

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.004

海洋工程装备重防腐涂料的应用研究

张贤慧, 方大庆, 钟承珠, 徐初琪, 苏雅丽

(中国船舶重工集团公司 厦门双瑞船舶涂料有限公司, 厦门 361101)

摘要: 介绍了海洋工程装备的腐蚀环境, 阐述了海洋工程装备在海洋大气区、潮差浪溅区、海水浸没区、海泥区等不同部位的腐蚀特点及重防腐涂料的选用及性能评价标准, 分析了目前国际上通用的海洋工程防腐设计标准结合实际案例, 研发并构建了适应苛刻海洋环境中的海洋工程钢结构防腐涂层体系。研究表明: 构建的海洋工程钢结构防腐涂层体系性能卓越, 满足 NORSOK Standard M-501 标准认证, 可保障海洋工程装备在湿、高盐、干湿交替、浸没等强腐蚀海洋环境下的安全稳定运行。

关键词: 海洋工程装备; 重防腐; 风电涂料; NORSOK Standard M-501

中图分类号: TQ632.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)03-0023-05

Application Research of Heavy-duty Anticorrosion Coatings for Marine Engineering Equipment

ZHANG Xianhui, FANG Daqing, ZHONG Chengzhu, XU Chuqi, SU Yali

(Xiamen Sunrui Ship Coating Co., Ltd., China Shipbuilding Industry Corporation, Xiamen 361101, China)

Abstract: This article introduces the corrosion environment and corrosion properties of offshore structures. It also introduces the selection and performance evaluation standards for heavy-duty coatings. It analyzes the general engineering cases with suitable heavy-duty anticorrosion coating system for offshore structures in harsh marine environments, then the suitable coating system for harsh marine environments are researched and established. The results show that the coating system offers great performance and meet the standard of NORSOK Standard M-501, which can ensure the safety and stability of the offshore structures in highly corrosive marine environments with wet, high-salt, alternation of drying and wetting, and immersion conditions.

Keywords: marine engineering equipment; heavy-duty anticorrosion; wind turbine coating; NORSOK standard M-501

随着陆地资源的枯竭, 资源开发由陆地转向海洋。经过近几十年的开发, 近海资源勘探程度较高, 多数已进入开发后期, 因此, 世界各国将资源开发的目光转向深海。在海洋工程装备领域, 随着陆地资源的日趋匮乏, 海洋资源的开发将带动海洋工程装备业的快速发展。我国目前约有海洋平台 280 座, 近两年在建或正在筹划的海洋平台约有 30 余座。在风电领域, 近年来国内发展也较快, 特别是这几年在沿海和西北地区尤为突出。2013 年, 风

力发电量共计 124.6 TWh, 同比增长 33%, 未来海上风电的发展将更为迅速。进行资源开发的海洋工程装备在海洋环境中不可避免地会遭受海水腐蚀, 从而严重影响装备的服役寿命, 导致严重的安全事故和巨大的经济损失和环境污染。

伴随着这些高端海洋工程装备制造业的快速发展, 高性能涂料产业也必然将配套这些行业而同步发展, 市场需求量巨大, 增长快速, 同时对这些装备的安全使用、功能发挥将起到至关重要的作用。相对于陆地装备, 海洋工程装备对设备的安装、维护等技术要求更高, 海洋工程装备的腐蚀防护要求与陆上装备的要求完全不同, 海洋工程装备面临更为复杂和苛刻的腐蚀因素, 提出了新的要求和挑战。

收稿日期: 2015-08-16

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2014BAE12B01)

作者简介: 张贤慧(1985), 男, 山东潍坊人, 工程师, 硕士, 主要从事涂料开发研究工作 (e-mail) zhangxianhui01@gmail.com。

1 海洋腐蚀环境

海洋环境是一个严酷的腐蚀环境口, 钢结构在海洋中的腐蚀特点, 可分为: 海洋大气区、潮差浪溅区、海水浸没区、海泥区。按照 ISO 12944 标准^[1]对腐蚀环境的分类, 海洋大气区处于海洋大气腐蚀环境(C5-M)、潮差浪溅区处于海洋大气腐蚀环境(C5-M)与海水浸没(Im2)交替的腐蚀环境、海水浸没区属于海水浸没 Im2 的腐蚀环境、海泥区属于海水浸没和土壤的腐蚀环境, 海泥区既有土壤的腐蚀特点又有海水的腐蚀行为。

其中潮差浪溅区的腐蚀速率是最高的, EGON Kunze^[2]曾对低碳钢和非合金钢在不同部位海洋环境中的腐蚀速率进行统计, 结果见表 1。浪溅区的平均腐蚀速率比海水浸没区高 3~10 倍^[2-3]。

表 1 海洋环境不同部位的腐蚀速率

Table 1 Corrosion Rates of Different Positions in Marine Environment

环境部位	腐蚀速率
海洋大气区	0.05~0.07 mm/a
潮差浪溅区	0.12~0.27 mm/a
浸没区	0.03~0.09 mm/a
海泥区	ca. 0.015 mm/a

在海洋大气区, 由于大气中湿度大、盐分高, 在钢铁表面容易形成含有强电解质溶液, 有利于电化学腐蚀的进行, 钢结构在海洋大气(C5-M 腐蚀等级)的腐蚀速率一般较内陆地区的大气(如 C2 腐蚀等级)的腐蚀速率快 4~15 倍。在潮差浪溅区, 氧供应最为充分, 氧的去极化作用促进了钢结构的腐蚀, 同时在海水及海水中夹杂的泥沙的冲刷下对腐蚀产物及防护层进行冲刷造成破坏, 从而加速了腐蚀。在浸没区, 由于钢结构长期浸泡在海水中, 钢铁在海水中的腐蚀速度主要受海水的温度、溶解氧含量、盐度、污染物、海生物等因素的影响。海泥区位于海水浸没区以下, 海泥区的土壤中含有大量的盐分, 是一种比较复杂的腐蚀环境, 既有土壤的腐蚀特点又有海水的腐蚀行为, 钢结构在海泥区的腐蚀速度主要受海泥的孔隙率、导电性、溶解盐、pH 值等因素的影响。

2 海洋环境用涂料性能及加速试验评价

对于海洋环境中的结构物来说, 涂层防护是最

为经济有效的手段。由于海洋结构物所处的腐蚀环境极为严苛, 与传统涂料不同, 需要对涂料进行加强级设计并进行相关的试验评价。其中对海洋环境用涂层设计及加速性能评价标准主要有 ISO 12944^[1]、NACE SP0108^[4]、NORSOK Standard M-501^[5]、ISO 20340^[6]、NB/T 31006^[7]等。

1994 年, 挪威国家石油标准化组织发布 NORSOK Standard M-501 标准, 该标准因对涂料系统进行严酷的测试而被广泛用于海洋平台等苛刻腐蚀环境。NORSOK Standard M-501 标准 10 多年成功的应用业绩, 使其普遍被认为是恶劣环境下防腐涂料的质量保证。海洋工程装备涂料产品的可靠性是首要的, 当前 NORSOK Standard M-501 标准已被广泛用于海上工业等严酷/恶劣环境下针对“防腐涂层性能”的要求。NORSOK Standard M-501 标准采用 ISO 20340 标准对涂层系统进行性能测试, 表 2 为 ISO 20340 标准对防腐涂层性能的加速测试方法及测试时间。

表 2 ISO 20340 标准对防腐涂层性能的加速测试方法及测试时间

Table 2 Test Methods and Exposure Times for Determination of the Performance of Protective Coatings from ISO 20340

腐蚀环境等级	循环老化测试 ISO 20340	阴极剥离测试 ISO 15711	海水浸泡 ISO 2812-2
C5-M	4 200 h	—	—
Im2	—	4 200 h	4 200 h

2.1 大气区涂料

《海上风电场钢结构防腐蚀技术标准》NB/T 31006 对大气区的涂料要求经 4 000 h 耐湿热试验、4 000 h 盐雾试验、4 200 h 耐人工老化试验测试, 人工老化后涂层不生锈不起泡、不剥落、不开裂且允许轻度粉化和 3 级变色、3 级失光; 盐雾试验后涂层不起泡、不剥落、不生锈、不开裂。国外的 NORSOK Standard M-501 对大气区涂层的性能要求主要参照 ISO 20340 标准的规定: 循环老化试验; 经 4 200 h 循环老化试验即 25 周期的试验, 其中 72 h 紫外老化试验(UVA-340)——72 h 盐雾试验——24 h 冷冻试验($-20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$)为 1 个周期。对于富锌体系的划线处的腐蚀蔓延 ≤ 3 mm; 对于非富锌体系的划线处的腐蚀蔓延 ≤ 8 mm, 粉化不超过 2 级; 漆膜起泡、生锈、裂纹、剥落等级均为 0 级。ISO 20340 标准中的循环老化试验, 是一个

模拟海洋工程装备涂料在不同的服役环境中的一种非常有效的加速试验, 综合考察了紫外光对涂层分子结构的破坏、盐雾对涂层侵蚀、温度交变对涂层应力的考验等因素, 比单一的耐人工老化测试、盐雾测试等相比更能体现涂层的实际服役情况。阿克苏诺贝尔国际油漆英国中心实验室对于静态盐雾实验和动态循环腐蚀测试进行的多年对比测试, 同样发现动态循环腐蚀实验对于防腐涂料的要求远远高于单纯的静态盐雾实验, 而且动态循环试验与涂层的实际服役表现更为契合^[8]。Rowell^[9]指出, 样板在不含有冻融过程进行 4 200 h 循环试验老化试验(72 h 紫外老化试验 <UVA -340>——72 h 盐雾试验), 样板的单边剥离为 7.3 mm; 样板在含有冻融过程进行 4 200 h 循环试验老化试验(72 h 紫外老化试验 <UVA -340>——72 h 盐雾试验——24 h 冷冻试验 <-20 ± 2℃>), 样板的单边剥离为 13 mm, 可见冻融温度交变是影响涂层性能的决定因素。

2.2 潮差浪溅区涂料

NORSOK Standard M-501 对潮差浪溅区涂层的性能要求主要参照 ISO 20340 标准的规定:

1) 循环老化试验。经 4 200 h 循环老化试验即 25 周期的试验, 其中 72 h 紫外老化试验(UVA -340)——72 h 盐雾试验——24 h 冷冻试验(-20 ± 2℃)为一个周期。划线处的腐蚀蔓延 ≤ 8 mm。

2) 耐阴极剥离性能。耐 4 200 h 阴极剥离试验, 剥离直径不超过 20 mm。

3) 耐海水浸泡性能。经 4 200 h 海水浸泡试验, 漆膜完好, 划线处的腐蚀蔓延 ≤ 8 mm。

2.3 海水浸没区

NORSOK Standard M-501 标准对海水浸没区涂层的性能要求主要参照 ISO 20340 标准的规定:

1) 耐阴极剥离性能: 耐 4 200 h 阴极剥离试验, 剥离直径不超过 20 mm。

2) 耐海水浸泡性能: 经 4 200 h 海水浸泡试验, 漆膜完好, 划线处的腐蚀蔓延 ≤ 8 mm。

海洋工程及海洋工程装备的潮差浪溅区及海水浸没区的腐蚀防护一般采用阴极保护与涂层进行联合防护, 要求相关的涂层具有极佳的阴极保护兼容性, 在该部位采用涂层与阴极保护联合防护方案时需要涂层的耐阴极剥离性能进行相关的认证。

3 海洋环境涂料的选用

3.1 大气区涂料

对于海洋大气区涂料一般选择具有阴极保护效果的涂层作为底漆直接涂覆在金属上起到电化学保护的效果, 如热浸涂金属、热喷涂金属、热喷涂金属、环氧富锌底漆、无机富锌底漆等产品。热浸涂金属涂层的厚度一般不低于 125 μm, 而且热浸涂装前金属基材必须进行喷砂处理; 富锌底漆的涂装厚度一般在 60 ~ 80 μm。采用金属热喷涂/浸涂的方式一般可以达到 20 年以上免维护的, 40 年少维护的防腐使用寿命(其对防腐配套涂层的性能要求更高^[10]); 采用富锌底漆一般可以达到 15 年以上的防腐蚀寿命。不同厂家提供的富锌底漆的性能相差较大, Knudsen 等人^[11], 对不同的富锌底漆进行了 5 年的实海曝露测试, 发现: (1) 不同厂家的环氧富锌涂料的性能差异较大, 锌粉含量越高, 性能不一定好, 涂料的防腐性能不仅取决于涂料自身的性能还取决于如何施工; (2) 环氧富锌层的厚度是影响性能的关键因素, 漆膜厚度越厚, 实海测试越优异。

海洋工程装备用涂料应选用合格厂家提供的经苛刻试验认证过的涂层体系。基于以上研究, 作者所在单位厦门双瑞船舶涂料有限公司(后简称厦门双瑞)研发了海洋大气区环氧富锌配套涂料体系(见表 3)^[12-13], 根据海洋大气区配套涂料的性能测试数据(见表 4), 其性能完全满足 NORSOK Standard M-501 标准的要求。该涂料体系与一般大气中钢结构防腐涂层体系相比具有一系列的创新, 具体表现为:

表 3 海洋大气区涂料配套方案

Table 3 Coating System for Marine Atmospheric Environment		
涂层	产品配套	干膜厚度/μm
底漆	厦门双瑞 725-H06-21 环氧富锌底漆	60
中间漆	厦门双瑞 725-H53-81 环氧中间漆	180
面漆	厦门双瑞 725-S52-60 脂肪族聚氨酯面漆	40
总干膜厚度 T. D. F. T		280

注: 1) 基材需要喷砂处理至 Sa 2.5 级, 表面粗糙度 50 ~ 85 μm;
2) 上述膜厚仅为基本膜厚, 可根据工程现状及防腐要求适当调整膜厚。

1) 环氧富锌涂层中合理优化了不同分子量树脂的搭配, 提高了涂层的耐性及机械性能; 对富锌涂

料中的活性金属成分进行优化,提高了金属的阴极保护效果,使得漆膜较一般环氧富锌具有更为优异的防腐性能;增强环氧富锌层的致密性,使得漆膜屏蔽性能提高,有效延缓腐蚀介质侵入基材。

表4 海洋大气区配套涂料性能测试

Table 4 Properties for Coating System of Marine Atmospheric Environment

测试项目	平均腐蚀蔓延		粉化	
	NORSOK 要求	实测	NORSOK 要求 2级	实测 0级
ISO 20340 循环老化试验	< 3.0 mm	2.3 mm		

注:漆膜起泡、生锈、裂纹、剥落等级均为0级。

2)环氧中间漆优化了各组分的构成,一方面可提高机械性能,使得涂层与底漆和面漆间配套性能更好;另一方面可提高中间漆的屏蔽性能,有效提高配套层的防腐性能。

3)脂肪族聚氨酯面漆,采用进口高性能低黏度树脂材料,制备的脂肪族聚氨酯面漆,不仅具有较高的固体份含量72%,而且具有优异的耐候性能,是传统的聚氨酯涂料耐候性能2~5倍;另外脂肪族聚氨酯面漆的复涂性能及与中间漆的配套性能优异,满足海工装备超长期服役的需求。

阴极保护性底漆中因含有活泼金属成分,在实际应用中一般不单独使用,需要配合中间漆和高性能耐候面漆一起使用。中间涂层主要采用高固体份环氧涂料,通常会采用云铁、铝粉或玻璃鳞片来加强涂层的屏蔽作用。高性能面漆的选用目前主要有3种类别:聚氨酯面漆、聚硅氧烷面漆、氟碳面漆(见表5)。由于海洋工程装备往往处于人迹罕至的区域,涂层维护不便,要求面漆在紫外线下抵御褪色、变色、龟裂、粉化和剥落的能力强,以维持涂层防锈性能。不同高性能面漆的耐候、保光性能对比数据,其中几种高性能面漆的耐候性能及保光性能对比的一般顺序为:氟碳面漆>聚硅氧烷面漆>脂肪族聚氨酯面漆>聚氨酯面漆。氟碳涂料因氟原

表5 三种高性能面漆的基本数据对比

Table 5 Basic Properties of Three High-performance Top Coatings

型号	面漆参数			
	化学键	键能 / (kJ/mol)	体积固体份 / %	设计厚度 / μm
氟碳面漆	F—C	485	30~55	25~60
聚硅氧烷面漆	Si—O—Si	452	50~90	50~150
聚氨酯	C—C	358	50~75	40~80

子电负性最高,氟碳键能最大,C—F键结合牢固的结构特点,从而性能上耐污染性好、可阻挡紫外线侵蚀、耐化学介质性好、屏蔽作用好、耐高低温。QUV人工加速老化试验显示:氟碳涂料2500h保光性数值约为初始值的90%,是普通聚氨酯的2~3倍。

3.2 潮差浪溅区及水下区涂料

应用于海洋潮差浪溅区及水下区的重防腐涂料以高固体份环氧涂料^[14-17]作为代表,高固体份涂料一直是船舶、海洋工程、海上风电等结构物的首选防腐涂料,具有优异的耐海水性能,且阴极保护相容性良好。在实际工程应用中,潮差浪溅区与水下区一般是采用重防腐涂料与阴极保护进行联合防护^[18],采用重防腐涂料进行涂装后配套使用阴极保护的手段,一方面可增强防腐的效果,另一方面可减少阴极保护的面积,减少牺牲阳极金属的使用量从而大幅降低成本。潮差浪溅区因潮水的冲刷,加速了腐蚀,需要采用超强耐磨性涂料并增加重防腐涂层的厚度。在水下区,采用的重防腐涂料也需要与阴极保护有极强的相容性。潮差浪溅区的平均腐蚀速率比海水浸没区高3~10倍。同时由于海水夹杂着泥沙的冲刷,因此要求浪溅区结构物的防腐涂层不仅具有优异的防腐性能,而且还应具有较高的耐磨性^[15]。高固体份环氧涂料一般采用以铝粉、玻璃鳞片等为主的片状屏蔽性能填料来增强屏蔽性能,在海洋工程与风电领域已有多年的应用记录,也是目前最主要的重防腐涂料。如英国 Greater Gabbard 海上风场采用了高固体份耐磨环氧涂料,宝钢原料码头钢管桩采用厦门双瑞的环氧重防腐涂料已有近30年的优异防腐使用记录(见图1),英国北海海上风电项目、东海大桥海上风电场等项目也均采用高固体份环氧涂料。



(a) 在海上风电中的应用



(b) 在海洋平台的应用

图1 宝钢原料码头防腐使用记录

Fig. 1 Anti-corrosion Record in Baosteel Raw Material Wharf

近年来, 厦门双瑞在国防 973、工信部高性能船舶项目、厦门市科技局等一系列国家地方项目的资助下, 对系列高性能重防腐涂料进行优化升级, 开发了可满足 NORSOK Standard M-501 标准认证的系列重防腐涂料, 构建并完成了海洋平台涂料体系。其中所研发的潮差浪溅区重防腐涂料(725-H53-38 环氧玻璃鳞片涂料)^[15]研发成功后, 立即投入了项目的应用中, 累计销售产值超过 5 千万元, 取得了可观的经济效益。海洋潮差浪溅区与水下区的涂料配套体系见表 6, 其改进后的性能测试数据见表 7。

表 6 海洋潮差浪溅区和水下区涂料配套方案

Table 6 Coating System for Splash and Tidal Zones, and Sea Water Immersion Zones

方案	涂层	产品配套	干膜厚度 度/ μm	总干膜厚度 T. D. F. T/ μm
潮差浪溅区涂料配套方案	底漆	厦门双瑞 725-H53-38 环氧玻璃鳞片涂料	300	600
	面漆	厦门双瑞 725-H53-38 环氧玻璃鳞片涂料	300	
水下区涂料配套方案	底漆	厦门双瑞 725-H53-38 环氧玻璃鳞片涂料	175	350
	面漆	厦门双瑞 725-H53-38 环氧玻璃鳞片涂料	175	

注: 1) 基材需要喷砂处理至 Sa 2.5 级, 表面粗糙度 50-85 μm ;
2) 上述膜厚仅为基本膜厚, 可根据工程现状及防腐要求适当调整膜厚。

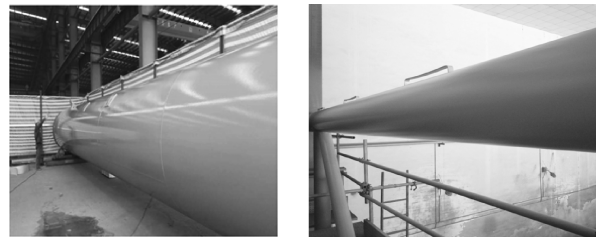
表 7 潮差浪溅区和水下区配套涂料性能测试

Table 7 The Properties for Coating System of Splash and Tidal Zones, and Sea Water Immersion Zones

测试项目	平均腐蚀蔓延 /mm		阴极剥离 /mm		海水浸泡 /mm	
	ISO	NORSOK	实测	NORSOK	实测	NORSOK
20340	要求 <8	5.3	要求 <20	8.0	要求 <8	0.2

注: 漆膜起泡、生锈、裂纹、剥落等级均为 0 级。

725-H53-38 环氧玻璃鳞片涂料参照 Norsok Standard M-501 设计的潮差浪溅区及水下区专用涂料, 采用高品质的环氧树脂和固化剂作为成膜物质, 添加了玻璃鳞片, 其特有的屏蔽、耐磨性能也赋予了涂料优异的性能, 通过计算机模拟及试验相结合的手段, 优化涂层中各组分的比例, 满足苛刻环境防腐使用的要求, 涂层具有抗氯离子渗透能力强、耐磨性高、耐阴极剥离性能优异、耐酸、碱性好等特点; 还具有突出的机械性能, 满足海工装备的重防腐需求。725-H53-38 环氧玻璃鳞片涂料在海上风电与海洋平台中的应用见图 2。



(a) 在海上风电中的应用

(b) 在海洋平台中的应用

图 2 725-H53-38 环氧玻璃鳞片涂料在海上风电与海洋平台中的应用

Fig. 2 725-H53-38 Epoxy Glass Flakes Coatings Applied in Offshore and Wind Turbine

4 结论

海上装备处于高湿、高盐、干湿交替、浸没等强腐蚀环境中, 腐蚀速率快, 海洋工程装备在不同的服役环境下腐蚀特点不同, 因而决定了不同部位的涂层设计具有差异性。本文介绍了海洋工程装备的腐蚀环境, 阐述了海洋工程装备在海洋大气区、潮差浪溅区、海水浸没区、海泥区等不同部位的腐蚀特点及重防腐涂料的选用及性能评价标准, 通过对目前国际上通用的海洋工程防腐设计标准结合实际案例进行研究, 研发并构建了适应苛刻海洋环境中的海洋工程钢结构防腐涂层体系。研究表明: 构建的海洋工程钢结构防腐涂层体系性能卓越, 满足 NORSOK Standard M-501 标准认证, 可保障海洋工程装备在湿、高盐、干湿交替、浸没等强腐蚀海洋环境下的安全稳定运行。

参考文献:

- [1] DIN EN ISO 12944—1998, Korrosionsschutz Von Stahlbauten Durch Beschichtungs Systeme [S].
- [2] 李云飞, 唐聪, 陈韬. 钢管桩阴极保护与 Denso 防腐技术联合保护 [J]. 中国港湾建设, 2011(2): 8-9.
LI Y F, TANG C, CHEN T. Combination of Cathodic Protection with Denso Anti-corrosion Technique for Steel Pipe Piles [J]. China Harbour Engineering, 2011(2): 8-9.
- [3] EGON Kunze. Korrosion Und Korrosionsschutz, Band 4 Korrosion Und Korrosionsschutz in Verschiedenen GEBIETEN [M]. Wiley-VCH Verlag, 2001.
- [4] NACE SP0108, Corrosion Control of Offshore Structures by Protective Coatings[S].
- [5] NORSOK Standard M-501. Surface Preparation and Protective Coating [S].

参考文献:

- [1] 章文俊. 基于接线模式的配电网络优化规划 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [2] RAMIREZ-ROSADO I J, BERNAL-AGUSTIN J L. Reliability and Costs Optimization for Distribution Networks Expansion Using an Evolutionary Algorithm [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 1(16): 111-118.
- [3] 孔涛, 程浩忠, 许童羽. 基于组件式 GIS 网络分析与多目标遗传算法的城市中压配电网规划 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 19(28): 49-55.
KONG Tao, CHENG Haozhong, XU Tongyu. Urban Medium-Voltage Distribution Network Planning Based on ComGIS Network Analysis and Multi-objective Genetic Algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 19(28): 49-55.
- [4] 鞠平, 李靖霞. 配电网模糊优化规划(I): 模型与方法 [J]. 电力系统自动化, 2007, 14(26): 45-48.
JU Ping, LI Jingxia. Optimized Fuzzy Planning of Distribution Power Network(I): Model and Methodology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 14(26): 45-48.
- [5] IMAN Ziari, GERARD Ledwich, ARINDAM Ghosh, et al. Integrated Distribution Systems Planning to Improve Reliability Under Load Growth [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 3(22): 1-9.
- [6] GONEN T, FOOTE B L. Distribution System Planning Using Mixed Integer Programming [J]. IEEE Proceedings C: Generation, Transmission and Distribution, 1981, 2(128): 70-79.
- [7] 刘健, 杨文字, 余健明. 一种基于改进最小生成树算法的配电网架优化规划 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 10(24): 103-108.
LIU Jian, YANG Wenyu, YU Jianming. An Improved Minimum-cost Spanning Tree Based Optimal Planning of Distribution Networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 10(24): 103-108.
- [8] 伍力, 吴捷, 钟丹虹. 多目标优化改进遗传算法在电网规划中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2000, 12(24): 45-48.
WU Li, WU Jie, ZHONG Danhong. Application of an Improved Genetic Algorithm in Multi-objective Power Network Optimization Planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 12(24): 45-48.
- [9] FERREIRA L A F, CARVALHO P M S, BARRUNCHO L M F. An Evolutionary Approach to Operational Planning and Expansion Planning of Large Scale Distributed Systems [C] // Transmission and Distribution Conference, New Orleans: IEEE, 1999: 345-349.
- [10] 陈章潮, 顾洁, 孙纯军. 改进的混合模拟退火-遗传算法应用于电网规划 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(10): 28-31, 40.
CHEN Zhangchao, GU Jie, SUN Chunjun. Application of the Mix Genetic-Simulated Annealing Algorithm in Electric Network Planning [J]. Automation of Electric Power System, 1999, 23(10): 28-31, 40.
- [11] 王大雷. 网格分析法在城乡配电网规划中的应用与研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [12] 吴文武. 城市配电网格化管理探讨 [J]. 技术与市场, 2012, 20(2): 95-96.
WU Wenwu. The Study of Gridding Management for City Distribution Networks [J]. Technology and Market, 2012, 20(2): 95-96.
- (责任编辑 黄肇和)
-
- (上接第 28 页 Continued from Page 28)
- [6] ISO 20340, Paints and Varnishes — Performance Requirements for Protective Paint Systems for Offshore and Related Structures [S].
- [7] NB/T 31006—2011, 海上风电场钢结构防腐蚀技术标准 [S].
- [8] 徐克文, 李君, 赵昌华. 海上风电防腐系统的选择与运用 [C]//全国电力系统腐蚀控制及检测技术交流会论文集. 中国腐蚀与防护学会, 长沙, 2009: 222-228.
- [9] SMITH C, SIEWERT T, MISHRA B, et al. Coatings for Corrosion Protection: Offshore Oil and Gas Operation Facilities, Marine Pipeline and Ship Structures [R]. Mississippi, 2004.
- [10] KNUDSEN Ole. Coating Failure Incidents on the Norwegian Continental Shelf Since the Introduction of NORSOK M-501-Corrosion Conference & EXPO [C]. NACE, 2013: 2500.
- [11] KNUDSEN Ole. Zinc-rich Primers—Test Performance and Electrochemical Properties [J]. Progress in Organic Coatings, 2005, 54(3): 224-229.
- [12] 苏雅丽, 蔡云露, 方大庆. 一种不含有机树脂的无机硅酸锌车间底漆: 中国, ZL 201010604970. 4 [P]. 2010-12-25.
- [13] 于海涛, 陈凯峰, 赵建南. 一种具有优异耐候性的舰船用可复涂有机硅丙烯酸面漆: 中国, ZL201010252307. 2 [P]. 2010-08-06.
- [14] 方大庆, 温正明, 高波. 一种具有坚韧性的环氧重防腐涂料制备方法: 中国, 104530921A [P]. 2015-04-22.
- [15] 张贤慧, 李陈鄂, 方大庆. 一种海洋潮差/浪溅区用环氧玻璃鳞片涂料的制备方法: 中国, 201510047560. 7 [P]. 2015-01-29.
- [16] 张贤慧, 方大庆, 高波, 等. 海洋钢结构用环氧玻璃鳞片涂料的开发 [J]. 材料开发与应用, 2015(1): 15-19.
ZHANG X H, FANG D Q, GAO B, et al. Development of Epoxy Glass Flakes Coatings for Off-shore Steel Structures [J]. Development and Application of Materials, 2015(1): 15-19.
- [17] 张贤慧, 方大庆, 赖国伟, 等. PCCP 管用无溶剂环氧煤沥青重防腐涂料 [C]//第一届中国(石家庄)国际特种功能涂层技术论坛论文集. 河北省防腐保温协会, 石家庄: 2014.
- [18] NORSOK Standard M-503, Cathodic Protection [S].
- (责任编辑 郑文棠)