

天津 LNG 接收站码头钢桩长效腐蚀防护技术对比研究

罗祥平¹, 艾绍平¹, 詹一鸣¹, 李易航¹, 王静^{2*}

(1.北京市燃气集团有限责任公司, 北京 100032;

2.中国科学院海洋研究所 海洋环境腐蚀与生物污损重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 为解决码头钢桩防腐问题, 针对国内同类场站进行腐蚀调研, 并对钢桩长效腐蚀防护技术进行优选。调研和试验结果表明, 复层矿脂包覆技术 (PTC) 的防护效果优于其他 2 类腐蚀防护技术, 是码头钢桩浪花飞溅区腐蚀防护的最佳解决方案。天津南港 LNG 接收站打破国内码头防腐设计的传统, 在设计建造初期就采用 PTC 技术进行防腐保护, 在国内尚属首例。相关调研和试验结果可为国内码头钢桩防腐设计提供参考。

关键词: 腐蚀防护技术; LNG 接收站; 防腐效果评价; 钢桩; 复层矿脂包覆防腐技术

中图分类号: TG174

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)04-0096-11

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.04.013

Comparative Study on Long-term Corrosion Protection Technologies for Steel Piles at Tianjin LNG Receiving Terminal

LUO Xiang-ping¹, AI Shao-ping¹, ZHAN Yi-ming¹, LI Yi-hang¹, WANG Jing²

(1. Beijing Gas Group Co., Ltd., Beijing 100032, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Corrosion and Bio-fouling, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

ABSTRACT: In order to solve the corrosion problem of wharf steel piles, the work aims to conduct corrosion investigation on Chinese similar receiving terminals and optimize the long-term corrosion protection technology of steel piles. According to the research and experimental results, the protective effect of petrolatum tape and covering system (PTC) was better than that of the other two anticorrosion technologies. PTC was the best solution for corrosion protection of wharf steel pile in splashing zone. Tianjin Nangang LNG receiving terminal breaks the tradition of corrosion protection design at Chinese wharfs and it is the first case in China that PTC technology is used for corrosion protection in the initial stage of design and construction. The relevant investigation and test results can provide reference for the corrosion protection design of wharf steel piles in China.

KEY WORDS: corrosion protection technology; LNG receiving terminal; anticorrosion effect evaluation; steel pile; petrolatum tape and covering system

收稿日期: 2022-04-28; 修订日期: 2022-07-22

Received: 2022-04-28; Revised: 2022-07-22

作者简介: 罗祥平 (1972—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为 LNG 工程建设与管理。

Biography: LUO Xiang-ping (1972-), Male, Senior engineer, Research focus: LNG engineering construction and management.

通讯作者: 王静 (1980—), 女, 研究员, 主要研究方向为海洋腐蚀与防护。

Corresponding author: WANG Jing (1980-), Female, Researcher, Research focus: Marine corrosion and protection.

引文格式: 罗祥平, 艾绍平, 詹一鸣, 等. 天津 LNG 接收站码头钢桩长效腐蚀防护技术对比研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(4): 000-000.

LUO Xiang-ping, AI Shao-ping, ZHAN Yi-ming, et al. Comparative Study on Long-term Corrosion Protection Technologies for Steel Piles at Tianjin LNG Receiving Terminal[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(4): 096-106.

“碳达峰、碳中和”是中国向全世界作出的庄严承诺。要实现“双碳”目标,调整能源结构是一条重要的途径。天然气作为清洁能源,对国家经济发展和民生保障的作用日益加强。LNG 接收站都是沿海建设的,海洋环境的腐蚀速率为内陆地区的几倍甚至几十倍。腐蚀不仅仅是使金属生锈,研究表明,腐蚀减薄 1 mm, 钢结构的承载力会下降 10%~15%^[1]。严重的腐蚀问题会使整座钢结构设施的承载力大大降低,缩短使用寿命,影响安全生产。LNG 接收站码头是重要的工作区域,同时处于海洋大气和工业大气环境中,其腐蚀环境最为恶劣,必须得到有效控制^[2-3]。

美国学者曾提出著名的“五倍定律”^[4],对于钢筋混凝土结构,在新建时,节约 1 美元的防腐投入,在后期腐蚀发展、钢筋锈蚀、混凝土结构劣化的每一个过程进行维修维护,都需要投入 5 倍于前一阶段的防腐投入。对于钢结构,这个定律仍然适用。如果在码头设计、建造初期,就针对不同的腐蚀问题,采取针对性的防腐措施,会大大降低后期腐蚀管理的成本,延长码头的服役寿命。

采用腐蚀防护技术^[5-7]对钢结构进行防护是新建工程在设计期间就必须采取的措施。针对码头钢管桩,国内新建码头钢桩防几乎全部按照涂层^[8-10]+牺牲阳极^[11-13]的防腐方案进行设计。复层矿脂包覆腐蚀防护技术(PTC)^[1,14-16]在国内已有 15 年以上的应用案例,但是主要应用于在役码头的维修、维护。对于新建码头,在建设期就采用 PTC 技术进行防腐保护,尚属首例。

本文针对天津南港 LNG 接收站码头钢桩的防

腐,阐述了从同类场站调研,到长效腐蚀防护技术评价筛选,再到 PTC 技术国内应用案例分析的全过程,并且相关技术的现场对比试验,仍然在进行中。本文的相关试验数据和工程案例,可以为今后新建码头钢桩防腐设计提供参考依据,可为业主单位大大降低后期运行维护成本,减少腐蚀事故,保障安全生产。

1 同类 LNG 场站腐蚀调研

为了更好地了解码头钢桩的腐蚀问题,开展了同类 LNG 场站腐蚀调研,见表 1。调研情况表明,国内不同海域的 LNG 码头钢桩,普遍存在浪花飞溅区/潮差区腐蚀严重的问题。这些码头的钢桩,普遍采用“涂层覆盖+阴极保护技术”进行防护,在服役 3~5 a 后,均出现局部锈蚀现象,如图 1 所示。根据海域的差异,锈蚀情况严重程度不同。6~10 a 后,锈蚀严重,进入大修期,如图 2 所示。LNG 接收站的码头是最重要的工作区域,钢桩一旦发生严重的腐蚀破坏,会使整座码头的承载力大大降低,缩短使用寿命,影响安全生产。

2 码头钢桩长效腐蚀防护技术对比评价试验

本文根据前期调研,初步筛选出复层矿脂包覆防腐技术(PTC)、2 种防腐涂层、自融合防腐胶带(有机包覆材料)在内的 3 类腐蚀防护技术,采用加速老化试验、电化学阻抗测试、中性盐雾试验及周浸试验

表 1 同类 LNG 场站腐蚀调研情况

Tab.1 Corrosion investigation of similar LNG terminals

同类 LNG 场站	防腐方法	腐蚀情况
黄海海域接收站	Q345D 低合金高强度结构钢,水位变动区及水下区采用环氧重防腐涂层	钢桩涂层裂化脱落现象严重,钢桩上具有较多的锈蚀区域
渤海海域接收站	涂层加牺牲阳极的防腐保护措施,并留有腐蚀裕量的方法	涂层出现剥离脱落现象,锈蚀较为严重,钢桩上出现了明显的锈迹,且在水位变动区有海洋生物附着现象
东海海域接收站	水面以上部分主要采用涂料防护	浪花飞溅区有大片的涂料发生了脱落,漏出钢桩本体,涂料下面出现大量的红锈,且有进一步扩大的趋势



图 1 渤海海域某 LNG 码头钢桩锈蚀情况(运行 7 a)

Fig.1 Corrosion of steel piles of an LNG terminal in Bohai Sea area (7 year operation)



图2 东海海域某 LNG 码头钢桩腐蚀情况 (运行 5 a)

Fig.2 Corrosion of steel piles of an LNG terminal in the East China Sea (5-year operation)

的方法,对其耐老化性能及腐蚀防护效果进行实验室对比评价。以天津南港内港池实际海水为腐蚀介质,优选出适用于北京燃气天津南港 LNG 接收站码头钢管桩的防蚀效果显著的长效腐蚀防护技术。每种材料的每项测试均制备 5 个样品。其中,防腐涂层配套体系为环氧富锌底漆-环氧云铁中间漆-聚氨酯面漆(以下采用“聚氨酯涂料体系”代称)和环氧富锌底漆-环氧云铁中间漆-氟碳面漆(以下采用“氟碳涂料体系”代称),干膜厚度为 500 μm 。复层矿脂包覆腐蚀防护技术生产厂家为青岛迪恩特新材料科技有限公司。自融合式防腐胶带生产厂家为 HBBM 华北保温密封材料基地永兴密封材料厂。

参照 GB/T 1766 及 GB/T 31881,进行快速紫外老化测试^[17-19],加快防蚀层的老化进程。对于防蚀层防腐性能^[20-24]的评价,拟开展中性盐雾试验、周浸试验及电化学测试。

1) 中性盐雾试验。为了评价材料耐腐蚀性能,通过盐雾腐蚀试验^[25]进行研究和分析,试验按照 GB/T 10125 要求,采用中性盐雾腐蚀,设备为盐雾腐蚀试验箱。按照标准配制溶液,进行 2 000 h 的盐雾腐蚀试验。连续作业 8 h 后停 8 h 记为 1 个腐蚀周期。

2) 周浸试验。周期浸润腐蚀试验(以下简称周浸腐蚀试验)是模拟干湿交替环境的一种试验方法,试验环境比较适合于耐海水腐蚀钢的锈层形成,是快速检验材料耐海水腐蚀性能的主要手段^[26]。试验按照 GB/T 19746 进行。腐蚀介质采用天津南港内港池实际海水。试验在模拟服役温度中进行,每周期包括 10 min 的浸渍和取出后 10 min 干燥,此循环过程

需保证在整个试验过程中连续进行,试验周期暂定为 1 000 h。

3) 电化学测试。电化学测试采用 10 mm \times 10 mm \times 3 mm 的电化学试样进行,将其浸泡入模拟海水溶液中进行电化学阻抗谱测试。试验结束后,以宏观形貌变化(是否起泡、起皱、脱落等)、服役前后的基础力学性能的变化(附着力、拉伸性能等)为判据,明确各类腐蚀防护技术在浪花飞溅区及潮差区的适用性。同时,以腐蚀质量损失或增量、是否存在局部腐蚀为判据,对比不同试验周期下各类涂层及包覆技术的腐蚀防治效果或性能退化程度,明确各类涂层及包覆技术的防治效果及长期适用性。

3 结果及讨论

3.1 紫外老化

将试验样品放置在样品架上,让其测试表面对着灯管。当试验样品没有完全填满样品架时,空出的位置应用空白板来填满,以保持试验箱里的测试条件:灯管为 UVA-340,在黑板温度(50 \pm 3) $^{\circ}\text{C}$ 下冷凝 4 h,在黑板温度(70 \pm 3) $^{\circ}\text{C}$ 下紫外光照 8 h。

氟碳涂料体系、聚氨酯涂料体系、自融合胶带以及矿脂防蚀材料的抗老化性能测试的结果见表 2 和图 3。从表 2 中可以看出,氟碳涂料体系、聚氨酯涂料体系以及自融合胶带在氙灯老化试验箱照射 1 000 h 后,均未出现起泡、粉化现象,表面都有轻微变色、失光现象。矿脂防蚀材料照射 1 000 h 后,未出现起泡、粉化、变色、失光现象。

表 2 氟碳涂料体系、聚氨酯涂料体系、自融合胶带以及矿脂防蚀材料的抗老化性能测试结果
Tab.2 Anti-aging performance test of fluorocarbon coating system, polyurethane coating system, self-fusion tape and mineral grease anticorrosion material

样品编号	涂层种类	检测结果
LH-001—005	氟碳涂料体系	未出现起泡、粉化现象,很轻微变色、失光
LH-006—010	聚氨酯涂料体系	未出现起泡、粉化现象,很轻微变色、失光
LH-011—015	矿脂防蚀材料	未出现起泡、粉化、变色、失光现象
LH-016—020	自融合胶带	未出现起泡、粉化现象,很轻微变色、失光

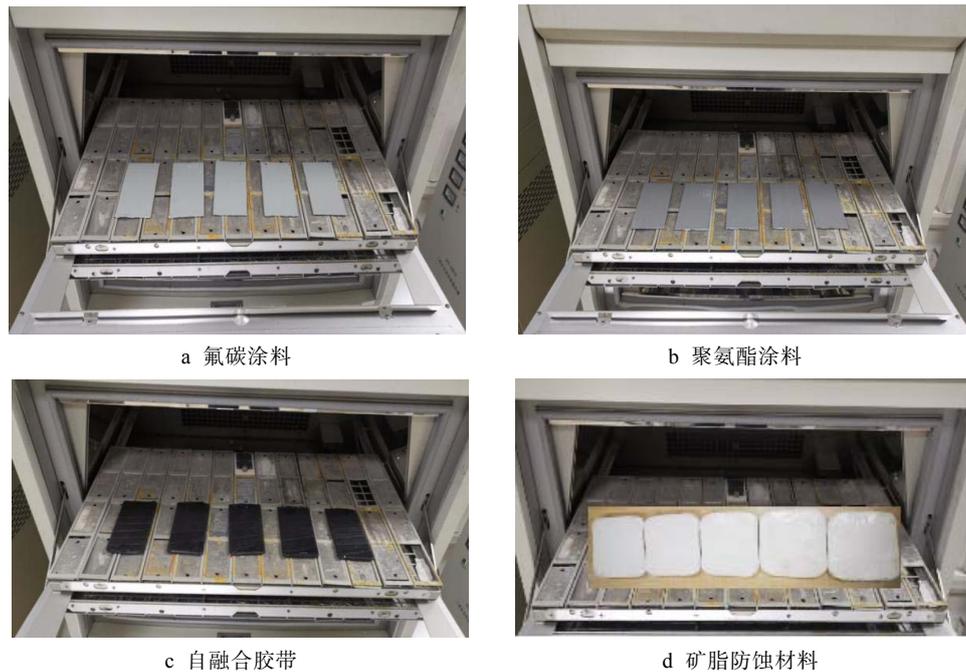


图 3 试样耐老化测试

Fig.3 Images of samples after aging resistance test: a) fluorocarbon coating; b) polyurethane coating; c) self-fusion tape; d) mineral grease anticorrosion material

3.2 中性盐雾试验

中性盐雾试验参照 GB/T 10125 进行, 取全新试片, 按照施工要求对试样进行防护处理。待处理完毕, 与空白组一同置于盐雾腐蚀试验箱中进行试验。中性盐雾试验温度为 $(35 \pm 2) ^\circ\text{C}$; 80 m^2 的平均沉降率为 $(1.5 \pm 0.5) \text{ mL/h}$; 氯化钠溶液的质量浓度 (收集溶液) 为 $(50 \pm 5) \text{ g/L}$; pH 值为 6.5~7.2; 试验时间为 2 000 h。

氟碳涂料体系、聚氨酯涂料体系、自融合胶带以

及矿脂防蚀材料的中性盐雾试验的结果见表 3 和图 4。从表 3 中可以看出, 中性盐雾试验 2 000 h 后, 氟碳涂料体系 5 个试样中有 1 个试样起泡等级为 α (S0), 生锈等级为 1 (S5), 剥落等级为 0 (S0); 自融合胶带 5 个试样中有 3 个试样起泡等级为 0 (S0), 生锈等级为 1 (S3), 剥落等级为 0 (S0); 聚氨酯涂料体系及矿脂防蚀材料起泡等级为 0 (S0), 生锈等级为 0 (S0), 剥落等级为 0 (S0)。

表 3 氟碳涂料体系、聚氨酯涂料体系、自融合胶带以及矿脂防蚀材料的中性盐雾试验结果

Tab.3 Salt spray resistance test of fluorocarbon coating system, polyurethane coating system, self-fusion tape and mineral grease anticorrosion material

样品编号	涂层种类	检测结果
ZW-001—005	氟碳涂料体系	ZW-001~003、ZW-005: 起泡等级 0 (S0), 生锈等级 0 (S0), 剥落等级 0 (S0) ZW-004: 起泡等级 0 (S0), 生锈等级 1 (S5), 剥落等级 0 (S0)
ZW-006—010	聚氨酯涂料体系	起泡等级 0 (S0), 生锈等级 0 (S0), 剥落等级 0 (S0)
ZW-011—015	矿脂防蚀带	起泡等级 0 (S0), 生锈等级 0 (S0), 剥落等级 0 (S0)
ZW-016—020	自融合胶带	ZW-016~017、ZW-019~020: 起泡等级 0 (S0), 生锈等级 1 (S3), 剥落等级 0 (S0) ZW-018: 起泡等级 0 (S0), 生锈等级 0 (S0), 剥落等级 0 (S0)

3.3 周浸试验

试样处理参照中性盐雾试验试样处理方法进行, 腐蚀介质采用天津南港内港池实际海水。试验在模拟服役温度中进行, 每周期包括 10 min 的浸渍和取出后 10 min 干燥, 此循环过程需保证在整个试验过程中连续进行, 试验时间为 1 000 h。试验结果见 4 和图 5、6。

3.4 电化学测试

利用电化学工作站分别测试空白电极、氟碳涂层电极、聚氨酯涂层电极、自融合防腐胶带电极以及包覆 PTC 材料电极的开路电位 (OCP)、电化学阻抗 (EIS) 以及极化曲线 (Tafel)。图 7a 表明, 负载 4 种材料之后, 低频区阻抗模值明显高于纯碳钢, 说明 4 种材料都具有防腐性能。PTC 材料阻抗模值为自融

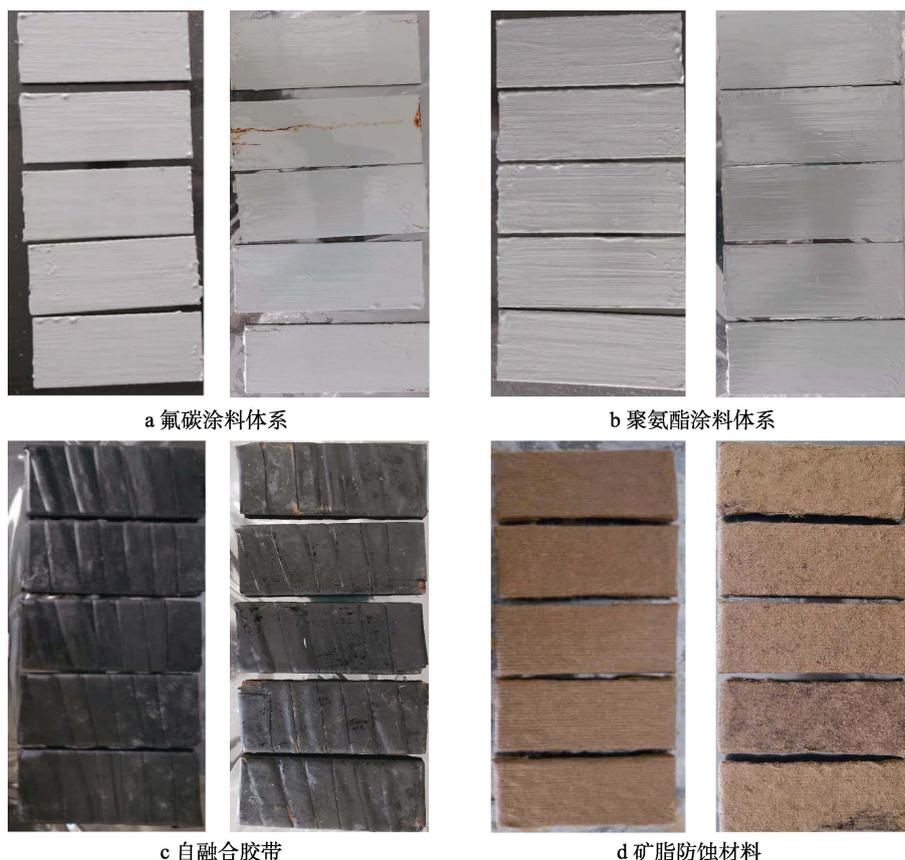


图4 中性盐雾试验前、后试样的形貌

Fig.4 Images before and after salt spray resistance test: a) fluorocarbon coating system; b) polyurethane coating system; c) self-fusion tape; d) mineral grease anticorrosion material

表4 氟碳涂料体系、聚氨酯涂料体系、自融合胶带以及矿脂防蚀材料的周浸试验结果

Tab.4 Alternate immersion test of fluorocarbon coating system, polyurethane coating system, self-fusion tape and mineral grease anticorrosion material

样品编号	涂层种类	检测结果
ZJ-001—005	氟碳涂料体系	起泡等级 0 (S0), 生锈等级 0 (S0), 剥落等级 0 (S0)
ZJ-006—010	聚氨酯涂料体系	起泡等级 0 (S0), 生锈等级 0 (S0), 剥落等级 0 (S0)
ZJ-011—015	矿脂防蚀带	起泡等级 0 (S0), 生锈等级 0 (S0), 剥落等级 0 (S0)
ZJ-016—020	自融合胶带	起泡等级 0 (S0), 生锈等级 0 (S0), 剥落等级 0 (S0)

合防腐胶带的 2 倍, 是涂料阻抗模值的 5 倍, 充分说明 PTC 的防腐性能明显高于自融合防腐胶带、聚氨酯涂料及氟碳涂料。图 7b 中阴阳交界区为材料的自腐蚀电位, 负载 4 种材料之后, 复合材料的自腐蚀电位明显降低, 说明其腐蚀倾向降低, 耐腐蚀性能提高。其中, PTC 材料耐腐蚀性能高于自融合防腐胶带、聚氨酯涂料及氟碳涂料, PTC 材料阻抗模值为自融合防腐胶带的 2 倍, 是涂料阻抗模值的 5 倍。包覆 PTC 试样的腐蚀速率是包覆自融合防腐胶带的 10%, 是涂覆涂料的 1%, 充分体现 PTC 具有优越的防腐性能。

4 复层矿脂防蚀材料国内应用案例分析

复层包覆腐蚀防护技术 (PTC) 是一类长效的腐

蚀防护技术, 防腐寿命预计在 30 a 以上。PTC 技术在国外应用较早, 已有 40 a 以上的应用案例, 但在国内最长仅有 17 a 的应用案例, 因此对于此项技术能否达到 30 a 的使用寿命, 仍然存在疑义。本文着重对国内应用比较早, 比较有代表性的几个工程案例进行分析, 为业主和设计单位提供参考。

4.1 渤海海域某单井平台立管及导管架腐蚀修复工程 (2005 年)

渤海海域某石油平台基础部分由导管架和桩 2 部分组成。2005 年 7 月腐蚀调查发现, 该平台桩腿的潮溅区出现明显锈蚀和海生物附着, 局部保护层下腐蚀严重。在节点处和其他结构连接处出现明显的大面积腐蚀和局部腐蚀, 井口套管由于没有进行任何保护, 锈蚀十分严重, 锈层厚度在 10 mm 左右, 浪溅

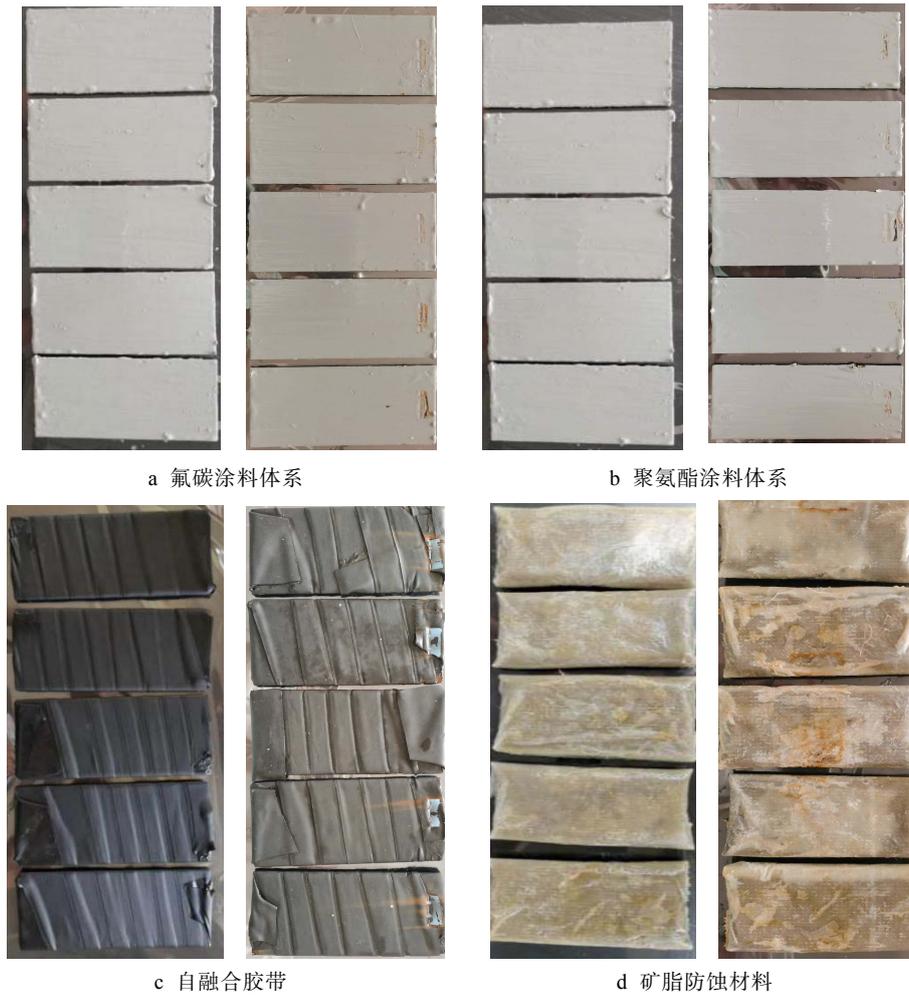


图 5 周浸试验前、后试样形貌

Fig.5 Images before (left) and after (right) alternate immersion test: a) fluorocarbon coating system; b) polyurethane coating system; c) self-fusion tape; d) mineral grease anticorrosion material



图 6 矿脂防蚀带周浸试验后剥离包覆层后的试板

Fig.6 Test board image after stripping of the coating layer of the mineral grease corrosion prevention zone after the alternate immersion test

区钢铁厚度最薄处只有 4 mm。考虑到平台的长期安全运营, 针对浪溅区的严重腐蚀问题, 采用 PTC 包覆技术进行修复处理, 如图 8 所示。为验证防腐效果,

在施工过程中安装了保护试片 (如图 9 所示), 通过观察保护试片的腐蚀情况, 便于了解包覆后内部钢桩的腐蚀状况。包覆施工 4 a 后, 对平台安装的保护试片打开验证, 发现包覆矿脂技术包覆的保护试片依然保持金属光泽, 而暴露在海洋环境中的试片已经锈迹斑斑 (如图 10a 所示)。试验分析数据表明, 证明了 PTC 技术保护的试片防腐效率高达 99.5% 以上, 如图 10b 所示。

4.2 黄海海域某码头工程钢桩腐蚀修复工程 (2007 年)

2007 和 2009 年分别针对黄海海域某码头钢管桩进行 2 期腐蚀修复工程, 钢桩修复前后对比如图 11 所示。2017 年, 对该码头包覆 10 a 的钢桩进行防腐效果验证。结果表明, 经过 10 a 的实海应用, 防蚀保护罩光亮无老化变色, PTC 包覆层油脂丰富, 钢桩光滑无锈蚀, 起到了良好的防护效果, 如图 12 所示。同时观察未采用复层矿脂包覆防腐的钢桩, 可以发现涂层破损严重, 局部锈层达到 1 cm, 如图 13 所示。

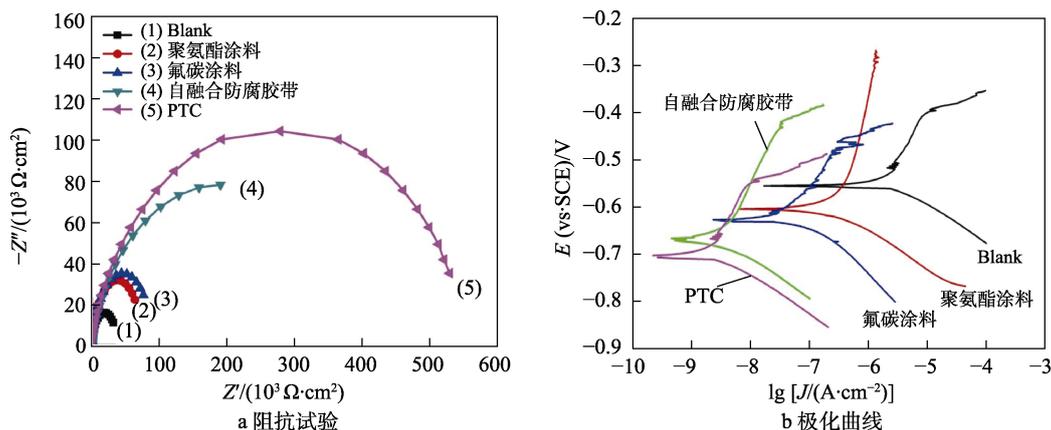


图7 电化学阻抗试验及极化曲线

Fig.7 Electrochemical impedance test and polarization curve: a) impedance test; b) polarization curve

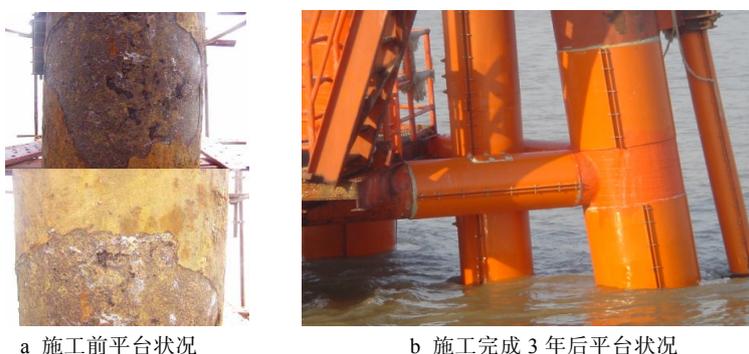


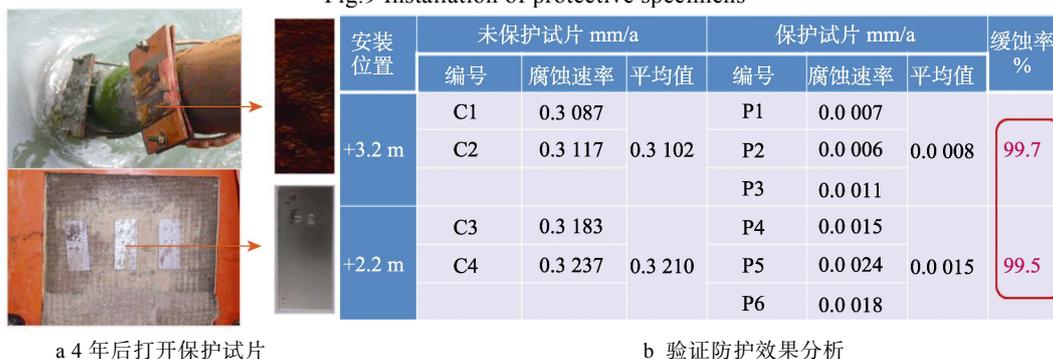
图8 平台立管及导管架包覆前后对比

Fig.8 Comparison of platform riser and jacket before and after cladding: a) platform condition before construction; b) platform condition three years later after completion of construction



图9 安装保护试片

Fig.9 Installation of protective specimens



a 4年后打开保护试片

b 验证防护效果分析

图10 保护试片现场验证和室内分析数据

Fig.10 Data from site verification and laboratory analysis of protective specimens: a) protective specimens opened four years later; b) verification analysis of protective effect



图 11 黄海海域某化工码头钢桩包覆实例
 Fig.11 Steel pile cladding of a chemical wharf in the Yellow Sea area: a) before steel pile repair; b) after steel pile repair



图 12 青岛港液体码头示范钢桩现场验证
 Fig.12 Site verification of demonstration steel piles in Qingdao Port Liquid Wharf



图 13 采用涂层保护钢桩腐蚀情况
 Fig.13 Corrosion of steel pile protected by coating

4.3 渤海海域某 LNG 接收站码头钢桩包覆 包覆案例 (2013 年)

渤海海域某 LNG 接收站码头部分钢桩在新建时采用复层矿脂包覆腐蚀防护技术进行防护,并于 2018 年对应用 5 a 的复层矿脂包覆防腐技术的防护效

果进行验证,如图 14 所示。打开保护罩之后,可以看到防蚀带表面油脂丰富,没有干结、流淌的现象。割开防蚀带,擦掉防蚀膏,可以看到钢管桩表面没有任何锈迹,防护效果良好。对比采用涂层防护的钢桩可以发现,涂层破损严重,亟需维修维护,如图 15 所示。



图 14 防护效果验证

Fig.14 Protective effect verification



图 15 采用涂层防护的钢桩腐蚀现状

Fig.15 Corrosion status of steel pile protected by coating

5 结语

天津 LNG 接收站码头在设计建造初期,就采用复层矿脂包覆腐蚀防护技术(PTC)进行防腐保护,在国内尚属首例。本文在有限的试验时间内,通过对氟碳涂料、聚氨酯涂料、自融合防腐胶带以及矿脂防腐材料的抗老化性能和腐蚀防护性能进行评价,表明复层矿脂包覆防腐材料 PTC 各项性能均优于其他 3 种材料。结合 PTC 的国内外实际应用案例及应用效果分析,可以得出,矿脂包覆材料 PTC 是钢结构浪花飞溅区最佳防腐方案。PTC 技术的实海防护效果也在天津南港 LNG 接收站持续进行中,相关试验结果对今后码头钢桩防腐设计具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 钱洲亥,王静,周海飞,等. 大气区异型钢结构上复层

矿脂包覆防腐技术施工要点[J]. 电镀与涂饰, 2016, 35(18): 976-979.

QIAN Zhou-hai, WANG Jing, ZHOU Hai-fei, et al. Construction Hints of Multilayer Petrolatum Tape and Covering Anticorrosion Technology for Irregularly-Shaped Steel Structure at Atmospheric Zone[J]. Electroplating & Finishing, 2016, 35(18): 976-979.

[2] 侯海龙,侯建国,王秀林,等. LNG 接收站腐蚀情况分析[J]. 涂料工业, 2020, 50(3): 83-87.

HOU Hai-long, HOU Jian-guo, WANG Xiu-lin, et al. Corrosion Analysis of LNG Terminals[J]. Paint & Coatings Industry, 2020, 50(3): 83-87.

[3] 秦冉. LNG 接收站碳钢螺栓的腐蚀及防护[J]. 化工设计, 2020, 30(3): 25-26.

QIN Ran. Corrosion and Protection of Carbon Steel Bolts in LNG Receiving Station[J]. Chemical Engineering Design, 2020, 30(3): 25-26.

[4] 胡慧文. 关于钢筋混凝土结构耐久性的一些探讨[J]. 科技资讯, 2008, 6(29): 63-64.

HU Hui-wen. Discussion on Durability of Reinforced Concrete Structure[J]. Science & Technology Information, 2008, 6(29): 63-64.

[5] 缪灿亮,王海勇,王思. 海洋平台的腐蚀现状和防护措施[J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27(1): 22-24.

MIAO Can-liang, WANG Hai-yong, WANG Si. Offshore Platform Corrosion and Protection Measures[J]. Total Corrosion Control, 2013, 27(1): 22-24.

[6] 贾润楠,刘胜林,朱永胜,等. 钢结构在浪花飞溅区的腐蚀特性与防护技术研究进展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(10): 1-4.

- JIA Run-nan, LIU Sheng-lin, ZHU Yong-sheng, et al. Research Progress of Corrosion Characteristics and Protection Technology of Steel Structures in Spray Splash Zone[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(10): 1-4.
- [7] 侯保荣. 海洋钢结构浪花飞溅区腐蚀防护技术[J]. 中国材料进展, 2014, 33(1): 26-31.
HOU Bao-rong. Anti-Corrosion Technology to Steel Structure in Splash Zone[J]. Materials China, 2014, 33(1): 26-31.
- [8] 续芯如, 娄超云, 王雅婷, 等. 海洋防腐涂料研究进展[J]. 玻璃, 2022, 49(2): 22-26.
XU Xin-ru, LOU Chao-yun, WANG Ya-ting, et al. Research Progress of Marine Anti-Corrosion Coatings[J]. Glass, 2022, 49(2): 22-26.
- [9] 宋志政, 高媛媛, 谢晓宇. 新型绿色抑制剂的海洋防腐涂料研究进展[J]. 山东化工, 2020, 49(10): 62-65.
SONG Zhi-zheng, GAO Yuan-yuan, XIE Xiao-yu. Review on New Anticorrosive Coatings Based on Green Inhibitors[J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(10): 62-65.
- [10] 文玉良, 刘重强, 卢志敏, 等. 海洋防腐涂料的研究现状及发展方向[J]. 山东化工, 2018, 47(12): 40-42.
WEN Yu-liang, LIU Chong-qiang, LU Zhi-min, et al. Research Status and Development Direction of Marine Anticorrosive Coatings[J]. Shandong Chemical Industry, 2018, 47(12): 40-42.
- [11] 王顺, 杨领, 卫宪, 等. 海洋多井口桩基平台阴极保护及阳极模块化安装技术研究[J]. 石油工程建设, 2021, 47(S2): 47-52.
WANG Shun, YANG Ling, WEI Xian, et al. Cathodic Protection and Anodes Installation for Offshore Pile-Supported Platform with Multiple Wellheads[J]. Petroleum Engineering Construction, 2021, 47(S2): 47-52.
- [12] 方翔. 海洋环境超大钢结构腐蚀控制关键技术研究——牺牲阳极阴极保护[R]. 广东: 中交四航工程研究院有限公司, 2019.
FANG Xiang. Study on Corrosion Control of Super-large Steel Structures in Marine Environment by Sacrificial Anode Cathodic Protection[R]. Guangdong: CCCC Fourth Aviation Engineering Research Institute Co, Ltd, 2019.
- [13] 王秀通, 宋积文, 陈胜利, 等. 海洋设施阴极保护监测与仿真技术研究[C]//第十届全国腐蚀大会摘要集. 南昌: 中国腐蚀与防护学会, 2019.
WANG Xiu-tong, SONG Ji-wen, CHEN Sheng-li, et al. Study on Cathodic Protection Monitoring and Simulation Technology of Marine Facilities[C]//The 10th national Conference on Corrosion in Set. Nanchang: Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019.
- [14] 王静, 侯保荣, 钱备. 海洋浪花飞溅区复层矿脂包覆腐蚀防护技术[C]//中国海洋湖沼学会第十次会员代表大会 2012 海洋腐蚀与生物污损学术研讨会摘要集. 青岛: 中国海洋湖沼学会, 2012.
WANG Jing, HOU Bao-rong, QIAN Bei. Anti-corrosion Technology of Coating Mineral Fat in Sea Spray Area[C]//Proceedings of the 10th Member Congress of The Society of Oceanology and Limnology of China. Qingdao: The Society of Oceanology and Limnology of China, 2012.
- [15] 李言涛, 戈成岳, 侯保荣. 海洋钢结构浪花飞溅区复层矿脂包覆腐蚀防护技术[C]//北京论坛(2014)文明的和谐与共同繁荣——中国与世界: 传统、现实与未来: “人类与海洋”专场论文及摘要集. 北京: 北京大学, 2014.
LI Yan-tao, GE Cheng-yue, HOU Bao-rong. Anti-Corrosion Technology of Marine Steel Structure Coated with Mineral Fat in Spray Area[C]//Beijing Forum (2014) Harmony and Common Prosperity of Civilizations: China and the World: Traditional Reality and Future: Humanity and the Ocean. Beijing: Peking University, 2014.
- [16] 侯保荣, 李言涛, 王静, 等. 钢结构复层包覆防腐技术及应用[R]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2017.
HOU Bao-rong, LI Yan-tao, WANG Jing, et al. Corrosion Prevention Technology and Engineering Application of Steel Structure Cladding[R]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [17] 王俊胜, 刘丹, 林贵德, 等. 紫外老化对溶剂型膨胀防火涂料基本性能的影响[J]. 涂料工业, 2019, 49(8): 47-52.
WANG Jun-sheng, LIU Dan, LIN Gui-de, et al. The Effects of UV Aging on Main Properties of Intumescent Fire-Retardant Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2019, 49(8): 47-52.
- [18] 高祥, 周彦宇, 林玛丽. 紫外老化箱风道及试验箱结构的优化设计[J]. 合成材料老化与应用, 2013, 42(4): 21-24.
GAO Xiang, ZHOU Yan-yu, LIN Ma-li. Optimization Design of UV Aging Chamber and the Chamber Duct Structure[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2013, 42(4): 21-24.
- [19] 孙斌. 聚氨酯材料的臭氧/紫外老化效应研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
SUN Bin. Study on Ozone/Ultraviolet Aging Effect of Polyurethane Materials[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- [20] 姜丽, 宋兆曦, 提阳. 新型防腐涂料复合体系耐腐蚀性测试分析[J]. 石油天然气学报, 2020, 42(3): 1-8.
JIANG Li, SONG Zhao-xi, TI. Corrosion Resistance Test and Analysis of New Type Anticorrosive Coating Composite System[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2020, 42(3): 1-8.
- [21] 陈旭东. 表面纳米化 316LN 不锈钢抗辐照及耐腐蚀性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
CHEN Xu-dong. Study on Radiation Resistance and Corrosion Resistance of Surface Nanocrystallized 316LN Stainless Steel[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [22] 殷鑫. Al、Ti、Cr 低合金高强耐蚀钢的制备及耐腐蚀性

- 能研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020.
- YIN Xin. Preparation and Corrosion Resistance of Al, Ti and Cr Low Alloy High Strength Corrosion Resistant Steel[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2020.
- [23] 李志杰, 杨鹏, 谢飞, 等. 新型高耐盐雾水性环氧富锌底漆的制备[J]. 中国涂料, 2019, 34(11): 24-28.
- LI Zhi-jie, YANG Peng, XIE Fei, et al. Preparation of a New Waterborne Epoxy Zinc-Rich Primer with High Salt Fog Resistance[J]. China Coatings, 2019, 34(11): 24-28.
- [24] 崔娟. 新型钛锆合金腐蚀特性及其耐腐蚀机理研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- CUI Juan. Study on Corrosion Characteristics and Corrosion Resistance Mechanism of New Titanium Zirconium Alloy[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [25] 张道达, 朱华明, 尧堯灿, 等. 10CrMoAl 钢热轧薄板的周浸实验对比分析[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2018, 42(4): 393-398.
- ZHANG Dao-da, ZHU Hua-ming, YAO Deng-can, et al. The Study on Compared Analysis 10 CrMoAl Hot Rolled Sheet[J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Sciences Edition), 2018, 42(4): 393-398.
- [26] 沈春华, 杜飞飞, 姚唯亮, 等. 水性环氧涂料耐盐雾性影响因素的研究[J]. 上海涂料, 2014, 52(4): 25-27.
- SHEN Chun-hua, DU Fei-fei, YAO Wei-liang, et al. Study on the Influence Facotors of Salt Fog Resistance of Waterborne Epoxy Coatings[J]. Shanghai Coatings, 2014, 52(4): 25-27.

责任编辑: 刘世忠