

# 新型防腐涂层对直升机典型结构材料 防护性能研究

崔腾飞<sup>1</sup>, 杨丽媛<sup>2</sup>, 彭望舒<sup>1</sup>, 曹真<sup>1</sup>, 刘明<sup>2</sup>, 高蒙<sup>2</sup>

(1.中国直升机设计研究所 综合技术研究室, 江西 景德镇 333000

2.北京航空材料研究院 航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室, 北京 100095)

**摘要:** **目的** 研究新型防腐涂层对直升机典型结构用铝合金及复合材料在热带海洋性气候环境下的防护性能, 并与原防护涂层进行对比。**方法** 通过测试涂层腐蚀后的形貌、光泽度、色差、电化学阻抗等, 对比新/原涂层对直升机典型结构用铝合金和复合材料的防护性能。**结果** 经过2年腐蚀后, 新涂层表面无明显变化, 而原涂层表面有轻微腐蚀, 光泽度和色差下降较大。电化学阻抗测试表明, 暴露前后涂层结构无明显变化, 涂层阻抗值呈现持续下降的趋势, 但是原涂层阻抗下降更快。**结论** 新涂层对直升机典型铝合金和复合材料有更好的防护性, 更加适于海洋性环境的使用。

**关键词:** 涂层; 外场腐蚀; 铝合金; 复合材料; 电化学

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.02.007

**中图分类号:** TG174.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)02-0041-08

## New Corrosion Protection Coating System for Typical Helicopter Structural Materials

CUI Teng-fei<sup>1</sup>, YANG Li-yuan<sup>2</sup>, PENG Wang-shu<sup>1</sup>, CAO Zhen<sup>1</sup>, LIU Ming<sup>2</sup>, GAO Meng<sup>2</sup>

(1. Integrated Technology Research Department, China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen, 333000, China; 2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material, Beijing Institute of Aeronautical Material, Beijing 100095, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to study the protection effect of new corrosion protection coating system for aluminum alloy and composite of typical helicopter structure in tropical maritime climate area. And the protection effect of new coating on aluminum alloy and composite of typical helicopter structure was contrasted with that of the unimproved coating by testing the morphology, glossiness, chromatic aberration, electrochemical impedance. The results showed that after 2 years of corrosion, the new corrosion protection coating had no difference, but there was slight corrosion on the unimproved protected coating and glossiness and chromatism were decreased. The electrochemical impedance spectroscopy showed that the coating's structure had no change during experiment time. The impedance of all coatings decreased, but the unimproved coating's impedance decreased more. The new corrosion protection coating system has better corrosion property for helicopter structural materials. It is appropriate for marine climate.

**KEY WORDS:** coating; maritime climate corrosion; aluminum alloy; composite; electrochemical

收稿日期: 2019-07-20; 修订日期: 2019-08-22

Received: 2019-07-20; Revised: 2019-08-22

作者简介: 崔腾飞(1987—), 男, 河北张家口人, 博士, 工程师, 主要研究方向为环境工程。

**Biography:** CUI Teng-fei (1987—), Male, from Zhangjiakou Hebei, Ph. D., Engineering, Research focus: environmental engineering.

腐蚀损伤是直升机结构损伤的重要形式之一<sup>[1]</sup>,尤其是在海洋环境条件下,腐蚀环境更为恶劣,高温、高湿、高盐雾、高紫外线的特点导致装备的腐蚀损伤较内陆地区更为突出<sup>[2-3]</sup>。直升机在海上救援、运输、搜索等方面有着广泛的应用,而长期在海洋环境下作业,暴露在严酷的腐蚀环境中,会导致机体结构的严重腐蚀。目前直升机采用了多种抗腐蚀手段,其中表面防护涂层最为重要<sup>[4]</sup>,是抵抗高温、高湿、高盐雾、高紫外线的海洋环境腐蚀的关键技术<sup>[5]</sup>。直升机表面防护涂层的抗腐蚀能力,对直升机结构能否达到预期服役使用年限有着决定性的影响<sup>[6-7]</sup>,一旦涂层失效,机体结构材料将很快发生腐蚀,影响结构的强度,严重时会影响直升机飞行的安全<sup>[8]</sup>。

目前,我国直升机防护涂层体系主要是沿用陆基直升机使用的环氧底漆和聚氨酯面漆体系。该涂层在内陆地区能对直升机有着较好的防护效果,但是在海洋环境下的耐腐蚀性欠佳。针对此情况,开发了新型防腐底漆及高耐候防护面漆,并对其抗腐蚀效果进行了研究。该涂层具有良好的抗划伤、高附着力、耐腐蚀、耐老化性能,对长期在海洋环境下服役的直升机具有良好的防护效果,应用前景广泛。

由于新的涂层体系要在直升机结构中进行应用,必须经历相应的考核验证,并考虑环境因素的影响<sup>[9-13]</sup>。因此,文中选用直升机结构常用的铝合金和复合材料为基体,在其表面喷涂新研发的耐海洋性环境气候的环氧底漆和聚氨酯磁漆,并在万宁试验站进行外场暴露试验,以考核新涂层对直升机结构材料的防护性,并与原陆基传统环氧底漆和聚氨酯面漆进行对比,为其在某型直升机上的装机应用提供技术支撑。

## 1 试验

### 1.1 材料及试样尺寸

材料选用 7A04-T6 铝合金、中温固化环氧玻璃布预浸料复合材料,试样尺寸如图 1 所示。7A04-T6 铝合金的化学成分为: Si  $\leq 0.5\%$ , Fe  $\leq 0.5\%$ , Cu 1.4%~2.0%, Mn 0.2%~0.6%, Mg 1.8%~1.8%, Cr 0.1%~0.25%, Zn 5.0%~7.0%, Ti  $\leq 0.1\%$ , 剩余为 Al。7A04-T6 铝合金的热处理制度为: 535 °C 保温 5.5 h+80 °C 淬火+165 °C 时效 4 h。复合材料为中温固

化环氧玻璃布预浸料 3238A/EW250F/45 Q/ZW3026。对 7A04-T6 铝合金表面进行铬酸阳极化处理,复合材料不进行表面处理。之后两种材料表面喷涂原、新两种体系的防护漆(其中原涂层体系为陆基传统涂层体系,新涂层体系为新开发的耐海洋环境涂层体系,两种涂层均为环氧树脂底漆和聚氨酯面漆)。试验开始及每次进行性能测试前,用无水乙醇清洗各试验件表面,去除灰尘等污物,之后用去离子水冲洗,冷风吹干。

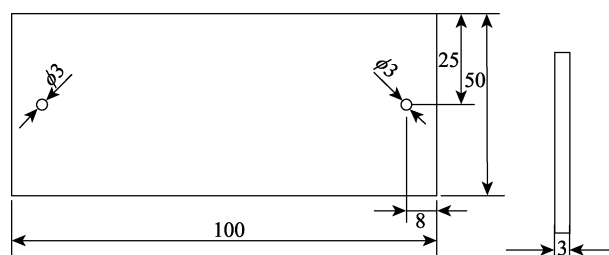


图 1 试样尺寸  
Fig.1 Sample size

表 1 材料表面处理及涂层体系

材料	基体表面预处理	涂层及其顺序
7A04-T6	铬酸阳极化	原涂层: 底漆+面漆 新涂层: 底漆+面漆
复合材料	无	原涂层: 底漆+面漆 新涂层: 底漆+面漆

### 1.2 外场环境及装夹方式

本试验的试验件在万宁大气试验站进行环境暴露试验。万宁大气试验站位于海南省万宁市东海岸,海拔 12.3 m,属典型的北热带湿润性海洋气候。万宁站具有高温、高湿、高盐雾、太阳辐射强等南海大气环境的典型特点。突出表现在“长夏无冬”,即使在气温最低的 1 月份,最低温度也能达到 7.8 °C,全年最高温差不足 30 °C。本地区相对湿度超过 80% 的时数全年高达 6800 h。占总时数的 78%,降雨充沛,日照充足,年积温超过 9000 °C,仅次于我国西沙和南沙地区,环境特征见表 2。

利用夹具和支架将试验件朝南固定在海上平台暴露场的试样架上,试验件与水平面夹角为 45°,具体装夹方式如图 2 所示。

表 2 万宁试验站大气环境特征

东经 北纬	平均温度/°C	相对湿度/ %	湿润时间/ (h·a <sup>-1</sup> )	降雨量/ (mm·a <sup>-1</sup> )	Cl <sup>-</sup> 沉积率/ (mg·100 cm <sup>2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	SO <sub>2</sub> 沉积率/ (mg·100 cm <sup>2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	日照时间/ (h·a <sup>-1</sup> )	雨水 pH
110°05' 18°58'	24.6	86	6736	1563	0.387	0.060	2043	5.00

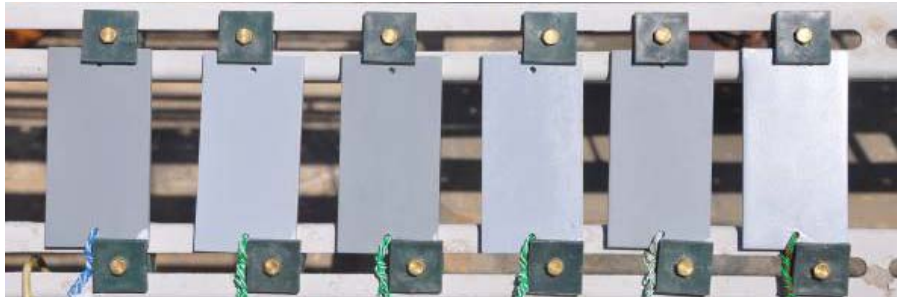


图 2 试样装夹方式  
Fig.2 Way of sample clamping

### 1.3 检测周期

外场暴露试验进行 0.5、1、1.5、2 a 后，检查各试验件的外观，并拍照，测试试样的光泽度、色差，并对试件的电化学交流阻抗进行测试。电化学测试采用三电极测试体系，参比电极为甘汞电极，辅助电极为铂金电极，工作电极为涂层/基体材料，正弦波加载，扫描频率范围为 0.1~100 kHz，信号幅值为 10 mV。

## 2 结果与讨论

### 2.1 宏观形貌

#### 2.1.1 铝合金

在自然暴露试验前和暴露 0.5、1、1.5、2 a 后，铝合金表面涂层的宏观形貌分别如图 3 和图 4 所示。可以看出，未暴露时，原涂层表面基本保持完好。

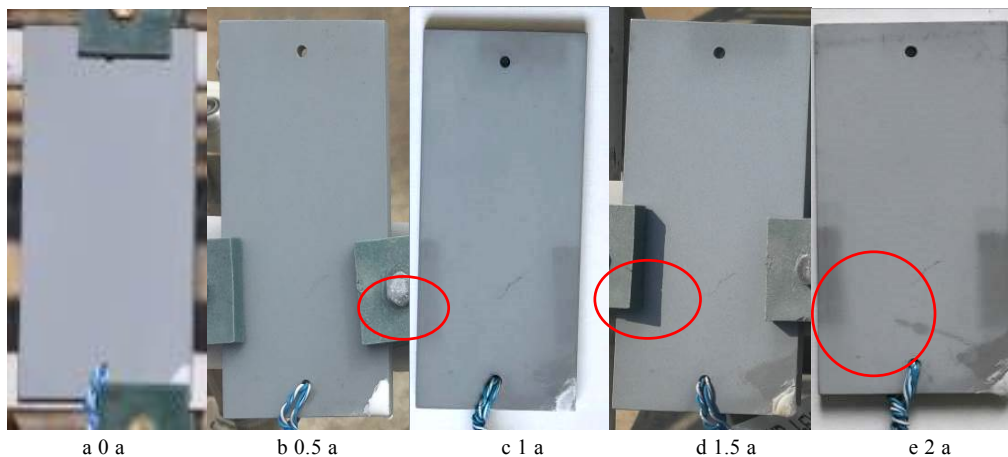


图 3 铝合金表面原涂层暴露不同时间后的宏观形貌  
Fig.3 Macro of original coating of aluminum alloy after exposure at different time

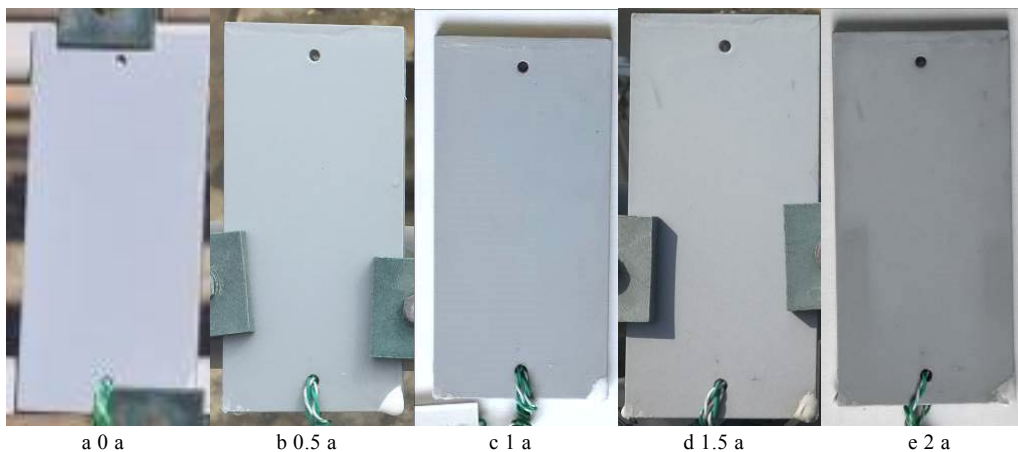


图 4 铝合金表面新涂层暴露不同时间后的宏观形貌  
Fig.4 Macro of new coating of aluminum alloy after exposure at different time

在暴露 0.5 a 后,试样表面发生轻微粉化(如图 3b 所示)。在暴露 1 a 后,有部分区域出现轻微变色,并有轻微腐蚀出现(如图 3c 所示)。新涂层体系试样在自然暴露不同时间后,试样表面无明显变化(如图 4 所示)。

### 2.1.2 复合材料

在自然暴露试验前和暴露 0.5、1、1.5、2 a 后,

复合材料表面涂层的宏观形貌分别如图 5 和图 6 所示。可以看到,暴露 0.5 a 后,复合材料原涂层表面出现少量轻微粉化现象(如图 5b 所示)。随着暴露时间的增加,粉化程度增加。暴露 1 a 后,表面有轻微变色,其他无明显变化(如图 5c 所示)。新涂层暴露 2 a 后,试样表面无明显变化(如图 6 所示)。

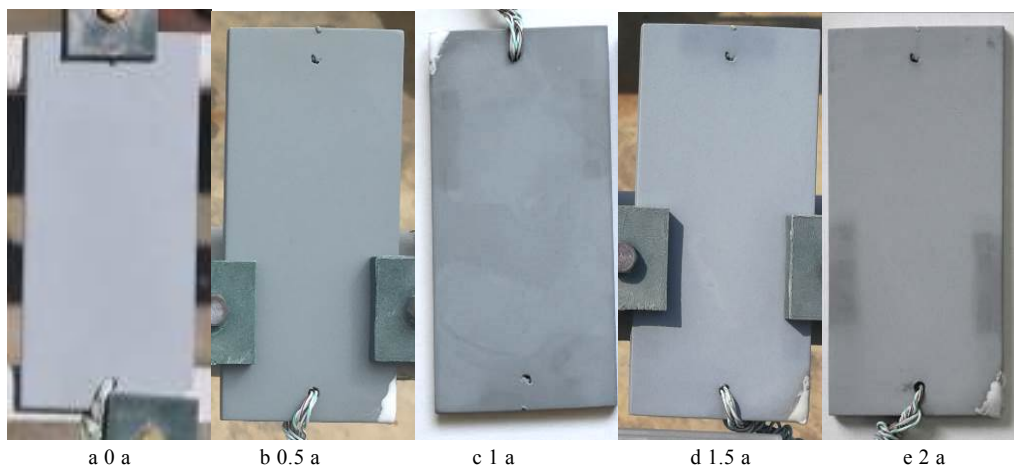


图 5 复合材料表面原涂层暴露不同时间后的宏观形貌

Fig.5 Macro of original coating of composite materials after exposure at different time

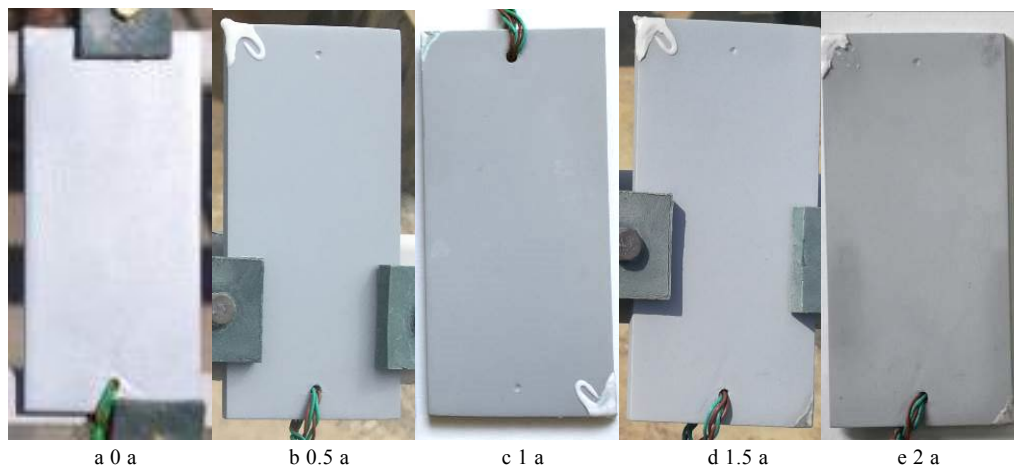


图 6 复合材料表面新涂层暴露不同时间后的宏观形貌

Fig.6 Macro of composite materials new coating after exposure at different time

## 2.2 表面光泽度

自然暴露试验前和暴露 0.5、1、1.5、2 a 后,测试了试样表面涂层的 60° 光泽度,试验结果如图 7 所示。可以看出,原涂层为无光漆,新涂层为半光漆。随着腐蚀时间的延长,两种漆的光泽度都有所降低,但是原涂层光泽度下降较为明显。经过 2 a 暴露后,铝合金表面原涂层光泽度已经下降了 54.5%,而新涂层经过 2 a 腐蚀后,光泽度只下降了 23.9%。复合材料表面原涂层光泽度下降了 31%,而新涂层经过 2 a 腐蚀后,光泽度只下降了 11.4%。说明新涂层较原涂层性能退化程度更小,防护性能更好。

铝合金和复合材料试样表面涂层光泽度随暴露时间的下降率如图 8 所示。可以看出,随着暴露时间的延长,无论是铝合金还是复合材料试样,其涂层光泽度下降率越来越大,但是程度不同。同样的基体材料,新涂层体系的下降率低于原涂层体系。对于同种涂层体系,复合材料的下降率低于铝合金。因此,新涂层较原涂层腐蚀速率更慢,且新涂层在复合材料表面的防护性优于铝合金。

## 2.3 表面色差

不同涂层自然暴露不同时间后,涂层相对于未腐蚀时的色差如图 9 所示。可以看出,随着暴露时间的

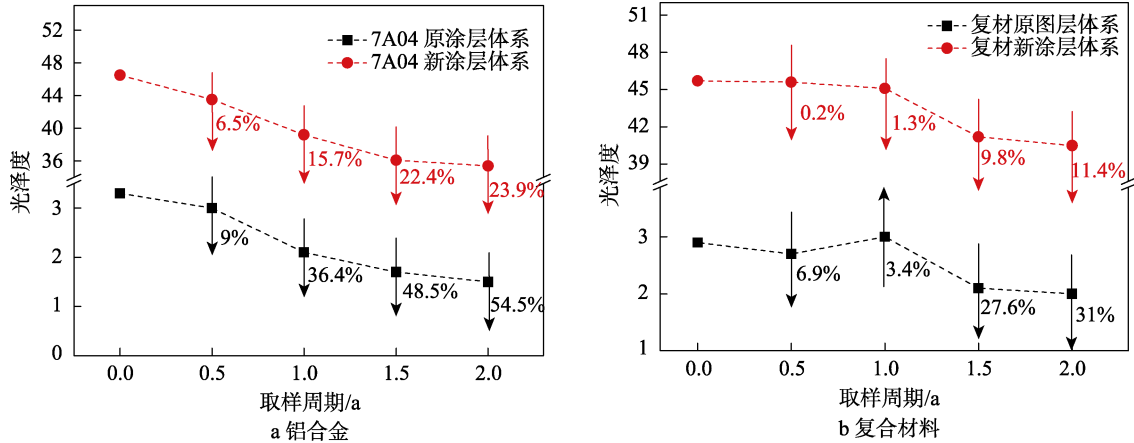


图 7 涂层光泽度随暴露时间的变化

Fig.7 Coating glossiness along with the change of exposure time: a) aluminum alloy; b) composite materials

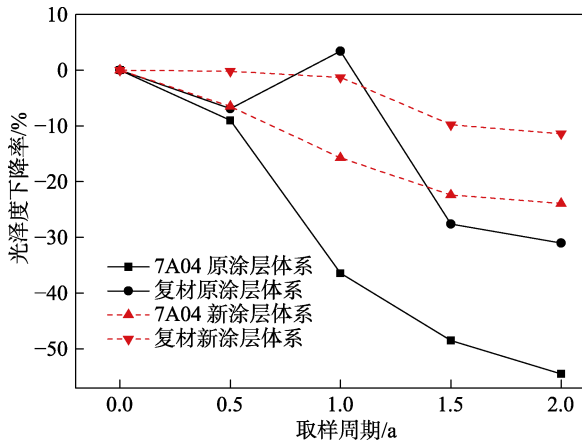


图 8 铝合金和复合材料光泽度随暴露时间的下降率  
Fig.8 Falling rate of aluminum alloy and composite gloss along with the change of exposure time

延长，两种涂层的色差都呈现增大的趋势。暴露 2 a 后，色差明显增加。相较于未暴露时，暴露 2 a 后，铝合金表面色差达到了 9.1，复合材料达到 6.1。这是由于暴露 2 a 后，涂层表面出现了轻微的粉化。新涂层色差变化相对较小，相较于未暴露时，暴露 2 a 后，铝合金和复合材料表面色差均只有 2.1。说明新涂层在铝合金和复合材料表面的性能退化程度低于原涂层，新涂层具有更好、更持久的防护性能。

图 10 对比了铝合金和复合材料色差随暴露时间的变化，可以看出，随着暴露时间的延长，无论是铝合金还是复合材料，其色差均越来越大，但是程度不同。同样的基体材料，新涂层体系的变化程度低于原涂层体系。对于同种涂层体系，铝合金的变化程度高于复合材料。因此，新涂层随着腐蚀时间的延长，耐腐蚀性优于原涂层，且新涂层在复合材料的表面性能劣化程度更慢。

## 2.4 电化学阻抗

不同基体材料、不同涂层体系暴露前和外场暴露 2 a 后的电化学阻抗分别如图 11 和图 12 所示。不同

基体材料、不同涂层体系外场暴露前后， $f=0.1\text{Hz}$  处的电化学阻抗模值见表 3。从图 11a 中可以看出，对于不同基体材料喷涂的不同涂层体系，其阻抗均表现出相同的电化学特征，即时间常数只有一个，出现一个高阻抗的容抗弧。这说明未暴露时，涂层体系完好，对基体具有很好的保护作用<sup>[14]</sup>。外场暴露 2 a 后（如图 12a 所示），对于不同基体材料喷涂的不同涂层体

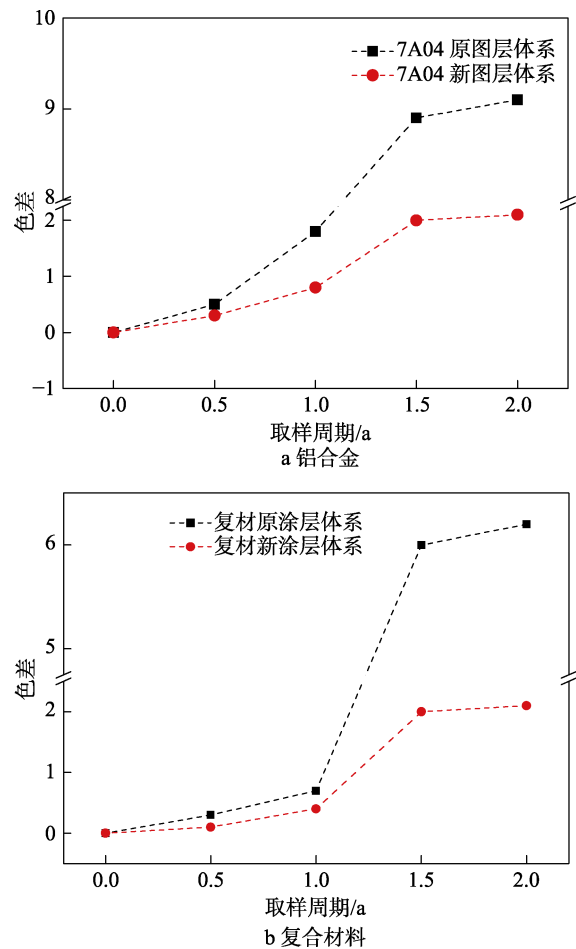


图 9 涂层色差度随暴露时间的变化

Fig.9 Coating color difference degree along with the change of exposure time: a) aluminum alloy; b) composite materials



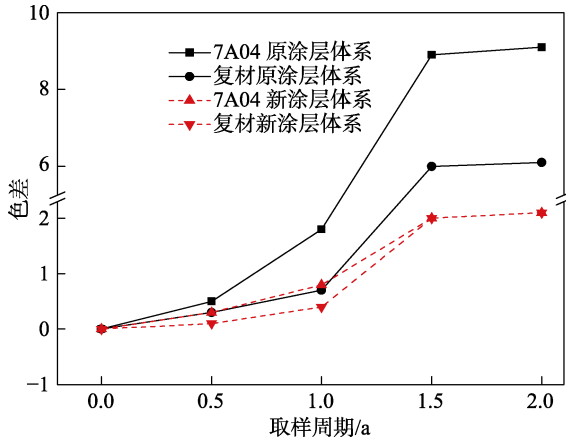


图 10 铝合金和复合材料涂层色差度随暴露时间的变化  
Fig.10 Color difference degree of aluminum alloy and composite coating along with the change of exposure time

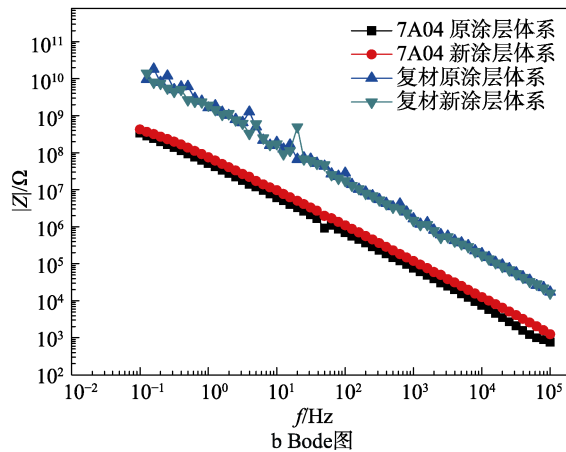
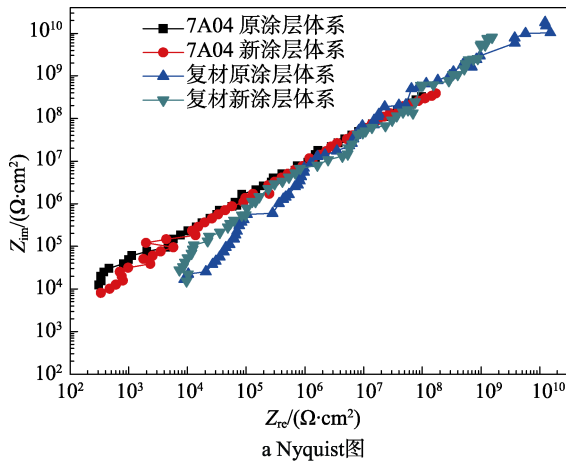


图 11 未暴露时涂层电化学阻抗  
Fig.11 Electrochemical impedance of unexposed coating

系,其阻抗也均表现出相同的电化学特征。这说明暴露 2 年后,涂层体系仍保持完好,对基体仍具有很好的保护性。

不同基体材料、不同涂层体系外场暴露前后的电化学阻抗可用图 13 所示的电路拟合<sup>[15]</sup>。其中  $R_s$  代表溶液电阻,  $R_c$  代表涂层界面反应电阻,  $C_c$  代表涂层界面反应电容。外场暴露 2 a 后,涂层结构未发生变化,依旧具备良好的耐腐蚀性能,可以保护基体免受腐蚀

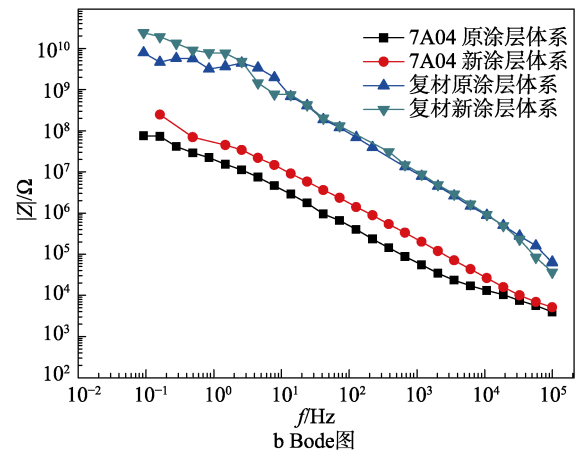
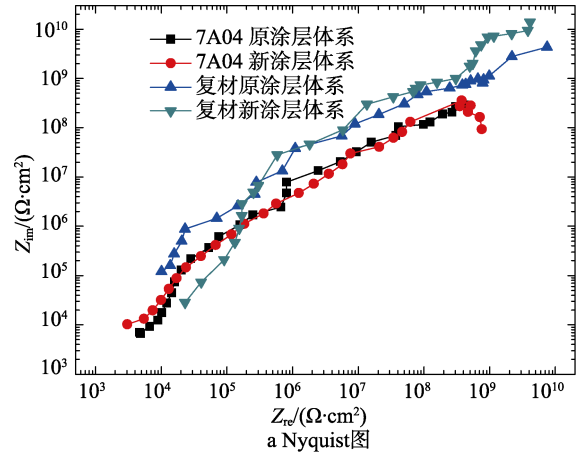


图 12 外场暴露 2 a 后涂层电化学阻抗  
Fig.12 Electrochemical impedance of coating after field exposure to 2 a

表 3 不同材料、不同涂层外场暴露前和暴露 2 a 后的阻抗 ( $|Z|_{f=0.1Hz}$ )

Tab.3 The impedance of different materials, different coatings before the field exposure and after exposure to 2 a ( $|Z|_{f=0.1Hz}$ )

基体材料	原涂层		新涂层		$\Omega$
	未暴露	暴露 2 a	未暴露	暴露 2 a	
7A04-T6	$3.3 \times 10^8$	$9.8 \times 10^7$	$4.2 \times 10^8$	$2.9 \times 10^8$	
复合材料	$1.4 \times 10^{10}$	$7.1 \times 10^9$	$2.8 \times 10^{10}$	$2.2 \times 10^{10}$	

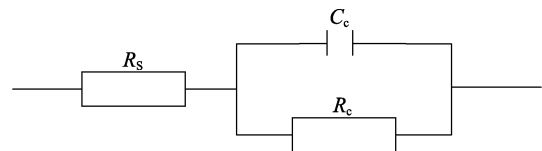


图 13 拟合电路  
Fig.13 Fitting circuit

介质的侵蚀。

对比表 3 可以看到,不同基体材料、不同涂层体系暴露前后的阻抗均较高,达到  $9.8 \times 10^7 \Omega$  以上,但是下降程度不同。对于铝合金,原涂层体系暴露 2 a 后,阻抗值下降了 70.3%,新涂层只下降了 30.95%;对于复合材料,原涂层体系暴露 2a 后阻抗值下降了

49.28%, 新涂层体系只下降了 21.42%。说明对于铝合金和复合材料, 新涂层的防护性均优于原涂层。在复合材料上, 未暴露时新涂层的阻抗值比铝合金高 2 个数量级; 暴露 2 a 后, 复合材料阻抗值仍比铝合金高 2 个数量级。暴露 2 a 后, 复合材料上原涂层的阻抗值只比在铝合金上高 1 个数量级。由此可见, 新涂层对复合材料的防护性优于对铝合金。

## 2.5 讨论

有机涂层喷涂在材料表面之后, 结构较为完整时, 能隔离基体与水、氧气及腐蚀介质 ( $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等) 等因素的联合作用, 达到防止基体腐蚀的目的。暴露在自然环境中, 有机涂层结构会慢慢变化, 最终导致失去防护效果。首先在紫外光、氧气和水分的作下, 涂层内的高分子链节逐渐断裂。此时涂层内孔隙率较小, 未形成腐蚀性离子通往基体材料的通道, 涂层能有效地隔离水及腐蚀性介质, 对基体还有较好的保护作用, 但是防护性逐渐降低。随着光氧化反应的发生, 涂层内产生了明显的高分子链节断裂, 涂层内的孔隙率增加, 逐渐形成了腐蚀性离子通往基体材料的通道, 水及腐蚀介质能通过微孔到达基体材料表面。一方面基体材料接触腐蚀介质发生腐蚀损伤, 另一方面腐蚀产物在基体与涂层界面生成, 造成涂层的鼓泡、破裂、脱落等。涂层基本失去了对基底的保护作用<sup>[16-18]</sup>。有研究表明, 当涂层阻抗在  $10^8 \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$  时, 有机涂层具有很好的防腐蚀性能; 涂层阻抗在  $10^7 \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$  时, 涂层的防腐蚀能力下降; 当涂层阻抗降低到  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$  时, 涂层对水等腐蚀介质的阻挡能力已经很低, 在涂层/金属基体界面有可能发生电化学腐蚀反应<sup>[19]</sup>。

在文中的试验中, 涂层失效还处在初级阶段。从电化学阻抗分析中可以看出, 外场暴露 2 a 后, 阻抗只有一个半径很大的容抗弧, 说明涂层的结构基本保持完整, 未发生明显变化。涂层只有部分高分子链节断裂, 并未形成腐蚀性离子通往基体材料的通道, 涂层表面虽然有轻微变色、失光, 阻抗值逐渐下降, 但仍具有较好的防护性。原涂层体系性能劣化速度较快, 阻抗下降较多, 经历 2 a 暴露后, 已经下降了 50% 以上, 达到  $10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$  范围内, 涂层防护能力逐步丧失, 可见原涂层失效时间较短。新涂层体系阻抗值下降较慢, 经过 2 a 暴露后, 只下降了 20%~30% 左右, 仍远高于  $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 可见新涂层对基体的防护时间更长。

## 4 结论

1) 铝合金经外场露暴露试验后, 原涂层发生轻微粉化、变色, 光泽度下降 54.5%, 色差增大到 9.1; 新涂层表面无明显变化, 光泽度下降 23.9%, 色差只增大到 2.1。铝合金表面新涂层的性能劣化速度较原

涂层更慢, 新涂层防护性更好。

2) 复合材料经外场露暴露试验后, 原涂层粉化程度随着时间的延长而增大, 光泽度下降 31%, 色差增大到 6.1; 新涂层在暴露期间表面无明显变化, 光泽度下降 11.4%, 色差只增大到 2.1。复合材料表面新涂层的性能退化速率更慢, 新涂层防护性更好。

3) 原/新涂层暴露前后电化学均表现为一个高阻抗的单容抗弧, 反应以涂层高分子链节断裂及轻微的腐蚀过程为主。暴露 2a 后, 铝合金、复合材料表面新涂层阻抗远大于原涂层。新涂层的耐蚀性优于原涂层, 对铝合金和复合材料的防护性能更好。

4) 外场暴露 2a 后, 复合材料表面新涂层的阻抗比铝合金高 2 个数量级。新涂层对复合材料的防护较优于铝合金。

## 参考文献:

- [1] 刘学君, 杨晓华, 辛志东, 等. LY12CZ 铝合金飞机内外部结构涂层日历有效性试验研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(5): 42-47.  
LIU Xue-jun, YANG Xiao-hua, XIN Zhi-dong, et al. Study of Calendar Validity of LY12CZ Aluminum Alloy Aircraft Structure Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(5): 42-47.
- [2] DAN ZH, MUTO I, HARA N. Effects of Environmental Factors on Atmospheric Corrosion of Aluminium and Its Alloys under Constant Dew Point Conditions[J]. Corrosion Science, 2012, 57(1): 22-29.
- [3] BARTER S A, MOLENT L. Fatigue Cracking from a Corrosion Pit in an Aircraft Bulkhead[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 39(1): 155-163.
- [4] 房振乾, 陈群志, 董兵, 等. 飞机结构表面涂层体系改进研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5): 102-107.  
FANG Zhen-qian, CHEN Qun-zhi, DONG Bing, et al. Improvement of Aircraft Structure Surface Coating System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 102-107.
- [5] 张勇, 丁文勇, 陈跃良, 等. 有机涂层户外暴晒与加速试验对比研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 14-17.  
ZHANG Yong, DING Wen-yong, CHEN Yue-liang, et al. Comparison Study on Outdoor Exposure and Accelerated Tests of Organic Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 14-17.
- [6] 唐扬刚, 贺小帆, 刘文珽, 等. 飞机连接结构防护涂层老化损伤量化评估方法[J]. 航空学报, 2017, 38(1): 45-52.  
TANG Yang-gang, HE Xiao-fan, LIU Wenting. Quantitative Method for Evaluating Aging Damage of protective Coatings of Aircraft Joint Structures[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2017, 38(1): 45-52.
- [7] 周学杰, 萧或星, 张三平, 等. 长效防腐蚀涂层体系热带海水环境中 22 年的腐蚀行为[J]. 材料保护, 2009,

- 42(3): 23-26.  
ZHOU Xue-jie, XIAO Huo-xing, ZHANG San-ping, et al. Corrosion Behavior of Long-Lasting Anticorrosion Coating Systems in Tropical Seawater Environment[J]. *Materials Protection*, 2009, 42(3): 23-26.
- [8] 骆晨, 蔡健平, 陈亚争, 等. 外加应变对航空有机涂层防护性能的影响[J]. *材料工程*, 2014, 5(1): 1-6.  
LUO Chen, CAI Jian-ping, CHEN Ya-zheng, et al. Effect of Applied Strain on Protective Properties of Aviation Organic Coatings[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2014, 5(1): 1-6.
- [9] 殷建新, 宋智桃. 飞机结构腐蚀与使用寿命研究[J]. *海军航空工程学院学报*, 2005, 20(6): 623-626.  
YIN Jian-xin, SONG Zhi-tao. Research on an Aircraft Structure Corruption and Service Life[J]. *Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute*, 2005, 20(6): 623-626.
- [10] 穆志韬, 段成美. 环境腐蚀对 LC4CZ 铝合金结构疲劳寿命的影响分析[J]. *海军航空工程学院学报*, 2003, 18(3): 359-362.  
MU Zhi-tao, DUAN Cheng-mei. Analysis of Effect of Corrosive Environment on the Fatigue Life of LC4CZ Aluminum Alloy[J]. *Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute*, 2003, 18(3): 359-362.
- [11] 陈跃良, 杨晓华. LY12CZ 铝合金力学性能随日历腐蚀环境变化的研究[J]. *海军航空工程学院学报*, 2002, 17(4): 447-479.  
CHEN Yue-liang, YANG Xiao-hua. Research on the Change of the Mechanical Performance of LY12CZ Aluminum Alloy with Calendar Corrosion Environment[J]. *Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute*, 2002, 17(4): 447-479.
- [12] 刘四平, 黄立恒, 唐雨. 直升机机载产品环境试验考核结果浅析[J]. *环境技术*, 2019, 37(5): 29-33.  
LIU Si-ping, HUANG Li-heng, TANG Yu. A Brief Analysis on the Results of Environmental Test of Helicopter Airborne Products[J]. *Environmental Technology*, 2019, 37(5): 29-33.
- [13] 曹真, 崔腾飞, 彭望舒, 等. 直升机复合材料有机涂层加速腐蚀试验考核与评价[J]. *环境技术*, 2019, 37(3): 134-140.  
CAO Zhen, CUI Teng-fei, PENG Wang-shu, et al. Corrosion Test and Analysis of Organic Coating for Helicopter Composite Parts[J]. *Environmental Technology*, 2019, 37(3): 134-140.
- [14] 孙志华, 章妮, 蔡健平, 等. 航空铝合金涂层体系加速老化试验前后电化学阻抗变化[J]. *航空学报*, 2008, 29(3): 746-751.  
SUN Zhi-hua, ZHANG Ni, CAI Jian-ping, et al. Electrochemical Impedance Varieties of Zinc Yellow Polypropylene Coated Aluminum Alloy Used in Aircraft During the Accelerated Degradation Test[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2008, 29(3): 746-751.
- [15] BIERWAGEN G, TALLMAN D, HE J P, et al. EIS Studies of Coated Metals in Accelerated Exposure[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2003, 46(2): 148-157.
- [16] 方华, 彭立涛, 华大力. 金属涂层与有机涂层在 5%NaCl 溶液中的腐蚀特征[J]. *材料保护*, 2010, 43(7): 55-60.  
FANG Hua, PENG Li-tao, HUA Da-li. Corrosion Behavior of Metallic Coatings and Organic Coatings in 5% NaCl Solution[J]. *Materials Protection*, 2010, 43(7): 55-60.
- [17] MURRAY N. Electrochemical Test Methods for Evaluating Organic Coatings on Metals[J]. *Progress in Organic Coating*, 1997, 30: 375-391.
- [18] 杨丽霞, 李晓刚, 张三平. 丙烯酸聚氨酯涂层在我国典型大气环境下的老化历程[J]. *环境技术*, 2006, 12(6): 19-22.  
YANG Li-xia, LI Xiao-gang, ZHANG San-ping. Aging Course of Acrylic Polyurethane Coating Exposed in Representative Atmosphere of Our Country[J]. *Environmental Technology*, 2006, 12(6): 19-22.
- [19] SCANTLEBURY J D, GALIC K. The Application of AC Impedance to Study the Performance of Lacquered Aluminum Specimens in Acetic Acid Solution[J]. *Progress in Organic Coatings*, 1997, 31(3): 201-207.