文章编号：1673–1522（2012）05-0507–05

飞机典型结构件防护涂层耐腐蚀试验对比研究

黄亚超[1, 2]，穆志韬[2]，苏维国[2]

（1. 南昌航空大学，南昌 330063；2. 海军航空工程学院青岛校区，山东 青岛 266041）

摘 要：基于 2 种涂层的飞机典型结构模拟试验件加速腐蚀及老化试验，得到涂层光泽度和色差随加速腐蚀时间的变化规律。利用灰色关联分析方法，对影响涂层腐蚀损伤的 9 个评定指标进行量化比较，计算出 2 种涂层防护体系评价指标与参考标准之间的关联度大小，并对 2 种涂层防护体系进行了综合评定。结果表明，2 种涂层光泽度和色差变化均随加速腐蚀时间增加而增大，TB06–9 涂层较 H06–076 涂层变化更明显，H06–076 涂层的防护效果优于 TB06–9 涂层。

关键词：加速腐蚀；灰色关联分析；涂层；腐蚀损伤

中图分类号：V216.5+7 **文献标志码**：A

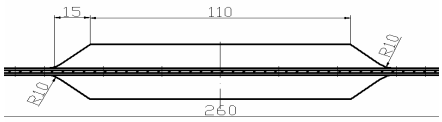
腐蚀是飞机结构的主要损伤之一[1]，涂层防腐是控制飞机结构腐蚀最有效、最经济的方法之一，在大气环境中使用的涂层，受大气环境因素影响会发生老化，进而基体腐蚀失效[2-3]。飞机上广泛采用涂层来达到防腐蚀的目的，对飞机涂层进行腐蚀条件下的试验研究，建立合理的寿命评估模型，研究腐蚀环境对飞机结构寿命的影响十分重要[4]。

在关于涂层腐蚀与防护的研究工作中，对比性的耐腐蚀试验是一种经常被采用的方法。在对比试验中，对于由单个性能指标评定试验结果是比较容易的，根据试验结果排序即可，但在绝大多数对比性腐蚀试验中，其评定指标不止一个，试验结果数据往往分散性很大，目前国内对于涂层性能评估往往依靠以往经验[5]。但对于复杂的试验系统，经验判断法要求判断者经验丰富，技术全面，否则可能造成误判；统计分析法计算繁杂，有时对于一些非定量化指标，处理起来困难[6]。灰色关联分析作为灰色系统理论的重要组成部分，其基本任务是基于行为的微观或宏观几何接近，以分析和确定因子间的影响程度或因子对主行为的贡献测度。本文应用灰色关联分析理论，探讨不同涂层防护体系的腐蚀损伤情况的分析方法，比较不同涂层的防护优劣的客观定量，为飞机在外场修理维护时涂层的选择提供参考依据。

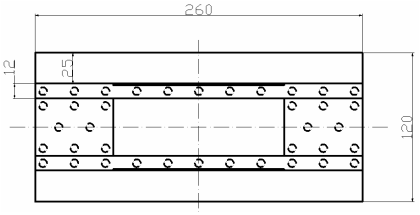
1 加速腐蚀试验

1.1 试验要求及过程

加速腐蚀试验选取的是模拟蒙皮与长桁铆接而成的结构件，蒙皮和长桁材料均为 LY12CZ，试验件尺寸如图 1 所示。试验件所用涂层为蒙皮，仅作阳极化处理后一面涂 H06-076 底漆(灰色)，长桁涂 H06-076 底漆；蒙皮另一面涂 TB06-9(黄色)底漆，长桁涂 TB06-9 底漆；底漆厚度均为 15~25 μm，共 10 件试验件，试验件如图 2 所示。



a) 正视图

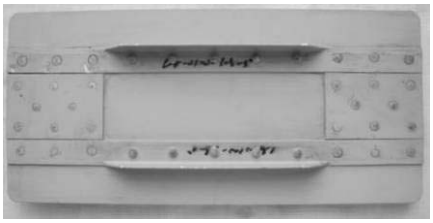


b) 俯视图

图 1 试验件尺寸图(单位：mm)

收稿日期：2012-06-11； **修回日期**：2012-08-30

作者简介：黄亚超（1989–），男，硕士；穆志韬（1963–），男，教授，博导，博士。



a) H06-076 涂层



b) TB06-9 涂层

图 2　蒙皮与长桁连接试验件

试验所用设备周期浸润试验箱如图 3 所示，当量加速试验环境谱如图 4 所示。



图 3　周期浸润腐蚀试验箱

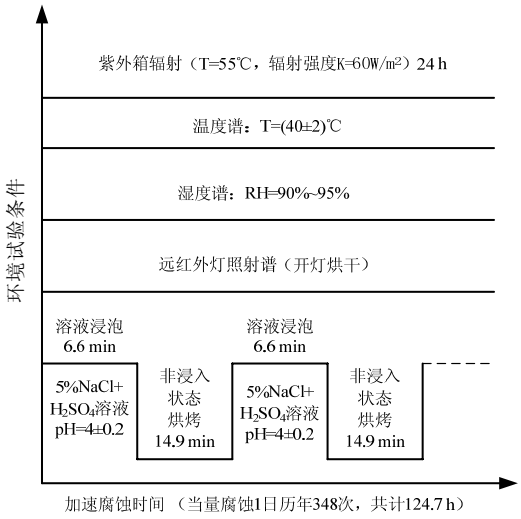
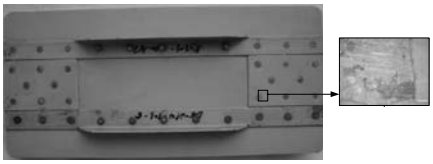
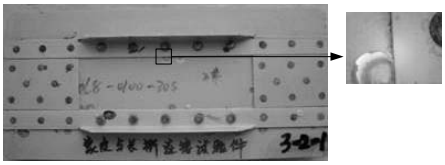


图 4　当量加速试验环境谱

根据试验件所用不同，防护体系分为涂 H06-076 底漆和涂 TB06-9 底漆。图 5 是试验件腐蚀试验到 10 个当量日历年时(文中以 a 当量表示当量日历年单位)2 种涂层的外观形貌及局部微观破坏图。



a) H06-076 涂层



b) TB06-9 涂层

图 5　试验件腐蚀 10 a 当量时腐蚀情况

1.2　光泽度及色差变化

光泽度表示的是材料表面对所获得的光泽的反射能力大小。涂层光泽度变化用失光率来表示，其反映出涂层表面随时间变化产生的腐蚀损伤程度，失光率越大，腐蚀老化越严重。选取 3 组试验件，用 XGP60 镜向光泽度仪测出的加速腐蚀不同年限时各试验件失光率变化如图 6 所示。图 6 表明，含 TB06-9 涂层试验件随着腐蚀时间的增加失光率逐渐增加，试验件涂层颜色变暗；对含 H06-076 涂层试验件，失光率变化并不大，说明试验件颜色变化不大，与试验件外观形貌统计一致。

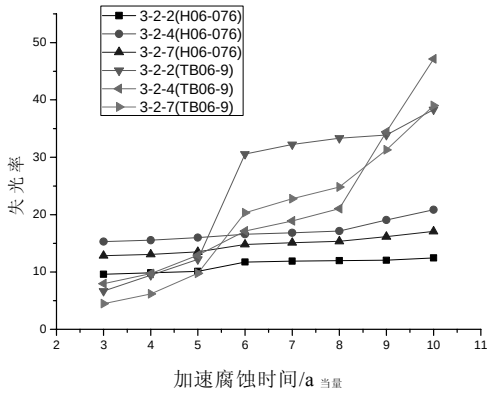


图 6　试验件腐蚀不同年限时失光率变化曲线

色差值 ΔE^*是利用 HP-200 精密色差仪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，$\Delta E^*=\sqrt{(\Delta L)^2+(\Delta a)^2+(\Delta b)^2}$，$\Delta E^*$

的值可以定量反映出被测涂层的色泽变化，ΔE^*的值越大，表明涂层腐蚀老化越明显。选取 3 组试验件，计算当量加速腐蚀不同年限时各试验件的色差值，结果如图 7 所示。图 7 表明，试验件表面随腐蚀试验时间的增加 H06-076 涂层的色差变化较大，H06-076 涂层色差变化较 TB06-9 涂层明显，但并未出现较大差异。

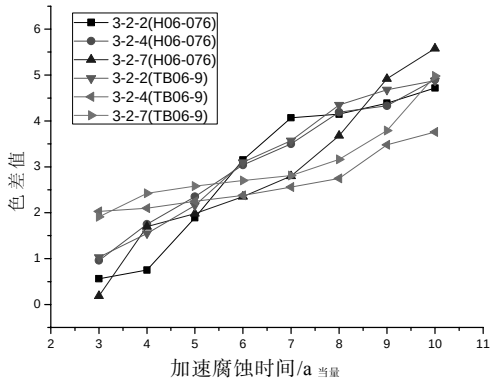


图 7　试验件加速腐蚀不同年限时色差变化曲线

试验中，涂层的老化失效主要是因为紫外光辐照损伤以及表面水分子吸附、扩散、溶渗作用进入涂层，到达涂层与金属基体分界面，再加上腐蚀性介质的渗入，使得涂层溶胀，导致涂层性能逐渐衰减而失效，表现为失光率及色差变化的增加。

2　基于灰色关联分析的涂层腐蚀损伤评定

2.1　涂层腐蚀损伤指标量化处理

参照 GB/T 1766-2008《色漆和清漆涂层老化的评级方法》,将飞机结构模拟试验件涂层的腐蚀损伤分为 6 级，用符号 S_1，S_2，…，S_6表示。涂层腐蚀损伤的评定指标主要有失光率 R_1、变色值 R_2、粉化程度 R_3、开裂大小 R_4和数量 R_5、起泡大小 R_6和密度 R_7、剥落最大尺寸 R_8和面积 R_9。GB/T 1766-2008《色漆和清漆涂层老化的评级方法》中腐蚀等级有的按数值大小定义，有的用语言定义，不便于定量分析，因而需对单项评定指标的各腐蚀等级进行量化处理。文献[7]对 GB/T1766-2008《色漆和清漆涂层老化的评级方法》中的指标进行了量化处理，量化处理后的结果如表 1 所示。

表 1　涂层腐蚀损伤单项评定指标量化结果

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
R_1	≤3	3 ~ 15	15 ~ 30	30 ~ 50	50 ~ 80	>80
R_2	≤1.5	1.5 ~ 3.0	3.0 ~ 6.0	6.0 ~ 9.0	9.0 ~ 12.0	>12.0
R_3	≤5	5 ~ 15	15 ~ 30	30 ~ 50	50 ~ 100	>100
R_4	≤0.05	0.05 ~ 0.1	0.1 ~ 0.2	0.2 ~ 0.5	0.5 ~ 1.0	>1.0
R_5	≤1	1 ~ 5	5 ~ 7	7 ~ 11	11 ~ 15	15 ~ 20
R_6	≤0.01	0.01 ~ 0.05	0.05 ~ 0.1	0.1 ~ 0.5	0.5 ~ 5.0	>5.0
R_7	≤1	1 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 17	17 ~ 25	>25
R_8	≤0.5	0.5 ~ 1	1 ~ 3	3 ~ 10	10 ~ 30	>30
R_9	≤0.1	0.1 ~ 0.3	0.3 ~ 1	1 ~ 3	3 ~ 15	>15

2.2　涂层腐蚀损伤指标描述

经对加速腐蚀 10 a 当量的试验件涂层腐蚀损伤情况观测记录，选取 1 个试验件结果，如表 2 所示。

表 2　加速腐蚀 10 a 当量试验件涂层腐蚀损伤检测结果

	R_1/%	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6/mm	R_7	R_8	R_9/%
H06-076	12.45	4.72	很轻微，试布上刚可观察到微量颜料粒子	无可见开裂	无可见开裂	表面有 2~3 的泡	有中等数量的泡	无可见剥落	无可见剥落
TB06-9	38.33	4.88	轻微，试布上沾有少量颜料粒子	正常视力下目视清晰	少量可以察觉	表面有 3~6 的泡	有中等数量的泡	有直径约 7 mm 的剥落	2.42

根据表 1 所示,将表 2 中加速腐蚀 10 个当量日历年的试验件涂层腐蚀损伤指标量化处理，其中粉化、开裂、起泡几项指标的量化是在参照 GB/T 1766-2008《色漆和清漆涂层老化的评级方法》下在表 1 中确定对应取值范围而定，数据如表 3 所示。

表 3 加速腐蚀 10 a 当量试验件涂层腐蚀损伤指标量化结果

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9
H06-076	12.45	4.72	10	0.02	0.5	2.5	13	0.4	0.08
TB06-9	38.33	4.88	18	0.38	5.8	4.9	16	7	2.42

2.3 灰色关联度的计算

2.3.1 权重计算

本文采用离差权法确定指标权重，其原理是若某项指标的标准差越大，那么其指标参数的变异程度就越大，提供的信息量也越大，在评价中所起的作用越大，则其权重也应越大；反之，若某项指标的标准差越小,那么其指标参数的变异程度就越小，提供的信息量也越小，在评价中所起的作用越小，其权重也应越小；据此，用每一项指标参数的标准差作为该指标的权重[8]，即

$$W_k=\frac{\sigma_k}{\sum_{k=1}^{m}\sigma_k}。\tag{1}$$

式(1)中：

$$\sigma_k=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}((x_i(k)-\bar{x}(k))^2}\quad;\quad \bar{x}(k)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i(k)。$$

得到 9 个腐蚀损伤指标的权重值如表 4 所示，R_1、R_6、R_8、R_9 所占权重之和达到 0.9 以上，故可以判断涂层的腐蚀损伤比较侧重于失光率、起泡大小、剥落最大尺寸与剥落面积，而其他指标比较次要。计算时，选取这 4 个指标作为参考，既简化了计算，也不致对评价结果有较大影响。

表 4 试验件涂层腐蚀损伤指标权重值

评定指标	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9
指标权重	0.028 5	0.000 3	0.005 3	0.023 8	0.017 5	0.793 6	0.009 9	0.043 6	0.077 4

2.3.2 灰色关联度的计算

根据文献[9]中的关于灰色关联度的计算方法，对 2 种不同涂层的灰色关联度进行计算。对于涂层的腐蚀老化，理想来说，不论失效损伤面积大小，都会有腐蚀或老化损伤，只是希望尽量使腐蚀损伤量最小。故根据量化指标，选取 R_1、R_6、R_8、R_9 4 个权重最大指标的等级 S_1 的值作为参考数列，2 种涂层的指标值作为比较数列，对参考数列及比较数列采用初值法进行无量纲化处理，求得差序列以及灰色关联系数，再加入指标权重值，进而得到 2 种涂层的灰色关联度为：

$$\gamma_1=0.9360\ ,\ \gamma_2=0.8926\ ,\ \gamma_1>\gamma_2。\tag{2}$$

由计算结果可知，故 H06-076 涂层防护体系较 TB06-9 涂层防护体系防护效果更好。

2.3.3 涂层腐蚀损伤定量等级评定

根据涂层腐蚀损伤指标的量化结果，通过插值法进行计算，选取其中权重最重的 4 个指标，计算出试验件涂层损伤的评定等级，结果见表 5。依据评定结果，TB06-9 涂层腐蚀明显比 H06-076 涂层腐蚀严重，此结果也与 2.3.2 的结论一致。

表 5 试验件涂层腐蚀损伤综合评定等级

试验件涂层	单项评定等级				综合评定等级
	R_1	R_6	R_8	R_9	
H06-076	2.787 5	4.444 4	0.8	0.8	2.208
TB06-9	4.19	4.977 8	2.4	3.71	3.819 7

2.4 综合评定结果分析

由 2.3 的评定结果可以看出，2 种涂层防护体系在经过 10 a 当量加速腐蚀时，腐蚀损伤情况差异明显。蒙皮阳极化处理后涂 H06-076 底漆，长桁涂 H06-076 底漆的腐蚀损伤综合评定等级远低于蒙皮阳极化处理后涂 TB06-9 底漆，长桁涂 TB06-9 底漆的涂层，其防护效果较好。

3 结论

1)对含不同涂层防护体系的飞机典型结构模拟试验件进行当量加速腐蚀试验，较好地再现了其腐蚀过程；对腐蚀试验后涂层的光泽度及色差变化规律进行分析，光泽度及色差值都随腐蚀时间增加而

变大，TB06-9 涂层的失光率较 H06-076 涂层更为明显，2 种涂层的色差变化差异不大；

2)利用加权灰色关联分析方法，计算出了 2 种不同涂层防护体系与参考标准之间的关联度大小；根据计算结果，对不同涂层防护体系的优劣进行了评定，蒙皮阳极化处理后涂 H06-076 底漆，长桁涂 H06-076 底漆的涂层比蒙皮阳极化处理后涂 TB06-9 底漆，长桁涂 TB06-9 底漆的涂层防护效果好。

参考文献：

[1] 金平, 杨凯, 薛庆增. 腐蚀环境下材料的疲劳缺口系数[J]. 海军航空工程学院学报, 2010,25(5):485-492.

[2] 王俊芳, 杨晓然. 军用防腐涂料涂装的发展探讨[J]. 装备环境工程, 2005,2(6):45-47.

[3] 罗振华, 蔡键平, 张晓云, 等. 耐候性有机涂层加速老化试验研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2003, 32(3):31-35.

[4] 陈跃良, 张勇. 军用飞机结构日历寿命相关问题的思考[J]. 航空工程进展, 2010,1(4):311-316.

[5] 周小敏, 刘钧泉. 有机涂层使用寿命探讨[J]. 装备环境工程, 2010,7(1):57-60.

[6] 汪学华, 张伦武. 涂层大气腐蚀的模糊综合评定[J]. 环境技术, 2001(6):35-38, 46.

[7] 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.

[8] 刘明周, 龚任波, 扈静, 等. 基于灰色关联分析的操纵装置操纵舒适性评价[J]. 中国机械工程, 2011, 22(21):2642-2645.

[9] 罗佑新, 张龙庭, 李敏, 等. 灰色系统理论及其在机械工程中的应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2001:18-30.

Comparative Research on Protection Coating Corrosion Resistant Test of Aircraft Typical Structure

HUANG Ya-chao[1, 2]，MU Zhi-tao[2]，SU Wei-guo[2]

（1．Nanchang Hangkong University，Nanchang 330063，China；
2．Qingdao Branch of NAAU，Qingdao Shandong 266041，China）

Abstract: Based on accelerated corrosion and ageing test for typical structure with two coatings of aircraft, the change law of gloss and chromatic aberration for coating along with the accelerated corrosion time was obtained. Using the grey relational analysis method to compare nine evaluating indexes that influence coating corrosion damage quantitatively, the relational degree between two coating protecting systems and reference standard were figured out, a comprehensive evaluation for the two coating protected systems was obtained. The result indicated that the variation of gloss and chromatic aberration for two coatings increased along with the accelerated corrosion time, the change of TB06-9 coating was more obvious than H06-076 coating, so the H06-076 coating was better than the TB06-9 coating.

Key words: accelerated corrosion; grey relational analysis; coating; corrosion damage