专题——飞机结构腐蚀修理与防腐改进技术研究

直升机旋翼桨叶有机涂层防护性能在户内加速 试验中的变化

骆晨¹,李宗原²,孙志华¹,汤智慧¹,李健²

(1.中航工业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; 2. 总参陆航研究所,北京 101121)

摘要:目的 考核评价高原环境下服役的直升机旋翼桨叶典型结构及其防护体系的耐腐蚀性能。 方法 利用建立的模拟高原环境加速试验谱,再现直升机旋翼桨叶结构防护体系实际服役过程中 出现的腐蚀损伤,采取电化学阻抗谱测试研究涂层阻抗的变化。结果 经历8个周期的户内加速试 验后,新修桨叶试验件表面有机涂层Bode 曲线呈现小幅下降,即有机涂层防护性能下降;报废桨叶 试验件表面有机涂层的特定频率电化学阻抗模值与原始情况相比仅下降了不到1个数量级。结 论 报废桨叶试验件表面有机涂层电化学阻抗模值曲线在8个周期后仍然小幅高于未经历户内加 速试验的新修桨叶试验件。

关键词:直升机;有机涂层;防护性能;加速试验 DOI:10.7643/issn.1672-9242.2016.01.001 中图分类号:TJ07;TG174 文献标识码:A 文章编号:1672-9242(2016)01-0001-07

Changes of Protective Properties of Organic Coatings on Helicopter Rotor Blade during Indoor Accelerated Testing

LUO Chen¹, LI Zong-yuan², SUN Zhi-hua¹, TANG Zhi-hui¹, LI Jian²

(1. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material,

AVIC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. General Staff Department Army Aviation Institute, Beijing 101121, China)

ABSTRACT: Objective To evaluate the anti-corrosion properties of typical helicopter rotor blade structure and its protection system that services in plateau environment. **Methods** Accelerated testing spectra for simulation of plateau environment was employed to reproduce the corrosion damage in service condition. Electrochemical impedance

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51201157);国防科技工业技术基础科研项目(H052013A003)

• 1 •

收稿日期: 2015-09-15;修订日期: 2015-10-04

Received: 2015-09-15; Revised: 2015-10-04

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51201157) and National Defense Technology Foundation Project (H052013A003)

作者简介: 骆晨(1984—),男,北京人,博士,高级工程师,主要从事环境试验与观测,表面防护等方面的研究。

Biography: LUO Chen (1984—), Male, from Beijing, Ph. D., Senior engineer, Research focus: environmental testing and observation, and surface protection.

measurement was used to study the degradation of impedance of organic coatings. **Results** After 8 cycles of indoor accelerated testing, the EIS Bode diagram of the organic coatings on the repaired blade specimen decreased. The characteristic frequency electrochemical impedance modulus of discarded blade specimen was reduced by less than 1 magnitude compared to that of original specimen. **Conclusion** After 8 cycles, electrochemical impedance modulus diagram of the organic coatings on discarded blade specimen was still a little higher than that of repaired blade specimen. **KEY WORDS**: helicopter; organic coatings; protective properties; accelerated testing

随着我国某型直升机服役日历年限和大修次数 的增加,其结构腐蚀发展呈现显著加快的趋势^[1-2],而 大修中所采用的腐蚀修理技术和修理质量在很大程 度上决定了直升机结构腐蚀损伤能否得到有效控制。

目前典型结构防护体系腐蚀损伤过程的外场跟 踪实测在工程上很难实现,通过合理的准则和方法 建立加速模拟环境试验方法是考核评价典型结构及 其防护体系耐腐蚀性能最为可行的技术四一。青藏高 原气候环境特殊,该环境下服役的直升机关键部件 的腐蚀损伤是当前关注的焦点^[10-11]。文中利用前期 建立的高原环境加速试验环境谱,针对直升机旋翼 桨叶结构防护体系,再现其实际服役过程中出现的 腐蚀损伤形式与特征,同时显著缩短实际使用环境 下腐蚀历程的时间。另外,采取电化学阻抗谱(EIS) 测试技术,通过研究涂层阻抗的变化来评价其防护 性能,这也是目前应用最广泛的涂层防护性能评价 技术之一。由于电化学阻抗只是向被测体系加一个 小振幅的正弦交变信号,所以对体系的破坏作用小, 可以对样品进行长时间的测试而不改变样品的性 质。近年来,越来越多的研究^[12-17]把特定频率的阻抗 模值作为评价涂层性能的指标,为测试和定量评价 涂层的防护性能提供了判据。

1 实验

1.1 试验件设计、加工和准备

旋翼桨叶外观如图1所示,主要由铝合金大梁、钢 制梳形接头和后段件组成。大梁是旋翼主要受力件, 采用ABT-1铝合金压制加工成封闭空心整体件。梳 形接头通过MΠΦ-1胶和21个螺栓以及大梁形成一 体,大梁后缘装有21个带蜂窝结构的后段件。实验中 共使用2类试验件,其中,"新修桨叶试验件"采用未使 用的桨叶后段件,沿桨叶长度方向截取130 mm、宽度 方向截取140 mm(从叶尖开始)的试验段,并按实际修 理工艺进行喷漆;"报废桨叶试验件"采用经过多年服 役已经报废的旋翼桨叶,沿桨叶长度方向截取140 mm 长的试验段。





图1 旋翼桨叶

b 报废桨叶

Fig.1 Rotor blade

所有试验件在试验前均彻底清洗,以除掉油污、 尘垢、油脂等。清洗后的试件用冷风干燥后放在干燥 器皿中短期保存,等待试验。用放大镜对清洗后的试 件进行外观检查,新制备的防护层不允许有微裂纹和 其他损伤。

1.2 模拟高原环境户内加速试验

确定高原环境桨叶部位加速试验环境谱见表1, 作用1个周期约相当于外场实际暴露1年。

1.3 腐蚀评价

 1)外观检查。用放大镜对试验件进行外观检查, 并采用佳能S30数码相机在标准光源下进行拍照,记 录宏观腐蚀现象和试验件表面的微观腐蚀形貌。

2) 电化学阻抗谱测试。在室温下利用EIS 对试 验件表面有机涂层的防护性能定期进行分析。在试 验件上施加PVC管,仅留表面试验区域暴露于环境 中,所有测试中暴露面积均为1 cm²。采用三电极体系 在质量分数为3.5%的中性NaCl溶液中进行EIS测试,

· 2 ·

• 3 •

表1 模拟高原环境户内加速试验谱

Table 1 Indoor accelerated testing spectra for simulation of plateau environment

步骤	试验	条件	时间/h
1	温度交变	最高温度 <i>t</i> =35 ℃,保温2h,	
		最低温度 t=−20 °C,保温2 h	-
2	紫外辐照	辐照强度 Q=(60±10)W/m ² ,	192
		温度 <i>t</i> =(55 ± 10)℃	
3		温度 t=40 ℃,相对湿度 RH 为90%,	
	周期浸润	溶液:0.05% NaCl+0.5% H ₂ O ₂ ,	6
		浸润周期:10 min浸润,50 min烘烤	
	同别反润	溶液:0.05% NaCl+0.5% H ₂ O ₂ , 浸润周期:10 min浸润,50 min烘烤	0

参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为铂电极,整个 试验装置放置在法拉第笼中。测试前试验区域在溶 液中浸泡20min,待自腐蚀电位稳定。每种类型试验 件有3个平行试样,以验证数据的可重复性。采用 AMETEK Princeton Applied Research公司的273A 恒电 位仪和5210锁相放大器进行有机涂层的电化学阻抗 谱测试。交流频率以10mV扰动幅度的正弦波激励信 号在10⁻² Hz和10⁵ Hz之间扫描。测试软件为 Powersuite 电化学测试系统。

2 实验结果与讨论

2.1 新修桨叶试验件

新修桨叶试验件在经历1~8个周期户内加速试验 后上表面(即受到紫外辐照的一侧)的照片如图2所 示。可以发现,试验件的有机涂层表面形貌在8个户 内加速试验周期后并未发生明显变化,也不存在粉 化、开裂、起泡、剥落或者泛金的现象。新修桨叶试验 件表面在8个周期加速试验后的扫描电镜照片如图3 所示,与后文中讨论的报废桨叶试验件表面防护涂层 相比,新修桨叶试验件氧化膜厚度较小,另外存在底 漆涂层厚度不均匀的现象,但经过8个周期户内加速 试验后尚未出现空洞或裂纹。

新修桨叶试验件表面在经历1~8个周期户内加速 试验后的电化学阻抗谱Bode 图如图4所示,原始和2, 4,6,8周期后的特定频率电化学阻抗模值IZI_{F01Ha}分别 为4.9×10⁸,2.6×10⁹,1.5×10⁹,2.3×10⁹,3.9×10⁸Ω。 由图4可见,在6个户内加速试验周期后,试验件的电 化学阻抗模值未发生显著下降,各户内加速试验周期 后的模值曲线与未经历户内加速试验情况下的模值 曲线基本重合。这与试验件有机涂层表面形貌在户 内加速试验过程中未发生明显变化的结果一致。经



g 7周期

h 8周期

图2 新修桨叶试验件表面在1~8个周期加速试验后的照片

Fig.2 The top surface photos of the repaired blade specimen after 1 to 8 cycles of accelerated testing

历8个周期的户内加速试验后,试验件表面有机涂层 Bode曲线呈现小幅下降,说明有机涂层经历加速试验 后防护性能下降,有机涂层内部实际上已经产生了微 小损伤,成为外界溶液可以渗透的通道。事实上,在 受到紫外线的作用时,有机涂层的树脂高分子链发生 光引发链增长、链终结等系列反应,最后分子链发生 断裂,生成亲水性基团。之后,有机涂层中分子链的





b 截面

- 图 3 新修桨叶试验件表面在 8 个周期加速试验后的扫描电镜 照片
- Fig.3 The SEM images of top surface of the repaired blade specimen after 8 cycles of accelerated testing



图4 新修桨叶试验件表面的电化学阻抗谱Bode图 Fig.4 EIS Bode diagram of the top surface of the repaired blade

降解产物如小分子醇、醚等挥发,亲水性氧化产物(如 羧酸)溶解于水中,离开有机涂层。因此,随着老化降 解,有机涂层内部孔隙率逐渐增加,有机涂层防护性 能逐渐退化。

2.2 报废桨叶试验件

specimen

报废桨叶试验件表面在1~8周期加速试验后的照 片如图5--7所示。随着加速试验的进行,试验件表面 的有机涂层逐渐失去光泽;经过6个周期的加速试验 后,开始出现轻微的粉化现象;经过8个周期的户内加 速试验后,尚未出现有机涂层起泡、剥落或者泛金的 现象。



图5 报废桨叶试验件前段部分表面在1~8个周期加速试验后 的照片

Fig.5 The top surface photos of the front end of discarded blade specimen after 1 to 8 cycles of accelerated testing

报废桨叶试验件前段部分表面同一局部区域在1 周期和8周期后的照片对比如图8所示。可见在加速 试验过程中,报废桨叶试验件的前段部分表面原有的 裂纹加深,如图8中细箭头所指示,同时出现更多新形 成的裂纹,如8图中加粗箭头所指示。这些更加细小的 裂纹由原有裂纹发展出来,而且这种裂纹有扩展连接 成网络的趋势。有机涂层表面裂纹长短不一,总体上 沿垂直或平行于桨叶长度分布方向,但是发展走向不 断发生微小变化。某课题组前期研究表明,外加拉应 变导致有机涂层防护性能下降,原因是拉应变超过涂



图 6 报废桨叶试验件中段部分表面在 1~8个周期加速试验后的照片 Fig.6 The top surface photos of the middle part of discarded blade specimen after 1 to 8 cycles of accelerated testing



图7 报废桨叶试验件后段部分表面在1~8个周期加速试验后的照片

Fig.7 The top surface photos of the back end of discarded blade specimen after 1 to 8 cycles of accelerated testing



图 8 报废桨叶试验件前段部分表面局部区域在1周期和8周期后的照片 Fig.8 Photos of the top surface of the front end of discarded blade specimen after 1 and 8 cycles of accelerated testing

层材料断裂强度,从而形成显微裂纹^[7-8]。报废桨叶试 验件在加速试验过程中虽然未受到外加拉应变,但前 段部分曲率变化大,表面涂层在施工固化过程中会产 生收缩内应力,表面在同时受到收缩内应力和紫外辐 照等环境因素的作用时产生裂纹,构成外界溶液进入 内部的通道。有机涂层的吸水率与空洞、裂纹等缺陷 的数量成正比,Cl⁻,O₂和H₂O通过孔隙进入涂层中,并 到达有机涂层/合金界面。

对比报废桨叶试验件后段部分表面在1周期和8 周期后的照片(如图9所示),后段件之间连接处的密封 材料开裂现象较未进行户内加速试验时的情况更加严 重,微裂纹和空洞非常明显。报废桨叶试验件表面3个 区域未经历户内加速试验时的电化学阻抗谱Bode图如 图10所示,报废桨叶试验件表面3个区域在经历8个周 期户内加速试验后的电化学阻抗谱 Bode 图如图 11 所 示,特定频率电化学阻抗模值|Zlf0.11+在表2中列出。可 以发现,报废桨叶试验件表面3个区域的模值曲线基本 重合,说明不同区域有机涂层的防护性能较为均匀。 在8个周期的户内加速试验后,报废桨叶试验件表面有 机涂层的电化学阻抗模值未发生显著下降,特定频率 电化学阻抗模值与原始情况相比,仅由5.4×10°Ω下 降到了 $3.1 \times 10^{\circ} \Omega$, $|Z|_{F0.1 Hz}$ 只下降了不到 1 个数量级, 这与试验件非密封结合部位的表面形貌在户内加速试 验过程中未发生明显变化的结果一致。报废桨叶试验 件后段部分表面的SEM图片如图12所示,其中横截面 的照片显示表面氧化膜、底漆涂层和面漆涂层厚度均 匀、完整,尚未出现空洞或裂纹。



b 8周期

- 图 9 报废桨叶试验件后段部分表面局部区域在1周期和8周 期后照片
- Fig.9 Photos of the top surface of the back end of discarded blade specimen after 1 and 8 cycles of accelerated testing

结合新修桨叶试验件表面在经历1~8周期户内加 速试验后的电化学阻抗谱 Bode 图一起进行分析,可以



图 10 报废桨叶试验件后段部分表面电化学阻抗谱 Bode 图 Fig.10 EIS Bode diagram of the top surface of the back end of discarded blade specimen



- 图 11 报废桨叶试验件后段部分表面 8 周期后的电化学阻抗谱 Bode 图
- Fig.11 EIS Bode diagram of the top surface of the back end of discarded blade specimen after 8 cycles of accelerated testing





图 12 报废桨叶试验件后段部分表面的扫描电镜照片

Fig.12 Top surface SEM images of the back end of discarded blade specimen

表2 报废桨叶试验件表面的特定频率电化学阻抗模值

 Table 2
 Characteristic frequency electrochemical impedance modulus of the top surface of the discarded blade specimen

加速试	$ Z _{f=0.1~\mathrm{Hz}}/\Omega$				
验周期	位置1	位置2	位置3	平均值	
原始	1.1×10^{10}	2.1×10^{9}	3.6×10^{9}	5.4×10^{9}	
8周期	1.6×10^{9}	2.2×10^{9}	5.4×10^{9}	3.1×10^{9}	

发现,未经历户内加速试验的新修桨叶试验件的电化 学阻抗模值曲线小幅低于经历了8个周期户内加速试 验的报废桨叶试验件,说明桨叶后段件部位实际修理 工艺所采用的国产有机涂层防护性能与原始有机涂 层相比存在一定差距。

3 结论

1) 经历1~8个周期模拟高原环境户内加速试验后, 新修桨叶试验件有机涂层表面形貌未发生明显变化。

2)前6个周期户内加速试验后,新修桨叶试验件 的电化学阻抗模值未发生显著下降;经历8个周期的 户内加速试验后,试验件表面有机涂层Bode曲线呈现 小幅下降,表明有机涂层防护性能下降。

3) 报废桨叶试验件表面有机涂层随加速试验的进行逐渐失去光泽,经过6个周期后开始出现粉化现象,前段部分表面原有的裂纹加深,同时出现更多新形成的裂纹且有扩展连接成网络的趋势,后段件之间连接处的密封材料开裂现象更加严重。

4) 在8个周期户内加速试验后,报废桨叶试验件 表面有机涂层的电化学阻抗模值未发生显著下降,特 定频率电化学阻抗模值IZI_{F0.1H2}与原始情况相比仅下降 了不到1个数量级,且模值曲线仍然小幅高于未经历 户内加速试验的新修桨叶试验件的模值曲线。

参考文献:

[1] 冯文春,陈日洋,陆建民.米-XX 直升机前缓冲支柱活动杆局部严重腐蚀问题分析[C]//第十六届全国直升机年会论文集.上海:中国航空学会,2000.

FENG Wen-chun, CHEN Ri-yang, LU Jian-min. Problem Analysis of Severe Localized Corrosion on Mi-XX Helicopter Piston Rod[C]// Proceedings of 16th National Helicopter Annual Conference. Shanghai; China Aviation Association, 2000.

[2] 魏荣俊,秦金柱,李洪德.米-XX 直升机延长首次翻修日历时限调研[C]//第十五届全国直升机年会论文集.洛阳:中国航空学会,1999.

WEI Rong-jun, QIN Jin-zhu, LI Hong-de. Investigation of

The First Repairing Calendar Life Elongation for Mi–XX Heli– copter[C]// Proceedings of 15th National Helicopter Annual Conference. Luoyang: China Aviation Association, 1999.

[3] 祝耀昌.环境适应性设计与高加速寿命试验[J]. 航空标准 化与质量,2002(1):37—42.

ZHU Yao-chang. Environmental Adaptability Design and Highly Accelerated Life Test[J]. Aviation Standardization and Quality, 2002(1):37-42.

[4] 谭晓明,穆志韬,张丹峰,等. 海军飞机结构当量加速腐蚀 试验研究[J]. 装备环境工程,2008,5(2):9—11.
TAN Xiao-ming, MU Zhi-tao, ZHANG Dan-feng, et al. Equipment Accelerated Corrosion Test Study of Navy Aircraft Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5 (2):9—11.

- [5] 蔡健平,孙志华,崔继红. 有机防护涂层综合加速试验老化 动力学模型的建立[J]. 材料保护,2012,45(2):8—10.
 CAI Jian-ping, SUN Zhi-hua, CUI Ji-hong. Kinetics Model of Comprehensive Accelerated Aging of Organic Protective Coatings[J]. Journal of Materials Protection,2012,45(2):8—10.
- [6] 蔡健平,刘明,安英辉. 铝合金防护涂层老化动力学研究
 [J]. 中国腐蚀与防护学报,2012,32(3):256—261.
 CAI Jian-ping, LIU Ming, AN Ying-hui. Degradation Kinetics of Protective Coating for Aluminum Alloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012, 32(3): 256—261.
- [7] 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—6.
 LUO Chen, CAI Jian-ping, CHEN Ya-zheng, et al. Effect of Applied Strain on the Protective Properties of Aviation Organic Coating[J]. Journal of Materials Engineering,2014(5):1—6.
- [8] 骆晨,蔡健平,董春蕾,等. 外加应变对航空有机涂层损伤规律的影响[J]. 北京科技大学学报,2014,36(5):656—668.
 LUO Chen, CAI Jian-ping, DONG Chun-lei, et al. Effect of Pre-strain on the Degradation Behaviour of Aviation Organic Coating[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2014,36(5):656—668.
- [9] 骆晨,蔡健平,许广兴,等. 航空有机涂层在户内加速试验
 与户外暴露中的损伤等效关系[J]. 航空学报,2014,35(6):
 1750—1758.

LUO Chen, CAI Jian-ping, XU Guang-xing, et al. Equivalent Degradation of Aviation Organic Coating during Indoor Accelerated Testing and Outdoor Exposure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(6): 1750—1758.

[10] 朱强,陈云翔,车飞,等. 高原地区太阳辐射对飞机维修保障的影响[J]. 电光与控制,2014,21(11):88—92.
ZHU Qiang, CHEN Yun-xiang, CHEN Fei, et al. Influence of Solar Radiation in Plateau Section on Aircraft Maintenance (下转第 38 页)

Corrosion Damage for 6A02 Aluminum Alloy Based Fractal Theory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9 (4):27-30.

- [7] LI Xu-dong, WANG Xi-shu, REN Huai-hui, et al. Effectof Prior Corrosion State on the Fatigue Small Cracking Behaviour of 6151 T6 Aluminum Alloy[J]. Corros Sci, 2012, 55(2): 26-33.
- [8] 李旭东,朱武峰,穆志韬,等. LD2 铝合金腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程,2013,10(1):8—12.
 LI Xu-dong, ZHU Wu-feng, MU Zhi-tao. Corrosion Behavior Investigation of LD2 Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering,2013,10(1):8—12.
- [9] 任克亮,吕国志,陈跃良.腐蚀结构损伤评估方法[J]. 机械 强度,2007,19(6):992—996.
 REN Ke-liang, LYU Zhi-guo, CHEN Yue-liang. Damge Assessment Technigues for Corroded Structures[J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 19(6):992—996.
- [10] WALDE K, HILLDERRY B M. Characterization of Pitting Damage and Prediction of Remaining Fatigue Life[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(6):106-118.
- [11] BRENCE J R, BROWN D E. Data Mining Corrosion from Eddy Current Mon-destructive Test[J]. Computers & Industrial Engineering, 2002, 43(4):821-840.

- [12] WANG Shou-yan, SONG Shi-zhe. Image Analysis of Atmospheric Corrosion Exposure of Zinc[J]. Material Science and Engineering, 2004, 38:377-381.
- [13] 宋诗哲,王守琰,高志明,等. 图像识别技术研究有色金属 大气腐蚀早期行为[J]. 金属学报,2002,38(8):890—896.
 SONG Shi-zhe, WANG Shou-yan, GAO Zhi-ming, et al. Atmospheric Forepart Corrosion Behaviors of Nonferrous Metal Based on Image Recorgition[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002,38(8):890—896.
- [14] 穆志韬,苏维国,叶彬. 铝合金加速腐蚀形貌灰度特征提取 方法[J]. 海军航空工程学院学报,2012,27(2):132—135.
 MU Zhi-tao, SU Wei-guo, YE Bin. Gray Feature Extraction Method for Accelerated Corrosion Morphology of Aluminum Alloy[J]. Journal of Aeronauical and Astronautical University, 2012,27(2):132—135.
- [15] 朱做涛,穆志韬,苏维国,等.基于图像处理技术的铝合金 腐蚀等级评定方法[J].南京航空航天大学学报,2010,42
 (3):383—386.

ZHU Zuo-tao, MU Zhi-tao, SU Wei-guo, et al. Corrosion Grade Evaluation of Aluminum Alloy Based on Image Processing Technique[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(3):383—386.

(上接第7页)

Support[J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(11):88–92.

- [11] 卢言利,潘家亮,张拴勤,等. 高原环境因素对涂层自然老 化性能的影响[J],装备环境工程,2011,8(2):37—41.
 LU Yan-li, PAN Jia-liang, ZHANG Shuan-quan, et al. Influence of Highland Environmental Factors on Paint Weathering
 [J]. Equipment Environmental Engineering, 2011,8(2):37—41.
- [12] DAROWICKI K. The Application of Impedance Measurements for the Determination of the Probability of the Course of Corrosion Process[J]. Corrosion Science, 1997, 39 (6) : 1087.
- [13] MISZCZYK A, DAROWICKI K. Accelerated Ageing of Organic Coating Systems by Thermal Treatment[J]. Corrosion Science, 2001, 43(7):1337—1343.
- [14] BIERWAGEN G, TALLMAN D, LI J, et al. EIS Studies of Coated Metals in Accelerated Exposure[J]. Progress Inorganic

Coatings, 2003, 46(2): 149–158.

- [15] 梁峰,刘宏伟,张鉴清,等. 沥青涂层下 A3 钢腐蚀的交流阻抗研究[J]. 材料保护,1992,25(12):3—12.
 LIANG Feng, LIU Hong-wei, ZHANG Jian-qing, et al. Evaluation of Non-perfect Organic Coatings by EIS[J]. Journal of Materials Protection, 1992, 25(12):3—12.
- [16] 刘宏伟,梁峰,张鉴清,等.交流阻抗特征频率法评价添加 铝粉对有机涂层防护性能的影响[J]. 腐蚀科学与防护技 术,1992,4(3):144—149.

LIU Hong-wei, LIANG Feng, ZHANG Jian-qing, et al. Investigation of Effect of Aluminum Powder on Performance of Epoxy Coatings by Breakpoint Frequency Method[J]. Corrosion Science, 1992, 4(3): 144-149.

[17] MANSFELD F, HAN L, LEE C, et al. Evaluation of Corrosion Protection by Polymer Coatings Using Electrochemical Impedance Spectroscopy and Noise Analysis[J]. Electrochimica Acta, 1998, 43(19–20): 2933—2945.