

港口机械钢结构密封箱体内部涂装工艺研究及应用

张士振¹, 孙 华¹, 程 清¹, 盛瑞君², 徐鸿书², 许海涛², 颜世峰²

(1.山东陆海装备集团青岛有限公司, 山东 青岛 266011; 2.山东陆海装备集团青岛有限公司, 山东 青岛 266011)

摘要: 本文深入探讨了港口机械密封箱体内部涂装工艺的优化路径, 全方位剖析了传统涂装工艺的繁琐流程、成本负担及潜在风险。通过创新性地引入简化的涂装工艺, 不仅显著提升了作业安全系数, 还大幅压缩了生产周期, 实现了经济效益的稳步增长。经严谨的实验室模拟测试与实地应用验证, 新工艺在防腐性能上表现卓越, 完全满足港口机械的苛刻使用标准。此外, 该工艺革新完美契合国家大力倡导的绿色低碳发展战略, 在同行业及类似结构领域具有极强的示范引领效应, 为行业可持续发展开辟了新航道, 对推动整个港口机械行业绿色转型具有深远意义。

关键词: 港口机械; 密封箱体; 简化涂装; 盐雾试验; 绿色低碳

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2025)09-0023-04

Research and Application of Internal Coating Process of Steel Structure Sealed Box of Port Machinery

ZHANG Shi-zhen¹, SUN Hua¹, CHENG Qing¹, SHENG Rui-jun², XU Hong-shu², XU Hai-tao², YAN Shi-feng²

(1. Qingdao Branch of Shandong Land and Sea Equipment Group Co., Ltd., Qingdao 266011, Shandong, China;

2. Shandong Land and Sea Equipment Group Co., Ltd., Qingdao 266011, Shandong, China)

Abstract: This paper delves into the optimization pathways for the internal coating process of sealed box bodies in port machinery, providing a comprehensive analysis of the cumbersome procedures, cost burdens, and potential risks associated with traditional coating methods. By innovatively introducing a simplified coating process, it has not only significantly enhanced operational safety but also greatly shortened the production cycle, leading to steady growth in economic benefits. Rigorous laboratory simulation tests and practical field application verifications demonstrate that the new process exhibits outstanding anti-corrosion performance, fully meeting the stringent operational standards of port machinery. Furthermore, this process innovation perfectly aligns with the national strategy advocating for green and low-carbon development. It holds a strong exemplary and leading role within the industry and for similar structural applications, paving a new path for sustainable development in the sector. This advancement carries profound significance for promoting the green transformation of the entire port machinery industry.

Key words: port machinery; sealed box body; simplified coating; salt spray test; green and low-carbon

0 引言

港口机械作为港口海陆物流运输的关键中枢设备, 在全球贸易体系中扮演着不可或缺的角色。它们

广泛分布于海边港口等区域, 所处环境基本上属于中高盐度的沿海地区或海上地区, 且要求 20 年左右的使用寿命^[1]。这些机械要求的防腐体系属于重防腐配套体系, 涂料耗量较大, 施工工期较长, 每道油漆的价格也十分高昂。为了在激烈的市场竞争中占据优势, 同时满足客户对高质量、低成本和短工期的综合要求, 必须对其中的各种机械部件进行甄别, 使用不同的配套, 以达到既保证大机的防腐蚀质量又能提高生产效率, 兼

收稿日期: 2024-11-09

作者简介: 张士振(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事港口机械设备的重防腐研究应用工作。E-mail: zhangshizhen6666@126.com。

顾经济效益的目的。港口机械内部存在大量密封箱体,形状多样、大小不一,通常焊接封闭后终生不再开启。大或长的箱体需充入氮气或惰性气体进行气密试验后封焊。此设计提高了稳定性和可靠性,降低了维护成本,但传统涂装工艺繁琐、成本高、周期长且有安全风险,影响生产效率和经济效益,阻碍行业可持续发展,故优化创新密封箱体内部涂装工艺刻不容缓。

1 港口机械的相关腐蚀因素

1.1 腐蚀机理

腐蚀按机理分为4类:化学腐蚀是金属在高温气体中氧化及在非电解质溶液中的腐蚀;电化学腐蚀是金属向溶液释放电子,阳离子在溶液中获电子还原;物理腐蚀是金属在高温熔盐、熔碱、液态金属中因物理溶解而破坏;生物腐蚀是生物通过生命活动对金属造成机械破坏或产生酸性、含盐离子液体引发的化学破坏。

港口机械中,化学腐蚀表现为金属表面与氧气、水蒸气反应生成氧化层,使性能下降。电化学腐蚀则涉及金属与电解质溶液间的电化学反应,更复杂。在港口机械中,碳钢是最常用的材料之一,其在与海水接触时会发生电池腐蚀反应:电极电位较低的区域—阳极区(如铁素体相) $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$,电极电位较高的区域—阴极区(如渗碳体相) $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ 。这种电化学腐蚀会导致金属的快速损耗,尤其是在海洋环境中,海水中富含的氯离子会加速腐蚀进程。

1.2 大机产品工况环境

港机产品大部分处于港口岸边,横向位置距离岸边5~10 m,纵向方向处于大气区和飞溅区^[1]。按照腐蚀机制,存在化学腐蚀和电化学腐蚀等;按照腐蚀环境分类,受大气腐蚀、海水腐蚀、生物腐蚀等影响;按照具体的影响因素,则包括 O_2 、 H_2O 、 CO_2 、 SO_2 、含Cl的海水溶液、海水溶氧量、海水pH、温度变化等^[3]。

为了更直观地理解这些腐蚀因素对港口机械的影响,以下是具体的腐蚀反应示例。

碳钢在与海水接触时发生的电池腐蚀反应:阳极反应(氧化反应) $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$;阴极反应(还原反应) $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ 。在这个过程中,铁原子在阳极区失去电子,被氧化成 Fe^{2+} 离子进入溶液,而氧气在阴极区获得电子,与水反应生成氢氧根离子。随着反应的进行,金属铁不断损耗,导致结构的腐蚀和弱化。此外,海水中的氯离子会与氢氧根离子结合,形成氯化物,进一步促进腐蚀反应的进行。

对于密封部件,在生产制造过程中,受到的主要影响是车间内的大气环境,而此大气环境中对碳钢母材影响较大的因素为温度与湿度的综合作用,还包括二氧化硫及氯化物的浓度水平^[3]。根据GB/T 19292.1—2018

标准,评判大气腐蚀,包含三个方面,分别为空气中二氧化硫含量、氯离子含量以及湿润的时间。

密封部件成品后,较大的密封件内部充满了惰性气体或氮气;较小的密封件内部是生产制造时残留的空气;外部均已按照规范涂刷了三层油漆。这种涂装方式虽然能够在一定程度上防止腐蚀,但也存在诸多问题,如涂装成本高、施工周期长、环境污染大等。因此,探索一种高效、环保、经济的涂装工艺对于港口机械的制造和维护具有重要意义。

在实际生产中,传统的涂装工艺需要对密封箱体的内外表面进行全面的表面处理和多层涂装,这不仅增加了生产成本^[4]和时间,还可能对环境造成污染。涂装过程中使用的有机溶剂会挥发到空气中,形成挥发性有机化合物(VOC),对环境和人体健康造成危害。此外,涂装过程中的废弃物处理也需要投入大量的资源和资金。因此,如何在保证防腐性能的前提下,优化涂装工艺,降低生产成本和环境影响,成了港口机械行业亟待解决的问题。

基于此,本文提出密封箱体内部涂装简化工艺,经理论及试验验证可行性。该工艺减少工序,降低成本与环境负担,防腐性能达标,有利于推动港口机械行业绿色低碳发展。

2 密封箱体的涂装简化工艺

2.1 传统的相关工艺

根据港口机械产品未来工作时所处的腐蚀环境等级^[5],与客户沟通后,设计不同的配套体系以隔绝上述腐蚀因素对港机的腐蚀,延长使用寿命。底漆一般采用环氧富锌底漆,膜厚要求 $60 \mu\text{m}$ 以上;中间漆为环氧云铁中间漆,一般厚度为 $100 \sim 150 \mu\text{m}$,面漆则根据客户要求使用聚氨酯面漆或者是四氟氟碳面漆 $60 \sim 100 \mu\text{m}$;总膜厚在 $270 \mu\text{m}$ 以上^[6]。此外,车间底漆作为临时性防腐底漆,一般喷涂 $20 \sim 40 \mu\text{m}$ 之间,在涂装环氧底漆前要求全部打掉,要求至少达到ISO 8501-1标准中的Sa2.5标准。

传统的管状钢构件,由于直径偏小,内部没有进行打砂、涂装,经过20多年的使用,没有用户反馈过内部锈蚀的问题^[7]。这表明在某些特定情况下,过度的涂装工艺实际上是不必要的,反而可能增加成本和风险。

对于密封箱体,传统上要求内部打砂达到瑞典工业标准SIS要求的Sa2.5标准或打磨至St2.5标准后^[8]涂刷环氧富锌漆底漆 $60 \sim 70 \mu\text{m}$,待底漆干燥后再拉毛,涂刷环氧云铁中间漆 $80 \sim 100 \mu\text{m}$;中间漆涂刷后需要静置至少2 d,待油漆中的溶剂挥发干净后才能进行下一步的焊接封盖工作,原因是油漆中含有二甲苯、酯类、酮类、醚类等沸点较低的有机溶剂,这些溶剂

易燃、易挥发,在没有完全挥发掉的情况下封盖焊接,会产生爆炸^[9]。

在实际操作中,传统的涂装工艺存在以下问题。成本高:多层涂装需要大量的涂料和人工,增加了生产成本。周期长:每层涂装之间需要干燥和固化时间,延长了生产周期。安全风险高:油漆中的有机溶剂易燃易爆,存在安全隐患。环境污染严重:涂料和溶剂的挥发对环境造成污染,不符合绿色发展的要求。

2.2 箱体内部简化涂装工艺

对于完全密闭的结构件内表面,不再进行额外的表面处理(如打磨、冲砂、涂层修补等),但箱体密封前须确保内部清洁、干燥。对于需要气密性试验的密闭箱体,按图纸要求灌充氮气或惰性气体进行试验。

该工艺基于密封箱体内部的稳定微环境:四面满焊封箱后,内部与外界隔离,限制了腐蚀介质(如水分、氧气、二氧化碳)的进出,从而抑制腐蚀反应。此外,制造过程中已对金属表面进行车间底漆喷涂等处理,提供了一定的防腐保护。因此,简化内部涂装工艺可减少工序,降低成本和环境影响,消除传统工艺中的安全隐患(如油漆溶剂挥发引起的爆炸风险)。

实施该工艺需严格控制以下环节:制造过程中彻底清洁和干燥箱体内部,确保无杂质和水分残留;气密性试验后可靠封焊充气口,确保密封性。该工艺能满足密封箱体的防腐要求,提高生产效率和经济效益,已获多家客户认可。

3 相关验证

3.1 理论验证

密闭的箱体,在密封前要求内部清洁、干燥;密封后,无空气进出流动,无液体积存,无其他金属与金属母材接触,也不存在可见的生物活动,因此,可以避免金属母材内部腐蚀大面积重度发生。

较小体积密封箱体封盖时,残留空气会轻微腐蚀部分裸露金属区,其余区域因车间底漆保护,可阻隔残留气体与金属接触。空气中起到腐蚀作用的因素主要是水、氧气、二氧化碳,在干燥空气环境内,部分金属裸露的表面形成不可见的保护性氧化膜(1~10 nm)和失去光泽现象^[10]。

密封箱体内部腐蚀主要因空气中的水分、氧气、二氧化碳等介质与金属表面发生化学或电化学反应。干燥环境可降低反应速率,依据相关标准和研究,可理论评估其腐蚀情况。

根据 GB/T 19292.1—2018 标准,评判大气腐蚀,包含三个方面,分别为空气中二氧化硫含量、氯离子含量以及湿润的时间。在密封箱体内部,由于空气无法自由流通,湿度相对较低,二氧化硫和氯离子的含量也较

低,因此腐蚀环境较为温和。

此外,根据 ISO 9223:2012 标准,小密封箱体内部处于很低的腐蚀环境,因无空气、水分的流通,实际比 C1 环境还要低。这意味着在密封箱体内部,金属材料的腐蚀速率会显著低于普通的大气环境。

在 NACE RP0775-2005 中规定轻度腐蚀,裸露碳钢平均腐蚀速率为小于 0.025 mm/a。即使考虑到密封箱体内部存在微量的腐蚀,这种程度的腐蚀对金属结构的性能和寿命影响也非常有限^[11]。

3.2 残留空气存在的氧化

小密封箱体封盖后,即便有残留的空气,对密闭箱体内部钢材的腐蚀也相对较小,内壁上附着的车间底漆一般在 20~40 μm 厚度,车间底漆含有锌粉,起到牺牲阳极保护钢材母材的防腐蚀作用。

根据 ISO 9223:2012 标准,可知小密封箱体内部处于很低的腐蚀环境,因无空气、水分的流通,实际比 C1 环境还要低。

在 NACE RP0775-2005 中规定轻度腐蚀,裸露碳钢平均腐蚀速率为小于 0.025 mm/a,见表 1。

表 1 NACE RP0775-2005 中规定的腐蚀速率定性评价

腐蚀程度	平均腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)
轻度腐蚀	<0.025
中度腐蚀	0.025~0.12
重度腐蚀	0.13~0.25
严重腐蚀	>0.25

在干燥的空气中发生单纯的化学腐蚀,速度较慢;而在潮湿的空气中,钢铁表面形成电解质溶液而按照原电池原理发生电化学腐蚀,速度很快^[12]。

除 ISO 9223:2012 和 NACE RP0775-2005 标准外,还可以通过计算来获得腐蚀量^[13]。

1)根据 GB/T 19292.1—2018 标准,第一年内内部腐蚀失重的评估,碳钢腐蚀失重的剂量-响应函数: $r_{\text{cor}} = 1.77 \times P_{\text{d}}^{0.52} \times \exp(0.020 \times RH + f_{\text{sa}}) + 0.102 \times S_{\text{d}}^{0.62} \times \exp(0.033 \times RH + 0.040 \times T)$,其中: r_{cor} 为金属的第一年腐蚀速率,μm/a; T 为年平均温度,℃; RH 为年平均相对湿度,%; P_{d} 为年平均 SO₂ 沉积率,mg/(cm²·d); S_{d} 为年平均 Cl⁻ 沉积率,mg/(cm²·d); f_{sa} 为碳钢相关系数,当 $T \leq 10$ °C 时, $f_{\text{sa}} = 0.150 \times (T - 10)$,否则 $f_{\text{sa}} = -0.054 \times (T - 10)$ 。

根据某沿海地区年平均温度为 12.5 °C,相对湿度为 71%,年平均 SO₂ 沉积率为 1.184 mg/cm²,年平均 Cl⁻ 沉积率可为 0.098 8 mg/cm²,经计算可得: $r_{\text{cor}} = 2.892$ μm/a,属于极低的腐蚀性环境。

2)因钢材表面经过车间底漆喷涂,膜厚在 20~40 μm,因车间底漆的锌含量为 28%左右,即锌膜的厚度

可假设为 5.6~11.2 μm , 选用函数为: $r_{\text{corr}}=0.012 \times P_d^{0.44} \times \exp(0.046 \times RH + f_m) + 0.0175 \times S_d^{0.57} \times \exp(0.008 \times RH + 0.085 \times T)$, 其中: f_m 为锌相关系数, 当 $T \leq 10$ $^{\circ}\text{C}$ 时, $f_m = 0.038 \times (T - 10)$, 否则 $f_m = -0.071 \times (T - 10)$, 经计算可得 r_{corr} 为 0.029 4 $\mu\text{m/a}$ 。

3) 还可采用失重法测试金属不同周期腐蚀速率, 根据 GB/T 19292.4—2018 规定, 某种金属的腐蚀速率按下式计算: $r_{\text{corr}} = \Delta m / (A t)$, 其中: r_{corr} 为腐蚀速率, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; Δm 为样品失重, g ; A 为样品表面面积, m^2 ; t 为曝晒时间, a 。

4) 腐蚀速率也可用 r_{corr} 深度 ($\mu\text{m/a}$) 表示, 计算公式如下: $r_{\text{corr}} = \Delta m / (A \rho t)$, 其中: ρ 为样品密度, g/cm^3 (Fe 为 7.86); Δm 为样品失重, g ; A 为样品表面面积, m^2 ; t 为曝晒时间, a 。

3.3 试验验证

3.3.1 试验目的

对密封性构件进行内部腐蚀的检验, 要求构件内部不喷涂任何底漆, 打砂后焊接密封, 后经过 2 个月的盐雾试验, 解剖检查内部的腐蚀情况。中性盐雾试验 24 h 约等于自然环境 1 a, 醋酸盐雾试验 24 h 约等于自然环境 3 a^[14]。

3.3.2 理论及设计方法

1) 中性盐雾试验: 检测方法 ISO 9227:2022, 沉降盐液浓度 (50±5) g/L NaCl, 试验箱内温度 (35±2) $^{\circ}\text{C}$, 盐雾沉降率 (1.0~2.0) $\text{mL}/(80 \text{ cm}^2 \cdot \text{h})$, 沉降盐液 $\text{pH}=6.5\sim 7.2$, 暴露时间 1 440 h。

2) 醋酸盐雾试验: 检测方法 ISO 9227:2022, 沉降盐液浓度 (50±5) g/L NaCl, 试验箱内温度 (35±2) $^{\circ}\text{C}$, 盐雾沉降率 (1.0~2.0) $\text{mL}/(80 \text{ cm}^2 \cdot \text{h})$, 沉降盐液 $\text{pH}=3$, 暴露时间 1 440 h。

3) 设计思路: 利用中性盐雾试验和醋酸盐雾试验, 检查试验后内部的腐蚀情况。对比不同试验条件下密封箱体内部的腐蚀程度, 评估简化涂装工艺的有效性和可靠性。

4) 试验结果: 无论正方体密封件外表面是否涂装, 切割后内部均无腐蚀。

3.3.3 试验结果

外观等级参照 ISO 10289:1999, 按破坏面积评定: 无论箱体外部是否涂漆, 在中性盐雾试验 (60 d) 及醋酸盐雾试验 (60 d) 环境中, 试样内表面以及内表面焊道均未出现锈蚀, 效果达到 10 级。这一试验结果表明, 简化涂装工艺后的密封箱体在严酷的盐雾环境下仍然能够保持良好的耐腐蚀性能。这不仅验证了理论分析的正确性, 也为简化涂装工艺的实际应用提供了有力的依据。

4 结语

由以上可知, 对于密封箱体完全可以不用再进行内部涂装。这样每个密封箱体内部清洁后, 不再涂装, 至少可以减少 3 d 的涂装时间 (搬运、打砂/打磨、环氧富锌漆涂刷、打磨、涂刷中间漆、静置等待 2 d), 直接封盖; 大大提高了生产效率。全年在 50 多个项目上应用, 节约 370 多万元, 已取得了大多数客户和监理的一致同意。简化涂装工艺在港口机械制造中成效显著, 降低生产成本与能耗, 减少 VOC 排放, 契合绿色低碳政策, 同时提高生产安全性, 消除爆炸风险, 改善工人环境, 具有广泛推广应用价值。未来, 随着技术进步和环保要求提升, 该工艺有望在更多领域应用, 并期待更多企业和研究机构投入研究, 进一步优化完善, 助力绿色制造和可持续发展。

参考文献:

- [1] 宋世波. 浅谈港机设备防腐蚀涂装与保护[J]. 工程技术, 2021(2): 111-112.
- [2] 段体岗, 彭文山, 丁康康, 等. 南海岛礁环境下 304 不锈钢腐蚀行为分析[J]. 装备环境工程, 2021(11): 51-57.
- [3] 刘凯吉. 大气腐蚀环境的分类及腐蚀性评定[J]. 全面腐蚀控制, 2015(10): 26-27.
- [4] 刘金贵, 张斌, 康学锋, 等. 浅谈钢结构件的腐蚀防护与成本控制[J]. 现代涂料与涂装, 2025(2): 59-62.
- [5] 苏少燕, 李长虹. 基于环境因素法和标准金属法的大气腐蚀性等级评价与分析[J]. 环境技术, 2024(4): 220-225.
- [6] 毛喆, 朱海磊. 装配过程中漆膜的质量控制[J]. 现代涂料与涂装, 2025(1): 70-72.
- [7] 王建军, 郭小丹, 郑文龙, 等. 海洋大气暴露 3 年的碳钢与耐候钢表面锈层分析[J]. 腐蚀与防护, 2002(7): 288-291.
- [8] 肖松. 涂装基材表面清洁度、粗糙度及底漆种类对其底层附着力的影响[J]. 现代涂料与涂装, 2025(1): 67-69.
- [9] 刘璠琦. Q350EW 与 Q355GNH 耐候结构钢焊接接头耐腐蚀性对比分析[J]. 焊接技术, 2023(6): 28-31.
- [10] 陈仕箐, 李会宁, 严榕秋. 水的渗透性对水性环氧防腐涂层性能的影响[J]. 现代涂料与涂装, 2024(12): 11-14.
- [11] 张全成, 吴建生, 郑文龙, 等. 耐候钢表面稳定锈层形成机理的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2021(3): 143-146.
- [12] 陈晓明, 李涛. 基于 ROV 的深水海管阳极电位测量方法研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023(18): 172-174.
- [13] 刘聪, 唐其环, 王莞, 等. ISO 9223:2012 标准碳钢大气腐蚀速率预测方程在我国典型地区的适用性研究[J]. 装备环境工程, 2017(14): 74-77.
- [14] 曾文广, 葛鹏莉, 肖雯雯, 等. 酸性环境下界面对低合金管材点蚀的影响[J]. 材料保护, 2020(10): 9-14. ◆