

氧化聚合型包覆技术 (OTC) 在热带海洋大气环境螺栓中的应用

杨黎晖^{1,2}, 徐玮辰^{1,2}, 王秀通^{1,2}, 王盈^{1,2}, 侯保荣^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所 中国科学院海洋环境腐蚀与生物污损重点实验室, 山东 青岛 266071;
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋腐蚀与防护开放工作室, 山东 青岛 266237)

摘要: **目的** 研究氧化聚合型技术 (OTC) 在热带海洋大气环境中对高强螺栓的防护效果。**方法** 在三亚大气腐蚀试验站开展 OTC 包覆和未保护的高强螺栓 6 a 的大气曝晒试验, 通过扫描电镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD)、X 射线光电子能谱仪 (XPS) 和激光共聚焦显微镜 (LSCM) 开展腐蚀形貌和成分分析, 通过质量损失试验考察 OTC 包覆和未保护的高强螺栓的腐蚀行为。**结果** 未经保护的螺栓表面生成大量棕红色的腐蚀产物, XRD 分析表明, 其主要成分为 α -FeOOH、 β -FeOOH、 γ -FeOOH、 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 等, 其中 β -FeOOH 晶体结构中含有 Cl^- , 会加速基体腐蚀。经 LSCM 分析, 螺栓垫片整体呈全面腐蚀状态, 但同时发生局部腐蚀, 最深的点蚀坑达 120 μm 以上。经 OTC 技术保护的高强螺栓, 仅在底部出现少量棕色物质, 大部分仍呈现原有的黑色基体表面, OTC 包覆螺栓 6 a 的腐蚀速率约为未保护螺栓的腐蚀速率 1/15, OTC 包覆垫片表面未出现明显腐蚀。**结论** 氧化聚合型包覆技术显著降低了高强螺栓的腐蚀速率, 具有优良的耐腐蚀性能, 在热带海洋大气环境对高强螺栓起到良好的长效防护作用。

关键词: 氧化聚合包覆技术; 螺栓; 海洋大气; 腐蚀; 防护; 大气曝晒试验

中图分类号: TG174

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)03-0062-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.03.008

Application of Oxidation Tape and Covering System (OTC) in Tropical Marine Atmospheric Environment

YANG Li-hui^{1,2}, XU Wei-chen^{1,2}, WANG Xiu-tong^{1,2}, WANG Ying^{1,2}, HOU Bao-rong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Environmental Corrosion and Bio-fouling, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Shandong Qingdao 266071, China; 2. Open Studio for Marine Corrosion and Protection, Pilot National Laboratory for

收稿日期: 2022-04-14; 修订日期: 2022-06-29

Received: 2022-04-14; Revised: 2022-06-29

基金项目: 科技部科技基础资源调查专项 (2019FY101400); 中国科学院海外科教合作中心部署项目 (121311KYSB20210005)

Fund: National Science and Technology Resources Investigation Program of China (2019FY101400); Overseas Science and Education Cooperation Center Deployment Project (121311KYSB20210005)

作者简介: 杨黎晖 (1982—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为金属的腐蚀与防护。

Biography: YANG Li-hui (1982-), Female, Doctor, Senior engineer, Research focus: corrosion and protection of metals.

通讯作者: 侯保荣 (1942—), 男, 博士。

Corresponding author: Hou Bao-rong (1942-), Male, Doctor.

引文格式: 杨黎晖, 徐玮辰, 王秀通, 等. 氧化聚合型包覆技术 (OTC) 在热带海洋大气环境螺栓中的应用[J]. 装备环境工程, 2023, 20(3): 062-068.

YANG Li-hui, XU Wei-chen, WANG Xiu-tong, et al. Application of Oxidation Tape and Covering System (OTC) in Tropical Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(3): 062-068.

Marine Science and Technology (Qingdao), Shandong Qingdao 266237, China)

ABSTRACT: The work aims to study the anti-corrosion effects of Oxidation Tape and Covering system (OTC) on high-strength bolts in tropical marine atmospheric environment. The OTC coated and unprotected high-strength bolts were exposed in Sanya atmospheric corrosion test site for 6 a. The corrosion morphology and composition were analyzed by scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and laser scanning confocal microscopy (LSCM). The corrosion behaviors of OTC coated and unprotected high-strength bolts were investigated through weight loss experiment. A large number of brownish red corrosion products were formed on the unprotected bolt surface. XRD analysis showed that the main components of corrosion products were α -FeOOH, β -FeOOH, γ -FeOOH, Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , etc., while β -FeOOH crystal structure contained Cl^- , which would accelerate matrix corrosion. According to LSCM analysis, the bolt gasket was in an overall corrosion state, but local corrosion occurred at the same time, and the depth of pitting was more than 120 μm . For high-strength bolts protected by OTC, only a small amount of brown substance appeared at the bottom. Most of them were still kept with the original black matrix surface. The corrosion rate of OTC coated bolts accounted for about 1/15 of the corrosion rate of unprotected bolts. There was no apparent corrosion on the surface of the OTC coated gasket. The oxidation tape and covering system significantly reduces the corrosion rate of high-strength bolts and has excellent corrosion resistance. It plays a good long-term protective role for high-strength bolts in tropical marine atmospheric environment.

KEY WORDS: oxidation tape and covering system; bolt; marine atmosphere; corrosion; protection; atmospheric exposure experiment

腐蚀是各类设施设备及其组成材料与环境发生化学或电化学反应而导致的材料破坏现象。严重的腐蚀不仅会导致设施设备的结构损伤,缩短其寿命,还可能引起突发性灾难事故,污染环境,造成重大财产损失和人员伤亡。中国工程院公布的调研结果表明,2014年我国全行业腐蚀总成本超过21 000亿元,约占GDP的3.34%,每位公民当年需要承担的腐蚀成本约为1 555元^[1]。海洋大气环境是最为严酷的大气腐蚀环境,海洋大气的高湿度和高盐分等因素会加剧金属腐蚀的发生。

螺栓作为固定和连接金属构筑物的重要零件,螺栓腐蚀会导致构筑物强度降低,带来安全隐患。螺栓由于形状复杂、材质不同,存在较多的缺陷、缝隙、边缘和棱角,且表面凹凸不平,易积存水、潮气和盐分等腐蚀性介质,极易发生应力腐蚀、电偶腐蚀、缝隙腐蚀和晶间腐蚀。腐蚀产生的锈迹不仅会影响美观,严重的腐蚀将引发腐蚀疲劳,甚至断裂^[2-8]。因此,螺栓虽小,但其腐蚀问题必须引起足够的重视。

防腐涂料是螺栓表面防护最常用的方法^[9],具有成本低、工艺简单、对钢结构无形状要求等优点。目前传统的防腐涂料对表面前处理等级及施工环境要求高,很难使螺栓的边缘部位得到足够的保护,并且涂刷时很容易出现流淌、漏涂等现象,后期维护费用高,效果也不理想。螺栓螺母等异型结构的腐蚀问题引起了极大的关注,研究人员开发了一些腐蚀防护技术,如采用防锈帽^[10]、镀Zn或Zn-Ni合金^[11-13]、磷化膜^[14]等。然而,这些方法均有其局限性。防锈帽底部容易积水,存在缝隙腐蚀现象;锌镀层短期内耐蚀

性较好,但存在表面夹层、空洞、氧化皮等缺陷;磷化膜保护效果有限。综上所述,传统防腐方法很难为螺栓提供足够的保护,亟需开发高效、工艺简单且长效的防腐蚀技术对其进行保护^[15-17]。

本研究采用新型氧化聚合型包覆技术包覆螺栓,并考察其在三亚地区海洋大气环境中6a的防腐效果。

1 试验

1.1 材料

试验材料选用市面上出售的高强螺栓($\phi 25\text{ mm} \times 130\text{ mm}$, S8.8),高强螺栓经过发蓝处理(氧化),表面为黑色。按GB/T0003—2009《金属材料大气环境腐蚀试验》在三亚大气试验站进行曝晒,时间为2015年1月—2021年1月。三亚大气试验站年平均温度为26.4℃,年平均相对湿度为78.6%,年均降雨量1 284 mm,平均 Cl^- 沉积速率为58.2 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,为典型的高温、高湿、高盐的热带海洋大气环境。

1.2 氧化聚合型包覆防腐蚀技术

氧化聚合型包覆防腐蚀技术(OTC)是中国科学院海洋研究所国家海洋腐蚀防护工程技术研究中心研发的针对大气环境下异型钢结构的长效防腐蚀技术。该体系由三层紧密相连的保护层组成,即氧化聚合型防蚀膏、氧化聚合型防蚀带和外防护剂,如图1所示。

氧化聚合型防蚀膏是最核心的材料,直接与被保护的金属紧密接触。防锈膏的成分为含有聚异丁烯的

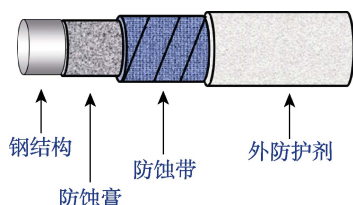


图 1 氧化聚合型包覆技术

Fig.1 Schematic diagram of oxidation tape and covering system

混合物中加入特殊的复配转锈剂,复配防锈剂能将钢结构表面的铁锈转化成铁的络合物保护膜,形成保护性封闭层,起到锈转化、防锈双重作用。

氧化聚合型防蚀带是浸渍在与防蚀膏相类似的化合物中制得的带状防蚀材料。其表面通过氧化聚合作用形成坚韧的皮膜,而紧贴钢结构的一侧始终保持非固化状态,从而达到最佳的防腐性能。防蚀带具有良好的密封性,可以将金属表面与水分、盐分、空气等腐蚀性因子隔离。此外,还具有良好的阻燃性和耐候性。防蚀膏和防蚀带具有类似的成分,可以紧密复合在一起,因此联合起来使用,防腐效果更佳。

外防护剂涂刷在防蚀带表面,用来加速防蚀带表层干燥、固化。此外,其中含有珠光体成分,可折射紫外线,具有较好的耐紫外老化性能。

1.3 腐蚀试样检测与分析

腐蚀速率测量采用失重法,腐蚀产物的清洗采用如下方法^[18]:量取 500 mL 盐酸溶液和 3.5 g 六次甲基四胺,加蒸馏水配制成 1 000 mL 溶液,将试片置于其中浸泡 10 min 后,清洗试样表面,去除腐蚀产物。用扫描电子显微镜 (Regulus S-3400N, Japan) 观察腐蚀产物的微观腐蚀形貌,使用 X 射线衍射仪 (Bruker D8, Germany) 及 X 射线光电子能谱 (ESCALAB 250xi, America) 对腐蚀产物的相组成及元素种类和价态进行分析。

2 结果与讨论

2.1 腐蚀宏观形貌分析

高强螺栓挂样前原始照片如图 2 所示,高强螺栓呈黑色,经 OTC 包覆后呈银白色。在三亚大气腐蚀试验站曝晒 6 a (见图 3),未保护的高强螺栓表面被棕红色的腐蚀产物覆盖,经 OTC 包覆的螺栓表面仍呈银白色,包覆层仅发生轻微的褶皱变形 (见图 4)。



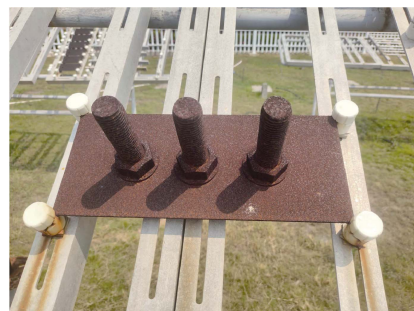
图 2 挂样前照片

Fig.2 Original photos before exposure



图 3 在三亚大气腐蚀试验站投试 6 a 后照片

Fig.3 Photos after exposure for 6 a in Sanya atmospheric corrosion test site



a 未保护的高强螺栓



b OTC 包覆高强螺栓

图 4 高强螺栓宏观形貌

Fig.4 Macro-morphology of high-strength bolt: a) unprotected high-strength bolt; b) OTC coated high-strength bolt

2.2 腐蚀速率分析

相对于未保护的螺栓被棕红色腐蚀产物覆盖,经 OTC 保护的螺栓仅在底部有少量棕红色腐蚀产物。将未保护和 OTC 包覆的螺栓经酸洗清理腐蚀产物,未保护的高强螺栓清洗后呈灰白色 (如图 5 所示),OTC 包覆的高强螺栓清洗后仍可见黑色基体表面 (如图 6 所示)。分析质量损失数据可知,OTC 包覆的高强螺栓 6 a 腐蚀速率为未保护高强螺栓腐蚀速率的 1/15 左右,OTC 包覆技术对螺栓起到很好的保护效果。

2.3 腐蚀产物形貌和成分分析

未加保护的高强螺栓表面腐蚀产物的 SEM 形貌如图 7a 所示。可以看出,锈层呈现出较为致密的片状结构,表面有一些裂纹。经 OTC 保护的螺栓表面几乎没有腐蚀 (见图 7b),表面较为平整,仍呈现原有的黑色基体形貌。



a 清洗前

b 清洗后

图 5 未保护的高强螺栓清洗腐蚀产物前后形貌对比

Fig.5 Comparison of morphology of unprotected high-strength bolts before and after removing corrosion products: a) before cleaning; b) after cleaning



a 清洗前

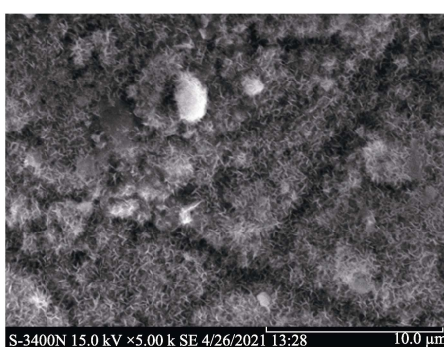
b 清洗后

图 6 OTC 包覆的高强螺栓清洗腐蚀产物前后形貌对比

Fig.6 Comparison of morphology of OTC coated high-strength bolts before and after removing corrosion products: a) before cleaning; b) after cleaning



a 未保护螺栓



b OTC 保护螺栓

图 7 螺栓表面腐蚀产物 SEM 形貌

Fig.7 SEM images of corrosion products on unprotected high-strength bolt surface: a) unprotected bolts; b) OTC protected bolt

未保护的螺栓表面的腐蚀产物 XRD 分析结果如图 8 所示。结果表明,其主要成分为 α -FeOOH、 β -FeOOH、 γ -FeOOH、 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 等^[19-26]。螺栓表面 XPS 分析如图 9 所示,腐蚀产物主要由 Fe、O 和少量的 Cl 等元素组成。有研究表明^[18],在含有 Cl^- 的薄液膜环境下,会促进 β -FeOOH 的形成。 β -FeOOH 晶体具有隧道结构,隧道中通常含有 Cl^- ,晶体表面也吸附 Cl^- 。该腐蚀产物对基体的危害极大,是活性腐蚀的主要特征之一^[20,27]。通过窄峰扫描分析(见图 9b)可知,Fe 元素主要以 FeOOH、FeO 和 Fe_2O_3 等形式存在,FeOOH 占比最高(51.42%),与 XRD 的结果基本一致。

未保护垫片和 OTC 包覆的垫片清洗腐蚀产物后表面激光共聚焦分析结果如图 10、11 所示。可以看

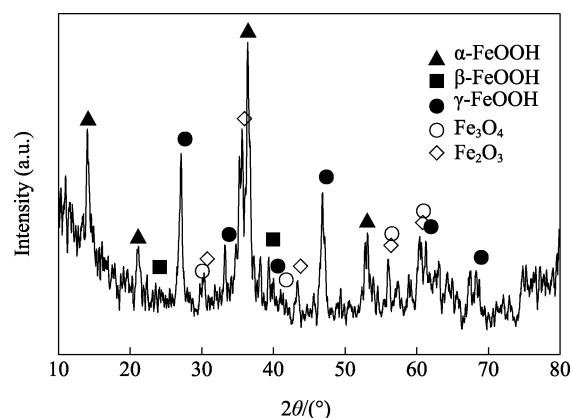


图 8 未保护高强螺栓表面的腐蚀产物 XRD 谱
Fig.8 XRD spectrum of corrosion products on unprotected high-strength bolt surface

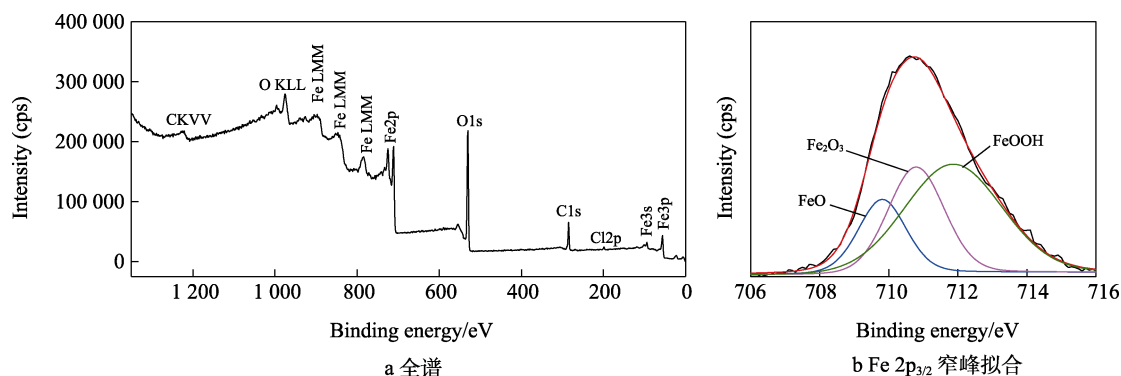


图9 未保护高强螺栓表面 XPS 分析

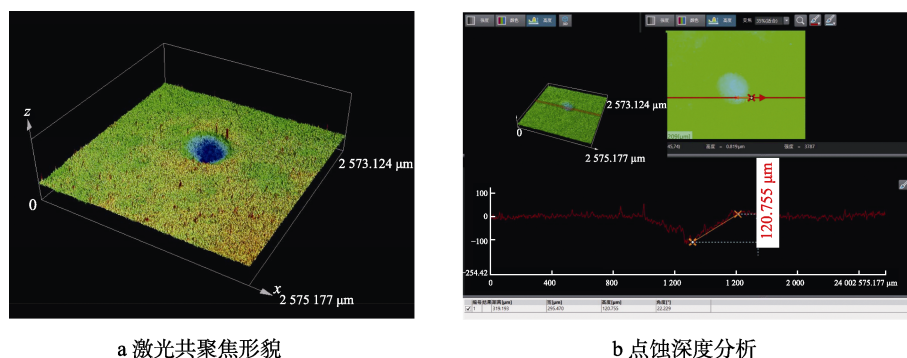
Fig.9 XPS analysis of unprotected high-strength bolt surface: a) full spectrum; b) Fe 2p_{3/2} narrow peak fitting

图 10 未保护垫片清洗腐蚀产物后表面激光共聚焦分析

Fig.10 LSCM analysis of surface after removing corrosion products of unprotected gasket: a) LSCM morphology; b) analysis of pitting depth

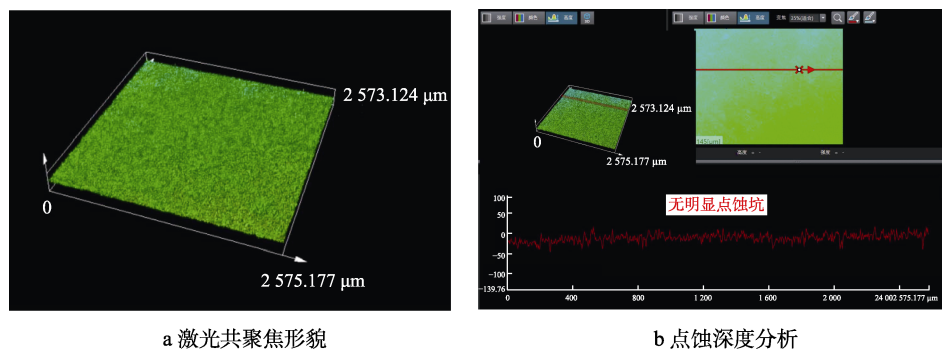


图 11 OTC 包覆的垫片清洗腐蚀产物后表面激光共聚焦分析

Fig.11 LSCM analysis of surface after removing corrosion products of OTC coated gasket: a) LSCM morphology; b) analysis of pitting depth

出,在热带海洋大气环境下,未保护的螺栓垫片表面出现严重的局部腐蚀,最深的点蚀坑达 120 μm 以上,OTC 包覆的垫片表面未出现明显腐蚀坑。这表明 OTC 包覆技术对螺栓起到了很好的保护作用。

3 结论

OTC 技术表面处理要求低,柔软,粘合力好,能够适应于任何形状的结构表面,施工工艺简单,节省施工时间,并且防护寿命长,综合防腐蚀费用低。

OTC 防护技术由氧化聚合型防蚀膏、氧化聚合型防蚀带和外防护剂 3 层紧密相连的保护层组成。防

蚀膏中包含的复合防锈剂能将钢铁表面未处理尽的铁锈转化成铁的络合物保护膜,起到转锈、防锈双重作用;氧化聚合型防蚀带表面通过氧化聚合作用形成坚韧的皮膜,而紧贴钢结构的一侧始终保持非固化状态,防蚀带具有良好的密封性,可以将金属表面与水分、盐分、空气等腐蚀性因子隔离,从而达到良好的防腐性能。外防护剂涂刷在防蚀带表面,用来加速防蚀带表层干燥、固化,而且其中含有珠光体成分,可折射紫外线,具有良好的耐紫外老化性能,从而保障 OTC 技术的长效防腐。

高强螺栓在亚热带海洋大气环境腐蚀严重,腐蚀产物主要为 α-FeOOH、β-FeOOH、γ-FeOOH、Fe₃O₄

和 Fe_2O_3 等,其中 $\beta\text{-FeOOH}$ 晶体结构中含有 Cl^- ,会加速基体腐蚀。螺栓垫片可见局部腐蚀,点蚀深度最深达 $120\text{ }\mu\text{m}$ 。

在三亚海洋大气腐蚀试验站的6a大气曝晒试验证明,氧化聚合型包覆防腐涂层体系具有优良的耐腐蚀性能,仅在底部出现少量棕色物质,大部分仍呈现原有的黑色基体表面,OTC包覆螺栓6a的腐蚀速率约为未保护螺栓的腐蚀速率 $1/15$,起到了很好的腐蚀保护作用。目前此项技术已应用于国内多个港口码头、跨海大桥和电厂的异型钢结构,防腐蚀效果良好。

致谢:感谢山东省腐蚀科学重点实验室支持;感谢中国船舶重工集团公司第七二五研究所船舶材料验证试验中心海洋环境腐蚀检验站提供场地支持。

参考文献:

- [1] 侯保荣. 中国腐蚀成本[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
HOU Bao-rong. The Cost of Corrosion in China[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [2] 张世艳, 张伦武, 杨小奎, 等. 典型螺栓/螺母装配件湿热海洋大气环境适应性研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 151-156.
ZHANG Shi-yan, ZHANG Lun-wu, YANG Xiao-kui, et al. Adaptability Research of Typical Bolt/Nut Assembly Parts in Humid and Hot Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 151-156.
- [3] 马红杰, 朱新远, 薛红艳. 316L 不锈钢螺栓腐蚀断裂分析及防护建议[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2021, 38(1): 42-46.
MA Hong-jie, ZHU Xin-yuan, XUE Hong-yan. Corrosion Fracture Analysis of 316L Stainless Steel Bolt and Protection Suggestions[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2021, 38(1): 42-46.
- [4] 方旭, 李智强, 张晓, 等. 核电厂海水阀门螺栓腐蚀原因分析及解决措施[J]. 全面腐蚀控制, 2021, 35(8): 89-91.
FANG Xu, LI Zhi-qiang, ZHANG Xiao, et al. Cause Analysis and Suggestion of Seawater Valve Bolt Corrosion in Nuclear Power Plant[J]. Total Corrosion Control, 2021, 35(8): 89-91.
- [5] 李岩, 房海峰, 孙作峰, 等. 风电场塔筒螺栓腐蚀分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(12): 79-88.
LI Yan, FANG Hai-feng, SUN Zuo-feng, et al. Analysis of Corrosion of Bolts in Wind Power Tower Tube[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(12): 79-88.
- [6] 刘小辉, 单广斌. 沿海工业大气环境下的不锈钢螺栓腐蚀开裂原因分析[J]. 石油化工设备技术, 2014, 35(2): 31-33.
LIU Xiao-hui, SHAN Guang-bin. Failure Analysis of the Stainless Steel Bolt Fracture in the Coastal Industrial Atmospheric Environment[J]. Petrochemical Equipment Technology, 2014, 35(2): 31-33.
- [7] 李伟光, 孔全兴, 杨宏欢, 等. 核电站螺栓腐蚀与防护[J]. 全面腐蚀控制, 2019, 33(4): 62-65.
LI Wei-guang, KONG Quan-xing, YANG Hong-huan, et al. Corrosion and Protection of Bolt in a Nuclear Power Plant[J]. Total Corrosion Control, 2019, 33(4): 62-65.
- [8] 黄引萍, 俞晓艳, 王琦. 工程项目钢制螺栓腐蚀成因分析及预防措施[J]. 石油天然气学报, 2019, 41(4): 25-29.
HUANG Yin-ping, YU Xiao-yan, WANG Qi. The Causes and Preventive Measures of the Steel Bolt Corrosion in Engineering Project[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2019, 41(4): 25-29.
- [9] 甘徐. 电力杆塔地脚螺栓的防腐处理研究[J]. 电气开关, 2021, 59(5): 58-60.
GAN Xu. Research on Antiseptic Treatment of Power Tower Anchor Bolts[J]. Electric Switchgear, 2021, 59(5): 58-60.
- [10] 周志飞. 螺栓防锈帽在装卸机械上的应用[J]. 铁道货运, 1998, 16(4): 35.
ZHOU Zhi-fei. Application of Bolt Rust-Proof Cap in Loading and Unloading Machinery[J]. Railway Freight Transport, 1998, 16(4): 35.
- [11] 王珣, 徐定逸. 新型热扩散渗锌紧固件的复杂腐蚀环境下耐腐蚀性研究[J]. 机电产品开发与创新, 2022, 35(1): 176-180.
WANG Xun, XU Ding-yi. Corrosion Resistance of New Zinc Alloy Thermal-Diffusion Fasteners under Complex Corrosive Environment[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2022, 35(1): 176-180.
- [12] 许雪冬, 李万江, 陈心欣, 等. 环保低成本酸性电镀镍镍紧固件腐蚀试验研究[J]. 环境技术, 2021, 39(3): 38-41.
XU Xue-dong, LI Wan-jiang, CHEN Xin-xin, et al. Study on Corrosion Test of Environment Friendly and Low Cost Acid Zinc-Nickel Plating Bolts[J]. Environmental Technology, 2021, 39(3): 38-41.
- [13] 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 Terminal[J]. Chemical Engineering Design, 2020, 30(3): 25-26.
- [14] 李继伟, 杨振宇, 翟欢乐. 钢结构连接螺栓锰系磷化及磷化膜的耐蚀性[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(1): 50-56.
LI Ji-wei, YANG Zhen-yu, ZHAI Huan-le. Manganese Phosphating of Steel Structure Connecting Bolt and Corrosion Resistance of Phosphating Film[J]. Plating and Finishing, 2022, 44(1): 50-56.
- [15] 侯保荣. 大气区钢结构氧化聚合型包覆防腐技术[J]. 中国材料进展, 2014, 33(2): 101-105.
HOU Bao-rong. Oxidative Polymerization Coated Anti-Corrosion Technology to Steel Structure at Atmospheric Zone[J]. Materials China, 2014, 33(2): 101-105.
- [16] 钱洲亥, 王静, 侯保荣, 等. 应用在异型钢结构上的氧化聚合型包覆防腐技术[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(2): 110-113.
QIAN Zhou-hai, WANG Jing, HOU Bao-rong, et al. Oxidative Polymerization-Type Covering Anticorrosion

- Technology for Irregularly-Shaped Steel Structure[J]. Electroplating & Finishing, 2017, 36(2): 110-113.
- [17] 杨源远, 孙丛涛, 陈明忠, 等. 氧化聚合型包覆防腐技术在煤矿中的应用[J]. 四川建筑, 2020, 40(3): 256-258.
- YANG Yuan-yuan, SUN Cong-tao, CHEN Ming-zhong, et al. Application of Oxidation Polymerization Coating Anticorrosion Technology in Coal Mine[J]. Sichuan Architecture, 2020, 40(3): 256-258.
- [18] GB/T 16545—2015, 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除[S].
- GB/T 16545—2015, Corrosion of Metals and Alloys—Removal of Corrosion Products from Corrosion Test Specimens[S].
- [19] KAMIMURA T, NASU S, SEGI T, et al. Influence of Cations and Anions on the Formation of B-FeOOH[J]. Corrosion Science, 2005, 47(10): 2531-2542.
- [20] 张然. 铁质文物腐蚀产物 β -FeOOH的产生及危害[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(11): 1-11.
- ZHANG Ran. Formation and Hazards of Corrosion Product B-FeOOH on Iron Cultural Relics[J]. Corrosion & Protection, 2021, 42(11): 1-11.
- [21] 赵寻, 苏嵘荣. 某核电厂龙门架高强度螺栓腐蚀情况分析[J]. 建材与装饰, 2018(41): 228-229.
- ZHAO Xun, SU Rong-rong. Corrosion Analysis of High Strength Bolts of Gantry in a Nuclear Power Plant[J]. Construction Materials & Decoration, 2018(41): 228-229.
- [22] 邱萍, 孙绪鲁, 修林冉, 等. 海水环境中 304 不锈钢螺栓腐蚀及使用寿命研究[J]. 材料保护, 2021, 54(12): 79-85.
- QIU Ping, SUN Xu-lu, XIU Lin-ran, et al. Study on Corrosion and Service Life of 304 Stainless Steel Bolts in Seawater Environment[J]. Materials Protection, 2021, 54(12): 79-85.
- [23] 杨波, 俞少行, 井建鑫, 等. 滨海发射场低温管路法兰连接螺栓环境腐蚀断裂失效机理[J]. 装备环境工程, 2021, 18(9): 86-92.
- YANG Bo, YU Shao-xing, JING Jian-xin, et al. Failure Mechanism of Environmental Corrosion and Fracture of Flange Connection Bolts of Low-Temperature Pipelines in Coastal Launch Site[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(9): 86-92.
- [24] 文娟, 吴其荣, 张卢喻, 等. 钢结构桥梁的失效高强螺栓腐蚀产物特性研究[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 321-328.
- WEN Juan, WU Qi-rong, ZHANG Lu-yu, et al. Research on the Corrosion Products of Fracture Failure High-Strength Bolt Used in Steel Structure Bridge[J]. Surface Technology, 2021, 50(5): 321-328.
- [25] 夏明磊, 罗懿. 某阀门螺栓断裂失效分析[J]. 化工装备技术, 2022, 43(1): 58-61.
- XIA Ming-lei, LUO Yi. Fracture Failure Analysis of a Valve Bolt[J]. Chemical Equipment Technology, 2022, 43(1): 58-61.
- [26] 李昊, 惠卫军, 王娇娇, 等. Cu 元素对 42CrMoV 高强度螺栓钢在模拟大气腐蚀环境下腐蚀行为的影响[J]. 材料保护, 2020, 53(11): 13-20.
- LI Hao, HUI Wei-jun, WANG Jiao-jiao, et al. Effect of Cu Element on the Corrosion Behavior of 42CrMoV High Strength Bolt Steel in Simulated Weathering Environment[J]. Materials Protection, 2020, 53(11): 13-20.
- [27] 居龙, 冯超, 赵劲彪, 等. 42CrMo 高强度螺栓在海洋大气环境中的应力腐蚀开裂风险评估[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(9): 644-649.
- JU Long, FENG Chao, ZHAO Jin-biao, et al. Risk Assessment of Stress Corrosion Cracking of 42CrMo High Strength Steel Bolts in Seacoast Environment[J]. Corrosion & Protection, 2019, 40(9): 644-649.

责任编辑: 刘世忠