

重防腐涂料在海洋工程钢结构中的研究进展

张巧霞^{1,3}, 许沫², 王秀通¹, 李红¹, 韦秦怡^{1,4}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071;

2. 中海石油深海开发有限公司, 广东 深圳 518067;

3. 山东科技大学, 山东 青岛 266590; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 海洋重防腐涂料是金属腐蚀防护的重要手段, 具有相对于常规防腐涂料更长的保护期。简述了海洋工程钢结构的腐蚀现状以及海洋重防腐涂料研究的必要性, 总结了国内外在重防腐涂料领域的研究进展, 介绍了溶剂型重防腐涂料的主要种类和目前的制备工艺, 水性重防腐涂料的种类和发展趋势, 以及新型纳米改性涂料的特点和应用情况。

关键词: 重防腐涂料; 海洋工程; 钢结构

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.04.012

中图分类号: TJ04; TG172.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)04-0060-06

Research Progress of Heavy-duty Anticorrosive Coating Applied on Marine Steel Structure

ZHANG Qiao-xia^{1,3}, XU Mo², WANG Xiu-tong¹, LI Hong¹, WEI Qin-yi^{1,4}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

2. CNOOC Deepwater Development Co., Ltd, Shenzhen 518067, China;

3. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

ABSTRACT: The application of anticorrosive coating is an important mean of metal corrosion protection. Compared with the common coatings, the heavy-duty anticorrosive coating has a longer life time. In this review, the corrosion status of marine steel structures and the necessity of the study of heavy-duty anticorrosive coating were briefly described. The research progress of heavy-duty anticorrosive coating in China and overseas was summarized. The main

收稿日期: 2015-04-07; 修订日期: 2015-06-18

Received: 2015-04-07; Revised: 2015-06-18

基金项目: 国家发改委“远海大型浮式结构物研发”项目(Y42814101H); 南通市科技项目(BK2014008)

Fund: Supported by the Project of National Development and Reform Commission(Y42814101H); Nantong Science Project (BK2014008)

作者简介: 张巧霞(1989—), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事光电纳米材料的制备与研究。

Biography: ZHANG Qiao-xia(1989—), Female, from Yantai, Shandong, Master graduate student, Research focus: preparation and study of photoelectric nanomaterials.

通讯作者: 王秀通(1977—), 男, 山东青岛人, 博士, 副研究员, 主要从事海洋腐蚀与防护工作。

Corresponding author: WANG Xiu-tong(1977—), Male, from Qingdao, Shandong, Ph.D., Associate professor, Research focus: marine corrosion and protection.

types and the preparation process of solvent heavy-duty anticorrosive coatings, the kinds and developing trend of waterborne heavy-duty anticorrosive coatings as well as the features and application of novel nano-modified coatings were introduced.

KEY WORDS: heavy-duty anticorrosive coating; marine engineering; steel structure

海洋拥有着丰富的自然资源,并且它为人类提供了赖以生存的空间环境。海洋约占地球表面积的70%,它为人类的生存和发展提供了丰富的资源。我国不仅国土辽阔,而且所属我国管辖海域面积十分宽广,其中海域面积相当于我国陆地面积的1/3。加上岛屿海岸线绵延长达5万 km,有渤海、黄海、东海和南海四大主要海域。其中海区在500 m²以上的岛屿有6536个,拥有223 km领海权的海域面积达37万 km²,所管辖的专属经济区、海里领海、毗连区和部分国际海底区域面积近300万 km²。这一宽阔的海域面积中蕴藏着丰富的海洋自然资源,海洋资源的开发是有着重要战略意义的新兴领域。随着人们对陆地资源的进一步开采使其日趋枯竭,海洋成为人类的生存和发展所依赖重要支柱,海洋资源的开发任重而道远。海水的导电性很强,含有丰富的氯化物和硫酸盐类电解质,是一种腐蚀性比较强的天然腐蚀剂。在海面风浪的机械搅拌和强烈的自然对流作用下海水是被氧所饱和的,所以普通的钢铁材料在海洋环境下会被严重腐蚀。例如会对港口机械设备、海洋平台钢构架、钢栈桥及钢桩码头等大型海洋工程钢结构的安全运营造成巨大不可估计的经济损失。因此探索高效稳定的海洋工程钢结构的腐蚀防护手段任重而道远。针对此情况,目前人们选用最多的就是在钢结构外涂覆重防腐涂料。重防腐涂料是防腐涂料中最具代表性、威力和影响力最大、且有很大发展潜力的一类防腐涂料。文中将针对海洋重防腐涂料及国内外研究进展和发展方向进行系统的介绍。

1 海洋工程钢结构腐蚀现状

海洋工程钢结构是主要以钢材料为骨架的海洋工程用结构建筑。据统计全球每年的钢材产量超过10亿 t,而每年仅因腐蚀而报废的钢铁设备就相当于年产量的约30%。海洋工程建筑的数量随着人们对海洋资源的逐渐开发日益增多。例如海港、采油平台、人工岛、海底管道等。因此通过研究钢材料的腐蚀防护技术,以降低海洋腐蚀对国民经济造成的损失,对于国家的发展有重大的意义。海水这一复杂的天然腐蚀介质会对于处于其中的金属结构造成很大的破坏,是一种溶有大量以氯化钠为主的盐类电解

质。它又不同于简单的食盐溶液,其中还含有悬浮泥沙、溶解气体(O₂, CO₂等)、生物及腐败的有机物。因此海洋工程钢结构的海洋腐蚀与防护是一个复杂而严峻的问题。

全球各个大洋就像是一个相互连通的大平衡体。在海洋环境中,即使同一海域的同一地点也会表现出不同的腐蚀特征,这就是海洋腐蚀环境的复杂之所在。人们将海洋腐蚀环境大体分为5个带区,分别为:大气区、飞溅区、潮差区、全浸区以及海泥区。海洋工程钢结构在不同的腐蚀带区的腐蚀情况表现出不同的特点。其中飞溅区和潮差区的腐蚀速率最高,对腐蚀防护技术要求难度最大。针对不同的带区采取不同的防护手段,如涂覆涂料^[1-2]、矿脂包覆防腐技术、电化学保护、材料改性^[3]等。其中涂覆重防腐涂料是腐蚀防护方法中一种行之有效的重要手段。

2 重防腐涂料研究现状

重防腐涂料是能在相对苛刻的腐蚀环境里应用,相对常规防腐涂料而言具有更长保护期的一类防腐涂料,具有长效防腐寿命且能在苛刻的腐蚀环境下使用。相比于普通涂料,重防腐涂料一次喷涂就可获得较高的膜厚。其技术含量高,难度较大,涉及许多方面的综合技术,不仅仅依赖涂料的经验和知识,是多学科的知识交汇与融合。重防腐涂料的发展水平与性能,成为衡量防腐涂料先进技术和一个国家科学技术水平的标志。海洋工程钢结构要经受严酷的腐蚀条件挑战,它要求所用涂料有更强的附着力、耐冲击力和抗酸碱性。重防腐涂料根据不同的标准有不同的分类方法。下面根据有无溶剂就溶剂型及非溶剂型重防腐涂料的研究进展进行分类介绍,并且介绍了纳米改性涂料这一新兴领域的发展概况。

2.1 溶剂型重防腐涂料

涂料中的VOC(volatile organic compounds)是指涂料中总挥发物含量扣减水分含量,认为是涂料中挥发性有机化合物含量,其对人体健康会造成巨大危害。当VOC达到一定浓度时,人在短时间内会感到头晕、头痛、恶心、乏力等,严重时会出现昏迷、抽搐,并会伤害到人的肾脏、肝脏、大脑及中枢神经系

统,严重的会造成记忆力减退等后果。目前常用的海洋重防腐涂料多为溶剂型涂料,因为溶剂型重防腐涂料原料易得,性能优良,涂层附着力好,坚韧耐磨,不产生裂纹,耐化学品腐蚀。溶剂型涂料的主要品种有:环氧树脂和环氧酯类涂料、醇酸树脂涂料、聚氨酯类涂料、有机硅和氟化树脂涂料、丙烯酸类树脂涂料等。下面主要介绍一下最具代表性的环氧树脂型和聚氨酯型重防腐涂料。

1) 环氧树脂型涂料。环氧树脂型涂料是目前应用最广泛,需求量最大的一类溶剂型重防腐涂料。环氧树脂是一种线性结构的高分子材料,具有良好的稳定性、粘结性、绝缘性和力学强度,同时还具有较好的耐碱性和耐油性。1930年环氧树脂最先由瑞士 Pierre Castan 和美国 SOGreenlee 合成,在 1947 年实现了工业化生产。由于环氧树脂难溶于水溶液中,而用有机溶剂价格高、易挥发,有些还有毒性、VOC 较高,不符合目前环境保护的要求。溶剂型涂料的单道涂层厚度仅为 $100\ \mu\text{m}$ 左右,然而海洋重防腐结构涂膜厚度至少要 $300\sim 500\ \mu\text{m}$ 。这就需要多道工序才能达到规定膜厚,施工成本增加的同时,其溶剂对工人的身体健康也造成损害^[4]。人们通过各种手段对环氧树脂溶剂型涂料进行改性,如对其填料进行改性,对涂料中环氧树脂进行有机硅改性^[5-6]、酚醛改性^[7]、橡胶改性^[8]、聚氨酯改性^[9]等手段进行改性处理。如李明等^[10]将玻璃鳞片经复合硅烷处理剂处理后按 20%~30% 的用量制备出高性能的改性环氧树脂涂料。涂层中呈片状分布的玻璃鳞片有效阻止了腐蚀介质的侵入,并对于海洋工程钢铁结构有很好的防腐效果。Chonkaew 等^[11]用端羧基丁腈橡胶和有机粘土成功制备了高强度耐磨损的改性环氧树脂,可以用于浪花飞溅区等海水冲击力强的海洋工程钢结构的防腐防护。Li 等^[12]用中碱玻璃鳞片为主要防腐颜料,制备出一种适用于海洋气候的高固含厚浆型环氧玻璃鳞片涂料。当粒径为 300 目时玻璃鳞片用量为 20%~25%,其阻隔屏蔽效应最佳。相比较于普通环氧涂料在特殊性的海洋环境中,制备的环氧玻璃鳞片涂料性能更加优异。

2) 聚氨酯涂料。聚氨酯涂料由于其独特的结构表现出优异的性能,如高强度,耐油耐磨及耐高温等。聚氨酯涂料是开始研究较晚但发展势头强劲的一类涂料。聚氨酯的主要原料是异氰酸酯,异氰酸酯能与羟基树脂结合并且还能与底材中的羟基结合,形成牢固的化学键和氢键,使涂料与底材之间形成很强的粘附力^[13]。二异氰酸酯类是聚氨酯类涂料的重要原

料,甲苯二异氰酸酯是目前最主要的二异氰酸酯类原料。二苯甲烷二异氰酸酯对人类及对环境的危害性远小于甲苯二异氰酸酯,主要是由于其毒性及蒸气压较低。目前在聚氨酯的各个行业,二苯甲烷二异氰酸酯代替甲苯二异氰酸酯已是大势所趋^[14]。

追求高固体分、水性化、无(弱)溶剂化、无重金属化、低表面处理化、高性能化、多功能化、低成本化、节省资源化是涂料发展的国际大趋势^[15]。水性涂料是迎合人们日益增长的环保意识而逐渐发展起来的。其特点是主要以水为分散介质,不含或含很少的有机溶剂所以,VOC 含量低。相比于溶剂型涂料对环境及施工人员的健康损害少。

2.2 水性重防腐涂料

水性涂料中没有或者含有很少的有机溶剂而是以水作为分散介质,其无气味、不易燃、价格低廉、储存运输及在使用过程中的安全性大大提高,且性能好。随着国家政策对环境保护的日益严格要求,减少和控制涂料中 VOC 的含量是环境保护的一个重要措施。水性环氧防腐涂料的诸多性能优势无形中决定了其比溶剂型防腐涂料的应用现状更优良和前景更广阔。

1) 水性环氧涂料。水性环氧树脂有水乳型和水溶性两种,它利用了环氧树脂良好的稳定性及抗腐蚀性等优良性能。目前,环氧树脂水性化有化学改性法、相反转法和机械法等 3 种主要方法。机械法是在乳化剂的作用下机械高速搅拌加入环氧树脂,使非水溶性的环氧树脂以微粒或液滴的形式分散在水中。这一方法制备的环氧树脂乳液稳定性极差,目前很少采用。化学改性法指在环氧树脂分子链上通过接枝改性引入强亲水性基团,使得原本非水溶性的环氧不用外加乳化剂就具有亲水性。相转换法又称相反转法,将一定比例的环氧树脂和乳化剂在高速搅拌下混合均匀,然后向体系中逐滴地滴加水,当水加到一定量时,体系就会从油包水型变成水包油型。此种改性手段相比较机械法产品性能更加优良、稳定,而相比与化学法操作更加方便、快捷。三种方法中普遍采用的方法是相转法和化学接枝改性法。李绩等^[16]通过自制乳化剂利用相转化法制备出了水性环氧树脂乳液,将添加有 TiO_2 、滑石粉及其他助剂的固化剂与制备的水性环氧树脂乳液混合制备出水性环氧涂料。Sun 等^[17]制备了自乳化水溶性非离子型固化剂,其同时具有固化和乳化的作用。制备的水性环氧树脂涂料有很好的稳定性及耐腐蚀性。

2) 水性聚氨酯涂料。聚氨酯是异氰酸酯与多元醇反应生成的一种聚合物。聚氨酯涂料以其优异的性能在涂料行业中占有非常重要的位置,对各种施工对象和环境的适应性较强,可以在潮湿的底材上施工和低温下固化。20世纪90年代,Jacobs成功开发出能分散于水中的多异氰酸酯固化剂,从而使双组分水性聚氨酯防腐涂料进入实用研究阶段。国内外对聚氨酯涂的研究也是从未间断过^[18-19]。S.S.Pathak等^[20]用GPTMS(γ -缩水甘油醚氧丙基三甲氧基硅烷)和有机硅MTMS(甲基三甲氧基硅烷)改性水性聚氨酯涂料,增强了水性聚氨酯涂料的机械应力和弹性。其热稳定性提高较大,降解温度也升高到约206℃,能够适用于海洋、航天、汽车等领域的防腐。Hu等^[21]通过热化学转化法将粗甘油、游离脂肪酸、脂肪酸甲酯转变成多元醇,制备出水性聚氨酯涂料。该涂料对钢铁表面表现出很好的附着性能,且涂料的铅笔硬度测试高达F级别。

3) 水性丙烯酸涂料。水性丙烯酸树脂乳液属于非均相丙烯酸酯聚合物水分散体,具有来源易、使用安全、价格低、减少环境污染和公害、节省资源和能源等优点。丙烯酸树脂乳液用途广泛,性价比优越,是水性树脂中市场影响力最大的品种。美国Rohm&Hass公司以环氧树脂为基料,以过氧化苯甲酰(BPO)作为引发剂,开发出水性双组分环氧/丙烯酸涂料系列MAINCOTEAE-58。其在丙烯酸聚合中将环氧树脂接枝到丙烯酸酯分子链中,且环氧基不开环,固化反应为双键加成反应。所得双组分乳液稳定性好、涂膜致密、贮存时间长、耐磨性和耐候性好、耐水性佳、光泽度高。湖北东盛特种涂料科技有限公司^[22]以DS-01无皂乳液作为成膜物质,疏水改性聚羧酸盐731A作为分散剂,二丙二醇甲醚作为成膜助剂制备了一系列性能优异的水性丙烯酸防腐漆。实验表明,水性丙烯酸防腐漆体系具有很好的耐盐雾性能,且一次成膜厚度高、表干时间较快、贮存稳定性良好。

4) 水性无机富锌涂料。水性无机富锌涂料主要由硅酸钾等水性硅酸盐树脂、硅酸钠、助剂以及锌粉等组成。它属于高固体分厚膜涂料,其以无机物为主要成膜物,防锈颜料为高含量的锌粉,水为分散介质。水性无机富锌涂料是海洋腐蚀防护领域中防锈性能相当优异的一类涂料,而且有很好的实用推广价值。水性无机富锌涂料已被各行各业所接受,因为其作为一种零VOC的环保型防腐涂料,具有广阔的应用发展前景。近年国外出现的无机磷酸盐水性富锌涂料,性能优异且对底材处理要求相对较低^[23]。Wei等^[24]

在常见的水性无机富锌涂料中,添加缓蚀性材料和有机成膜基料,使的水性无机富锌涂料的施工适应性大大拓宽,改善了涂膜的致密性、附着性、抗滑移性和耐老化性。Kakaei等^[25]测试了不同云母氧化铁含量的富锌硅酸盐涂层涂覆到碳钢上的阴极保护效果。

水性重防腐涂料具有许多优点:涂膜附着力高、环保、耐化学药品和耐腐蚀性能优异、耐磨性好、硬度高;涂膜固化后其中含有的少量水分,可使涂膜表面形成微孔隙,这些孔隙能释放混凝土内部水汽的压力。也有一些不可避免的缺点:施工过程中若不小心掺入污物容易在涂膜表面造成缩孔;不适宜冬季或低温环境施工等。

2.3 新型纳米改性涂料

随着纳米技术在全世界范围内的广泛研究,纳米科技与生活的关联性越来越大。纳米科学技术已迅速融入到人们的生活,并预计在未来人类发展中发挥更加重要的作用。在涂料的制备与改性方面也出现了越来越多的纳米技术手段、利用纳米粒子的体积效应、表面效应、宏观量子隧道效应和量子尺寸效应等,能够改善涂料的各方面性能,增强其抗氧化性和硬度,使其具有抗菌性光、催化、吸收电磁波性以及亲水、油的亲疏性等特殊性能^[26-27]。新型纳米改性涂料的研制已成为涂料防腐领域的一种新型趋势,并日益向功能型转化^[28]。杨培等^[29]用阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠(SDBS)为分散剂,对自制的复合ZnO-CeO₂纳米颗粒进行分散改性。涂料中纳米颗粒添加量为1%(质量分数)时改性涂料的紫外吸收效果最好,并且表现出良好的紫外吸收稳定性。添加纳米颗粒的涂料的耐人工老化性能较未添加的提高90%,比国标中优等品的要求提高58%。王震宇等^[30]利用纳米氧化锌和二氧化硅浓缩浆改性海洋船舶聚氨酯船壳漆和环氧底漆,制备出海洋纳米复合涂料。通过对海洋加速循环老化试验分析表明:1.2%纳米氧化锌浓缩浆可提高海洋船舶聚氨酯面漆的表面接触角和抗老化性,进而可增强纳米复合涂料在海洋环境中抗老化、耐腐蚀等性能。石墨烯是最薄(0.34 nm)、最坚硬的纳米材料,是目前电阻率最小的材料,具有优异的耐化学品性。黄坤等^[31]实验发现石墨烯添加量较低(0.5%)时,石墨烯/环氧复合导电涂层的耐强酸、强碱、浓盐溶液浸泡和耐盐雾侵蚀性很好,在油品中的耐溶解性也很好。添加量在1%左右时,石墨烯环氧复合涂料导电性稳定,附着力良好,可作为一种新型的静电重防腐涂料。

3 展望

随着人类对海洋的不断深入探索,海洋工程钢结构建筑越来越多,但其同时也面临着严酷的腐蚀环境。目前国际上新建大型钢结构设备所用的重防腐涂料涂层的有效使用寿命一般平均要达到20年以上。海洋重防腐涂料的研究具有很强的实际意义,对国民经济的发展有重要促进作用。随着世界各国环保意识日渐加强及纳米技术的异军突起,环境友好型和纳米材料功能改进型重防腐涂料成为涂料工业发展的主导方向。

参考文献:

- [1] 叶美琪,金晓鸿,陈乃红,等. 船舶涂料海洋环境与实验室加速试验相关性研究——海洋大气区用涂料体系[J]. 装备环境工程,2011,8(2):4—11.
YE Mei-qi, JIN Xiao-hong, CHEN Nai-hong, et al. Study on Correlation between Marine Environmental Test and Accelerated Tests in Laboratory for Ship Coatings—Coating Systems for Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(2): 4—11.
- [2] 杨培源,高汝明,白文平. 一种船舶自修复防腐涂料的制备与表征[J]. 装备环境工程,2010,7(5):141—143.
YANG Pei-yuan, GAO Ru-ming, BAI Wen-ping. Preparation and Characterization of a Self-healing Anticorrosion Coating for Ship Repair[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(5): 141—143.
- [3] 刘成松,秦林,李翠玲,等. 304不锈钢表面Mo合金化改性层组织结构及耐磨性研究[J]. 表面技术,2014,43(5):100—104.
LIU Cheng-song, QIN Lin, LI Cui-ling, et al. Study on Microstructure and Wear Resistance of Mo Surface Alloying Layer on 304 Stainless Steel[J]. Surface Technology, 2014, 43(5): 100—104.
- [4] 曹慧军,张昕,韩金,等. 高固体分环氧海洋防腐蚀涂料的研究进展[J]. 中国材料进展,2014(1):20—25.
CAO Hui-jun, ZHANG Xin, HAN Jin, et al. Research and Progress of High Solid Epoxy Corrosion Resistant Coating for the Marine[J]. Materials China, 2014(1): 20—25.
- [5] 赵双. 有机硅改性环氧树脂电子封装料的制备及性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.
ZHAO Shuang. Study on Preparation and Properties of Polysiloxane Modified Epoxy Encapsulating Material[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.
- [6] 夏兰君,李福志,熊和建,等. 有机硅改性环氧树脂及其室温固化的性能研究[J]. 粘接,2014(4):54—57.
XIA Lan-jun, LI Fu-zhi, XIONG He-jian, et al. Performance of Silicone Modified Epoxy Resin Curable at Room Temperature[J]. Adhesion, 2014(4): 54—57.
- [7] 张迎平,刘兰轩,汪洋,等. 酚醛改性环氧树脂耐腐防腐涂料的研制[J]. 上海涂料,2014(4):10—13.
ZHANG Ying-ping, LIU Lan-xuan, WANG Yang, et al. Development of Phenolic Modified Epoxy Wear and Corrosion Resistant Coatings[J]. Shanghai Coatings, 2014(4): 10—13.
- [8] 曹国磊,陆冲,程树军,等. 聚硫橡胶改性环氧室温快干重防腐涂料的制备[J]. 涂料工业,2014(8):7—12.
CAO Guo-lei, LU Chong, CHENG Shu-jun, et al. Preparation of Fast Drying Heavy-Duty Anticorrosive Coatings Based on Epoxy Modified with Liquid Polysulfide Rubber[J]. Paint & Coatings Industry, 2014(8): 7—12.
- [9] 邓春华. 端羟基聚丁二烯聚氨酯改性环氧树脂防腐涂料的制备与性能研究[D]. 济南:山东大学,2014.
DENG Chun-hua. Preparation and Property of HTPB Polyurethane Elastomer-modified Epoxy Resin Anti-corrosion Coatings[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [10] 李明,张海宽,刘兰轩,等. 环氧玻璃鳞片长效防腐涂料的制备[J]. 上海涂料,2012(5):4—6.
LI Ming, ZHANG Hai-kuan, LIU Lan-xuan, et al. Preparation of Epoxy Glass Flake Long Life Anti-corrosion Coatings[J]. Shanghai Coatings, 2012(5): 4—6.
- [11] CHONKAEW W, SOMBATSOMPOP N, BROSTOW W. High Impact Strength and Low Wear of Epoxy Modified by a Combination of Liquid Carboxyl Terminated Poly(butadiene-co-acrylonitrile) Rubber and Organoclay[J]. European Polymer Journal, 2013, 49(6): 1461—1470.
- [12] LI Min, WANG Xiu-juan, LIU Bao-cheng, et al. Development of Epoxy Glass Flake Heavy-Duty Anticorrosive Coatings Used in Marine Environment[J]. Paint & Coatings Industry, 2010, 40(1): 49—53.
- [13] 李晓明,张义新,冯辉霞,等. 聚氨酯涂料研究现状及发展[J]. 应用化工,2010(7):1091—1095.
LI Xiao-ming, ZHANG Yi-xin, FENG Hui-xia, et al. Research Current Situation and Development of Polyurethane Coatings[J]. Applied Chemical Industry, 2010(7): 1091—1095.
- [14] 胡远奇. 溶剂型MDI双组分聚氨酯涂料的活化期及影响因素探讨[J]. 中国涂料,2010(9):44—46.
HU Yuan-qi. Discussion on Influencing Factors and Pot-life of Solvent-based MDI Two-package PU Coatings[J]. China Coatings, 2010(9): 44—46.
- [15] 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(2):65—76.
HAN En-hou, CHEN Jian-min, SU Yan-jing, et al. Corrosion Protection Techniques of Marine Engineering Structure and

- Ship Equipment—Current Status and Future Trend[J]. Materials China, 2014 (2): 65—76.
- [16] 李绩, 李莉, 赵亚丽, 等. 水性环氧涂料的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2014(9): 94—96.
- LI Ji, LI Li, ZHAO Ya-li, et al. Preparation and Properties of Waterborne Epoxy Coatings Research[J]. New Chemical Materials, 2014 (9): 94—96.
- [17] SUN H X, NI W L, YUAN B B, et al. Synthesis and Characterization of Emulsion-type Curing Agent of Water-borne Epoxy Resin[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 130(4): 2652—2659.
- [18] PATEL A, PATEL C, PATEL M G, et al. Fatty Acid Modified Polyurethane Dispersion for Surface Coatings: Effect of Fatty Acid Content and Ionic Content[J]. Progress in Organic Coatings, 2010, 67(3): 255—263.
- [19] MISHRA V K, PATEL K I. Nonionic Diol Modified UV-Curable Polyurethane Dispersions: Preparation and Characterization[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2015, 36(3): 351—362.
- [20] 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.
- [21] HU S J, LUO X L, LI Y B. Production of Polyols and Waterborne Polyurethane Dispersions from Biodiesel-derived Crude Glycerol[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(6): 8.
- [22] 叶琪, 宋小攀. 钢箱梁内表面涂装用水性丙烯酸防腐漆的研究[J]. 涂料技术与文摘, 2014(6): 10—14.
- YE Qi, SONG Xiao-pan. Study of Waterborne Acrylic Anti-corrosive Paint for Inner Surface of Steel Box Girder[J]. Coatings Technology & Abstracts, 2014 (6): 10—14.
- [23] 邓静伟, 唐囡, 尹桂来, 等. 一种高分散性富锌漆的制备及性能研究[J]. 表面技术, 2013, 42(6): 101—105.
- DENG Jing-wei, TANG Nan, YIN Gui-lai, et al. Study of Preparation and Properties of High Dispersed Zinc-rich Coating[J]. Surface Technology, 2013, 42 (6): 101—105.
- [24] WEI Xiang-yang. Super Corrosion Retarding Water Borne Inorganic Zinc-rich Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2007, 37(5): 40—43.
- [25] KAKAEI M N, DANAEI I, ZAAREI D. Evaluation of Cathodic Protection Behavior of Waterborne Inorganic Zinc-rich Silicates Containing Various Contents of MIO Pigments[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2013, 60(1): 37—44.
- [26] 高立, 宋胜利. 纳米技术在防腐涂料中的应用[J]. 装备制造技术, 2013(10): 87—88.
- GAO Li, SONG Sheng-li. Nanotechnology Application in Anticorrosion Coatings[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2013 (10): 87—88.
- [27] 邢新侠, 甘志宏. 有机-无机纳米聚硅氧烷涂料的耐蚀性研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 65—69.
- XING Xin-xia, GAN Zhi-hong. Research on the Corrosion Resistance of Organic-Inorganic Nano Polysiloxane Coatings [J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11 (6): 65—69.
- [28] 董艳, 杨崇斌, 张丹, 等. 功能涂料在雷达上的应用[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 71—74.
- DONG Yan, YANG Chong-bin, ZHANG Dan, et al. Application of Functional Coating on Radar[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 71—74.
- [29] 杨培, 张金生, 李丽华, 等. 复合 ZnO-CeO₂ 纳米颗粒的分散及其在涂料中的应用[J]. 涂料工业, 2014(9): 70—75.
- YANG Pei, ZHANG Jin-sheng, LI Li-hua, et al. Dispersion of Nanocomposite ZnO-CeO₂ and Its Application Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2014(9): 70—75.
- [30] 王震宇, 韩恩厚, 刘福春, 等. 纳米复合海洋涂料在船舶防腐应用研究[J]. 中国材料进展, 2014(1): 14—19.
- WANG Zhen-yu, HAN En-hou, LIU Fu-chun, et al. Application Research of Marine Composite Nano-Coatings in Corrosion Protection of Ship[J]. Materials China, 2014(1): 14—19.
- [31] 黄坤, 曾宪光, 裴嵩峰, 等. 石墨烯/环氧复合导电涂层的防腐性能研究[J]. 涂料工业, 2015(1): 17—20.
- HUANG Kun, ZENG Xian-guang, PEI Song-feng, et al. Research on Anticorrosive Performance of Graphene/Epoxy Composite Conductive Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2015(1): 17—20.

(上接第 48 页)

- FANG Fang, YAN Tao. Status Quo and Prospects of Marine Fouling Studies in South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2004, 23(1): 76—85.
- [14] 杨海洋, 黄桂桥. 碳钢在海水环境中的腐蚀和污损特性研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5): 58—60.
- YANG Hai-yang, HUANG Gui-qiao. Corrosion and Biofouling Character of Carbon Steel in Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 58—60.
- [15] 王庆飞, 宋诗哲. 金属材料海洋环境生物污损腐蚀研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(3): 185—188.
- WANG Qing-fei, SONG Shi-zhe. Progress in Marine Biologically Influenced Corrosion Study[J]. Journal of Chinese Society For Corrosion and Protection. 2002, 22(3): 185—188.