

专论

海上风电塔架腐蚀与防护现状

时士峰, 徐群杰, 云虹, 潘红涛

(上海电力学院上海高校电力腐蚀控制与应用电化学重点实验室, 上海 200090)

摘要: 海上风电作为一种绿色能源技术, 已成为世界上可再生能源发展的热点。海上风电运行在高度腐蚀的海洋环境中, 防腐蚀成为一项非常重要的工作, 而塔筒是防护的重点。本文分析了海上风电塔架的腐蚀原因和防腐蚀设计, 综述了海上风电塔架防腐蚀用富锌涂料和聚氨酯涂料的研究进展, 提出通过纳米材料和缓蚀剂改性优化提高防腐蚀涂料综合性能的建议, 为海上风电塔架提供更好的腐蚀防护。

关键词: 海上风电; 腐蚀; 涂料; 改性

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1005-748X(2010)11-0875-03

Status of Corrosion and Protection for Offshore Wind Towers

SHI Shi-feng, XU Qun-jie, YUN Hong, PAN Hong-tao

(Shanghai University of Electric Power, Shanghai Key Laboratory of Colleges and Universities for Corrosion Control in Electric Power System and Applied Electrochemistry, Shanghai 200090, China)

Abstract: As a clean technology of energy utilization, offshore wind power has become a hot topic of renewable energy in the world. The offshore wind turbines and especially the towers suffer from serious corrosion due to the extremely harsh marine environment, therefore the corrosion protection has become a major problem in offshore wind power design. The research progress of zinc-rich coatings and polyurethane coatings as anticorrosive coatings of offshore wind towers are reviewed in this paper, and the corrosion and anticorrosion design are also discussed. The comprehensive performance of the anticorrosive coatings modified by nanometer materials and corrosion inhibitors can be obviously improved, which provides a feasible corrosion protection for the offshore wind towers.

Key words: offshore wind power; corrosion; paint; modification

0 引言

与陆上风电场相比, 海上风电场具有风能资源储量大、开发效率高、环境污染小、不占用耕地等优点^[1,2], 自1991年世界上首座海上风电场在丹麦建成以来, 海上风力发电已经成为世界可再生能源发展的焦点领域。然而海上风电运行环境十分复杂: 高温、高湿、高盐雾和长日照等, 腐蚀环境非常苛刻, 对海上风电设备的腐蚀防护提出了严峻挑战。防腐蚀成为每个风电场必须考虑的突出问题, 防腐蚀设计成为海上风电场设计的重要环节之一。

目前对于海上风电工程基础设施以及风机的防

腐蚀措施, 主要来自于海上石油平台、破冰船以及海底管线等方面的经验^[3], 而针对海上风电腐蚀与防护的研究还很少。在大力提倡节能减排的今天, 结合国内外风力发电的理论研究和工程背景, 对海上风电的腐蚀与防护进行系统的研究已成为当前需要解决的重要课题^[4]。

1 海上风电塔架的腐蚀

风力发电设备主要由桨叶、风机及塔架组成, 其中塔架是风机支撑结构, 是海上风电场的重要组成部分, 塔架的类型主要有桁架式、管塔式等。目前广泛采用的是管塔式塔架, 即通常所说的塔筒。管塔式塔架用钢板卷制焊接而成, 具有结构紧凑、安全可靠、维护方便、外形美观等特点^[5], 但也存在比较严重的腐蚀问题。

塔筒外壁直接暴露在海洋大气环境中, 根据ISO12944-2^[6]腐蚀环境分类规定, 塔筒外壁处于

收稿日期: 2010-01-18; 修订日期: 2010-02-04

基金项目: 上海市科委重点项目(No. 08DZ2201400; No. 08160512600; No. 08DZ2210800)

联系人: 徐群杰, 教授, xuqunjie@shiep.edu.cn

C5-M 腐蚀环境,即:非常高的海洋腐蚀环境。

海洋大气湿度很大,水蒸气在毛细管作用、吸附作用、化学凝结作用的影响下,附着在钢材表面上形成一层水膜,CO₂、SO₂ 和一些盐分溶解在水膜中,使之成为导电性很强的电解质溶液,铁作为阳极在电解质溶液(水膜)中被氧化而失去电子,变成铁锈。海洋大气中的Cl⁻有穿透作用,在潮湿的环境中会加速钢结构的腐蚀。全球首个大型海上风电场荷斯韦夫(Horns Rev)在投入运行后不久,部分风机机组的变压器、发电机开始出现技术故障。故障原因较为综合,除了制造、安装延迟等问题外,离岸的气候条件、空气中盐分侵蚀也被认为是重要的因素。因此,只有对海上风电塔筒采取针对性的腐蚀防护设计才能保证海上风电场的安全、稳定运行。

2 海上风力发电塔架的防腐蚀涂料体系设计

海上风电的腐蚀防护措施主要有:增加腐蚀允量、电极防护、镀层、喷涂防腐蚀涂料等方法,其中采用防腐蚀涂料是应用最广泛、最经济、最方便的方法。

2.1 设计标准

目前国际上风电场钢结构的防腐蚀设计和施工主要参考三个标准:① ISO 12944—1998 色漆和清漆——防护漆体系对钢结构的腐蚀防护;② ISO 20340—2003 色漆和清漆——用于近海建筑及相关结构的保护性涂料体系的性能要求;③ NORSOK M501—2004——表面处理和防护涂料。ISO 12944 是目前国际上应用最广泛的钢结构防腐蚀涂装规范,ISO 20340 和 NORSOK M501 对海上风电防腐蚀涂料体系的性能测试和施工技术等做出了规范。

2.2 防腐蚀涂料选择原则

综合考虑环境、施工和性能,海上风力发电机组防腐蚀涂料的性能应满足以下规定^[7]:① 优先选择施工方便,能用普通涂装设备进行施工的涂料体系;② 结构长期处于海水浸泡或海水湿润、雨水冲刷等工作环境,宜采用耐海水、耐水性能优异的涂层体系;③ 暴露于海洋恶劣的环境中,宜采用耐紫外线、抗粉化性能好、耐老化的涂层体系;④ 处于海上的风电设备,昼夜温差明显,选用涂料应具有良好的耐冷热交替性。

2.3 防腐蚀涂装方案

目前世界上各大风电公司都有自己成熟的塔筒防腐蚀涂装配套体系。这些配套体系都是以达到长

期耐久为目的而设计的,符合国际标准 ISO12944 中有关钢结构在不同的服役环境下达到长期耐久年限的相应规定和要求。塔筒外表面典型涂装方案如表 1^[8]。

表 1 塔筒外表面典型涂装方案

	底漆	中间漆	面漆
塔筒内表面 (C4 高腐蚀环境)	环氧富锌	环氧厚浆 涂料	聚氨酯
塔筒外表面 (C5-M 海洋大气环境)	环氧富锌 / 无机富锌	环氧厚浆 涂料	聚氨酯面漆 / 硅氧烷 / 氟碳 / 天门冬氨酸酯

3 海上风电塔架防腐蚀涂料研究现状

风力发电的大力发展,带动了风力发电装备用防腐蚀涂料的发展。目前风力发电防腐蚀涂料市场中,丹麦的赫普(HEMPPEL)塔架涂料市场占有率最高,另外还有挪威的佐敦(JOTUN)、荷兰的阿克苏诺贝尔(AKZO—NOBEL)以及美国的 PPG 等。国内做风电防腐蚀涂料的企业主要有中远关西、金鱼、普兰纳等。

涂料的类型主要是富锌涂料和聚氨酯涂料,它们具有较高的品质和耐久性,但海上风电苛刻的腐蚀环境,要求不断提高其综合性能以更好的满足海上风电防腐蚀的需要。

3.1 富锌涂料

ISO12944 中指出 C4 和 C5 环境中钢结构防腐蚀推荐使用富锌底漆,因此富锌底漆在风力发电中具有广泛应用。富锌涂料分为无机富锌涂料和有机富锌涂料,有机富锌涂料最常用的是环氧富锌涂料。

20 世纪末,随着环境保护越来越受到各国的重视,各种水性富锌底漆不断涌现。徐亮^[9]等在常见的水性无机硅酸盐富锌涂料中添加适量的硅丙乳液及碳纳米管,制成了性能良好的无机-有机复合水性富锌涂料。胡涛^[10]等利用气相二氧化硅表面活性高、分散性能良好的特点将其加入到环氧富锌涂料中,研究表明其能有效防止涂层中颗粒的团聚,使涂层表面更均匀、平整,同时还能有效提高涂层的附着力,大大增强了环氧富锌涂料的防腐蚀性能。傅晓平^[11]等制备了环氧富锌聚苯胺杂化金属重防腐蚀水性涂料,对比检测证明其具有优异的防腐蚀性能。

3.2 聚氨酯涂料

聚氨酯涂料中的丙烯酸聚氨酯面漆是 20 世纪 90 年代发展起来的一类新型涂料,以装饰性和防腐蚀性兼备的优点被广泛用于海上风电塔筒的防腐蚀

面漆。海洋大气中 Cl^- 含量很高,而在含有 Cl^- 的潮湿环境中丙烯酸聚氨酯涂层会加快失效^[12],另外长期的紫外线照射会使重防腐蚀涂料老化、变质以致失去防腐蚀能力。

海上风电用面漆需具备耐候性高、耐海水性好和防海洋微生物附着等特性。国内外学者为提高丙烯酸聚氨酯涂料的综合性能进行了大量研究。Krishnan^[13]成功合成了具有互穿网络结构的室温固化型环氧-丙烯酸-聚氨酯高性能防锈涂料,具有优异的耐腐蚀性、耐候性和保光保色性,兼具底漆和面漆双重功效。S. S. Pathak 等^[14]用有机硅 MTMS 和 GPTMS 改性水性聚氨酯涂料,增强了水性聚氨酯涂料的弹性和机械应力,使其适用于海洋领域。陈俊等^[15]制备了室温固化水性双组分氟丙烯酸-聚氨酯清漆,其具有优异的耐水和耐老化等性能,可以广泛使用在钢结构等对涂料要求苛刻的场合。

纳米防腐蚀涂料具有性能优异、制造方便、价格相对低廉等一些其他材料所无法比拟的优点,在选择防腐蚀措施时成为优先考虑的对象^[16]。高丽君等^[17]制得丙烯酸酯类聚氨酯/蛭石纳米复合材料,综合性能较纯丙烯酸酯类聚氨酯显著提高。周树学等^[18]通过共混法制得了 KH570 改性纳米 SiO_2 丙烯酸聚氨酯涂料,综合性能显著提高。毛晨峰等^[19]制得了金红石型纳米 TiO_2 改性丙烯酸聚氨酯涂料,该复合材料能有效地屏蔽紫外线,提高材料的抗老化和防腐蚀性能。Saha 等^[20]将球状的纳米 TiO_2 用来改性聚氨酯泡沫,大大提高了聚合物的力学性能和防腐蚀性能。

3.3 其它涂料

天冬氨酸酯涂料、高性能氟碳涂料、聚硅氧烷涂料的出现为海上风电设备的防腐蚀提供了新的涂装方案,通过合理设计可以满足海上风电防腐蚀的要求,但是存在价格高、施工要求高等缺点,还有待进一步改善。

4 结束语

海上风电防腐蚀涂层是以多道涂层组成的一个完整的防护体系来发挥防腐蚀功能的,而目前对涂料的改性研究大都只是针对某一种涂料在基材上的性能进行改性,对海上风电的腐蚀与防护进行系统研究的还很少。对于我国来说,海上风电腐蚀防护基础薄,方案少,运行中的风电防腐蚀涂料几乎全部为进口或国外品牌,导致风电投入大、成本高。另外

由于涂装环境的限制和沿用传统涂装工艺等原因,涂料浪费大,污染严重,与风能环保属性不符。

缓蚀剂因具有工艺简便、成本低廉、适用性强等特点而被广泛用于金属防腐蚀防护,将缓蚀剂加入涂料中可以提高涂料的防腐蚀性能,纳米材料因其特有的光学效应,能有效地抵御紫外线照射对有机高分子涂层的降解作用,从而有效改善涂层的防腐蚀性能。应用缓蚀剂和纳米材料的优点对现有防腐蚀涂料进行改性优化,可以全面提高涂料的综合性能,有望对海上风电提供更好的腐蚀防护。

参考文献:

- [1] Brian Snyder, Mark J Kaiser. Ecological and economic cost-benefit analysis of offshore wind energy[J]. Renewable Energy, 2009, 34(6):1567—1578.
- [2] Simon-Philippe Breton, Geir Moe. Status plans and technologies for offshore wind turbines in Europe and North America[J]. Renewable Energy, 2009, 34(3): 646—656.
- [3] 刘新,赵荣坊. 电力工业的防腐及特种涂料要求[J]. 现代涂料与涂装,2008,11(7):48—51.
- [4] 单晓宇. 海上风电发展不能忽视防腐技术[N]. 中国海洋报,2009-07-31.
- [5] 肖广民,陈贵. 浅谈风力发电机塔架的制造[J]. 风力发电,2004,20(4):37—39.
- [6] ISO 12944—1998. Paints and varnishes—corrosion protection of steel structures by protective paint systems [S].
- [7] 李爱贵,纬文礼,王雪莹,等. 海洋平台涂层防腐蚀系统设计[J]. 石油化工腐蚀与防护,2009,26(1):48—51.
- [8] 金晓鸿,王建,刘新,等. 防腐蚀涂装工程[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [9] 徐亮,唐一文,龚书生,等. 碳纳米管改性无机-有机水性富锌涂料的制备及其性能[J]. 腐蚀与防护,2008, 29(6):309—312.
- [10] 胡涛,薛银飞,王建军,等. 气相二氧化硅对环氧富锌涂料性能的改性研究[J]. 广东化工,2009,36(5):11—15.
- [11] 傅晓平,龙兰,李岩等. 环氧富锌聚苯胺杂化金属重防腐水性涂料的研制[J]. 表面技术,2009,38(2):80—84.
- [12] 杨丽霞,李晓刚,程学群,等. 水、氯离子在丙烯酸聚氨酯涂层中的扩散传输行为[J]. 中国腐蚀与防护学报,2006,26(1):6—10.

(下转第 885 页)

[1] 邓文礼, 杨林静, 王琛. 烷基硫醇分子自组装研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(5): 304—307.

[2] 陈跃东. DJB-823 在防银变色上的应用[J]. 表面技术, 2000, 29(2): 38—39.

[3] Fang J L, Cai Z. Tarnish and protection of silver deposit-mechanism and method[J]. Science in China, Ser B, 1989, 32(1): 23.

[4] Bigelow W C, Pickett D L, Zisman W A. Oleophobic monolayers: I. Films adsorbed from solution in non-polar liquids[J]. Journal of Colloid Science, 1946, 1 (6): 513—538.

[5] 邓文礼, 杨林静, 王琛. 烷基硫醇分子自组装研究进展[J]. 科学通报, 1998, 43(5): 449—457.

[6] 杨生荣, 任嗣利, 张俊彦, 等. 自组装单分子膜的结构及其自组装机理[J]. 高等学校化学学报, 2001, 22 (3): 470—476.

[7] 杨长江, 梁成浩. 自组装膜在金属防护中的应用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(5): 315—319.

[8] 杨学耕, 陈慎豪, 马厚义, 等. 金属表面自组装缓蚀功能分子膜[J]. 化学进展, 2003, 15(2): 123—128.

[9] Laibinis P E, Whitesides G E, Allara D L. Comparison of the structures and wetting properties of self-assembled monolayers of n-alkanethiols on the coinage metal surfaces, Cu, Ag, Au[J]. J Am Chem Soc., 1991, 113: 7152—7167.

[10] Magali E, Miehel K, Hisasi T. The formation of self-assembling membrane of hexadecane-thiol on silver to prevent the tarnishing[J]. Electrochimica Acta, 2004, 49(17/18): 2937—1943.

[11] Burleigh T D, Gu Y, Donahey G, et al. Tarnish protection of silver using a hexadecanethiol self-assembled monolayer and descriptions of accelerated tarnish tests[J]. Corrosion, 2001, 57(12): 1066—1074.

[12] 刘金红, 王怡红, 郭志睿, 等. 银表面分子自组装膜的防腐性能[J]. 化工学报, 2004, 55(10): 1674—1677.

[13] 刘金红, 王怡红, 郭志睿, 等. 银保护用自组装单分子膜的防腐蚀研究[J]. 材料保护, 2004, 37(1): 6—9.

[14] Wang Y H, Song W, Gao L J, et al. Analysis of electrochemical impedance and XRD spectroscopy for complex self-assembled film on silver[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2006, 22(1): 121—124.

[15] 杨长江. 金银币变色机理和抗变色工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学博士学位论文, 2008.

[16] Tao Y T. Structural comparison of self-assembled monolayers of n-alkanoic acids on the surfaces of silver, copper, and aluminum[J]. J Am Chem Soc., 1993, 115: 4350—4358.

[17] Liang C H, Yang C J, Huang N B. Tarnish protection of silver by octadecanethiol self-assembled monolayers prepared in aqueous micellar solution[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(8): 1034—1044.

[18] Evesque M, Keddam M, Takenouti H. The formation of self-assembling membrane of hexadecane-thiol on silver to prevent the tarnishing[J]. Electrochimica Acta, 2004, 49(17/18): 2937—2943.

[19] 邓文礼, 杨林静, 王琛, 等. 烷基硫醇分子自组装研究进展[J]. 科学通报, 1998, 43(5): 449—457.

[20] 王静, 李德刚, 于先进, 等. 金属表面烷基硫醇类自组装膜的研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2008, 28(7): 67—71.

[21] 马洪芳, 项东, 孙华, 等. 自组装单分子膜技术及金属腐蚀与防护[J]. 山东建筑工程学院学报, 2004, 19 (3): 86—89.

(上接第 877 页)

- [13] Krishnan S M. Studies on corrosion resistant properties of sacrificial primed IPN coating systems in comparison with epoxy-PU systems[J]. Progress in Organic Coatings, 2006, 57(4):383—391.
- [14] Pathak S S, Sharma A, Khanna A S. Value addition to waterborne polyurethane resin by silicone modification for developing high performance coating on aluminum alloy[J]. Progress in Organic Coatings, 2009, 65(2):206—216.
- [15] 陈俊, 闫福安. 性双组分氟丙烯酸-聚氨酯涂料的研制及性能测试[J]. 中国涂料, 2009, 24(3):24—28.
- [16] 童忠良. 纳米功能涂料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

- [17] 高丽君,周立明,方少明,等. 丙烯酸酯类聚氨酯/蛭石纳米复合材料的制备与性能研究[J]. 工程塑料应用,2009,37(5):13—16.
- [18] 周树学,陈国栋,武利民,等. 丙烯酸酯聚氨酯/SiO₂纳米复合涂层结构与形态对其耐刮伤性影响研究[J]. 涂料工业,2006,36(5):1—4.
- [19] 毛晨峰,王新灵. 羟基丙烯酸聚氨酯/金红石型纳米TiO₂改性复合材料研究[J]. 化学建材,2007,23(2):30—32.
- [20] Saha M C, Jeelani S. Enhancement in thermal and mechanical properties of polyurethane foam infused with nanoparticles[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 479(2): 213—222.