

飞机用缓蚀剂性能分析

石志想, 何卫平

(中国特种飞行器研究所, 湖北 荆门 448035)

摘要: 目的 延缓或抑制飞机结构腐蚀的发生。方法 选择飞机维护中具有工程应用基础的5种不同类别(TFHS-15, LPS03316, Cor-Ban 35, Corrosion X Aviation, WD 40)的缓蚀剂, 采用GM9540P加速腐蚀环境谱(包括盐雾、湿热和干燥等3个模块)对5种缓蚀剂的性能进行评价。结果 喷涂TFHS-15试验件表面无气泡、剥落和变色, 喷涂Cor-Ban 35的试验件表面无气泡和剥落, 有轻微变色, 这两种缓蚀剂的防护等级为10级; 喷涂Corrosion X Aviation试验件表面少量剥落, 防护等级为9级; 喷涂LPS03316的试验件表面微量脱落和轻微变色, 防护等级为8级; 喷涂WD 40的试验件表面大量脱落和变色, 防护等级为1级。结论 经过加速腐蚀循环试验对试验件进行对比, TFHS-15和Cor-Ban 35两种缓蚀剂在飞机中使用时施工性能和防护性能最好。这两种缓蚀剂可以作为飞机腐蚀预防的有效手段, 在军机中推广应用。

关键词: 缓蚀剂; 30CrMnSiA 不锈钢; 施工性能; 防护性能

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.03.017

中图分类号: TJ01; TG174.42 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2015)03-0092-05

Analysis of Corrosion Inhibitors for Aircrafts

SHI Zhi-xiang, HE Wei-ping

(China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

ABSTRACT: Objective To delay or inhibit corrosion of aircraft structure. **Methods** Totally five different kinds of corrosion inhibitors (TFHS-15, LPS03316, AV15, Cor-Ban 35, Corrosion X Aviation, WD 40) were selected which had been used for aircraft maintenance. And the GM9540P accelerated corrosion test was adopted to evaluate the corrosion inhibitors. The GM9540P provided a combination of cyclic conditions including salt solution, damp-heat, and dry environment. **Results** The surfaces of test pieces of TFHS-15 showed no bubbles, spalling or discoloration. The surfaces of test pieces of Cor-Ban 35 showed no bubbles or spalling, but slight discoloration appeared. These results indicated that the protection grade of TFHS-15 and Cor-Ban 35 was Grade 10. The surfaces of test pieces of Corrosion X Aviation had a slight spalling, indicating the protection grade was Grade 9. The surfaces of test pieces of LPS03316 had a trace spalling and a slight discoloration, indicating the protection grade was Grade 8. The surfaces of test pieces of WD40 had massive spalling and discoloration, indicating the protection grade was Grade 1. **Conclusion** The accelerated corrosion test for comparison of test pieces showed that the two different kinds of corrosion inhibitors (TFHS-15 and Cor-Ban 35) were effective means in the military aircraft maintenance to prevent corrosion and worthy

收稿日期: 2015-01-16; 修订日期: 2015-01-20

Received: 2015-01-16; Revised: 2015-01-20

作者简介: 石志想(1984—), 女, 湖北荆门人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为飞机结构腐蚀防护与控制。

Biography: SHI Zhi-xiang(1984—), Female, from Jingmen, Hubei, Master, Engineer, Research focus: corrosion prevention and control.

of popularization and application.

KEY WORDS: corrosion inhibitor; 30CrMnSiA stainless steel; construction performance; corrosion protection performance

飞机结构维修费用中的95%都与飞机结构内部和表面的腐蚀有关。据1996年的统计,美国民用飞机行业与腐蚀有关的成本费用每年高达22.25亿美元。国内某飞机维修企业通过统计其腐蚀成本发现,该公司5年来在B737和B757型飞机的定期结构腐蚀损伤修理的费用达696.5万美元^[1-3]。

在飞机上使用缓蚀剂是一种成本低、操作方便的减缓或抑制飞机腐蚀的方法。缓蚀剂又称防腐剂,为石油衍生物和特殊添加剂的混合物,可通过防止腐蚀介质接触裸露金属表面,来保护飞机、导弹及其他设备的金属零件和部件^[4-6]。缓蚀剂不仅可用于飞机服役过程中的维护,也可用于飞机零部件在制造、储存、运输以及飞机在长期停放过程中的防护。目前,缓蚀剂在国外飞机生产、维护中已得到广泛应用。美、英等国已将缓蚀剂列为军机腐蚀控制维护技术的一项重要内容^[7-8]。

文中选择了具有工程应用经验的5种飞机用缓蚀剂:TFHS-15, LPS03316, Cor-Ban 35, Corrosion X Aviation 和 WD 40, 选择飞机常用的不锈钢材料,通过GM9540P实验室加速环境试验谱,根据GB/T 1766—2008,按照涂层起泡、开裂、剥落、粉化、基体腐蚀和失光等6项指标,对试验件表面试件损伤/失效程度进行评定,并依据ASTM D1654-05对缓蚀剂的等级进行评定^[9-10]。评定得出TFHS-15和Cor-Ban 35两种缓蚀剂的施工性和对试验件表面的防护性能最好,在军机中使用时可以有效预防飞机腐蚀。

1 飞机用缓蚀剂分类

1.1 常规分类

在飞机维护中,缓蚀剂可分为水置换型和非水置换型^[11-12]。非水置换型缓蚀剂耐久性较好,适用于干燥表面或使用了水置换型缓蚀剂表面的防护。通过在材料表面形成较厚的阻挡层达到长期腐蚀防护的目的,对积水区或水流经结构可提供较好的腐蚀防护效果。水置换型缓蚀剂在应用时往往具有特定的功能,如润滑等,某些水置换型缓蚀剂也可在电子电气设备上应用。

水置换型缓蚀剂是应用较为普遍的一类缓蚀剂,具有良好的渗透性和水置换性,能迅速脱除材料表面

和结构缝隙中的水分或其他电解质,同时沉积上一层保护膜^[13],可有效防止/延缓材料的腐蚀,作用原理如图1所示。目前,发达国家普遍使用水置换型缓蚀剂作为海洋环境中服役飞机重点腐蚀控制部位的附加防护材料。

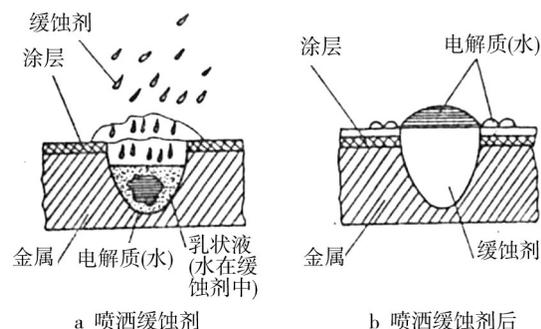


图1 水置换缓蚀剂作用原理^[13]

Fig.1 Mechanism of corrosion inhibitors on metal surface

水置换型缓蚀剂分为以下几种:

- 1) 水置换型渗透润滑缓蚀剂,适用于飞机结构中相对运动不频繁的铰链和装配连接件的清洗、润滑和维护。
- 2) 湿膜水置换型自降解缓蚀剂,适用于飞机内部、外部结构、滑动部位的短期防护,可自降解,无需去除即可重新喷涂。
- 3) 湿膜水置换型超薄膜缓蚀剂,适用于航空电子设备,包括电连接插头和接触片的防护,不影响设备电性能。
- 4) 长效干膜水置换型缓蚀剂,用于飞机内部结构表面及缝隙处腐蚀预防、涂层破损处的临时防护等。

1.2 其他分类

此外,实际应用当中缓蚀剂的分类方法有多种。如可根据化学成分的不同分为无机缓蚀剂与有机缓蚀剂两种;根据缓蚀剂抗电化学腐蚀的控制部位不同可分为阳极缓蚀剂、阴极缓蚀剂以及混合型缓蚀剂;根据在保护构件上生成保护膜的类别不同可以分为氧化膜型缓蚀剂、沉积膜型缓蚀剂和吸附膜型缓蚀剂三种^[14-15]。

根据使用周期的长短不同,还可将缓蚀剂分为长效和短效两种。缓蚀剂的使用周期即为其有效期。由于缓蚀剂具有临时性,在施加缓蚀剂之前必

须确定其有效期,以便做好缓蚀剂去除和再涂覆计划,确保可提供持续性的腐蚀防护效果。缓蚀剂有效期的确定一般应综合考虑环境、产品类型及特性、使用区域等因素。最佳方案是对所选用缓蚀剂通过模拟使用环境试验和使用经验,确定其在各种条件下的有效期。

2 试验设计

试验选择了5种飞机缓蚀剂,其中,TFHS-15, Cor-Ban 35, LPS03316为长效重防腐水置换型, Corrosion X Aviation为短效湿膜水置换自降解型, WD 40为短效渗透润滑水置换型。试验分5组进行,对每组试样施加不同种类缓蚀剂后,再进行加速环境腐蚀测试,测试完成后分别对不同组的测试结果进行分析。试验中选取常用的飞机材料为30CrMnSiA结构钢试验件,连接形式为螺接,试验件的结构形式如图2所示。



图2 30CrMnSiA的试验件结构形式

Fig.2 Sketch of 30CrMnSiA

2.1 方法

2.1.1 缓蚀剂施工方法

缓蚀剂施工方法包括刷涂、浸涂和喷涂等。刷涂适用于小区域涂覆,或者防止周围区域或设备涂覆缓蚀剂的情况;浸涂适用于小型分解部件的缓蚀剂涂覆,应使用材料与缓蚀剂相容的容器进行浸涂;喷涂适用于无限制大面积区域的涂覆,应该根据材料黏度选择合适的喷涂设备。

此外,选用施工方法还应考虑材料的黏度。一般情况下,低黏度材料使用喷涂方法;高黏度材料则使用刷涂和浸涂;浸涂适用于所有类型的材料。该次试验中TFHS-15, LPS03316采用刷涂工艺, Cor-Ban 35, Corrosion X Aviation和WD 40采用喷涂工艺。

2.1.2 加速使用方法

通过模拟海洋腐蚀环境,进行缓蚀剂的优选试验。试验环境由盐雾、湿热、干燥等3个环境模块循

环进行(如图3所示),每个模块的试验时间为8h,每一个循环为24h,试验总周期为8天。各试验模块及参数:盐雾试验模块的测试箱温度为 $(49 \pm 2)^\circ\text{C}$,盐溶液中氯化钠的质量分数为0.9%, NaHCO_3 为0.25%, pH值为6~9;湿热环境模块的温度为 $(49 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度 $>95\%$;干燥环境模块的温度为 $(55 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。

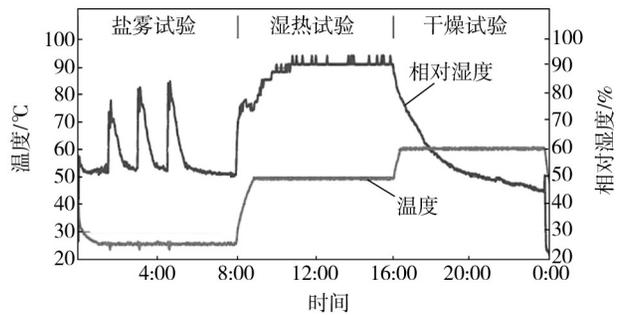


图3 GM9540P加速腐蚀环境谱组成

Fig.3 The environment spectra of GM9540P accelerated test

2.1.3 试验方法

试验前按ASTM G1-90充分清洗试验件,除掉油污、尘垢、油脂等污物。清洗后的试验件干燥后放在干燥器内短期保存(不应造成二次污染),等待试验。试验前,对试验件进行外观检查,不允许有微裂纹等其他初始缺陷/损伤。依次按盐雾、湿热、干燥加速试验环境谱的环境模块开展试验,试样应固定在支架上,应以与垂直方向成 15° 左右固定,并且相互之间不能接触,如图4所示。



图4 试验件摆放

Fig.4 The layout of samples

测试时要求每天重复试验循环周期直至达到所要求的测试时间。在测试过程中,根据GB/T 1766—2008,按涂层起泡、开裂、剥落、粉化和基体腐蚀和失光等6项指标评定试件损伤/失效程度,测试样件应进行检查并在每个预定循环周期结束时拍照。8个试验循环周期结束后,根据ASTM D1654-05检查和分析试验件,并对各种缓蚀剂保护下的试样腐蚀程度进行等

级评定。

2.2 缓蚀剂施工后的试样件

施加 TFHS-15, LPS03316, Corrosion X Aviation, Cor-Ban 35 和 WD 40 等 5 种缓蚀剂后的试验件如图 5 所示,分析 30CrMnSiA 结构钢试样施加不同缓蚀剂后的形貌如下:

1) TFHS-15 为微黄色的透明膜层,在施工过程中可以采用喷涂和刷涂,在此次施工中采用刷涂。

2) LPS03316 为无色半透明状的硬膜,在此次施工中采用刷涂。

3) Corrosion X Aviation 为无色透明软膜缓蚀剂,极易渗透试验件表面,形成一层疏水软膜,在喷涂过程中其膜厚比较薄。

4) Cor-Ban 35 为透明状的棕红色硬膜缓蚀剂,施工过程为喷涂,使用前要用力摇晃均匀,否则会在试验件表面形成大量泡沫。

5) WD 40 和 Corrosion X Aviation 较为相似,均为无色透明状的湿膜缓蚀剂。



图5 涂缓蚀剂试样件

Fig.5 The samples coated with corrosion inhibitors

3 试验结果

3.1 试样形貌分析

3.1.1 涂 TFHS-15 试样

刷涂 TFHS-15 缓蚀剂的试样件在 8 个试验周期后表面形貌如图 6 所示。由图 6 可知,试验周期循环结束后,缓蚀剂无变化,试验件表面未见明显的腐蚀。由 ASTM D1654-05 可知,TFHS-15 的防护等级为 10 级,这说明 TFHS-15 在加速腐蚀试验谱下腐蚀防护作用很好。

3.1.2 涂 LPS03316 试样

刷涂 LPS03316 缓蚀剂 8 个试验周期循环过程如图 7 所示。在 1 个周期结束后,发现试验件有少量的腐蚀产物产生。随着试验周期的延长,试验件的腐蚀情况



图6 涂 TFHS-15 试样件 8 个周期后腐蚀情况

Fig.6 Corrosion of the samples coated with TFHS-15 after eight cycles

加重,但腐蚀速率很慢,且腐蚀多发生在试验件的边缘,紧固件周围腐蚀现象较少。在 8 个试验周期结束后,腐蚀基本控制在一定区域,按 ASTM D1654-05 可知 LPS03316 的防护等级为 8 级。LPS03316 缓蚀剂在加速腐蚀试验谱下能提供较好的腐蚀防护效果。

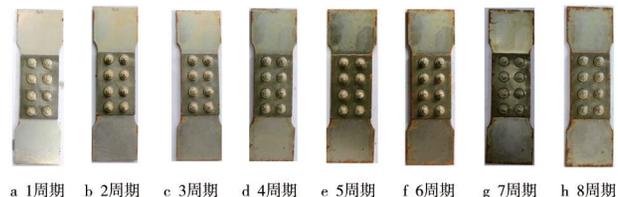


图7 涂 LPS03316 试样件 8 个周期后腐蚀情况

Fig.7 Corrosion of the samples coated with LPS03316 after eight cycles

3.1.3 涂 Corrosion X Aviation 试样

喷涂缓蚀剂 Corrosion X Aviation 在第 4, 5, 6, 8 周期中的表面形貌如图 8 所示,在第 4 个周期结束后,试验件有少量的腐蚀产物产生。随着试验周期的延长,腐蚀情况也随之加剧,腐蚀速率较慢。加速试验结果按 ASTM D1654-05 对试验件腐蚀形貌进行分析可知,Corrosion X Aviation 的防护等级为 9 级。说明缓蚀剂 Corrosion X Aviation 在加速腐蚀试验谱下腐蚀防护作用比较好。

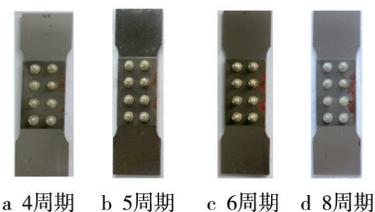


图8 涂 Corrosion X Aviation 试样件 8 个周期后腐蚀情况

Fig.8 Corrosion of the samples coated with Corrosion X Aviation after eight cycles

3.1.4 涂 Cor-Ban 35 试样

喷涂缓蚀剂 Cor-Ban 35 的 30CrMnSiA 结构钢试验

件在第1,3,5,8周期结束后试验件表面腐蚀状况变化情况如图9所示。可以看出,第3周期结束后试验件的螺接处开始出现盐粒的沉积。随着试验周期增长,盐粒沉积增多,但试验件表面未见明显的腐蚀产生,只是随之试验周期的延长,缓蚀剂的颜色变浅。按ASTM D1654-05可知,Cor-Ban 35类缓蚀剂的防护等级为10级。说明缓蚀剂 Cor-Ban 35在加速腐蚀试验谱下腐蚀防护作用很好。

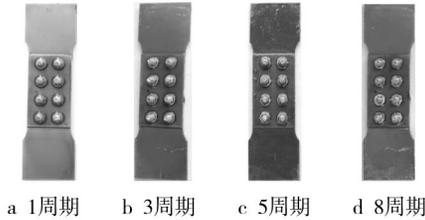


图9 涂 Cor-Ban 35 试验件 8 个周期后腐蚀情况

Fig.9 Corrosion of the samples coated with Cor-Ban 35 after eight cycles

3.1.5 涂 WD 40 试样

喷涂缓蚀剂 WD 40 后试验件在 8 个周期加速试验中的表面腐蚀形貌变化如图 10 所示。可以看出,在第 1 周期结束后,喷涂 WD 40 试验件有极少量的腐蚀产生,但是随着试验周期的增长,喷涂 WD 40 试验件的腐蚀情况加剧,腐蚀速率很快。相比喷涂 Corrosion X Aviation 的试验件,腐蚀加重剧烈。在 8 个试验周期结束后,按 ASTM D1654-05 可知,WD 40 试验件的防护等级为 1 级。说明 WD 40 类缓蚀剂在加速腐蚀试验谱下腐蚀防护作用很差。



图 10 涂 WD 40 试验件 8 个周期后腐蚀情况

Fig.10 Corrosion of the samples coated with WD 40 after eight cycles

3.2 讨论

由以上试验结果可以看出,喷涂 LPS03316, Corrosion X Aviation, WD 40 的试验件出现腐蚀,喷涂 TFHS-15 和 Cor-Ban 35 缓蚀剂的试验件未见腐蚀产生。Cor-Ban 35 缓蚀剂则随着试验的开展,颜色有明显的变化,综合情况见表 1 和图 11。

表 1 试验件表面腐蚀状况变化

Table 1 Corrosion of the samples

| 缓蚀剂 | 外观变化 | | | 缓蚀剂等级 |
|----------------------|------|----|----|-------|
| | 起泡 | 剥落 | 变色 | |
| TFHS-15 | 无 | 无 | 有 | 10 |
| LPS03316 | 无 | 有 | 有 | 8 |
| Corrosion X Aviation | 无 | 有 | 无 | 9 |
| Cor-Ban 35 | 无 | 无 | 有 | 10 |
| WD 40 | 无 | 有 | 无 | 1 |

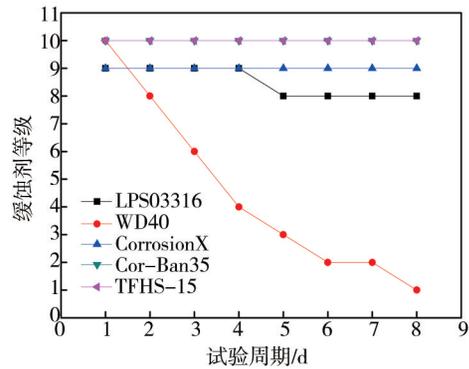


图 11 缓蚀剂等级

Fig.11 Grade of corrosion inhibitors

4 结论

在试验周期完成后,依据 ASTM D1654-05 可知,喷涂 TFHS-15 和 Cor-Ban 35 的试验件无腐蚀出现,缓蚀剂级别为 10 级。喷涂 LPS03316, Corrosion X Aviation 和 WD 40 的试验件有少量腐蚀,其中 WD 40 提供的防护效果最差,等级最低,因此实际使用中 WD 40 一般充当润滑剂和临时防护使用。

TFHS-15 和 Cor-Ban 35 两种缓蚀剂是长效硬膜缓蚀剂,在使用过程中可以根据需要采用喷涂、刷涂或者浸涂使用,施工较为简单,使用性能最好。

参考文献:

[1] 任三元,曹定国,王文亮. 航空装备腐蚀防护控制技术进展与展望[J]. 装备环境工程,2008,5(3):40—44.
REN San-yuan, CAO Ding-guo, WANG Wen-liang. Progresses and Prospect on the Corrosion Prevention and Control Technique for Aviation Equipments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008,5(3):40—44.

[2] 张大全,高立新,周国定. 国内外缓蚀剂研究开发与展望[J]. 腐蚀与防护,2009,30(9):604—610.

(下转第 110 页)

Homogenization Techniques in Fabrication of Short Carbon Fiber Reinforced Composites. *Ordnance Material Science and Engineering*[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2003, 26(6):50—53.

[9] 葛世荣,张德坤,朱华,等. 碳纤维增强尼龙 1010 的力学性能及其对摩擦磨损的影响[J]. *复合材料学报*, 2004, 21(2): 99—104.

GE Shirong, ZHANG Dekun, ZHU Hua, et al. Mechanical Properties and Their Influence on The Friction and Wear of the Carbon Fibers Reinforced Polyamide 1010[J]. *ACTA Materiae Composit AE Sinica*, 2004, 21(2): 99—104.

[10] 张淑芳,冀克俭,张银生. 几种复合材料的断裂行为研究[J]. *工程塑料应用*, 1996, 24(1): 38—41.

ZHANG Shu-fang, Ji Ke-jian, ZHANG Yin-sheng. Study on The Micro-fracture Behavior of Several Composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 1996, 24(1): 38—41.

[11] 于倩倩,侯俊峰,陈刚,等. 碳纤维复合材料热老化性能研究及预测[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2013(8): 39—43.

YU Qian-qian, HOU Jun-feng, CHEN Gang, et al. The Study and Prediction of Aging Properties of CFRC[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2013(8): 39—43.

[12] 张春雷,朱波,乔琨,等. 高低温老化对碳纤维复合材料芯棒结构性能的影响[J]. *高科技纤维与应用*, 2012, 37(5): 23—26.

ZHANG Chun-lei, ZHU Bo, QIAO Kun, et al. Effect of High-low Temperature Thermal Aging on The Structure of Carbon Fiber Reinforced Composite Core[J]. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2012, 37(5): 23—26.



(上接第 96 页)

ZHANG Da-quan, GAO Li-xin, ZHOU Guo-ding. Recent Progress and Prospect for Corrosion Inhibitor Science and Technology[J]. *Corrosion & Protection*, 2009, 30(9): 604—610.

[3] 陈群志,房振乾,康献海. 军用飞机外场腐蚀防护方法研究[J]. *装备环境工程*, 2011, 8(2): 72—76.

CHEN Qun-zhi, FANG Zhen-qian, KANG Xian-hai. Methods for Military Aircraft Field Corrosion Prevention and Control[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2011, 8(2): 72—76.

[4] 王彬,苏艳. 铝合金大气腐蚀行为及其防腐措施研究进展[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(2): 64—68.

WANG Bin, SU Yan. Research Progress in Atmospheric Corrosion Behavior and Anticorrosion Measures of Alumi-Bum Alloy[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 9(2): 64—68.

[5] 罗来正,肖勇,陈智君,等. 航空用 2D12 铝合金在海洋大气环境中的腐蚀行为研究[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(4): 39—41.

LUO Lai-zheng, XIAO Yong, CHEN Zhi-jun, et al. Research on Corrosion Behavior of 2D12 Aluminum Alloy for Aircraft in Marine Atmospheric environment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 9(4): 39—41.

[6] 陈群志,房振乾. 飞机结构日历寿命及腐蚀防护研究应关注的问题[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(6): 72—77.

CHEN Qun-zhi, FANG Zhen-qian. Consideration on Some Calendar Life and Corrosion Protection Questions of Aircraft Structures[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 9(6): 72—77.

[7] 舒畅,刘彬,周漪. 锌铝/富铝复合涂层在海洋环境中的耐腐蚀性研究[J]. *表面技术*, 2012, 41(5): 56—59.

SHU Chang, LIU Bing, ZHOU Yi. Research on Corrosion Resistance of Zn-Al/Rich-Al Composite Coating in Marine Environment[J]. *Surface Technology*, 2012, 41(5): 56—59.

[8] 曹宏涛,李雪亭. 基于海洋环境的紧固件腐蚀防护要求及技术措施[J]. *表面技术*, 2013, 42(1): 105—108.

CAO Hong-tao, LI Xue-ting. Corrosion Protection Requirements and Technical Measures of Fasteners Based on the Marine Environment[J]. *Surface Technology*, 2013, 42(1): 105—108.

[9] GM9540P, Accelerated Corrosion Test[S].

[10] ASTM D 1654-05, Standard Test Method for Evaluation of Painted or Coated Specimens Subjected to Corrosive Environments[S].

[11] TO 1-1-691, Cleaning and Corrosion Prevention and Control, Aerospace and Non-aerospace Equipment[S].

[12] 孙祚东,李云仲,韦力军. 缓蚀剂在军用飞机维护中的应用研究[J]. *装备环境工程*, 2014, 12(6): 100—103.

SUN Zuo-dong, LI Yun-zhong, WEI Li-jun. Study on the Applications of Corrosion Inhibitor in Military Aircraft Maintenance[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 12(6): 100—103.

[13] 朱辰,邱实. 缓蚀剂及其在飞机上的应用[J]. *装备环境工程*, 2013, 10(5): 334—337.

ZHU Chen, QIU Shi. Corrosion Inhibitors and Their Application in Aircraft[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2013, 10(5): 334—337.

[14] 王英,曹祖宾,孙微微,等. 缓蚀剂的分类和发展方向[J]. *全面腐蚀控制*, 2009(2): 24—26.

WANG Ying, CAO Zu-bin, SUN Wei-wei, et al. The Category and the Development Directions of Corrosion Inhibitors[J]. *Total Corrosion Control*, 2009(2): 24—26.

[15] HEGEDUS C R. The Displacement of Water from a Steel Surface[R]. NADC-82194-60, 1982.