

海上风电设施防腐蚀技术研究进展

贾文虎^{1,2}, 徐群杰^{1,2*}

(1. 上海电力大学环境与化学工程学院, 上海市 杨浦区 200090;
2. 上海市电力材料防护与新材料重点实验室, 上海市 杨浦区 200090)

Research Progress of Anti-Corrosion Technology for Offshore Wind Power Facilities

JIA Wenhui^{1,2}, XU Qunjie^{1,2*}

(1. College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Materials Protection and Advanced Materials in Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China)

摘要: 海上风电是一种绿色能源, 目前受到越来越多的关注, 海上风电设施防腐蚀技术已成为当下的研究热点。首先, 阐述了海洋环境中设备的腐蚀机理, 继而介绍了海上风电设施常用防腐技术, 包括防腐涂层、阴极防护、预留腐蚀裕量法等; 然后, 结合实例, 重点介绍了飞溅区新型防腐手段中的热喷涂与矿脂包覆覆层防腐蚀技术; 最后, 简单分析风电设施防腐检测与检修技术, 并介绍了我国已建成并网发电的广东珠海桂山风电项目所用的腐蚀防护手段, 以期为提高我国海上风电防腐水平提供参考。

关键词: 海上风电; 防腐蚀; 热喷涂; 矿脂包覆

ABSTRACT: Offshore wind power is a kind of green energy, which has attracted more and more attention. The anti-corrosion technology of offshore wind power facilities has become a current research hotspot. This paper first expounded the corrosion mechanism of equipments in the marine environment, and then introduced the commonly used anti-corrosion technologies for offshore wind power facilities, including the anti-corrosion coatings, cathodic protection, reserved corrosion allowance method, etc. Then, combined with an example, the anti-corrosion technology of thermal spraying and mineral grease coating in the new anticorrosion method in splash area were introduced emphatically. Finally, it briefly described the anti-corrosion detection and maintenance means of wind power facilities. It also introduced the corrosion protection methods used in Guishan wind power project in Zhuhai, Guangdong, which has been

built into grid connected power generation in China, in order to provide some suggestions for improving the anti-corrosion level of offshore wind power.

KEY WORDS: offshore wind power; anti-corrosion; thermal spraying; petrolatum taped cover

0 引言

据2021年2月全球风能理事会发布的数据显示, 2020年全世界海上风电新增装机容量达6 067 MW, 中国新增装机容量超过3 000 MW, 连续3年位居世界首位, 新增装机量占全球50%以上。截至2020年年底, 全世界海上风电累计装机容量超35 000 MW, 我国超9 000 MW, 约占总装机容量的28%, 目前我国海上风电装机总容量已超越德国, 仅次于英国, 位居世界第二。相较于陆上风电, 海上风电有相当明显优势: 一方面, 海上风电能够较大程度节省对土地资源的占用; 另一方面, 海上风速大, 且风主导方向相对稳定, 从而能量产出更大, 能够较大程度缓解能源紧张问题^[1-3]。加上国家的政策支持, 海上风电技术的发展得到了广泛关注, 与此同时, 海上风电设施防腐蚀问题也日益严重^[4]。在严峻的环境下寻找合适的防腐技术以延长设施的使用寿命成为当下的研究热点。本文介绍了海上风电设施常用防腐技术, 结合工程实例, 分析了各种防腐技术的优劣, 可为提高我国海上风电防腐水平提供参考。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(21673135); 上海市科委项目(17020500700, 19DZ2271100)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (21673135); Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (17020500700, 19DZ2271100).

1 海上风电设施腐蚀机理

海上风电设施大多采用钢结构,也有部分使用钢筋混凝土结构^[5-6]。参照《海港工程钢结构防腐蚀技术规范》JTS 153-3-2007,钢结构设施自下而上分为海泥区、全浸区、潮差区、飞溅区、大气区55个区域(见图1)^[7],其中在飞溅区发生的腐蚀行为最为剧烈^[8-9],潮差区次之。设备腐蚀主要是电化学腐蚀,当钢制结构与海水(电解质溶液)接触时,由于金属表面粗糙,不均匀,易在其表面形成阴极区和阳极区,发生氧化还原反应,形成腐蚀微电池,导致腐蚀的发生^[10]。混凝土结构设施一般自下而上分为水下区、水位变动区、浪溅区和大气区4个区段,浪溅区腐蚀速率最高,破坏最为严重。

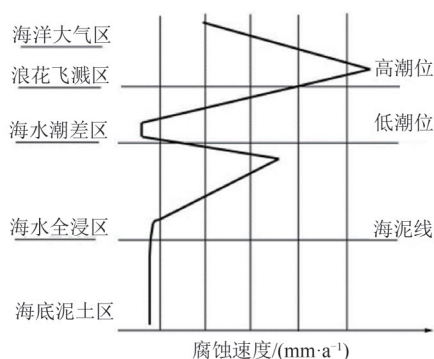


图1 海洋环境腐蚀倾向示意图

Fig. 1 Schematic diagram of corrosion tendency in marine environment

腐蚀产生的主要原因是,氯盐侵入破坏了钝化膜,加速腐蚀反应。此外,混凝土的碳化、海水中硫酸根离子以及镁离子也起到一定程度的破坏作用^[11]。一般来说,盐度、温度、氧浓度越高,pH值越低,腐蚀反应越剧烈。由于海上风电设备钢制结构比例远高于混凝土结构,因此本文以钢制结构介绍为主。

2 常用防腐技术

近年来,海上风电设施防腐保护方法主要有防腐涂层、阴极保护以及预留腐蚀裕量法等,在大气区、飞溅区、潮差区多采用涂层保护,在全浸区以及海泥区则以阴极保护为主^[12]。

2.1 防腐涂层

流动状态下能在物体表面形成薄层,在干燥固化后仍能牢固附着且连续覆盖在物体表面的膜层物质称为防腐涂层^[13]。防腐涂层主要有以下作用:1)屏蔽作用;2)缓蚀钝化作用;3)牺牲阳极保护作用。用作海上风电设施防腐的涂料有环氧类防腐涂料、橡胶类防腐涂料、氟树脂防腐涂料、有机硅树脂涂料以及富锌涂料等,其中环氧类防腐涂料最为常见,市场份额比也最高,另外,玻璃鳞片涂料及玻璃钢也较常使用^[14]。环氧类防腐涂料施工方便、价格低廉,且具有很好的附着能力,防腐性能长效且优异,在飞溅区和潮差区这样恶劣的环境下仍能展现出较好的防腐效果,我国的东海大桥、天津港等风电场都使用了此类涂料。玻璃鳞片属于湿固化环氧重防腐涂料,其防腐机理在于能在金属表面形成大量且致密的薄片层,产生层迭迷宫效应,腐蚀液难以渗透,从而延缓腐蚀。玻璃鳞片具有优良的抗渗透性、耐腐蚀性和良好的阴极相容性。玻璃钢(fiber reinforced plastics, FRP),全称纤维增强塑料,是一种无机材料,具有质轻、耐蚀、成型性好、操作简单、成本低廉等优点,其缺点在于耐磨性能不佳。目前,使用较多的涂层油漆品牌有海虹老人(赫普)、PPG Sigma等^[15]。

范镇宇等^[16]模拟海洋环境,在低碳钢上涂覆环氧树脂,并添加不同量的环氧化棕榈油酸(epoxidized palm olein, EPO)进行30天检测,结果显示,添入适量的EPO对涂层影响不大,且能够降低成本,产生良好的经济效益。

Momber等^[17]对海上风电中常用的聚氧树脂、聚硅氧烷、玻璃鳞片、聚氨酯等13种常用有机涂层物质在不同法向力下进行摩擦磨损试验,结果表明,环氧树脂的耐摩擦性能突出,且成本效益最高。

相较于阴极保护及预留腐蚀裕量法,防腐涂层的最大优势在于成本低廉、经济效益高。

2.2 阴极保护技术

阴极保护的基本原理是给金属补充大量电子,使被保护金属整体处于一种电子过剩的状态,其表面各点到达同一负电位,金属原子难以失去电

子,自然难以变成离子溶于溶液,从而实现腐蚀防护。阴极保护技术有牺牲阳极的阴极保护和外加电流的阴极保护2种。牺牲阳极的阴极保护也称为保护器保护法,是将活性金属(电极电势较低的金属)与钢构本体电性连接,形成原电池,依靠活性金属不断腐蚀溶解所产生的电流,保护钢构本体。牺牲阳极法维护工作量较小,过保护可能小,相对较为安全,且常与防腐涂层配合使用,涂层作为额外的防腐补偿,可减缓牺牲阳极的消耗。外加电流法通过外加可调直流电源的方式实现,将被保护金属(钢铁)与电源负极相连作为阴极,电源正极则与废金属(一般采用高硅铸铁等)相连作阳极,充当辅助电极,使阴极金属处于保护电位,从而对阴极也即钢铁本体实施保护。

牺牲阳极法的主要优点是系统较为简单、无需外接电源,缺点在于设计安装后相关保护参数无法随意进行调整,且在使用过程中阳极金属会不断地溶解消耗^[18],所以需定期更换阳极。对于风电基桩来说,此项工作耗费巨大。外加电流保护法的突出优点是阳极使用寿命长,而且还可根据系统的运行情况实时调整相关参数,更为智能;其缺点是需外加电源,对调节、控制系统的稳定性、可靠性有着很高的要求^[19]。目前国内外风电行业采用较多的仍然是牺牲阳极法,主要由于其技术含量相对低,施工质量容易保证,且施工单位对牺牲阳极的施工经验较为丰富,例如美国的Cape Wind、英国的North Hoyle及荷兰的Q7等海上风电场都采用牺牲阳极的保护方法^[20];但牺牲阳极法不能很好地适应不断变化的条件,并且会过早消耗,可能会导致对风力涡轮机单元支撑结构保护不足,且需要设计多余重量,使费用增加。外加电流法则更为智能,是未来风电行业防腐技术发展一个趋势,目前德国AlpHa Ventus海上风电场以及英国Greater Gabbard海上风电场就采用了外加电流的阴极保护技术。

Erdogan等^[21]以美国玛莎葡萄园风电场为实例,通过大量理论分析与计算,配合涂层的协同作用,使用牺牲阳极的方法在最佳位置安放适合的阳极,以此显著降低阴极需要的电流和阳极牺牲质量,延长风电场使用年限。

Chernov等^[22]系统比较了2种阴极保护方式的经济效益,牺牲阳极的方式因需定期更换阳极,成本较高;在电源供应较容易的区域,外加电流法成本相对低些,但在电源供应条件有限的区域,其所需成本则难以预估。

2.3 预留腐蚀裕量法

预留腐蚀裕量法是依据钢结构的腐蚀速率及使用年限计算,以此为基础增加管壁钢板厚度,从而使得风电设备符合相关规定,达到使用寿命要求。该方法会导致钢管桩厚度及重量增加,进一步可能会使施工设备结构改变,从而增加材料及施工费用,经济性较差^[23],一般多用于监测构筑物的腐蚀程度。

3 浪花飞溅区新型防腐技术

一般将在海洋环境中,海水及浪花能够飞溅、喷洒到设施表面,但在海水涨潮时又不能被海水所直接浸没的部位称为浪花飞溅区^[24],通常在海水的平均高潮位0~2.4 m处^[25],在这一区域,钢表面由于受到海水的周期性润湿,常处于干湿交替状态,充足的氧会发生去极化作用^[26],以及阳光、海水、氢渗透等多种因素作用^[27],使得浪花飞溅区成为风力发电设施腐蚀现象最为严重的区域,所以本文重点介绍此区域的新型防腐技术。

3.1 海工重防腐涂层

海工重防腐涂料联合预留腐蚀裕量以及阴极防护,是飞溅区防腐最常用的手段。厚膜化是飞溅区防腐涂料的典型特征之一,一般干膜厚度就能达到600 μm以上,通常具有较好的耐水性和低吸水性。此外,抗离子透过和抗电渗析性能佳^[28],近年来厚浆型改性环氧玻璃鳞片涂料经实践取得良好效果,有较为广泛的应用。

曾登峰等^[29]对环氧富锌、环氧树脂、环氧玻璃鳞片等常用海工重防腐涂料体系的循环老化、阴极剥离、附着力等多项指标进行测试,分析各体系涂料的优、劣势,其中:环氧富锌附着力强;环氧树脂易在紫外光作用下断裂降解;玻璃鳞片在涂层中重叠排列,能有效隔绝腐蚀介质扩散,但耐温性能较差。

李旭海等^[30]使用纳米改性环氧树脂、纳米二

氧化硅浓缩浆与酚醛环氧树脂、碳化硅等结合, 制备成纳米改性硼酚醛环氧复合防腐涂料, 通过正交实验, 进行耐腐蚀、耐磨、抗开裂等多项测试, 结果表明, 添加纳米颗粒与封闭胶能有效填补涂料固化所产生的微孔洞, 具有延缓、阻碍腐蚀液扩散, 提高防腐、耐磨、抗开裂等性能。

3.2 添加合金元素

经国内外研究人员研究发现, P、Si、Cr、Mo、Ni 和 Mn 等元素可在一定程度上提高钢材在飞溅区的防腐性能^[31], 但并不能从根本上解决腐蚀问题。

3.3 金属热浸镀层

热浸镀层也是在飞溅区较常使用的一种腐蚀防护技术。热浸镀也称为浸镀, 其步骤为: 先将钢材制件通过酸、氯化铵等化学清洗去除表面氧化铁等物质, 而后放入热熔融状态下的金属液中浸泡, 一段时间后取出, 使熔融金属与钢铁反应产生合金层, 基体镀层二者结合, 达到防腐的目的^[32]。热浸镀后的表面通常较为均匀且附着性能优异, 当下很多潮间带海上风电场中的部分爬梯、栏杆等采用的便是热浸镀锌、环氧封闭漆以及面漆相结合的防腐蚀方案, 绝大多数的法兰和钢格栅均采用 110~130 μm 的热浸镀锌进行防腐^[33]。

3.4 金属热喷涂

热喷涂是一种表面强化技术, 指的是借助特定热喷涂装置所产生的高温高压焰流, 将要制成的涂层材料迅速升温至熔融状态后, 高速喷涂到已预处理过的钢铁表面形成涂层的一种表面加工方法^[34]。火焰喷涂、电弧喷涂和等离子喷涂是目前常用的 3 种基本热喷涂工艺, 其中应用于海洋环境中钢制物防腐的主要是前 2 种工艺。热喷涂沉积速度快, 操作灵活, 能改性被喷涂体, 获得多种特殊的物理化学性能^[35]。在海洋腐蚀防护方面使用较多的是喷涂后的 Zn、Al 及其合金涂层, 陈散兴等^[36]在舟山海域的试验表明, 经火焰喷涂的喷铝涂层及喷锌铝复合涂层比喷锌涂层具有更高的硬度、更好的耐久性和抗冲蚀性能。

Momber 等^[37-38]在德国海戈兰岛附近试验场对 6 套涂层体系在海洋暴露环境下展开了长达 3 年的

监控与检测, 6 套涂层体系分别为: 锌、树脂、聚氨酯(a 体系); 锌、树脂(b 体系); 锌铝涂层、树脂(c 体系); 锌铝热喷涂树脂(d 体系); 纯环氧树脂(e 体系); 铝镁热喷涂环氧树脂(f 体系)。对 6 套涂层体系进行了污垢强度、防腐效果、法兰腐蚀等多项检测, 结果表明, f、a 体系具有较好的防腐效果和良好的附着力, 而又以 Zn/Al 热喷涂与环氧树脂结合的 f 体系为最佳。

Eom 等^[39]在韩国附近海域开展类似试验, 体系有 4 套, 即锌铝热喷涂(MS)、锌铝热喷涂+环氧树脂(MC)、纯环氧树脂(MC)、环氧树脂+聚氨酯涂层(EP)。通过 365 天海洋暴露和 15 天的室内盐雾试验, 得出类似的结论: MC 体系, 即锌铝热喷涂与环氧树脂结合的体系防腐效果最好, 最适用于海上风电钢结构防腐。

3.5 包覆覆盖层防护

与防腐涂层方法相比, 包覆覆盖层保护是一种更为长期有效的防护技术, 包覆防腐近 20 年在飞溅区腐蚀防护中应用越来越广泛, 且包覆材料的种类也日益繁多, 有无机包覆、有机包覆以及矿脂包覆(petrolatum taped cover, PTC)等。PTC 覆层防腐是指在钢制结构表面先涂覆矿脂材料(特点是黏附性、电绝缘性、防水性佳, 不溶于水, 无挥发性), 再在矿脂材料外部包覆防护外罩的一种防腐蚀技术, 该技术自日本引入国内后使用效果良好。PTC 覆层防腐蚀系统^[40]如图 2 所示, 主要由矿脂防蚀膏、矿脂防蚀带、密封缓冲层(图中聚乙烯泡沫衬里)和防蚀保护罩 4 部分组成。

矿脂防蚀膏呈淡褐色, 是一种人造的油状、膏状缓蚀化合物, 在水中不溶解, 盐雾试验检测等级为 A 级(表面无缺陷), 其中有很多防锈成分, 能够对钢制结构进行长期有效的防护^[41]。矿脂防蚀带呈淡黄色, 是一种由人造纤维制造而成的无纺布, 其中浸透并涂满大量缓蚀剂, 持久性能好。矿脂防蚀膏和矿脂防蚀带是 PTC 防腐技术的核心部分, 内含多种抗腐蚀材料, 具有优良的黏附性, 且隔绝水和空气性能优异, 长期不易变质, 它们牢固地黏附在钢铁设施表面, 发挥良好的防护作用。密封缓冲层, 起减震、隔热、防水等作用。防蚀保护罩具有机械强度高, 耐冲击、抗风化性,

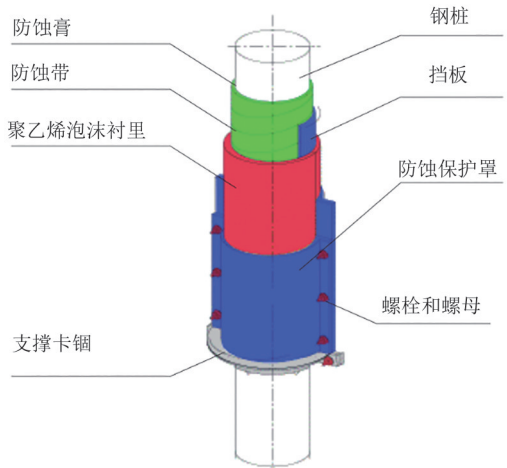


图2 PTC覆层防腐蚀系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of PTC coating anti-corrosion system

还能防渗透，也能起到很好的保护作用^[42]。PTC具有以下优点：1) 防腐效果优异且长效，有效防腐时间可达30年以上；2) 施工简便，对基体表面处理要求低，能够带水作业；3) 密闭性能佳，抗冲击性能优；4) 质轻，几乎不会对结构产生额外载荷；5) 对环境友好^[43]。PTC技术主要缺点在于材料及施工费用高，不过可以预见的是，随着PTC工艺的进一步升级优化及综合性能更卓越且成本效益高的缓蚀剂等包覆材料问世，复合包覆技术未来必将在海上风电防腐领域发挥重要作用。

曲文娟等^[44]在模拟飞溅区环境下使用PTC技术对AISI4135钢进行试验，研究PTC技术对氢渗透行为的阻隔，实验结果表明，氢进入高强钢主要是在飞溅区腐蚀条件下发生的，海水喷射频率对渗透氢总量影响不大，而PTC技术能够有效缓解氢渗透，实现优良的防腐效果。

钱洲亥等^[45]等研究表明，PTC技术能有效解

决传统喷涂工艺中螺栓法兰等关键节点难以喷砂的问题，也不会出现漏涂、流挂等现象，此技术适用于钢结构，不受应用环境和钢制结构形状限制，能解决风电设施关键复杂部位的防腐蚀难题。

经过一系列调研分析及工程运用，海上风电设施在飞溅区可考虑采用高性能海工重防腐涂层、金属热喷涂(小型构件建议使用金属热浸镀层)与环氧树脂结合以及PTC覆层矿脂包覆等防腐技术进行防腐蚀保护。

近年来，上海市电力材料防护与新材料重点实验室对海上风电设施防腐蚀领域多有研究。徐群杰团队^[46-47]重点介绍了风电塔中常用的防腐涂料及海上风电防腐蚀的研究状况，并提出未来可行性建议。同时，将超疏水技术应用于海上风电电气控制部分的材料防腐蚀技术也取得了一系列新进展，韩杰等^[48]以白铜为基底，在硬脂酸乙醇溶液中加入盐酸和氯化铁，刻蚀后在350℃环境下加热，所得涂层接触角超150°，在质量分数3.5%的氯化钠模拟海水环境中展现出优异的电化学性能；刘伟等^[49]在铜箔上用氨水刻蚀后进行灼烧，所得涂层也具有超疏水性和自清洁性能；贺子豪等^[50]将六水氯化铝和十二烷基三甲基硅烷(DTMS)及乙醇配制成电解液，以5052铝合金为阳极，铂片为阴极，进行电沉积，制得膜层超疏水且具有抗黏附性、自清洁及优异的耐蚀性能。上海市电力材料防护与新材料重点实验室海上风电设施防腐蚀课题组正努力探索新型的具有优异防腐耐磨性能的涂层，以期将之应用于海上风电设施防腐蚀领域。

海上风电设施防腐蚀常用方法总结如表1所示。

表1 海上风电设施防腐蚀常用方法

Tab. 1 Common anti-corrosion methods for offshore wind power facilities

防腐措施	原理	优缺点
腐蚀裕量法	通过腐蚀速率与使用寿命计算裕量，增加钢材厚度，延长寿命	没有具体区分不同区域腐蚀速率与特点，增加金属浪费，甚至导致结构变化
阴极保护法	利用电荷转移原理，牺牲阳极、保护阴极	不适用于腐蚀最为严重的飞溅区
海工重防腐涂层	利用涂料的耐水、吸水、阻隔等优良性能实施防护	是包括海上风电等大多数海洋构筑物最常用的防腐方法，性能较为优异
添加合金	合成性能更为优异的合金，在一定程度上延缓腐蚀	效果不明显，不能从根本上解决腐蚀问题
热喷涂、热浸镀	热喷涂常用在大器件；热浸镀较多使用在小件，通过熔融改性实现防腐	干燥情况效果较好，表面若粘附凝结水后与氧气等作用形成电解液，发生电化学腐蚀，缩短寿命
包覆覆盖层防护	将防腐材料缠绕包裹在钢制结构表面，从而延缓腐蚀	复层矿脂包覆技术施工工艺简单，防腐效果优异，主要缺点是成本较高

4 海上风电设施防腐检查检测与检修技术

海上风电防腐检查检测主要是参照相关规范、标准,按照一定的防腐检查计划,定期完成相关检查^[51]。检查包括设备健康状况检查、设备防腐情况监控,形成防腐检查台账,包括防腐检查汇报、阴极保护电位检查报告等;对检查所发现的问题进行分析、诊断、评估,区分偶然故障、系统故障,提出处理建议、措施,并进行消缺闭环,包括防腐涂层维护、牺牲阳极外焊加固,加强筒塔、机舱的严密性和防潮气、盐雾措施,同时也需要对风电场防腐系统对海洋环境造成的影响进行检测与评估^[52]。对于疲劳腐蚀的检测,电子脉冲法^[53]是一种无害检测方法,其主要优点是不需要破坏待检测样品表面涂层就能够清楚地观察到其表面缺陷。

防腐检修主要包括防腐涂层修补、阴极保护系统维护2部分,在检查后制定对应的维护维修方案,从而形成闭环,完成检查检修工作。

5 工程实例

珠海桂山海上风电场是广东省首个海上风电项目,也是我国南海上第一座大型海上风电场,2018年已并网运行30台风电机组,一期后续及二期13台风机也已于2021年12月实现并网发电。该风电场位于珠海市万山区东侧海域,属于亚热带海洋气候,受高湿高温、高盐雾及海洋生物腐蚀等因素影响,风电机组采用涂层保护与电化学保护联合使用的保护方法,且考虑腐蚀裕量。具体地讲,海上机组塔筒采用“环氧富锌底漆+环氧云铁漆+聚氨酯面漆及氟碳面漆”,外壁采用耐久性和防腐性优良的氟碳面漆,在电气集装箱外使用4F氟碳涂层,这是一种新型海工重防腐涂料,具有免维护、自清洁的功能,且具有强附着力和超长的耐候性,但同时可能会产生一定量的有机挥发物,且造价成本较高。这是国内首次将氟碳涂料防腐体系应用于风电防腐领域,显示出我国防腐工程师应对海洋气候环境的技术创新能力。珠海桂山风电项目成功并网发电,预计年发电量超2亿kW·h,对促进粤港澳大湾区节能减排、优

化资源结构具有积极作用。

6 结论

海上风电设施相较于陆上风电对防腐技术有更高更新的要求,且海上风电技术能在很大程度上缓解我国的能源危机,与此同时,海上风电设施的防腐蚀面临诸多问题与挑战,因此在海上风电的开发及运行管理过程中,一定要进一步加强海上风电设施的防腐蚀研究与应用,顺应海上风电防腐绿色环保、定制型、质量型发展趋势,不断改进与创新,努力提高海上风电设施防腐蚀能力,促进我国海上风电事业不断发展。

参考文献

- [1] 李铮,郭小江,申旭辉,等.我国海上风电发展关键技术综述[J].发电技术,2022,43(2):186-197.
LI Z, GUO X J, SHEN X H, et al. Summary of technologies for the development of offshore wind power industry in China[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 186-197.
- [2] 郑黎明,贾科,毕天姝,等.海上风电接入柔直系统交流侧故障特征及对保护的影响分析[J].电力系统保护与控制,2021,49(20):20-32.
ZHENG L M, JIA K, BI T S, et al. AC-side fault analysis of a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms and the impact on protection[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 20-32.
- [3] 余浩,肖彭瑶,林勇,等.大规模海上风电高电压穿越研究进展[J].智慧电力,2020,48(3):30-38.
YU H, XIAO P Y, LIN Y, et al. Review on high voltage ride-through strategies for offshore doubly-fed wind farms [J]. Smart Power, 2020, 48(3): 30-38.
- [4] 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 anti-corrosion technology for offshore wind power [J]. Wind Energy, 2019(11): 88-91.
- [5] 张国新,黎扬佳,项建强,等.海上风电混凝土承台温度特性监测与仿真分析[J].水利水电技术(中英文),2022,53(3):1-10.
ZHANG G X, LI Y J, XIANG J Q, et al. Monitoring and simulation analysis of temperature characteristics of concrete pile-cap foundation for

- offshore wind turbine[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(3): 1-10.
- [6] 胡丹梅, 曾理, 陈云浩. 半潜式海上风力机流固耦合特性分析[J]. *发电技术*, 2022, 43(2): 218-226.
HU D M, ZENG L, CHEN Y H. Analysis of fluid-structure coupling characteristics of semi-submersible offshore wind turbines[J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(2): 218-226.
- [7] 邓再芝. 海上风力发电系统的腐蚀与防护[J]. *中国重型装备*, 2011(4): 47-49.
DENG Z Z. Corrosion and protection of offshore wind power system[J]. *China Heavy Equipment*, 2011(4): 47-49.
- [8] UMaya M, NOGUCHI T, UCHIDA M, et al. Wind power generation-development status of offshore wind turbines[J]. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 2013, 50(3): 29.
- [9] 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 splash zone[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2012, 24(4): 342-344.
- [10] 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 corrosion prevention research and application status of offshore wind power[J]. *Journal of Building Materials and Decoration*, 2020(9): 213-214.
- [11] 李理, 范玉鹏, 常志明, 等. 海洋风电机组防腐蚀技术研究进展[J]. *分布式能源*, 2021, 6(5): 51-58.
LI L, FAN Y P, CHANG Z M, et al. Research progress of anti-corrosion technology for offshore wind turbines[J]. *Distributed Energy*, 2021, 6(5): 51-58.
- [12] 练宗源, 梁云, 袁拥军, 等. 海水潮差区和浪花飞溅区中钢结构的腐蚀控制方法对比[J]. *全面腐蚀控制*, 2017, 31(3): 75-78.
LIAN Z Y, LIANG Y, YUAN Y J, et al. The contrast on the corrosion control methods of steel structure in the tidal zone and splash zone[J]. *Total Corrosion Control*, 2017, 31(3): 75-78.
- [13] 杨春玉, 谢俊峰, 杜金楠, 等. 拉应力对油管防腐层防腐性能的影响[J]. *全面腐蚀控制*, 2017, 31(11): 65-68.
YANG C Y, XIE J F, DU J N, et al. The influence of tensile stress on oil tubing antiseptic coating[J]. *Total Corrosion Control*, 2017, 31(11): 65-68.
- [14] 张斌. 海上风电塔架涂层老化问题分析[J]. *广东科技*, 2020, 29(5): 66-69.
ZHANG B. The Influence of tensile stress on oil tubing antiseptic coating[J]. *Guangdong Science and Technology*, 2020, 29(5): 66-69.
- [15] 刘新生, 张小伟. 玻璃钢船的成型工艺和连接技术[J]. *船舶物资与市场*, 2021, 29(10): 49-50.
LIU X S, ZHANG X W. Forming process and connection technology of FRP ship[J]. *Marine Equipment/Materials & Marketing*, 2021, 29(10): 49-50.
- [16] FAN Z Y, QING X, YANG X, et al. Anticorrosion properties of epoxidized palm olein/epoxy resin as coating materials on low-carbon steel in 3.5% NaCl[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2019, 14: 7487-7494.
- [17] MOMBER A, IRMER M. Taber abrasive wear resistance of organic offshore wind power coatings at varying normal forces[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2021, 18(3): 729-740.
- [18] 张新勃. 牺牲阳极阴极保护有效性测试的必要性[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2021, 41(17): 52-53.
ZHANG X B. Necessity of sacrificial anode cathodic protection effectiveness test[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2021, 41(17): 52-53.
- [19] 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.
- [20] YAN G, ZHU X C, LI Y. Anti-corrosion protection strategies for support structures and foundations of wind turbines of offshore wind farms[C]//2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Nanjing, China: IEEE, 2009: 1-4.
- [21] ERDOGAN C, SWAIN G. Conceptual sacrificial anode cathodic protection design for offshore wind monopiles[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 235: 109339.
- [22] CHERNOV B B, NUGMANOV A M. Comparative efficiency of different realization methods of cathodic protection for marine structures[J]. *E3S Web of Conferences*, 2021: 04001.
- [23] 黄延琦, 张俊臣. 海上风电钢管桩防腐系统远程监测技术[J]. *船舶工程*, 2020, 42(S1): 571-574.
HUANG Y Q, ZHANG J C. Remote monitoring technology of anti-corrosion for steel pipe piles of offshore wind power[J]. *Ship Engineering*, 2020, 42(S1): 571-574.

- [24] 朱梦伟, 王学明, 沈巍巍, 等. 海洋腐蚀环境下电缆过桥设计研究[J]. 电力勘测设计, 2020, 42(S1): 571-574.
- ZHU M W, WANG X M, SHEN W W, et al. Study on the design of bridge cable in marine corrosion environment[J]. Electric Power Survey & Design, 2020, 42(S1): 571-574.
- [25] 韩恩厚, 陈建敏, 宿彦京, 等. 海洋工程结构与船舶的腐蚀防护: 现状与趋势[J]. 中国材料进展, 2014, 33(2): 65-76.
- HAN E H, CHEN J M, SU Y J, et al. Corrosion protection techniques of marine engineering structure and ship equipment: current status and future trend[J]. Materials China, 2014, 33(2): 65-76.
- [26] 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, LÜ P, LIANG L Q, et al. Research progress on corrosion and protection of steel structures in marine splash area[J]. Shanghai Coatings, 2016, 54(4): 24-28.
- [27] 陈君. 低碳钢浪花飞溅区腐蚀和防腐带保护技术研究[D]. 广州: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2012.
- CHEN J. Study on corrosion in spray splash zone of low carbon steel and protection technology of anti-corrosion belt[D]. Guangzhou: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanography), 2012.
- [28] 赵书彦, 童鑫红, 刘福春, 等. 环氧富锌涂层防腐蚀性能研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(6): 563-570.
- ZHAO S Y, TONG X H, LIU F C, et al. Corrosion resistance of three Zinc-rich epoxy coatings[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019, 39(6): 563-570.
- [29] 曾登峰, 陶乃旺, 江水旺, 等. 海工重防腐涂料 NORSOKM-501 试验方法介绍及结果讨论[J]. 涂料工业, 2015, 45(8): 51-56.
- ZENG D F, TAO N W, JIANG S W, et al. NORSOKM-501 test method for heavy-duty anticorrosive marine coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2015, 45(8): 51-56.
- [30] 李旭海, 杜丽平. 纳米重防腐涂料在海上风力发电机组中的应用研究[J]. 节能, 2020(1): 21-22.
- LI X H, DU L P. Application of nano heavy anti-corrosion coating in offshore wind turbine[J]. Energy Conservation, 2020(1): 21-22.
- [31] HOSSAIN K M A, EASA S M, LACHEMI M. Evaluation of the effect of marine salts on urban built infrastructure[J]. Building and Environment, 2009, 44(4): 713-722.
- [32] 王开泰, 许云波, 徐兵, 等. 980 MPa 级热浸镀钢的新型淬火配分工艺及组织性能[J]. 金属热处理, 2021, 46(11): 143-147.
- WANG K T, XU Y B, XU B, et al. Novel Q & P process, microstructure and mechanical properties of a 980 MPa grade hot-dip galvanized steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(11): 143-147.
- [33] 郭太雄, 刘常升, 刘春富. 热浸镀铝锌合金镀层钢板表面锌花形成的研究进展[J]. 材料保护, 2016, 49(2): 50-54.
- GUO T X, LIU C S, LIU C F. Research progress on the formation of zinc flower on the surface of hot dip aluminum zinc alloy coated steel plate[J]. Materials Protection, 2016, 49(2): 50-54.
- [34] 张作华, 宋广裕. 钢铁金属热喷涂防腐技术[J]. 涂层与防护, 2020, 41(6): 42-46.
- ZHANG Z H, SONG G Y. Thermal spraying for corrosion control of steel structure[J]. Coating and Protection, 2020, 41(6): 42-46.
- [35] 曹彬, 王倩. 耐高温熔融金属侵蚀热喷涂涂层的研究[J]. 宝钢技术, 2020(5): 9-13.
- CAO B, WANG Q. Research on thermal spray coating with corrosion resistance of high temperature molten metal[J]. Baosteel Technology, 2020(5): 9-13.
- [36] 陈散兴, 周学杰, 张三平, 等. 火焰喷涂 Al、Zn-Al 涂层在舟山地区海洋环境的腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016, 28(5): 480-484.
- CHEN S X, ZHOU X J, ZHANG S P, et al. Corrosion behavior of flame spraying coatings of Al and Al-Zn alloy on low carbon steel in marine environment by seaside of Zhoushan island[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2016, 28(5): 480-484.
- [37] MOMBER A, 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.
- [38] MOMBER A, 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.
- [39] 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.
- [40] 高宏飙, 陈强, 王静, 等. PTC复层矿脂包覆防腐技术在海上风电的应用[J]. 中国涂料, 2013, 28(12): 39-43.
GAO H B, CHEN Q, WANG J, et al. Anticorrosion technology application of petrolatum tape and covering (PTC) on offshore wind Farm[J]. China Coatings, 2013, 28(12): 39-43.
- [41] 崔芳莹. 海水干湿交替条件下碳钢腐蚀行为及其缓蚀剂性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
CUI F Y. Study on the corrosion behavior of mild steel and inhibition effect of inhibitors under wet-dry cyclic conditions[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [42] 潘杰, 侯保荣, 刘佳利, 等. PTC矿脂包覆防腐技术在国内的应用进展[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(12): 1170-1173.
PAN J, HOU B R, LIU J L, et al. Advances in application of petrolatum tape cover[J]. Corrosion & Protection, 2015, 36(12): 1170-1173.
- [43] 郑传祥, 朱军, 苏小芳, 等. 海工结构复合材料包覆隔离防腐技术研究[J]. 化工装备技术, 2020, 41(5): 39-42.
ZHU C X, ZHU J, SU X F, et al. Research on the technology of coating, isolation and anticorrosion of marine structure composite materials[J]. Chemical Equipment Technology, 2020, 41(5): 39-42.
- [44] QU W J, HUANG Y L, YU X M, et al. Effect of petrolatum tape cover on the hydrogen permeation of AISI4135 steel under marine splash zone conditions[J]. International Journal of Electrochemicalence, 2015, 10: 5892-5904.
- [45] 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 Z H, WANG J, ZHOU H F, 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.
- [46] 时士峰, 徐群杰, 云虹, 等. 海上风电塔架腐蚀与防护现状[J]. 腐蚀与防护, 2010(11): 875-877.
SHI S F, XU Q J, YUN H, et al. Status of corrosion and protection for offshore wind towers[J]. Corrosion & Protection, 2010(11): 875-877.
- [47] 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.
- [48] HAN J, XU Q J, WEI L, et al. Etching and heating treatment combined approach for superhydrophobic surface on brass substrates and the consequent corrosion resistance [J]. Corrosion Science, 2016, 102: 251-258.
- [49] LIU W, XU Q, HAN J, et al. A novel combination approach for the preparation of superhydrophobic surface on copper and the consequent corrosion resistance[J]. Corrosion Science, 2016, 110: 105-113.
- [50] HE Z H, ZENG Y, ZHOU M, et al. Superhydrophobic films with enhanced corrosion resistance and self-cleaning performance on an Al Alloy [J]. Langmuir, 2020, 37(1): 524-541.
- [51] 彭潜. 海上风电结构健康监测工程实践与分析[J]. 船舶工程, 2021, 43(S1): 81-86.
PENG Q. Practice and analysis of structural health monitoring engineering of offshore wind power[J]. Ship Engineering, 2021, 43(S1): 81-86.
- [52] KIRCHGEORG T, WEINBERG I, HÖRNIG M, et al. Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: evaluation of the potential impact on the marine environment[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 136: 257-268.
- [53] 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.

收稿日期: 2022-10-10.

作者简介:



贾文虎

贾文虎(1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金属腐蚀防护, j15151980938@163.com;



徐群杰

徐群杰(1969), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为金属腐蚀防护及电化学储能, 本文通信作者, xuqunjie@shiep.edu.cn.

(责任编辑 辛培裕)