

海上风电腐蚀防护技术及应用研究进展

赵雄¹, 岳晓晴², 马璐¹, 张险峰¹, 张一晗^{2*}, 张海兵²

(1. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 100038;

2. 洛阳船舶材料研究所 海洋腐蚀与防护全国重点实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 综合概述了海上风电设施装备腐蚀防护技术及应用方法研究进展。基于海上风电设备腐蚀防护技术的发展进程, 系统归纳了海上风电工程设施在海洋环境下的腐蚀规律的研究, 分析了海上风电腐蚀机理、典型腐蚀特点, 总结了近年来海上风电腐蚀防护技术, 介绍了海上风电工程腐蚀防护应用研究现状, 为助力海上风电腐蚀防护技术发展提供参考。海上风电装备面临多种腐蚀区域影响, 在腐蚀特性及应对策略上 also 存在差异显著, 针对实际工况和结构特点开发综合防护技术将极大改善典型结构腐蚀问题, 海上风电腐蚀防护技术的发展仍面临一定挑战。海上风电结构材料腐蚀规律尚不明确, 腐蚀监测与评估技术薄弱, 海生物污损问题尚无法解决, 海上风电腐蚀防护技术仍需进行系统研究和长远发展。

关键词: 海上风电; 牺牲阳极; 涂层; 腐蚀防护; 腐蚀机理; 电化学

中图分类号: TG172

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)10-0110-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.10.014

Research Progress on Corrosion Protection Technology and Application of Offshore Wind Power

ZHAO Xiong¹, YUE Xiaoqing², MA Lu¹, ZHANG Xianfeng¹, ZHANG Yihan^{2*}, ZHANG Haibing²

(1. Science and Technology Research Institute, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. National Key Laboratory of Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Qingdao 266237, China)

ABSTRACT: The work aims to overview the research progress on corrosion protection technology and application methods for offshore wind power facilities and equipment. Based on the development process of corrosion protection technology for offshore wind power equipment, the corrosion laws of offshore wind power engineering facilities in the marine environment were systematically summarized, the corrosion mechanism and typical corrosion characteristics of offshore wind power were analyzed, the corrosion protection technology for offshore wind power in recent years was summarized, and the current research status of corrosion protection application for offshore wind power engineering was introduced, so as to provide reference for promoting the development of corrosion protection technology for offshore wind power. Offshore wind power equipment was affected by various corrosion areas, and there were significant differences in corrosion characteristics and response strategies. Developing comprehensive protection technologies based on actual working conditions and structural characteristics would greatly alleviate

收稿日期: 2024-06-21; 修订日期: 2024-08-15

Received: 2024-06-21; Revised: 2024-08-15

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目 (202303051)

Fund: Qualification for Research Projects of China Three Gorges Corporation Limited (202303051)

引文格式: 赵雄, 岳晓晴, 马璐, 等. 海上风电腐蚀防护技术及应用研究进展[J]. 装备环境工程, 2024, 21(10): 110-117.

ZHAO Xiong, YUE Xiaoqing, MA Lu, et al. Research Progress on the Preparation and Aging of Nanothermites[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(10): 110-117.

*通信作者 (Corresponding author)

typical structural corrosion problems. The development of offshore wind power corrosion protection technology still faced certain challenges. The corrosion law of offshore wind power structural materials is not yet clear, the corrosion monitoring and evaluation technology is weak, and the problem of marine biofouling cannot be solved. The corrosion protection technology for offshore wind power still needs systematic research and long-term development.

KEY WORDS: offshore wind power; sacrificial anode; coating; corrosion protection; corrosion mechanism; electrochemistry

风能资源作为一种由太阳能转化形成的清洁可再生能源,其开发利用成本较低,具备良好的开发前景。与地面风能相比,海洋风能的风力水平运动分量来看,速度更快;从风力方向来看,流动更平稳,且我国有超四百万平方千米的可利用海洋表面积,海洋风能资源高于地面风能资源的 2 倍^[1-4]。大力推进发展海上风电产业,增大风力涡轮机电力产量,可以有效地缓解电力需求紧张的问题。同时,海上风电也是一种环境友好型能源,可以不受土地空间、地形地貌限制,能够减小周围地区的噪声污染。为了加快能源转型进程,助力“双碳”目标早日实现,我国大力支持海上风电技术的发展^[5-8]。

海上风电电气设备、塔筒、叶片、导管支架等长期服役于高温高湿的海洋环境,由于海水的强腐蚀性,使得上述主要结构件极易出现腐蚀问题,进而严重制约海上风电技术的发展进程。但是,关于海上风电工程设施在海洋环境下的腐蚀规律的研究较少,且不系统^[9-11]。因此,确保海上风电设备在严苛的海洋环境中的正常服役,减缓风电机组关键部件的腐蚀行为,成为了海上风电腐蚀防护技术研究的重要课题。

本文在深入分析海上风电腐蚀环境、典型腐蚀特点的基础上,归纳总结了近年来海上风电腐蚀防护技术及设计原则,梳理了海上风电桩基基础及设备组件的腐蚀防护技术要求和设计准则,介绍了海上风电工程腐蚀防护应用研究现状,并对海上风电腐蚀防护技术尚存的问题进行了总结与展望,为助力海上风电腐蚀防护技术发展提供参考。

1 海上风电腐蚀问题

海洋环境是腐蚀性最为苛刻的自然环境。由于海水挥发和风浪作用,海洋大气中氯化钠等盐含量大幅增加,盐度均值可达 60 mg/m³,而陆地大气中盐含量仅为 0.8 mg/m³。同时,海洋大气环境的湿度也明显高于陆地环境。在高盐高湿环境下,金属的腐蚀速率大幅提高,为内陆大气环境的 4~5 倍^[7]。海洋环境的高盐高湿特征因素对风电装备电器元件会产生明显的腐蚀危害性,会造成电路板上导线载流量减少,生成的腐蚀产物能够附着在电气触点处导致接触不良,甚至发生断路,进而可能造成更加严重的电气设备故障及经济损失。海洋环境还存在强紫外辐射特征,容易加速非金属叶片、非金属结构件以及防护涂层的老化失效^[12]。

1.1 海上风电腐蚀环境

海上风电工程设施面临的腐蚀环境区域较多,包括海洋大气区、浪花飞溅区、海水潮差区、海水全浸区和海底泥下区^[13]。通过参考 ISO 9223 和 ISO 12944-2 等标准,对各分区环境的腐蚀性进行分级,其中外部大气区、飞溅区和潮差区是强腐蚀性环境,见表 1。

表 1 各分区环境腐蚀性分级
Tab.1 Environmental corrosion classification for each subarea

序号	环境分区	环境腐蚀性分类
1	内部大气区	C4
2	外部大气区	C5/CX
3	飞溅区、潮差区	IM2/CX
4	全浸区	IM2/IM4
5	海泥区	IM3/IM4

1.2 海上风电的典型腐蚀部位

海上风电设施为高耸结构,贯穿较多海洋腐蚀区,在不同的海洋腐蚀区,海上风电设施所面临的腐蚀问题有所不同,如图 1 所示。海上风电各部分所处的海洋腐蚀区域的不同,在腐蚀特性及应对策略上也存在差异显著。如常见的海洋大气区,由于湿度相对较大,且大气环境中盐分含量较高,基础结构材料表面状态受到较大影响,腐蚀速率异常增大,相较陆地环境增大 5 倍左右,而浪花飞溅区则会频繁遭受海水浪花冲击进而导致材料表面发生局部腐蚀等多种腐蚀行为。其中,对于海洋大气区的风机叶片、机舱、塔筒等结构,主要受高盐高湿环境下的局部点蚀、电偶腐蚀和缝隙腐蚀等作用,易引发叶片老化开裂等问题。处于浪花飞溅区的风电基础是腐蚀重点部位^[14],此区域面临干湿交替、盐分富集、大气环境引起的日照和盐分变化以及生物附着等复杂问题,处于最严苛的腐蚀环境,导致风电基础钢桩更易出现严重的腐蚀老化和更为敏感的疲劳损伤现象^[15-16]。潮差区结构部分由于海洋潮汐作用使得其表面氧含量充足,材料表面微区易成为氧浓差电池的阴极区,腐蚀情况会得到一定缓解。全浸区的钢结构主要发生海水的电化学腐蚀,在水面以下结构材料同时还会受到海流冲刷和微生物腐蚀等多重作用影响。在洋流作用下,静水压增大伴随着水流速度的降低,此时海水温度及含氧量同

时降低,微生物及碱性离子浓度下降,材料腐蚀程度得到一定减缓。海上风电设施底部多位于海泥区,此区域的腐蚀情况整体轻微。但当海泥中存在一定量的硫酸盐还原菌时,其会对钢材表面造成比较严重的微生物腐蚀,影响材料服役寿命。

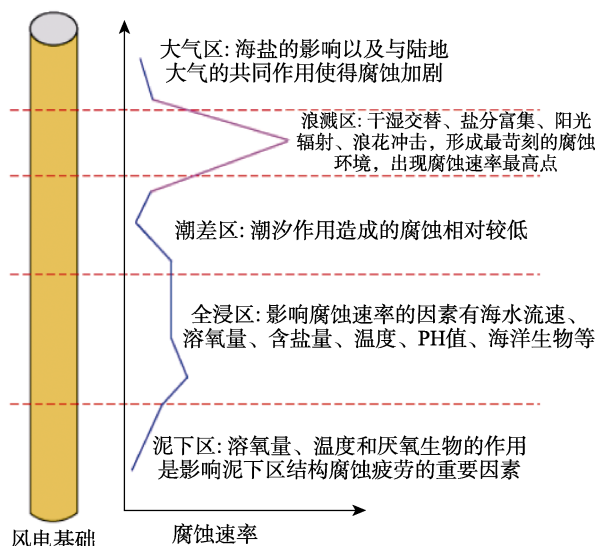


图1 不同海洋腐蚀区海上风电的典型腐蚀
Fig.1 Typical corrosion of offshore wind power in different marine corrosion areas

2 海上风电工程设施腐蚀防护技术

海洋工程设施的腐蚀防护通常从介质环境与结构材料2个方面入手^[17],目前大多数海上风电腐蚀防护方案采用针对二者的综合腐蚀防护来达到防腐蚀效果。从介质环境方面入手,腐蚀环境控制是主要手段,通过环境改善(环境控制等)、环境阻隔以及其他方法来达到腐蚀环境控制的目的。其中腐蚀环境的改善通常采取增加机组除湿设备、盐雾过滤装置等方式实现温度、湿度及盐分等环境参数控制(介质环境替换),同时也采用缓蚀剂或阻锈剂优化腐蚀环境,而环境阻隔则通过涂刷有机涂层、无机涂层、包覆层、内衬层(衬里)来实现介质隔离。

对于结构材料方面,可以选择耐蚀性材料或对材料进行表面强化,从预留腐蚀裕量、避免缝隙与积液、避免异金属连接、避免应力集中角度出发,设计防腐蚀的结构,采用阴极保护或者阳极保护的电化学保护技术来进行腐蚀防护。结构材料的维护、保养与维修也是有效的腐蚀防护手段。最后腐蚀环境的状态、材料的维护以及电化学保护状态等均需要通过腐蚀监测技术来保障。海上风电腐蚀防护技术的应用和发展应充分考虑所处环境特征和风电机组的设计使用年限。常规的腐蚀控制手段主要包括涂料保护、金属热喷涂、热浸镀锌、阴极保护、包覆防腐和预留腐蚀裕量等,其中防腐涂层和阴极保护使用较为广泛^[18-20]。

2.1 防腐涂层技术

防腐涂层是海洋环境下金属结构使用最多、应用范围最广的腐蚀防护技术,目前已形成依据服役环境分类的多种复合涂层体系及技术方案,见表2。海上风电防腐涂层的基本要求:满足长寿命防护需求(设计寿命20 a以上);抗海洋大气、海浪冲击和海水浸泡;有良好的附着性、耐蚀性、耐候性;能适应干湿交替变化和温度的冷热变化;水下涂料与阴极保护相兼容,耐阴极剥离;满足其他功能需求,如防结冰等^[21-24]。

表2 各分区常用防腐涂层

Tab.2 Anti-corrosion coating commonly used in each subarea

序号	分区结构	常用防腐涂层体系
1	大气区-钢结构	环氧富锌底漆+环氧中间涂层+聚氨酯/氟碳面漆
2	大气区-叶片	叶片腻子、聚氨酯底漆+弹性聚氨酯面漆、抗结冰涂料
3	浪花飞溅区	600 μm 以上环氧漆或环氧玻璃鳞片漆
4	潮差区	环氧底漆+氟碳面漆,中间层加玻璃布
5	全浸区	环氧重防腐底漆+静态防污漆
6	海泥区	环氧重防腐底漆、环氧玻璃鳞片涂料等

目前使用较多的防腐涂层仍以国外品牌为主,近年来,国产品牌也得到了快速发展。陈川等^[25]开展了我国严酷海洋环境下的海上风电涂料环境适应性、耐久性的针对性研究,发现我国各个厂家的防腐涂层涂料样品各方面性能差异不大,涂层耐老化性能、耐蚀性能均较好,较为成熟,但在施工工艺、涂层一致性方面存在短板和差异,产品质量需要严格控制,与国外热销产品存在一定差距。

2.2 阴极保护技术

阴极保护是通过向被保护结构物施加外加阴极电流,使被保护结构物产生阴极极化成为阴极,使金属表面的电子迁移过程得到有效抑制,进而减缓腐蚀行为发生的一种技术手段。通过区分阴极保护电流的来源,可分为牺牲阳极和外加电流保护技术^[26],牺牲阳极因简单、可靠、不消耗电源等优势而使用较为广泛。

海上风电实际工程中通常采用牺牲阳极保护、外加电流保护、涂层相互结合的保护技术对海上风电设备进行保护,设计一般参照 NORSOK M-501 及 ISO 12944 防腐体系。我国研究人员^[27]研究了外加单一电流阴极保护 (ICCP) 系统、单一牺牲阳极保护 (SACP) 系统以及 SACP 与 ICCP 系统联合保护 3 种工况下对

3.2 浪花飞溅区/潮差区基础结构防腐方法

海上风电设施主要支撑结构多位于飞溅区及潮差区,主要采用防护涂层或包覆层进行腐蚀防护^[32-34]。支撑结构一般下段固定于海床中,结构表面为未涂覆耐蚀涂层的裸露金属;中段、上段接触海水、盐雾大气,依靠涂层体系与腐蚀介质隔绝。涂层体系包括环氧底漆加厚膜型环氧玻璃鳞片涂层体系、无机富锌加环氧粉末涂层体系等;矿脂包覆层具有良好的防护性能,且施工简单方便。浪花飞溅区/海水潮差区的钢结构是腐蚀最严重部分。常用的腐蚀控制方法包括^[35]:

1) 预留腐蚀裕量,主要指在设计初期综合考虑结构材料腐蚀速率及使用寿命,增加金属材料的厚度同时保证整体合理性和安全性。

2) 有机防腐涂层,主要包括富锌涂料和聚氨酯涂料等,涂层具体指标要求应遵循 GB/T 33314—2016 及 NB/T 31006—2011 相关标准。

3) 热喷涂金属涂层,主要选用铝合金或锌合金涂层材料进行施工,施工过程中应保证金属涂层表面均一致密,无气孔或基体裸露的斑点,避免出现金属熔融颗粒在表面附着力下降等问题,影响涂层的服役年限。

4) 包覆层,常用包覆材料有胶泥、防锈油脂、高聚物胶带、热熔塑料等。包覆技术可有效地隔绝海水、氧等腐蚀介质的侵入,具备良好的腐蚀防护效果和一定周期的使用寿命。郑直等^[36]针对莱州市海上风电单桩基础的结构特点,采用一种风电桩基新型岸上包覆防腐施工技术,减缓了关键结构腐蚀速率达到25%以上,取得了较好的防护效果。

3.3 塔筒防腐方法

塔筒结构处于海洋大气环境中,最为经济有效的防腐方案是采用长效防腐涂层体系,包括底漆、中间漆和面漆,其中应用较多的是有机或无机防腐涂层体系,也可采用金属镀层和防腐涂层联合保护^[37]。然而,面漆在塔筒结构中的使用时对其耐老化性能要求较高,聚氨酯面漆、氟碳面漆耐候性较好,目前广泛用于南海等强光照环境的海上风电工程。依据海上风电钢结构防腐标准(NB/T 31006—2011),海洋大气区底漆、中间漆及面漆整体涂层干膜厚度不应小于320 μm,由于塔架外壁长期处于暴晒环境,塔筒面漆的抗紫外线老化性能成为关键技术指标。

塔架内壁的腐蚀情况相对较轻,且内壁可规避紫外线老化的辐照问题,一般采用海洋大气区普遍使用的单一涂层防护体系,如环氧富锌底漆和环氧类面漆,这类涂层漆膜也控制在较小厚度。林辰等^[38]基于循环老化试验方法对四家厂家生产的涂层板进行试验,给出了适用于海洋飞溅区与海洋大气区的涂层体系。

3.4 机舱/轮毂防腐方法

机舱壳体:机舱壳体的建造组装通常使用玻璃钢复合材料,这种复合材料的耐蚀性优异,一般使用吸湿鼓风机对壳体内部进行吹扫,从而杜绝外界空气及腐蚀介质的混入造成表面腐蚀,一定程度上降低了机舱内部结构及设备的腐蚀防护需求。另外,也可采取二甲咪唑、柠檬酸钠等气相缓蚀剂化学品,改善机舱内部的服役环境,从而减缓腐蚀。

结构部件:动力机舱内部的结构部件一般设计尺寸较小,例如机舱支撑底座、内部设备台架等,此类结构一般采用热镀锌或耐蚀涂层进行腐蚀防护。

机械部件:机械部件主要包含主轴、连轴器、偏航轴承、齿轮箱、变桨齿轮等。机械部位在空气中的暴露部位与机舱内部结构部件的防腐方法相同,均采用热镀锌或耐蚀涂层进行腐蚀防护。由于连轴器一般使用高应变弹性材料制成,材料表层防护手段单一,采用预留腐蚀裕量法延缓腐蚀问题。偏航轴承、齿轮箱等精密部件一般在其内部充填防腐润滑油以保护部件正常工作运行。

电气部件:海上风电设施电气部件一般是指电驱动装置、压力变送装置和综合控制系统等组件。其中,电驱动装置内部单元结构通常使用全封闭散热冷却组件,无须采取额外腐蚀防护手段,仅在设备表面涂刷常规耐蚀涂层即可;变压器则一般选取浇注绝缘树脂的方法隔绝空气及腐蚀介质;控制柜及各类动力组件散热需求较低,一般采取阻隔空气的方法削弱腐蚀行为的影响。

3.5 叶片防腐方法

风机叶片是海上风电设备机组捕获风能的重要组件,叶片材质多为玻璃纤维增强复合材料(GRP),这种材料具有较高的机械强度和较好的耐蚀性能,由环氧树脂和聚酯树脂基体组成且成形简易,这种叶片材质从根源上可缓解腐蚀问题。但是在海洋环境应用时,高紫外辐照将成为非金属叶片加速老化的主要原因,并且海洋大气环境中的高含量盐分也容易在叶片表面积聚,导致叶片发生一定程度的腐蚀。此外,雨水、冰雪、杂物等冲击作用也会加速叶片的破坏。

目前,风电叶片的腐蚀防护主要采用涂层防护技术进行保护^[39]。根据相关标准要求,单层涂层干膜厚度应大于335 μm,底漆层应采用环氧型复合底漆,中间漆层为环氧型耐磨漆,面漆层采用丙烯酸聚硅环氧涂料或丙烯酸聚氨酯面漆等。近年来,随着涂层技术发展,底面合一涂料,无溶剂环保涂料,以及抗结冰、抗油污易清洁等功能涂料也得到快速发展,为风电叶片提供了新的防护方案。

其中,针对叶片中腐蚀最严重的叶片前缘部分的腐蚀问题,主要采用防护涂层、防护膜和防护壳等防护手段。国内主要使用防护涂层技术,相关研究也较

多。以不饱和聚酯、亚克力(丙烯酸塑料)为代表的防护膜、防护壳抗蚀效果更好,具备一定耐老化性能,适用于高速叶片在极端天气下的长期暴露。然而由于其生产制造方法繁杂,关键的核心技术目前仍被国外所垄断,国内材料开发研究尚处于起步发展阶段。许楠等^[40]对辽宁、江苏、福建等区域的海上风电场进行了叶片前缘腐蚀及防护现状的调研,从目前已有前缘防护产品的实际应用效果来看,对于叶尖段前缘,防护涂层和防护膜的效果较差,在风电机组全生命周期内需反复进行维修;防护壳相对耐用,但其寿命、可靠性、经济性还没有得到长期现场实测试验验证。

4 结语

海上风电作为一种清洁的可再生的绿色能源,具有广阔的发展前景,但海洋腐蚀环境对海上风电设备的腐蚀防护提出了严峻的挑战。目前的腐蚀与防护技术还存在以下问题:

1)海上风电装备结构材料的腐蚀规律尚不明确。有关海上风电关键结构在多因素海洋环境下的腐蚀行为规律及其对关键结构综合力学性能影响的探究不足,无法明确海上风电金属复杂结构在不同腐蚀区域的共性规律。

2)腐蚀监测与评估技术薄弱。目前海上风电的腐蚀监测以定期人工检视和保护电位测试为主,对阴极保护系统和腐蚀监测系统的全生命周期研究较少,基于自动化、数字化和智能化的全面监测与安全评估技术仍在发展中。

3)海生物污损问题尚无法解决。海上风电基础部分长期浸泡于海水中,海生物污损无法避免,污损增加基础的结构载荷,并加剧金属结构的微生物腐蚀。现有防污涂料的有效寿命5~7年,无法满足风电长周期的防污需求。

腐蚀防护作为海上风电安全服役的关键保障技术,依然任重道远,亟需进一步发展完善。

参考文献:

- [1] 蒋瑜, 郭明权, 黄长军, 等. 2000—2019年中国海外电力项目信息数据集[J]. 中国科学数据, 2019, 4(4): 14-21.
JIANG Y, WU M Q, HUANG C J, et al. A Dataset of China's Overseas Power Projects(2000-2019)[J]. China Scientific Data, 2019, 4(4): 14-21.
- [2] 于学华. 助力“一带一路”国家开展电力综合资源规划[J]. 能源研究与利用, 2018(6): 5-6.
YU X H. Help the “Belt and Road” Countries to Carry out Comprehensive Power Resource Planning[J]. Energy Research & Utilization, 2018(6): 5-6.
- [3] 任伟, 陈有登, 谢志猛, 等. 海上风电防腐蚀研究现状与前景[J]. 应用能源技术, 2022(2): 49-52.
REN W, CHEN Y D, XIE Z M, et al. Research Status and Prospect of Corrosion Prevention for Offshore Wind Power[J]. Applied Energy Technology, 2022(2): 49-52.
- [4] BILGILI M, YASAR A, SIMSEK E. Offshore Wind Power Development in Europe and Its Comparison with Onshore Counterpart[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(2): 905-915.
- [5] PRICE S, FIGUEIRA R. Corrosion Protection Systems and Fatigue Corrosion in Offshore Wind Structures: Current Status and Future Perspectives[J]. Coatings, 2017, 7(2): 25.
- [6] KOH J H, NG E Y K. Downwind Offshore Wind Turbines: Opportunities, Trends and Technical Challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 54: 797-808.
- [7] 陈俊鹏. 解读海上风电的防腐蚀研究与应用现状[J]. 建材与装饰, 2020(9): 213-214.
CHEN J P. Interpretation of the Research and Application Status of Anti-Corrosion of Offshore Wind Power[J]. Construction Materials & Decoration, 2020(9): 213-214.
- [8] 郑崇伟, 李崇银. 海上风能等级区划研究: 瓶颈与对策[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(4): 654-665.
ZHENG C W, LI C Y. Research on Offshore Wind Energy Classification: Bottlenecks and Countermeasures[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(4): 654-665.
- [9] 许雪冬, 黄开云. 我国海上风力发电设备环境条件与环境技术要求分析[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5): 36-41.
XU X D, HUANG K Y. Analysis of Environmental Conditions and Requirements for Offshore Wind Power Equipment in China[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 36-41.
- [10] HE Y, CHEN W, DI Z, et al. Overview of Research on Corrosion Detection Technology for Offshore Engineering Facilities[J]. Advances in Hydraulic Engineering, 2023, 3(1): 12-22.
- [11] 王玉飞, 苗顺超, 潘天国, 等. 海上风电腐蚀与防腐检测技术浅探[J]. 材料保护, 2022, 55(11): 178-183.
WANG Y F, MIAO S C, PAN T G, et al. Brief Analysis on Offshore Wind Power Corrosion and Anti-Corrosion Detection Technology[J]. Materials Protection, 2022, 55(11): 178-183.
- [12] 张钢, 冯宝平, 刘碧燕. 浅谈海上风电钢构基础腐蚀疲劳及早期检测[J]. 风能, 2016(1): 60-63.
ZHANG G, FENG B P, LIU B Y. Discussion on Corrosion Fatigue and Early Detection of Offshore Wind Power Steel Structure Foundation[J]. Wind Energy, 2016(1): 60-63.
- [13] 李美明, 徐群杰, 韩杰. 海上风电的防腐蚀研究与应用现状[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(6): 584-589.
LI M M, XU Q J, HAN J. Progress of Corrosion and Protection for Offshore Wind Power[J]. Corrosion &

- Protection, 2014, 35(6): 584-589.
- [14] 陈君, 黄彦良, 侯保荣. 低碳钢在浪花飞溅区的腐蚀防护研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2012, 24(4): 342-344.
CHEN J, HUANG Y L, HOU B R. Research Progress on Corrosion Protection of Low Carbon Steel in Spray Splashing Area[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2012, 24(4): 342-344.
- [15] 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 B R. Anti-Corrosion Technology to Steel Structure in Splash Zone[J]. Materials China, 2014, 33(1): 26-31.
- [16] 张晓丽, 吕平, 梁龙强, 等. 海洋浪溅区钢结构的腐蚀与防护研究进展[J]. 上海涂料, 2016, 54(4): 24-28.
ZHANG X L, LV P, LIANG L Q, et al. The Research Progress on the Corrosion and Protection of Steel Structure in the Marine Splash Zone[J]. Shanghai Coatings, 2016, 54(4): 24-28.
- [17] 胡苏杭, 刘碧燕. 海上风电防腐技术现状及研究方向[J]. 风能, 2019(11): 88-91.
HU S H, LIU B Y. Present Situation and Research Direction of Offshore Wind Power Anti-Corrosion Technology[J]. Wind Energy, 2019(11): 88-91.
- [18] MOMBER A. Corrosion and Corrosion Protection of Support Structures for Offshore Wind Energy Devices (OWEA)[J]. Materials and Corrosion, 2011, 62(5): 391-404.
- [19] 李辉, 赵凯. 海上风电钢管桩石墨烯涂层的防腐性能[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(2): 200-205.
LI H, ZHAO K. Corrosion Resistance of Graphene Coating for Steel Pipe Pile in Offshore Wind Farm[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(2): 200-205.
- [20] 张丽, 王敏, 曹蕃, 等. 海上风电涂层防腐型功能助剂研究进展[J]. 分布式能源, 2021, 6(6): 53-58.
ZHANG L, WANG M, CAO F, et al. Research Progress of Anticorrosive Functional Auxiliaries for Offshore Wind Power Coatings[J]. Distributed Energy, 2021, 6(6): 53-58.
- [21] EOM S H, KIM S S, LEE J B. Assessment of Anti-Corrosion Performances of Coating Systems for Corrosion Prevention of Offshore Wind Power Steel Structures[J]. Coatings, 2020, 10(10): 970.
- [22] MOMBER A W, PLAGEMANN P, STENZEL V. Performance and Integrity of Protective Coating Systems for Offshore Wind Power Structures after Three Years under Offshore Site Conditions[J]. Renewable Energy, 2015, 74: 606-617.
- [23] XU C C, LIU W. Organic-Inorganic Hybrid Corrosion Protection Coating Materials for Offshore Wind Power Devices: A Mini-Review and Perspective[J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2020, 710(1): 74-89.
- [24] SIMANDJUNTAK S, BAUSCH N, FARRAR A, et al. Wind Cr Field Trial and Electrochemical Analysis for Corrosion Detection and Monitoring Offshore Wind Turbine's MP-TP Steel Components[J]. Journal of Marine Engineering and Technology, 2021(6): 311-323.
- [25] 陈川, 黄海军, 王俊, 等. 我国湿热海上风电大气区金属重防腐涂料的性能研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 89-94.
CHEN C, HUANG H J, WANG J, et al. Performance of Metal Heavy-Duty Coating in Atmospheric Zone of Humid-Hot Sea[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 89-94.
- [26] 邱春雷, 冯磊, 贾星杰, 等. 海上风电桩基阴极保护经济技术分析——牺牲阳极与外加电流对比分析[J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(2): 38-41.
QIU C L, FENG L, JIA X J, et al. Economic and Technical Analysis of Pile Cathode Protection for Offshore Wind Power-Comparative Analysis of Sacrificial Anode and Impressed Current[J]. Total Corrosion Control, 2024, 38(2): 38-41.
- [27] 和一帆, 金曦, 孙吉星, 等. 海上风电基础阴极保护技术研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(1): 89-95.
HE Y F, JIN X, SUN J X, et al. Cathodic Protection Technology for Offshore Wind Power Foundation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(1): 89-95.
- [28] 贺敬, 郭文敢, 曾东, 等. 外加电流阴极保护技术在海上风电项目中的应用[J]. 风能, 2021(12): 92-93.
HE J, GUO W G, ZENG D, et al. Application of Impressed Current Cathodic Protection Technology in Offshore Wind Power Projects[J]. Wind Energy, 2021(12): 92-93.
- [29] 王珩, 杨康, 马义明, 等. 锌合金牺牲阳极材料研究综述[J]. 铸造设备与工艺, 2023(6): 55-58.
WANG H, YANG K, MA Y M, et al. Review of the Research on Zinc Alloy Sacrificial Anode Materials[J]. Foundry Equipment & Technology, 2023(6): 55-58.
- [30] 铁元芬. 海上风电钢结构防腐问题以及解决对策探究[J]. 中国设备工程, 2024(6): 132-134.
TIE Y F. Study on Corrosion Protection of Offshore Wind Power Steel Structure and Countermeasures[J]. China Plant Engineering, 2024(6): 132-134.
- [31] 李洪刚, 冯磊, 邱春雷, 等. 海上风电水下钢结构 ICCP 系统与智能调控[J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(3): 59-62.
LI H G, FENG L, QIU C L, et al. ICCP System and Intelligent Regulation of Underwater Steel Structure for Offshore Wind Power[J]. Total Corrosion Control, 2024, 38(3): 59-62.
- [32] 贾文虎, 徐群杰. 海上风电设施防腐蚀技术研究进展[J]. 发电技术, 2023, 44(5): 703-711.
JIA W H, XU Q J. Research Progress of Anti-Corrosion Technology for Offshore Wind Power Facilities[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5): 703-711.
- [33] MOMBER A W. Quantitative Performance Assessment of Corrosion Protection Systems for Offshore Wind Power Transmission Platforms[J]. Renewable Energy,

- 2016, 94: 314-327.
- [34] MOMBER A W, PLAGEMANN P, STENZEL V. The Adhesion of Corrosion Protection Coating Systems for Offshore Wind Power Constructions after Three Years under Offshore Exposure[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2016, 65: 96-101.
- [35] 刘薇, 王佳. 海洋浪溅区环境对材料腐蚀行为影响的研究进展[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2010, 30(6): 504-512.
- LIU W, WANG J. Environmental Impact of Material Corrosion Research Progress in Marine Splash Zone[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2010, 30(6): 504-512.
- [36] 郑直, 张冉, 徐亚茜, 等. 海上风电与海洋牧场新型风电桩包覆防腐技术[J]. *全面腐蚀控制*, 2023, 37(7): 101-106.
- ZHENG Z, ZHANG R, XU Y Q, et al. New Petrolatum Coating Anti-Corrosion Technology for Wind Power Pile of Offshore Wind and Marine Ranching[J]. *Total Corrosion Control*, 2023, 37(7): 101-106.
- [37] 回世翔, 张冉, 徐亚茜, 等. 海上风电机组桩基腐蚀防护研究进展[J]. *全面腐蚀控制*, 2023, 37(9): 8-13.
- HUI S X, ZHANG R, XU Y Q, et al. Research Progress of Pile Foundation Corrosion Protection for Offshore Wind Turbines[J]. *Total Corrosion Control*, 2023, 37(9): 8-13.
- [38] 林辰, 骆汉英, 王志敏. 海上风电塔筒钢构防腐蚀涂料耐循环老化性能研究[J]. *环境技术*, 2024, 42(2): 58-64.
- LIN C, LUO H Y, WANG Z M. Study on Cyclic Aging Resistance of Steel Anticorrosive Coatings for Offshore Wind Turbine Towers[J]. *Environmental Technology*, 2024, 42(2): 58-64.
- [39] LI Y, ZHANG Y, WANG W H, et al. Influence of Corrosion Damage on Fatigue Limit Capacities of Offshore Wind Turbine Substructure[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(8): 1011.
- [40] 许楠, 张祺. 风电机组叶片前缘腐蚀问题及防护技术[J]. *风能*, 2024(3): 62-66.
- XU N, ZHANG Q. Research Progress on the Current Situation and Prevention of Erosion of Key Components of Wind Turbines[J]. *Wind Energy*, 2024(3): 62-66.