

船舶用涂层仿生减阻性能检测探索及应用研究

刘桃凤, 封俊

泉州海洋职业学院, 福建 石狮 362700

DOI: 10.61369/SSSD.2026070042

摘 要： 基于仿生学原理，结合材料改性技术，本文对仿生涂层的性能检测方法及其在船舶涂层领域的工业应用进行了系统研究。研究内容涵盖数值模拟与实验验证、航速预报与能效评估以及改性涂层性能测试方法三个方面，重点探讨了柔性仿生减阻涂层的设计理念、性能验证方法及工程应用现状。通过数值模拟与实验数据的综合分析，总结了仿生减阻涂层的技术优势，并展望了未来研究方向，旨在为后续技术优化提供理论支撑。

关 键 词： 仿生减阻涂层；数字模型；能效评估；性能测试

Exploration and Application Research on Bionic Drag Reduction Performance Testing of Coatings for Ships

Liu Taofeng, Feng Jun

Quanzhou Ocean Institute of Vocational Technology, Shishi, Fujian 362700

Abstract： Based on bionics principles and integrated with material modification technologies, this paper presents a systematic investigation into the performance testing methods of bionic coatings and their industrial applications within the marine sector. The research encompasses three primary areas: numerical simulation coupled with experimental validation, ship speed prediction and energy efficiency assessment, and performance testing methodologies for modified coatings. A particular focus is placed on the design philosophy, performance validation approaches, and current engineering application status of flexible biomimetic drag-reducing coatings. Through a comprehensive analysis combining numerical simulations with experimental data, the technical advantages of biomimetic drag-reducing coatings are summarized, and future research directions are proposed. This work aims to establish a theoretical foundation for subsequent technological optimization.

Keywords： bionic drag-reducing coating; numerical model; energy efficiency evaluation; performance test

引言

随着全球航运业的快速发展，船舶节能增效已是学术界与工程界关注的热点问题。船舶在水介质中航行时，船体表面与水相互作用产生的摩擦阻力占总阻力的70%以上，导致大量能源消耗，且制约船舶航速的提升。因此，开发高效减阻技术对提高船舶综合性能具有重要意义。通过仿生学原理^[1]对这些生物表面结构进行模拟，并对船舶涂层进行功能改性，开发出具有卓越减阻性能的新型功能涂层。

（一）制备方法概述

仿生减阻涂层的制备方法呈多样化特征^[3]，主要可分为物理加工与化学修饰两大类。物理加工方法包括激光蚀刻、电火花加工、微电镀加工等，可用于在基材表面构建微米级结构；化学修饰方法涵盖溶胶-凝胶法、电化学沉积、自抛光漆技术等，旨在赋予涂层疏水性和抗污性能。本研究采用高精度3D打印技术直接构建仿生微结构^[4]。将聚氨酯预聚体、扩链剂及各类助剂按比例均匀混合，经脱泡处理后制得聚氨酯溶液，随后将溶液浇注于模板中，经热固化成型后剥离模板，最终获得具有特定仿生结构的聚氨酯涂层。

（二）材料设计与配方优化

仿生减阻涂层的制备核心在于仿生结构设计与材料体系创新^[5-6]。常用基体材料包括聚氨酯、硅橡胶及聚乙烯薄膜，弹性聚氨酯涂层可通过调控交联密度与表面粗糙度，实现减阻与防污的双重功能。本研究通过添加纳米二氧化硅填料对聚氨酯进行改性，形成优化涂层配方，具体组成见表1。

表1 改性涂料配方

成分	比例	作用	备注
水性聚氨酯乳液	89%	基体材料	柔性主体
纳米 SiO ₂	3.05%	增强硬度和疏水性	强化耐久性
氟硅烷偶联剂	1.36%	表面疏水改性	疏水减阻
其他助剂	2.04%	促进交联、固着等	交联增强

注：基体材料常用复合乳液，届时需调整相关物料比例。

（三）典型应用案例

中国科学院宁波材料技术与工程研究所团队研制的螺旋桨仿生蒙皮，该材料结合“类液态”动态界面特性与微米级柔性结构（厚度0.1~0.2 mm），通过降低螺旋桨表面与水流间的剪切力，有效提升了推进效率^[9-10]。德国汉堡水池研究团队则开发了双层结构柔性仿生涂层：其中“鲸脂”层（硅凝胶与硅橡胶复合材料）负责缓冲水流冲击，“真皮”层（聚乙烯薄膜）提供结构支。研究表明，适当增加“鲸脂”层厚度可提升转捩延迟效果，最大延迟距离可达90 cm。

一、仿生减阻涂层结构改性研究

（一）功能改性方法

模仿鲨鱼皮等生物表面特征，利用光刻、模板或激光加工技术在涂层表面构建微米/纳米级纹理构建表面微结构；添加功能性纳米粒子如SiO₂、碳纳米管填充涂层微孔以提高表面光洁度。部分纳米粒子还能在固液界面诱导形成润滑层，降低摩擦阻力。其中碳纳米管还可同步提升涂层的力学性能与耐磨性；同时受海豚皮肤自适应特性启发，设计开发能响应温度、压力等环境变化的智能响应型涂层；采用等离子体处理调控表面化学性质，喷涂PDMS、氟碳等疏水材料构筑超疏水表面，再经二次固化增强涂层稳定性后处理和功能强化也是提升涂层综合性能的重要手段。

（二）改性涂层制备工艺

通过喷涂或刷涂将含改性材料的溶液直接覆盖于基材表面，溶液涂覆法工艺简单、成本低，但需精确调控溶液浓度与涂覆速率以控制膜厚与均匀性；利用金属醇盐的水解缩聚反应形成溶胶，经涂覆、干燥及热处理得到涂层，形成溶胶-凝胶法制备的涂层成分可控、纯度高、微观结构均匀，但工艺条件要求严格，流程较复杂；在高温/低压条件下，使气态前驱体在基体表面反应生成固态涂层的化学气相沉积法更适用于复杂构件，涂层结合力强、性能优异，但设备投入大，操作门槛高。

二、改性涂层性能与检测方法

（一）数值模拟与实验验证

1. 计算流体动力学模拟方法

（1）模型构建

基于仿生涂层表面微观结构特征（如鲨鱼皮沟槽、荷叶微纳结构），建立三维几何模型。采用大涡模拟方法捕捉近壁面流动特性，结合壁面函数处理近壁流动。边界条件设置如下：航速范围覆盖船舶典型工况（0~20节），流体介质为海水（密度1025 kg/m³，黏度1.08×10⁻³ Pa·s），壁面采用无滑移边界条件，表面粗糙度进行参数化处理。

数据输出包括摩擦阻力系数、流速分布及湍动能变化等关键参数，要求模拟结果与实验数据误差控制在5%以内。

（2）参数优化

采用计算流体动力学软件对涂层覆盖船体进行流场分析，预测阻力分布与转捩区延迟效果。通过网格敏感性分析优化计算域

网格划分（重点加密边界层网格），并应用Spalart-Allmaras湍流模型验证改性涂层减阻预测的准确性。

2. 表面粗糙度检测

采用白光干涉仪测量涂层表面三维形貌，计算算术平均粗糙度（Ra）、最大高度（Rz）等参数；使用原子力显微镜分析纳米级微观结构分布，测试过程遵循ISO 4287/4288表面粗糙度规范，旨在量化涂层表面形貌对减阻性能的影响。

根据《船舶涂层低阻性能验证与检验指南》要求，涂层施工后需进行表面粗糙度检测，确保Ra ≤ 50 μm的标准得以满足。

（二）航速预报与能效评估

基于CFD模拟与水洞实验数据建立船舶阻力-航速关系曲线，通过水池试验或数值计算验证航速提升效果。结合单位油耗（EEDI）指标评估减排潜力，通过对比裸钢表面与涂层覆盖表面的能效差异开展节能潜力评估，从而优化船舶运营参数，实现碳减排目标。

能效指标计算方法如下：EEDI = CO₂排放量 / （载货量 × 航程）

（三）改性涂层性能测试

1. 减阻性能测试

采用风洞实验、水洞实验及实船试验等方法对改性涂层的减阻性能进行综合评估。风洞实验和水洞实验可在实验室条件下模拟船舶航行时的流场环境，通过测量不同工况下的阻力系数评估涂层减阻效果。拖曳水池实验采用全尺寸船模测试，测量不同航速下的总阻力变化。

通过缩比模型实验验证CFD模拟结果的准确性。实验系统包括：循环水洞系统、高精度力传感器、粒子图像测速仪。实验步骤为：将涂层试样安装于平板模型表面，逐步增加流速并记录阻力数据，对比不同表面粗糙度条件下的阻力差异。

2. 耐久性测试

动态界面材料需耐受长期海水浸泡和机械磨损考验。中国船级社认证数据显示，仿生蒙皮材料生命周期约为2.5年，综合节能率达1.5%。本研究通过磨损实验评估涂层耐磨性能，采用加速老化实验考察涂层耐久性。具体测试项目包括：盐雾试验测试耐腐蚀性能；紫外辐照试验模拟海洋环境光老化效应；机械磨损测试采用砂粒冲刷试验；同时使用预制式摩擦率仪测试涂层耐磨性能。

3. 防污性能

通过海洋生物附着实验评估涂层防污性能：采用静态挂片法

在港口水域进行6~12个月浸泡实验，全过程观察并记录生物附着情况。实验室模拟采用藻类孢子接种法，参照 ASTM D6990 标准测试抑菌率。聚氨酯涂层通过抑制生物膜形成，可有效减少污垢覆盖，降低船舶维护成本。

4. 节能效果评估

仿生减阻涂层的应用能够显著降低燃油消耗。通过能效对标分析，结合 EEXI（现有船舶能效指数）评估达标率；实船油耗监测采用燃油流量计记录涂层应用前后的油耗差异，量化节能效果。

5. 耐腐蚀性能

耐腐蚀性能对船舶在海洋环境中的长期使用至关重要。常用测试方法包括盐雾试验、电化学测试、极化曲线法（Tafel 分析）、电化学阻抗谱（EIS）等，用于评估涂层防护寿命。

6. 附着力测试

附着力直接影响涂层与基体之间的结合强度，可采用划格法、拉拔法等进行测试。划格法参照 ASTM D3359 标准，划痕间

距 1 mm，评估涂层剥离面积；拉拔试验参照 ISO 4624 标准，要求涂层与基材的粘结强度 ≥ 5 MPa 为合格。综合性能是仿生减阻功能改性涂层实现工程应用的基础。性能分析涵盖减阻率、耐腐蚀性及防污性等多维度指标，需通过综合测试进行验证。动态试验结果显示，改性涂层在航速提高时减阻优势更为显著，最大减阻率可达 3%。

三、结论

本研究基于仿生减阻原理，通过材料创新与工艺优化，成功制备了兼具显著减阻与节能环保性能的功能涂层，该涂层能有效降低船舶航行阻力，已在超大型油轮上实现 3% 的油耗优化效果，展现出良好的工程应用前景。未来研究应聚焦制备工艺改进、耐久性提升与综合性能调控，同时结合 CFD 模拟、纳米技术与生物仿生的发展，推动仿生减阻涂层在远洋运输和水下航行器等领域实现更广泛应用，为船舶工业绿色转型提供关键技术支撑。

参考文献

[1]BECHERT D W, BRUSE M, HAGE W, et al. Fluid mechanics of biological surfaces and their technological application[J]. Naturwissenschaften, 2000, 87(4): 157-171.

[2]ISO 4287:1997, Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method[S].

[3] 科普中国. 最新突破！我国科学家研发螺旋桨仿生蒙皮新材料，油轮油耗大幅下降 [EB/OL]. (2024-08-26). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1808378195427600017>.

[4] 中国船级社. 船舶低阻涂层验证与检验指南：低阻涂层标准化检验方法及航速预报模型 [S]. 2024.

[5] 韦海东. 一种硅橡胶和网状聚氨酯的复合材料、制备方法及应用：CN202010718803.6[P]. 2020-11-03.

[6]PU S, CHENG G, YU T, et al. A summary of research results on the acquisition and application of typical navigation parameters of intelligent ship[C]//2020 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA). 2020.

[7] 刘浩, 谢络, 姚博仁, 等. 高分子-自抛光漆复合涂层减阻特性实验研究 [J]. 力学学报, 2023, 55(6): 1228-1235.

[8]CHEN D K, CUI X X, LIU X J, et al. Dual-composite drag-reduction surface based on the multilayered structure and mechanical properties of tuna skin[J]. Microscopy Research and Technique, 2021, 84(8): 1862-1873.

[9]ZHANG Y C, LI X, LI P X, et al. Eel skin inspired flexible polymeric coating for drag reduction[J]. Progress in Organic Coatings, 2024, 197: 108859.

[10]FENG Y Q, CHEN D K, LEI Z L, et al. Coupled bionic drag-reducing surface covered by conical protrusions and elastic layer inspired from pufferfish skin[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(28): 32747-32758.