

建筑工程全生命周期钢结构腐蚀管理策略

张梓煜

杜伦大学

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18433

[摘要] 钢结构腐蚀管控贯穿建筑工程全生命周期,对延长结构寿命、提升经济效益、保障绿色发展与运行安全具有关键作用。基于全生命周期覆盖、预防为主防治结合、环境适应性及经济合理性四大原则,管控工作通过材料选型与预处理把控源头质量,施工阶段依托环境监测与精细化操作保障防护效果,运维阶段构建分级动态监测体系并实施精准修复。沿海某大型公共建筑工程的实践表明,通过环境适配的材料选择、标准化施工管控与智能化监测修复,可有效抵御高盐雾、高湿度环境的腐蚀影响,显著降低结构安全风险,为同类工程提供实践参考。

[关键词] 建筑工程;全生命周期;钢结构;腐蚀管理

引言:

本研究立足工程实际,结合环境特性与经济要求,确立科学管控原则,制定材料、施工、运维全环节策略,通过具体工程案例验证方案可行性,为提升钢结构腐蚀管控水平提供系统解决方案。

一、建筑工程全生命周期钢结构腐蚀管控的意义

在建筑工程全生命周期管理进程中,实施钢结构腐蚀管控具有至关重要的意义,其不仅能够有效延长钢结构的实际使用寿命,还可显著提升工程建设经济效益、积极促进绿色可持续发展理念的落地,同时强化工程结构运行全过程的风险控制效能。具体而言,钢结构在建筑工程领域常被应用于承载关键荷载的核心部位,其一旦发生腐蚀现象,将会直接削弱结构自身的强度与稳定性,进而大幅增加坍塌等安全事故的发生风险;工程师通过开展全生命周期腐蚀管理工作,实时监测钢结构的腐蚀状态,并针对性地制定与实施修复策略,从而确保结构始终符合安全使用标准,有效规避因腐蚀问题引发的灾难性后果。

二、建筑工程全生命周期钢结构腐蚀管控的原则

首先,开展建筑工程全生命周期钢结构腐蚀管理工作,要遵循的是全生命周期覆盖原则,即腐蚀管理工作需全面覆盖钢结构从设计、制造、安装,到使用维护、改造,直至拆除的完整流程,杜绝因阶段割裂而产生管理漏洞。

其次,应遵循预防为主、防治结合的核心原则,强调以主动预防模式替代被动修复模式,通过科学合理的设计方案降低钢结构的腐蚀风险,同时制定完善的应急预案以高效应对突发腐蚀问题;在此过程中,可运用阴极保护、防腐涂层、

环境控制等多元化手段抑制腐蚀现象的发生,对于已出现腐蚀的部位,则需根据腐蚀程度精准选择局部修复或整体更换的处理方式,防止腐蚀范围进一步扩散。

此外,还需遵循环境适应性原则,要依据钢结构所处环境的腐蚀性等级,制定差异化的防腐方案,依托对环境变化的动态监测数据,采取具有适应性的管控措施,以此增强防护管控的实际效果。

除此之外,须遵循经济合理性原则,即在充分满足结构安全与使用功能需求的前提下,优化防腐工程的成本投入,避免出现过度设计或维护不到位的问题。

三、建筑工程全生命周期钢结构腐蚀管理策略

(一) 材料选型与预处理, 把控源头质量

1. 材料选型

材料选型与预处理是钢结构腐蚀管理的首要环节,相关单位需以钢结构所处环境的腐蚀性等级为核心依据,通过系统化评估环境参数,包括湿度、盐雾浓度、污染物种类及含量、温度波动范围等关键指标,确定环境的腐蚀性类别,并严格依据国际标准及行业规范划分环境等级。在此基础上,构建材料性能与环境等级的匹配矩阵,明确不同环境等级下钢材材材,如普通钢、耐候钢、不锈钢等,及防腐涂层类型的具体要求,确保所选材料在特定环境条件下的耐腐蚀性能能够满足设计使用寿命的需求。在这一过程中,需严格审核材料供应商的资质证书与产品检测报告,全面验证材料的化学成分、力学性能及耐腐蚀指标是否符合相关标准要求;同时建立完善材料追溯体系,详细记录每一批次材料的来源、生产日期及各项检测数据,为后续质量管控工作提供可靠的

数据支撑。

2. 预处理

完成材料选型后, 预处理环节作为提升材料防腐性能的关键工序, 需重点通过表面清洁与粗糙化处理增强涂层与基材的附着力。在实践操作中, 工程师可采用喷砂或抛丸工艺, 彻底去除钢材表面的氧化皮、锈蚀及油污, 确保表面清洁度达到规定标准; 随后使用喷砂粗糙度检测仪检测表面粗糙度, 将其精准控制在 40 至 70 微米的合理范围内, 以优化涂层的附着牢固度; 最后对预处理后的表面进行清洁度复核, 采用目视检查与溶剂擦拭法相结合的方式, 验证表面无任何残留污染物。

(二) 施工阶段, 保障防护施工质量

1. 部署环境传感器

完成前期选材与准备工作后, 工作人员须严格做好施工环节的质量控制工作, 此过程中需优先把控施工环境参数, 借助实时监测设备对环境条件进行动态跟踪。具体而言, 需在施工现场合理布置温湿度传感器与风速仪, 明确设定环境控制阈值; 当监测数据超出阈值范围时, 立即启动应急调整措施: 若湿度过高, 便采用加热除湿设备降低空气含水率; 若温度过低, 就通过热风机或红外加热装置提升施工区域温度; 若风速过大, 则及时增设防风围栏以减少粉尘污染。在此过程中, 需建立完善的环境监测日志, 详细记录不同时间段的环境参数及对应的调整措施, 为后续优化施工参数提供详实的数据支持, 保障防腐涂层在适宜的环境条件下固化成型。

2. 精细化管理

防腐涂层施工质量的控制取决于工艺参数的精确把控与操作流程的规范执行, 相关单位需制定标准化的施工手册, 明确各道工序的具体操作要求。喷涂作业前, 需对钢材表面进行二次清洁, 采用无油压缩空气吹扫表面灰尘, 并使用溶剂擦拭去除残留油污; 喷涂过程中, 要精准控制喷枪压力、喷涂距离及移动速度, 确保涂层均匀覆盖、无漏涂、无流挂现象。每道涂层施工完成后, 需采用检测仪进行湿膜厚度检测, 若检测结果未达到要求, 立即进行补涂处理直至合格; 涂层固化后, 需开展干膜厚度复核工作, 采用干膜测厚仪在钢材表面随机选取 10 个点位进行测量, 确保干膜总厚度偏差不超过 10%。同时, 要对涂层表面进行目视检测, 重点核查是否存在针孔、裂纹、起泡等缺陷, 对不合格区域进行标记并及时返工处理, 形成完整的施工质量控制闭环。

(三) 运维阶段, 动态监测与及时修复

1. 动态监测

在运维阶段, 需开展动态监测与及时修复工作, 以此增强防腐管控的实际效果。腐蚀监测工作需结合钢结构所处环境的腐蚀性等级及结构自身的重要性, 构建分级监测网络, 实现精准化控制。相关单位需在钢结构的关键部位, 如焊缝节点、涂层破损高发区等, 部署电化学传感器、超声波测厚仪及光纤光栅应变传感器, 实时采集腐蚀速率、剩余壁厚及结构应力等核心数据; 在次要部位, 则采用涂层测厚仪、涡流检测仪等便携式检测设备开展定期巡检工作, 确保监测范围覆盖整个钢结构。所有监测数据需通过无线传输模块上传至中央管理平台, 经数据清洗、算法剔除异常数据后, 运用机器学习模型分析腐蚀发展趋势, 生成动态腐蚀风险图谱; 管理人员可依据风险图谱划分高、中、低风险区域, 对高风险区域实施加密监测, 对低风险区域调整为季度监测, 实现监测资源的优化配置。

2. 评估分析与修复

腐蚀损伤评估工作需结合损伤类型、损伤深度及损伤位置划分分级标准, 此过程中需构建三维评估模型: 首先通过超声波测厚仪测量腐蚀区域的剩余壁厚, 计算壁厚减薄率; 随后采用涡流检测技术评估腐蚀坑的几何尺寸, 判断是否形成穿透性缺陷; 最后结合有限元分析软件, 模拟腐蚀损伤对结构承载力的影响, 最终确定损伤等级。修复工作需严格依据损伤等级匹配对应的修复方案: 一级损伤采用表面清理后补涂防腐涂层的处理方式; 二级损伤需将腐蚀区域打磨至母材后, 焊接补强板进行加固; 三级损伤则需切割并更换受损构件; 所有修复方案均需经结构工程师审核通过后方可组织实施。

四、案例分析

本案例为沿海某大型公共建筑工程, 该工程钢结构总量达 8000 余吨, 主要应用于主体框架、屋面支撑体系及幕墙龙骨等关键部位。工程所在地属于亚热带海洋性气候, 常年受高盐雾、高湿度环境影响, 经专业检测该区域环境腐蚀性等级为 C5-M 级, 盐雾浓度日均达 $0.05\text{mg}/\text{m}^3$, 日均相对湿度为 82%, 污染物以氯离子、二氧化硫为主, 对钢结构腐蚀性极强。工程建设单位联合设计单位、施工单位及运维单位组建专项管理团队, 严格遵循全生命周期覆盖、预防为主防治结合、环境适应性及经济合理性原则, 开展钢结构腐蚀全流程管控

工作。

(一) 材料选型精准匹配环境需求

相关单位组织专业检测团队对工程所在地沿海区域开展环境参数系统监测,通过采集盐雾浓度、空气湿度、污染物种类及含量、温度波动范围等核心指标构建环境评估体系,最终确定该区域环境腐蚀性等级为 C5-M 级。基于此评估结果,专项管理团队构建材料性能与环境等级匹配矩阵,明确主体框架钢结构选用 Q355NH 耐候钢,屋面支撑体系及幕墙龙骨选用 316L 不锈钢,防腐涂层选用氟碳涂料配套环氧底漆的复合涂层体系。相关单位严格审核材料供应商的生产资质证书、产品质量检测报告及耐腐蚀性能试验报告,重点核查 Q355NH 耐候钢的化学成分中铜、磷等耐蚀元素含量是否符合 GB/T 4171-2008 标准要求,316L 不锈钢的铬、镍元素含量是否满足 GB/T 3280-2015 标准规定。审核通过后,管理团队建立完善的材料追溯体系,为每一批次钢材粘贴唯一追溯二维码,详细记录材料来源产地、生产批次、化学成分检测数据及耐腐蚀性能试验结果,确保材料质量可追溯可核查。

(二) 防腐施工精细化质量控制

喷涂作业前,施工人员采用无油压缩空气对钢材表面进行吹扫,清除浮尘杂质,再用蘸取专用溶剂的纱布擦拭表面,进一步去除残留油污。喷涂施工时,操作人员严格按照施工手册要求控制喷枪压力在 0.3-0.5MPa,喷涂距离保持在 200-300mm,移动速度均匀控制在 300-500mm/s,确保涂层均匀覆盖无漏涂、流挂现象。每道涂层施工完成后,检测人员立即使用湿膜厚度梳在涂层表面选取 15 个点位进行检测,若发现某点位湿膜厚度未达到设计要求,立即标记该区域并进行补涂处理,补涂后重新检测直至合格。涂层完全固化后,采用干膜测厚仪进行厚度复核,在钢材表面随机选取 10 个点位测量,确保干膜总厚度偏差不超过 10%。同时,质量检测人员对涂层表面进行全面目视检查,重点核查是否存在针孔、裂纹、起泡等缺陷,对发现的 2 处针孔缺陷区域进行标记,安排专业人员打磨去除缺陷涂层后重新进行喷涂,所有施工工序完成后形成质量控制闭环资料,经监理单位审核通过后方可进入下一道安装工序。

(三) 分级动态腐蚀监测体系运行

运维单位依据钢结构焊缝节点、涂层破损高发区、受力关键部位等分布情况,构建三级腐蚀监测网络。在主体框架焊缝节点、屋面支撑体系连接处等 15 个高风险部位,永久部

署电化学腐蚀速率传感器、超声波测厚仪及光纤光栅应变传感器,实时采集腐蚀速率、剩余壁厚及结构应力数据;在幕墙龙骨等 20 个中风险部位,每月采用涂层测厚仪开展一次厚度检测;在次要受力构件等低风险区域,每季度采用涡流检测仪进行一次腐蚀缺陷巡检。

当监测数据显示某主体框架焊缝节点区域腐蚀速率异常升高时,运维单位立即组织专业评估团队开展损伤评估工作。评估人员首先使用超声波测厚仪测量该区域钢材剩余壁厚,计算得出壁厚减薄率为 8%;随后采用涡流检测技术检测腐蚀坑几何尺寸,确认未形成穿透性缺陷;最后运用有限元分析软件建立该区域结构力学模型,模拟腐蚀损伤对结构承载力的影响,最终确定该区域损伤等级为一级。依据损伤等级,评估团队制定表面清理后补涂防腐涂层的修复方案,方案经结构工程师审核通过后,施工人员立即开展修复工作:先采用角磨机对腐蚀区域进行打磨,去除腐蚀产物及破损涂层,打磨至母材露出金属光泽后,用无油压缩空气吹扫干净,再按照原施工标准依次涂刷底漆、面漆,修复完成后再次使用超声波测厚仪和涂层测厚仪检测,确保修复质量符合要求。后续监测数据显示该区域腐蚀速率恢复正常范围,修复效果达到预期。

五、结束语

总体来说,研究表明,源头把控材料质量、施工阶段精细化管控、运维阶段动态监测与精准修复的闭环模式,能够有效破解腐蚀管控难题。工程实践进一步证实,基于环境适应性的差异化策略与分级监测体系,可显著提升管控针对性与有效性。

[参考文献]

- [1] 臧芃乔. 某盐浴炉车间腐蚀及不均匀沉降问题应对策略 [J]. 现代盐化工, 2025, 52 (04): 112-114. DOI: 10.19465/j.cnki.2095-9710.2025.04.048.
- [2] 任娟. 公路桥梁钢结构的腐蚀监测与防护技术研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24 (14): 91-93. DOI: 10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2025.14.031.
- [3] 张峰. 钢结构防火涂料在石油化工装置中的应用 [J]. 天津化工, 2025, 39 (04): 160-163.
- [4] 邹正. 基于深度学习的钢结构锈蚀种类检测方法研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24 (12): 4-6. DOI: 10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2025.12.002.