

# 热带海域不同海区环境因素差异及腐蚀性对比研究

侯健<sup>1</sup>, 张彭辉<sup>1</sup>, 程文华<sup>1</sup>, 赵广宇<sup>2</sup>, 郭为民<sup>1</sup>

(1. 海洋腐蚀与防护重点实验室 中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 山东 青岛 266101;  
2. 青岛双瑞海洋环境工程股份有限公司, 山东 青岛 266101)

**摘要:** **目的** 研究三亚海域不同海区环境因素和腐蚀性差异。**方法** 对三亚海域亚龙湾和红塘湾两海区的自然环境因素数据和海生物种类及生长速度进行比较分析, 并对钢、不锈钢、铝合金和铜合金等4种典型金属材料在两海区的腐蚀性能进行对比研究。**结果** 两海区的海水环境因素除盐度外差别不大, 随月份的变化规律一致。由于钛合金在海水中具有良好的耐蚀性, 因此选用PVC和钛合金分别代表非金属材料 and 金属材料研究两海区海生物附着规律, 结果发现两海区附着海生物的数量和种类差别较大, 钛合金板的海生物附着量明显多于PVC板。四种典型金属材料在红塘湾和亚龙湾相同区带条件下的腐蚀速率相差很小。**结论** 两海区环境因素及腐蚀性差异不大, 具有较好相关性。

**关键词:** 环境因素; 腐蚀性; 相关性

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2015.04.009

**中图分类号:** TJ01; TG172.5 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2015)04-0044-05

## Comparison of Environment Factors and Corrosivity in Different Tropical Sea Areas

HOU Jian<sup>1</sup>, ZHANG Peng-hui<sup>1</sup>, CHENG Wen-hua<sup>1</sup>, ZHAO Guang-yu<sup>2</sup>, GUO Wei-min<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Qingdao 266101, China; 2. Sunrui Marine Environment Engineering Co., Ltd, Qingdao 266101, China)

**ABSTRACT: Objective** To study differences in environment factors and corrosivity in different Sanya sea areas. **Methods** The natural environment factors in Hongtang Bay were compared with those in Yalong Bay. Furthermore, the species and the growth speed of marine organisms were also compared. Four kinds of typical metals and alloys, namely, steel, stainless steel, aluminum alloy and copper were compared for corrosivity in the two sea areas. **Results** It showed that sea water environment factors except salinity in the two sea areas were in good coincidence as well as their variations within months. Ti and PVC were chosen as the representatives of metal and nonmetal materials respectively to study the laws of biofouling, considering the excellent corrosion resistance of Ti in seawater. It showed that the species

收稿日期: 2015-06-08; 修订日期: 2015-06-29

Received: 2015-06-08; Revised: 2015-06-29

作者简介: 侯健(1980—),男,山东淄博人,硕士,高级工程师,主要研究方向为材料腐蚀与防护。

Biography: HOU Jian(1980—), Male, from Zibo, Shandong, Master, Senior engineer, Research focus: corrosion and protection of materials.

and amount of marine organisms adhered were quite different in the two sea areas, and the adhesion amount of marine organisms on the Ti plate was larger than that on the PVC plate. Corrosion rates of the four kinds of typical metals and alloys differed very little in the same zone conditions in the two areas. **Conclusion** Environment factors and corrosivity in the two sea areas have little differences and there is good relativity between environment factors and corrosivity.

**KEY WORDS:** environment factors; corrosivity; relativity

三亚海域为中热带海洋气候,其环境因素基本反映了我国南海海区的特征,在我国水环境网站体系中具有特殊的重要性<sup>[1]</sup>。三亚海水环境腐蚀试验站始建于1958年,位于亚龙湾海区。建站以来进行了大量舰船及海洋工程材料、构件的腐蚀与防护试验研究工作,积累了数以万计的环境因素和材料实海腐蚀数据,在南海环境中材料的腐蚀机理、腐蚀行为和腐蚀规律研究等方面取得了大量成果,有效填补了国内空白<sup>[2-6]</sup>。

为扩展三亚海水环境腐蚀试验站的试验能力,提高试验水平,在三亚市天涯镇海滨红塘湾对三亚海水环境腐蚀试验站进行迁址扩建。目前三亚海水环境腐蚀试验站新站(三亚站)已经建成并将投入使用。

由于海水环境的复杂性,即使同一海域不同海区的环境参数及腐蚀性能也具有较大差异,导致材料在不同海区间腐蚀行为存在不同<sup>[7-9]</sup>。因此文中对钢、不锈钢、铝合金和铜合金等4种典型金属材料在亚龙湾和红塘湾的腐蚀性能进行对比研究,并结合两海区自然环境因素数据和海生物种类及生长速度的比较分析,探讨两海区腐蚀数据之间的相关性。

## 1 研究方法

1) 热带海域不同海区海水自然环境因素对比。在亚龙湾和红塘湾采用现场采集和取样送检的方式,记录海水的温度、盐度、溶解氧和pH值等环境数据,研究对比两海区的主要海水自然环境因素变化规律。

2) 热带海域不同海区典型海生物附着规律对比。由于钛合金在海水中具有良好的耐蚀性,因此选用钛合金和PVC为研究材料,分别代表金属材料和非金属材料,来研究表面生物的附着状况。样板尺寸为80 mm × 150 mm × (2 ~ 3) mm。将样板分别投放到亚龙湾和红塘湾全浸区带进行海生物附着试验,通过测量干、湿质量增量的方法,研究海生物的附着规律。试验周期为1年,每月检测1次。

3) 四种典型金属材料在热带海域不同海区的腐蚀规律对比。试验参照GB/T 5776—2005《金属和合金的腐蚀 金属和合金在表层海水中暴露和评定的导则》进行。选取Q235, 304, 1060和T2为研究材料,试

样尺寸为200 mm × 100 mm × 5 mm,按标准打孔。将加工好的试样分别投放在亚龙湾和红塘湾潮差和全浸区带,进行0.5, 1, 2年的暴露试验,通过腐蚀失重法,研究对比其腐蚀规律。

## 2 结果与讨论

### 2.1 热带海域不同海区自然环境因素变化规律

两海区海水自然环境因素随月份的变化规律如图1所示。由图1a可以看出,红塘湾和亚龙湾海水温度相差不大,随月份的变化规律基本一致。12—1月期间海水温度较低,6—8月份海水温度较高。年平均水温在27℃左右,最大温差不超过10℃。图1b为红塘湾和亚龙湾海水盐度随月份变化规律,可以看出,两海区海水盐度随月份的变化规律一致,红塘湾海水的年平均盐度为3.22%,略高于亚龙湾的3.09%。这是由于红塘湾地处开阔海域,而亚龙湾地处海域较狭窄,有较多的生活废水等淡水注入。两海区海水溶解氧随月份变化规律如图1c所示,可以看出,两海区的溶解氧含量相差不大,均在6~7 mg/L之间波动。两海区海水pH值随月份变化规律如图1d所示,可以看出,红塘湾和亚龙湾海水的pH值相差不大,而且随月份无明显变化,两站海水的pH值均在8左右。

### 2.2 热带海域不同海区典型海生物附着规律

经过PVC板和钛合金板在两海区1年的挂片试验发现,同海区两种材料生物附着种类基本一致,亚龙湾的海生物附着量远多于新站的附着量,而且两海区的海生物附着种类不尽相同。红塘湾的附着海生物以生物粘膜、牡蛎、石灰虫和藤壶为主,亚龙湾的附着海生物以石灰虫为主,并有一定数量的藤壶、牡蛎和贻贝附着<sup>[10-15]</sup>,如图2所示。两海区附着海生物种类和数量有较大差别的原因可能是:亚龙湾地处三亚市区,临近海域水产养殖业发达,并有生活污水注入,海水受到一定程度的污染而且富营养化,海生物生长迅速;红塘湾地处三亚市郊,临近海域清洁无污染。亚龙湾水泥浮船已经运行十多年,浮船上附着的海生物已经逐步发展成为稳定的生物群落。当试验样板投

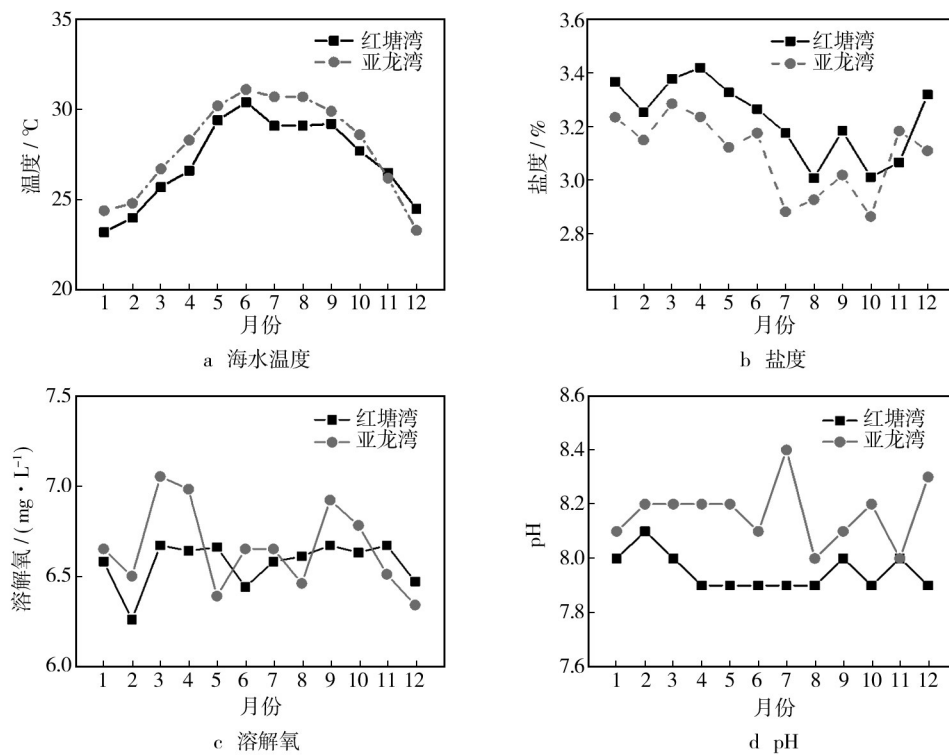


图1 两海区自然环境因素随月份变化规律

Fig.1 Variations of natural environment factors over months in two sea areas

放后,被大量孢子迅速占领,生物种群互相竞争,生长迅速。红塘湾的试验平台刚刚建成1年左右,原有的生态系统被破坏,整个生物群落处于逐步恢复阶段,附着海生物的种类和数量相对较少。

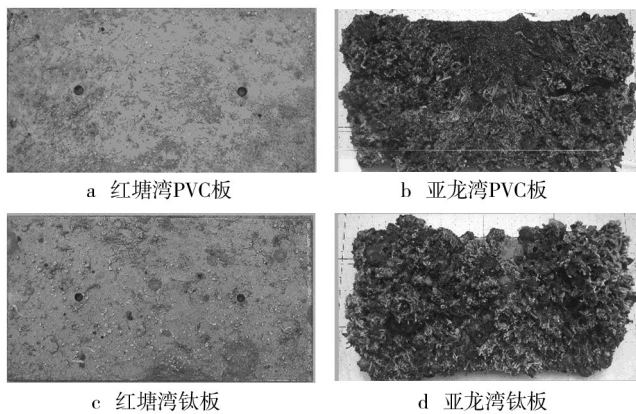


图2 两海区海生物附着形貌照片(生长旺季)

Fig.2 Morphologies of marine organisms adhered in two sea areas (boom season)

两海区海生物附着量干、湿质量增量随月份的变化规律如图3所示。由图3可以看出,亚龙湾海生物在1年周期内明显有2个生长旺季,分别是2—4月份和7—9月。在此期间,海水温度有利于海生物的生长繁殖。红塘湾海生物月附着量较少,没有明显

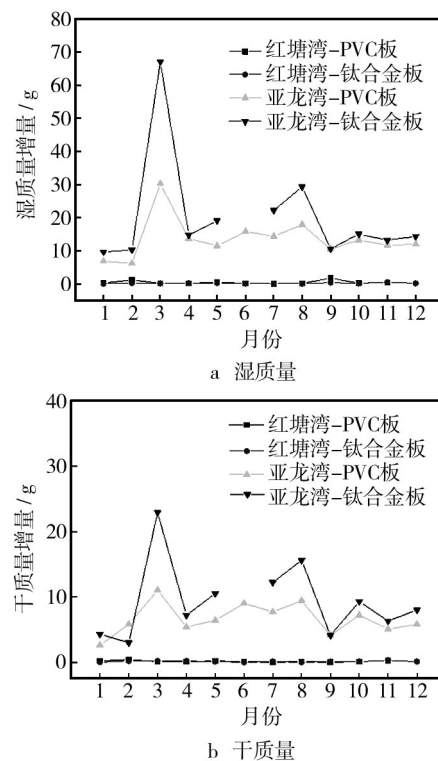


图3 两海区海生物附着量随月份的变化

Fig.3 Variations of adhesion amount of marine organisms over months in two sea areas

的变化趋势。



2.3 在热带海域不同海区的腐蚀规律

2.3.1 腐蚀速率对比

Q235, 1060, T2 和 304 四种金属材料在红塘湾和亚龙湾全浸和潮差区带 0.5 年周期的腐蚀速率见表 1。

表 1 四种金属材料在两海区 0.5 年周期的腐蚀速率  
Table 1 Corrosion rates of four materials in two sea areas within half a year

| 材料牌号 | 腐蚀速率/(mm·a <sup>-1</sup> ) |       |       |       |
|------|----------------------------|-------|-------|-------|
|      | 全浸区                        |       | 潮差区   |       |
|      | 红塘湾                        | 亚龙湾   | 红塘湾   | 亚龙湾   |
| Q235 | 0.240                      | 0.347 | 0.644 | 0.481 |
| 1060 | 0.013                      | 0.018 | 0.006 | 0.004 |
| T2   | 0.051                      | —     | 0.029 | 0.034 |
| 304  | 0.032                      | 0.023 | 0.001 | 0.001 |

注: — 表示试样丢失。

所考察的四种金属材料分别代表钢、铝、铜和不锈钢在红塘湾和亚龙湾不同区带条件下的腐蚀行为。由表 1 可以看出,在考察的四种金属材料中,每种材料在两海区相同区带条件下的腐蚀速率相差不大,腐蚀速率的数值均在同一数量级<sup>[13-15]</sup>。腐蚀速率存在差别的主要原因可能是两海区海水流动速度不同所致,红塘湾海水流动速度较亚龙湾快。

2.3.2 腐蚀形貌对比

Q235, 1060, 和 304 在红塘湾和亚龙湾全浸和潮差区带 0.5 年周期的微观腐蚀形貌如图 4 所示,腐蚀外观如图 5 所示。

由微观腐蚀形貌可以看出,金属材料在两海区全浸区带的微观腐蚀形貌照片存在略微差别,其原因可能是附着海生物的差别所导致。此规律与腐蚀外观情况相符,两海区全浸区带的海生物附着量差别较大。

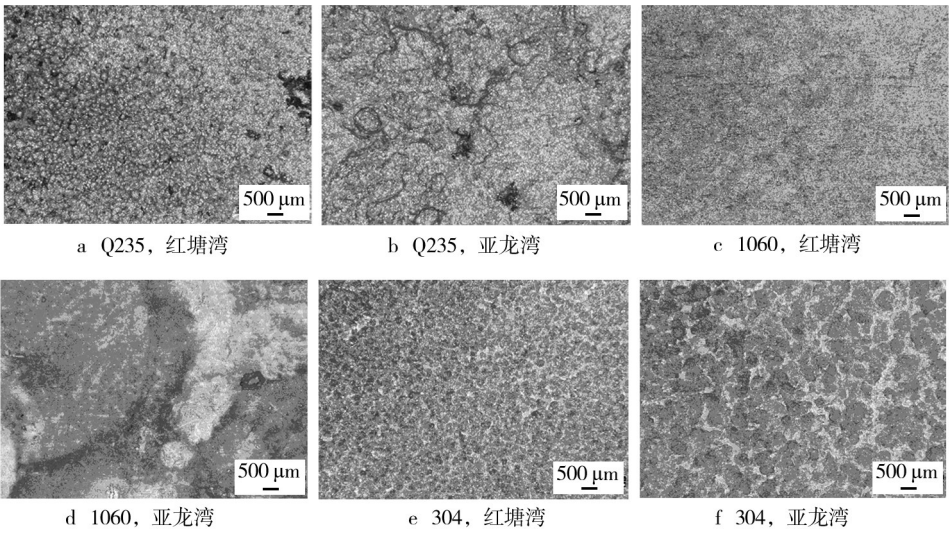


图 4 金属材料在两海区 0.5 年周期的微观腐蚀形貌  
Fig.4 Micro morphologies of metals in two sea areas within half a year

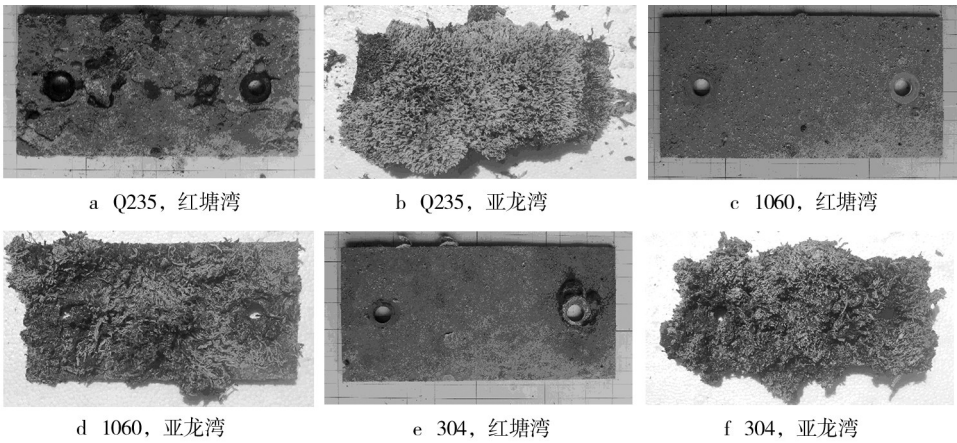


图 5 金属材料在两海区 0.5 年周期的腐蚀外观  
Fig.5 Morphologies of metals in two sea areas within half a year

### 3 结论

1) 红塘湾和亚龙湾1年的海水环境数据表明,两海区的海水环境因素除盐度外差别不大,随月份的变化规律一致。

2) 红塘湾和亚龙湾PVC板和钛合金板1年的海生物附着挂片试验结果表明,两海区附着海生物的数量和种类差别较大,红塘湾附着海生物以牡蛎、石灰虫和藤壶为主,附着量较少;亚龙湾附着海生物中石灰虫占绝对优势,并有少量的藤壶、牡蛎和贻贝附着,附着量较多。从材料种类上看,由于钛合金具有良好的生物亲和性,其在两海区的海生物附着量均明显多于PVC板。

3) 所考察的四种典型金属材料Q235, 1060, T2和304在红塘湾和亚龙湾相同区带条件下的腐蚀速率相差很小,腐蚀速率的数值均在同一数量级。腐蚀速率存在差别的主要原因是两海区海水流动速度不同,红塘湾的海水流动速度较亚龙湾快。四种金属材料在两海区全浸区带的微观腐蚀形貌照片存在略微差别,可能是由于附着海生物的差别所致。

#### 参考文献:

- [1] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.  
CAO Chu-nan. Corrosion of Materials in Chinese Natural Environment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [2] 三亚海水环境试验站[J]. 装备环境工程, 2008, 5(5): 91—92.  
Sanya Seawater Environment Testing Station[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(5): 91—92.
- [3] 刘大扬, 魏开金, 李文军, 等. 南海榆林海域环境因素对钢局部腐蚀的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003, 23(4): 20—25.  
LIU Da-yang, WEI Kai-jin, LI Wen-jun, et al. Influence of Environmental Factors in Yulin Area of the South China Sea on Localized Corrosion of Steels[J]. Journal of Chinese Society For Corrosion and Protection, 2003, 23(4): 20—25.
- [4] 陈卓元, 林志坚, 宋文桑, 等. 东海、南海海域海洋环境因素研究[J]. 腐蚀与防护, 2000, 21(6): 248—251.  
CHEN Zhuo-yuan, LIN Zhi-jian, SONG Wen-sang, et al. A Study of Ocean Environment Factors of the Waters in East China Sea and South China Sea[J]. Corrosion & Protection, 2000, 21(6): 248—251.
- [5] 黄桂桥. 碳钢在我国不同海域的海水腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(2): 81—84.  
HUANG Gui-qiao. Corrosion Behavior of Carbon Steels Immersed in Sea Areas of China[J]. Corrosion Science and Technology Protection, 2001, 2(13): 81—84.
- [6] 夏兰廷, 王录才, 黄桂桥. 我国金属材料的海水腐蚀研究现状[J]. 中国铸造装备与技术, 2002(6): 1—4.  
XIA Lan-ting, WANG Lu-cai, HUANG Gui-qiao. Present Status of Research on Sea-water Corrosion of Metal in China[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2002(6): 1—4.
- [7] 刘世念, 苏伟, 魏增福, 等. 碳钢在自然海水和灭菌海水中的腐蚀行为分析[J]. 装备环境工程, 2013, 4(10): 16—19.  
LIU Shi-nian, SU Wei, WEI Zeng-fu, et al. Corrosion Behavior Analysis of Carbon Steel in Natural and Sterile Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 4(10): 16—19.
- [8] 杜翠薇, 赵妍妍, 卢琳, 等. 神经网络在海水腐蚀预测中的应用[J]. 装备环境工程, 2007, 4(3): 85—87.  
DU Cui-wei, ZHAO Yan-yan, LU Lin, et al. Application of Artificial Neural Network on the Forecast of Seawater Corrosion[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(3): 85—87.
- [9] 林臻, 李国璋, 白鸿柏, 等. 金属材料海洋环境腐蚀试验方法研究进展[J]. 新技术新工艺, 2013(8): 68—73.  
LIN Zhen, LI Guo-zhang, BAI Hong-bai, et al. Review of Research on Experimental Methods for Marine Environmental Corrosion of Metal Materials[J]. New Technology & New Process, 2013(8): 68—73.
- [10] 陈翔峰, 侯健, 穆振军, 等. 海洋污损生物变化及附着规律研究[J]. 材料开发与应用, 2011, 26(1): 24—28.  
CHEN Xiang-feng, HOU Jian, MU Zhen-jun, et al. Study on the Adhesion and Variety of Marine Fouling Organism[J]. Development and Application of Materials, 2011, 26(1): 24—28.
- [11] 马士德, 孙虎元, 黄桂桥, 等. 海洋污损生物对碳钢腐蚀的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2000, 20(3): 49—54.  
MA Shi-de, SUN Hu-yuan, HUANG Gui-qiao, et al. Effect of Marine Fouling Creatures on Corrosion of Carbon Steel[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2000, 20(3): 49—54.
- [12] 杨天笑, 严涛, 陈池, 等. 大型海洋污损生物对金属材料腐蚀影响及研究展望[J]. 工业安全与环保, 2013, 39(11): 69—71.  
YANG Tian-xiao, YAN Tao, CHEN Chi, et al. Research on the Effects of Marine Macro-fouling Organisms on Metal Corrosion[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2013, 39(11): 69—71.
- [13] 方芳, 严涛. 南海污损生物研究的现状及展望[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(1): 76—85.

(下转第65页)

- 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-CeO<sub>2</sub> 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-CeO<sub>2</sub> 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.