济宁内河船舶高熵合金涂层技术适配性与产业落地对策研究

朱晨晨[1] 钱 坤[5] 王加革[3] 王 辉[2] 刘倩琦[4] 苏 鹏[2*] 李孝晨[1*]

1 济宁学院，山东 济宁 273155

2 济宁市鲁南工程技术研究院管理服务中心，山东 济宁 272000

3 济宁市科技创新服务中心，山东 济宁 272023

4 济宁市科学技术情报研究所，山东 济宁 272004

5 济宁高新招商发展集团有限公司，山东 济宁 272000

[摘要]济宁港跻身全国亿吨大港，当地在内河新能源船舶建造方面已形成全国领先的产业优势，但船体配套防腐材料的发展滞后于造船产业的扩张节奏。高熵合金凭借抗腐蚀、耐磨损、高强韧及结构稳定的综合优势，在船舶防护领域展现出巨大的应用潜力和广阔的发展前景。本文在梳理济宁港航产业发展现状的基础上，分析高熵合金涂层技术与济宁内河船舶场景的适配性，明确指出当前产业链存在“制造能力在前、材料配套在后”的核心矛盾。据此提出以下四条对策建议：一是依托新能源批量船型开展对比试验，验证实际效能；二是推动高熵合金涂层纳入济宁绿色船舶相关标准，为规模化推广提供规范支撑；三是强化涂层工艺配套以补齐产业短板，并深化运河老旧船舶运维翻新服务。

[关键词]高熵合金涂层；内河船舶；防腐蚀；济宁港航

DOI：10.33142/ect.v4i10.20663 中图分类号：TG174.44 文献标识码：A

Research on the Adaptability and Industrial Implementation Strategies of High Entropy Alloy Coating Technology for Inland River Ships in Jining

ZHU Chenchen[1], QIAN Kun[5], WANG Jiage[3], WANG Hui[2], LIU Qianqi[4], SU Peng[2*], LI Xiaochen[1*]

1. Jining University, Jining, Shandong, 273155, China

2. Management Service Center of Southern Jining Academy of Engineering Technology, Jining, Shandong, 272000, China

3. Jining Science and Technology Innovation Service Center, Jining, Shandong, 272023, China

4. Jining Institute of Science and Technology Information, Jining, Shandong, 272004, China

5. Jining High-tech Investment Development Group Co., Ltd., Jining, Shandong, 272000, China

Abstract: Jining Port has become a major port with billions of tons in China, and has formed a leading industrial advantage in the construction of new energy ships in inland rivers. However, the development of anti-corrosion materials for ship hulls lags behind the expansion pace of the shipbuilding industry. High entropy alloys, with their comprehensive advantages of corrosion resistance, wear resistance, high strength and toughness, and structural stability, have shown great potential for application and broad development prospects in the field of ship protection. On the basis of sorting out the current development status of Jining Port and Shipping Industry, this article analyzes the adaptability of high entropy alloy coating technology to the Jining inland waterway ship scene, and clearly points out the core contradiction of "manufacturing capacity first, material matching second" in the current industrial chain. Based on this, the following four countermeasures and suggestions are proposed: Firstly, conducting comparative tests based on new energy bulk ship types to verify actual efficiency; Secondly, we will promote the inclusion of high entropy alloy coatings in the relevant standards for green ships in Jining, providing normative support for large-scale promotion; Thirdly, strengthen the coating process to fill the gaps in the industry, and deepen the operation and renovation services for old ships in the canal.

Keywords: high entropy alloy coating; inland vessels; corrosion prevention; Jining Port Navigation

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

引言

2025 年，济宁港年吞吐总量跨越一亿大关，成为北方内河首个亿吨级港口，带动港航产业年营收总额突破千亿大关[1]。在航道建设方面，济宁范围内三级以上高等级航道建设规模 360km，占据山东省内河总量的 58%，凭借京杭运河水运，2000 吨级货运船只及万吨级船队可以直达长三角内河航道。在船舶制造方面，济宁建成了国内首个内河标准化新能源船舶产业园，2025 年开工建造 108 艘，交付 82 艘，累计完成国内外造船订单签约 180 余艘[2]，多款纯电动船舶被纳入省级重点装备目录。从一座依托煤炭资源的城市，转型为北方重要的内河航运枢纽，济宁实现了一次极具标志性的产业升级。

然而，产业规模迅速壮大之后，船舶全生命周期的耐久性管理难题逐渐显现出来。济宁在册船舶数量已达 7000 艘，其中不少船型进入了老龄化更新阶段。服役年限、维修保养水平对腐蚀累积程度有直接影响，服役年限越长，腐蚀损伤累积就越严重，良好的维修保养能够有效减缓腐蚀进程[3]。内河环境和海洋环境存在明显差异，水位涨落变化频繁，泥沙长期冲刷，再加上沿线工业废水造成复杂水质条件，水下船体面临的腐蚀机制与海洋船舶不同。传统的防护涂料在干湿交替、泥沙磨损共同作用下，维护周期较短，频繁维修导致的成本增加、船舶停航带来的损失，会进一步加重船舶运营负担。所以研发并应用新型长效防腐涂层具有重要现实意义。

从济宁船舶产业的整体布局来看，对于“要造出什么样的船”，当地已形成走新能源、标准化、批量化建造的清晰发展路线。但是，在“用什么材料造得更耐久”上，还没有形成系统性的技术方案。这是制造产能与新材料配套能力之间产生的差距，是当前产业链的薄弱环节，但同样也是未来产业提质升级的发力点。

高熵合金涂层凭借多主元成分设计带来的迟滞扩散效应和钝化膜稳定性，在腐蚀防护方面展现出传统涂层无法比拟的优势[4]。然而，该技术能否从实验室走向工程应用，真正适配济宁内河船舶的防护场景，仍是亟待解决的关键问题。为此，本文尝试结合材料特性与济宁产业现状开展分析，以期为提升本地内河船舶的长效防护水平提供可行路径。

1 高熵合金涂层技术特性与内河场景适配性概述

传统合金一般是选取一种主要元素，并少量添加其他元素，高熵合金则一般是由 5 种或 5 种以上元素按照等原子比或近原子比的方式组合，各组成元素的含量在 5%～35%范围内，形成热力学性质稳定的简单固溶体结构[5]。高熵合金具有热力学的高熵效应、微观结构的晶格畸变效应、动力学的迟滞扩散效应和性能的“鸡尾酒”效应[4]，在耐蚀性、耐磨性、综合力学性能及热稳定性方面均优于传统合金。

从工程应用角度看，目前可通过激光熔覆、等离子喷涂等工艺在钢基体表面制备高熵合金涂层[6]。其中，激光熔覆工艺制备的涂层具有致密的微观组织、与基材呈冶金结合、厚度可控等特点，具有显著的工业生产和应用优势[7]。Zhang 等[8]在模拟海水环境中的实验表明，FeCoNiCrAlW 体系涂层可以同时兼顾耐蚀和耐磨性能。Wang 等[9]的研究进一步揭示，W 元素的添加，不仅能通过提高合金硬度以增强抗磨损能力，还能通过促进致密钝化膜生成以抑制腐蚀。

面向内河航运工况，应规定涂层性能的基准规范数据。在高含沙环境之中，流速的增大会引起涂层质量损失的加大；而在低含沙量工况下，涂层磨损会经历一段较长平缓阶段[10]。京杭运河济宁段居处北方，水体悬浮泥沙浓度较高，且降水季节差异显著，水位起伏造成干湿周期轮换，对涂层耐磨耐蚀协同作用的综合性能提出了更高要求。济宁内河船舶防护材料要以耐腐特性为基底，突出加强应对泥沙研磨及沙粒打击的承受力，同时考量各类航段、水位涨落及船体部位的现场情形，对组分构成与工艺参数予以优化。衡量这类材料，不能仅以技术是否先进为准，更当着力于其在济宁的水情与维修实况条件下能否稳定见效，此要素是方案从规划走向落实的关键。

2 济宁的现实条件与核心矛盾

2.1 已具备的场景优势

产业应用具备现成的验证场景。济宁推进高熵合金涂层技术在内河船舶上应用，最突出的优势在于拥有现成的验证场景。济宁新能源船业采用标准化船型和模块化建造模式，每年交付量达到百艘级，涂层试验可以嵌入批量生产流程之中，无需耗费财力单独搭建中试平台。

政策层面存在有利条件。济宁市已将新能源船舶纳入 36 条重点产业链实施“一链一策”精准培育，明确提出提高“本地配套率”“培育壮大配套产业”的方向[11]。这为高熵合金涂层材料制备与涂装服务作为新增配套环节嵌入现有体系提供了政策接口。

产学研协同机制也已初步建立。济宁船企与武汉理工大学、宁德时代等共建创新平台的经验表明，引入外部材料研发资源具备可操作的机制基础。值得注意的是，济宁

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

学院联合企业申报的“核工业用耐海水腐蚀高熵合金设计与产业化关键技术研发”已经获得 2025 年度济宁市重点研发计划立项，同一课题组“AI 驱动的济宁内河航运船舶防腐关键技术研发与前瞻性布局研究”也获得批准。这说明本地高校已经开始基于济宁航运具体情况进行防腐技术研究工作，科研成果向产业转化正在逐步推进。

2.2 核心矛盾：制造能力在前，材料配套在后

综合来看，在船舶建造方面，济宁已经走在了前列，但在船体长效防护材料的研发与应用方面，发展脚步还没有跟上。具体而言，当地新能源船业的产品线覆盖 LNG、纯电、醇电混动等新能源动力形式，在动力系统层面的技术集成能力已得到市场验证[12]。但在船体防腐材料层面，仍主要依赖传统涂料体系，还没有把新型涂层技术整合到“绿色智能船舶”的完整体系中。济宁市工信局在产业链规划中明确提出“加大船用核心零部件及附属配件项目招引力度”，涂层材料与涂装服务正是这一招引方向下亟待补齐的缺口。

从产业发展情况看，济宁的问题并不是船舶腐蚀严重，而是船舶制造发展较快，相关防护材料和配套技术没有完全跟上。随着新能源船舶快速发展，济宁已经形成了较好的船舶制造基础和应用需求，但船体长效防护材料及涂装技术仍以传统体系为主，与新能源船舶向绿色化、智能化发展的要求还不完全匹配。因此，发展船体防护材料并非简单弥补产业短板，而是依托现有船舶制造基础，进一步完善产业配套、提高本地化配套能力的重要切入点。

3 推动济宁内河船舶高熵合金涂层应用的对策建议

建议一：借助新能源船舶批量建造契机，开展高熵合金涂层实船试验

开展涂层的研发，最核心的前提是获取现场实测数据。为此，可以选用新能船业 67.6 米纯电集散两用船这种已经定型、能够批量建造的船型，挑选船体水线下方有代表性的区域，将高熵合金涂层与现阶段普遍使用的防腐涂料放在相同环境下，开展平行对比试验[13]。

试验方案要充分考虑济宁河段独特的水环境，比如微山湖来水携带泥沙、沿线工业废水汇入带来的离子组分差异等，采集真实工况下的腐蚀速率数据。本阶段不必一味追求涂层性能达到最优，重点是搭建“济宁内河环境—高熵合金涂层”服役数据库，为后续涂层优化、地方标准编制提供原始支撑。

建议二：将高熵合金涂层纳入济宁“绿色船舶标准体系”建设框架

济宁正着手推进内河新能源船舶相关标准的制定，希望能以“济宁标准”争取行业话语权。倡导制定涂装用新型防护材料的选用标准，让“绿色船舶”不只看动力系统是否清洁低碳，也要看船体防护是否耐久。可推动行业协会同检测机构合作，依据实船测试数据，逐步建立《内河船舶高熵合金涂层防腐蚀技术规范》地方标准，明确涂层成分、制备工艺参数和性能评价标准。推进标准化，既要规范涂装应用，也要依托济宁内河航运和新能源船舶建造的先发条件，争取标准制定主动权。

建议三：推动高熵合金涂层制备与涂装服务作为“核心配套”环节落地济宁

济宁船舶产业本地化配套水平持续提高，区域产业资源日益集约。在这种情况下，要统筹盘活现有优势，重点攻坚适配本地造船现状、贴合实际应用、技术含量高且对产业链拉动作用明显的核心配套环节。其中，高熵合金粉末制备、涂层工艺优化、现场涂装施工、涂层质量检验等相关工序属于亟需填补的短板。借助已建成的产业链招商布局，新型防腐涂层材料的制备研发和船舶涂装配套服务成为重点招商培育对象。通过这种产业布局优化，能够进一步筑牢济宁内河船舶的绿色发展根基，为船体长期安全运维防护网搭建提供稳固技术力量。

济宁造船业的优势主要集中在新船开发制造方面，而京杭运河沿线的在役旧船维修涂装空间同样巨大。开展面向在役船舶的涂层更新服务模式研究，可依托济宁港航扎实的维修根基，不断夯实“制造+运维”一体化涂层服务的支撑底座[14]。这一路径既能拓宽高熵合金涂层的适用范围，也有助于济宁从“船舶制造中心”转型为“船舶技术服务中心”。

4 结语

济宁内河航运的跃迁，更多是把已有优势一步步做实、放大，而不是先找问题再补短板。亿吨大港、新能源船舶制造基地和标准化船型体系，已经为产业升级打下成熟基础；高熵合金涂层技术的价值，正在于为这些优势补足“耐久性”这一关键环节。

高熵合金涂层凭借耐蚀、耐磨、高强韧的综合优势，与济宁内河高含沙、干湿交替的服役工况高度契合；而济宁拥有的批量造船场景、政策培育接口和产学研协同机制，又为技术验证与产业落地提供了现实条件。技术特性与场景需求之间已经形成较好的契合关系，缺的是把这种契合转化为实际应用的推进路径。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

本文提出的对策建议，正是围绕这一转化过程展开。以实船试验获取真实服役数据，以地方标准固化技术规范，以核心配套环节补齐产业链短板，以运维服务拓宽应用市场。三条建议形成“验证-规范-配套-运维”的完整闭环。涂层材料能够实现自主生产并且在当地进行配套，这对于济宁达成内河船舶产业链而言是非常关键的一步。在场景驱动研发方面率先行动，借助真实内河服役数据来确定涂层优化标准，进而依靠系列化造船工况缩短验证周期，济宁所收获的或许不仅仅是一套防腐规划，还将会形成一种“制造场景重塑材料研发”的产业生态。这种生态能够发展到何种程度，也许比涂层技术自身更值得予以关注。

从更长远的视角看，济宁若能以高熵合金涂层为切入点，打通“材料研发-工艺配套-运维服务”的完整链条，就有望在内河船舶的绿色化、耐久化发展中形成可复制、可推广的经验，从“北方内河航运中心”进一步成长为内河船舶新材料应用的技术策源地。这一前景的实现，有赖于当地政府、高校、科研机构与船企协同发力、共同推进。

基金项目：济宁市重点研发计划（软科学）项目（编号：2025JNZC012）；山东省重点研发计划（软科学）项目（编号：2026RZB0208）；济宁学院 2025 年“百名卓越人才支持计划”。

[参考文献]

[1]冯帆,宋喜群.山东济宁:打造北方内河航运中心[N].光明日报,2026-01-25(003).

[2]高峰,武剑,尹明波.“北方内河航运中心”缘何落子济宁[N].中国改革报,2025-10-17(003).

[3]符之倡,杨进.基于多指标性能评估的老旧船舶腐蚀状态量化评估方法[J].舰船科学技术,2026,48(8):50-53.

[4]朱玉辉,江恬恬,周永康,等.高熵合金研究现状及其在海洋工程领域应用展望[J].稀有金属材料与工程,2026,55(9):2397-2410.

[5]曹甫洋,王浩权,季谦,等.大气等离子喷涂 FeCoCrNiMn 高熵合金涂层的耐海水腐蚀与磨损性能[J].中国腐蚀与防护学报,2024,44(6):1529-1537.

[6]孙幸,卢帅丹,刘赟姿,等.激光熔覆高熵合金涂层制备与性能调控研究进展[J].材料开发与应用,2026(1):2026062202.

[7]肖浩,黄剑,汪鹏,等.高速激光熔覆 FeCoCrNiMo 高熵合金涂层微观组织演变及耐蚀性研究[J].中国激光,2025,52(4):122-133.

[8] Zhang M, Zhang Y, Dai P, et al. Study on the process parameters and corrosion resistance of FeCoNiCrAl high entropy alloy coating prepared by atmospheric plasma spraying [J].Materials,2025(18):1396.

[9] Wang X, Chu Z, Ma X, et al. Unveiling corrosion behavior and multiscale tribocorrosion mechanism of W-alloyed FeCoNiCrAl high-entropy alloy coatings: insights from experiments and DFT calculations[J].Applied Surface Scicence,2026(745):167525.

[10]刘明维,曾丽琴,余杰,等.内河码头钢构件防腐涂层冲蚀特性及损伤模型[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(10):115-122.

[11]济宁市工业和信息化局. 亿吨大港启新程丨济宁市工信局：延伸塑强产业链条 推动内河新能源船舶做大做强[EB/OL].(2025-12-23)[2026-09-14].

[12]冯劲舸.济宁引领内河新能源船舶产业[J].山东国资,2025(7):87.

[13]王凯,盛颖航,高鹏,等.激光熔覆 FeCoCrNiMn 高熵合金涂层的工艺探索[J].表面技术,2025,54(9):175-188.

[14]徐晓峰.船舶栖装件涂装工艺标准及规范研究[J].船舶物资与市场,2025,33(8):23-26.

作者简介：朱晨晨（2007—），女，汉族，山东潍坊人，材料科学与工程专业在读本科生；*通信作者 1：苏鹏（1984—），男，汉族，山东泗水人，硕士，副研究员，济宁市第十三届、十四届市政协委员，主要从事科技服务、产学研合作、成果转化等相关工作；*通讯作者 2：李孝晨（1991—），男，汉族，山东淄博人，博士，讲师，主要从事稀土合金、人工智能等研究工作。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.