

沿海港口码头结构耐久性提升与防腐加固措施分析

朱 宁

杭州交投建设工程有限公司 浙江 杭州 310024

摘 要：沿海港口码头结构长期受海洋环境侵蚀，耐久性问题突出。本文深入分析海洋环境、材料特性、施工环节及运营阶段对结构耐久性的影响，从防腐加固技术、耐久性提升措施、实施流程三方面展开研究。涵盖表面与内部防腐、水下及老旧结构加固，提出材料、设计、施工、维护优化策略，明确排查、选型、施工、跟踪等实施流程，为提升沿海港口码头结构耐久性提供全面参考。

关键词：沿海港口码头；结构耐久性；防腐加固技术；提升措施；实施流程

引言：沿海港口码头作为交通枢纽与经济纽带，其结构耐久性关乎港口运营安全与经济效益。海洋环境复杂，氯离子、硫酸根离子等腐蚀性介质，以及干湿交替、温湿度波动等因素，对码头结构造成严重侵蚀。同时，结构材料特性、施工环节操作及运营阶段外界作用，也进一步影响结构耐久性。在此背景下，研究沿海港口码头结构耐久性提升与防腐加固措施，对保障港口长期稳定运行具有重要意义。

1 沿海港口码头结构耐久性影响因素

1.1 海洋环境侵蚀因素

海洋环境是沿海港口码头结构耐久性劣化的主要外部诱因，侵蚀作用通过多介质协同作用逐步削弱结构服役性能。海洋大气中富集的氯离子、硫酸根离子等腐蚀性介质，会随海风与盐雾沉降附着于结构表面，缓慢向内部渗透，破坏结构材料微观结构^[1]。浪溅区干湿交替频繁，氯离子浓度远高于其他区域，腐蚀作用最为剧烈；全浸区以氧还原反应为主，海生物附着形成的氧浓差电池会加重局部坑蚀；潮差区因供氧不均衡，腐蚀速率处于浪溅区与全浸区之间，易诱发结构缝隙腐蚀。温湿度频繁波动会加剧侵蚀进程，高湿度为腐蚀性反应提供充足水分，昼夜与季节温差产生的应力会加速结构表面开裂，为介质侵入开辟通道。

1.2 结构材料自身特性

结构材料性能直接决定码头结构初始耐久水平，是影响结构长期服役的核心内在因素。混凝土材料适配性至关重要，水泥强度等级、骨料纯度及杂质含量、掺合料质量，均会影响抗侵蚀能力。低质量骨料中的有害成分会加速混凝土碳化与开裂，不合理配比会降低混凝土密实度，增加介质渗透风险。钢材耐锈蚀性能关联钢结构构件服役寿命，纯度不足、合金元素配比不当，会使其在海洋环境中易发生电化学腐蚀，逐步丧失力学性能。材

料体积稳定性同样影响耐久性，易收缩、易开裂的材料在环境作用下会快速出现损伤，缩短结构整体服役年限。

1.3 施工环节相关影响

施工环节操作质量与工艺合理性，对码头结构耐久性产生不可逆影响，直接决定结构能否发挥设计预期的耐久性能。混凝土施工中，搅拌均匀性、浇筑密实度控制不到位，会导致结构内部产生孔隙与微裂缝，成为腐蚀性介质侵入的通道。钢筋保护层厚度控制偏差过大，会降低钢筋抗锈蚀能力，加速钢筋劣化进而影响结构整体稳定性。钢结构表面除锈不彻底、混凝土表面养护不及时，会破坏材料表面完整性，为后续腐蚀与损伤埋下隐患。施工缝与节点处理不当，会导致结构衔接处强度不足，易在环境与荷载作用下出现破损。

1.4 运营阶段外界作用

运营阶段各类外界作用会持续损耗码头结构性能，逐步降低结构耐久性，是影响结构长期服役的重要外部因素。码头运营中，堆货荷载、起重运输机械荷载的反复作用，会使结构产生疲劳损伤，长期荷载下结构变形累积，易引发裂缝扩展。船舶撞击、水流冲刷等偶然作用，会直接造成结构表面破损，破坏防护体系完整性，加速腐蚀进程。运营期间维护不到位，会使结构表面微小损伤无法及时修复，逐步发展为严重病害。港口运营产生的污染物会加剧环境侵蚀强度，进一步加速结构材料劣化，缩短结构服役年限。

2 沿海港口码头结构防腐加固技术

2.1 表面防腐处理

沿海港口码头结构长期暴露于海洋环境，表面防腐处理是抵御氯离子渗透、碳化作用及生物侵蚀的关键防线。针对混凝土结构，可采用渗透型硅烷浸渍剂，通过毛细作用深入混凝土内部形成憎水层，阻断水分与腐蚀介质的侵入路径^[2]。对于金属构件，热喷涂锌铝伪合金涂

层技术通过高速气流将熔融金属雾化并喷射至基材表面,形成致密且附着力强的防护层,有效隔绝海水与氧气接触。此外,纳米改性环氧树脂涂料凭借其低孔隙率与高耐候性,在码头面层防护中展现出优异性能,可显著延长结构表面防护寿命。

2.2 内部防腐加固

内部防腐加固聚焦结构本体性能提升,通过改善结构内部材质与构造,增强自身抗腐蚀能力与力学性能。混凝土结构内部防腐可通过掺入阻锈剂实现,阻锈剂能吸附于钢筋表面形成保护膜,抑制钢筋电化学腐蚀,常用有机胺类、亚硝酸钙类阻锈剂,需根据混凝土配比与服役环境合理选型。同时可优化混凝土配合比,掺入优质掺合料提升混凝土密实度,减少内部孔隙,阻断介质渗透通道。钢结构内部防腐可采用合金化处理,通过调整钢材合金成分,提升钢材自身耐锈蚀性能,针对已发生内部锈蚀的构件,可采用压力灌浆技术注入防腐浆液,填充内部缝隙与锈蚀空隙,兼顾防腐与加固效果,保障结构内部完整性。

2.3 水下结构防腐加固

水下结构长期处于高压、低氧、高流速环境,防腐加固需兼顾抗冲刷与耐腐蚀需求。水下不分散混凝土技术通过添加絮凝剂与增稠剂,使混凝土在水中浇筑时保持良好粘聚性,避免骨料分离,适用于码头桩基修复。牺牲阳极阴极保护技术选用铝锌合金作为阳极材料,通过电化学作用优先腐蚀阳极,保护水下钢结构免受电化学腐蚀。对于局部腐蚀严重区域,可采用水下机械切割与焊接修复工艺,结合防腐涂料涂装,恢复结构完整性。

2.4 老旧结构防腐加固

老旧码头结构因长期服役出现材料劣化与构造缺陷,需采用复合加固策略。混凝土结构表面缺陷修复中,聚合物改性水泥基修补材料凭借与基材相似的热膨胀系数,可有效减少界面应力集中。对于承载力不足的老旧桩基,增设钢管套筒并灌注高强灌浆料形成组合桩,可显著提升竖向承载能力。金属构件疲劳裂纹修复采用摩擦搅拌焊技术,通过机械搅拌作用实现金属原子间结合,消除裂纹尖端应力集中,恢复构件疲劳寿命。此外,结构健康监测系统集成应变传感器与腐蚀速率探头,可实时反馈加固效果,为后续维护提供数据支持。

3 沿海港口码头结构耐久性提升措施

3.1 结构材料优化

结构材料优化是提升码头结构耐久性的核心基础,依托防腐加固技术中的材料改进思路,通过选用高性能耐腐蚀材料、优化材料配比,从源头提升结构抗劣化能

力。混凝土材料优化聚焦抗渗、抗腐蚀性能提升,选用低水化热、高密实度的水泥品种,搭配优质洁净骨料,严格控制骨料中有害杂质含量,掺入粉煤灰、矿渣粉等优质掺合料,改善混凝土微观结构,减少内部孔隙率,阻断腐蚀性介质渗透路径^[1]。钢材选用耐海洋腐蚀的低合金高强度钢材,通过调整合金成分提升自身耐锈蚀性能,也可采用表面合金化处理,增强钢材抗电化学腐蚀能力。同时选用适配海洋环境的专用防腐辅助材料,提升材料间协同防护效果,筑牢结构耐久性基础。

3.2 设计层面优化

设计层面优化以预防性设计为核心,结合码头服役环境与荷载特征,通过科学设计规避耐久性隐患,为结构长期服役提供保障。设计过程中充分考量海洋环境各区域腐蚀强度差异,针对浪溅区、潮差区等腐蚀剧烈区域,优化结构截面形式,增加防护层厚度,减少结构表面棱角与缝隙,降低局部腐蚀风险。合理设计钢筋保护层厚度,结合介质渗透规律优化配筋方式,避免钢筋外露引发锈蚀。优化结构节点设计,提升衔接部位密实度与抗裂性能,减少应力集中导致的结构破损。融入耐久性设计理念,结合结构服役年限,合理确定设计参数,确保设计方案适配海洋环境长期侵蚀需求,实现主动预防腐蚀与损伤。

3.3 施工工艺改进

施工工艺改进重点围绕施工质量控制展开,通过规范施工流程、优化施工方法,减少施工环节对结构耐久性的不利影响。混凝土施工中,优化搅拌工艺确保物料混合均匀,采用分层浇筑、振捣密实的方式,减少内部孔隙与微裂缝产生,加强浇筑后养护工作,控制养护温度与湿度,避免混凝土早期开裂。钢结构施工中,完善表面除锈工艺,采用机械除锈与化学除锈相结合的方式,确保除锈彻底,提升防腐涂层附着效果。严格控制施工缝、节点等关键部位的施工质量,采用专用密封材料与施工工艺,提升衔接部位密封性与强度。建立施工质量管理体系,对材料进场、施工过程进行全程管控,及时纠正施工偏差,保障施工质量符合耐久性设计要求。

3.4 运营期间维护

运营期间维护以全生命周期管理为核心,通过常态化维护、及时修复病害,持续保障结构耐久性。建立完善的结构监测体系,定期对码头结构表面状态、腐蚀情况、力学性能进行检测,精准掌握结构服役状态,及时发现微小损伤与腐蚀隐患。针对监测发现的问题,采取针对性修复措施,对表面涂层破损、裂缝等病害及时处理,避免损伤进一步发展。定期对结构进行防腐维护,补涂防

防腐层、检查阴极保护系统运行状态,确保防护体系持续有效。优化运营荷载管理,合理控制堆货、运输机械荷载,避免荷载过大引发结构疲劳损伤。通过全程管控、动态维护,延长结构服役年限,实现码头结构全生命周期耐久性提升。

4 沿海港口码头耐久性提升与防腐加固实施流程

4.1 前期排查与梳理

前期排查与梳理是实施耐久性提升与防腐加固工作的前提,通过系统排查掌握结构实际状态,为后续工作开展提供科学依据^[4]。排查工作需覆盖码头结构全部构件,聚焦混凝土结构碳化、裂缝、腐蚀情况与钢结构锈蚀程度,采用专业检测设备精准获取结构损伤数据,明确损伤部位、范围及严重程度。梳理工作需结合排查结果,分析损伤产生的核心原因,区分环境侵蚀、材料劣化、施工缺陷与运营损耗等不同诱因,梳理结构当前存在的耐久性隐患。同时梳理码头服役环境参数、原有设计标准与施工记录,明确结构服役年限与当前承载需求,形成完整的排查梳理报告,为后续措施选型与方案设计提供精准支撑。

4.2 措施选型与方案设计

措施选型与方案设计需基于前期排查梳理结果,结合码头结构类型、服役环境与损伤状态,实现针对性与科学性的统一。措施选型需匹配结构损伤特征,针对不同类型、不同程度的病害,选用适配的防腐加固技术与耐久性提升措施,兼顾技术可行性、经济合理性与长期有效性,避免选型与实际需求脱节。方案设计需细化各项措施的实施细节,明确施工流程、技术参数、材料规格与质量标准,结合预防性设计理念与全生命周期管理思路,优化设计方案。设计过程中充分考量现场施工条件与运营需求,合理规划施工时序,减少对港口正常运营的影响,确保方案既符合学术规范与技术要求,又具备较强的可操作性。

4.3 现场施工与管控

现场施工与管控是保障防腐加固与耐久性提升效果的关键环节,通过规范施工操作、强化质量管控,确保各项措施落地见效。施工前需对施工人员进行专业技术交底,明确施工要点与质量要求,确保施工人员熟练掌握施工工艺。施工过程中严格按照设计方案执行,规范材料进场检验流程,杜绝不合格材料投入使用,严格控

制各施工工序的操作质量,重点把控关键部位与薄弱环节的施工精度。建立完善的现场管控体系,安排专业人员进行全程巡检,及时发现并纠正施工过程中的偏差,处理施工中出现的突发问题。施工过程中做好施工记录,详细记录施工工序、技术参数与质量检测结果,为后续跟踪维护提供依据。

4.4 后期跟踪与维护调整

后期跟踪与维护调整是实现结构耐久性长期提升的重要保障,依托全生命周期管理理念,持续监控结构服役状态并优化维护策略。建立长期跟踪监测体系,定期对结构防腐效果、损伤修复情况与耐久性指标进行检测,跟踪结构性能变化规律,及时捕捉新的损伤与腐蚀隐患。根据跟踪监测结果,对维护方案进行动态调整,针对出现的新问题优化维护措施,补充完善防腐防护体系,确保维护工作贴合结构实际状态。定期开展常态化维护工作,按照维护方案对结构进行防腐处理、裂缝修补与构件检查,及时更换老化、损坏的防护材料与构件^[5]。通过持续跟踪、动态调整与常态化维护,延长结构服役年限,稳定提升结构耐久性水平。

结束语

沿海港口码头结构耐久性提升与防腐加固是一项系统工程,涉及多环节、多因素。通过深入分析影响因素,针对性采用防腐加固技术,从材料、设计、施工、维护等方面综合施策,并严格遵循实施流程,可有效提升结构耐久性。实践中需持续关注结构状态,根据实际情况动态调整维护策略,确保各项措施长期有效,为沿海港口码头安全、稳定运营提供坚实保障,推动港口事业持续健康发展。

参考文献

- [1]张雷,张朝辉.沿海港口码头钢筋混凝土结构耐久性测试与评估方法研究[J].中国水泥,2025(6):38-43.
- [2]王碧波,范伟.码头水工结构耐久性检测现状分析探究[J].广东建材,2024,40(10):33-36.
- [3]刘红彪,刘海成,齐方利,等.基于阳极梯传感器的高桩码头耐久性监测研究[J].水道港口,2023,44(3):422-431.
- [4]邱智锦.面向深水码头的港口工程结构优化与耐久性提升研究[J].现代工程科技,2025,4(22):49-52.
- [5]刘珂.港口码头安全性、适用性和耐久性评估技术分析[J].中国水运,2025(23):19-21.