

# SEBF/SLF 重腐蚀防护涂层应用于 典型飞机结构中防腐性能综合评定

陈群志<sup>1,2</sup> 孙祚东<sup>3</sup> 陆维忠<sup>1</sup> 韩恩厚<sup>1</sup> 常铁军<sup>3</sup> 李京<sup>1</sup>

(1. 中国科学院金属研究所 沈阳 110016; 2. 北京航空工程技术研究中心 北京 100076; 3. 哈尔滨工程大学 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对典型飞机结构的局部腐蚀环境开展了加速腐蚀环境谱及加速腐蚀试验方法研究, 为了综合评定 SEBF/SLF 重腐蚀防护涂层涂装在典型飞机结构中的防腐性能, 对该涂层与现役飞机典型涂层进行了对比试验. 结果表明, 与现役飞机典型涂层相比, SEBF/SLF 重腐蚀防护涂层的抗环境腐蚀性有明显改进.

**关键词:** 飞机结构 SEBF/SLF 重腐蚀防护涂层 腐蚀环境谱 加速腐蚀试验

**中图分类号:** TG174.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-4537(2005)06-0365-04

## 1 前言

涂层对抵抗环境的腐蚀非常重要, 飞机结构因腐蚀损伤所造成的失效或事故, 主要是由涂层防腐功能失效引起的. 目前沿海和内陆湿热地区服役的主要机种都存在不同程度的涂层老化失效及由此引起的基体结构腐蚀问题, 严重地影响着飞机的正常使用与合理维修. 现役飞机的防腐技术比较落后, 尤其是结构防腐涂层抗环境腐蚀(或老化)品质较差, 使用寿命较短, 是导致飞机结构产生严重腐蚀的主要原因之一<sup>[1-5]</sup>. 在目前条件下提高防腐涂层的使用寿命和抗环境腐蚀品质, 是抑制或延缓飞机结构发生重大腐蚀故障最为有效的措施.

现役飞机铝合金结构(尤其是高强度铝合金结构)对环境腐蚀比较敏感, 与其它材料的结构相比, 铝合金结构的腐蚀情况比较严重, 腐蚀严重的区域主要集中在一些半封闭式或密封较差的结构部位<sup>[5]</sup>. 由于含氯离子和硫化物等腐蚀介质的潮湿空气或雨水很容易渗入到这些结构内部, 但往往因不通风或排水不畅, 易使水分或潮气等腐蚀介质长时间滞留, 导致局部环境比外界大气环境更加恶劣<sup>[5]</sup>. 但目前飞机常用的典型涂层难以抵抗硫化物和氯化物含量较高的湿热环境的腐蚀作用, 因而防腐效果较差, 涂层失效后基体金属结构将很快出现严重的腐蚀. 为此, 本文首次提出了将 SEBF/SLF 重腐蚀防护涂层应用于局部环境恶劣的飞机典型结

构的想法, 并对涂装该涂层的典型模拟件的防腐性能进行综合评定, 以确定能否提高飞机结构的抗腐蚀品质, 从而为将其应用于实际飞机结构中提供依据.

SEBF/SLF 重腐蚀防护涂料是由中科院金属所研发的一种具有优良性能的防腐涂料, 主要体现在涂层本身良好的力学性能和化学稳定性, 与金属基体具有良好的结合力和抗渗透能力, 在恶劣的腐蚀环境下具有很好的防腐性能.

## 2 试验方法

### 2.1 试验件

试件基体材料选用飞机结构常用的两种典型铝合金板材 LY12CZ 和 LC4CS, 试件尺寸为 150 mm × 75 mm. 涂层体系选用 2 种: 现役飞机内部结构常用的典型涂层体系, 即阳极化 + H06-2 锌黄底漆(与实际结构涂装工艺相同, 以下简称 H06-2 涂层); 阳极化 + SEBF/SLF 重防腐涂层(以下简称 SEBF/SLF 涂层), 涂层厚度分别为 100 μm、150 μm 和 200 μm.

### 2.2 加速腐蚀环境谱及试验方法

实际服役环境与载荷对涂层的作用是长期、缓慢、十分复杂的过程, 军用飞机的日历年限一般都超过 20 年, 大修的周期在 5~10 年以上, 若进行与飞机日历寿命等时间的环境模拟试验, 所需时间、经费和人力都难以实现. 可见, 采用实验室条件下加速环境试验方法及对应的分析是十分必要. 国内外的大量研究表明<sup>[1,5]</sup>, 这是有效可行的技术途径. 但加速环境试验必须能够再现飞机在服役过程中出现的主要损伤形式及特征, 需要考虑的主要环境因素, 如温度、湿度、盐雾、酸雨等.

定稿日期: 2005-04-24

基金项目: 国家重点基础研究专项经费资助(G19990650)

作者简介: 陈群志, 1963 年生, 男, 博士, 高级工程师, 主要从事飞机结构寿命及腐蚀防护研究

参照国内外同类试验方法及涂层评估试验标准<sup>[1,2]</sup>,并在加速环境谱及加速试验方法进行探索性试验的基础上,制定了如图 1 所示的加速环境谱.

湿热暴露试验采用 H1200C 温湿交变试验箱,其温度误差  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度误差  $\pm 3\%$ .

盐雾腐蚀试验采用 DCTC1200P 盐雾试验箱,其温度误差  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .盐雾溶液的配制:先用蒸馏水配置浓度为  $50\text{ g/L} \pm 5\text{ g/L}$  NaCl 溶液,然后加入  $\text{CuCl}_2$ ,使其浓度为  $0.26\text{ g/L} \pm 0.02\text{ g/L}$ ,最后加入适量的醋酸,使  $\text{pH} = 3.1 \sim 3.3$ .溶液  $\text{pH}$  值可用醋酸和 NaOH 调整.

周期浸润试验采用 ZJF-75 周期浸润腐蚀试验箱,其温度误差  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度误差  $5\%$ .浸润周期为  $30\text{ min}$ ,其中试件浸没在溶液中  $7.5\text{ min}$ ,试件在溶液外用远红外灯烘烤  $22.5\text{ min}$ .周期浸润试验

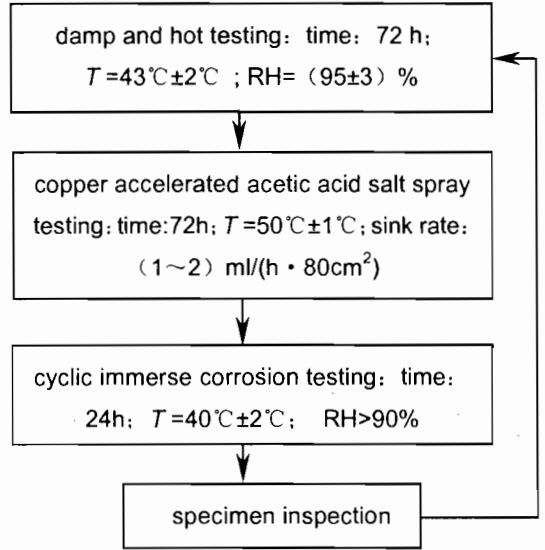


Fig. 1 Accelerated corrosion environment spectrum

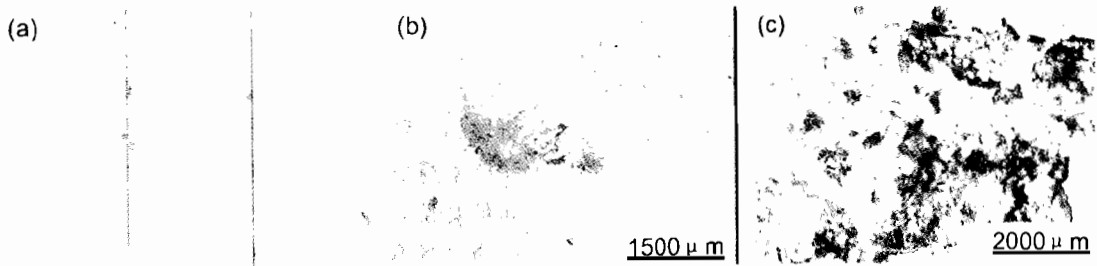


Fig. 2 Specimen coated H06-2 after 6 testing periods

(a) microscopic picture, (b) coating local swelling, (c) alloy corrosion on coating

溶液采用改进后的 EXCO 溶液: NaCl  $234\text{ g/L}$ ,  $\text{KNO}_3\ 50\text{ g/L}$ , 98% 的浓  $\text{H}_2\text{SO}_4\ 3\text{ ml/L}$ , 溶液  $\text{pH} = 0.4$ .

试件腐蚀损伤检测采用 SZX12 显微镜及 MCS-7200 图像分析系统.

### 3 结果与分析

#### 3.1 H06-2 涂层试件的腐蚀情况

经过 6 个周期(共 42 d)加速环境试验后,涂层表面光泽度明显降低并出现粉化现象.6 件 H06-2 涂层试件(试验区总面积  $450\text{ cm}^2$ )共观察到 126 个腐蚀点,包括起泡、涂层剥落、金属基体中出现的碟型腐蚀坑(图 2).用 MCS-7200 图像分析系统测得最大腐蚀坑面积为  $28.7\text{ mm}^2$ ,金属基体腐蚀深度达到  $2.2\text{ mm}$ ,呈现出明显的剥落腐蚀特征.主要是因为腐蚀性离子透过涂层到达基体与涂层的界面,使铝合金基体发生了腐蚀(图 3),生成的腐蚀产物体积膨胀导致涂层鼓起,腐蚀严重处涂层破裂,同时向

横向、纵深发展,逐渐形成碟型腐蚀坑.

将试件与飞机典型内部结构构件进行对比观察表明,H06-2 涂层在加速环境试验后出现的老化失效现象与现役飞机内部结构涂层的失效特征基本一致,涂层失效部位下面的金属基体也呈现出与实际机体结构相同的剥落腐蚀特征.这说明图 1 所示的环境谱可较好地评定飞机典型内部结构防护涂层的

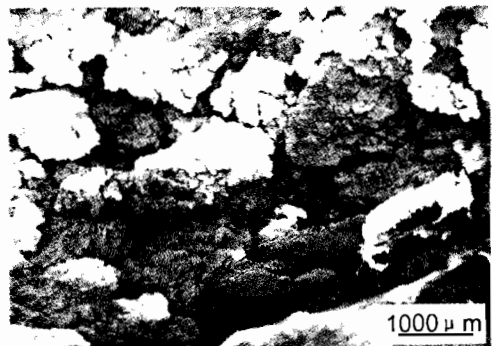


Fig. 3 Aluminium alloy LC4 corroded locally SEM morphology

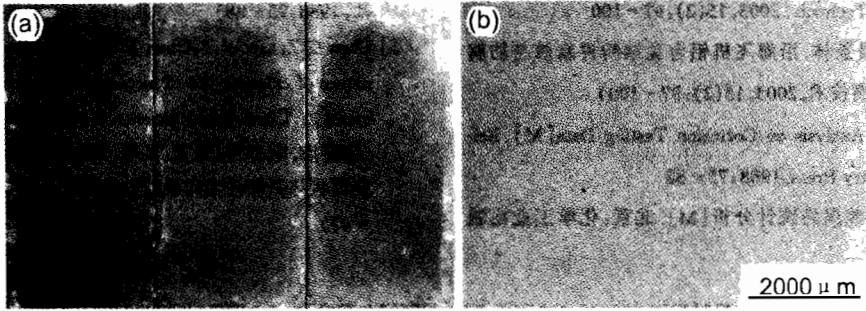


Fig.4 Specimen coated SEBF/SLF after 6 testing periods  
(a)microscopic picture, (b)micrograph

抗腐蚀性能.

### 3.2 SEBF/SLF 涂层试件的腐蚀状况

经过 6 个周期加速环境试验后,涂层表面光泽度略有降低.未发现 SEBF/SLF 涂层试件有明显的失效现象(图 4),可以看出该涂层具有优良的防腐性能.

### 3.3 腐蚀点密度

**3.3.1 腐蚀点密度的分析方法** 试件表面出现腐蚀点(含起泡点)是涂层体系薄弱环节和腐蚀敏感区.因此,腐蚀点的密度是定量评定涂层抗腐蚀性能的重要指标.

若用  $K$  表示试件上腐蚀点数的观察值,用  $X$  表示腐蚀点数的真实值,研究表明<sup>[4]</sup>,当  $K$  较小时,  $X$  服从 Poisson 分布;当  $K$  较大时,  $X$  服从正态分布.

若用  $X_1$  和  $X_2$  分别表示腐蚀点数置信下限和上限,  $\alpha$  表示显著水准,当  $K=0$  时,依据 Poisson 分布规律可推导出:

$$X_1 = 0 \quad (1)$$

$$X_2 = -2.3 \lg \alpha \quad (2)$$

当  $K$  较大时,依据正态分布规律可推导出

$$X_1 = K + 1.5 + u_\alpha - \sqrt{K} \quad (3)$$

$$X_2 = K + 1.5 + u_\alpha + \sqrt{K} \quad (4)$$

式中  $u_\alpha$  可查正态分布表得到.

若用  $\bar{n}$  表示腐蚀点的平均密度,  $A_s$  表示该组试件的总面积,则  $\bar{n}$  的置信范围为:

$$\frac{X_1}{A_s} \leq \bar{n} \leq \frac{X_2}{A_s} \quad (5)$$

**3.3.2 SEBF/SLF 涂层试件的腐蚀点密度** 对于 SEBF/SLF 涂层试件,经过 6 个试验周期后还没有观测到腐蚀点,即  $K=0$ .依据式(1)、式(2)、式(5),取  $\alpha=0.05$ (即 95%的置信度).可计算出腐蚀点平均密度置信范围为:

$$0 \leq \bar{n}_1 \leq 30(\text{个}/\text{m}^2)$$

**3.3.3 H06-2 涂层试件的腐蚀点密度** 对于

H06-2 涂层试件,经过 6 个试验周期后观测到 126 腐蚀点,即  $K=126$ .依据式(3)、式(4)、式(5),取  $\alpha=0.05$ (即 95%的置信度).可计算出腐蚀点平均密度置信范围为:

$$2611 \leq \bar{n}_2 \leq 3055(\text{个}/\text{m}^2)$$

由此可见,H06-2 涂层试件的腐蚀点密度远大于 SEBF/SLF 涂层试件的腐蚀点密度.

## 4 结论

(1)H06-2 涂层试件出现的涂层鼓泡、剥落、粉化等老化失效现象与现役飞机内部结构涂层的失效特征基本一致,涂层失效部位下面的金属基体的腐蚀坑呈现出剥落腐蚀特征,与实际机体结构的腐蚀特征相同.

(2)在相同的腐蚀环境下,H06-2 涂层试件腐蚀点的平均密度远大于 SEBF/SLF 涂层试件,这表明 SEBF/SLF 涂层的抗腐蚀品质明显优于 H06-2 涂层.

(3)SEBF/SLF 涂层涂装在局部环境恶劣的飞机典型结构后,能够明显提高飞机结构的抗腐蚀性能.本文研究结果为 SEBF/SLF 应用于实际飞机结构中提供了重要依据.

## 参考文献:

- [1] Chen Q Z. A technique system research on the calendar life of aircraft structure under corrosive environments[D]. Beijing: Beijing Univ. Aeron. Astron., 1999:10-25  
(陈群志.腐蚀环境下飞机结构日历寿命技术体系研究[D].北京:北京航空航天大学,1999:10-25)
- [2] LI X H. Studies of nano-composite coatings system to be applied on typical military aircraft structures for corrosion protection[J]. Haerbin: Haerbin University of Engineering, 2003:11-35  
(李祥海.纳米复合涂层在军用飞机结构防腐中的应用研究[J].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2003:11-35)
- [3] Hu F Y, Wang M C, Wen J L. Corrosion and protection of aluminum alloy applied on aircraft structure serving along the coast[J].

- Corros. Sci. Prot. Technol., 2003, 15(2): 97 - 100  
(胡芳友, 王茂才, 温景林. 沿海飞机铝合金结构件腐蚀与防腐[J]. 腐蚀科学与防腐技术, 2003, 15(2): 97 - 100)
- [4] Cao C N. Statistics Analysis on Corrosion Testing Data[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1988: 75 - 88  
(曹楚南. 腐蚀试验数据的统计分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988: 75 - 88)
- [5] Chen Q Z, Liu W T, Chen Z W, et al. Current status and key techniques of calendar life of aircraft structure under corrosive environment[J]. China Safety Science Journal, 2000, 10(3): 43 - 47  
(陈群志, 陈志伟, 刘文珽等. 腐蚀环境下飞机结构日历寿命研究现状与关键技术问题[J]. 中国安全科学学报, 2000, 10(3): 43 - 47)

## COMPREHENSIVE EVALUATION FOR ANTICORROSIVE PROPERTIES OF HEAVY - DUTY COATING SEBF/SLF APPLIED TO TYPICAL AIRCRAFT STRUCTURES

CHEN Qunzhi<sup>1,2</sup>, SUN Zuodong<sup>3</sup>, LU Weizhong<sup>1</sup>, HAN Enhou<sup>1</sup>, CHANG Tiejun<sup>3</sup>, LI Jing<sup>1</sup>

(1. Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

2. Beijing Aeronautical Research Center of Engineering & Technology, Beijing 100076;

3. Haerbin University of Engineering, Haerbin 150001)

**Abstract:** The accelerated corrosive environment spectrum and the accelerated corrosion test methods were studied for evaluation the local environmental corrosion in the typical aircraft structures. The comparative tests for the heavy - duty coating SEBF/SLF and the ordinary coating on the active service aircraft structures were carried out. The results indicated that the anticorrosive properties of the heavy - duty coating SEBF/SLF are much better than the ordinary coating on the active service aircraft structures.

**Key words:** aircraft structures, heavy - duty coating SEBF/SLF, corrosion environment spectrum, accelerated corrosion test