

海上风电场钢结构腐蚀剖析及应对策略

汤东升^{1,✉}, 徐初琪², 王洪庆¹

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;
2. 中国船舶集团第七二五研究所厦门双瑞船舶涂料有限公司, 福建 厦门 361101)

摘要: [目的] 文章旨在研究海上风电场钢结构腐蚀环境、现象和机理, 剖析原因, 提出海上风电场钢结构防腐的策略, 确保海上风电场钢结构全生命周期的安全运行。[方法] 以并网发电海上风电场为研究对象, 根据不同基础形式、结构件、材料和部位在特定海洋环境中已发生的腐蚀现象进行分析。[结果] 结果表明, 在特定海洋环境下, 不同基础形式、结构件和部位的腐蚀形式与速度存在差异; 电化学腐蚀是主要的腐蚀形式, 内应力和外力作用是加速钢结构腐蚀的潜在因素; 制造质量控制及防护措施实施过程对于钢结构的腐蚀速度具有直接影响。[结论] 综上所述, 必须识别针对海上风电场钢结构制造特性、材料特性和环境特性而产生的各种潜在风险, 并采取相应精细化防护措施消除隐患, 同时对于某些关键部位需提高防护等级。

关键词: 海上风电场; 钢结构腐蚀; 剖析; 策略; 腐蚀速度

中图分类号: TK89; U655

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)06-0105-07

开放科学(资源服务)二维码:



Corrosion Analysis and Corresponding Countermeasures of Steel Structures in Offshore Wind Farms

TANG Dongsheng^{1,✉}, XU Chuqi², WANG Hongqing¹

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;
2. CSSC Xiamen Sunrui Ship Coating Co., Ltd., Xiamen 361101, Fujian, China)

Abstract: [Introduction] Strategies for preventing corrosion in steel structures at offshore wind farms, derived from a comprehensive study on the environmental conditions, symptoms, and mechanisms of corrosion in such structures, as well as an analysis on various causes were proposed, aiming to ensure safe operation throughout their lifecycle. [Method] The study focused on the grid-connected offshore wind farms and investigated corrosion observed in specific marine environmental conditions for different foundation types, structural components, materials, and parts. [Result] The results show that corrosion appears in various forms and progresses at varying rates among different foundation types, structural components, and parts in specific marine environmental conditions. Electrochemical corrosion is identified as the main form of corrosion, while internal and external stresses act as potential accelerators of corrosion in steel structures. Manufacturing quality control and the implementation of protective measures directly affect the rate of corrosion development. [Conclusion] In summary, it is crucial to identify various potential risks related to manufacturing characteristics, material properties, and environmental conditions of steel structures at offshore wind farms and take appropriate refined protection measures to eliminate underlying causes. In addition, protection levels should be increased for certain critical parts.

Key words: offshore wind farm; corrosion of steel structures; analysis; strategy; rate of corrosion

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

在“双碳”目标指引下, 我国海上风电的建设和

并网容量不断增加, 截至 2023 年 3 月, 全国海上风电装机已达 30.89 GW。2022 年底国家实施海上风电平价上网以来, 我国已有 7 个省份启动海上风电

收稿日期: 2023-06-25 修回日期: 2023-09-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“海洋极端环境中海上风电嵌岩桩-海床多界面动力劣化特性与评价”(42277135); 中国能源建设股份有限公司重点研发项目“深远海海上风电关键技术研究”(CEEC2021-ZDYF-01)

竞配工作,总容量达到 16.7 GW,海上风电将迎来新一轮发展高峰,且呈现大容量、集中连片和向着深远海发展的新特点。随着大规模海上风电场的不断投入运营,海洋环境下金属腐蚀问题,特别是海上风电场钢结构腐蚀问题日益显现,它将严重影响钢结构件的服役寿命,导致严重的安全事故和巨大的经济损失。关于海洋环境下金属的腐蚀机理以及防腐方法在相关的知识体系中被认为是成熟的,然而实际情况表明其有效性却差强人意,经调查,海上风电场金属腐蚀问题依然严重存在,特别是钢结构件的腐蚀已对风电场全生命周期安全运行构成威胁^[1-2]。为此,以并网发电海上风电场为研究对象,根据不同基础形式、结构件、材料和部位在特定海洋环境中已发生的腐蚀现象进行分析,提出海上风电场钢结构防腐的策略,确保海上风电场钢结构全生命周期的安全运行,为海上风电场的高质量发展保驾护航^[3-4]。

1 调查与判断

1.1 研究场址腐蚀情况

有关人员将对已并网发电的海上风电场钢结构件的腐蚀情况进行调查,情况如表 1 所示。

表 1 研究场址腐蚀概况
Tab. 1 Corrosion conditions of study sites

风电场	所属地区	单桩基础数/台	投产日期	腐蚀情况
WF1	南方西部	39	2021年	一般
WF2	南方西部	32	2019年	严重
WF3	南方东部	82	2021年	一般
WF4	南方西部	32	2021年	中等
WF5	南方西部	47	2021年	严重
WF6	南方东部	35	2021年	一般
WF7	南方西部	43	2021年	一般
WF8	南方中部	55	2021年	严重

调查发现:发生腐蚀乃至破坏的主要部位是辅助结构件套笼,且集中在特定位置,WF8 风场 50 多台基础的套笼在三层圈梁的 1、2、3、4、5、6(如图 1、图 2 所示)节点均不同程度腐蚀,其中 1 台因腐蚀导致套笼从二层圈梁下部整体脱落坠入海中(如图 3 所示)。与主体结构连接的爬梯等部位也不同程度的腐蚀,腐蚀形态完全符合腐蚀机理,结构件的破坏也

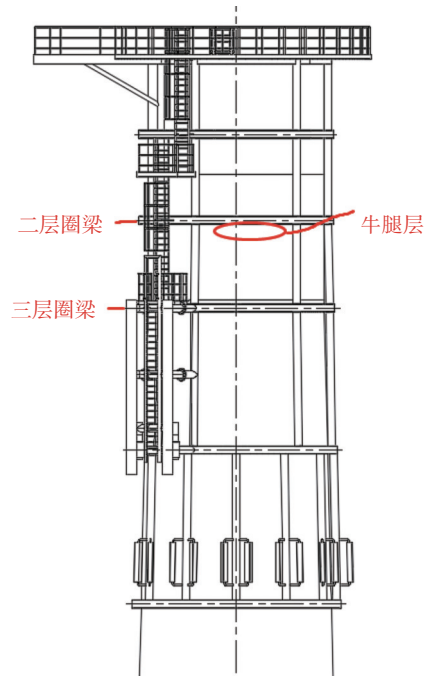


图 1 单桩基础套笼立面图

Fig. 1 Elevation of single pile foundation cage

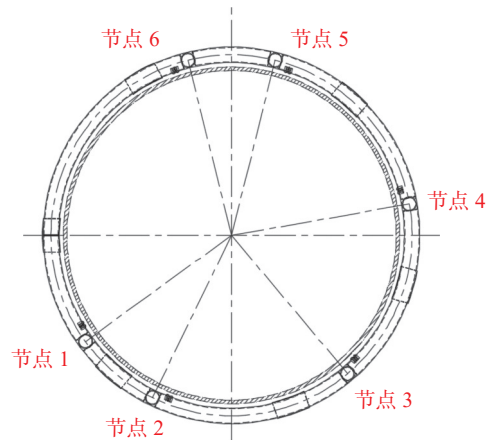


图 2 三层圈梁俯视图

Fig. 2 Top view of 3rd ring beam

因其所在位置以及其部位所起的作用而成为必然。

1.2 研究场址腐蚀现状

从图 4~图 8 发现发生腐蚀的位置都有共同点:(1)焊接处;(2)内(外)应力处;(3)积水处;(4)干湿交替处;(5)破碎浪飞沫降落区;(6)环境温度较高区域;(7)2 种不同金属直接接触或焊接处。调研的 8 个海上风电场不同程度地出现上述情况,特别是单桩基础套笼的三层圈梁、倒管架及升压站平台的爬梯转弯平台等结构件,当这些腐蚀导致结构件超出

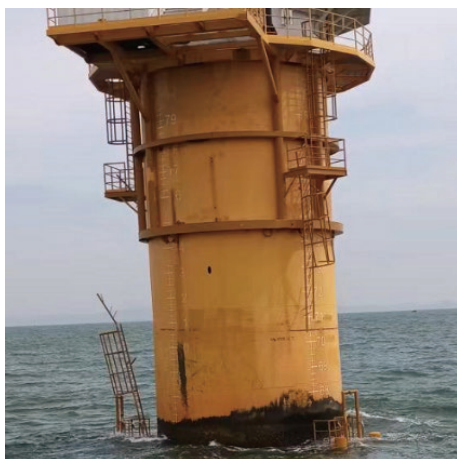


图 3 套笼从二层圈梁下部整体脱落现场图片

Fig. 3 Detached cage under the 2nd ring beam

图 4 积水区应力腐蚀开裂

Fig. 4 Stress corrosion cracking in water-logged area

其极限强度时,在有外力作用,或者自身重力作用下就会产生不同程度的破坏。

2 分析与讨论

2.1 海上风电场钢结构件的材料型号及化学成分

表 2 和表 3 表明,桩基及结构件所用的材料都是碳素钢,碳钢主要是铁元素和碳元素以及少量的其他元素所组成的合金。其中除铁外,碳的含量对钢铁的机械性能起着主要作用,同时也是构成腐蚀的主要元素^[5]。表 3 中金属含碳量的不同决定着其耐腐蚀的能力不同,用在风机基础中的部位也不同。

2.2 腐蚀机理及现状分析

2.2.1 腐蚀机理

1) 电化学腐蚀: 碳钢中的铁和碳在有电解质和氧环境中形成微电池而引起腐蚀。腐蚀反应的过程可表示为:



图 5 积水区域焊缝腐蚀破坏

Fig. 5 Corrosion damage of weld in water-logged area

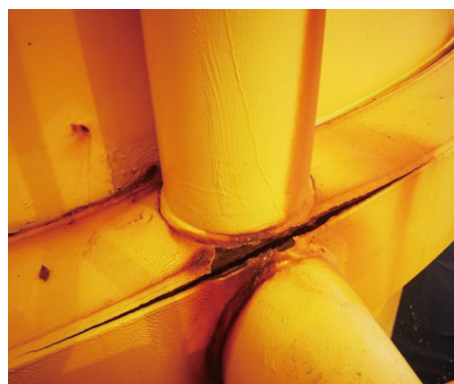


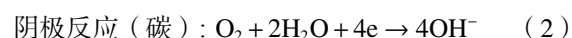
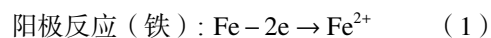
图 6 应力腐蚀开裂

Fig. 6 Stress corrosion cracking



图 7 应力腐蚀开裂

Fig. 7 Stress corrosion cracking



Fe^{2+} 是不稳定的, 它将继续被氧化:



腐蚀环境中, O_2 的浓度是稳定的; Fe 却不断被

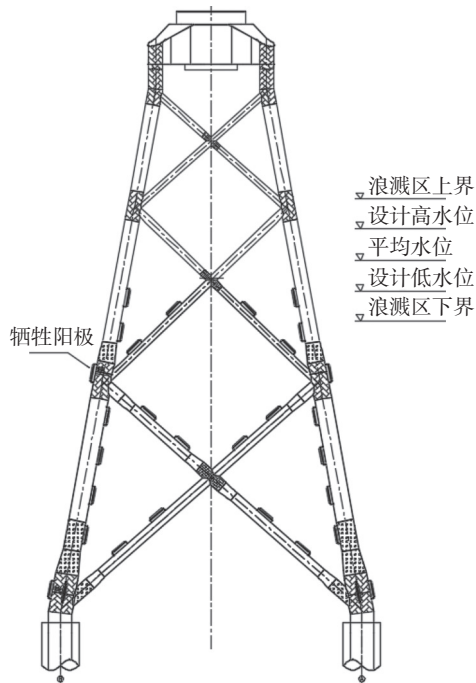


图 8 导管架基础示意图

Fig. 8 Schematic diagram of jacket foundation

表 2 不同基础形式及结构件的用钢型号

Tab. 2 Grades of steel used for different foundation forms and structural components

基础形式	桩	爬梯	套笼	靠船结构
单桩	DH36	Q235B	Q355C	Q355C
导管架	DH36	Q235B	-	Q355C

表 3 不同钢材型号的化学成分

Tab. 3 Chemical composition of different steel grades %

型号	C	Si	Mn	P	S
DH36	0.14	0.40	1.51	0.015	0.007
AH36	0.18	0.50	1.60	0.030	0.030
Q235B	0.12~0.20	0.30	0.30~0.70	0.045	0.450
Q355C	0.24	0.55	1.60	0.035	0.035

氧化(腐蚀)形成铁锈。铁锈是一种疏松而易碎的物质,不能防止铁的进一步腐蚀。因此,钢就不断受到化学腐蚀而破坏^[6]。

2)应力腐蚀:金属在腐蚀介质环境中,同时还受到机械应力或内应力的作用产生的腐蚀疲劳和应力腐蚀开裂等现象。

3)电偶腐蚀:2种不同金属相连接并在腐蚀介质环境中时,通常会发生严重的电偶腐蚀。它是电化

学腐蚀的一种形式。

2.2.2 影响腐蚀速度的因素

1)含盐量:海水中的所含盐分几乎都处于电离状态,因此成为一种导电性很强的电解质溶液。而盐量直接影响电导率的大小,对腐蚀有很大影响。海水中存在着大量的氯离子,对金属的钝化起着破坏作用而加速腐蚀^[7-9]。

2)溶解氧:氧是海洋环境腐蚀中的主要元素,直接参加阴极反应,而且氧又是去极化剂,一般情况下,腐蚀介质中,氧含量越高,金属的腐蚀速度就越快。

3)pH值:腐蚀介质中pH值对金属的腐蚀速度影响有很大的因素,当pH值很低时,也就是在含有氧的酸性水中,pH值越低,腐蚀速度越快。

4)温度:海水温度升高,氧的扩散速度加快,海水导电率增大,这加速了阴极和阳极的反应,即腐蚀的加速。

5)钢结构的材质及其制造过程引起的缺陷是腐蚀产生的内部原因,如含碳量、卷板过程引起的内应力、焊接工艺等等。

6)防腐措施的有效性与腐蚀速度直接相关^[10]。

2.2.3 现状分析

根据表1统计分析,南方地区8个海上风电场的结构件的腐蚀情况表现不一是符合实际的,因为8个海上风电场的场址间首尾相距约800多km,场址条件、建设条件与投运时间存在差异。但都存在腐蚀这样一个事实,发生的最严重的情况是因腐蚀导致套笼从二层圈梁下部整体脱落(如图3所示)。而且发生腐蚀的部位基本上都是《海上风电场钢结构防腐技术标准》(NB/T 31006)“4.2海上风电场钢结构的暴露环境分为大气区、浪溅区、全浸区和内部区。”中所指的“大气区”。“4.2 a)大气区为浪溅区以上暴露于阳光、风、水雾及雨中的支撑结构部分”^[5]。通常人们认为大气区的腐蚀比浪溅区小,因此,《标准》提出“大气区宜采取涂料保护或热喷涂金属保护”;大气区应采取以下措施减少需要保护的钢表面积,并易于涂层施工:(1)用管型构件代替其他形状的构件;(2)金属构件组合在一起时采用密封焊缝和环缝;(3)尽量避免配合面和搭接面。

根据规范^[5-7]要求以及本文“2.2.2影响腐蚀速度的因素”,结合图4~图8发生腐蚀的位置,完全可以解释焊接处、具有内(外)应力处、积水处、干湿交替

处、破碎浪飞沫降落区、环境温度较高区域、2种不同金属直接接触或焊接处都是腐蚀较严重的区域,而且是综合因素联合作用的结果。分析如下:

1) 调查的8个海上风电场工程所在海域,属于亚热带季风气候,平均气温 $20\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均相对湿度 $75\%\sim 85\%$,年平均降水量 2.6 L ,气温高、日照强、相对湿度高,属典型的高温高湿海洋大气环境。湿空气凝结水,降水与破碎浪飞沫形成电解质溶液,大气中的氧气溶入溶液中,如果某些地方空气不同程度污染,大气中二氧化硫等酸性气体同时溶入时使电解质 pH 降低而形成更强腐蚀性。如果结构件表面因材料本体或者因制作的精度问题凹凸不平而产生积水区,这些电解质就积聚在积水区中。

2) 在外力的作用下结构件的防腐涂层破坏而暴露金属。

3) 结构件的焊点毛刺穿破防腐涂层而暴露金属。

1)~3)所描述现象的集合就会构成微电池而产生电化学腐蚀,严重时氢腐蚀和氧腐蚀同时产生(见图4~图7)。

几个因素同时加速了金属结构件的腐蚀速度:

1) 积水区电解质在晴朗天气时因水的蒸发而不断浓缩,又在雨天中稀释,一浓一稀、一干一湿的过程使原电池的电位变化而加速腐蚀(见图9)。



图9 干湿交替区域焊点腐蚀

Fig. 9 Corrosion of welding joints in dry-wet alternating area

2) 焊接过程焊缝处析碳形成的微电池数远大于基材,在电解质中腐蚀速度明显大于基材(见图5)。

3) 结构件在制作过程中引起的内应力以及受到机械撞击当其在腐蚀介质环境中就产生腐蚀疲劳和应力腐蚀开裂,应力腐蚀开裂破坏结构件的防腐涂

层而加速结构件的破坏(见图4~图7)。

4) 不同金属相接触时,在电解质条件下很容易发生电偶腐蚀。在相连接的电偶中,一种金属是阳极,另一种金属是阴极,两种金属的电位差愈大,则电偶中的阳极金属侵蚀得愈快(见图10)。



图10 电偶腐蚀现象

Fig. 10 Galvanic corrosion

海洋环境的腐蚀形态主要是局部腐蚀,从构件表面开始,在形成原电池的区域发生的腐蚀,如电偶腐蚀、点腐蚀、缝隙腐蚀等,而这些腐蚀直接影响结构强度而引起“千里之堤毁于蚁穴”的严重后果^[11]。

3 海上风电场钢结构腐蚀应对策略

防止腐蚀的措施应从腐蚀机理入手,海洋环境的腐蚀主要是电化学腐蚀,调研的8个海上风电场中的结构件虽处大气区,但仍然出现不同程度的腐蚀情况,其腐蚀机理一样是电化学腐蚀。自然环境是不可抗力的,防止电化学腐蚀措施首先是合理选择耐蚀材料,从技术经济性考量,我国现行规范对海工构筑物钢材选择的有关规定是合理的。表2列出了不同结构件用材型号,据此,应该根据结构件所起作用、所处环境,针对设计过程、制造过程、施工安装、运维过程可能产生的各种潜在腐蚀风险,提出应对策略,防止金属结构件的腐蚀破坏。

3.1 钢结构腐蚀应对策略

3.1.1 设计过程

1) 应按规范要求最大限度选择管材,明确焊接形式和焊缝处理要求,应有明确的焊缝探伤和表面处理要求,减少积水隐患、减少内应力,减少破坏防

防腐层的因素^[11]。

2)对长期有外应力作用的结构件,应根据现实情况仿真分析,针对性地提高部件的结构强度,必要时增加加强环、加强筋等加强件以及抗冲击的缓冲防护件,消除微裂缝引起防腐涂层的破坏而连环腐蚀^[12-14]。

3)高度关注防腐涂料、涂层、新型防腐涂料的性能,特别是其粘结力和抗拉强度;对腐蚀发生严重区(焊点焊缝处、内外应力积聚处、积水区和干湿交替区)应提出重点防护要求和检测要求,必要时对某些关键部位应提高防护等级;出现 2 种不同金属件连接时,金属间应有绝缘措施^[15-16]。

3.1.2 制造过程

1)要严格落实执行入厂材料的验收要求。

2)严格按设计图纸要求制造和检测,对图纸的疑问应及时沟通,杜绝自行代材。

3)结构件出厂至安装现场全过程中应对防腐涂层进行保护,应检查涂层的完好性,及时修复已破损的防腐涂层。

3.1.3 施工安装

1)施工安装前需检查涂层的完好性,及时修复已破损的防腐涂层。

2)严格按设计图纸要求施工,对图纸的疑问应及时沟通,杜绝自行代材^[17-18]。

3)安装过程应避免破坏防腐涂层,一旦发现破损应及时修复^[19]。

3.1.4 运维过程

1)施工船和运维船靠船位置处必须安装橡胶护舷。

2)杜绝大型施工船、敷缆船、锚艇、非正规平头运维船等吨位超过运维船设计标准的船只靠船。

3)施工船和运维船应在海况小于蒲福风级 6 级风和小于 1.5 m 有效波高时靠船,且在顶靠过程中船速不应超过 0.5 m/s。

4)靠船船只应按照双柱顶靠原则,避免单柱顶靠或者单柱斜靠。

5)及时修复已破损的防腐涂层。

3.2 讨论

海洋环境中金属腐蚀是永恒的课题,它是多因素构成的,任何环节的麻痹都将直接构成腐蚀风险而威胁生命财产安全,它是可以通过技术方法、管理

手段来避免的,特别是人的因素。以此来提醒我们海上风电人在海上风电事业高质量发展中的责任,同时也呼吁海上风电产业链中的每一个人都能用心为海上风电产业健康安全发展贡献力量。

4 结论

本文基于对南方地区 8 个已投运的海上风电场的金属结构件腐蚀调查情况进行剖析并提出应对的策略。得出如下结论:

1)调查的 8 个海上风电场工程的金属结构件均发生腐蚀,其腐蚀机理主要是电化学腐蚀。因结构件所处的自然环境以及其功能等因素而导致腐蚀轻重。

2)钢结构材料特性、制造特性、环境特性是产生腐蚀的内因,在复杂的外因作用下而发生各种形式的腐蚀现象。

3)可以根据结构件所起作用、所处环境,针对设计过程、制造过程、施工安装、运维过程可能产生的各种潜在腐蚀风险,提出应对策略,防止金属结构件的腐蚀破坏,确保海上风电场钢结构全生命周期的安全运行。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.沿海及海上风电机组防腐技术规范:GB/T 33423—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Technical specification for anticorrosion of wind turbines in the coastal and offshore area: GB/T 33423—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [2] 国家能源局.海上风电场工程防腐蚀设计规范:NB/T 10626—2021[S].北京:中国水利水电出版社,2021.
National Energy Administration. Code for design of corrosion protection for offshore wind power projects: NB/T 10626—2021 [S]. Beijing: China Water Power Press, 2021.
- [3] 中华人民共和国交通部.海港工程钢结构防腐蚀技术规范:JTS 153-3—2007[S].北京:人民交通出版社,2008.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical specification for corrosion protection of steel structures for sea port construction: JTS 153-3—2007 [S]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [4] 中华人民共和国交通部.海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范:JTJ 275—2000[S].北京:人民交通出版,2001.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Corrosion prevention technical specifications for concrete structures of marine harbour engineering: JTJ 275—2000 [S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [5] 国家能源局.海上风电场钢结构防腐蚀技术标准:NB/T

- 31006—2011 [S]. 北京: 原子能出版社, 2011.
- National Energy Administration. Technical code for anticorrosion of offshore wind farm steel structures: NB/T 31006—2011 [S]. Beijing: Atomic Energy Press, 2011.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 铝—锌—铜系合金牺牲阳极: GB/T 4948—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Sacrificial anode of Al-Zn-In series alloy: GB/T 4948—2002 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [7] Det Norske Veritas. Cathodic protection design: DNV-RP-B401 [S]. Oslo, Norway: Det Norske Veritas, 2010.
- [8] DNV GL AS. Corrosion protection for wind turbines: DNVGL-RP-0416 [S]. Oslo, Norway: DNV GL AS, 2016.
- [9] 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): 584-589,622.
- LI M M, XU Q J, HAN J. Progress of corrosion and protection for offshore wind power [J]. Corrosion & protection, 2014, 35(6): 584-589,622.
- [10] 乐治济, 林毅峰. 海上风机基础钢结构防腐蚀设计 [J]. 中国港湾建设, 2013, 33(4): 18-22. DOI: 10.7640/zggwjs201304005.
- YUE Z J, LIN Y F. Anticorrosive design for steel structured foundation for offshore wind turbines [J]. China harbour engineering, 2013, 33(4): 18-22. DOI: 10.7640/zggwjs201304005.
- [11] 余越泉. 导管架平台防腐技术研究 [J]. 中国海洋平台, 2001, 16(4): 37-41. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4500.2001.04.008.
- YU Y Q. A study on the anti-corrosive technology for jacket platform working in shallow beach sea [J]. China offshore platform, 2001, 16(4): 37-41. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4500.2001.04.008.
- [12] 侯保荣, 杨小刚, 贾淑香. 海洋浪溅区钢结构腐蚀与复层包覆防护实践 [J]. 中国港湾建设, 2012(2): 70-72. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3688.2012.02.017.
- HOU B R, YANG X G, JIA S X. Practice of corrosion protection and multi-layer covering technology for steel structure in splash zone [J]. China harbour engineering, 2012(2): 70-72. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3688.2012.02.017.
- [13] 刘建国, 李言涛, 侯保荣. 海洋浪溅区钢铁腐蚀与防护进展 [J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(10): 833-836.
- LIU J G, LI Y T, HOU B R. Progress in corrosion and protection of steels in marine splash zone [J]. Corrosion & protection, 2012, 33(10): 833-836.
- [14] 邹辉. 海上风机基础结构防腐蚀研究 [J]. 华东电力, 2014, 42(12): 2529-2534.
- ZOU H. Corrosion protection of basic structure of offshore wind turbine [J]. East China electric power, 2014, 42(12): 2529-2534.
- [15] 张贤慧, 方大庆, 钟承珠, 等. 海洋工程装备重防腐涂料的应用研究 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 23-27,42. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.004.
- ZHANG X H, FANG D Q, ZHONG C Z, et al. Application research of heavy-duty anticorrosion coatings for marine engineering equipment [J]. Southern energy construction, 2015, 2(3): 23-27,42. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.004.
- [16] 何小华, 张力. 海上风机基础阴极保护设计与应用 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 76-79. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.015.
- HE X H, ZHANG L. Cathodic protection design and application of offshore wind turbine supporting structure [J]. Southern energy construction, 2015, 2(3): 76-79. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.015.
- [17] 阮建, 王欣怡, 刘宏洲, 等. 基于均匀和局部腐蚀模型的海上风电单桩基础承载特性 [J]. 中国海洋平台, 2023, 38(4): 42-47. DOI: 10.12226/j.issn.1001-4500.2023.04.20230406.
- RUAN J, WANG X Y, LIU H Z, et al. Bearing characteristics of offshore wind power single pile foundation based on uniform and local corrosion model [J]. China offshore platform, 2023, 38(4): 42-47. DOI: 10.12226/j.issn.1001-4500.2023.04.20230406.
- [18] 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. DOI: 10.16577/j.issn.1001-1560.2022.0326.
- 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. DOI: 10.16577/j.issn.1001-1560.2022.0326.
- [19] 温家浩, 杨中桂, 白洁, 等. 海上风电设备防腐技术与展望 [J]. 船舶工程, 2022, 44(增刊1): 57-60. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2022.S1.014.
- WEN J H, YANG Z G, BAI J, et al. Anticorrosion technology and prospect of offshore wind power equipment [J]. Ship engineering, 2022, 44(Suppl.1): 57-60. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2022.S1.014.

作者简介:



汤东升

汤东升(第一作者, 通信作者)

1961-, 男, 教授级高级工程师, 注册公用设备工程师, 学士, 主要从事电力工程设计工作(e-mail)tangdongsheng@gedi.com.cn。

徐初琪

1976-, 男, 高级工程师, 学士, 主要从事海洋钢材腐蚀评估及防护工作(e-mail)xuchuqi@xmsunrui.com.cn。

(编辑 赵琪)