



钢结构防腐技术在自动化码头工程中的应用

丁志全，陈红兵，刘观发，廖振宇，潘长卿

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司，广东 广州 510290)

摘要：钢结构腐蚀问题一直以来是近海港区钢结构设计难点，目前国内针对近海港区钢结构防腐的应用研究较少。本文基于钦州大榄坪某自动化集装箱码头改造项目，对近海港区工业钢结构常用的防腐技术进行研究，分析了各种钢结构防腐技术的防腐原理、性能差异、防腐效果以及适用场景，并结合本项目进行涂料防腐体系的经济技术对比，提出了符合近海港区钢结构防腐设计的技术方案和施工维护要求。通过项目实施证明该防腐方案效果较好，为类似项目提供了参考。

关键词：钢结构；防腐；自动化集装箱码头；海洋环境

中图分类号：U 652；TU 375

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)10-0094-05

Application of anti-corrosion technology of steel structure in automated terminal project

DING Zhi-quan, CHEN Hong-bin, LIU Guan-fa, LIAO Zhen-yu, PAN Chang-qing

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: Corrosion of steel structure has always been a difficulty in the design of steel structures in offshore port areas. At present, there are few systematic studies on the anti-corrosion application of steel structures in offshore port area. Based on the reconstruction project of a automated container terminal in Dalianping, Qinzhou, this paper studies the common anti-corrosion technologies of steel structures near the port area, and analyzes the anti-corrosion principles, performance differences, anti-corrosion effects and applicable scenarios of various steel structure anti-corrosion technologies. Moreover, combined with the project, the economic and technical comparison of the coating anti-corrosion system is carried out, the technical scheme most in line with the anti-corrosion design for main steel structures near the harbor area is put forward. Through the implementation verification of the project, it is found that the adopted anti-corrosion design scheme has a good effect, which provides a reference for similar projects.

Keywords: steel structure; anti-corrosion; automated container terminal; marine environment

钢结构轻质高强，具备良好的塑性变形能力以及冲击韧性，易于装配式施工和回收，是一种环境友好和应用广泛的建筑材料。但长期以来钢材存在腐蚀问题，易于在空气和潮湿环境下腐蚀，尤其在海洋大气环境中的钢结构更易产生严重的腐蚀，进而导致钢结构截面削弱等不利影响，给结构安全埋下重大隐患。钢材腐蚀严重威胁到了建筑安全，在设计阶段对钢结构进行防腐设计能提高钢结构的耐久性。为了满足沿海地区钢结构防腐设计要求，本文以钦州大榄坪某集装箱自动

化码头改造项目的钢结构防腐设计为例，对港区钢结构防腐技术应用进行研究。

1 项目概况

钦州大榄坪某集装箱自动化码头改造项目是广西打造的“千万标箱”港口，也是国际陆海贸易新通道关键节点的重要组成部分。该项目位于我国南方沿海地区的钦州湾内，地处亚洲东南部季风区，属亚热带季风海洋气候。该地区夏季空气湿润，冬季空气干燥，并且夏季时间较长，冬

季气温也较高, 降雨量丰富。该项目处于中等含盐量的海边地区室外环境, 腐蚀环境分类为 C3 或 C4^[1]。项目的钢结构单体包括灯塔、冷藏箱架、厂房、通讯塔和闸口等建构筑物, 材质均为普通钢, 主要钢结构防腐处理表面积约为 1.0 万 m², 见表 1。

表 1 项目钢结构建构筑物情况

单体名称	数量	钢结构表面积/m ²
灯塔	25	2 500
冷藏箱架	30	3 000
厂房	2	3 500
通讯塔	6	550
闸口	2	450
合计		10 000

2 钢结构防腐方法

2.1 耐候钢

耐候钢是在普通钢中添加少量微量元素, 在钢材表面形成一道致密的保护膜, 该保护膜与钢结构表面黏附性好, 可以阻止大气中氧气和水渗入钢材基体, 阻碍锈蚀向内扩散和发展, 减缓腐蚀速度, 使钢材的耐腐蚀性能大大提高。WANG 等^[2]采用失重法测定了海洋环境中含不同添加微量元素低合金钢的腐蚀速率, 结果发现添加不同微量元素的合金钢腐蚀速率不同, 对钢材的耐腐蚀性能有显著改善。耐候钢主要用于长期暴露在腐蚀环境中的工业项目钢结构, 其性能优越、应用广泛, 但由于造价高和施工维护复杂等缺点, 对大面积钢结构防腐工程而言具有一定局限性。

2.2 热镀锌

热镀锌防腐原理是让钢构件与锌液接触溶解, 在钢材表面形成铁锌合金镀层, 起到防腐作用。

在热镀锌防腐时, 镀层中的金属间化合物镀层的性能可以通过在锌浴中添加不同的合金元素来改变^[3]。热镀锌具有如下优点: 首先, 热镀锌厚度较厚, 锌层厚度约为电镀锌的 4 倍^[4]; 其次, 热镀锌附着能力强, 容易覆盖全部钢构件表面; 再次, 热镀锌液具有较好的流动性, 对于难以处理的防腐死角, 热镀锌基本可以全面覆盖; 最后, 热镀锌具有较好的耐碰撞性能, 即使受到外力碰撞脱落, 由于锌的腐蚀电位低于钢材, 可以牺牲破坏区域的锌层来抵挡腐蚀, 从而达到钢材防腐目的。但热镀锌也存在一定缺点: 有一定的污染性, 造价相对较高, 后续维护困难等。

2.3 涂料防腐

目前, 防腐涂料产品总的发展趋势需要遵循无公害、无污染、经济高效和节约能源的原则, 其中包括常规防腐涂料和重防腐涂料, 可应用于不同的腐蚀环境^[5]。相比于耐候钢和热镀锌, 油漆防腐具有造价低、易修复和施工简单等特点, 目前在工业钢结构中大量采用。油漆防腐主要内容包括防腐涂料不同层组分和防腐涂料防腐期。

2.3.1 防腐涂料不同层组分

根据涂层的不同位置, 钢结构防腐涂层可以分为底漆、中间漆和面漆。其中, 底漆要具有耐腐蚀性和屏蔽性, 且在基层上附着性较好, 常见的底漆有环氧富锌漆、聚氨酯漆和醇酸漆等; 中间漆应具有填充性和修复底漆作用, 其位于底漆与面漆之间, 常见的中间漆种类有环氧云铁中间漆和聚氨酯中间漆等; 面漆与外界直接接触, 具有抵抗外界腐蚀和增加建筑美观的效果, 常见的面漆种类有氟碳面漆和丙烯酸聚氨酯面漆等, 防腐涂料不同层组分见表 2。

表 2 防腐涂料不同层组分

防腐涂层	醇酸底漆	环氧富锌底漆	聚氨酯底漆	聚氨酯中间漆	环氧云铁中间漆	氟碳面漆	丙烯酸聚氨酯面漆
主要组分	醇酸树脂	环氧树脂	聚氨酯树脂	脂肪酸树脂	环氧树脂	特种树脂	丙烯酸树脂
	防锈颜料	锌粉	耐磨防腐颜料	丙烯酸	聚酰胺树脂	氟碳树脂	脂肪族异氰酸酯
	铁红	硅酸乙酯		异氰酸酯	云母氧化铁	成膜物质	

2.3.2 防腐涂料防腐期

根据 ISO12944, 低碳钢的质量和厚度在不同

腐蚀环境下的损失见表 3。由表可知, 在没有防腐措施情况下, 钢材随着腐蚀环境变化, 厚度损失

严重。王承伟等^[6]指出针对海洋腐蚀环境 C3、C4, 涂料的预期使用寿命受涂料体系、钢材表面

处理等级、涂层厚度、涂装质量和腐蚀环境等因素影响, 见表 4。

表 3 低碳钢的质量和厚度损失

腐蚀环境类别	厚度损失/($\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$)	质量损失/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	典型室外环境
C1	≤ 1.3	≤ 10	-
C2	1.3~2.5	10~200	低污染环境, 如乡村环境
C3	25~50	200~400	有轻微的二氧化硫污染的工业环境, 以及含盐量低的海边环境
C4	50~80	400~650	含盐量中等的海边环境
C5I	80~200	650~1 500	侵蚀性强和湿度高的工业区
C5M	80~200	650~1 500	含盐量高的海滨和海洋环境

表 4 不同环境下不同防腐涂层使用寿命

腐蚀环境类别	表面处理等级	底漆种类	底漆厚度/ μm	面漆种类(含中间漆)	面漆厚度/ μm	涂层总厚度/ μm	防腐期/a
C3	St2	醇酸防锈漆	80	醇酸漆	80	160	1~3
	Sa2.5	醇酸防锈漆	80	醇酸漆	80	160	2~5
	Sa2.5	醇酸防锈漆	80	醇酸漆	120	200	≥ 5
C4	St2.5	醇酸防锈漆	80	醇酸漆	120	200	2~5
	Sa2.5	环氧富锌漆	40	环氧/聚氨酯漆	160	200	5~15
	Sa2.5	环氧富锌漆	40	环氧/聚氨酯漆	200	240	≥ 15

由表 4 可知: 在 C3 和 C4 环境类别下, 虽然涂料种类、涂层厚度相同, 但钢结构表面处理等级不同, 使得涂层具有不同的使用寿命期限; 同时, 防腐使用寿命期限的长短主要受涂层厚度的影响。

2.4 防腐方案选择

如前文所述, 耐候钢具有造价高和施工维护复杂等缺点, 对大体量钢结构防腐工程具有一定局限性。热镀锌主要缺点为有一定的污染性、造价相对较高、后续维护困难等。涂料防腐能适应各类腐蚀环境, 具有造价低、易修复和施工简单等特点。因此, 根据本项目特点, 对大面积钢结构选取涂料防腐方法。

3 涂料防腐设计

3.1 设计流程

涂料防腐设计流程的确定, 首先应根据构件重要程度和腐蚀环境类别确定构件设计使用寿命和设计要求等因素; 然后选择防腐涂料涂层工艺、涂层体系和涂层厚度; 最后确定防护方法, 并进行经济技术比选, 选出最佳防护方法。具体涂料防腐设计流程见图 1。

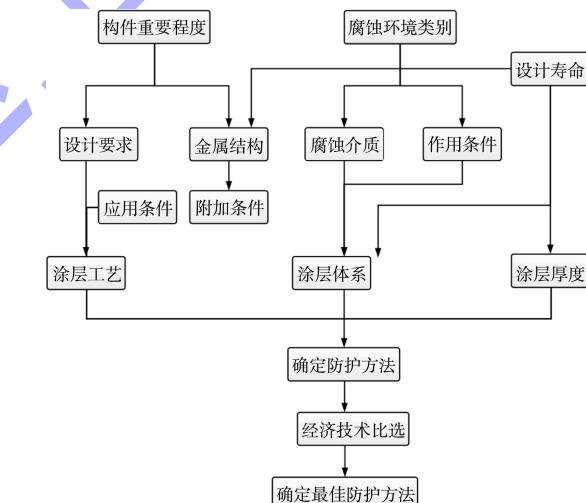


图 1 涂料防腐设计流程

3.2 经济技术比选

不同涂层材料的性能和市场参考价格见表 5; 3 种不同体系(常规体系、高性能体系和超高性能体系)对应的涂装方案见表 6; 3 种方案的防腐施工费用对比见表 7, 根据相关研究^[7], 方案 1 的材料损耗系数取 1.2, 方案 2、3 取 1.5; 本工程钢材约有 1.0 万 m^2 施工面积, 计算节约的工程费用见表 8。

表 5 涂料性能对比

涂料名称	机械性能	耐化学耐工业大气	耐湿热性	耐盐雾性	耐候性	保光性 保色性	固含量	市场价平均值 /(元·kg ⁻¹)
醇酸底漆	初期好	差	一般	一般	差	差	中	15
醇酸面漆	中后期差							18
环氧富锌底漆	优	好	优	优	-	-	高	25
环氧云铁防锈漆	优	好	优	优	-	-	高	24
聚氨酯面漆	优	优	优	优	优	优	中	65
FEVE 氟碳涂料	优	优	优	优	优	优	中	110

表 6 涂装方案

方案	体系	类别	涂料品种	涂装道数	干膜厚度/μm	理论用量/(g·m ⁻²)	防腐年限/a	维修间隔/a
1	常规体系	面漆	醇酸漆	2	100	280	2~3	2
		底漆	醇酸铁红漆		100	250		
2	高性能体系	面漆	聚氨酯漆	1	50	125	10~15	10
		中间漆	环氧云铁漆		100	220		
		底漆	环氧富锌漆		50	200		
3	超高性能体系	面漆	氟碳漆	1	50	125	20~25	20
		中间漆	环氧云铁漆		100	200		
		底漆	环氧富锌漆		50	200		

表 7 3 种方案防腐施工费用对比 元/m²

涂装方案	除锈费用	涂料费	人工费	合计
1	3.5	10.548	4	18.048
2	4.5	27.608	6	38.108
3	4.5	36.045	6	46.545

表 8 3 种方案工程费用对比

使用时间/a	施工工程费/万元			节约费用/万元	
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1-方案 2	方案 3-方案 2
2	18.048	38.108	46.545	-20.060	8.437
4	36.096	38.108	46.545	-2.012	8.437
6	54.144	38.108	46.545	16.036	8.437
8	72.192	38.108	46.545	34.084	8.437
10	90.240	38.108	46.545	52.132	8.437
14	126.336	76.216	46.545	50.120	-29.671
16	144.384	76.216	46.545	68.168	-29.671
20	180.480	76.216	46.545	104.264	-29.671

本工程主要承重构件防腐涂层系统设计使用年限为 10 a, 以表中各方案 10 a 的使用寿命对比, 方案 2 的施工工程费最低, 相比于方案 1 节约工程费 52.132 万元, 相比于方案 3 节约工程费 8.437 万元; 从工程费用、防腐效果、施工方便程度以及环境保护等方面综合考虑, 本工程最终采用高性能体系方案 2。

3.3 防腐涂层方案

本工程主要钢结构的防腐涂层设计使用年限

为 10 a。根据 GB/T 50046—2018《工业建筑防腐蚀设计标准》^[8] 对方案 2 的涂层厚度进行细化, 采用了 3 种不同的涂装方案, 分别为 2A、2B 和 2C, 见表 9。

表 9 防腐涂层方案

方案	环氧富锌漆 底漆厚/μm	环氧云铁漆 中间漆厚/μm	聚氨酯漆 面漆厚/μm	总干漆 膜厚/μm
2A	50	100	50	200
2B	50	150	80	280
2C	75	150	100	325

在保证达到防腐年限的前提下, 根据不同构件的重要等级程度选取不同的防腐方案, 具有施工简单、造价优化和维护方便等优点。针对港区工业钢结构的不同构件部位的重要程度, 采用相匹配的防腐方案, 见表 10。

表 10 构件防腐方案选用

构件	方案 2A	方案 2B	方案 2C	除锈等级
钢柱	-	√	-	Sa2.5
钢梁	-	√	-	Sa2.5
抗风柱	-	√	-	Sa2.5
柱间支撑	-	-	√	Sa2.5
联系梁	-	-	√	Sa2.5
屋面支撑	-	-	√	Sa2.5
型钢墙梁	-	-	√	Sa2.5
节点板	√	-	-	Sa2.5

3.4 防腐涂层施工和维护

钢结构表面采用喷砂除锈处理，该处理方法可以将钢结构表面的锈层和污垢清除，而且可以增加防腐涂料底漆与钢结构表面的黏聚力，避免防腐涂层因外界物理作用脱落，延长防腐涂层的使用寿命；然后依次进行底漆、中间漆和面漆施工，每一道工序施工结束后需要进行质量验收，验收不合格的不允许进行下一道工序；施工结束后应对完成涂装的钢结构进行保护，特别是近海港区迎风部位，要防止钢结构涂层表面形成盐液和结露；对后续施工造成的防腐涂层破坏要及时修补。通过后续施工质量检测，防腐涂层施工质量满足设计要求，从项目完工使用情况来看，防腐效果良好。

4 结论

1)相比耐候钢和热镀锌防腐，油漆防腐具有造价低、易修复和施工简单等特点，在港区工业钢结构大面积防腐中应用广泛。

2)针对近海港区环境，通过不同防腐涂层工程费用的经济性对比，确定了高性能防腐体系方案，该方案既能保证防腐效果，又能节约防腐费用。

3)针对港区钢结构的不同构件重要程度，选取对应的除锈等级和涂装方案，实际应用效果较好。

(上接第 84 页)

3)广州南沙四期和大榄坪自动化集装箱码头冷藏箱堆场均采用箱底式通道进行插拔电源作业，根据堆场布局不同分别采用电子锁闭和隔离围网两种方式进出箱区。

4)自动化集装箱码头的辅助工艺流程具有定制化和个性化的特点，应结合总体布局、工艺设备和配套基础设施等进行设计。

参考文献：

- [1] 程泽坤, 何继红, 刘广红. 自动化集装箱码头设计与实践[M]. 上海: 上海浦江教育出版社, 2019.

4)通过施工质量控制和施工保护措施能有效地提高防腐涂层施工质量，保证涂层设计使用寿命和防腐效果。

参考文献：

- [1] International Organization for Standardization. Paints and varnishes-Corrosion protection of steel structures by protective paint systems[S]. London: British Standard Institution, 1999.
- [2] WANG X T, DUAN J Z, ZHANG J, et al. Alloy elements' effect on anti-corrosion performance of low alloy steels in different sea zones[J]. Material letter, 2008, 62(8/9): 1291-1293.
- [3] 袁鹏园, 冯立明, 刘宇, 等. 我国海洋环境中钢结构件防腐研究进展[J]. 山东建筑大学学报, 2019, 34(3): 68-73.
- [4] 孙澜曦, 白玉星. 钢结构防腐方法研究[J]. 全面腐蚀控制, 2020, 34(5): 75-78.
- [5] 邓桂芳. 防腐涂料发展趋势分析[J]. 化学工业, 2015, 33(Z1): 28-32, 37.
- [6] 王承伟, 周晓红, 杨一沫. 钢结构的腐蚀与防护[J]. 上海涂料, 2014, 52(4): 53-55.
- [7] 许君栋, 夏范武, 王书林. 钢结构防腐与氟碳涂料[J]. 涂料技术与文摘, 2007(8): 14-19.
- [8] 中国寰球工程有限公司. 工业建筑防腐蚀设计标准: GB/T 50046—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.

(本文编辑 王传瑜)

- [2] 梁浩, 吴邵强. 广州港南沙四期自动化集装箱码头新型装卸工艺系统设计[J]. 港口装卸, 2020(3): 55-58.
- [3] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 钦州港大榄坪港区大榄坪南作业区 7#、8#泊位集装箱自动化改造工程初步设计[R]. 广州: 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 2019.
- [4] 孙金余. 自动化集装箱码头堆场冷藏箱区安全管控技术措施[J]. 集装箱化, 2019, 30(4): 1-3.
- [5] 韩保爽, 罗勋杰, 乔其斌, 等. 自动化集装箱码头智能闸口布置[J]. 水运工程, 2016(9): 40-45.

(本文编辑 王璁)