

# 沿海机场某型飞机典型结构件自然曝晒试验研究

张勇<sup>1</sup>, 王晨光<sup>2</sup>, 卞贵学<sup>1</sup>, 王安东<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛, 266041;

2. 海军航空工程学院 研究生管理大队, 山东 烟台, 264001)

**摘要:** 目的 研究某型飞机典型结构件的腐蚀机理。方法 在海南陵水机场进行自然曝晒试验, 采用表面宏观形貌记录和微观形貌表征法、腐蚀产物物相分析等手段对基体及上覆防护体系的腐蚀、老化性能进行评估, 进而得出该型飞机不同部位的防护性能变化规律。结果 其中试件边缘、与螺栓直接接触的部位和试件连接处涂层老化、脱落最为严重, 涂层脱落后裸露的基体也会出现较为严重的腐蚀现象; 而一般远离螺栓、边缘和断口的区域则涂层老化、脱落均匀, 腐蚀程度较轻。结论 相同环境谱作用下, 受力壁板连接关键部位不同部位发生腐蚀的类型、机理不同。

**关键词:** 飞机; 结构件; 自然曝晒

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2016.02.017

**中图分类号:** TJ85; TG172 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2016)02-0092-06

## Performance of Typical Structures of A Type of Aircraft after Natural Exposure in a Coastal Airport

ZHANG Yong<sup>1</sup>, WANG Chen-guang<sup>2</sup>, BIAN Gui-xue<sup>1</sup>, WANG An-dong<sup>2</sup>

(1. Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao 266041, China;

2. Graduate Students Brigade of Naval Aeronautical Engineering University, Yantai 264001, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To study the corrosion mechanism of typical structures of a type of aircraft. **Methods** Natural exposure test of typical aircraft structures were carried out in Lingshui coastal airport. The surface morphology and the composition of corrosion products were obtained by means of SEM and XRD, which were used to evaluate the corrosion and aging performance of substrate and its overlying corrosion protection system, and to obtain the changing law of the protection performance at different parts of the aircraft. **Results** Different parts showed different mechanism and types of corrosion even in the same environment. The coating of the specimen, which directly contacted with the edge and bolt parts, and the specimen joint showed most serious aging and falling off phenomenon, leading to serious corrosion in the exposed substrate, while the corrosion degree of other parts was lighter, with even aging and falling off of the coating. **Conclusion** Under the action of the same environmental spectrum, the corrosion types and mechanisms at different parts of the critical connecting structures of the force-bearing panel.

**KEY WORDS:** aircraft; structures; natural exposure

收稿日期: 2015-10-27; 修订日期: 2015-11-25

Received: 2015-10-27; Revised: 2015-11-25

作者简介: 张勇(1981—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 主要研究方向为材料的腐蚀防护和疲劳可靠性。

**Biography:** ZHANG Yong (1981—), Male, from Chongqing, Master graduate student, Research focus: corrosion protection and fatigue reliability of materials.

服役环境对飞机机体结构及系统装置的腐蚀、损伤具有决定性影响。海军飞机相对陆军飞机的服役环境尤为苛刻,主要体现在两个方面:一是飞行的海洋大气环境中富含盐雾、霉菌等腐蚀性介质;二是由于海军飞机长时间远离陆地遂行训练、战斗任务,使得其腐蚀环境呈现出更为复杂的区域多样性,相应腐蚀失效机理也更为复杂<sup>[1-2]</sup>。调研发现,对于长期服役于沿海环境的海军某型飞机而言,因大气曝晒而造成的腐蚀破坏已经成为制约其使用寿命、安全可靠性及经济性的重要因素之一。环境腐蚀试验作为飞机机体结构腐蚀防护体系防腐品质和日历寿命评估工作的重要组成部分<sup>[3]</sup>,可用来确定影响飞机机体结构完整性的具体因素,为飞机机体结构的“三防”和高可靠性提供基本保障<sup>[4]</sup>。因此,开展飞机典型结构件的自然曝晒试验研究,掌握飞机关键部位的腐蚀、损伤规律变化对于飞机的腐蚀防护提供理论依据,同时也为保证飞机的长寿命、高可靠性、高维护性及结构完整性提供了重要保障<sup>[5-7]</sup>。

## 1 实验

### 1.1 自然曝晒气象环境谱的确定

曝晒试验选择海南陵水机场,由于该机场地处海岸线附近,以高温多雨为主要气候特征,远离工业区,因此该机场气候中大气污染主要考虑盐雾的影响。当刮东风和东南风时为海风,作为盐雾作用时间处理。盐雾含量利用自制设备进行测定,主要测定原理是不同时间段收集 100 m<sup>3</sup> 的空气,测定其中盐分含量。对不同时间段和不同季节的含盐量进行统计分析求得平均值。其他因素则结合对机场环境因素调研 10 年内结果及机场气象部门所提供近 10 年的气象数据,按照对腐蚀、损伤贡献从大到小的原则,最终确定了包括温度、湿度、风向、风速、雨时、雨量、月雾日、月雾时等 8 个参数在内的该机场地面环境谱<sup>[8-9]</sup>,见表 1。

表 1 某机场地面环境谱

Table 1 Ground environment spectrum of a certain airport

| 类别   | 时间比例/% | 作用时间/h  | 作用次数  | pH值  | SO <sub>2</sub> /(mg·m <sup>-3</sup> ) | NO <sub>x</sub> /(mg·m <sup>-3</sup> ) | Cl <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> ) | 雨量/mm  | 盐雾含盐量/(mg·m <sup>-3</sup> ) |
|------|--------|---------|-------|------|--|--|--|--------|-----------------------------|
| 雾及凝露 | 18.51  | 1621.8  | 244.8 | 6.52 | —                                      | —                                      | 0.27                                   | —      | —                           |
| 雨    | 4.90   | 429.1   | 157.9 | 6.52 | 0.073                                  | 0.0028                                 | 0.27                                   | 1213.6 | —                           |
| 盐雾   | 27.12  | 2375.7  | —     | —    | 0.073                                  | —                                      | 0.27                                   | —      | 0.28                        |
| 潮湿空气 | 39.98  | 3502.48 | —     | —    | —                                      | —                                      | —                                      | —      | —                           |

### 1.2 试验件准备

选取某型飞机中最常见的受力壁板连接关键部位作为模拟对象<sup>[10-12]</sup>,试验件加工尺寸及形式如图 1 所示。试验件表面经过阳极化处理后,分别涂刷 H04-2 铁红底漆和 H04-2 钢灰面漆,共设置 10 件平行样,编号分别为 1#—10#。

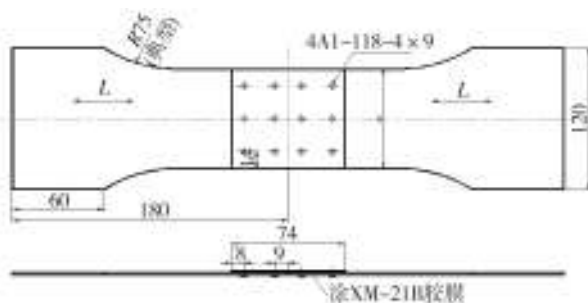


图 1 受力壁板连接模拟试件

Fig.1 Simulation of the force-bearing panel connection

### 1.3 实验设备

试件表面涂层宏观形貌采用科视达 KH-7700 型体式显微镜观察,微观形貌表征和断面线扫描采用德国 Carl Zeiss 公司的 Ultra 55 型热场发射扫描电子显微镜。组分分析采用德国 Bruker-AXS 公司的 D8 Advance 型多晶 X 射线衍射仪(Cu 靶, KA 辐射源),对腐蚀产物的物相及主要成分进行分析,参数设置:管电压为 40 kV/(30 mA),扫描角度为 20° ~80°,扫描速度为 0.05(°)/s。此外还需借助 XGP60 型光泽度计、HP-200 型精密色差仪分别对试验件表面涂层光泽度和颜色的变化进行测定评级。

### 1.4 自然曝晒试验

将试件固定在塑料支架上,置于该机场的机库顶部,架起高度约 5 cm。设定观察周期为 1 年,共进行 5 个周期。每个周期结束时按照图 2 所示评价流程对试件首先进行宏观形貌观察,然后分别对腐蚀产物成分

进行XRD分析,和对腐蚀产物清除后的试样表面微观形貌进行观察和能谱分析,最后根据国标 GB/T 1766—2008《色漆和清漆 涂层老化的评级方法》按涂层的起泡、开裂、剥落、基体腐蚀、失光/色差和粉化等6项指标对试样表面涂层腐蚀损伤程度进行评价<sup>[13]</sup>。



图2 腐蚀关键部位模拟件试验步骤

Fig.2 Test procedures for the simulation of critical parts of corrosion

## 2 试验结果及分析

### 2.1 涂层损伤老化性能分析

受力壁板连接区模拟件自然曝晒5年前后表面涂层的宏观腐蚀形貌用数码相机进行记录,如图3所示。

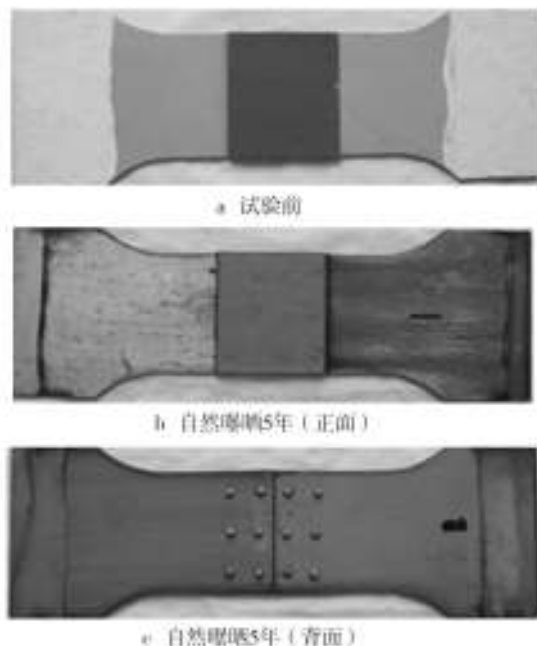


图3 自然曝晒5年试验件宏观图片

Fig.3 Macro morphology of specimens after 5-year natural exposure test

参照 GB/T 1766—2008《色漆和清漆涂层老化的评级方法》对试验件腐蚀情况进行观察统计,具体老

化情况见表2。

表2 自然曝晒试验件评价

Table 2 Evaluation of specimens after natural exposure test

| 评价指标 | 腐蚀状况                              |
|------|-----------------------------------|
| 起泡   | 未观察到起泡                            |
| 开裂   | 铆钉头腐蚀开裂严重,部分铆钉头边缘全部开裂             |
| 剥落   | 壁板原黄色涂层基本脱落,连接区部分铆钉头的涂层脱落         |
| 基体腐蚀 | 涂层剥落区域发生了大量点蚀,腐蚀坑以及铆钉头周围有黑色的污染物积聚 |
| 失光   | 连接区涂层失光严重                         |
| 变色   | 连接区原钢灰色涂层色泽变化明显,发白                |
| 粉化   | 擦拭可见大量的颜料粒子                       |

通过对受力壁板连接区模拟件表面涂层曝晒前后进行对比,同时结合各指标进行综合评价认为:经自然曝晒后涂层破损严重,原黄色涂层大面积脱落,裸露的铝合金基体出现大量点蚀坑;连接区钢灰色涂层失光、变色、粉化严重;铆钉头周围涂层开裂脱落,露出基体,有大量黑色污染物附着。图3c表明,该机场环境谱中紫外线作用和温度交替变化等因素影响均会加剧涂层老化,尤其在边缘部位和螺栓附近的老化最为严重。产生这一现象的原因主要是由于边缘部位涂层厚度较小,同等环境作用下更易受到破坏,同时由于螺栓与基体由异种金属构成,存在电位差。当表面涂层受到破坏时直接接触的基体和螺栓形成电偶对,铝合金基体作为偶对阳极电位正移,当高于过钝化电位时会引起钝化膜破坏,形成点蚀。因此,在边缘效应和电偶效应的协同作用下,边缘部位和螺栓附近腐蚀程度最为严重<sup>[13-14]</sup>。

为进一步探究试样不同部位腐蚀程度及机理,按照图4中标注的8~12号区域取样进行三维视频形貌观察,其中8号区域为铆钉连接部位,9,10,11号区域为带有断口位置,12号样片是基材部位。

图5表明,铆钉与基体衔接部位的涂层已经出现明显裂纹,露出基体,螺栓上涂层已有大面积脱落,未脱落部位表面也出现较为严重的粉化<sup>[8]</sup>。这主要是由于螺栓为碳钢材料,当大气中Cl<sup>-</sup>离子等腐蚀性离子渗过涂层与基体接触时,螺栓基体表面并不能像铝合金一样生成一层钝化氧化膜,而是会与之发生反应生成Fe<sup>2+</sup>,增大涂层与基体空隙中的离子浓度,与外部凝露形成离子浓度差,进而引发涂层鼓泡、脱落等老化现象,使涂层失去防护能力,因此螺栓会比基体表现出更为明显的腐蚀破坏情况<sup>[9]</sup>。

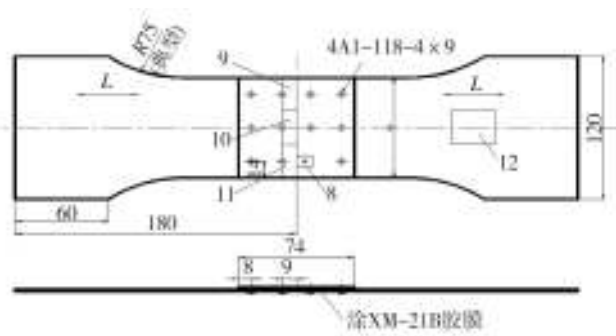


图4 受力壁板连接区模拟件取样部位

Fig.4 Schematic diagram of the sampling parts of the connecting zone of the force-bearing panel

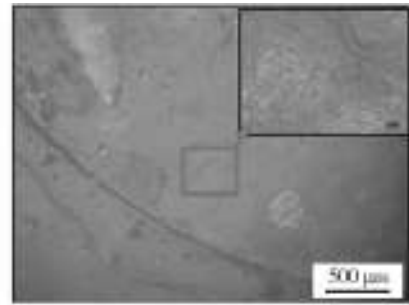


图5 8号区域微观图片

Fig.5 Microscopic picture of region 8

图6中9,10,11号区域均为模拟试样中铆钉孔边缘部位,从不同位置的铆钉孔中均可以看到较多腐蚀产物,尤其在铆钉与基体连接部位涂层完全破损,连

接部位发生较为明显的缝隙腐蚀,这主要与掩盖缝隙的腻子溶解、脱落有关<sup>[10]</sup>。含盐溶液容易进入缝隙,而缝隙内部与外部会产生氧浓度差而引发缝隙腐蚀<sup>[15]</sup>。

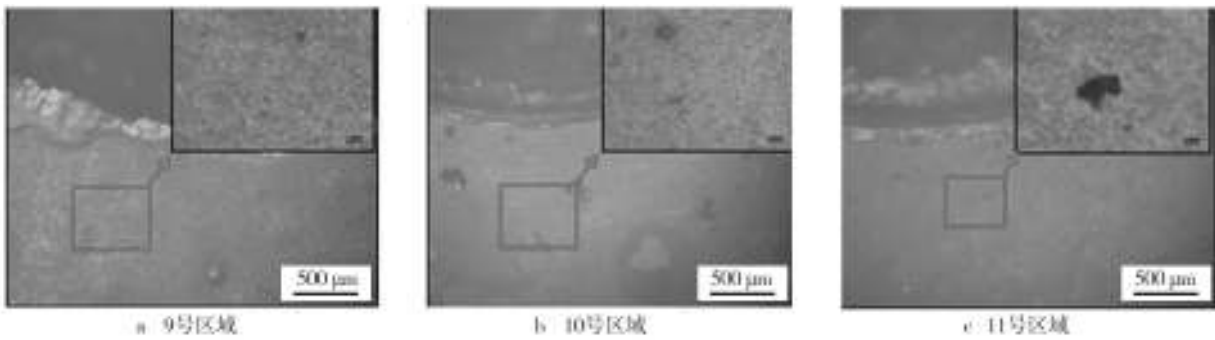


图6 9~11号区域铆钉孔周围腐蚀微观形貌(100×)

Fig.6 Microscopic morphology of the corrosions around the rivet hole in regions 9 to 11(100×)

图7中所示12号区域为远离铆钉的基体样板区域,从图7中可观察到试件表面的涂层脱落均匀,并没有出现小范围集中区域的局部老化,裸露的基体表面呈现出很多直径、深度均较小的点蚀坑,相对边缘和螺栓连接部位腐蚀程度较轻。

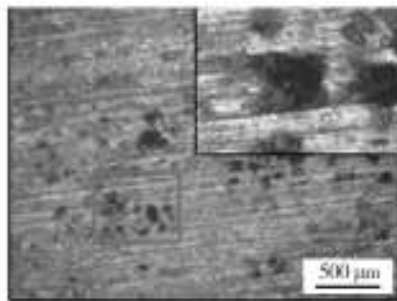


图7 12号区域铆钉孔周围腐蚀微观形貌

Fig.7 Microscopic morphology of the corrosions around the rivet hole in region 12

## 2.2 腐蚀产物结构组分分析

为进一步验证螺栓周围部位腐蚀类型与螺栓位置关系,对螺栓附近8—11号区域腐蚀产物进行XRD衍射分析,如图8所示。

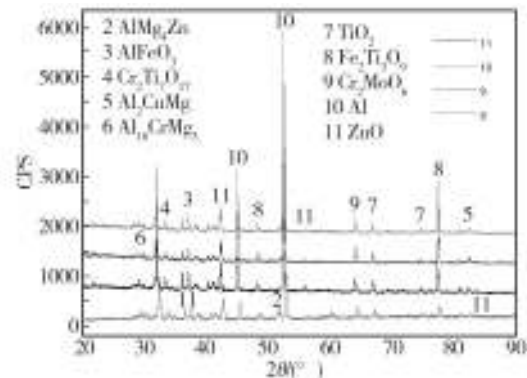


图8 8—11号样片X射线衍射图

Fig.8 X-ray diffraction patterns of specimens 8 to 11

从图8中可以看出,8~11号不同区域位置的腐蚀产物成分相同,均由Al,Mg,Fe,Ti等合金元素不同价态和不同方式的水合氧化物组成,且含量差别不大<sup>[6]</sup>。由此表明:在螺栓与基体连接缝隙区域、螺栓与基体接触偶合区域和试件边缘区域,涂层老化破坏后基体发生的腐蚀类型相同。

### 2.3 试件表面微观形貌及能谱分析

为了研究常规试件中腐蚀情况,对12号区域样片进行面扫描能谱分析。能谱分析结果见表3,腐蚀产

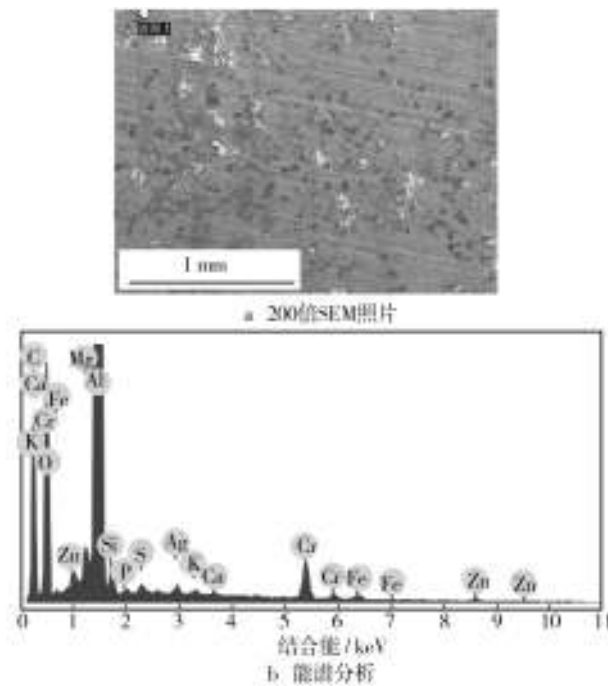


图9 12号区域样片能谱分析

Fig.9 Energy spectrum analysis of sample 12

表3 12号区域腐蚀产物能谱分析结果

Table 3 The results of energy spectrum analysis of corrosion products in region 12

| 元素 | 质量分数/% | 原子分数/% |
|----|--------|--------|
| C  | 6.82   | 12.59  |
| O  | 23.25  | 32.22  |
| Mg | 0.56   | 0.51   |
| Al | 62.23  | 51.15  |
| Si | 1.41   | 1.12   |
| P  | 0.22   | 0.16   |
| S  | 0.32   | 0.22   |
| K  | 0.20   | 0.11   |
| Ca | 0.14   | 0.08   |
| Cr | 2.90   | 1.24   |
| Fe | 0.53   | 0.21   |
| Zn | 0.72   | 0.24   |
| Ag | 0.71   | 0.15   |

物有Al,Mg,O,Cr,S,Si等元素,其中Al和O含量较高,Cr,S,Si含量较少。

### 3 结论

在沿海某机场的自然环境谱作用下进行了飞机受力壁板连接模拟试验件的自然曝晒试验,通过对曝晒前后试件表面涂层老化破坏情况和关键部位的宏、微观形貌分析,得到了某型飞机典型结构件海洋环境条件下的腐蚀、损坏变化规律。

1) 相同环境谱作用下试件不同部位发生腐蚀类型、机理不同:边缘和靠近螺栓的位置涂层老化、脱落最为严重,这分别是由于边缘效应涂层厚度较小,容易受到破坏和螺栓与基体的电偶效应,同时裸露的基体会出现较为严重的点蚀现象;基体与螺栓连接的部位则会由于腻子的失效、脱落而在缝隙内外产生氧浓度差,引发缝隙腐蚀。

2) 经过5年自然曝晒的试件由于没有进行维护保养,受力壁板连接模拟试验件涂层表面失光、变色、粉化严重,基体也发生明显腐蚀。这一方面表明自然曝晒过程中温度、紫外线作用为影响腐蚀的主要因素,另一方面也表明对于实际服役的飞机来说维护保养对于腐蚀防护也起到重要作用。

### 参考文献:

- [1] 陈跃良,金平,林典雄,等. 海军飞机结构腐蚀控制及强度评估[M]. 北京:国防工业出版社,2007.  
CHEN Yue-liang, JIN Ping, LIN Dian-xiong, et al. The Structure Corrosion Control of Naval Aircraft and Strength Evaluation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007
- [2] 中国特种飞行器研究所. 海军飞机结构腐蚀设计指南[M]. 北京:航空工业出版社,2005.  
China Special Vehicle Research Institute. The Navy Aircraft Structure Corrosion Design Guide[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005.
- [3] 汪定江,潘庆军,夏成宝. 军用飞机的腐蚀与防护[M]. 北京:航空工业出版社,2006.  
WANG Ding-jiang, PAN Qing-jun, XIA Cheng-bao. Corrosion and Protection of Military Aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2006.
- [4] ALEXOPOULOS N D, DALAKOURAS C J, SKARVELIS P, et al. Accelerated Corrosion Exposure in Ultra Thin Sheets of 2024 Aircraft Aluminium Alloy for GLARE Applications[J]. Corrosion Science, 2012, 55(2): 289—300.
- [5] LEI Tao, SONG Shi-zhe, ZHANG Xiao-yun, et al. Image Analysis of Atmospheric Corrosion of Field Exposure High

- Strength Aluminium Alloys[J]. Applied Surface Science, 2008, 254(21):6870—6874.
- [6] PATHAK S S, BLANTON M D, MENDON S K, et al. Investigation on Dual Corrosion Performance of Magnesium-rich Primer for Aluminum Alloys under Salt Spray Test (ASTM B117) and Natural Exposure[J]. Corrosion Science, 2010, 52(4):1453—1463.
- [7] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- CAO Chu-nan. Natural Environmental Corrosion China Materials[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2005.
- [8] 李慧连, 王文涛, 李莉, 等. 汽车仪表板材料氙灯老化试验与自然曝晒试验相关性研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1):30—33.
- LI Hui-lian, WANG Wen-tao, LI Li, et al. Car Dashboard Material Xenon Lamp Aging Test and Natural Exposure Test Correlation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1):30—33.
- [9] 王艳艳, 舒畅, 李超. 自然环境谱转化为加速试验环境谱的方法[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1):34—38.
- WANG Yan-yan, SHU Chang, LI Chao. Natural Environmental Spectrum is Transformed into the Method of Accelerating Test Environment Spectrum[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1):34—38.
- [10] LYU Sheng-Li, CUI You, GAO Xiao-sheng, et al. Influence of Exposure to Aggressive Environment on Fatigue Behavior of a Shot Peened High Strength Aluminum Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 574:243—252.
- [11] LEE E W, OPPENHEIM T, ROBINSON K, et al. The Effect of Thermal Exposure on the Electrical Conductivity and Static Mechanical Behavior of Several Age Hardenable Aluminum Alloys[J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(8):1538—1549.
- [12] HUANG Z W, SUN C. On the Role of Thermal Exposure on the Stress Controlled Fatigue Behaviour of a High Strength Titanium-aluminum Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 615:29—41.
- [13] LUCAS E L, BERTRAND P, GUAZZETTI S, et al. Impact of Ferromanganese Alloy Plants on Household Dust Manganese Levels: Implications for Childhood Exposure[J]. Environmental Research, 2015, 138:279—290.
- [14] 郝文魁, 刘智勇, 王显宗, 等. 舰艇用高强钢强度及其耐蚀性现状及发展趋势[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1):54—62.
- HAO Wen-kui, LIU Zhi-yong, WANG Xian-zong, et al. Present Situation and Development Trend of High Strength and Corrosion Resistance of High Strength Steel for Naval Ships[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1):54—62.
- [15] SCHNEIDER M, KREMMER K, LMMEL C, et al. Galvanic Corrosion of Metal/Ceramic Coupling[J]. Corrosion Science, 2014, 80:191—196.
- [16] KEISUKE F, HIROYUKI F, REI T, et al. Quantitative Evaluation of Initial Galvanic Corrosion Behavior of CNTs Reinforced Mg-Al Alloy[J]. Advanced Powder Technology, 2013, 24(5):833—837.

(上接第87页)

- GAO Chang-yin, ZHAO Hui, MA Long-mei, et al. Influence of Charge Amplifier on Dynamic Characteristics of Quartz Sensor[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2006, 28(6):654—656.
- [14] 陆兆峰, 秦旻, 陈禾, 等. 压电式加速度传感器在振动测试系统的应用研究[J]. 仪表技术与传感器, 2007(7):3—9.
- LU Zhao-feng, QIN Min, CHEN He, et al. Application and Investigation of Piezoelectric Accelerometer on Vibration Measurement System[J]. Instrument Technique and Sensor, 2007(7):3—9.
- [15] LDS-Dactron Shaker Control User Guide Rev.6.2[S].