水利水电技术(中英文)
Water Resources and Hydropower Engineering
ISSN 1000-0860,CN 10-1746/TV

《水利水电技术(中英文)》网络首发论文

题目：基于纳米无机材料的仿生涂层技术在水生态保护修复中的应用研究探析
作者：李志鹏，詹政法，赵进勇，丁洋
收稿日期：2025-01-23
网络首发日期：2025-03-27
引用格式：李志鹏，詹政法，赵进勇，丁洋．基于纳米无机材料的仿生涂层技术在水生态保护修复中的应用研究探析[J/OL]．水利水电技术(中英文).
https://link.cnki.net/urlid/10.1746.tv.20250326.1605.007

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2025-03-27 08:58:26　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/10.1746.tv.20250326.1605.007

基于纳米无机材料的仿生涂层技术在水生态保护修复中的应用研究探析

李志鹏[1,2]，詹政法[3]，赵进勇[1,2]，丁 洋[1,2]

（1. 中国水利水电科学研究院，北京 100038；2. 水利部京津冀水安全保障重点实验室，北京 100038；3. 韦尔狄（广州）生物工程科技有限公司，广东 广州 510000）

摘 要：【目的】评估仿生涂层技术在水生态保护修复中的防污、防腐及抗生物附着性能，分析其在复杂水环境下的应用效果。【方法】采用多层喷涂工艺制备仿生涂层，测试其抗菌性能、物理性能指标及水质安全指标，综合评估涂层在水生态环境中的防护能力。结合典型案例，验证涂层的长期稳定性及防护效果。【结果】仿生涂层技术通过多层喷涂工艺在表面涂覆形成致密保护层，在防污、防腐及耐久性方面表现优异，抗菌率超过 95%，VOC 排放量≤23 g/L，在酸碱和盐水环境中保持稳定，工程应用表明，耐沾污性≤2%，清洁维护频率降低 1-3 倍，设施使用寿命显著延长。【结论】仿生涂层技术在水生态保护修复中展现出优异的防污、防腐和抗生物附着能力，可有效减少生物污染，延长设施使用寿命，降低维护成本，为水工结构提供高效、可持续的防护方案。

关键词：涂层技术；水生态保护修复；着生生物防控；仿生涂层技术；防腐抗污；影响因素

Research and analysis on application of bionic coating technology based on nano-inorganic materials in water ecological protection and restoration

LI Zhipeng[1,2], ZHAN Zhengfa[3], ZHAO Jinyong[1,2], DING Yang[1,2]

（1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Key Laboratory of Water Safety for Beijing-Tianjin-Hebei Region of Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 3. Verdi (Guangzhou) Bioengineering Technology Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] To evaluate the anti-fouling, anti-corrosion, and anti-biofouling performance of bionic coating technology in water ecological protection and restoration, and analyze its application effectiveness in complex water environments. [Method] Multi-layer spraying technology was used to prepare the bionic coating, and its antibacterial performance, physical performance indicators, and safety indicators of water quality were tested to comprehensively evaluate the coating's protective ability in aquatic ecological environments. Combined with typical cases, the long-term stability and protective effect of the coating were verified. [Results] Bionic coating technology formed a dense protective layer on the surface through a multi-layer spraying process, demonstrating excellent performance in anti-fouling, anti-corrosion, and durability. The antibacterial rate exceeded 95%, VOC emissions were ≤23 g/L, and the coating remained stable in acidic, alkaline, and saline environments. Engineering applications showed that the anti-fouling rate was ≤2%, the cleaning and maintenance frequency was reduced by 1

收稿日期：2025-01-23 **修回日期：**2025-03-03 **录用日期：**2025-03-19

基金项目：国家重点研发计划项目(2024YFC321090004);水利部重大科技项目（调水工程多维多级水系连通及生态调度关键技术研究 SKR-2022052）;中国水利水电科学研究院基本科研业务费项目(WE0145B042021)

作者简介：李志鹏(2000—)，男，硕士研究生，主要从事河流生态保护与修复研究。E-mail：1766606151@qq.com

通信作者：赵进勇(1976—)，男，正高级工程师，博士，主要从事于河流生态修复、生态水工学等方向的研究。E-mail: zhaojy@iwhr.com

to 3 times, and the service life of the facilities was significantly extended. [Conclusion] Bionic coating technology demonstrates excellent anti-fouling, anti-corrosion, and anti-biofouling capabilities in water ecological protection and restoration. It can effectively reduce biological pollution, extend the service life of facilities, lower maintenance costs, and provide an efficient and sustainable protection solution for hydraulic structures.
Keywords: coating technology; water ecological protection and restoration; biofouling prevention and control; bionic coating technology; anti-corrosion and anti-fouling; influencing factors

0 引言

在水利工程的运行过程中，水生态保护面临诸多挑战[1]，尤其在灌溉、防洪与区域水资源优化配置等方面[2]。长期运行导致藻类过度繁殖、水污染加剧以及管理难度增加，进而影响水生态系统的稳定性和水质安全[3-6]。现有的物理刮除、化学制剂灭杀等方法，虽可短期内降低水体污染，但存在环境污染、壁面损伤、成本高及适用性受限等问题，难以满足水利工程长期运行的需求[7]。因此，开发高效、环保、长效的防污技术，对于提升水利设施耐久性、降低维护成本以及改善水环境质量具有重要意义。针对这一问题，涂层技术作为一种新型防护技术，可通过减少水利设施表面生物附着和化学腐蚀，在水生态保护及工程耐久性提升方面展现出广阔应用潜力。

姚国友通过市场调研和文献分析，总结了 10 类涂层材料，主要包括硅酸盐类、杂化材料类、丙烯酸树脂类、环氧树脂类、聚脲类、乙烯基树脂类、硅烷类、氟碳树脂类、聚氨酯类和陶瓷漆类[8]。其中，环氧树脂和聚氨酯类涂层因其较强的耐腐蚀性和附着力，广泛应用于管道、水池及坝体防护，但在长时间运行后可能出现老化、剥落及防污效果下降的问题[9]。氟碳树脂类和陶瓷漆类涂层在耐候性和自清洁性方面表现较好，但其施工要求高、成本较高，限制了大规模推广应用[10]。尽管这些涂层在防污、防腐方面各具优势，但在实际应用中仍存在以下局限性：（1）生态安全性问题：多数防污涂层依赖重金属毒理机制，其老化或更换过程中可能释放微塑料和化学残留。（2）基材适配性不足：涂层的防污效果受基材的物理化学特性影响较大，现有涂层在不同基材上的适应性有限，难以满足复杂施工条件。（3）功能单一：现有防污涂层难以兼顾防污、防腐、耐磨、抗老化等多种性能，影响其长期效能。（4）经济性不足：高性能涂层的初始成本较高，而生命周期效能与维护成本匹配性不足，影响推广应用。

针对上述问题，国内外学者提出了多种解决方案并取得了重要进展，江雷院士首次提出“二元协同界面效应”，指出化学组成和微观结构的协同优化能够显著提升防污性能[11]。OHKOY 等[12]发现通过紫外光照射下二氧化钛（TiO_2）可产生羟基自由基（•OH），可有效分解有机物，抑制藻类生物膜的形成，这一研究表明，通过引入具有光催化功能的材料，可以实现对表面污染物和微生物的主动降解，赋予涂层更高效、更环保的防污性能。DE KWAADSTENIET 等[13]探讨了纳米技术在抗微生物涂层中的应用，通过释放抗菌离子和光催化作用抑制微生物生长。这些研究表明，通过优化涂层的化学组成、微观结构和表面特性，可以显著提高防护性能。吉林大学任露泉院士课题组梳理了仿生海洋防污涂层的研究进展，提出通过在表面构建微纳结构来防止生物污损[14]。这些研究为涂层的防污机制提供了新思路，但防污涂层在淡水环境中的长期稳定性研究较少，大多研究集中于海洋应用。同时，涂层施工工艺适应性差，在大面积水工建筑上的施工工艺仍需优化等问题。

尽管仿生涂层技术在水生态保护与工程应用中展现出良好前景，但涂层在长期水动力作用下易受冲刷，如何保持表面微纳结构的稳定性是关键挑战，同时，其耐温性、耐紫外线及耐化学腐蚀性能仍有提升空间，以确保在复杂水环境中的长期稳定性。此外，施工工艺适应性仍需优化，如何降低成本并提高涂层在不同基材上的附着力，是大规模推广应用的关键，同时，纳米材料的长期生态安全性评估仍需进一步研究，以

避免微粒释放对水环境造成潜在影响[15]。本文提出了一种基于纳米无机材料的仿生涂层技术，旨在解决水生态保护修复中因生物附着导致的水质恶化、管道堵塞、设施腐蚀及生态失衡等问题，具有安全性、经济型和施工可操作性等特点该涂层采用二氧化钛、硅酸盐等纳米无机材料，在水体表面形成致密保护层，有效抑制藻类、贝类等生物附着，降低水质污染及维护成本。同时，涂层采用多层喷涂工艺，确保其在复杂环境下的稳定性，施工过程无危害、简便，常温自然固化，适用于多种水利设施及生态修复工程，并可复涂于旧涂层（如环氧、聚氨酯、醇酸涂层），在水工设施及其他防护层升级改造中发挥积极作用。此外，涂层的防腐蚀、耐磨、耐候性能显著提升，可有效延长水利设施的使用寿命，提高工程的长期运行效率。

1 涂层技术原理构成

1.1 涂层原理

荷叶效应作为一种重要的仿生学现象，以其表面微观粗糙结构和低表面能特性受到广泛关注（见图 1）。这一效应通过构造超疏水表面，使水滴在表面形成大接触角的球形，并在滚动过程中去除污垢和微生物，从而实现自清洁功能。在此基础上，已经开发了许多不同的合成技术来设计和制造自清洁表面，大量仿生材料得到了实际应用，为复杂环境下的表面抗污和防护提供了解决方案[16]。SELIM 等[17]通过实验研究开发了包括硅基、氟聚合物、交联涂层、两性共聚物涂层及水凝胶涂层在内的多种涂层技术。这些涂层通过构造光滑或低表面能结构，有效降低了表面生物的附着能力，为复杂环境下的表面保护提供了有效解决方案。在此基础上，仿生涂层进一步结合高分子材料的优异物理性能与纳米技术的功能特性，通过形成纳米颗粒增强的复合涂层，进一步抑制藻类生长和微生物附着能力。

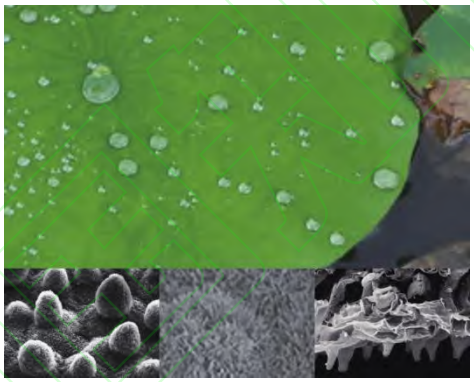


图 1 仿生荷叶表面微结构与超疏水特性示意[17]

Fig.1 Schematic diagram of microstructure and superhydrophobic properties of bionic lotus leaf surface [17]

如图 2 所示，仿生涂层由底涂层（1）、中涂层（2）和防护面涂层（3）组成，实现涂层耐冲刷、防污防腐、及自清洁功能。涂层（1）作为涂层系统的基础部分，主要提供强附着力和初步的抗菌、防腐保护，其由组分 A、B 组成，包括苯丙乳液、硅酸盐水泥、白水泥等材料，并辅以抗菌剂和消泡剂以增强功能。中涂层（2）在底涂层基础上进一步提升涂层的机械性能和抗冲击能力，由组分 C、D 组成，通过重晶石粉、偏高岭土等填充材料增强结构强度，同时为表层防护提供支持。防护面涂层（3）作为最外层，该层采用纳米陶瓷溶胶改性树脂、纳米二氧化硅（SiO_2）、钛金属纳米粉末（TiO_2）等材料，并辅以异丙醇、云母片和表面活性剂进行优化，以确保涂层的均匀性、耐候性及长期稳定性。纳米陶瓷溶胶改性树脂作为基体材料，提高涂层的成膜能力，增强耐磨性、耐候性和耐化学腐蚀性，使其在长期水流冲刷及气候变化条件下仍能保持稳定[18]。纳米二氧化硅通过构建纳米结构，使涂层表面具有超疏水性，接触角可达 130°以上，形成类似荷叶效应的自清洁功能，有效减少污垢和生物污损的附着[19]。钛金属纳米粉末具备光催化降解功能，在紫外光照射下产生羟基自由基（•OH），能够分解附着在涂层表面的有机污染物，同时抑制霉菌和细菌繁殖，进一步提高抗污能力[12]。此外，异丙醇的加入可降低涂层表面张力，提高流平性，确保施工时形成均匀光滑的涂层[20]；云母片的层状结构提供屏蔽效应，阻挡水分子和腐蚀介质的渗透，提高耐腐蚀性能[21]；晶须填料通过增强涂层的机械强度、抗裂性和耐冲击性能，防止长期水流冲击或温差变化导致的开裂，提

高涂层的耐久性表面[22]；活性剂优化纳米填料的分散性，防止颗粒团聚，提高涂层的均匀性和稳定性，确保长期防护效果。

表 1　仿生涂层成分表

Table 1 Composition of bionic coating

涂层类型	组分	混合比例	喷涂厚度	重量（以份数记）
双组分高分子聚合物砂浆粘结底涂层 (1)	组分 A	A:B=1～1 .5：3	0 .3～1 .5mm	60 份～80 份苯丙乳液、20 份～40 份去离子水、 1 .5 份～3 .5 份分散剂、0 .8 份～2 .5 份抗菌剂、1 .5 份～3 .5 份消泡剂
	组分 B			30 份～50 份硅酸盐水泥(42.5 级)、8 份～22 份白水泥、18 份～40 份石英砂、8 份 ～22 份重钙粉、2 .5 份～6 份偏高岭土、2 .5 份～6 份乳胶粉、0 .8 份～3 .5 份聚羧酸高效减水剂
双组分高强聚合物砂浆中涂层 (2)	组分 C	A:B=1～1 .5：3	0 .3～1 .5mm	60 份～80 份苯丙乳液、20 份～40 份去离子水、1 .8 份～4 份分散剂、0 .8 份～2 .5 份抗菌剂、1 .8 份～3 .5 份消泡剂
	组分 D			30 份～50 份硅酸盐水泥、12 份～30 份白水泥、18 份～40 份石英砂、8 份～22 份铝矾土、2.5 份～6 份偏高岭土、2.5 份～6 份重晶石粉、2.5 份～6 份纤维素醚，0 .8 份～3 .5 份聚羧酸高效减水剂
纳米防腐抗污防护面涂层 (3)			30～150μm	25 份～50 份纳米陶瓷溶胶改性树脂、15 份～40 份纳米二氧化硅、8 份～28 份钛金属纳米粉末、8 份～22 份异丙醇、1 .8 份～5.5 份云母片、0.8 份～2.2 份晶须填料、0.8 份～2.2 份表面活性剂

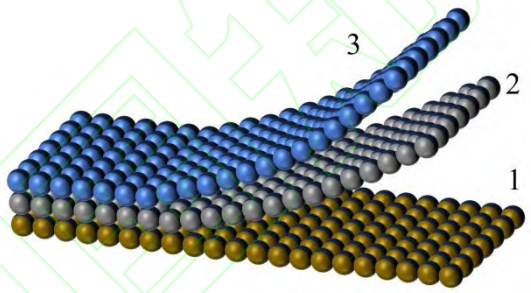


图 2　仿生涂层分层结构示意

Fig.2 Schematic diagram of layered structure of bionic coating

1.2 涂层施工工艺流程

仿生涂层结构采用三层喷涂工艺施工于水工混凝土表面。首先，喷涂双组分高分子聚合物砂浆粘结底涂层（1），形成与基面的高附着力界面；随后，在底涂层表面喷涂双组分高强聚合物砂浆中涂层（2），以提高整体涂层的强度和耐久性；最后，喷涂纳米防腐抗污防护面涂层（3），赋予表面抗腐蚀、抗污染及超疏水等功能。该多层施工工艺能够确保涂层与混凝土基面牢固结合，满足复杂工程环境中对涂层的使用要求。

确保涂层结构牢固附着于混凝土基面，满足复杂工程环境的使用需求。

仿生涂层具有良好的兼容性，施工环境的温度在 5℃至 40℃之间，相对湿度不超过 85%。在此温湿度范围内，在极端温度或湿度条件下，涂层的干燥速度和附着力可能会受到影响。对于潮湿环境（如水下或高湿度区域），可采用底面处理产品对基材进行表面处理，以提高涂层的附着力和耐久性。可直接复涂于环氧树脂、聚氨酯、醇酸等旧涂层表面，无需彻底清除旧涂层，仅需简单打磨即可，大幅降低施工复杂度和成本。施工方式灵活，一般采用空气喷涂设施，喷涂气压范围为 5~6 kgf/cm^2，喷枪口径为 1.0~1.2 mm，确保涂料均匀喷吐并达到所需涂层厚度。此外，喷涂距离应保持在 20~30 cm，喷涂速度为 30~50cm/s，以确保涂层均匀，避免漏喷或过厚造成的涂层不均匀问题。在施工过程中，需控制环境风俗不超过 5 m/s（三级），防止风力导致涂料飘散并造成污染或浪费。可根据实际需求采用喷涂、滚涂或刷

涂，并且常温自然固化，无需特殊设备，极大提升施工便捷性。同时，涂层具有较短的复涂间隔时间，能够快速完成多层施工，适用于紧急维护工程，缩短工程停运时间。

2 涂层性能测试

试验聚焦于涂层性能测试，依据表 1 中的成分，设计浓度呈阶梯性递增的均匀配比梯度，并评估五种不同的涂层结构，以探索其对涂层整体性能的影响。试验以 10cm×10cm 规格的水工混凝土样品为基底，依次喷涂底涂层、中涂层和纳米防腐抗污面涂层。每层涂层均匀喷涂，喷涂后在恒温环境（20℃）下干燥 24 小时，确保涂层固化。试验温度保持在 37±1℃，相对湿度大于 90％条件下，均匀接种大肠杆菌和金黄色葡萄球菌培养 24 小时，模拟微生物附着和生长，所有试样试验前均经过紫外线照射和化学消毒，确保无外源性细菌干扰。抗菌性能依据《抗菌涂层抗菌性能试验方法》GB/T 21866-2008 标准评估，分别测试了涂层对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制效果，采用平板涂布法和菌落计数法评估涂层的抗菌性能[23]。表 2 结果显示，涂层样品在抗菌性能方面表现显著，所有样品的大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌率均超过 95%，远高于空白对照样品的大肠杆菌（68%）和金黄色葡萄球菌（7.2%）。表明该涂层在抑制微生物生长方面效果最为显著。其他样品的抗菌率也均高于 95%，超过普通纳米涂层样品，表现出较为均衡的防护效果[24]。这表明仿生涂层荷叶效应，这种超疏水性表面有效减少了微生物与涂层表面的接触，降低了微生物附着的可能性，从而增强了涂层的抗菌性能。能够有效减少微生物附着，降低水质恶化和腐蚀风险，延长设施使用寿命，减少维护成本。

表 2　抗细菌性能　　%

Table 2 Antibacterial performance　　%

测试微生物	空白对照样品	样品 1		样品 2		样品 3		样品 4		样品 5		添加纳米二氧化钛样品[25]
		例 1	抗菌率	例 2	抗菌率	例 3	抗菌率	例 4	抗菌率	例 5	抗菌率	
大肠杆菌	68	2.4	96.47	2.1	96.91	1.9	97.21	1.8	97.35	1.5	97.7	70.83
金黄色葡萄球菌	7.2	0.31	95.69	0.28	96.11	0.22	96.84	0.2	97.22	0.19	97.35	86.84

通过试验对涂层进行优选，综合使用寿命等因素，以下涂层选择样品 3 作为检测对象。

表 3　纳米涂层最优涂层成分表

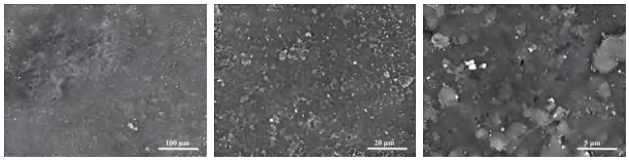
Table 3 Optimal composition of nanocoating

涂层类型	组分	混合比例	喷涂厚度	重量（以份数记）
双组分高分子聚合物砂浆粘结底涂层 (1)	组分 A	A:B=1：3	0 .8mm	70 千克苯丙乳液、30 千克去离子水、2 .5 千克分散剂、1 .5 千克抗菌剂、 2.5 千克消泡剂
	组分 B			40 千克硅酸盐水泥(42 .5 级)、15 千克白水泥、28 千克 100 目石英砂、 17 .5 千克重钙粉、4 千克偏高岭土、4 千克乳胶粉、2 千克聚羧酸高效减水剂
双组分高强聚合物砂浆中涂层 (2)	组分 C	A:B=1 .5：3	0.8mm	70 千克苯丙乳液、30 千克去离子水、2 .5 千克分散剂、1 .5 千克抗菌剂、 2.5 千克消泡剂
	组分 D			40 千克硅酸盐水泥(42 .5 级)、20 千克白水泥、27 .5 千克 100 目石英砂、 15 千克铝矾土、4 千克偏高岭土、4 千克重晶石粉、4 千克纤维素醚，2 千克聚羧酸高效减水剂；
纳米防腐抗污防护面涂层 (3)			80μm	40 份纳米陶瓷溶胶改性树脂、27 .5 千克纳米二氧化硅、17 .5 千克钛金属纳米粉末、15 千克异丙醇、3 .5 千克云母片、1 .5 千克晶须填料、1 .5 千克表面活性剂

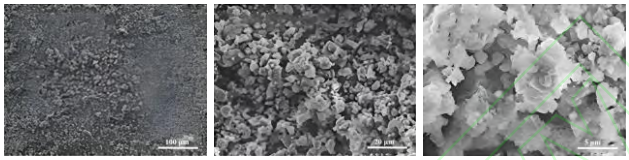
根据扫描电子显微镜（SEM）图像，仿生涂层展现出显著的表面和内部微观结构差异（见图 3）。水泥浆体的表面在不同放大倍数下表现为平滑且均匀，颗粒分布一致，未显示出明显的结构化特征。相对而言，仿生涂层在相同的放大倍数下展现出复杂且具有层次感的微观结构。其表面均匀分布了一层颗粒，颗

粒的直径约在 1000 纳米以下。这些纳米颗粒排列紧密，呈现出层次感，在混凝土表面形成了具有规则立体结构的覆盖层。这种立体结构的覆盖层赋予了混凝土较强的疏水疏油的性能。

在内部微观结构方面，图 4 为水泥浆体表现为均匀的基体结构，颗粒分布一致，粒子之间连接简单，有明显的空隙与裂分，缺乏明显的结构化排列。而仿生涂层的内部微观结构则显现出更高的有序性。粒子排列更加紧密粒子之间的空隙较小。尤其在高放大倍数下，这些纳米级的微结构更加明显，表现出较高的结构复杂性。这种结构能够阻碍水分子等小分子在混凝土内部的渗透，增强混凝土的防水特性。



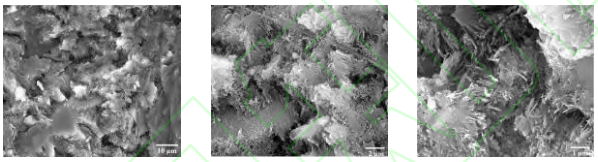
(a)混凝土净浆表面形貌



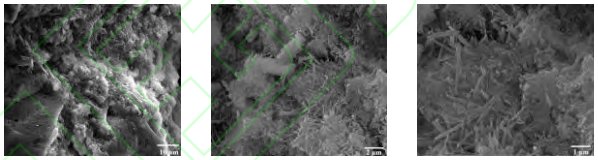
（b）仿生涂层表面形貌

图 3　混凝土及仿生涂层表面微观形貌图

Fig.3 Microscopic morphology images of concrete and bionic coating surfaces



(a)水泥浆体内部微观形貌



（b）仿生涂层浆体内部微观形貌

图 4　混凝土及仿生涂层内部微观形貌图

Fig.4 Microscopic morphology images of internal structure of concrete and bionic coating

涂层样本由第三方检测机构进行性能测试，结果为样本的平均值。通过对涂层的综合性能进行测试，包括耐冲击性、附着力、柔韧性、耐磨性、耐化学腐蚀性（酸、碱、盐水、汽油）及耐高低温性能，实验结果（见表 4）表明，涂层在物理性能和化学性能方面表现出卓越的稳定性性，在抗冲击、附着力、柔韧性、耐磨性、耐腐蚀性及耐高低温等指标上均达到或超过相关国家标准要求，且在-40℃至+300℃的极端温度范围内仍能保持稳定性能。此外，针对高盐环境的专项测试（见图 5）进一步验证了涂层的耐盐雾能力，涂层在 NaCl 盐雾环境中长时间暴露后仍无明显腐蚀、剥落或性能劣化，展现出优异的耐盐雾和耐化学腐蚀能力。涂层能够适应多种复杂工况，高强水流冲击、沙石磨损、温度骤变以及高盐、高湿和化学腐蚀等严苛环境。这种多功能性使其可广泛应用于水利工程中的输水管道、大坝、灌溉渠道以及其他防护设施，显著提高工程的耐久性和可靠性，同时降低后期维护成本。

图 5　涂层盐雾试验对比

Fig.5 Comparison of coating salt spray testing

表 4　物理性能指标

Table 4 Physical performance indicators

检测项目	检测结果	备注	工程意义
耐冲击性/cm	50	GB/T1732-93	高耐冲击性（50cm）确保涂层在受到机械冲击时不易开裂或脱落，尤其适用于管道、储罐等设备的防护。相较与传统涂层（20-30cm），仿生涂层的耐冲击性更高，能够更好地抵御外力冲击，延长设备使用寿命。
柔韧性	1	GB/T1731-93	优异的柔韧性和 2 毫米最小弯曲半径表明其能够承受温度变化、基材形变和外力作用而不出现裂纹或脱落，有效适应基材的热胀冷缩及微小变形，确保在复杂工况下保持完整性。
弯曲试验（圆柱轴）/ mm	2	GB/T6742-2007	
附着力（划格间距 1mm）/级	A/	GB/T9286-1998	与普通环氧涂层（通常为 B 级）相比，仿生涂层的附着力更强，能够在高湿度、化学腐蚀等复杂环境中保持良好的粘附性，确保涂层的长期稳定性。
附着力（拉开法）/Mpa	4.7*A	GB/T5210-2006	
硬度/S	133	GB/T1730-2007A 法	在实际应用中，涂层可能面临颗粒磨损或机械摩擦，高硬度涂层(＞120)能够有效抵御这些损伤，保持涂层的完整性和防护性能。
耐磨性/（g/1000rg）	0.014	GB/T1798-2008	耐磨性测试结果显示，涂层的磨损率仅为 0.014，明显高于普通混凝土表面涂层（0.05 -0.1 g/1000rg）。这一结果表明，这一超低磨损率表明其在长期摩擦条件下仍能保持良好的完整性，长期的摩擦环境中保持较好的稳定性，适应水流、沙石等物质的冲刷。
耐水性（浸入费水中 8h）	无变化	GB/T1733-93 乙法	普通环氧涂层在长时间浸泡后可能出现起泡或脱落现象，而仿生涂层凭借其优异的耐水性，能够在水下环境中长期保持稳定，确保设备的防护性能不受影响。这一特性使其在水处理设施、海洋工程等领域具有显著的应用优势。

耐汽油性（浸入 90#汽油中 7d）	无变化	GB/T1734-93 甲法	在有机溶剂环境中，普通涂层可能因溶胀或软化而失去防护功能，而仿生涂层凭借其优异的耐溶剂性，能够有效抵御汽油等有机溶剂的侵蚀，确保设备的长期稳定运行。
耐碱性（浸入 20%NaOH 中 7d）	无变化	GB/T9278-2008 甲法	在海洋环境或盐碱地区，盐水腐蚀是设备面临的主要挑战之一。仿生涂层凭借其优异的耐碱水性，能够有效抵御盐水的侵蚀，确保设备在恶劣环境中的防护性能，显著延长设备的使用寿命。
耐盐水性（浸入沸腾 NaCl 的溶液中 8h）	无变化	GB/T9274-88 甲法	
耐酸性（浸入分别位 10%、30%的 HCL、HNO_3、H_2SO_4 中 7d）	无变化	GB/T9274-88 甲法	在高压力、高温以及腐蚀性气体（如 H_2S 和 CO_2）环境中，仿生涂层表现出卓越的稳定性。这一特性使其在油气管道和化工设备中具有显著的应用优势。
H_2S(2.5MPa)CO_2(2.5MPa)80°C 浸泡 7d	无变化		
耐候性测试	≥250 小时，无异常	GB/T16259-2008	涂层性能测试结果表明，该涂层在耐候性测试中达到≥250 小时且无异常，显示其在长期暴露于外界环境中具有良好的耐久性；同时，抗紫外线测试（KUV 5000H）无异常，表明涂层能够有效抵御紫外线照射，保持稳定性和抗老化能力。这些结果表明该涂层适用于户外环境或长期暴露在阳光下的应用场合。
抗紫外线（KUV 5000H）	无异常	GB/T 16422.3-2014	
耐盐雾性	500 小时，无异常	GB/T 10125-2012	耐盐雾性 500 小时无异常 证明该涂层具备长期抗盐雾腐蚀能力，能够在高盐、高湿环境下保持稳定性能，不发生剥落、裂纹或腐蚀劣化。这意味着涂层适用于沿海、盐碱地及水利工程 等恶劣环境，可有效延长设施使用寿命，降低维护成本，并提高工程耐久性和安全性。
使用温度/°C	-40~+300		这一宽广的温度适应性使涂层能够在极端环境下保持稳定的性能。这一特性使其在各种复杂环境中表现出色，显著提升了设备的防护能力和使用寿命。

按照《生活饮用水卫生规范》（卫生部 2001 版）的要求，配制浸泡液，在 25±5℃条件下对涂层样品进行 24±1 小时的浸泡试验，同时设置空白对照。测试结果（见表 5）表明，该涂层通过了生活饮用水 18 项接触安全技术指标，符合与食品接触相关的安全标准。此外，经广东省技术监督局检测院测试，该涂层的 VOC 平均排放量仅为≤23 克/升，属于超低 VOC 排放范围，满足国家及欧盟的环保政策要求。进一步分析表明，涂层对水质指标（如色度、浑浊度、pH、溶解性总固体及重金属含量等）未产生显著影响，各项增量均远低于相关标准限值，充分证明涂层对水质无不良影响。

表 5　水质安全指标

Table 5 Safety indicators of water quality

测定指标	单位	测定结果			标准要求
		空白	样品	增加量	
色度	度	＜5	＜5	＜5	增加量≤5
浑浊度	NTU	0.0	0.0	0.0	增加量≤0.2
肉眼可见物	/	无	无	/	无
臭和味	/	无	无	无	无异臭和异味
pH	/	7.96	7.90	0.06	增加量≤0.5
溶解性总固体	mg/L	218	222	4	增加量≤10
耗氧量	mg/L	0.33	0.41	0.08	增加量≤1

铝	mg/L	＜0.005	＜0.005	＜0.005	增加量≤0.02
砷	mg/L	＜0.001	＜0.001	＜0.001	增加量≤0.005
镉	mg/L	＜0.005	＜0.005	＜0.005	增加量≤0.005
汞	mg/L	＜0.002	＜0.002	＜0.002	增加量≤0.002
铅	mg/L	＜0.001	＜0.001	＜0.001	增加量≤0.001
铬(六价)	mg/L	＜0.005	＜0.005	＜0.005	增加量≤0.005
挥发酚类	mg/L	＜0.002	＜0.002	＜0.002	增加量≤0.0002
三氯甲烷	mg/L	0.002	0.002	＜0.006	增加量≤0.006
四氯化碳	mg/L	＜0.0001	＜0.0001	＜0.0002	增加量≤0.0002
甲醛	mg/L	＜0.05	＜0.05	＜0.05	增加量≤0.05
苯	mg/L	＜0.007	＜0.007	＜0.001	增加量≤0.001

综合实验结果表明，涂层再附着、抗冲击、耐腐蚀及耐污染性能方面具有显著表现。通过 24 小时固化形成高致密性结构，具备超疏水、抑菌、防霉、抗污、耐化学腐蚀及抗老化等多种性能，能够有效抑制微生物附着生长并解决清理难题。涂层耐磨、抗冲刷、耐机洗，避免因机械清洗导致损坏，展现出优异的耐候性，具备抗紫外线、抗辐射及抗氧化能力，可为基材提供长期保护，保持洁净及色泽稳定。该工艺设计简单易操作，环保无毒，固化时间短，在运行中显著降低清洁频率及维护成本，提高调水工程运行效率。

3 典型案例与应用场景

仿生涂层技术作为一种创新型防护手段，该技术在水利工程领域展现了卓越性能，已成功应用于多个项目中，解决了设施在复杂环境中面临的腐蚀、生物附着以及高维护成本等难题。下面以重庆三峡水务污水处理厂除臭滤池箱体以及宁波界牌碶闸泵站为应用案例进行简要介绍。

重庆三峡水务污水处理厂除臭滤池箱体由于长期暴露于酸性环境下，设施发生氧化腐蚀、严重影响了设施的外观与整体形象。采用仿生涂层技术，通过对腐蚀部位（箱体表面及接缝区域）进行去锈处理、打磨清洁后涂覆涂层，提升抗氧化和耐腐蚀性能，抵御雨水冲刷及周围酸性环境硬气的腐蚀，延长设施使用寿命。施工前，箱体表面剥落严重、氧化腐蚀明显，盐雾环境加剧了局部损伤。施工后，涂层表面光滑均匀，耐酸性能显提高，实现防水、不残留水渍的效果；两年后，涂层完好，无明显腐蚀，耐水性和耐腐蚀性能保持稳定，仅需定期检查维护，大幅降低成本。此涂层应用后，不仅有效恢复了设施的功能性，还显著提升了设施的外观及长期使用效率，为水利工程提供了重要的参考价值。

（a）施工前　　（b）施工后　　（c）两年后

图 6 臭滤池箱体施工前后及回访效果对比

Fig.6 Comparison of odor filter tank before and after construction and follow-up effectiveness

重庆三峡水务水厂水源中通常含有细菌、藻类和真菌等多种微生物，这些微生物在水处理过程中难以被彻底清除，从而导致其在池壁表面大量附着。这些生物污损不仅会影响水质安全，还会加速池壁基材的腐蚀，腐蚀严重区域已出现穿孔。基于此，采用仿生涂层技术，通过附着物清理、均匀打磨及涂覆涂层，填充了表面孔隙，并对涂层进行均匀改色处理，使整体表面光滑无瑕。对池壁通过耐沾污性测试

（≤2%，优于标准≤15%），有效阻止外界物质渗透，同时降低了微生物附着的可能性。光滑表面降低了水流阻力，并可通过雨水或流水自清洁方式清除污渍。施工后，还极大延缓了池壁腐蚀进程，提升了水厂设施的耐久性和运行效率，后期清洁频率降低 1~3 倍。

（a）施工前

（b）施工后

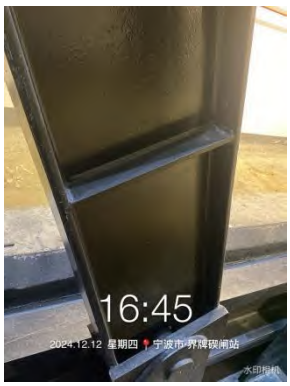
图 7 水厂前后效果对比

Fig.7 Comparison of water treatment plant before and after construction

宁波界牌碶闸泵站，由于钢结构长期受到水流冲刷和腐蚀，表面出现了严重的结构损伤。针对这一问题，对环氧防腐漆与仿生涂层工艺进行对比试验，五个月后，高分子纳米涂层水上部分洁净程度高，表面平整均匀，涂层光度超过 70Gu（高光等级）。水下部分耐沾污性仅为 2.3%，清洗时通过清水擦拭可恢复洁净，且无污渍渗透或表面残留。相比之下，普通防腐材料的闸门耐沾污性为 10%，表面存在大量污物粘附且清洗难度大，污渍渗透导致轻度腐蚀风险。一年半后仿生涂层在水流冲刷和腐蚀环境中仍能保持完好无损。相较之下，普通环氧防腐涂层的抗污防腐效果逐渐减弱，难以满足长期防护需求，展现出优异的耐久性和防腐能力，不仅显著延长了设施的使用寿命，还为水下设施的维护和防护提供了重要参考。

（a）施工前

（b）施工后



（c）一年半后

（d）五个月后水下防腐结果
（普通防腐材料）

（f）五个月后水下防腐结果
（仿生涂层材料）

图 8 泵站前后及普通材料效果对比

Fig.8 Comparison of pump station before and after construction and effectiveness of ordinary materials

综合以上案例，仿生涂层技术在水利工程中的应用不仅大幅提升了设施的防腐性能和抗污能力，还显著降低了维护成本，优化了设施运行效率。其多功能性和适应性使其能够有效解决传统防护手段的不足，成为水利设施维护和性能优化的重要技术手段，为水利工程的可持续发展提供强有力的技术支持。其应用领域涵盖但不限于以下几个方面。

（1）干渠和灌溉系统:仿生涂层可显著提升渠道的耐腐蚀性和抗侵蚀性，从而延长渠道的使用寿命。同时，涂层可以降低干渠糙率，能够降低水在渠道中的阻力，提高输水效率[25]。

（2）水库和水塔:仿生涂层具有优异的的防侵蚀、防冻融、防老化和防漏效果，为水库、水塔等设施提供了重要保护手段[26]。

（3）水力发电设备:长期运行的设备易腐蚀和磨损，仿生涂层可为设备提供保护，减少损伤进而延长设备使用寿命，确保其长期稳定运行[27]。

（4）海堤:承受海水的强腐蚀性的影响，仿生涂层对海堤提供了重要的防护作用，长其使用寿命[28]。

（5）管道和阀门:管道和阀门的内壁可通过涂层实现有效的防腐蚀，同时降低水流阻力，提升运行效率[29]。

（6）防止生物侵害:仿生涂层能够有效阻止水藻、贝类及其他生物附着，减轻生物侵害的影响[30]。

（7）高寒地区水工设施及高温工业设备装置的日常维护。

仿生涂层在酸性、碱性、盐雾、高低温及机械冲击环境下均表现出优异的防护性能，适用于海洋工程、沿海水工结构、污水处理设备、化工管道、油气储罐、水库大坝、输水管道、桥梁护栏等。其耐紫外线和耐候性使其可广泛应用于户外暴露环境，如太阳能设施、储罐外壁、海上平台等，而高耐磨性和抗冲刷性能则适用于水道衬层、泵站叶轮、高速水流区域及砂石冲刷环境。此外，其高附着力和耐冲击性确保了在受力变形较大的结构，如桥梁、坝面及复合材料设备上的长期稳定性。综合来看，该涂层可在水利、海工、石化、能源、交通及环境工程等领域提供可靠防护。

4 讨论

本研究对基于纳米无机材料的仿生涂层技术在不同环境条件下的适用性进行了系统分析。实验结果表明，该涂层在酸碱（HCl、HNO_3、H_2SO_4、NaOH）、盐雾、高低温（-40°C 至 300°C）等极端环境中均表现出优异的耐久性和稳定性。在酸性环境下，传统有机涂层常出现降解、变色或剥落，而本研究的纳米无机仿生涂层在强酸作用下保持结构完整，无明显腐蚀现象；在碱性环境中，涂层的表面形态未发生明显变化，耐碱腐蚀性能优于常规环氧涂层。此外，在高盐环境下，该涂层的表面未出现明显溶解或剥离，而传统有机涂层在类似条件下往往因渗透性增加而加速降解。

在极端温度条件下，涂层的耐候性进一步得到了验证。在高温（300°C）环境下，涂层表面形态和化学组成未发生显著变化，展现出良好的耐热性；而在低温（-40°C）环境下，涂层仍保持较好的机械强度和附着力，未出现脆裂或剥落，相较于常规有机防护涂层，低温适应性更优。涂层可广泛适用于高温和寒冷地区的水利设施，如寒区水库大坝、输水管道及沿海海洋工程结构。

在生物附着控制方面，涂层的表面纳米级结构有效降低了微生物附着。在淡水环境中，该涂层可减少水体微生物污染，提高设施的抗污性能。然而，尽管该涂层在不同环境下均展现出良好的防护效果，其在长期水动力作用下的稳定性仍需进一步评估，尤其是在潮汐作用显著的海洋环境或高流速河道中的耐久性仍需长期监测。

综合来看，该仿生涂层在多种极端环境下均展现出优越的适应性，尤其在耐酸碱腐蚀、耐高低温、抗盐雾和抗生物附着方面，相较于传统防护涂层具有明显优势。因此，该技术在水生态保护修复、海洋工程及水利设施防护等领域具有广泛的应用价值。然而，由于该涂层的长期耐久性和环境安全性尚未得到全面

评估，其在不同水环境条件下的长期稳定性仍需进一步研究，以确保在实际工程应用中的可靠性。

5 结论与展望

本研究提出了一种基于纳米无机材料的仿生涂层技术，并通过实验测试与工程案例分析，验证了其在水生态保护修复中的应用价值。研究结果表明，该涂层在极端环境条件下具备优异的防污、防腐和抗生物附着性能，可有效延长水利设施的使用寿命，降低维护成本，并在多个水利及环保工程中展现出良好的应用前景。

然而，该技术在长期使用稳定性、界面结合力及生态安全性方面仍存在一定局限性，未来研究可从以下几个方面展开：

（1）优化界面结合力，开发界面过渡层或采用表面预处理技术，提升涂层与基材的附着力，增强长期稳定性；

（2）开展长期现场监测，建立科学的寿命预测模型，评估涂层在水动力冲刷、干湿循环及极端气候条件下的耐久性，以指导实际工程应用；

（3）优化施工工艺，改进涂层配方和施工方法，以降低成本，提高工程适用性，促进大规模推广应用；

（4）加强生态安全评估，系统研究纳米材料的释放机制、迁移行为及其对水生态系统的长期影响，确保该涂层的环境友好性；

（5）拓展水生态修复应用，结合生态监测数据，进一步分析涂层在改善水体透明度、控制藻类生长及优化水生生物栖息环境方面的长期作用，以提升其生态修复价值。

综上所述，仿生涂层技术在水生态保护修复中展现出显著优势，具有较大的推广价值。未来的研究应围绕提高涂层的综合性能、优化应用条件，并探索其生态环境效益，以促进该技术的可持续发展。

参考文献：

[1] 赵广川, 孙博, 曹倩. 长距离调水工程梯级泵站优化调度研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(S2): 82-93.
ZHAO Guangchuan, SUN Bo, CAO Qian. Optimization scheduling of cascade pump stations in long-distance water transfer projects [J] . Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(S2): 82-93.

[2] 崔巍, 穆祥鹏, 陈文学, 等. 明渠调水工程事故段上游闸门群应急调控研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(11): 13-19.
CUI Wei, MU Xiangpeng, CHEN Wenxue, et al. Emergency regulation of upstream gate groups in accident sections of open-channel water transfer projects[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(11): 13-19.

[3] KAZMI S S U H, YAPA N, KARUNARATHNA S C, et al. Perceived intensification in harmful algal blooms is a wave of cumulative threat to the aquatic ecosystems[J]. Biology, 2022, 11(6): 852.

[4] ZHANG Y L, DENG J M, ZHOU Y Q, et al. Drinking water safety improvement and future challenges of lakes and reservoirs[J]. Science Bulletin, 2024, 69(22): 3558-3570.

[5] 尚丽霞,柯凡,李文朝,等.高密度蓝藻厌氧分解过程与污染物释放实验研究[J].湖泊科学,2013,25(1):47-54.
SHANG Lixia, PANG Yali, WANG Hao, et al. Experimental study on the anaerobic decomposition process of high-density cyanobacteria and pollutant release[J]. Journal of Lake Sciences, 2013,25(1):47-54.

[6] 徐梦珍,王兆印,段学花.输水管道中淡水壳菜的防治研究[J].给水排水,2009,45(5):205-208.
XU Mengzhen, WANG Zhaoyin, DUAN Xuehua. Study on the prevention and control of freshwater mussel fouling in water transmission pipelines[J]. Water Supply and Drainage, 2009, 45(5): 205-208.

[7] 田勇,张爱静,王树磊,等.输水工程中淡水壳菜生物污损影响及防治对策研究[J].水生态学杂志,2020,41(1):110-116.
TIAN Yong, ZHANG Aijing, WANG Shulei, et al. Study on the impact of freshwater mussel biofouling and prevention strategies in water transfer projects[J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41(1): 110-116.

[8] 姚国友,徐梦珍,安雪晖,等.防淡水壳菜附着涂料的快速评价指标体系[J].清华大学学报(自然科学版),2015,55(9):957-963.
YAO Guoyou, XU Mengzhen, AN Xuehui, et al. Rapid evaluation index system for antifouling coatings against freshwater mussel attachment[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2015, 55(9): 957-963.

[9] IFIJEN I H, UDOKPOH N U, ONAIWU G E, et al. Coating properties of alkyd resin, epoxy resins, and polyurethane-based nanocomposites: a review[J]. Momona Ethiopian Journal of Science, 2022, 14(1): 1-31.

[10] CHAVAN T K, SETHI S K. Eco-friendly self-cleaning coatings: fundamentals, fabrication, applications, and sustainability[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2025, 13: 429..

[11] 江雷.从自然到仿生的超疏水纳米界面材料[J].科技导报,2005(2):4-8.
JIANG Lei. From nature to biomimetic superhydrophobic nano-interface materials[J]. Science & Technology Review, 2005(2): 4-8.

[12] OHKO Y, NAGAO Y, OKANO K, et al. Prevention of Phormidium tenue biofilm formation by TiO_2 photocatalysis[J]. Microbes and Environments, 2009, 24(3): 241-245.

[13] DE KWAADSTENIET M, BOTES M, et al. Application of nanotechnology in antimicrobial coatings in the water industry[J]. Nano, 2011, 6(5): 395-407.

[14] SUN J, DUAN J, LIU C, et al. Transparent and mechanically durable silicone/ZrO_2 sol hybrid coating with enhanced antifouling properties[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 490: 151567.

[15] ERBIL H Y. Practical applications of superhydrophobic materials and coatings: problems and perspectives[J]. Langmuir, 2020, 36(10): 2493-2509.

[16] XU Q, ZHANG W, DONG C, et al. Biomimetic self-cleaning surfaces: synthesis, mechanism and applications[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2016, 13(122): 20160300.

[17] SELIM M S, FATTHALLAH N A, SHENASHEN M A, et al. Bioinspired graphene oxide–magnetite nanocomposite coatings as protective superhydrophobic antifouling surfaces[J]. Langmuir, 2023, 39(6): 2333-2346.

[18] ARUN K L, UDHAYAKUMAR M, RADHIKA N. A comprehensive review on various ceramic nanomaterial coatings over metallic substrates: applications, challenges, and future trends[J]. Journal of Bio- and Tribo-Corrosion, 2023, 9(1): 11.

[19] LI X, DU S, MA C, et al. Nano-SiO_2-based anti-corrosion superhydrophobic coating on Al alloy with mechanical stability, anti-pollution, and self-cleaning properties[J]. Ceramics International, 2024, 50(6): 9469-9478.

[20] SASSONI E, GRAZIANI G, FRANZONI E, et al. Calcium phosphate coatings for marble conservation: influence of ethanol and isopropanol addition to the precipitation medium on the coating microstructure and performance[J]. Corrosion Science, 2018, 136: 255-267.

[21] 赵婧,顾程文,蹇锡高,等.厚朴酚基环氧树脂防腐涂层的制备及性能评价[J].化工学报,2023,74(7):3010-3017.
ZHAO Jing, GU Chengwen, JIAN Xigao, et al. Preparation and performance evaluation of magnolol-based epoxy resin anti-corrosion coating[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2023, 74(7): 3010-3017.

[22] 黄明杰,张晓莹,佘荆丽.硫酸钙晶须在涂料中的应用综述[J].现代涂料与涂装,2013,16(11):18-19.
HUANG Mingjie, ZHANG Xiaoying, SHE Jingli. Review on the application of calcium sulfate whiskers in coatings[J]. Modern Coatings & Finishing, 2013, 16(11): 18-19.

[23] SALWICZEK M, QU Y, GARDINER J, et al. Emerging rules for effective antimicrobial coatings[J]. Trends in biotechnology, 2014, 32(2): 82-90.

[24] 胡尚宇.纳米改性环氧粉末涂料的制备及其长效耐蚀抗菌性研究[D].广州：广州大学,2024.
HU Shangyu. Study on the Preparation and Long-Term Corrosion-Resistant and Antibacterial Properties of Nano-Modified Epoxy Powder Coatings[D]. Guangzhou：Guangzhou University, 2024.

[25] XU J, ZHUO C Z, HAN D Z, et al. Erosion–corrosion behavior of nano-particle-reinforced Ni matrix composite alloying layer by duplex surface treatment in aqueous slurry environment[J]. Corrosion Science, 2009, 51(5): 1055-1068.

[26] 宋新伟.聚氨酯涂层在跃进水库混凝土面板病害防治中的应用[J].陕西水利,2012(3):123-124.
SONG Xinwei. Application of polyurethane coating in the prevention and treatment of concrete panel diseases in Yuejin Reservoir[J]. Shaanxi Water Resources, 2012(3): 123-124.

[27] 李选荣.低水头灯泡贯流式水轮机转轮室修复方案优化[D].成都:西华大学,2022.
LI Xuanrong. Optimization of Repair Scheme for the Runner Chamber of Low-Head Bulb Tubular Turbine[D]. Chengdu: Xihua University, 2022.

[28] NAVARRETE S A, PARRAGUÉ M, et al. Susceptibility of different materials and antifouling coatings to macrofouling organisms in a high wave-energy environment[J]. Journal of Ocean Technology, 2020, 15(1).

[29] 陈卫,任凯麟,张御翎等.多沙河流闸门过流面抗冲磨防护环氧砂浆的研制及性能研究[J].水资源与水工程学报,2023,34(3):129-135.
CHEN Wei, REN Kailin, ZHANG Yuling, et al. Development and performance study of anti-scour epoxy mortar for gate flow surfaces in sediment-laden rivers[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(3): 129-135.

[30] LIU Z H, ZHENG X Y, ZHANG H W, et al. Review on the formation of biofouling in the marine environment and functionalization of new marine antifouling coatings[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57(39): 18221-18242.