

# 沿海港口码头结构耐久性防护措施探析

李启迪

大连港口建设监理咨询有限公司

DOI : 10.32629/jpm.v7i5.8887

**[摘要]** 沿海港口作为国家对外开放的门户和物流枢纽,其基础设施的安全性与耐久性直接关系到区域经济的可持续发展。然而,海洋环境具有高温、高湿、高盐雾以及潮汐冲刷等极端特征,导致港口码头混凝土结构极易遭受氯离子侵蚀、碳化、冻融破坏及钢筋锈蚀等多重灾害,严重缩短了结构的使用寿命并增加了全生命周期成本。本文旨在系统综述沿海港口码头结构耐久性的退化机理,深入剖析当前主流的防护技术措施及其适用性。文章首先探讨了海洋环境下混凝土材料劣化的物理化学机制;其次,详细阐述了高性能混凝土配制、防腐涂层保护、阴极保护、表面改性及结构优化设计等关键防护技术的应用现状与优缺点;再次,结合工程实践案例,分析了不同防护策略在延长结构寿命、降低维护成本方面的实际效果;最后,展望了智能化监测、自修复材料及绿色防护技术在未来的应用前景。研究表明,构建“材料本征提升+多重防护协同+全周期智能运维”的综合防护体系,是应对海洋严苛环境、保障港口码头结构长期安全服役的根本途径。

**[关键词]** 沿海港口; 码头结构; 耐久性; 氯离子侵蚀; 防护措施; 高性能混凝土; 阴极保护; 全生命周期

## Analysis of Durability Protection Measures for Coastal Port Terminal Structures

Li Qidi

Dalian Port Construction Supervision Consulting Co., Ltd.

**[Abstract]** As gateways to national openness and logistics hubs, coastal ports rely heavily on infrastructure safety and durability for sustainable regional economic development. However, the marine environment—characterized by extreme conditions such as high temperatures, humidity, salt spray, and tidal erosion—exposes port concrete structures to multiple threats including chloride ion corrosion, carbonation, freeze-thaw damage, and steel reinforcement rusting, significantly shortening structural lifespan and increasing lifecycle costs. This paper systematically examines degradation mechanisms of coastal port terminal structures and evaluates current mainstream protection technologies. First, it explores physicochemical mechanisms of concrete deterioration in marine environments; second, it details application prospects and limitations of key technologies—including high-performance concrete formulation, anticorrosive coatings, cathodic protection, surface modification, and structural optimization design; third, it analyzes practical effectiveness of various strategies in extending service life and reducing maintenance costs through case studies; finally, it outlines future applications of intelligent monitoring systems, self-healing materials, and green protection technologies. The study concludes that establishing a comprehensive protection framework combining material enhancement, multi-layered defense mechanisms, and full-cycle smart operation represents the fundamental approach to ensuring long-term structural integrity under harsh marine conditions.

**[Key words]** coastal ports; dock structure; durability; chloride ion erosion; protective measures; high-performance concrete; cathodic protection; full life cycle

### 引言

随着全球贸易的持续增长和航运船舶的大型化趋势,沿海港口码头作为水陆交通的关键节点,其建设规模与标准不断提

升。然而,我国沿海地区拥有漫长的海岸线,绝大多数港口位于高盐、高湿、多风浪的海洋环境中。这种独特的海洋大气区、浪溅区、水位变动区及水下区构成了极具腐蚀性的复杂环境。

在此环境下，港口码头混凝土结构面临着严峻的耐久性挑战。氯离子通过毛细孔渗透侵入混凝土内部，破坏钢筋表面的钝化膜，引发钢筋锈蚀膨胀，导致混凝土保护层开裂、剥落，进而削弱结构承载力，甚至引发灾难性事故。此外，海水中的硫酸盐侵蚀、冻融循环以及波浪冲击等物理作用，进一步加速了材料的劣化进程。

传统的港口码头设计与施工往往侧重于满足短期强度和承载力的要求，而对长期耐久性考虑不足，导致大量早期建成的码头设施出现不同程度的损伤，维修加固费用高昂，且严重影响港口的正常运营效率。近年来，虽然高性能混凝土、新型防腐材料等技术有所发展，但如何根据具体的海洋环境分区、结构类型及服役年限，科学选择并组合应用多种防护技术，形成系统性的防护策略，仍是学术界和工程界关注的焦点。本文将对沿海港口码头结构耐久性防护的相关理论、关键技术及发展趋势进行系统性综述，以期提升我国港口基础设施的耐久性水平提供理论依据和技术参考。

## 一、海洋环境下港口码头结构耐久性退化机理分析

### (一) 氯离子侵蚀与钢筋锈蚀的电化学机制

氯离子侵蚀是导致沿海港口码头钢筋锈蚀的首要因素。海水中含有高浓度的氯离子，它们通过扩散、毛细吸附及渗透作用进入混凝土孔隙体系。当氯离子浓度达到临界值时，会破坏钢筋表面的碱性钝化膜，使钢筋由钝态转变为活化态，从而在氧气和水分存在的条件下发生电化学腐蚀。这一过程不仅消耗钢筋截面积，降低其抗拉强度，而且生成的铁锈体积膨胀可达原体积的2-6倍，产生巨大的内应力，导致混凝土保护层沿钢筋方向开裂、剥落。一旦保护层脱落，钢筋直接暴露在海洋环境中，腐蚀速率将进一步加快，形成恶性循环。特别是在浪溅区和潮差区，由于干湿交替频繁，氧气供应充足，氯离子积聚速度快，该区域的钢筋锈蚀最为严重。

### (二) 混凝土碳化与环境物理作用的耦合效应

除了氯离子侵蚀外，混凝土碳化也是导致结构耐久性下降的重要原因。空气中的二氧化碳与混凝土中的氢氧化钙反应生成碳酸钙，降低了混凝土的碱度，同样会破坏钢筋钝化膜。在海洋环境中，碳化作用与氯离子侵蚀往往协同发生，加速钢筋锈蚀进程。此外，海洋环境的物理作用也不容忽视。海水中的硫酸盐会与水泥水化产物反应生成石膏或钙矾石，引起体积膨胀，导致混凝土开裂酥松（硫酸盐侵蚀）。在寒冷地区，反复的冻融循环会使混凝土孔隙中的水分结冰膨胀，产生微裂纹并扩展，最终导致表层剥落。同时，波浪的周期性冲击和水流冲刷会加速混凝土表层的磨损，破坏防护层，使内部结构更易受到化学侵蚀。这些物理化学因素的耦合作用，使得海洋环境下的结构劣化速度远高于内陆环境。

### (三) 结构构造缺陷对耐久性的不利影响

除环境因素外，结构设计本身的不合理也会加剧耐久性病害。例如，混凝土保护层厚度不足、钢筋间距过密导致浇筑不密实、排水设计不合理造成积水滞留、伸缩缝处理不当导致海水渗入等构造缺陷，都会为侵蚀介质提供快速通道。特别是在节点部位、预埋件周围及裂缝处，往往是腐蚀发生的“重灾区”。若在施工过程中存在蜂窝、麻面、裂缝等质量通病，将显著降低混凝土的抗渗性能，使氯离子和水分更容易侵入，从而大幅缩短结构的设计使用年限。因此，深入理解退化机理，从源头控制结构缺陷，是制定有效防护策略的前提。

## 二、基于材料改性的本征耐久性提升技术

### (一) 高性能混凝土 (HPC) 与超高性能混凝土 (UHPC) 的应用

提高混凝土自身的密实度和抗渗性是提升耐久性的根本途径。高性能混凝土 (HPC) 通过优化配合比设计，采用低水胶比、掺加矿物掺合料（如粉煤灰、矿渣粉、硅灰）等手段，显著细化了混凝土孔隙结构，降低了氯离子的扩散系数。在沿海港口工程中，HPC 已成为主流选择。更进一步，超高性能混凝土 (UHPC) 凭借极低的孔隙率和极高的强度，展现出卓越的抗氯离子渗透能力和抗裂性能，特别适用于浪溅区、锚碇结构等关键部位的修补或新建。然而，UHPC 成本较高，需根据工程部位的重要性权衡使用。此外，引入纤维（如钢纤维、聚丙烯纤维）可显著提高混凝土的韧性，抑制微裂缝的产生与发展，从而阻断侵蚀介质的通道。

### (二) 耐腐蚀特种胶凝材料与外加剂技术

针对海洋环境的特殊性，研发和应用耐腐蚀特种胶凝材料成为重要方向。例如，硫铝酸盐水泥、抗硫酸盐水泥等特种水泥具有更好的耐海水侵蚀能力。同时，高效减水剂和引气剂的合理使用，能够进一步改善混凝土的工作性和抗冻性。特别是憎水型外加剂的应用，能在混凝土孔隙表面形成疏水膜，阻止液态水的侵入，同时允许水蒸气逸出，有效防止冻融破坏和氯离子传输。在沿海港口码头中，常采用复合掺合料技术，利用硅灰的高火山灰活性填充微孔隙，利用矿渣粉的后期强度增长特性，构建多重防护屏障，显著提升混凝土的长期耐久性。

### (三) 结构自修复功能的探索与应用

近年来，生物矿化、微生物诱导沉淀及微胶囊技术等自修复材料的研究取得了突破性进展。通过在混凝土中掺入休眠的细菌或其营养源，当裂缝产生并有水分进入时，细菌被激活并分泌碳酸酐酶，促使碳酸钙沉淀填充裂缝，实现自我修复。微胶囊技术则是在混凝土中预埋含有修复剂的微胶囊，裂缝扩展时胶囊破裂释放修复剂，自动愈合微裂缝。虽然目前这些技术多处于实验室或小规模试验阶段，但其代表了未来提升混凝土耐久性的新方向，有望彻底解决微裂缝引发的渗漏问题，大幅延长结构寿命。

### 三、多重协同防护技术与工程实践策略

#### (一) 表面防护涂层与浸渍技术的实施要点

表面防护是阻止侵蚀介质直接接触混凝土基体的第一道防线。常用的防护涂层包括环氧沥青涂料、聚氨酯涂料、氟碳涂料及有机硅浸渍剂等。对于浪溅区和水位变动区,厚浆型环氧涂层因其优异的附着力和耐水性而被广泛应用,能有效阻隔氯离子和水分。有机硅浸渍剂则能深层渗透至混凝土内部,形成憎水层,既不影响混凝土呼吸,又能显著降低吸水率。在实际应用中,需注意基层处理的彻底性,确保涂层无气泡、无漏涂,并根据不同区域的腐蚀特点选择合适的涂层体系。例如,水下区可采用耐磨损的防腐砂浆覆盖,而大气区则需选用耐候性强的面漆。

#### (二) 阴极保护技术在钢结构与钢筋混凝土中的应用

阴极保护是通过施加外部电流或连接牺牲阳极,使被保护金属电位负移,从而抑制其阳极溶解反应的技术。在沿海港口码头中,对于钢桩、钢护筒等钢结构,牺牲阳极法(如锌合金、铝合金阳极)是最成熟且应用最广泛的保护措施。对于钢筋混凝土结构,尤其是埋入海床或长期处于水中的部分,混合式阴极保护(外加电流+牺牲阳极)效果更佳。该技术能有效延缓钢筋锈蚀,甚至在一定范围内逆转锈蚀过程。实施阴极保护时,必须配套安装参比电极进行电位监测,并定期维护电源设备或更换阳极块,以确保保护效果的持续性和经济性。

#### (三) 结构优化设计与构造细节的改进

从设计源头提升耐久性至关重要。应合理确定混凝土保护层厚度,对于浪溅区等恶劣环境,建议适当增加保护层厚度(如不小于70mm),并严格控制保护层垫块的材质和分布。优化钢筋布置,避免钢筋过密导致混凝土振捣不密实。在节点构造上,应采用滴水线、排水坡度等设计,避免雨水和海水在结构表面滞留。此外,设置合理的伸缩缝和止水带,防止海水通过缝隙渗入结构内部。对于易受冲刷的部位,可采用抛石护底或消浪设施,减轻波浪对基础的直接冲击。通过精细化的结构设计,消除耐久性隐患的“薄弱环节”。

### 四、全生命周期智能运维与防护体系展望

#### (一) 基于物联网的结构健康监测与预警系统

传统的人工巡检存在滞后性和主观性,难以及时发现隐蔽病害。未来,依托物联网、大数据和人工智能技术,构建港口码头结构健康监测系统(SHM)将成为必然趋势。通过在关键部位埋设光纤光栅传感器、无线传感网络、腐蚀探针等设备,实时采集应变、裂缝宽度、钢筋电位、氯离子浓度、温度湿度等数据。利用边缘计算和云端分析,建立结构耐久性退化模型,实现对潜在风险的精准预测和早期预警。这不仅能为维修决策提供科学依据,还能实现从“被动抢修”向“主动预防”的转变,极大降低全生命周期成本。

#### (二) 绿色防护技术与生态融合的新范式

随着“双碳”目标的提出,港口结构防护将更加注重绿色低碳。未来,研发和推广低能耗、低排放的新型防护材料,如生物基涂料、再生骨料混凝土等,将是行业发展的重点。同时,探索“工程防护+生态修复”的融合模式,如在码头前沿构建人工鱼礁、种植红树林等,利用自然生态系统缓冲海浪冲击、净化水质,间接保护码头结构。这种生态友好的防护理念,不仅能提升结构的耐久性,还能改善港口生态环境,实现经济效益与生态效益的统一。

#### (三) 标准化体系与全链条质量管控

为确保防护技术的实施效果,亟需建立健全涵盖材料生产、施工工艺、验收标准及运维管理的全链条标准化体系。制定针对不同海洋环境分区的差异化防护技术规范,明确材料性能指标和施工质量控制要点。加强从业人员的技能培训,推广标准化施工工艺,杜绝因人为因素导致的防护失效。同时,建立防护工程的质量追溯机制,确保每一道工序、每一个环节都可查可控。通过标准化的引领和规范化管理,全面提升沿海港口码头结构防护的整体水平。

### 结语

沿海港口码头结构的耐久性防护是一项涉及材料学、岩土工程、结构力学及环境科学的复杂系统工程。面对海洋环境的严酷考验,单一的技术手段已难以满足日益增长的长效服役需求。本文通过对氯离子侵蚀机理的剖析,系统梳理了高性能混凝土、表面涂层、阴极保护及结构优化等主流防护技术的应用现状,强调了“本征提升”与“多重防护”协同作战的重要性。展望未来,随着智能监测技术的普及、自修复材料的突破以及绿色理念的深入,港口码头结构防护将向着更加智能化、精细化、生态化的方向发展。唯有坚持技术创新与管理规范并重,构建全生命周期的综合防护体系,方能有效抵御海洋侵蚀,保障港口基础设施的长治久安,为国家海洋强国战略提供坚实支撑。

### [参考文献]

- [1]王壹省,周然,李晓君,等.气候变化背景下我国港口设施防灾减灾能力提升策略研究[J].水道港口,2026,47(01):149-156.
- [2]徐扬.基于云模型的绿色港口多层次模糊综合评价[D].武汉理工大学,2024.DOI:10.27381/d.cnki.gwlg.2024.002805
- [3]欧阳豪,曾环尚,苏志焕,等.面向多场景码头的融合集成式变形预测模型研究[J].中国水运,2026,(07):22-25.DOI:10.13646/j.cnki.42-1395/u.2026.07.008.
- [4]乔艳东,于五一.钢筋混凝土耐久性影响因素及检测方法[J].中国水泥,2026,(01):124-126.
- [5]孙贺.我国港口供应链稳定性评价及对策建议研究[D].宁波工程学院,2026.DOI:10.49515/d.cnki.gnbgd.2025.000012.