kg，总减排 68kg，协同系数为 1.45 (68 / (25+28))，VOC 排放相比较于传统方案降低 43%，满足 IMO MEPC.331 (76) 决议 2025 年限值要求。

其次则是能耗协同验证，无机纤维绝缘材料让船舶热损耗减少 40%，变频空调的额定功率从 120kW 降低到 90kW，同时绝缘材料无甲醛释放，避免空调滤网频繁更换，空调系统年耗电量从 8.6 万 kWh 降低到 5.2 万 kWh，能耗协同效益系数 1.32，综合能耗相比较于传统方案降低 39%。

最后则是经济协同验证，协同方案初期投资相比较于传统方案高出 12%，但是全生命周期成本降低 15%，投资回收期从 5.2 年缩短到 3.8 年，验证了模型的实用性，这一方案现如今已经开始纳入到该船厂绿色船舶标准化设计手册。

4 结语

展望未来，绿色船舶舾装技术依旧需要向更深层次突破与加强。在材料端，需要进一步研发高耐盐雾、长寿命的低 VOC 复合材料，解决环保性与耐久性的平衡难题。在设备端，需要融入数字孪生、AI 调控技术，达成舾装系统动态能耗优化。在产业端，需要推动低 VOC 材料检测标准的国际统一，以及材料 - 设备 - 船厂的供应链协同，形成全链条绿色化生态体系。

参考文献：

- [1] 邢维升，于辉. 新型船舶复合材料上层建筑搭载与舾装质量控制[J]. 船舶标准化与质量，2025(03):30-33+47.
- [2] 谢志勇.“双碳”视域下船舶舾装设计与材料发展研究[J]. 船舶物资与市场，2025,33(01):26-28.
- [3] 孟祥礼，张红菊，程光旭. LNGC 模块化建造项目舾装材料管理分析[J]. 广东造船，2024,43(05):111-113+107.
- [4] 应程成. 新时期船舶舾装现状与发展趋势分析[J]. 中国水运，2024(17):66-68.

基金项目：浙江省科技计划项目 (2025C02255(SD2))。

作者简介：第一作者：顾峰 (1993-)，男，中国江苏盐城人，工程师，研究方向：从事船舶舾装设计工作。