

# 飞机铝合金结构连接部位表面防护体系 修理技术研究

张学军<sup>1</sup>, 武恒州<sup>1</sup>, 张登<sup>2</sup>, 张幸<sup>2</sup>

(1. 航空装备管理, 北京 100071; 2. 中国特种飞行器研究所, 湖北 荆门 448035)

**摘要:** **目的** 研究飞机铝合金结构连接部位表面防护体系修理技术。**方法** 根据飞机铝合金连接结构腐蚀损伤特点、原防护体系类型及服役环境特点等, 选取修复材料和修复工艺, 制定5种不同的表面防护体系修理方法, 通过在飞机典型涂层加速试验环境谱下开展加速腐蚀试验, 优选出适于飞机铝合金结构连接部位表面涂层损伤修理方法。**结果** 加速试验2周期, 采用RM4修理的试件, 修复部位表面开始出现脱落现象。加速试验6周期, 在紧固件区域, 采用RM1, RM2, RM3, RM5修理的试件在变色、粉化、开裂、起泡和剥落指标上都属于优或者良, 但在生锈指标上仅采用RM3修理的试件属于良; 在非紧固件区域, 采用RM1, RM2, RM3, RM5修理的试件在各指标上都属于优或者良。**结论** RM3更适用于飞机铝合金结构连接部位表面防护体系修理。

**关键词:** 铝合金; 连接部位; 表面防护; 修理

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2015.06.027

**中图分类号:** TJ07; TG178 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2015)06-0152-06

## Repairing Techniques for Surface Protecting System of Aircraft Aluminum Connection Structure

ZHANG Xue-jun<sup>1</sup>, WU Heng-zhou<sup>1</sup>, ZHANG Deng<sup>2</sup>, ZHANG Xing<sup>2</sup>

(1. Aviation Equipment Management, Beijing 100071, China;

2. China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

**ABSTRACT: Objective** To research repairing techniques for surface protecting system of aircraft aluminum connection part. **Methods** According to the corrosion damage features of the aircraft aluminum connection structure, the original protecting system type, the service environmental features and so on, the repairing material and the repairing process were selected and five different repairing methods (RM) for the protecting system were developed. By carrying out the accelerated corrosion test under the environment spectrum of the typical aircraft coating accelerated test, the preferred repairing method adapted for the surface protecting system of the aircraft aluminum connection structure was selected. **Results** At 2 cycles of the accelerated test, the surface of the repairing part began shedding by using RM4. At 6 cycles of the accelerated test in the fastening area, the repairing part by RM1, RM2, RM3 or RM5 were all excellent or

收稿日期: 2015-07-14; 修订日期: 2015-08-15

Received: 2015-07-14; Revised: 2015-08-15

作者简介: 张学军(1967—), 男, 黑龙江人, 高级工程师, 主要从事腐蚀修理等方面的工作。

Biography: ZHANG Xue-jun(1967—), Male, from Heilongjiang, Senior engineer, Research focus: corrosion repairing work.

good in the indicators of color, chalking, cracking, blistering and peeling, however, only the repairing part by RM3 was good in the indicator of rusting. In the non-fastening area, the repairing part by RM1, RM2, RM3 or RM5 were all excellent or good in all indicators. **Conclusion** RM3 was more suitable for repairing of the surface protecting system of the aircraft aluminum connection part.

**KEY WORDS:** aluminum; connection part; surface protection; repairing

飞机在服役过程中,不可避免地会受到各种环境因素、载荷的交互作用,引起结构及材料的腐蚀或破坏<sup>[1-3]</sup>,特别是沿海环境腐蚀及其严重<sup>[4-6]</sup>。近年来,针对飞机在外场使用与维护阶段中暴露出问题的大量调研表明,现役各机种均存在不同程度的腐蚀现象,以连接件居多,甚至有些机型飞机因其重要部位、关键承力结构的严重腐蚀损伤问题而导致提前大修或报废<sup>[7-8]</sup>。据统计,一架飞机平均由约5万个连接结构组成,大量的连接结构中不可避免存在电势差以及缝隙等原因而极易导致腐蚀<sup>[6-13]</sup>。早期腐蚀以飞机涂层腐蚀损伤破坏形式最为普遍<sup>[14-15]</sup>,如不及时采取修理措施,将会继续腐蚀金属结构件,危及飞机结构的刚度、强度、疲劳寿命等,甚至危及飞机飞行安全<sup>[16-17]</sup>。考虑到飞机首翻期一般需要几年,并且经常执行任务、频繁出勤等,一旦发现表面防护体系腐蚀损伤破坏,就需要临时快捷地对表面防护体系进行腐蚀损伤修理,保证飞机飞行任务或出勤等按时正常进行。

由此,文中针对飞机典型铝合金连接结构腐蚀损伤特点、原防护体系类型及服役环境特点等,选取了修复材料和修复工艺,开展了加速腐蚀试验,优选出了适于飞机铝合金结构连接部位表面防护体系腐蚀损伤的修理方法。试验结果表明,采用RM3修复,铝合金连接结构表面紧固件区域和非紧固件区域修复涂层综合性能良好。

## 1 试验

### 1.1 试验件及修理方法

试验件材料是2A12,单剪对接,表面处理为硫酸阳极化,涂层体系是H06-27底漆+SO4-21面漆,共15件试验件,采用5种修理方法进行涂层损伤修复,每种修理方法对应3件试验件。为了方便快捷地进行腐蚀损伤修理,选用便于携带、贮存、使用的修理材料。在修理过程去腐蚀产物阶段选用了铝合金去腐蚀产物膏,可深度清除腐蚀产物,工作温度为15~35℃,30 min内去腐蚀产物膏固化后可轻松完全脱离。在表面处理阶段选用了便捷式的Alodine氧化修复笔,工作温度为

20~50℃,可直接使用,无需漂洗。铝合金局部化学氧化膏,可在材料表面形成氧化膜,工作温度为15~35℃。在涂漆阶段,选用了IMR-21纳米涂料,允许在温度为5~38℃,相对湿度≤85%条件下施工,表干时间≤2 h,实干时间≤24 h。磷化底漆,允许在温度为10℃以上,相对湿度比较干燥条件下施工,表干时间为30 min,实干时间≤2 h,以及缓蚀剂。去腐蚀产物膏与局部化学氧化膏通常配套使用。最终采用的5种修理方法如下,其中RM1是原防护体系,用于对比。

RM1:去腐蚀产物+清洗+Alodine氧化(常规)+H06-27底漆+SO4-21面漆。

RM2:去腐蚀产物+清洗+Alodine氧化(修复笔)+IMR-21纳米涂料。

RM3:去腐蚀产物+清洗+去腐蚀产物膏+局部化学氧化膏+IMR-21纳米涂料。

RM4:去腐蚀产物+清洗+Alodine氧化(修复笔)+缓蚀剂(Corrosion X+HD)。

RM5:去腐蚀产物+清洗+磷化底漆+IMR-21纳米涂料。

### 1.2 试件腐蚀损伤预制

据统计,飞机结构涂层的脱落、失效现象比较普遍,紧固件区域腐蚀严重。因此,拟采用以下方法预制典型的涂层损伤模拟件,如图1所示。

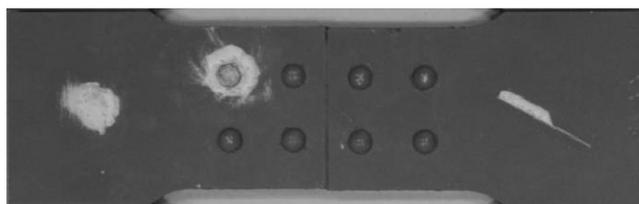


图1 腐蚀损伤预制件

Fig.1 Pieces of pre-corrosion test

1) 手工打磨去除铆钉周围底漆、面漆,打磨成近圆形状,直径约为15 mm,打磨深度为直至露出基体。

2) 在非紧固件区域一端预制0.5 mm宽的划痕,划痕深度为穿透涂层体系直至金属基体;另一端打磨成近圆形状,直径约为15 mm,打磨深度为直至露

出基体。

3) 将打磨好的试验件浸入 EXCO 溶液腐蚀 3 天, 直至所有的打磨区域出现明显的腐蚀产物。

需进一步完善和规范腐蚀损伤预制的內容: 如打磨去除铆钉周围漆层的面积、在非紧固件区域划痕的深度、EXCO 溶液浸泡腐蚀时间及损伤程度等。

### 1.3 测试项目、方法

采用飞机典型涂层试样加速试验环境谱开展加速腐蚀试验<sup>[18]</sup>, 包括湿热暴露、紫外线照射和盐雾试验, 共循环 6 次, 加速试验环境谱如图 2 所示。每一循环试验结束后, 根据 GB/T 1766—2008<sup>[19]</sup>, 按涂层变色、粉化、开裂、起泡、生锈、剥落等指标评定试件修复涂层的损伤/失效程度, 采用三维体视显微系统进行微观形貌观察。

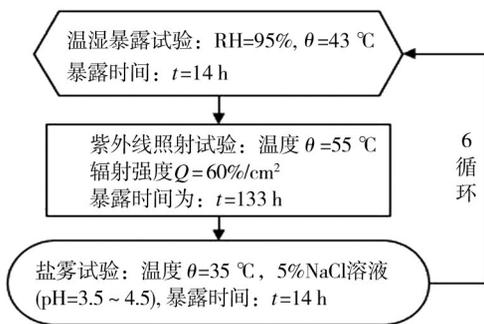


图2 涂层加速试验环境谱

Fig.2 Environment spectrum of coating accelerated test

## 2 试验结果分析

### 2.1 外观形貌分析

针对采用了 5 种不同修理方法的铝合金连接结构试样, 共完成了 6 个周期的加速腐蚀试验, 并对其首先进行了外观形貌的对比分析, 具体包括:

1) 采用 RM4 时, 缓蚀剂在加速试验 2 周期各个修复部位已经开始出现脱落现象, 在加速试验 6 周期出现干裂、粉化现象。主要是由于缓蚀剂抗紫外性能差, 因此在后面对比涂层性能时不考虑 RM4。

2) 加速试验 3 周期后, 采用 RM5 的修复涂层在铆钉周围有一个泡, 其他部位无起泡、无锈点; 采用其他修理方法的修复涂层在各个部位均无起泡、无锈点。

3) 加速试验 6 周期后, 采用 RM1 的修复涂层在划痕位置处出现了一个锈点、无起泡, 在铆钉位置出现

密集型锈点并形成锈斑、有一个泡; 采用 RM2 的修复涂层在铆钉周围出现密集型锈点、无起泡, 其他位置无锈点、无起泡; 采用 RM3 的修复涂层在铆钉周围有少量锈点、有一个泡, 其他位置无锈点、无起泡; 采用 RM5 的修复涂层在划痕位置处出现一个泡、无锈点, 在铆钉周围有多个锈点、有一个泡、出现脱漆现象, 在片状打磨位置处有一个锈点。

用三维体视显微系统观察加速试验 3 周期和 6 周期的铝合金涂层修复试验件, 典型的微观形貌(起泡、锈点等缺陷见箭头标记处)如图 3 和图 4 所示。

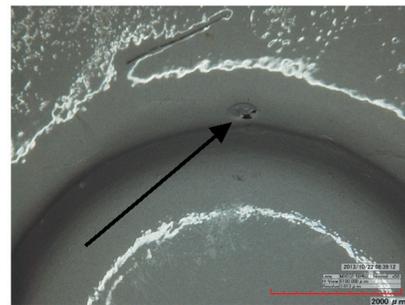


图3 RM5 铆钉加速试验 3 周期后微观形貌

Fig.3 Microtopography after three cycles of rivet acceleration test by RM5

### 2.2 涂层色差

参考 GB/T 11186.2 和 GB/T 11186.3<sup>[20]</sup>, 测量试验前后试验件涂层的色差, 并利用式(1)计算色差值, 见表 1。

$$\Delta E = \sqrt{(L_n - L_0)^2 + (A_n - a_0)^2 + (B_n - b_0)^2} \tag{1}$$

式中:  $\Delta E$  为色差值, 表示颜色的变化;  $L_0$  为初始明度指数;  $a_0, b_0$  为初始色度指数;  $L_n, A_n, B_n$  为试验  $n$  周期后涂层的明度和色度指数。

从表 1 中可以看出, 色差值均很小, 评定等级为 0 级, 无变色。说明在涂层色差指标上, 4 种修理方法对试验件在整个试验周期内均合适。

### 2.3 修复涂层等级评定

根据修复试验件加速试验结束后的试验结果, 按照 GB/T 1766—2008 对修复涂层进行综合老化性能等级评定, 结果见表 2 和表 3。

从表 2 中可以看出, 在紧固件区域, RM1, RM2, RM3, RM5 在变色、粉化、开裂、起泡和剥落指标上都属于优或者良, 但是在生锈指标上 RM1 属于差, 仅

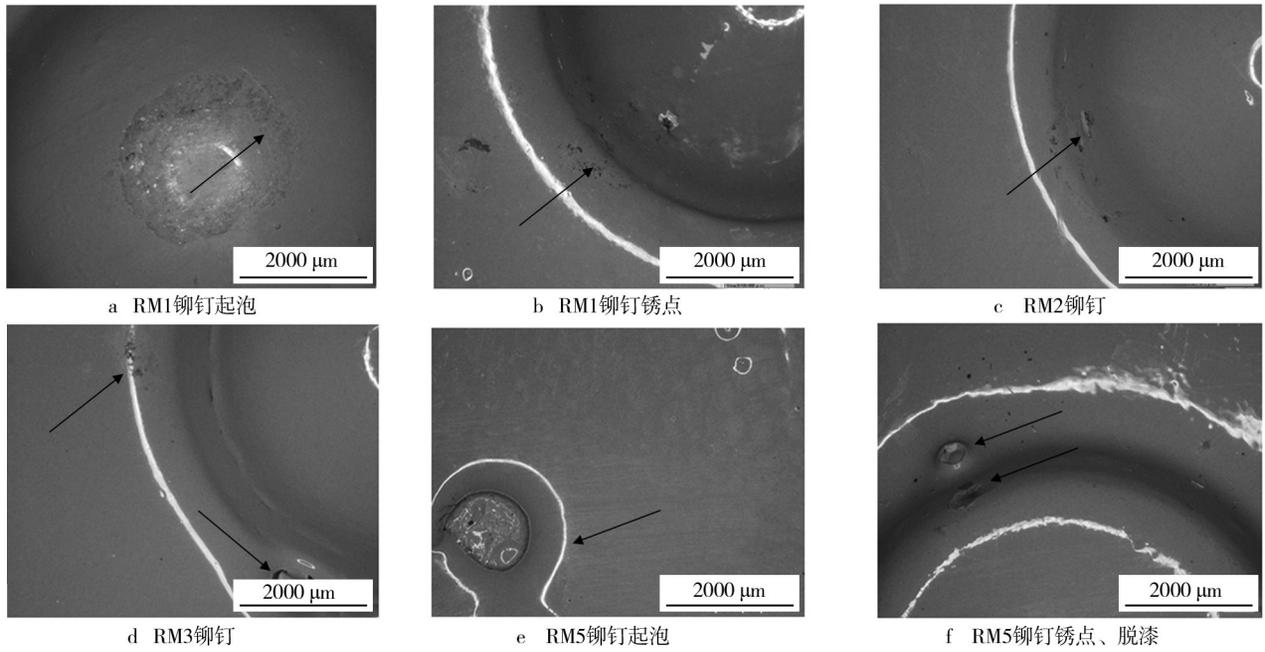


图4 试验件涂层修复后微观形貌(6周期)

Fig.4 Microtopography of test pieces after coating repairing (6 cycles)

表1 铝合金涂层修理试验件色差记录

Table 1 Chromatic aberration record of test pieces of aluminum coating repairing

周 期	RM1		RM2		RM3		RM5	
	$\Delta E$	变色等级						
1	0.18	0级—无变色	0.34	0级—无变色	0.22	0级—无变色	0.13	0级—无变色
2	0.29	0级—无变色	0.36	0级—无变色	0.27	0级—无变色	0.27	0级—无变色
3	0.21	0级—无变色	0.11	0级—无变色	0.25	0级—无变色	0.30	0级—无变色
4	0.19	0级—无变色	0.12	0级—无变色	0.17	0级—无变色	0.18	0级—无变色
5	0.32	0级—无变色	0.64	0级—无变色	0.50	0级—无变色	0.14	0级—无变色
6	0.42	0级—无变色	0.26	0级—无变色	0.19	0级—无变色	0.07	0级—无变色

表2 紧固件区域修复涂层性能等级评定结果

Table 2 Performance grade evaluation of repaired coating in the fastening area

修理 方法	单项等级						综合 等级
	变色	粉化	开裂	起泡	生锈	剥落	
RM1	0	0	0	1	5	0	5
RM2	0	0	0	0	4	0	3
RM3	0	0	0	1	2	0	1
RM5	0	0	0	1	3	1	4

综合等级0,1,2,3,4,5六个等级,  
分别代表漆膜耐老化性能的优、良、中、可、差、劣。

表3 非紧固件区域修复涂层性能等级评定结果

Table 3 Performance grade evaluation of repaired coating in the non-fastening area

修理 方法	单项等级					综合 等级
	粉化	开裂	起泡	生锈	剥落	
RM1	0	0	0	1	0	1
RM2	0	0	0	0	0	0
RM3	0	0	0	0	0	0
RM5	0	0	1	1	0	1

综合等级0,1,2,3,4,5六个等级,  
分别代表漆膜耐老化性能的优、良、中、可、差、劣。

RM3属于良,综合等级仅采用RM3的涂层老化性能属于良。从表3可以看出,在非紧固件区域,所有修理方法的涂层老化性能属于优或者良,其中RM2, RM3的

综合等级为优, RM1, RM5的综合等级为良。

综上所述, RM3相对于其他修理方法要好。主要是由于RM3使用的去腐蚀产物膏可深度去除腐蚀产

物,使得被清理后的表面没有腐蚀产物的痕迹,经局部化学氧化膏处理后的结构件表面氧化膜层连续不间断,无擦痕及其他缺陷或破损,更易于与IMR-21纳米涂料相结合。

### 3 结论

1) 对于飞机铝合金连接结构,紧固件区域修复涂层老化情况比非紧固件区域的严重。严重性主要体现在生锈指标上。

2) 在紧固件区域,RM1生锈最严重,仅RM3生锈级别属于良;在非紧固件区域,RM1和RM5的生锈等级为1, RM2和RM3的生锈等级为0。

3) 在紧固件区域,仅RM3的涂层综合等级为良;在非紧固件区域, RM2和RM3的涂层综合等级为优,修理RM1和RM5的涂层综合等级为良。

4) 对于铝合金结构,采用RM3(去腐蚀产物+清洗+去腐蚀产物膏+局部化学氧化膏+IMR-21纳米涂料)后,紧固件区域修复涂层综合老化性能等级为1级,非紧固件区域修复涂层综合老化性能等级为0级。表明漆膜耐老化性能在紧固件区域处良好,在非紧固件区域处优,修理方法较好。故推荐采用RM3来作为飞机铝合金连接结构腐蚀损伤快速修理技术方案。

#### 参考文献:

- [1] 宣卫芳,胥泽奇,肖敏,等. 装备与自然环境试验[M]. 北京:航空工业出版社,2009.  
XUAN Wei-fang, XU Ze-qi, XIAO Min, et al. Equipment and the Natural Environment Test[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009.
- [2] 陈群志,王逾涯,崔常京,等. 老龄飞机结构的腐蚀问题与对策[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 1—9.  
CHEN Qun-zhi, WANG Yu-ya, CUI Chang-jing, et al. Corrosion Problems and Countermeasures of the Aging Aircraft [J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 1—9.
- [3] 张蕾,陈群志,刘慧丛,等. 飞机外部IMR21纳米复合涂层在典型加速腐蚀环境中的腐蚀失效行为[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 36—41.  
ZHANG Lei, CHEN Qun-zhi, LIU Hui-cong, et al. Corrosion Failure Behavior of IMR21 Nano Composite in Typical Accelerated Corrosion Environment[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 36—41.
- [4] 孙志华,汤智慧,李斌. 海洋环境服役飞机的全面腐蚀控制[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 35—39.  
SUN Zhi-hua, TANG Zhi-hui, LI Bin. Comprehensive Cor-

rosion Control of Naval Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 35—39.

- [5] 刘静,罗勇,周漪,等. 模拟加速腐蚀专家模拟器软件在美军海空军飞机腐蚀损伤评估中的应用[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 124—129.  
LIU Jing, LUO Yong, ZHOU Yi, et al. Application of ACES in Corrosion Damage Evaluation of U. S. Navy Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 124—129.
- [6] 曾凡阳,刘元海,丁玉洁. 海洋环境下军用飞机腐蚀及其系统控制工程[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 77—81.  
ZENG Fan-yang, LIU Yuan-hai, DING Yu-jie. Research on Corrosion and System Engineering Control Technology of Military Aircraft in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 77—81.
- [7] 彭志军,王学强,叶彬. 某型飞机腐蚀防护及设计改进[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 84—89.  
PENG Zhi-jun, WANG Xue-qiang, YE Bin. Corrosion Protection and Design Improvement of an Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 84—89.
- [8] 高延达,李健,李宗原,等. 浅析直升机的外场腐蚀防护[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 135—139.  
GAO Yan-da, LI Jian, LI Zong-yuan, et al. Brief Analysis of Helicopter Field Corrosion Prevention[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 135—139.
- [9] 俞树荣,夏洪波,李淑欣,等. 316L不锈钢扩散连接结构晶间腐蚀的研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(17): 2138—2141.  
YU Shu-rong, XIA Hong-bo, LI Shu-xin, et al. Intergranular Corrosion for Diffusion Bonded Joints of 316L Stainless Steel [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(17): 2138—2141.
- [10] 黄晓霞,李荣强,张艳霞. 钛合金紧固件的腐蚀及其防护技术[J]. 材料保护, 2008, 41(6): 56—59.  
HUANG Xiao-xia, LI Rong-qiang, ZHANG Yan-xia. Titanium Fastener Corrosion Protection Technology[J]. Journal of Materials Protection, 2008, 41(6): 56—59.
- [11] 郁春娟,黄桂桥. 常用金属紧固件在水环境中的腐蚀行为[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 4—7.  
YU Chen-juan, HUANG Gui-qiao. Corrosion Behavior of Usual Metallic Fastener in Water Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(5): 4—7.
- [12] 沈亚秋. 淬火转移时间对7075-T73铆钉晶间腐蚀及剪切性能的影响[J]. 紧固件技术, 2013(1): 2—8.  
SHEN Ya-qiu. Effect of Quenching Transfer Time on IGA and Shear Property of Rivets Made from 7075-T73[J]. Fastener Technology, 2013(1): 2—8.
- [13] 曹小敏,周元康,陈素,等. 铝合金铆钉化学着色工艺及着

- 色膜的耐蚀性能[J]. 材料保护, 2011, 44(5): 40—42.
- CAO Xiao-min, ZHOU Yuan-kang, CHEN Su, et al. Anodizing Research of Aluminum Alloy Revits and Performance of Oxidizing Film[J]. Journal of Materials Protection, 2011, 44(5): 40—42.
- [14] 张蕾, 陈群志, 王逾涯, 等. 某型飞机腐蚀关键结构含涂层模拟件腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 45—49.
- ZHANG Lei, CHEN Qun-zhi, WANG Yu-ya, et al. Research on the Corrosion Behavior of Simulated Samples with Coating for the Corrosion Critical Component on a Certain Type of Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 45—49.
- [15] 赵芯, 谢飞, 张帆, 等. 浅析现代民用航空飞机蒙皮防腐蚀体系[J]. 全面腐蚀控制, 2014(1): 22—24.
- ZHAO Xin, XIE Fei, ZHANG Fan, et al. ANTI-corrosion system of Modern Civil Aviation Aircraft Skin[J]. General Corrosion Control, 2014(1): 22—24.
- [16] 张丹峰, 谭晓明, 马力, 等. 服役环境条件下飞机结构铝合金材料孔蚀规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(2): 93—96.
- ZHANG Dan-feng, TAN Xiao-ming, MA Li, et al. Aluminium Pitting Corrosion Damage Rule under Service Environment[J]. Journal of Chinese society for Corrosion and Protection, 2010, 30(2): 93—96.
- [17] 刘文珽, 李玉海. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- LIU Wen-ting, LI Yu-hai. Precision Measurement Methods for the Calendar Life of Aircraft Structure System[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [18] 刘文珽, 李玉海, 陈群志, 等. 飞机结构腐蚀部位涂层加速试验环境谱研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(1): 109—112.
- LIU Wen-ting, LI Yu-hai, CHEN Qun-zhi, et al. Accelerated Corrosion Environmental Spectrums for Testing Surface Coatings of Critical Areas of Flight Aircraft Structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(1): 109—112.
- [19] GB/T 1766—2008, 色漆和清漆 涂层老化的评级方法[S]. GB/T 1766—2008, Paints and Varnishes Rating Schemes of Degradation of Coats[S].
- [20] GB/T 11186, 漆膜颜色的测量方法[S]. GB/T 11186, Paint Color Measurement Method[S].
- 
- (上接第 146 页)
- [5] 吴艳红, 王晓晖, 马斌捷. 爆炸螺栓盒的爆炸模拟与冲击强度计算[J]. 强度与环境, 2007, 34(6): 11—15.
- WU Yan-hong, WANG Xiao-hui, MA Bin-jie. The Simulation of Explosion and the Calculation of the Impact Strength of the Explosive Bolt Box[J]. Structure & Environment Engineering, 2007, 34(6): 11—15.
- [6] 马宏宣. 国外抗静电抗射频电火工品[J]. 火工品, 2010(3): 21—24.
- MA Hong-xuan. Eed Anti-static and Anti-RF in Foreign[J]. Eed, 2010(3): 21—24.
- [7] 陈加兴. 工业防静电危害[M]. 北京: 兵器工程师进修大学, 1994.
- CHEN Jia-xing. Industrial Anti-static Hazard[M]. Beijing: Weapon Engineer Training University, 1994.
- [8] 张枫, 杨树彬. 一种低冲击分离螺栓的设计[J]. 火工品, 2011(3): 14—22.
- ZHANG Feng, YANG Shu-bin. Design Bolt with a Low Impact Separation[J]. Eed, 2011(3): 14—22.
- [9] 孙勇. 某型无污染爆炸螺栓的研制[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- SUN Yong. Development of a Certain Type of Explosive Bolts Without Pollution[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [10] 王凯民. 火工品工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- WANG Kai-min. Explosive Engineering[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2015.
- [11] 王凯民. 军用火工品设计技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- WANG Kai-min. Military Pyrotechnics Design Technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006.
- [12] 赵文虎. 某导弹用电点火防静电技术研究[J]. 火工品, 2001(3): 24.
- ZHAO Wen-hu. A Study on Anti-electrostatic Technology of Missile with Electric Ignition[J]. Eed, 2001(3): 24.
- [13] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.
- CAI Rui-jiao. The Design Principle of Pyrotechnics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1997.
- [14] 杜龙飞, 马玉环, 陈慧能, 等. 爆炸螺栓作用过程的仿真研究[J]. 火工品, 2015(3): 29—32.
- DU Long-fei, MA Yu-huan, CHEN Hui-neng, et al. The Simulation of Action Procedure of Explosive Bolt[J]. Eed, 2015(3): 29—32.
- [15] GJB 1307A—2003, 航天火工装置通用规范[S]. GJB 1307A—2003, General Specification for Aerospace Pyrotechnics[S].