

# 飞机表面涂层海洋环境试验与实验室环境试验相关性研究

刘成臣, 赵连红, 王浩伟

(中国特种飞行器研究所 结构腐蚀防护与控制航空科技重点实验室, 湖北 荆门 448035)

**摘要:** **目的** 研究 5 类典型飞机表面涂层南海大气环境试验与实验室环境试验的相关性。**方法** 在南海域环境开展 5 类典型飞机表面基材及涂层的户外暴露试验, 试验时间为 3 年, 同时在实验室开展太阳辐射-湿热-盐雾组合试验。通过测试外观、光泽度、色差研究两种试验环境的相关性。**结果** 将失光率、色差、老化评级为基准得出的秩相关系数进行平均, 计算得出平均秩相关系数为 0.96, 说明涂层样品的试验实验室加速试验和自然暴露试验为极强相关。**结论** 通过秩相关系数法证明了表面涂层在南海大气环境试验和实验室环境试验的极强相关性, 可为后续南海环境试验的加速处理提供依据。

**关键词:** 飞机; 涂层; 暴露试验; 加速试验; 相关性

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.06.004

**中图分类号:** TJ07; TG174.461

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)06-0016-05

## Correlation between Marine Atmospheric Environmental Test and Laboratory Environmental Test of Aircraft Surface Coating

LIU Cheng-chen, ZHAO Lian-hong, WANG Hao-wei

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structural Corrosion Prevention and Control, China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the correlation between surface airborne environmental tests in the South China Sea and laboratory environmental tests for five types of typical aircraft. **Method** The outdoor exposure tests of five types of typical aircraft surface substrates and coatings were conducted in South China Sea environment for three years. At the same time, solar radiation-damp heat-salt spray combination tests were conducted in the laboratory. The correlation between the two test environments was examined by testing appearance, gloss, and chromatic aberration. **Results** The rank correlation coefficients obtained from the basis of the loss of light, color difference, and aging rating were averaged, and the average rank correlation coefficient was calculated to be 0.96, indicating that the test laboratory accelerated test and the natural exposure test of the coated sample were extremely strongly correlated. **Conclusion** The correlation of the surface coating in the South China Sea atmospheric environment test and the laboratory environmental test is proved by the rank correlation coefficient method. It provides a basis for the follow-up treatment of the South China Sea environmental test.

**KEY WORDS:** aircraft; coating; exposure test; accelerated testing; correlation

飞机在海洋环境下服役时, 长期受高温、高湿、高盐环境的作用。涂层作为飞机最重要的的防护措

施, 对于飞机的防腐蚀能力具有决定性的影响<sup>[1-4]</sup>。随着我国飞机在南海布局, 对飞机的环境适应性提出

了更高的要求。飞机的寿命一般在 30 年左右，在自然环境下评估涂层的环境适应性需要很长的周期，无法满足工程研制需求。因此必须采用加速试验的方法，以期在短时间内达到评估飞机服役若干年后涂层的性能，而建立加速试验和自然环境试验之间的相关性是评估的重要前提<sup>[5-10]</sup>。

文中开展了 5 类典型飞机涂层的南海大气暴露试验和实验室加速试验，通过测试外观、光泽度、色差等数据，研究了两种试验环境的相关性。

### 1 试验件

涂层试样尺寸为 180 mm×50 mm×2 mm，如图 1

所示，其组分见表 1。

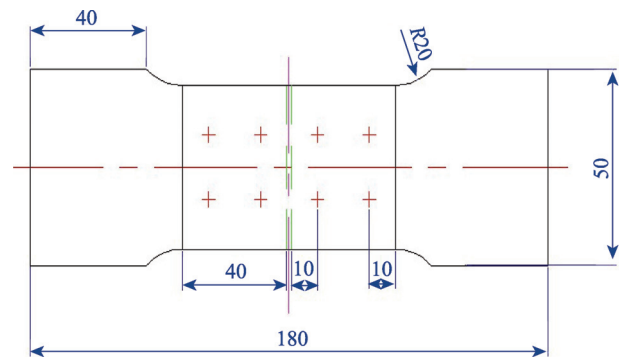


图 1 涂层试验件

表 1 涂层试验件组分

编号	基材	底漆	面漆
C1	LY12	H06-27 锌黄底漆	S04-81 聚氨酯面漆
C2	复合材料	S06-12 锌黄底漆	S04-61 聚氨酯面漆
C3	30CrMnSiA	H06-27 锌黄底漆	S04-61 聚氨酯面漆
C4	LC4	TB06-9 锌黄聚氨酯底漆	TS70-60 聚氨酯面漆
C5	7075	TB06-9 锌黄聚氨酯底漆	TS96-71 聚氨酯面漆

### 2 自然环境试验

南海某自然暴露试验站，属于典型的热带海洋性

气候，具有高温、高湿、强辐射且日照时间长、高盐雾的气候特点，环境数据见表 2，较适用于各类涂层对海洋环境适应性的考核。

表 2 南海某环境站年均环境数据

项目	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
太阳辐 45°角总辐射曝辐量/(MJ·m <sup>-2</sup> )	523.5	680.5	664.1	674.7	532.0	378.4	401.8	509.3	470.6	521.2	524.7	307.3
日照量 紫外辐射曝辐量/(MJ·m <sup>-2</sup> )	25.6	28.4	30.2	33.0	33.4	24.1	24.5	25.2	22.5	20.8	16.9	15.3
温度月平均值/°C	24.1	24.9	26.4	28.5	29.9	29.9	29.3	29.1	28.7	26.6	26.6	24.3
相对湿度月平均值/%	72	78	77	78	79	79	79	82	82	76	82	77
盐雾沉降率/(mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	1.815	2.120	0.667	0.634	0.630	2.505	1.251	3.041	1.871	3.444	4.801	3.629

涂层样品按 6, 12, 18, 24, 30, 36 个月的试验周期进行取样，每次取样时，会对所取试样和暴露架上的其余试样进行拍照。完成拍照后，取回的涂层样品按照标准进行外观检查，检查项目包括失光、变色、粉化、裂纹、起泡、斑点、生锈、脱落等，具体的评级方法按照 GB/T 1766—2002《色漆和清漆涂层老化的评级方法》中规定的进行。检测结果见表 3。

### 3 实验室加速试验

在涂层的表面降解阶段，受到太阳光、温度、氧气和水分的影响，光泽度、粗糙度和表面样貌发生变

化。随着降解的加深，涂层中形成了水和各种腐蚀离子的渗透通道，这个过程的影响因素也主要是太阳光、温度、氧气和水分。实验室加速试验选取太阳辐射-湿热-盐雾组合的方式作为涂层的加速腐蚀试验方案，这种方式体现了自然环境条件下太阳辐射的高温、干湿交替、光照周期和黑暗交替的影响效应。试验条件参考 GJB 150.7A—2009《军用设备实验室环境试验方法 太阳辐射试验》、GJB 150.9A—2009《军用设备实验室环境试验方法 湿热试验》、GJB 150.11A—2009《军用设备实验室环境试验方法 盐雾试验》中的试验条件，其试验条件见表 4，检测数据见表 5。

表3 C1—C5种类涂层样品暴露试验检测数据

样品编号	试验时间/月	色差 $\Delta E$	失光率/%	外观评价	样品编号	试验时间/月	色差 $\Delta E$	失光率/%	外观评价	
C1	初始	/	/	表面无异常	C3	24	5.42	53.01	老化综合评级3级	
	6	0.49	-29.26	老化综合评级0级		30	7.90	87.87	老化综合评级4级	
	12	1.14	-11.97	老化综合评级1级		36	11.29	90.72	老化综合评级5级	
	C2	18	1.60	3.32	老化综合评级2级	C4	初始	/	/	表面无异常
		24	3.74	9.31	老化综合评级3级		6	0.48	5.40	老化综合评级0级
		30	6.46	32.11	老化综合评级4级		12	0.92	7.47	老化综合评级1级
		36	8.74	59.85	老化综合评级5级		18	1.14	14.49	老化综合评级2级
初始		/	/	表面无异常	24		0.47	42.48	老化综合评级3级	
C3	6	0.32	-43.98	老化综合评级0级	30	1.63	68.94	老化综合评级4级		
	12	1.49	-3.61	老化综合评级1级	36	1.53	82.53	老化综合评级5级		
	18	3.88	10.54	老化综合评级2级	C5	初始	/	/	表面无异常	
	24	7.58	51.96	老化综合评级3级		6	1.79	28.42	老化综合评级0级	
	30	9.49	77.61	老化综合评级4级		12	3.83	46.06	老化综合评级1级	
	36	11.58	88.06	老化综合评级5级		18	4.03	63.70	老化综合评级2级	
初始	/	/	表面无异常	24		5.54	76.34	老化综合评级3级		
6	0.67	15.96	老化综合评级0级	30		6.59	83.59	老化综合评级4级		
C4	12	1.57	18.81	老化综合评级1级	36	8.40	91.14	老化综合评级5级		
	18	3.75	24.89	老化综合评级2级						

表4 实验室加速试验方案

样品类别	加速试验方式	试验条件	试验周期
涂层	太阳辐射-湿热-盐雾组合试验	太阳辐射试验: BST 为(65±3) °C; 相对湿度为 50%±5%; 辐照度为(0.60±0.05) W/m <sup>2</sup> @340nm; 试验时间为 22 h 湿热试验: 温度为(45±2) °C; 相对湿度为 95%±2%; 试验时间 1 h 盐雾试验: 试验温度为(35±2) °C; 盐溶液浓度为 5%±1%; 盐溶液 pH 值为 6.5~7.2; 盐雾沉降率为 (1.0~2.0) mL/(80 cm <sup>2</sup> ·h); 连续喷雾方式; 试验时间 1 h。	24 h 为一个循环周期

表5 C1—C5 涂层样品加速试验测试数据

样品编号	试验时间/d	色差 $\Delta E$	失光率/%	外观评价	样品编号	试验时间/d	色差 $\Delta E$	失光率/%	外观评价	
C1	初始	0	0	表面无异常	C3	60	7.04	74.21	老化综合评级2级	
	15	0.37	-25.45	老化综合评级1级		75	10.27	123.00	老化综合评级3级	
	30	0.86	-10.48	老化综合评级2级		90	14.67	127.00	老化综合评级5级	
	C2	45	1.24	2.89	老化综合评级2级	C4	初始	0	0	表面无异常
		60	2.84	8.32	老化综合评级3级		15	0.42	5.94	老化综合评级1级
		75	4.90	27.93	老化综合评级4级		30	0.81	8.21	老化综合评级1级
		90	6.65	52.06	老化综合评级5级		45	1.01	15.93	老化综合评级2级
初始		0	0	表面无异常	60		1.41	46.72	老化综合评级3级	
C3	15	0.24	-38.26	老化综合评级1级	75	1.45	75.83	老化综合评级4级		
	30	1.23	-3.14	老化综合评级2级	90	1.66	90.78	老化综合评级5级		
	45	3.02	9.16	老化综合评级2级	C5	初始	0	0	表面无异常	
	60	5.91	45.45	老化综合评级3级		15	1.61	34.10	老化综合评级1级	
	75	7.54	67.52	老化综合评级4级		30	3.44	55.27	老化综合评级1级	
	90	9.03	76.65	老化综合评级5级		45	3.62	76.44	老化综合评级2级	
初始	0	0	表面无异常	60		4.98	91.60	老化综合评级3级		
15	0.87	22.34	老化综合评级1级	75		5.93	100.30	老化综合评级4级		
C4	30	2.04	26.33	老化综合评级1级	90	7.56	109.36	老化综合评级5级		
	45	4.87	34.84	老化综合评级2级						

## 4 南海环境试验和实验室环境试验相关性评价

为了准确获知两种环境的相关性，采用了 Spearman 秩相关系数。Spearman 秩是一种无参数检验方法，适用于两列变量，而且具有等级变量性质的数据分析。文中所采集的加速腐蚀数据和自然腐蚀数据都是随着腐蚀时间等级变化的，故适用于本方法。秩相关系数  $R$  越接近 1，相关性越好，即两种试验方法对材料的影响规律是基本一致的，秩相关系数法判断临界值见表 6。

表 6 秩相关系数临界值

相关系数	相关强度
0.8~1.0	极强相关
0.6~0.8	强相关
0.4~0.6	中等程度相关
0.2~0.4	弱相关
0~0.2	极弱相关或无相关

### 4.1 以失光率为基准的相关性评价

$X_0$  为自然暴露试验后涂层的失光率， $X_{01}$ — $X_{06}$  分别为 C1—C6 涂层样件自然暴露试验的失光率， $X_1$  为开展实验室加速试验后的失光率， $X_{11}$ — $X_{16}$  分别是实验室加速试验后 C1—C6 涂层样件的失光率。

自然暴露试验和实验室加速试验中，涂层样品的失光率性能变化过程分别为：

自然暴露试验

$$X_0 = \begin{pmatrix} X_{01} \\ X_{02} \\ X_{03} \\ X_{04} \\ X_{05} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -29.26 & -11.97 & 3.32 & 9.31 & 32.11 & 59.85 \\ -43.98 & -3.61 & 10.54 & 51.96 & 77.61 & 88.06 \\ 15.96 & 18.81 & 24.89 & 53.01 & 87.87 & 90.72 \\ 5.40 & 7.47 & 14.49 & 42.48 & 68.94 & 82.53 \\ 28.42 & 46.06 & 63.70 & 76.34 & 83.59 & 91.14 \end{pmatrix}$$

实验室加速试验

$$X_1 = \begin{pmatrix} X_{11} \\ X_{12} \\ X_{13} \\ X_{14} \\ X_{15} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -25.45 & -10.48 & 2.89 & 8.32 & 27.93 & 52.06 \\ -38.26 & -3.14 & 9.16 & 45.45 & 67.52 & 76.65 \\ 22.34 & 26.33 & 34.84 & 74.21 & 123.00 & 127.00 \\ 5.94 & 8.21 & 15.93 & 46.72 & 75.83 & 90.78 \\ 34.10 & 55.27 & 76.44 & 91.60 & 100.30 & 109.36 \end{pmatrix}$$

将测得的涂层失光率数据分别按大小统一排序，得到的秩序数为：

$$\text{自然暴露试验 } x_0 = \begin{pmatrix} x_{01} \\ x_{02} \\ x_{03} \\ x_{04} \\ x_{05} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{pmatrix}$$

$$\text{实验室加速试验 } x_1 = \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \\ x_{15} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{pmatrix}$$

通过对比  $x_0$  和  $x_1$ ，计算涂层样品实验室加速试验和自然暴露试验中失光率的相关系数  $R$  为：

$$R = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

以失光率为评价基准，涂层样品实验室加速试验和自然暴露试验的平均秩相关系数为 1，为极强相关。

### 4.2 以色差为基准的相关性评价

$Y_0$  为自然暴露试验后涂层的色差， $Y_{01}$ — $Y_{06}$  分别为自然暴露试验后 C1—C6 涂层样件的色差。 $Y_1$  为开展实验室加速试验后的色差， $Y_{11}$ — $Y_{16}$  分别是加速腐蚀试验后 C1—C6 涂层样件的色差。

自然暴露试验和实验室加速试验中，涂层样品的色差性能变化过程分别为：

自然暴露试验

$$Y_0 = \begin{pmatrix} Y_{01} \\ Y_{02} \\ Y_{03} \\ Y_{04} \\ Y_{05} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.49 & 1.14 & 1.60 & 3.74 & 6.46 & 8.74 \\ 0.32 & 1.49 & 3.88 & 7.58 & 9.49 & 11.58 \\ 0.67 & 1.57 & 3.75 & 5.42 & 7.90 & 11.29 \\ 0.48 & 0.92 & 1.14 & 0.47 & 1.63 & 1.53 \\ 1.79 & 3.83 & 4.03 & 5.54 & 6.59 & 8.40 \end{pmatrix}$$

实验室加速试验

$$Y_1 = \begin{pmatrix} Y_{11} \\ Y_{12} \\ Y_{13} \\ Y_{14} \\ Y_{15} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.37 & 0.86 & 1.24 & 2.84 & 4.90 & 6.65 \\ 0.24 & 1.23 & 3.02 & 5.91 & 7.54 & 9.03 \\ 0.87 & 2.04 & 4.87 & 7.04 & 10.27 & 14.67 \\ 0.42 & 0.81 & 1.01 & 1.41 & 1.45 & 1.66 \\ 1.61 & 3.44 & 3.62 & 4.98 & 5.93 & 7.56 \end{pmatrix}$$

将测得的涂层总色差数据分别按大小统一排序，得到的秩序数为：

$$\text{自然暴露试验 } y_0 = \begin{pmatrix} y_{01} \\ y_{02} \\ y_{03} \\ y_{04} \\ y_{05} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 2 & 3 & 4 & 1 & 6 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{pmatrix}$$

$$\text{实验室加速试验 } y_1 = \begin{pmatrix} y_{11} \\ y_{12} \\ y_{13} \\ y_{14} \\ y_{15} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{pmatrix}。$$

通过对比  $y_0$  和  $y_1$ , 计算涂层样品实验室加速试验和自然暴露试验中色差的相关系数  $R$  为:

$$R = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0.6 \\ 1 \end{pmatrix}$$

以总色差为评价基准, 涂层样品实验室加速试验和自然暴露试验的平均秩相关系数为 0.92, 为极强相关。

### 4.3 以老化评级数为基准的相关性评价

依据 4.1 和 4.2 的计算方法, 同理可计算以老化评级数为评价基准的平均秩相关系数为 0.97, 为极强相关。最后, 将失光率、色差、老化评级数为基准得出的秩相关系数进行平均, 计算得出平均秩相关系数为 0.96, 说明涂层样品的实验室加速试验和自然暴露试验为极强相关。

## 5 结论

通过秩相关系数法说明了飞机表面涂层南海大气环境试验与太阳辐射-湿热-盐雾组合试验两者之间的极强相关性, 可为后续南海环境试验的加速处理提

供依据。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张丹峰, 王玉刚, 谭晓明. 航空聚氨酯涂层老化分析[J]. 环境技术, 2016, 34(5): 38-40.
- [3] 孙世彧, 李高原. 高分子材料的气候老化试验技术[J]. 塑料工业, 2006(9): 36-39.
- [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.
- [5] 骆晨, 孙志华, 汤智慧, 等. 防护性有机涂层失效研究的发展趋势[J]. 装备环境工程, 2017, 14(8): 50-54.
- [6] 易平, 杨建新, 杨秀清, 等. 3种高分子材料自然环境多角度暴露对比试验[J]. 表面技术, 2007, 36(2): 18-20.
- [7] 刘文斑, 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.
- [8] 金涛, 何卫平, 廖圣智, 等. 2024-T62 铝合金涂层外场腐蚀环境下电化学性能研究[J]. 装备环境工程, 2016, 12(1): 8-12.
- [9] 刘文斑, 贺小帆. 飞机结构腐蚀/老化控制与日历延寿技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [10] 刘成臣, 王浩伟, 杨晓华. 不同材料在海洋大气环境下的加速环境谱研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 18-24.