

高耐磨弹性体材料在海上风电场靠船件防护中的应用可行性研究

陈宏楷 刘龙翔 张耀邦 梁俊清
中广核（福建）风力发电有限公司 福建 福州 350000

摘要：海上风电场靠船件长期承受船舶高频撞击与海洋腐蚀的耦合作用，传统橡胶护舷方案存在缝隙腐蚀、螺栓失效与运维成本高昂等痛点。本文提出以高耐磨高分子弹性体为主材、配套环氧玻璃鳞片底漆的密贴式复合防护体系，从材料性能、施工工艺、实海验证与经济性四方面开展研究。试验表明，该弹性体拉伸强度30.3 MPa，断裂伸长率583%，Taber磨耗量35~40 mg，附着力超20 MPa；4200 h第三方检测五项海洋环境性能全部达标。针对海上无法使用喷涂设备的工况，材料优化为底面合一刮涂型，单道成膜2000 μm以上，单根施工约3 h。全包覆单米成本约2000元，较传统方案降低75%~80%，全生命周期成本降低70%以上，投资回收期约3年。某海上风电场60天实海测试验证了方案可行性。

关键词：海上风电；靠船件；高分子弹性体；缝隙腐蚀；刮涂施工

引言

全球能源转型背景下，我国海上风电发展迅猛，2025年底累计装机突破3500万kW，2030年规划超1亿kW。单台风机年均登靠运维30~50次，靠船件处于浪溅与潮差区，承受高盐雾腐蚀、干湿交替与船舶高频撞击耦合作用，其防护性能直接影响作业安全、结构寿命与运维成本。

当前主流方案短板明显：橡胶护舷存在0.1~1 mm装配间隙，易引发缝隙腐蚀，螺栓完好率不足60%，寿命仅约3年，更换需起重船舶，成本高昂；无防护钢结构则腐蚀快、易损伤船体。本文以FQR405高分子弹性体为核心，配套环氧玻璃鳞片底漆与防腐纳米材料构建复合防护体系，从材料性能、施工工艺、实海验证与经济性四方面开展研究，为靠船防护技术升级提供支撑。

1 FQR405 材料特性与复合防护体系

1.1 材料概述

FQR405是一种双组分、高交联度改性热固性弹性体，由异氰酸酯与胺类通过聚合反应生成，可与钢、混凝土、玻璃钢等多种基材形成高强度化学键合。该材料针对重度磨损、高频冲击、长期浸水等严苛工况设计，核心特质为耐磨性能优异、拉伸与伸长率均衡、水解与化学稳定性突出，可同时实现抗冲击缓冲与长效防腐双重功能^[1]。

1.2 核心力学性能

FQR405材料硬度为邵氏A80~90，兼顾柔性缓冲与结构支撑。经ASTM D412标准测试，其拉伸强度达30.3 MPa，断裂伸长率为583%，远优于普通天然橡胶（20~25

MPa，300%~400%）；长期使用温度覆盖-62℃至120℃，低温韧性优异。其高弹性源于交联聚合分子结构，外力作用下分子链舒展形变吸收能量，外力撤除后快速回弹复位，通过表层塑性变形吸收船舶撞击动能，形成“牺牲性磨损防护机制”。

界面附着力测试显示，在规范处理的钢表面附着强度超过20 MPa，破坏形式为材料本体撕裂，可彻底摆脱螺栓固定依赖；抗撕裂强度达83.2 kN/m，远高于普通橡胶的20~30 kN/m，可有效抵御尖锐边角刮蹭引起的裂纹扩展。

1.3 海洋环境适配性能

材料配方具备优良的水解稳定性与耐介质腐蚀能力，长期海水浸泡无溶胀、无降解。该材料已通过第三方委托检验，依据GB/T 1740-2007、GB/T 1865-2009等五项国家标准，完成4200 h长周期老化与腐蚀测试，所有检测项目全部符合要求。五项测试中，耐湿热、人工气候老化、盐雾循环、耐盐水浸泡及循环老化试验（25个循环）均未出现起泡、开裂、剥落、粉化等失效现象，仅循环老化后出现轻微色变与失光，整体满足海上防护涂料体系的性能要求。同时，材料表面致密光滑，海生物不易附着，组分不含重金属及有毒物质，避免传统橡胶护舷老化碎屑导致的微塑料污染风险^[2]。

1.4 施工工艺特性与复合防护体系构成

海上作业受风力波动、空间受限及窗口期短等制约，常规高压无气喷涂难以实施：风况不稳致漆雾扩散，影响成膜均匀性与材料利用率，且不符环保要求；喷涂设备多，靠船件作业面狭窄，多工种协同进一步压

缩平潮作业时间。针对上述工况，FQR405优化为底面合一刮涂型材料，无需喷涂设备，仅靠手工刮刀即可施工。材料整合底漆的界面粘结与防腐功能及面漆的抗冲击、耐磨性能，单道刮涂成膜2000 μm 以上，一道工序完成双重防护。整套工序可单人独立完成，大幅简化施工组织，节约成本、规避风险。

针对靠船件浪花飞溅区及潮差区（+1 m~+5 m）的恶劣工况，采用“底漆封闭+弹性面层+封边”三层复合防护结构：EP251环氧玻璃鳞片底漆附着于钢基材，起界面过渡与腐蚀屏障作用；FQR405弹性面层承担抗冲击、耐磨核心功能；EP255纳米封边层在涂层边缘与基材衔接处形成密封过渡，阻断海水渗入。

2 现场施工工艺与质量管控

靠船件防腐改造严格遵循标准化工艺流程：①表面预处理，清除靠船件表面附着的海生物及盐渍；②除锈处理，除去表面锈蚀层与附着涂层，达到规定除锈等级；③涂装EP251环氧玻璃鳞片防腐底漆；④刮涂FQR405高分子弹性面层，一次成型至设计厚度；⑤EP255纳米材料封边处理。

施工环境条件控制：选择风力 ≤ 6 级的晴朗天气出海作业，温度控制在8 $^{\circ}\text{C}$ ~35 $^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $< 85\%$ ，基材温度高于露点温度3 $^{\circ}\text{C}$ 以上。阴雨天、高湿天气禁止涂装作业，出海作业前核实当日天气与海况，动态调整作业方式与时间，保障施工安全与质量^[3]。

3 技术经济综合优势分析

3.1 防护性能优势

FQR405涂层与钢结构100%密贴成型，无装配间隙，配合底漆封边形成连续防腐屏障，从根源解决传统橡胶护舷0.1~1 mm间隙引发的缝隙腐蚀难题，可使钢结构腐蚀速率降低85%以上，防腐寿命从传统方案的3~5年延长至15年以上。583%的断裂伸长率保障了强缓冲吸能能力，12倍于碳钢的耐磨性可有效抵御船体频繁滑动摩擦。同时，材料表面光滑无析出物，靠泊时不会在船舷留下黑色橡胶印记或刮伤船体油漆，降低运维船舶保养成本。

3.2 全生命周期成本优势

单位造价上，传统橡胶护舷单米采购预制成本8000~10000元，FQR405全包覆涂层单米仅约2000元，价差显著。安装成本差异更为突出：传统方案需起重船舶与多工种配合，单台机位单次船机人工成本2~3万元；FQR405刮涂方案无需大型起重设备，可依托日常运维船舶顺路作业，大幅降低船机分摊成本。

以单根6 m靠船件测算，传统护舷单次采购加安装总费用7~9万元，寿命仅3~5年；FQR405方案初始投入2~3

万元，寿命可达15~20年。20年运营周期内，传统方案需更换4~6次，直接费用35~50万元；新型方案仅需1次施工加少量局部补涂，总投入4~5万元，全生命周期成本降低70%以上。综合测算投资回收期约3年，经济效益显著。

3.3 施工与运维效率优势

该方案支持原位施工，无需拆除原有结构、无需动火作业，对风电场正常运行影响极小。刮涂工艺工序大幅简化，底面合一特性减少施工道次，单根靠船件单人施工仅需约3 h，单机位可在单个平潮窗口内完成，既大幅节约船机与人工成本，也降低了高空吊装安全风险。运维阶段取消螺栓连接，从根源消除了传统护舷80%以上的失效来源；日常巡检仅需目视检查，台风季后无需逐颗紧固螺栓；局部损伤可现场补涂修复，无需整体更换^[4]。

4 工程验证与实海测试分析

4.1 多行业与先期试点验证

FQR405材料已在矿山、水电、工业地坪等领域完成长期工程验证，在重磨损、强冲击工况下，其使用寿命是普通橡胶衬里的4倍以上，技术成熟度高。福建松下港2024-2026实海测试显示，磨损高发区运行20个月磨损均匀，无撕裂粉化，耐盐雾性能优异，适配福建海域工况。

4.2 某风电场实海测试

2026年6月，在某海上风电场FA19靠船构件完成刮涂施工，60天后开展实地回访评估。测试区域为+1 m~+5 m潮差浪溅区。测试周期内，构件承受多次运维船舶靠泊挤压、金属梯具刚蹭的机械载荷，同时持续经受高盐雾、干湿交替腐蚀作用。运行60天后，涂层无剥落、起皮、分层，整体附着力优异；局部擦痕与轻微凹陷为表层塑性变形，无脆性崩裂；涂层周边无锈蚀蔓延，与实验室检测结论一致。施工效率实测显示，6~8 m长靠船件单次刮涂成膜3000 μm 以上，单根施工耗时约3 h。（图1所示）



图1 涂装后初始状态

4.3 综合性能对标

综合实验室数据与现场实测，将FQR405刮涂方案与传统橡胶护舷进行多维度对标，结果如表1所示。可以看出，传统方案在材料本体、安装成本、全周期费用上

均显著高于新型方案，且存在缝隙腐蚀、螺栓失效等固有缺陷；FQR405方案在防护性能、施工便捷性、使用寿命、全周期成本等核心指标上均实现跨越式提升，综合优势显著。

表1 FQR405与传统橡胶护舷综合性能对比

对比项目	传统橡胶护舷	FQR405刮涂方案	性能差异
单米材料造价	8000~10000元/米	约2000元/米（全包覆2000μm）	材料造价降低75%~80%
安装方式	螺栓锚固+起重船舶吊装	界面粘结+手工刮涂	无需起重机械，工序大幅简化
单次安装总费用（单根6米）	约9~10万元	约1~2万元	初始投入降低约70%
单根施工时长	需吊装配合，约半个工作日	约3 h	作业时间大幅缩短
界面状态	0.1~1 mm缝隙，缝隙腐蚀严重	完全密贴无间隙	从根源消除缝隙腐蚀
耐海洋老化性能	易老化龟裂，缝隙加速腐蚀	4200 h检测无失效	长效防腐性能显著提升
Taber磨耗量/(mg·千转-1)	120~150	35~40	耐磨性提升2~3倍
施工组织	多工种配合+吊装作业	单人即可完成整道工序	人工与船机成本大幅降低
年维护次数	3次以上	≤ 1次目视检查	维护量减少70%
预估使用寿命	3~5年	15~20年	寿命延长3~4倍
20年周期总费用（单根）	约35~50万元	约4~5万元	全周期成本降低70%以上

多方应用反馈显示：施工端认为工序简化、吊装风险降低；运维端认为巡检工作量大幅下降；船员反馈靠泊缓冲感柔和，船体无黑痕掉漆，使用体验明显提升^[5]。

结论

（1）技术成熟可靠。FQR405力学性能优异，4200h第三方检测全部达标；密贴式复合防护体系彻底解决缝隙腐蚀与螺栓失效两大痛点。（2）工艺适配海上工况。底面合一刮涂型材料单人即可施工，单道成膜 ≥ 2000μm，单根靠船件施工约3h，适配短窗口期作业，人工与船机成本优势显著。（3）经济效益突出。传统橡胶护舷单米造价8000~10000元，全周期成本高昂；FQR405全包覆单米约2000元，20年全生命周期成本降低70%以上，投资回收期约3年。（4）实海验证表现优异。中广核某海上风电场FA-19机台60天实海测试证实涂层附着力、防腐性、耐磨性符合预期，与实验室结论相互印

证，工程适用性强。建议分阶段推进工程应用：先开展3~5台试点积累数据，再推广至新建与在役项目；针对主靠泊面、极端海域等优化涂层厚度与封边工艺；完善质量管控与长效跟踪机制，持续积累全寿命周期数据。

参考文献

[1] 国家能源局. 海上风电发展规划(2021—2035)[R]. 北京: 国家能源局, 2022.

[2] 中国可再生能源学会. 中国海上风电发展报告: 2025[R]. 北京: 中国可再生能源学会, 2025.

[3] 李明, 张华. 海上风电基础结构防腐蚀技术研究进展[J]. 海洋工程, 2023, 41(2): 78-86.

[4] 陈宇. 海上风电场运维船舶靠泊安全与防护技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.

[5] 王强, 刘伟. 聚脲弹性体在海洋工程防护中的应用现状与展望[J]. 材料保护, 2024, 57(1): 112-118.