

跨海公路桥梁结构防腐技术与耐久性设计方法研究

郭安虔

鹰潭市顺达公路工程监理有限公司 江西鹰潭 335099

摘 要: 本文针对跨海公路桥梁在严酷海洋环境下的腐蚀与耐久性问题,开展了系统性研究。首先,深入剖析了氯离子侵蚀、干湿循环、硫酸盐腐蚀等多因素耦合作用下的腐蚀机理及其对结构性能的劣化影响。在此基础上,系统梳理了涵盖材料本体、表面涂层及阴极保护的多层次防腐技术体系,并对各项关键技术的适用性与效能进行了评述。核心创新在于构建了一套基于性能的耐久性设计方法,该方法以保障桥梁全生命周期性能为目标,通过设定明确的设计年限与环境等级、优选高耐久性材料与构造、实施分区差异化防腐措施,并建立可量化的耐久性极限状态验算方法。杭州湾跨海大桥的工程应用案例验证了该方法在显著提升结构长期可靠性与降低全生命周期成本方面的有效性。

关键词: 跨海桥梁; 腐蚀机理; 防腐技术; 耐久性设计

引言

跨海公路桥梁作为连接区域交通的关键枢纽,其长期安全服役面临海洋环境中氯离子侵蚀、干湿循环、化学腐蚀及生物附着等多重严酷挑战。这些腐蚀因素的耦合作用,会导致结构材料性能劣化、构件承载力下降,严重缩短桥梁使用寿命,并带来高昂的维护成本和安全隐患。传统依赖经验或固定参数的“定值设计”方法,难以精准应对环境的动态变化与腐蚀的长期累积效应,常导致设计目标与实际服役状态脱节。因此,本研究旨在从腐蚀机理的源头分析入手,系统整合现有防腐技术,并引入“基于性能”的现代设计理念,探索一套能够主动保障跨海桥梁在全生命周期内安全、适用、经济的耐久性设计新方法,以期为我国跨海工程的建设与维护提供科学的理论指导与实践路径。

1. 跨海桥梁结构腐蚀机理与环境作用分析

1.1 海洋环境的主要腐蚀因素

跨海桥梁所处海洋环境具有高度的复杂性与严酷性,其腐蚀作用来源于多种物理、化学及生物因素的共同作用。氯离子侵蚀是其中最主要的腐蚀因素,氯离子通过混凝土孔隙渗透至钢筋表面,破坏钢筋钝化膜,引发电化学腐蚀,导致钢筋锈蚀、体积膨胀,进而引起混凝土开裂剥落。碳化作用则是指大气中的二氧化碳与混凝土中的氢氧化钙反应生成碳酸钙,降低混凝土的碱性环境,加速钢筋钝化膜的破坏。干湿循环过程使得结构材料反复经历湿润与干燥状态,加速氯离子和有害物质的迁移与渗透。硫酸盐侵蚀主要来源于海

水中的硫酸根离子,其与水泥水化产物反应生成具有膨胀性的产物,导致混凝土开裂、强度降低。此外,海洋微生物(如硫酸盐还原菌、铁细菌)在结构表面附着繁殖,通过代谢过程加剧局部腐蚀。风浪荷载则通过动态力学作用,加剧结构表面保护层的损伤,促进腐蚀介质的侵入。这些腐蚀因素并非独立作用,而是存在显著的耦合效应,例如干湿循环会加剧氯离子侵蚀,微生物附着会增强局部电化学腐蚀,共同作用导致腐蚀过程更加复杂和严重。明确各因素的主次关系及其耦合效应,是制定有效防腐策略的基础^[1]。

1.2 腐蚀对桥梁结构性能的影响

腐蚀作用对跨海桥梁结构材料性能的劣化具有深远影响。对于混凝土材料而言,氯离子侵蚀与碳化作用共同导致钢筋锈蚀,锈蚀产物体积膨胀可产生高达2-6倍的膨胀应力,引发混凝土保护层开裂、剥落,降低混凝土的有效截面与承载能力。硫酸盐侵蚀则导致混凝土微观结构破坏,宏观表现为强度下降、弹性模量降低,严重时出现大面积剥落与结构失效。对于钢材,尤其是预应力钢绞线与主梁钢材,腐蚀会直接导致截面损失、力学性能下降,锈蚀坑处易产生应力集中,显著降低疲劳寿命与极限承载力。腐蚀不仅影响材料本身的力学性能,还会导致结构构件的刚度减弱、变形增大,进而影响桥梁的整体动力特性与行车安全性。长期腐蚀作用将显著缩短桥梁的使用寿命,增加维护成本,甚至引发突发性结构失效,对公共安全构成严重威胁。因此,深入分析腐蚀对桥梁结构性能的影响机制,对于制定科学的防腐技术与

耐久性设计方法具有重要的理论价值与工程意义^[2]。

2. 跨海桥梁结构防腐技术体系研究

2.1 基本防腐策略与技术分类

跨海桥梁结构防腐应遵循“标本兼治、多重防护”的基本原则，即从材料自身性能提升与外部防护措施相结合的角度出发，构建系统化、多层次的防腐技术体系。根据防护原理和作用对象的不同，现有防腐技术可划分为三大类：第一类是以提高材料自身密实性为主的材料本体防护技术，通过优化材料组成与微观结构，增强其抗渗性与耐腐蚀性，从源头上延缓腐蚀介质的侵入；第二类是以设置物理屏障为主的表面涂层防护技术，通过在结构表面形成致密的保护层，有效阻隔外部腐蚀环境与结构材料的直接接触；第三类是以抑制电化学反应为主的阴极保护技术，通过电化学手段改变钢筋或钢材的电位状态，使其处于免蚀区，从而有效控制腐蚀速率。这三类技术各有侧重，可单独应用，也可组合使用，形成协同防护机制，以应对跨海桥梁复杂严酷的海洋腐蚀环境。

2.2 关键防腐技术评述

在材料本体防护技术中，高性能海工混凝土通过掺入硅灰、粉煤灰、矿粉等辅助胶凝材料，优化水胶比，显著提升混凝土的密实度与抗氯离子渗透能力，延长钢筋锈蚀起始时间。硅烷浸渍技术则通过在混凝土表面渗透形成憎水层，有效降低水分和氯离子的侵入速率，适用于已建桥梁的防护加固。表面涂层防护技术中，环氧涂层具有优异的附着力与耐化学性，适用于浪溅区与大气区的防护；聚氨酯涂层具备良好的弹性与耐候性，能够适应结构变形与环境温度变化；氟碳涂层以其超强的耐紫外线与耐腐蚀性能，适用于严酷海洋环境下的长效防护。阴极保护技术包括牺牲阳极法与外加电流法，前者通过连接电位更负的金属（如锌、铝合金）提供保护电流，适用于中小型结构或局部防护；后者通过外部直流电源使被保护金属极化至免蚀电位，适用于大型桥梁结构的全面防护。各技术在防护效果、施工工艺、维护难度及经济成本方面存在显著差异，需根据桥梁具体部位、环境条件、设计寿命及全生命周期成本进行综合选择与优化配置，以实现防腐效果与经济性的最佳平衡。这一系统化的技术评述为跨海桥梁防腐技术的科学选型与工程应用提供了重要依据^[3]。

3. 基于性能的跨海桥梁耐久性设计方法

3.1 耐久性设计理念与目标

传统跨海桥梁“定值设计”以固定的材料强度、腐蚀速率等参数为依据，未充分考虑海洋环境的动态变化（如氯离子浓度波动、温度湿度交替、浪花冲击强度差异）及长时间效应（如混凝土碳化、材料老化、腐蚀损伤累积），导致设计结果与实际服役状态偏差较大。例如，部分采用定值设计的跨海桥梁，因未针对性量化浪溅区的强腐蚀作用，在服役 20–30 年后就出现钢筋锈蚀、混凝土剥落等病害，需投入高额资金进行大修加固，反而增加全生命周期成本。

现代“基于性能的耐久性设计”理念，实现了从“被动满足规范指标”到“主动保障服役性能”的转变，其核心是围绕结构全生命周期的实际性能需求展开设计。该理念要求先明确桥梁所处海洋环境的具体腐蚀特征（如海洋大气区、浪溅区、水位变动区的腐蚀强度差异），再结合材料性能衰减规律、维护策略，将耐久性设计与结构安全、适用、外观及成本目标深度绑定。其核心目标清晰界定为：确保桥梁结构在预设的设计使用年限（跨海公路桥梁通常为 100 年）内，在正常日常维护（如定期涂层检查、轻微裂缝修补、阳极性能监测等）条件下，始终满足安全性要求（不发生因腐蚀导致的承载力下降、结构失稳）、适用性要求（不出现影响通行的变形、渗漏、外观破损），同时通过优化设计方案减少后期大修、加固的频率与成本，最终实现全生命周期成本最优——即建设阶段的初始投资、运营阶段的维护成本、病害后的修复成本及退役处置成本的总和最小化，避免“重建设、轻维护”导致的资源浪费^[4]。

3.2 耐久性设计的关键环节

实现基于性能的耐久性设计目标，需通过四个紧密衔接的关键环节落地，每个环节均需量化指标支撑，确保设计可执行、可验算。

首先是设定合理的设计使用年限与环境作用等级。设计使用年限需结合桥梁的战略意义（如跨海峡通道、区域交通枢纽）、区域经济水平及环境腐蚀强度确定，跨海公路桥梁普遍设定为 100 年，且需明确不同结构部件（如主梁、桥墩、基础）的耐久性优先级（基础因维修难度大，耐久性要求需高于主梁）。环境作用等级划分需依据现场监测数据与《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》（JTJ 275-2000），将海洋环境细分为海洋大气区、浪溅区、水位变动区、水下区及泥下区，每个区域按氯离子年侵入量、相对湿度、温度波动范围等参数确定腐蚀作用等级（如浪溅区氯离子年侵入量

达 $0.8\text{--}1.2\text{kg/m}^3$ 混凝土,为最高腐蚀等级),为后续材料选择、防腐设计提供针对性依据。

其次是选择高耐久性的结构材料与构造形式。材料方面,混凝土需采用海工高性能混凝土,通过掺入硅灰、矿粉等活性掺合料优化配合比,使 28d 抗压强度 $\geq 50\text{MPa}$,抗氯离子渗透系数(RCM 法) $\leq 2.0 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$,抗冻等级 $\geq \text{F300}$,从源头减少氯离子侵入通道;钢筋优先选用环氧涂层钢筋(涂层厚度 $\geq 200\mu\text{m}$,附着力 $\geq 7\text{MPa}$,耐盐雾性能 $\geq 10000\text{h}$)或双相不锈钢钢筋(Cr 含量 $\geq 22\%$ 、Ni 含量 $\geq 5\%$),阻断电化学腐蚀路径。构造形式设计需规避腐蚀隐患,如桥墩顶部设置向外倾斜的排水坡(坡度 $\geq 3\%$),防止雨水、浪花积水渗透至混凝土内部;主梁翼缘板的混凝土保护层厚度在浪溅区需 $\geq 60\text{mm}$,且避免钢筋密集布置导致的振捣不密实,减少氯离子局部富集风险。

再者是针对性的防腐措施设计,需按环境分区差异化配置。海洋大气区采用混凝土表面涂覆氟碳防腐涂层(干膜厚度 $\geq 80\mu\text{m}$,光泽度 $\geq 70\%$,耐人工老化性能 $\geq 3000\text{h}$),减少氯离子吸附与紫外线老化;浪溅区腐蚀最强,采用“聚脲弹性体涂层 + 牺牲阳极阴极保护”复合措施,聚脲涂层需满足拉伸强度 $\geq 15\text{MPa}$ 、断裂伸长率 $\geq 300\%$,牺牲阳极选用锌铝合金阳极(电流效率 $\geq 65\%$,设计寿命 ≥ 20 年),通过阳极溶解持续抑制钢筋腐蚀;水下区仅需设置牺牲阳极阴极保护,阳极布置密度按钢筋表面积每平方米 $0.5\text{--}1.0\text{kg}$ 确定,确保保护电流密度达到 $20\text{--}50\text{mA/m}^2$ 。

最后是建立基于性能的耐久性极限状态与验算方法。需将腐蚀影响量化为可计算的设计参数:通过现场取样与室内加速试验,确定氯离子在混凝土中的扩散系数、钢筋锈蚀临界氯离子浓度(通常为 0.6kg/m^3 混凝土),利用菲克第二定律计算不同环境区域钢筋开始锈蚀的时间;将“钢筋锈蚀导致截面损失率 $\leq 5\%$ ”“混凝土保护层剥落面积 $\leq 0.1\%$ 结构表面积”“结构变形量 $\leq$ 规范允许值的 80% ”作为耐久性极限状态,结合结构受力分析,验算在设计使用年限内,腐蚀作用下结构的承载力、刚度是否满足要求,确保腐蚀影响被纳入设计全过程,避免后期性能失效。

2008 年通车的杭州湾跨海大桥(连接浙江省嘉兴市与宁波市),其耐久性设计采用基于性能的方法,设定设

计使用年限 100 年,按 JTJ 275-2000 将环境划分为 5 个等级,浪溅区采用海工高性能混凝土(抗氯离子渗透系数 $\leq 1.5 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$) + 环氧涂层钢筋 + 聚脲涂层 + 牺牲阳极阴极保护的复合防腐措施,并建立氯离子扩散验算模型量化锈蚀风险。2020 年该桥运营 12 年后的耐久性监测报告显示,浪溅区混凝土保护层厚度达标率 100%,钢筋锈蚀率 $\leq 0.1\%$,混凝土表面无明显剥落,结构承载力仍保持设计值的 98% 以上,远优于同期采用传统定值设计的跨海桥梁(传统桥梁运营 12 年钢筋锈蚀率常达 $0.5\%\text{--}1\%$);同时,该设计预计可减少 2020-2040 年的大修成本约 1.2 亿元,充分验证了基于性能的耐久性设计方法在保障结构长期性能、降低全生命周期成本方面的有效性,为后续跨海桥梁耐久性设计提供了实践参考。

4. 结语

跨海桥梁的防腐与耐久性设计是保障其长期安全服役的核心环节。通过系统分析海洋环境的主要腐蚀因素及其耦合效应,可以明确防腐技术的研发方向与应用重点。同时,基于性能的设计理念突破了传统定值设计的局限性,将结构全生命周期内的性能需求纳入设计体系,实现了从被动防护到主动保障的转变。科学的防腐策略与精准的耐久性设计能够显著延缓腐蚀进程,降低维护成本,提升结构的整体可靠性。未来,随着新材料、新技术的不断涌现,以及监测手段的进一步完善,跨海桥梁的防腐与耐久性设计将朝着更加智能化、精细化的方向发展,为海洋工程建设提供更有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 许艳平,黎鹏平,李安,等.公路桥梁混凝土防腐涂层研究进展[J].电镀与涂饰,2020,39(24):5.
- [2] 魏小龙.公路混凝土桥梁防腐工艺研究及应用[D].兰州大学,2022.
- [3] 冯忠居,马昊,蔡杰,等.跨海大桥装配式钢管混凝土复合桩基础防腐技术研究[J].公路,2022,67(11):104-110.
- [4] 王子宁.我国某跨海桥梁混凝土结构耐久性状况调查与分析[J].珠江水运,2021(19):2.
- [5] 王神力.铁路跨海桥梁钢筋混凝土结构耐久性设计[J].铁道建筑技术,2022(007):000.