

海军直升机表面涂层体系改进研究

彭望舒¹, 杨丽媛², 高蒙², 孙志华², 汤智慧², 瞿新辉¹

(1. 中国直升机设计研究所 综合技术研究室, 江西 景德镇 333001;

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** 解决海军直升机表面涂层体系耐腐蚀性能较差, 难以满足日历寿命要求的难题。**方法** 采用新研制的有机涂层和原陆军直升机涂层分别对设计的结构模拟件进行涂装, 并进行 8 个周期、共计 200 天的加速腐蚀试验, 利用光泽度测量、色差测量和电化学阻抗测量的方法对涂层的腐蚀情况进行表征, 考核验证涂层体系的防腐蚀性能。**结果** 试验后新、原涂层外观基本完整, 新涂层光泽度与色差无明显变化, 原涂层光泽度下降较大。新涂层一直处于腐蚀初期的渗水阶段, 其阻抗在 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 范围内, 原涂层已进入腐蚀中期, 其阻抗在 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 范围内。**结论** 新涂层耐蚀性能更为优良, 更加适用于海洋环境下的使用。

关键词: 涂层; 结构模拟件; 耐腐蚀; 加速试验; 电化学阻抗

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.12.014

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)12-0086-07

Improvement of Navy Helicopter Surface Coating System

PENG Wang-shu¹, YANG Li-yuan², GAO Meng², SUN Zhi-hua², TANG Zhi-hui², QU Xin-hui¹

(1. Integrated Technology Research Department, China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, China;

2. Key Laboratory of Advanced Corrosion and Protection Aviation Technology for Aviation Materials, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing, 100095, China)

ABSTRACT: Objective To solve the problem that the poor corrosion resistance of the naval helicopter surface coating system does not meet the calendar life requirements. **Methods** The designed structure specimens were painted with the newly developed organic coating and the original army helicopter organic coating. The structural part was subjected to an accelerated corrosion test of 8 cycles for a total of 200 days. The corrosion of coating was characterized by gloss measurement, loss of light measurement and electrochemical impedance spectroscopy to verify the corrosion resistance of the coating system. **Results** The new and original coatings were basically intact after the test, and the gloss and chromatic aberration of the new coatings were not significantly changed; and the gloss of the original coatings was greatly reduced. The new coating was always in the initial stage of corrosion; and its impedance was in the range of $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$. The original coating entered the middle of corrosion and its impedance was in the range of $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$. **Conclusion** The new coating has better corrosion resistance and is more suitable for using in the marine environment.

KEY WORDS: coating; structure specimens; corrosion-resistant; accelerated corrosion test; electrochemical impedance

直升机在沿海地区服役时, 将暴露于高温、高湿、高盐雾的严酷腐蚀环境中, 该“三高”环境极易引发直

升机结构的腐蚀, 而表面防护涂层对抵抗腐蚀是至关重要的^[1-2]。直升机表面防护涂层的抗腐蚀品质, 是

保障直升机结构是否能达到预期服役使用年限的决定性因素^[3-5]。当前我国直升机的表面涂层体系多采用 20 世纪的环氧底漆和聚氨酯磁漆，其防腐性能较差，导致机体结构易产生腐蚀损伤，且需要较高的修理费用，大幅影响飞机的就位率^[1]。针对直升机表面涂层防腐性能较差，难以满足日历寿命要求的难题，海洋化工研究院开展了防腐底漆及高耐候防护面漆的研发与应用研究。在攻克了涂料高耐候、耐丝状腐蚀的难题后，研发出耐蚀性较好的 QH-15 防腐环氧底漆和 QFS-15 耐候聚氨酯磁漆。该涂层具备良好的抗划伤、附着力、耐腐蚀、耐老化性能，在海军直升机中具备良好的应用前景。一种新的涂层体系需要用在直升机结构中，必须经历相应的考核验证，并考虑环境因素的影响^[6-9]。

由于直升机实际服役年限很长，通常要达到 30 年左右，故而真实地模拟使用环境进行长期的环境试验在当前是不现实的，也会因试验周期过长而使试验失去意义。为了缩短试验时间，需要进行加速试验，形成加速试验环境谱^[10]。20 世纪 80 年代，北大西洋

公约组织（NATO）便开展了相关的腐蚀疲劳试验研究^[11-12]。美国国防部制定了涂层加速试验环境谱及试验程序（CASS 谱），并阐述其加速试验环境谱的编制方法^[13]。文中采用某型海军直升机实际使用的典型结构件，在其表面喷涂现有的 QH-15 防腐环氧底漆和 QFS-15 耐候聚氨酯磁漆。在实验室加速试验中，对该涂层的防腐性能进行考核验证，并与原直升机涂层体系进行对比，为其在某型海军直升机防腐改进应用中提供技术支撑。

1 实验

1.1 典型结构件设计

选取直升机桨毂处的部分结构为典型试验件，并制造陪试件共同进行试验。该典型试验件由铝合金结构和不锈钢块组成，铝合金阳极化并喷漆，与不锈钢通过螺栓连接。试验件及其陪试件如图 1 所示，其外廓尺寸、材料及其表面处理工艺、防护涂层见表 1。试验件选用 7A04 材料，其化学成分见表 2。

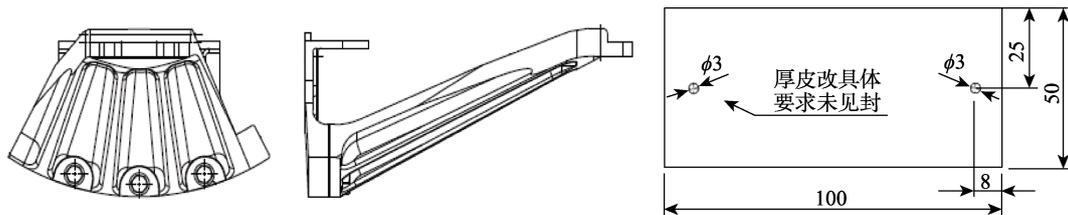


图 1 试验件及其陪试件

表 1 试验件及其陪试件的外廓尺寸、材料、表面处理工艺及防护涂层

试件名称	外廓尺寸	主要材料及其表面处理工艺	防护涂层说明
典型试验件	270 mm×210 mm× 130 mm	铝合金结构：7A04-T6 铬酸阳极化处理	新涂层 底漆：QH-15 (30±5) μm 面漆：QFS-15 灰 (35±5) μm
		不锈钢块：1Cr17Ni2 表面钝化处理 调整垫片：0Cr18Ni9 表面钝化处理	原涂层 底漆：H06-27 (20±5) μm 面漆：S04-21 (40±5) μm
典型陪试件	100 mm×50 mm	7A04-T6 铬酸阳极化	新涂层 底漆：QH-15 (30±5) μm 面漆：QFS-15 灰 (35±5) μm
			原涂层 底漆：H06-27 (20±5) μm 面漆：S04-21 (40±5) μm

表 2 7A04 的化学成分

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
≤0.5	≤0.5	1.4~2.0	0.2~0.6	1.8~2.8	0.1~0.25	5.0~7.0	≤0.1

1.2 加速试验环境谱及加速试验过程

海军直升机外部结构会受到多种环境因素的综合影响，如湿热、紫外、盐雾、振动等，而单一的环境试验不足以考核结构件在外场服役的耐腐蚀性能。参考国外同类研究及国内典型外露上表面结构环境谱，结合直升机的特点，给出由湿热、紫外、低温振动、盐雾等 4 个谱块构成的加速试验环境谱，一个试

验周期约为 27 天，共进行 8 个周期的加速试验。加速试验的实施过程如下所述。

1) 湿热试验在 GSL-10KA 型温湿试验箱进行。试验条件：试验时间为 12 天，试验温度为(43±2) °C，相对湿度为 95%±5%。

2) 紫外照射试验在 QUV-SPRAY 型紫外老化试验箱进行。试验条件：试验时间为 3 天，辐照强度为(60±10) W/m²，试验温度为(55±2) °C。

3) 低温振动在 DC-3200-36 型垂直振动台和 CH1000CVT30ESS 型三综合试验箱中进行。试验条件：试验温度为(-45±2) °C，试验时间为 30 min，振

动量级及图谱为直升机振动环境谱。

4) 盐雾试验在 Q-FOG/CCT1100 型盐雾试验箱进行。试验条件: 试验时间为 11 天(其中中性盐雾 7 天, pH=4.5~5.0 的酸性盐雾 3 天 23 小时 40 分, pH=2.0 的酸性盐雾 20 min), 盐溶液为 5%NaCl 溶液, 酸性溶液为硫酸调节, 试验温度为(35±2) °C, 盐雾沉降量为(1~2) mL/(80 cm²·h)。

5) 利用 KGZ-1B 光泽度仪、6801 色差计、Princeton Applied Research Model 273A 恒电位仪和 Signal Recovery 5210 锁相放大器对每个加速试验周

期后的试验件进行光泽度、色差测试与电化学测试。

2 结果与分析

2.1 外观检测结果

在典型试验件的整个加速试验过程中, 每个周期结束后, 对试验件外观进行检查, 且详细记录其腐蚀状况, 见表 3。试验件 8 个周期加速试验后外观照片如图 2 所示。

表 3 试验件加速试验表面形貌统计

考察面	第 1 周期	第 2 周期	第 3 周期	第 4 周期	第 5 周期	第 6 周期	第 7 周期	第 8 周期
新涂层上表面	无明显变化	无明显变化	出现一处腐蚀鼓泡, 直径约 3 mm	腐蚀加剧	腐蚀加剧	腐蚀加剧	腐蚀加剧	腐蚀鼓泡直径达 5 mm
原涂层上表面	出现一处涂层鼓泡, 直径约 3 mm	涂层鼓泡向周边有所扩展	鼓泡中心的涂层部分剥落, 剥落区直径约 4 mm	腐蚀加剧	腐蚀加剧	腐蚀加剧	腐蚀加剧	腐蚀鼓泡直径达 8 mm
新涂层下表面				无明显变化				
原涂层下表面	无明显变化	无明显变化	无明显变化	无明显变化	侧面出现腐蚀产物	腐蚀加剧	腐蚀加剧	腐蚀加剧
新涂层与不锈钢连接处	连接部位发生腐蚀	腐蚀未加剧	腐蚀未加剧	腐蚀加剧, 出现白色腐蚀产物	腐蚀加剧	腐蚀加剧	腐蚀加剧	腐蚀加剧
原涂层与不锈钢连接处	连接部位发生腐蚀	腐蚀未加剧	腐蚀未加剧	腐蚀加剧	腐蚀加剧	腐蚀加剧	腐蚀加剧	腐蚀加剧

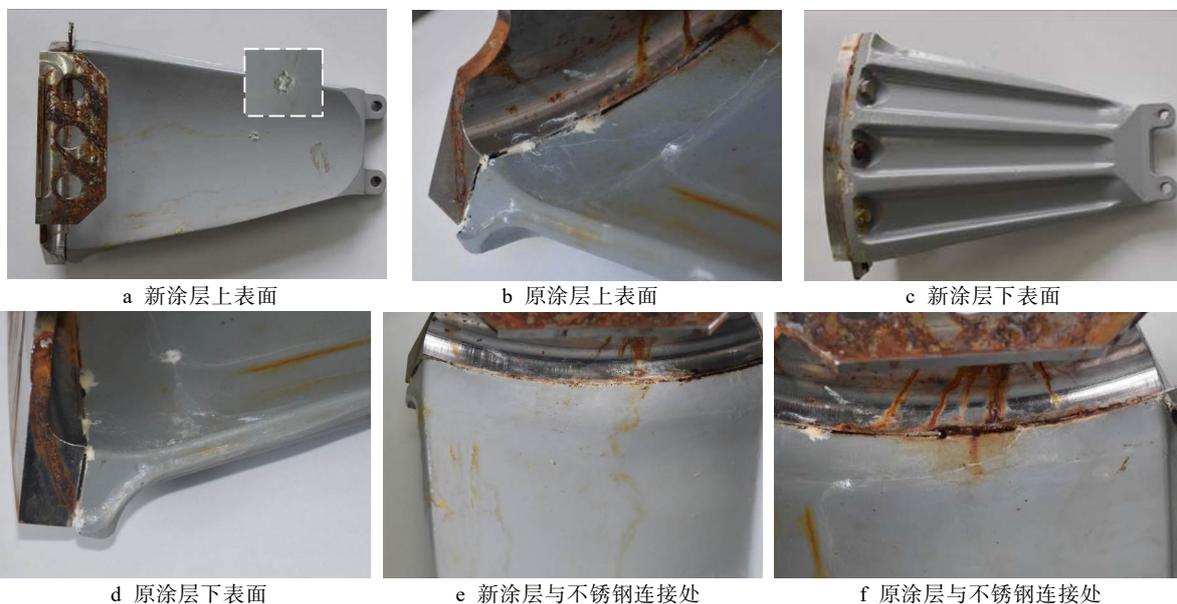


图 2 典型试验件 8 个周期加速试验后外观照片

表 3 及图 2 的观察结果表明, 完整的典型试验件, 经历 8 个周期的加速腐蚀试验(当量 8 年)后, 与试验前试验件相比, 新涂层、原涂层试验件表面涂层无明显失光、变色、粉化。新涂层试验件上表面在第 3 周期出现一块涂层鼓泡, 并随着试验周期的增加而扩展, 最终鼓泡直径达 5 mm; 而原涂层试验件在第 1

周期出现鼓泡, 并随着试验周期的增加而扩展, 最终鼓泡直径达 8 mm。这可能是由于新、原涂层在喷漆的时候有较大颗粒的灰尘落入试验件中, 漆层未能很好地覆盖金属表面导致的。

新涂层试验件下表面在整个试验过程中均无明显变化, 而原涂层试验件在第 5 周期, 侧面出现白色

腐蚀产物，并随着试验周期的增加，腐蚀加剧，但涂层表面依旧完整，无鼓泡、裂纹、脱落等现象。新、原涂层与不锈钢连接处的腐蚀情况基本一致，均出现了白色、红色腐蚀产物，但无漆层鼓泡、脱落等现象，表明新、原涂层体系均未发生失效，具备良好的耐腐蚀性能，但新涂层耐蚀性稍好。

2.2 涂层失光率及色差

涂层的失光、变色、粉化、起泡情况是衡量涂层是否失效的重要指标，在加速试验过程中，由于受湿热、紫外照射、盐雾等因素的综合交变作用，涂层材料中的树脂高分子链断裂，生成小分子产物及亲水基团。盐雾中的氯离子 (Cl⁻) 有较小的离子半径，能通过聚氨酯涂层中的宏观和微观缺陷，渗透并扩散到涂层与金属的结合面，导致涂层表面失光、变色、粉化等^[14-16]。在加速试验前、加速试验每个周期后，测试典型结构陪试件涂层的 60° 光泽度和色差，并用式

(1) 计算涂层材料的失光率 η ：

$$\eta = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中： A_0 为周期循环加速试验前光泽测定值； A_1 为周期循环加速试验后光泽测定值。

涂层失光率及色差随加速试验周期的变化统计结果如图 3 所示。可以看出，新涂层的光泽度无明显变化，原涂层的光泽度下降较大，光泽度的下降与表面粗糙度的增加有关。国外研究者采用原子力显微镜研究了高光泽性聚氨酯面漆暴露在 QUV 紫外辐射+间歇盐雾交替加速试验后涂层表面形貌的变化，证实了该暴晒试验条件下，涂层表面存在微小气泡，气泡的发展增加了表面的粗糙度和失光。在本次试验过程中，原涂层试验件表面涂层的失光及失光率的变化也正是这个原因^[17-18]。

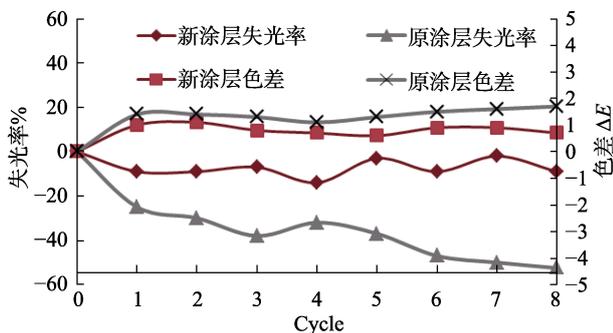


图 3 涂层失光率及色差曲线

色差 ΔE 是利用精密色差计测出的涂层被测表面红绿偏差 Δa 、黄蓝偏差 Δb 、表面亮度偏差 ΔL 计算出的， $\Delta E = [(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2 + (\Delta L)^2]^{1/2}$ ， ΔE 的值可以定量反映出被测涂层的色泽变化。 ΔE 越大，表明涂层腐蚀老化越明显。涂层变色主要是由于受加速环境的交变作用，涂层中的有机分子发生裂解而引起的。在诸多环境因子中，紫外老化作用对涂层的失色影响最

大，特别是湿态环境下，涂层的变色、粉化的速率大大加快。有机聚合物在紫外作用下引起的光氧化和水解是导致涂层色泽变化的直接原因^[17]。

从图 3 可以看出，新、原涂层色差 ΔE 变化范围在 0~2 之间，变化较小。色差结果表明，新、原涂层体系皆具备良好的耐光氧化性能，在湿热、紫外照射等环境的综合作用下能保持良好的稳定性。新涂层的耐环境能力更强，稳定性更好。

2.3 电化学阻抗

典型陪试件在每一个加速周期后，在 3.5% NaCl 溶液中进行电化学交流阻抗的测试。测试前试样在 3.5% NaCl 溶液中浸泡，测试的激励信号为幅值 10 mV 的正弦波，频率的扫描范围为 0.1 Hz~100 kHz，测得的电化学阻抗谱如图 4 所示。可以看出，新涂层试验前的阻抗值很高，可达 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，而原涂层试验前的阻抗值达 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，这表明在试验前新涂层对腐蚀介质的阻挡能力更强。新涂层 1—6 周期的阻抗值略低于试验前，7—8 周期的阻抗值最低，原涂层 1—8 周期的阻抗值大幅度下降。

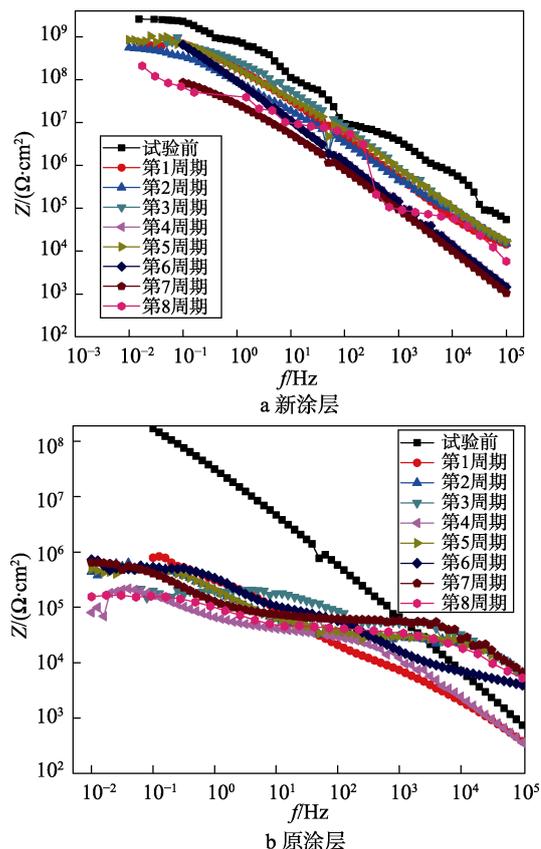


图 4 涂层在不同加速试验周期下 Bode 图

新、原涂层在不同试验周期后， $f=0.1 \text{ Hz}$ 处的电化学阻抗模值如图 5 所示。可以看出，新涂层试验前的阻抗最高，达到了 $2.28 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，能够很好地隔离腐蚀介质与金属基体的接触，保护试验件免受腐蚀。经过了 1 个周期的腐蚀试验后，阻抗值降低到

$6.92 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。之后随着腐蚀时间的延长, 阻抗呈现高低波动的趋势。在整个试验周期中, 最高时为 $6.92 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 最低时为 $0.86 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。整体呈波动下降的趋势, 但是阻抗都在 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 量级内, 表明涂层接近于绝缘状态, 依旧具备良好的耐腐蚀性能, 可以保护基体金属免受腐蚀介质的侵蚀。原涂层试验前的阻抗值为 $1.69 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 能较好地隔离腐蚀介质与金属基体的接触, 保护试验件免受腐蚀。经过了 1 个周期的腐蚀试验后, 阻抗值降低到 $7.84 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 下降了 2 个数量级。之后随着腐蚀时间的延长, 阻抗呈现高低波动的趋势。在整个试验周期中, 最高时为 $7.84 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 最低时为 $1.58 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。表明涂层已不处于绝缘状态, 对腐蚀介质无法起到完全隔绝的作用, 不能有效地保护基体金属。

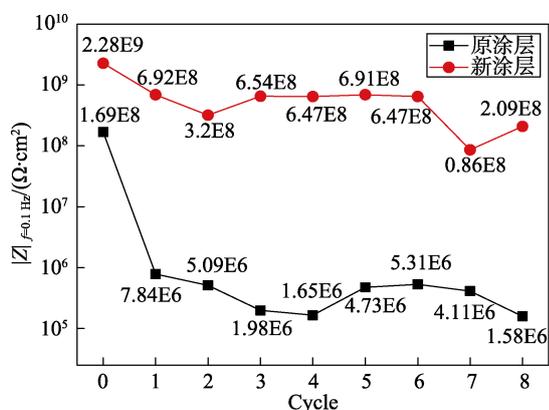


图5 新、原涂层不同试验周期后 $|Z|_{f=0.1\text{Hz}}$ 的变化曲线

新涂层在不同试验周期后所得的 Nyquist 图如图 6a 所示。Nyquist 图中容抗弧的半径与腐蚀速率有密切的关系, 半径越大, 耐腐蚀性能越好^[19]。从图 6a 中可以发现, 试验前的涂层耐蚀性最好, 1—8 周期后的涂层耐蚀性稍变差。在试验周期中, 曲线的形状变化不大, 为一个高阻抗的单容抗, 表现为一个时间常数, 阻抗在 $10^8 \sim 3 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 之间。说明在试验的 8 个周期内, 涂层均保持完好, 反应以涂层的渗水过程为主。参考张鉴清和曹楚南等建立的等效电路模型^[20-23], 用图 7a 所示的电路进行阻抗拟合, 其中 R_s 表示溶液电阻, C_c 和 R_c 表示界面反应电容和电阻。图中圆的半径和 R_c 有关, 试验前圆的半径非常大, 随着试验的进行, 圆的半径有所减小, 并稳定在一个较大的范围。这说明水向涂层内部渗透一定程度后, 被涂层阻挡在外, 并一直保持该状态至 8 个周期的加速试验完成。该结果说明涂层依旧处于浸泡初期阶段, 该涂层体系具备良好的耐蚀性能。

图 6a 为原涂层不同试验周期后所得的 Nyquist 图, 可以发现试验前的涂层耐蚀性最好, 其曲线形状与新涂层的曲线类似, 为一个高阻抗的单容抗弧, 表现为一个时间常数, 说明反应以涂层的渗水过程为主。腐蚀 1—8 周期后, 涂层的 Nyquist 图表现为一个

高频段、高阻抗的容抗弧和低频段、较低阻抗的容抗弧, 表现为两个时间常数, 说明此时腐蚀介质已渗入至涂层/金属界面, 基体金属发生腐蚀反应。用图 7b 所示的电路进行阻抗拟合, 其中 R_s 表示溶液电阻, C_c 和 R_c 表示涂层电容和电阻, C_{dl} 表示涂层/金属界面腐蚀反应相应的双电层电容, R_t 表示电荷转移电阻。在腐蚀 1—8 个周期后, 高频段对应的时间常数来自于涂层电容 C_c 及涂层电阻 R_c 的贡献, 与低频端对应的时间常数来自于 C_{dl} 和 R_t 。综上表明, 腐蚀 1—8 个周期后, 原涂层已进入腐蚀中期阶段, 已有部分腐蚀介质渗入涂层/金属界面, 基体金属开始发生腐蚀, 但并未进入腐蚀后期, 腐蚀介质对涂层的渗透未达到饱和, 涂层并未发生劣化与失效, 依旧具备较好的阻挡保护作用。

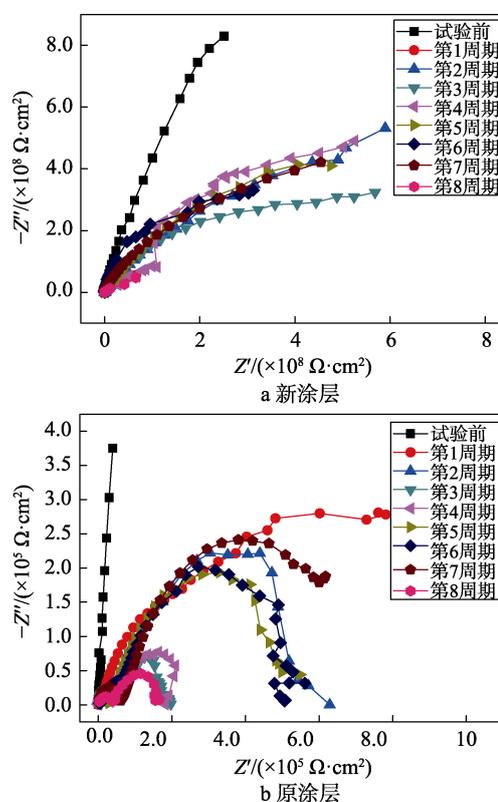


图6 涂层在不同加速试验周期下 Nyquist 图

2.4 反应机理探讨

有机涂层喷涂在金属表面之后, 因溶解与挥发, 会在涂层表面产生较多微观针孔^[24]。该针孔及喷涂的缺陷将作为腐蚀介质的扩散通道, 水、电解质及氧气扩散至涂层/金属的界面, 金属发生电化学腐蚀, 腐蚀产物在金属与涂层界面生成, 便造成涂层的鼓泡、破裂等。涂层阻挡腐蚀介质的性能越好, 其耐腐蚀性能越佳。

在加速试验过程中, 湿热、紫外、盐雾分别作用于典型试验件, 其中湿热、盐雾试验会导致涂层表面的腐蚀介质通过吸附、扩散、渗透作用进入涂层, 最

终达到涂层/金属的界面。盐雾试验中的 Cl^- 是一种强电解质，具有较小的离子半径 ($1.82 \times 10^{-4} \mu\text{m}$)，穿透能力很强，能通过聚氨酯涂层中的宏观和微观缺陷，渗透至涂层/金属的界面，从而造成金属的腐蚀。另外酸性盐雾中的硫酸对涂层的老化也有一定的影响。紫外照射会导致涂层的键段运动剧烈，键与键之间的作用力变弱，最终涂层表面的分子键被破坏，涂层表面分子结构、孔隙率等发生变化，致使腐蚀介质的渗透更加容易^[25]。试验之间的干湿交替，导致涂层在吸水与脱水过程中发生溶胀与收缩，增加涂层的孔隙率，并导致涂层的微孔和缝隙不断扩大与加深，形成了外界通向涂层/金属界面的通道，导致腐蚀介质的渗透速率加快。

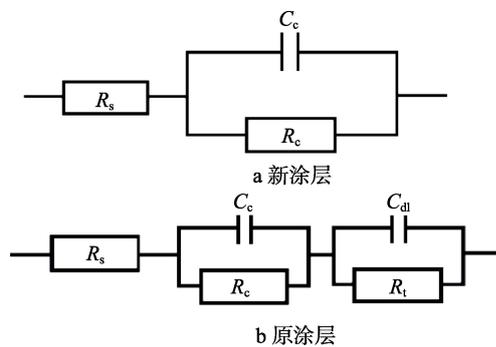


图 7 等效电路

在有腐蚀介质的环境中，涂层即使处于完好状态，也仍然存在外界腐蚀介质渗入的传输通道，涂层表面水分子通过吸附、扩散、渗透作用进入涂层，最终可达到涂层/金属界面。在水溶液介质中，由于涂层表面张力，初期水在涂层界面的吸附、扩散是比较缓慢的，主要是利用涂层的孔隙和缺陷处进行渗入。从上述的电化学阻抗分析中可以看出，经过 8 个周期的加速腐蚀试验，新涂层依旧处于涂层表面水分子向涂层内部扩散、渗透的阶段。

原涂层在试验过程中，随着水分子的渗入，缝隙达到饱和，并向其附近均匀扩散，发生腐蚀反应。涂层/金属界面的金属与渗入的水分子发生化学反应，生成 Al^{3+} ，并与水溶液中的 OH^- 生成腐蚀产物，腐蚀产物防止金属界面锈层的形成和发展，同时阻塞涂层孔隙，使水分子的渗入处于停滞状态，抑制腐蚀的进一步发生。可以看出，经过 8 个周期的加速腐蚀试验，原涂层一直处于该腐蚀阶段。如果试验继续进行，水分子渗入的通道进一步被打开，涂层的微孔和缝隙不断扩大和加深，形成了较多通向涂层/金属界面的通道。这时涂层中的水解产物不能有效阻塞孔隙，产生更多的腐蚀产物，则会发生涂层起泡、开裂现象，进一步甚至会造成涂层剥落，最终失效。

3 结论

1) 新涂层光泽度无明显变化，原涂层光泽度有

较大的劣化，新原涂层色差变化范围在 0~2 之间，色差变化均较小。

2) 加速腐蚀试验前，新涂层表现为一个高阻抗的单容抗弧， $f=0.1 \text{ Hz}$ 处的电化学阻抗模值为 $2.28 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，涂层耐蚀性很好；原涂层表现为一个高阻抗的单容抗弧， $f=0.1 \text{ Hz}$ 处的电化学阻抗模值为 $1.69 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，涂层耐蚀性较好。

3) 加速腐蚀试验中，新涂层依旧表现为一个高阻抗的单容抗弧，反应以涂层渗水过程为主， $f=0.1 \text{ Hz}$ 处的电化学阻抗模值在 $0.86 \times 10^8 \sim 6.92 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 之间，整体呈波动下降的趋势，但是阻抗都在 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 范围内，涂层的耐蚀性较好。原涂层表现为一个高阻抗的容抗弧和一个较低阻抗的容抗弧，反应以涂层渗水及腐蚀介质与基体金属反应为主， $f=0.1 \text{ Hz}$ 处的电化学阻抗模值在 $1.58 \times 10^6 \sim 7.84 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 之间，涂层依旧具有一定的阻挡腐蚀介质能力。

4) 新涂层的耐蚀性较原涂层更为优异，新涂层典型结构件经 8 个周期的加速腐蚀试验（相当于外场日历 8 年）后，涂层基本完整，无明显变化，起泡处尺寸较小，可在外场修复，表明该涂层体系能满足海军直升机的使用要求。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 刘文珽, 李玉海, 王向明, 等. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2004.
- [4] 中国特种飞行器研究所. 海军飞机结构腐蚀控制设计指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 2005.
- [5] 汪定江, 潘庆军, 夏成宝. 军用飞机的腐蚀与防护[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006.
- [6] 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.
- [7] 李世平, 魏广平. 飞机涂层老化模式及日历寿命预测[J]. 环境技术, 2017, 35(1): 24-26.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] WANHILL R J H, LUCCIA J J D. An AGARD—Coordinated Corrosion Fatigue Cooperative Testing Program (CFCTP)[R]. RAE Technical Report No 83055, 1983.
- [12] WANHILL R J H, LUCCIA J J DE, RUSSO M T. The Fatigue in Aircraft Corrosion Testing Program (FACTP)[R].

- No 713, 1982.
- [13] ROBERT N MILLER, SCHUESSLER R L. Predicting Service Life of Aircraft Coating in Various Environments[J]. Corrosion, 1989(4):17-21.
- [14] 刘学君, 杨晓华, 辛志东, 等. LY12CZ铝合金飞机内外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.
- [15] 罗来正, 肖勇, 苏艳, 等. 东南沿海气候条件对聚氨酯涂层老化行为影响研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(6): 42-47.
- [16] 李赛, 杨飞, 李卫平, 等. 含氟丙烯酸聚氨酯涂层的环境失效行为研究[J]. 表面技术, 2014, 43(6): 138-143.
- [17] CAO Chu-nan. Corrosion Electrochemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1994.
- [18] ZHANG Jin-tao, hu Ji-ming, ZHANG Jian-qing, et al. Studies of Water Transport Behavior and Impedance Models of Epoxy-coated Metals in NaCl Solution by EIS[J]. Progress in Organic Coating, 2004, 51: 145-151.
- [19] 张鉴清, 曹楚南. 电化学阻抗谱方法研究评价有机涂层[J]. 腐蚀与防护, 1998, 19(3): 99-104.
- [20] ZHANG J T, ZHANG J Q, CAO C N. Studies of Impedance Models and Water Transport Behaviors of Polypropylene Coated Metals in NaCl Solution[J]. Progress in Organic Coating, 2004(49): 293-301.
- [21] HU J M, ZHANG J Q, CAO C N. Determination of Water Uptake and Diffusion Of Cl⁻ Ion in Epoxy Primer on Aluminum Alloys in NaCl Solution by Electrochemical Impedance Spectroscopy[J]. Prog Org Coat, 2003(46): 273-279.
- [22] PERERA D Y. Effect of Pigmentation on Organic Coating Characteristics[J]. Progress in Organic Coatings, 2004, 50(4): 247-262.
- [23] 耿舒, 高瑾, 李晓刚, 等. 丙烯酸聚氨酯涂层的紫外老化行为[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(6): 752-757.
- [24] 李松梅, 李湘澄, 辛长胜, 等. 循环加速腐蚀中紫外照射对环氧涂层老化行为的影响[J]. 材料工程, 2014, 7(12): 60-66.
- [25] 王淑清, 卢向雨, 左禹, 等. 环氧带锈涂层在干湿交替环境中失效过程的电化学阻抗谱[J]. 化工学报, 2012, 63(11): 3625-3631.