

一种耙吸式挖泥船绿色智造技术研究

周杰

上海振华重工启东海洋工程股份有限公司, 江苏 启东 226259

DOI:10.61369/ERA.2026020046

摘要：现代耙吸式挖泥船经常会搭载双燃料系统，如 LNG、甲醇等，以此来实现更高效的疏浚作业和更少的大气污染。采用传统燃油和清洁燃料切换的动力系统，不仅能优化船舶设计还能减少碳排放，符合国际绿色低碳的环保要求。而制造过程中的减排更是作为造船企业应该关注的要点，通过优化能源结构、推广低碳技术和加强环保意识等措施，提升船企绿色智造能力，为后续长久发展铺垫基石。

关键词：绿色智造；碳排放；VOCs 减排；水性漆；甲醇燃料

Research on Green Intelligent Manufacturing Technology for Trailing Suction Hopper Dredgers

Zhou Jie

Qidong Offshore Engineering Co., Ltd., Shanghai Zhenhua Heavy Industries Co., Ltd., Qidong, Jiangsu 226259

Abstract：Modern trailing suction hopper dredgers often incorporate dual-fuel systems, such as LNG and methanol, to achieve more efficient dredging operations and reduce atmospheric pollution. Adopting a power system that switches between traditional fuel and clean fuel not only optimizes ship design but also reduces carbon emissions, aligning with international environmental requirements for green and low-carbon practices. Moreover, emission reduction during the manufacturing process is a crucial focus for shipbuilding enterprises. By optimizing the energy structure, promoting low-carbon technologies, and enhancing environmental awareness, shipbuilders can enhance their green intelligent manufacturing capabilities, laying a solid foundation for sustained long-term development.

Keywords：green intelligent manufacturing; carbon emissions; VOCs reduction; water-based paint; methanol fuel

引言

中国于2020年正式提出碳达峰、碳中和的“双碳”目标。为达成这一目标，我国已在多个领域推行一系列举措，促进经济社会向全面绿色低碳方向转变。船舶制造业中的“碳排放”问题更是一个复杂而又紧迫的问题，不仅要考验船企在船舶制造过程中的低碳控制，更要考虑其打造的产品在未来航行作业中对全球气候的影响。本文通过对中交天航3万方超大型耙吸挖泥船的设计与建造来研究绿色智造在这一过程中的运用。

一、绿色涂装技术研究

(一) 概述

作为壳-舱-涂三大作业之一的船舶涂装是船舶建造的重要工艺流程，传统建造过程中使用的各类溶剂型涂料及稀释剂，会产生大量的挥发性有机物 (VOCs)，污染环境。因此，建立起绿色涂装技术体系，推动企业向绿色涂装的全面转型就成为了必然。首先研究如何减少源头涂料中 VOCs 的含量，根据涂料适应性进行环保涂料选型；其次研究绿色产品涂装工艺方案，保证绿色涂料的顺利应用与涂装质量；最后，在末端对涂装污染物进行控制的同时，还需对生成过程实施治理。三个阶段相互支撑、互为依托，是绿色涂装作业流程密不可分的整体。

(二) 环保涂料选型

a. 水性无机硅酸锌车间底漆

车间底漆一般使用两种：溶剂型无机富锌底漆和水性无机硅酸锌底漆。溶剂型无机富锌底漆的性能特点是耐热、机械性能好、附着力强和热加工损伤面小。缺点是固化周期长，固体成分只有25%~30%；涂层较脆，容易产生“龟裂”，复涂困难；同时VOCs含量高达600~660g/L。而水性无机硅酸锌底漆不仅具备相同的性能优势，且干燥速度极快，还可将VOCs从660g/L降低至50g/L以内，更符合环境保护要求。

b. 内部舱室水性涂料

这类涂料中，有机溶剂的含量普遍为成品量的15%~50%。为方便操作，施工过程中会把溶剂型稀释剂的用量控制在5%~

15%。但值得注意的是，溶剂的挥发会引发环境污染问题，并危害相关人员健康。采用水性漆、无溶剂和高固体份方面的绿色防腐涂料，对于实现 VOCs 减排具有现实和长远的意义。

c. 高固体分环氧涂料

水性涂料具有环保减排、使用安全等特点，但在重防腐方面的适用性还有待提高，且目前比较成熟的水性涂料配套较少，无法应对机泵舱 / 生活区等内部舱室以外的防腐要求。高固体分环氧涂料具有出色的耐水、耐盐雾和耐化学品特性，使其成为全船 80% 以上涂装部位通用的防腐底漆选择。且施工方便，可以作为新建耙吸挖泥船的优选。

3万方超大型耙吸挖泥船可采用高固体分环氧涂料，本船底漆面积约 200,000 m²，根据计算 VOCs 减排能达到约 16,320~25,660kg。

(三) 涂装工艺研究

虽然水性涂料在 VOCs 减排方面表现优异，其在常温状态下施工时，能够满足施工要求，但是处在低温施工时，其产品性能则可能呈现不稳定性。为此，我们开展了对水性漆施工性，漆膜外观，防腐性，附着性等性能的测试与研究。

测试工件为 2m*2m*2m 的工装 2 个，如下图 1 所示：



图1 水性漆喷涂测试工装

参与测试的油漆配套产品满足机舱、上建内部大于 15 年防腐设计寿命，质量担保 5 年的设计要求；并对底材表面处理与常规溶剂型油漆的施工性能优异：底漆快干，厚涂性好，无最大复涂间隔限制，或复涂前表面处理要求低。工件表面喷砂处理至 Sa2 级，由施工队提供常规喷漆泵，涂装车间通风除湿设备正常运转配合，所有准备工作与日常溶剂型油漆作业无差别。

测试油漆配套：a. 水性丙烯酸底漆 + 面漆；b. 水性环氧底漆 + 水性丙烯酸面漆；c. 水性环氧底漆 + 溶剂型环氧底漆 + 水性丙烯酸面漆。一个面翻涂溶剂型环氧底漆，另一个面露天放置 6 个月后用溶剂型环氧复涂，再统喷水性丙烯酸面漆。此配套为测试船舶合拢 / 水下涂装阶段，冬季低温作业条件下，用溶剂型环氧底漆替代水性环氧底漆覆涂的工况。

测试结果：水性底漆的厚涂性、抗流挂性较好，湿膜、干膜可以做到标准膜厚的 2 倍以上不流挂。底漆干燥快，复涂性较好，整体漆膜外观优良，满足施工要求。另外，还验证了冬季露天低温作业情况下，水性涂料不适用时，可以用溶剂型环氧底漆替代水性环氧漆的修补涂装。（如图 2 所示）



水性漆加水稀释 无气喷涂 测试干膜厚度

图2 测试现场

第二阶段，工件露天摆放约 8 个月后，环氧类老涂层表面有轻微粉化，目视检查漆膜外观良好，无锈蚀等不良表现。对部分测试工件进行了翻涂测试，环氧类底漆动力工具轻拉毛，水性丙烯酸底 / 面漆测试了轻拉毛和仅淡水擦拭清洁两种表面处理方式。翻涂后漆膜状态良好，一星期后进行附着力测试，划叉法 / 划格法未有涂层剥离，拉拔实验至 17MPa 未脱离，涂层附着力良好。（如图 3 所示）



图3 翻涂表面处理及附着力测试

经过长达 8 个月的模拟测试，通过对底材的表面处理，油漆的施工性能，防腐性能，外观，水性与溶剂型环氧漆的相互覆涂，附着力等观察，水性漆可以满足机舱、生活区等区域的配套及施工要求，施工性、涂层质量优异。

(四) 末端治理

船厂涂装作业时，所排放的 VOCs 废气成分复杂，且表现出风量高、浓度低的特点。干式过滤器 + 沸石转轮 + 三床式 RTO 的设备工艺可以很好的达到涂装车间 VOCs 末端治理的目的，其工艺流程如下图 4 所示：

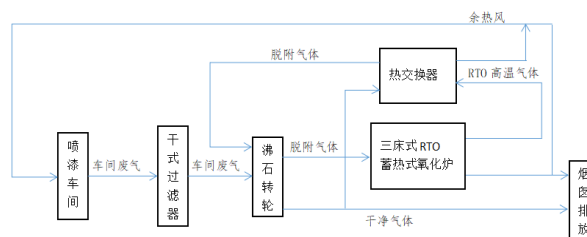


图4 末端治理工艺流程图

干式过滤器是沸石分子筛转轮前的预处理设备，利用其自身结构和过滤材料去除废气中的粉尘、漆雾等杂质，防止损坏风机。干式过滤器设 5 级过滤材料组合，不同等级材料采用模块设计，可以快速组装更换。系统设置压力传感器，压差超出规定范围时，声光报警提醒更换过滤材料，保证系统安全、稳定运行。

由吸附区、脱附区和冷却区组成的沸石分子筛转轮，在处理含有 VOCs 的废气时，会首先流经其吸附区，然后经沸石吸附废气中的 VOCs，使废气净化；沸石轮以一定速度转动，当内含高浓度 VOCs 的沸石转入脱附区时，用 180°C - 200°C 的热空气进行脱附再生，脱附后的沸石再转入冷却区通风降温，恢复沸石的吸附能力，重新进入新一轮的循环。沸石分子筛转轮适用大风量、低

浓度废气处理，可持续处理有机废气，具有高度净化功能，可去除废气中的 VOCs 成分，去除率高达95%。

蓄热式热氧化器 (RTO) 由燃烧室、蓄热体和切换阀门组成。其工作原理是先加热有机废气，使废气中的 VOCs 氧化分解，同时较高的温度可以储存热能方便节省废气升温的能耗。每个蓄热室通过蓄热 - 放热 - 吹扫的循环程序，不断重复这一过程，确保设备连续稳定工作。经过图 4 所述的工艺流程对涂装车间 VOCs 排放进行高效治理。

通过对水性车间底漆，内部舱室水性涂料，低 VOCs 高固体分通用环氧底漆等绿色产品的对比分析，3 万方超大型耙吸挖泥船涂料产品减排估算对比如下表 1 所述：

表 1 不同配套选择的减排对比表

	油漆用量 (L)	VOCs 总量 (Kg)	减排百分比 (%)
普通产品配套	260774	111771	满足 VOCs 限量
高估组分通用环氧漆	203154	67209	减排 40%
水性漆 + 高估组分结合	216495	43073	减排 61.5%

由此可见，绿色涂料产品可以有效达到 3 万方超大型耙吸挖泥船建造期间 VOCs 减排的目的，减少涂装对环境的危害，逐步走上绿色涂装、绿色造船的工艺路线。

二、甲醇燃料预留技术研究

(一) 甲醇燃料的特点

甲醇 (Methanol)，作为一种密度比空气大、蒸汽不易飘散的燃料，具有危险的特性。采用高速透气管，强化进舱驱气流程，爆炸极限范围广。通过持续充氮气，保证甲醇舱内正压，在甲醇加注过程中，对蒸汽回收进行特殊操作监控。甲醇火焰几乎无颜色，不易探测，需对危险点采用气体探测等措施。甲醇能量密度较高适合作为长距离航行，又因其物理特性与传统燃油相近，无需新建专用存储罐和加注码头，可直接利用现有仓储与加注设施，改造成本大幅降低。

(二) 甲醇预留方案

本船总布置图中原来的 HFO 储存舱和 MDO 储存舱及其下部的双层底空舱，改作甲醇舱；油舱设置在第二舱的内舱甲板上。为应对腐蚀问题，相关管路选用了 316L 不锈钢材料进行防护。如图 5 所示。

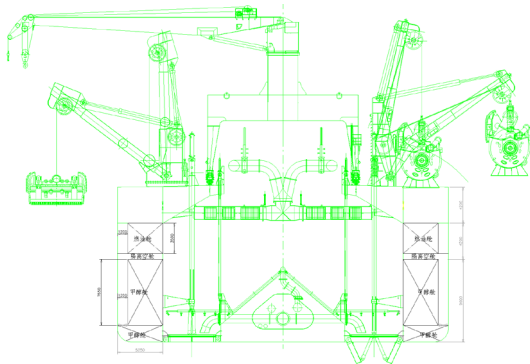


图 5 甲醇舱预留方案截面图

预留甲醇方案包括如下系统：

1) 储运、加注系统：该系统由甲醇舱、加注站、甲醇泵、管路阀门附件和监视安防系统等构成。在加注甲醇时，加注管道和甲醇舱蒸发气体通过蒸汽回收管道实现回流。注水过程中，需注意船侧甲醇舱的压力变化，并协调船上蒸汽回收氧气浓度与岸上或加注蒸汽的变化。完成加注后，甲醇液管道需用氮气吹扫以准备进舱。

2) 供给系统：通过 LFSS 单元（供应单元集成撬块），将甲醇从日用舱中处理后，再进入主机，经 FVT（甲醇燃料阀组单元）满足主机的压力流量温度。LFSS 系统设计应考虑潜在的风险，并制定相关安全措施，以确保发动机各工况运转正常。在甲醇燃料供应中，系统支持起动、运转、待机、停机、自动扫尾等自动运行方式。同时，氮气在供应过程中发挥关键作用，为甲醇的日常舱提供气体补充。供给系统以主机对甲醇燃料供应的需要和规格要求为基础，保证安全、有效地供应系统。

3) 安全系统：用于保障甲醇燃料在储运、供应全流程中的安全性与稳定性。每个燃料舱的惰化进气管路设置隔离装置，隔离装置应位于进入燃料舱的船员易于发现的位置。隔离应通过可拆卸短管的方式设置。在双壁管外管与内管之间的环形空间建立正压惰化环境，通过精密压力调节阀维持 0.2-0.5kPa 的恒定正压。采用惰性气体（如氮气）持续吹扫替代双壁管环形空间的机械通风，同时在环形空间内设置多级泄漏监测系统。

为阻止可燃液体或蒸气进入惰气系统，惰性气体供应管路上的危险区域，如甲醇储藏区、加注作业区等爆炸性环境，应设置双截止透气管组 (DBB)。还需在 DBB 阀组与燃料系统之间的管段设置一个可关闭的止回阀，有效隔离两种物质接触风险。（如图 6 所示）

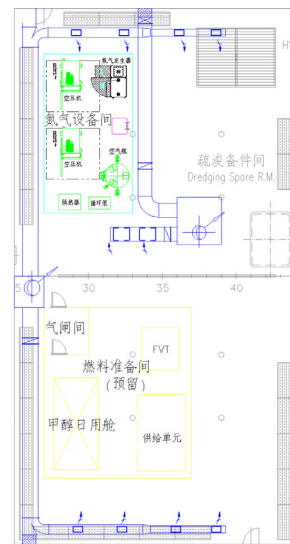


图 6 甲醇舱预留系统

(三) 积极意义

甲醇燃料具有清洁环保的特点，可实现全生命周期碳中和，与常规燃油相比，二氧化碳排放量最高降低 92%，硫氧化物排放量减少 99%，颗粒物减少 90%。后续本船如使用该预留方案较传统柴油动力，可减少超 7.5% 的二氧化碳排放。如使用可再生资源

生产的绿色甲醇作为燃料，该主机的碳排放量将比传统柴油主机减少95%以上。

船舶甲醇燃料供给系统是甲醇动力船舶的核心设备，其国产化增强中国在新能源船舶领域的竞争力，补强造船产业链，为绿色船舶自主配套提供新动能。该成果不仅推动了绿色碳中和技术在运营船舶上的集成应用，更通过甲醇这种清洁能源的规模化使用，大幅提高了我国在船舶绿色改造方面的技术创新能力和全球竞争力。

三、结束语

绿色涂装技术是当前工业涂装领域的核心发展方向，它通过环保材料、节能工艺和智能化管理，从源头上减少 VOCs 排放和

能耗，目标是实现高效、低污染、资源节约的涂装过程，其对企业意义远不止环保，它是一套能降本、增效、控风险、提价值的战略工具。

甲醇能用煤、天然气甚至生物质制取，大幅降低进口依赖。而且，因其常温液态的特性，在储运和加注方面比 LNG、氨或氢更具安全性和便利性；全生命周期碳排放更低，相比较传统燃料的船舶可减排90%以上，是当前最可行的绿色主燃料之一。

随着全球对生态环境保护的重视程度不断提升，船企和船舶的环保技术将不断迭代前进。未来，我们或许将看到更多融合新能源技术、具备自我修复功能的智能船型问世；通过大数据与云计算，实现跨区域水域治理的协同作业，甚至开发出能自主识别污染物种类并针对性处理的“智慧挖泥系统”。

参考文献

-
- [1] 黄海鸿, 李新宇, 宋守许. 绿色制造理论方法及应用 [M]. 清华大学出版社, 2021.05.
 - [2] 王忠诚, 乐鹏峰. 甲醇燃料动力船舶操作与管理 [M]. 人民交通出版社, 2025.07.
 - [3] 胡以怀. 新能源与船舶节能技术 [M]. 科学出版社, 2015.10.
 - [4] 汪国平. 船舶涂料与涂装技术 [M]. 化学工业出版社, 2011.02.
 - [5] 金晓鸿, 马少卿. 船舶涂料与涂装手册 [M]. 化学工业出版社, 2016.07.