

## 海上风电钢桩腐蚀防护

蒋永杰, 李续光

青岛双瑞海洋环境工程股份有限公司 山东青岛

**【摘要】**在全球碳中和的大背景下,海上风电产业面临重大挑战和机遇,钢桩的腐蚀防护成为海上风电发展面临的技术难题,积极研究钢桩结构的腐蚀防护技术,对海上风电的推广具有重大意义。本文介绍了多种钢桩结构的腐蚀防护技术方案,并对其研究方向进行了展望。

**【关键词】**海上风电钢桩结构; 腐蚀防护

### Corrosion protection of steel structure of offshore wind turbine generator

Yongjie Jiang, Xuguang Li

Qingdao SunRui Marine Environment Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong

**【Abstract】**In the context of global carbon neutrality, the offshore wind power industry is facing challenges and opportunities. Corrosion protection of steel structure has become a technical challenge for the development of offshore wind power. Research on corrosion protection technology of steel structure is important to the promotion of offshore wind power. In this paper, several corrosion protection technologies for steel structures are introduced and the research directions are prospected.

**【Keywords】**Offshore wind power; Steel structure; Corrosion protection

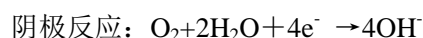
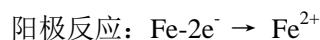
#### 前言

能源是人类赖以生存的重要因素,化石能源帮助人类实现了工业革命,提高了生产效率,但化石能源的大量使用导致温室气体过量排放,保护环境成为未来人类面临的巨大挑战<sup>[1]</sup>。风能是可再生的绿色清洁能源,风力发电技术日益成熟,我国狭长的海岸线为海洋风电的发展提供了便利,碳达峰和碳中和的“双碳”目标<sup>[2]</sup>为海洋风电的发展提供了历史机遇。根据全球风能理事会发布的《全球风能报告 2022》的统计数据,2021 年全球海上风电新增装机容量 21.1GW,若要实现 2050 年的零碳排放,十年后风电年安装量需要比增长 300%。海上风电风机叶片需要钢桩结构作为支撑,钢桩在海洋环境中极易发生腐蚀,导致钢桩结构刚度、强度、稳定性下降,钢桩的腐蚀防护成为海上风电发展面临的技术难题。

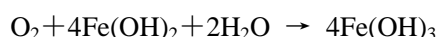
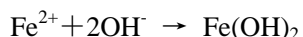
#### 1 海洋腐蚀环境与机理

海上风电钢桩的腐蚀类型包括均匀腐蚀和局部

腐蚀。其中,均匀腐蚀是海上风电钢桩受损主因,是特殊的海洋环境导致的。而冲击腐蚀、点腐蚀、电偶腐蚀、空泡腐蚀以及缝隙腐蚀等局部腐蚀发生的原因主要是结构设计或钢材成型质量。Hoar<sup>[3]</sup>等人提出金属阳极溶解理论反应机理,金属在海水介质中不断被溶解,生成的铁离子与阴极吸氧过程产生的 OH<sup>-</sup>结合,生成铁锈,电化学反应方程式如下:



靠近阳极溶液中的反应为:



腐蚀介质和应力的双重作用导致钢桩结构的塑性变形,金属沿滑移面错位运动产生滑移阶梯,当滑移阶梯突破极限后,表面膜发生破裂。阳极溶解和应力腐蚀破裂的共同作用是海上风电钢桩腐蚀问题严重的核心成因。铁的溶解使钢桩结构表面产生微裂纹,应力的存在加快了溶解的速率且促使生成

物的分离, 温度、湿度、含盐量和 pH 等因素影响电化学腐蚀速率。

海上风电机组按照环境差异分为 5 个腐蚀区域, 分别为海泥区、全浸区、潮差区、飞溅区和海洋大气区 (图 1), 海水及盐雾中的氯离子渗透性强, 腐蚀破坏性大, 飞溅区的盐雾粒子吸附在钢铁表面形成液膜, 为电化学腐蚀提供电解质, 另外浪花撞击造成涂层和金属表面钝化膜破坏, 成为腐蚀速率最快的区域。而全浸区由于氧浓度差异和海生物的附着, 成为腐蚀速率次快的区域。

## 2 风电钢桩结构形式

海上风力发电机组由风轮-机舱组件和钢桩支

撑结构组成, 钢桩支撑结构包括塔架、下部结构和基础三部分, 图 2 为不同的基础形式的海上风力发电机组组成部分示意图。海上风机支撑结构形式有底部固定式和浮置式两大类型, 底部固定式适用于近海海域, 浮动式适用于深水海域。

底部基础固定结构有单桩基础、多桩基础和重力式基础等多种形式, 单桩基础制造和施工都比较简单, 是近海风机基础常用的结构形式。多桩基础一般为三桩和四桩。我国东海大桥海上风电场是亚洲第一座大型海上风电场, 采用四桩基础, 下部结构为四角架结构。重力式基础底面为平面, 可以是钢结构也可以是钢筋混凝土结构<sup>[5]</sup>。

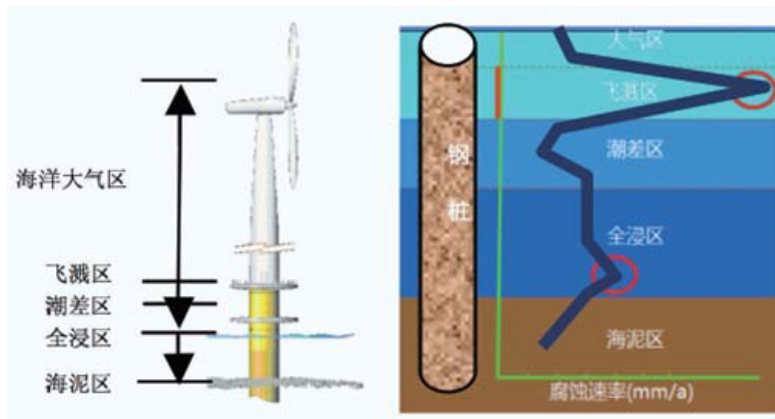


图 1 海上风电机组腐蚀分区<sup>[4]</sup>

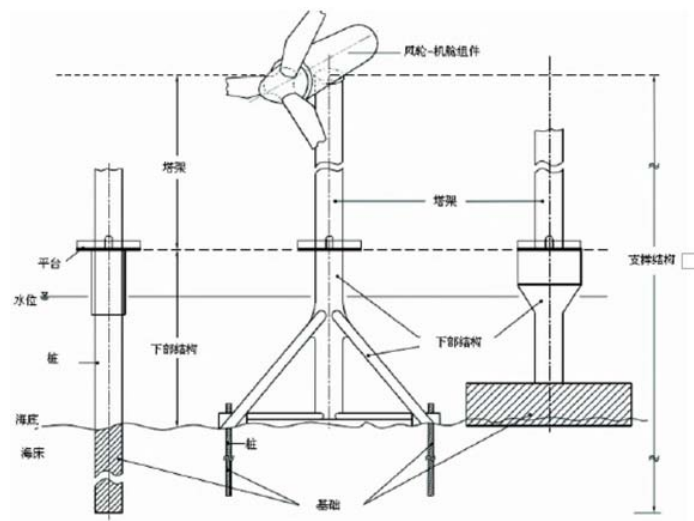


图 2 海上风力发电机组组成部分图

## 3 风电钢桩腐蚀防护技术

许多国家的相关机构都已经针对海上钢桩结构的防腐蚀方案制定了有关的标准规范, 挪威船级社在 2004 年发布的 DNV-OS-C101-2004《海上钢结构设计标准》中明确了防腐设计要求, 我国以国内外

相关技术标准为基础, 结合多年的海洋工程钢结构防腐蚀实践经验, 于 2011 年发布标准 NB/T 31006-2011《海上风电场钢结构防腐蚀技术标准》<sup>[6]</sup>, 对海上风电防腐设计提供了规范支持。

海上风机的设计寿命一般为 25 年, 一般涂料的

防腐年限难以满足海上风机的全寿期需求。根据钢桩结构和不同腐蚀区域的环境差异, 需要采用不同的防腐防护技术方案。

大气区多采用涂层防腐, 涂层防腐是利用涂料或金属镀层在设备表面形成致密的钝化膜, 屏蔽腐蚀介质, 是目前港制品最常用的防腐手段。防腐涂层包括底漆、中间漆和面漆, 总膜厚度 320 $\mu\text{m}$ 。底漆使用环氧富锌底漆、无机富锌底漆, 中间漆使用环氧云铁涂料、环氧玻璃鳞片涂料, 面漆需采用聚氨酯、氟碳涂料或聚硅氧烷等耐候性良好的涂料<sup>[7]</sup>。金属镀层中的活泼金属还可以作为阳极, 实现阴极保护功能。另外, 姜清淮等人<sup>[8]</sup>发现在环氧改性聚氨酯体系底漆中, 添加适量石墨烯, 涂层耐酸性和耐盐雾性能有一定提升。

飞溅区和潮差区的腐蚀问题非常严重, 宜采用重防腐涂层或金属镀层加封闭保护, 也可采用覆层包覆防腐。防蚀膏、防蚀带、缓冲层及最外层的防蚀保护罩共同构成了复层包覆防腐体系<sup>[9]</sup>, 防蚀膏位于复层包覆防腐最内部, 可形成完整的保护膜, 填充腐蚀坑, 隔绝腐蚀环境并兼具防锈、除锈的作用。防蚀带通常采用浸润防腐材料的聚酯纤维, 与防蚀膏结合为一体, 对腐蚀环境起到缓冲功能。防护罩可与钢结构紧密贴合形成封闭环境, 高效杜绝或减弱腐蚀的发生。复层包覆性能优良, 能有效的抗冲击, 防止海生物附着, 施工简单, 修复方便, 包覆材料包括矿脂、玻璃钢、耐蚀金属、聚乙烯等。矿脂包覆技术成熟, 防腐效果好, 施工方便, 中科院海洋所的 PTC 包覆防蚀系统已在海上采油平台、码头等成功应用, 但成本较高。高宏飙等<sup>[10]</sup>提出的表面持久防蚀 (STAC) 复层包覆防护技术, 在单桩式锥塔形大直径钢管桩的应用中发挥了良好的防腐功能。单桩玻璃钢包覆成本较低, 但易破坏且不易修复。耐蚀金属包覆耐蚀性能良好, 但成本高且易损坏。聚乙烯包覆需专用设备, 现阶段工程应用较少。

全浸区和海泥区宜采用阴极保护防腐技术, 阴极保护是电化学防腐技术, 被保护的金属作为阴极, 有外加电流和牺牲阳极两种方案。牺牲阳极是利用腐蚀电位较低的金属或合金作为阳极, 与钢桩结构在海水中接触, 阳极失电子从而保护钢桩结构, 现阶段一般采用铝锌钢合金材料。外加电流是以钢桩

结构作为阴极, 利用直流恒电位电流使钢桩发生阴极极化, 消除结构表面的不均一性, 抑制钢铁腐蚀溶解<sup>[11]</sup>。外加电流技术相比牺牲阳极具有一定优势, 牺牲阳极会向海水中排放有害微量元素, 在制造过程中耗费大量金属材料和能源, 使用成本高。

#### 4 总结及展望

钢桩结构是风机运行的重要支撑, 面对苛刻的海洋环境, 高效的防腐技术方案是保证钢桩结构长期服役的重要举措, 钢桩结构防腐设计需综合考虑建设和运行的全生命周期。不同腐蚀分区的风电钢桩进行不同的防腐设计, 构建具有针对性的标准化防腐系统, 降低系统维护成本。海上风电钢桩防腐系统应保证设计寿命与维护周期同步, 从而提高钢桩强度及稳定性维持时间。另外, 目前防腐监测技术应用较少, 应加大海上风电钢桩结构腐蚀状态在线检测技术和腐蚀疲劳早期检测研究, 实时掌握钢桩结构腐蚀状态, 提前进行风险预警。

#### 参考文献

- [1] MALLAPATY Smriti. How China could be carbon neutral by mid-century[J]. Nature, 2020, 586: 482—483.
- [2] XI Jinping. Delivers an important speech at the general debate of the 75<sup>th</sup> session of the United Nations (UN) general assembly (2020/09/22, Beijing)[N]. People's Daily Overseas Edition, 2020-09-23(2).
- [3] Hoar T P, Hines J G. The corrosion potential of stainless steels during stress corrosion[J]. J. Iron. Steel Int, 1954, 177: 248-249.
- [4] 胡苏杭, 刘碧燕. 海上风电防腐技术现状及研究方向[J]. 技术, 2019, 11: 88-91.
- [5] 葛燕, 朱锡昶, 李岩. 海上风电场风机支撑结构防腐对策[C]. 中国环境科学学会学术年会论文集, 2016, 4782-4786.
- [6] NB/T 31006—2011 《海上风电场钢结构防腐技术标准》
- [7] 乐治济, 林毅峰. 海上风机基础钢结构防腐设计[J]. 中国港湾建设, 2013, 187(4): 18-22.
- [8] 姜清淮, 卢树平, 李志士, 等. 石墨烯对海上风电叶片底漆的性能影响研究[J]. 涂料工业, 2019, 49(2): 7-13.
- [9] 侯保荣. 海洋钢结构浪花飞溅区防腐防护技术[J]. 中国

材料进展, 2014,33 (1):26-31.

- [10] 高宏飙, 诸浩君, 钱正宏, 等. 海上风机单桩基础浪溅区腐蚀及复层包覆防护技术的应用[J]. 中国港湾建设, 2014, (5):57-61.
- [11] 李理. 海洋风电机组防腐蚀技术研究进展[J]. 分布式能源, 2021,10 (6):51-58.

**收稿日期:** 2022年6月10日

**出刊日期:** 2022年7月25日

**引用本文:** 蒋永杰, 李续光, 海上风电钢桩腐蚀防护[J]. 工程学研究, 2022, 1(2): 47-50  
DOI: 10.12208/j.jer.20220031

**检索信息:** RCCSE 权威核心学术期刊数据库、中国知网 (CNKI Scholar)、万方数据 (WANFANG DATA)、Google Scholar 等数据库收录期刊

**版权声明:** ©2022 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**