

LY12CZ 铝合金飞机内外结构涂层 日历有效性试验研究

刘学君¹, 杨晓华¹, 辛志东², 张泰峰¹

(1. 海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041; 2. 南昌航空大学, 南昌 330000)

摘要: 基于外部和内部涂层加速试验环境谱, 分别对某型飞机的 LY12CZ 铝合金内、外部结构涂层进行加速老化试验, 统计分析了两种涂层腐蚀老化表面形貌, 得到了光泽度和色差随加速腐蚀时间的变化规律, 并对涂层的有效性进行了综合评定。试验结果表明, LY12CZ 铝合金外部结构涂层的有效期为 12 a, 内部结构涂层的有效期为 10 a, 轻微划痕对外部结构涂层的日历有效性影响不大, 而对内部结构涂层有一定影响。

关键词: 涂层; 加速腐蚀; 色差; 光泽度

中图分类号: V216.5+7; TG174.46 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)05-0042-06

Study of Calendar Validity of LY12CZ Aluminum Alloy Aircraft Structure Coatings

LIU Xue-jun¹, YANG Xiao-hua¹, XIN Zhi-dong², ZHANG Tai-feng¹

(1. Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao 266041, China;

2. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Based on accelerated corrosion environmental spectrums for surface coatings of external and internal structure, accelerated aging test was carried out on surface coatings of external and internal structure of LY12CZ aluminum alloy of a certain type of aircraft. Surface morphology of corrosion and aging of two kinds of surface coatings were statistically analyzed. The time varying laws of glossiness and chromatic aberration were obtained. The validity of the surface coatings was comprehensively evaluated. The results showed that the term of validity of surface coatings of external structure of LY12CZ aluminum alloy is about 12 a, and the term of validity of surface coatings of internal structure of LY12CZ aluminum alloy is about 10 a. Scratch has little impact on surface coatings of external structure, but scratch has some impact on surface coatings of internal structure.

Key words: coating; accelerated corrosion; glossiness; chromatic aberration

防护涂层对飞机结构抵抗环境腐蚀有着举足轻重的作用^[1], 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, 进而使基体腐蚀失效^[2-5]。涂层

的日历有效性是机体结构日历寿命评定的基础^[6-9]。

针对某型飞机的主体材料 LY12CZ 铝合金, 制备了飞机机体外部结构涂层和内部结构涂层试验件,

收稿日期: 2012-06-04

作者简介: 刘学君(1989—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要研究方向为材料的腐蚀与疲劳。

分别采用外部和内部涂层加速试验环境谱进行腐蚀试验,根据 GB/T 1766—2008《色漆和清漆涂层老化的评级方法》,评定该机 LY12CZ 铝合金防护体系的耐腐蚀性能^[10]。

1 试验方法

1.1 试验件

涂层试验件材料为 LY12CZ 铝合金,结构外形及尺寸如图 1 所示。涂层体系有两种:

- 1) 内部结构涂层: S06-1010H 聚氨酯底漆(厚度为 30~40 μm);
- 2) 外部结构涂层: H06-3 锌黄底漆(厚度为 30~40 μm)+ S04-20 聚氨酯磁漆、面漆(厚度为 50~60 μm)。

试验件状态有两种:完备试件、划伤试件(试验件一端按 60° 夹角划两条交叉透底的切割线)。

因此,试验件共有 4 种。

1.2 试验方法

根据该机型服役特点及对飞机结构局部环境的修正,借鉴美国 CASS 环境谱,确定了外部结构涂层加速试验环境谱和内部结构涂层加速试验环境谱。其中一个循环块谱相当于外场日历年限 1 a。

图 2a 为典型外部结构涂层加速试验环境谱,在

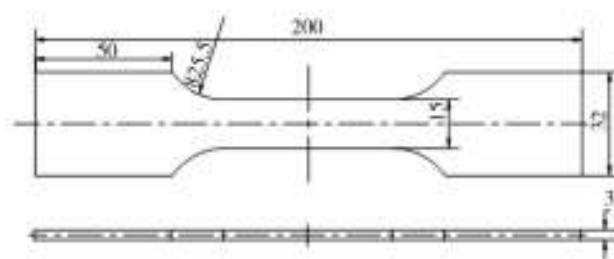
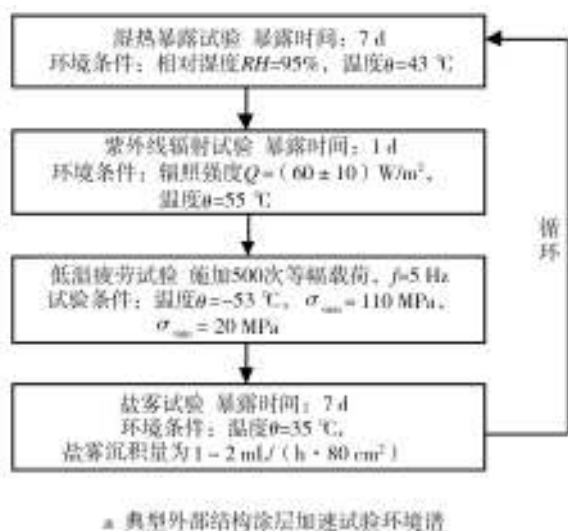


图 1 涂层试验件

Fig. 1 Coating specimen

CHALLENGE 1200 温湿试验箱中进行湿热暴露试验,然后在 ZN-P 紫外线辐射试验箱中进行紫外线照射试验,在 MTS810 电液伺服疲劳试验机上进行低温疲劳试验,在 DCTC 1200P 盐雾腐蚀试验箱中进行盐雾试验。

图 2b 为典型内部结构涂层加速试验环境谱。在 CHALLENGE 1200 温湿试验箱中进行湿热暴露试验,然后进行常温疲劳试验,施加若干次等幅载荷, $f=5\text{ Hz}$,最后进行盐雾试验。

2 试验结果及分析

针对 4 种试验件,进行了当量日历年分别为 6, 8, 10, 12 a 的加速腐蚀试验。

2.1 涂层腐蚀老化表面形貌

表 1 为典型结构涂层腐蚀老化表面形貌。观察



图 2 典型结构涂层加速试验环境谱

Fig. 2 Accelerated corrosion environmental spectrums for surface structure coating

表1 典型结构涂层腐蚀老化表面形貌统计
Table 1 Statistical table of surface morphology of corrosion and aging of typical structure coating

涂层	6 a	8 a	10 a	12 a
外部结构涂层 (完备试件)	出现很轻微的失光、变色和粉化,表面出现起泡现象的试件增多	失光程度加重,起泡现象增加,气泡直径加大	出现轻微失光、变色和粉化,表面出现起泡现象的试件普遍,但气泡数量很少	明显失光,个别试件起泡处开始出现开裂现象
外部结构涂层 (划伤试件)	出现很轻微的失光、变色和粉化,表面出现起泡现象的试件增多,划叉处腐蚀扩展<1 mm	失光程度加重,起泡现象增加,气泡直径加大,划叉处腐蚀扩展<1 mm	出现轻微失光、变色和粉化,表面出现起泡现象的试件普遍,但气泡数量很少,划叉处腐蚀扩展<1 mm	明显失光,个别试件起泡处开始出现开裂现象,划叉处腐蚀扩展约为1 mm
内部结构涂层 (完备试件)	出现轻微失光,很轻微的变色和粉化,表面出现起泡现象的试件增多	失光程度加重,起泡现象增加,气泡直径加大	明显失光,轻微变色和粉化,表面出现起泡现象的试件普遍,但气泡数量较少,开始出现开裂现象	明显失光、变色和粉化,出现中等数量的气泡,个别试件出现少量轻微开裂现象,基体开始出现轻微腐蚀
内部结构涂层 (划伤试件)	出现轻微失光,很轻微的变色和粉化,表面出现起泡现象的试件增多,划叉处腐蚀扩展<1 mm	失光程度加重,起泡现象增加,气泡直径加大,划叉处腐蚀扩展<1 mm	明显失光,轻微变色和粉化,表面出现起泡现象的试件普遍,但气泡数量较少,开始出现开裂现象,划叉处腐蚀扩展约为1 mm	明显失光、变色和粉化,出现中等数量的气泡,个别气泡直径很大,个别试件出现少量轻微开裂现象,基体开始出现轻微腐蚀,划叉处腐蚀扩展约为1 mm

表明:完备试件外部结构涂层,经过12个周期加速腐蚀试验(当量12 a),与试验前试验件相比,试验件表面涂层出现了明显失光,轻微变色和粉化,试验件表面仅出现少量起泡现象,并且个别试件靠近棱角处较大的气泡开始出现开裂现象,表明该涂层体系没有失效,表现出优良的抗老化性能;而对于典型外部结构涂层(划伤试件)的腐蚀情况看,与完备试件基本相同,只是在划叉处划痕扩展了1 mm,表明该涂层体系没有失效。

典型内部结构涂层(完备试件、划伤试件)经过10个周期加速腐蚀试验,腐蚀情况较轻,满足涂层体系没有失效的判据,认为涂层没有失效,但是经过12个周期加速腐蚀试验(当量12 a),与试验前试验件相比,试验件表面涂层出现了明显失光、变色和粉化,并且出现了少量轻微开裂现象,基体开始出现轻微腐蚀,但由于试验件表面出现了一定数量的气泡,并且气泡的直径很大,认为该涂层体系失效。但是划伤试件划叉处腐蚀扩展仅为1 mm左右,说明划痕对涂层有效期影响较小。

2.2 涂层失光率变化情况

光泽是物体的一种外观光学特性。镜向反射的结果使材料表面所获得的光泽称为镜向光泽,其反射能力的大小称为镜向光泽度。涂层光泽度变化用失光率来表示,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,腐蚀越严重。

试验前,利用XGP60光泽度计对试验件表面涂层的光泽度进行了测量,光泽度都在70 Gs以上,说明该涂层体系具有很好的光泽。进行不同周期试验以后,测量相应的光泽度,用式(1)计算失光率:

失光率 = $\frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$ (1)

式中:A₀为老化前光泽测定值;A₁为老化后光泽测定值。

表2为失光率随加速腐蚀时间的变化统计结果,利用表2的数据进行Sigmoidal函数拟合,拟合结果如图3所示。

通过对试验周期T与失光率进行回归分析,4种

表2 失光率随加速腐蚀时间变化的统计结果

Table 2 Statistical results of gloss reduction laws with time

试验 周期/a	失光率/%			
	外部完备	外部划伤	内部完备	内部划伤
0	0	0	0	0
2	5	5.5	8.5	8.5
4	13.5	12.5	17	17
6	18	20	25	26
8	24.5	26.5	28.5	29
10	28	29	34	35
12	33	32	38	39

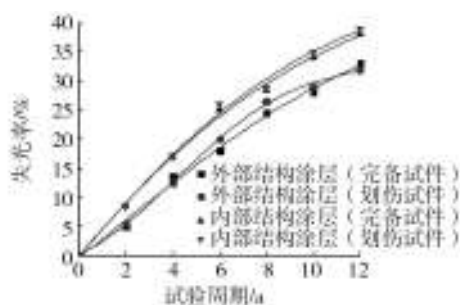


图3 失光率随加速腐蚀时间的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of gloss reduction with time of accelerated corrosion

试验件拟合的相关系数都达到了0.996,其关系表达式为:

$$y = a_2 + \frac{(a_1 - a_2)}{1 + \exp[(T - x_0)/x_1]} \quad (2)$$

式中: a_1, a_2, x_0, x_1 为材料参数。

可见,全部试件都是随着试验周期的增加,涂层的失光率上升,但上升的斜率逐渐减小。光泽度的下降与涂层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紫外辐射或紫外辐射+间歇盐雾交替加速试验后涂层表面形貌的变化,证实了两种暴晒情况下涂层表面均存在微小气泡,QUV情况下的气泡尺寸随暴露时间的延长而增大,气泡的发展增加了表面粗糙度和早期的失光。在本试验过程中,试验件表面涂层的失光及失光率变化也正是这个原因^[6]。

通过比较可以看到,经过12个周期,典型外部结构涂层(完备试件、划伤试件)的失光率基本都在35%左右,而典型内部结构涂层(完备试件、划伤试件)的失光率在38%左右,说明对于外部结构涂层来说,内

部结构涂层缺少面漆,对于有害介质腐蚀的防护能力较差;划痕会对防护涂层产生一定程度上的破坏,使氧气和腐蚀性离子更容易通过涂层中的宏观缺陷和微观缺陷扩散到涂层/金属基体界面,使其抗腐蚀能力有一定影响。而划伤试件的失光率比完备试件的失光率要略高,但是基本不影响其抗腐蚀能力。

2.3 涂层色差变化情况

通过测量涂层腐蚀老化后与老化前原始试验件之间的色差值(ΔE^*),可得到表面涂层色差随加速腐蚀时间的变化曲线。 ΔE^* 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。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。其中,人工紫外线老化作用后涂层失色增加,特别是湿态环境下,涂层的变色、粉化大大加快。有机涂层的主要成分为有机聚合物,有机聚合物在紫外作用引起的光氧化和水解是导致涂层色泽变化的直接原因。

表3为色差随加速腐蚀时间变化的统计结果,利用表3的数据进行Gaussian函数拟合,拟合结果如图4所示。

表3 色差随加速腐蚀时间的变化曲线

Table 3 Statistical results of chromatic aberration varying laws with time

试验 周期/a	色差值			
	外部完备	外部划伤	内部完备	内部划伤
0	0	0	0	0
2	0.8	0.5	0.5	0.9
4	1.4	1.3	1.8	1.6
6	2.1	2.2	2.7	2.9
8	2.8	2.8	4.1	3.9
10	4.5	4.3	5.6	5.7
12	5.6	5.8	7.1	7.3

通过对试验周期 T 与色差进行回归分析,4种试验件拟合的相关系数都达到了0.998,其关系表达式为:

$$y = y_0 + \frac{A}{W \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \exp\left[-2\left(\frac{x - x_c}{W}\right)^2\right] \quad (3)$$

式中: y_0, x_c, A, W 为材料参数。

从图4可以看到,涂层的色差值随着时间的增

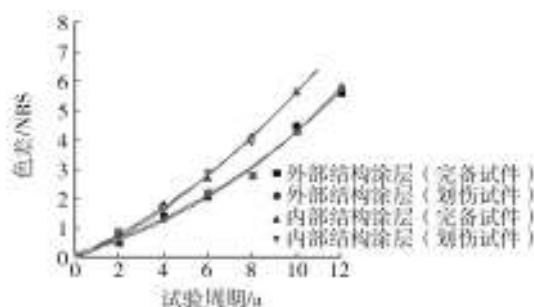


图4 色差随加速腐蚀时间的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of chromatic aberration with time of accelerated corrosion

长而逐渐增大;经过12个周期的加速腐蚀试验,外部结构涂层色差值在5.5左右,发生轻微的变色现象;内部结构涂层色差值约在7左右,发生了明显的变色现象。说明外部结构涂层的抗老化能力要优于内部结构涂层。

2.4 涂层的腐蚀损伤评定

参照 GB/T 1766—2008《色漆和清漆涂层老化的

评级方法》中“保护性漆膜综合老化性能等级的评定”,按老化试验过程中出现的单项破坏等级评定漆膜老化的综合等级,分0,1,2,3,4,5共6个等级,分别代表漆膜老化性能的优、良、中、可、差、劣。涂层如有数种破坏现象,评定综合等级时,应按最严重的一项评定。

涂层失效判据原则上是指无法通过经济修理恢复防护涂层的完好状态。对于完备试件,参照《飞机结构日历寿命体系评定》一书中,非连接形式的腐蚀失效关键部位,则允许开裂、剥落,并有基体轻微腐蚀,但深度不大,可以通过打磨后重新涂漆使之复原,蚀点过深则认为涂层失效。对于划伤试件,划叉处锈蚀扩展超过2 mm,视为失效。

根据表1,4及失效判据原则,典型外部结构涂层抗腐蚀性能要优于典型内部结构涂层;完备试件要略优于划伤试件;典型外部结构涂层(包括完备试件和划伤试件)有效期为12 a,典型内部结构涂层(完备试件)有效期为12 a,典型内部结构涂层(划伤试件)有效期为10 a。

表4 经过6,8,10,12个周期加速腐蚀试验后的评定等级统计

Table 4 Statistical table of ratings of corrosion after 6, 8, 10, 12 periods of accelerated corrosion test

涂层	综合评定 (6 a)	划叉扩展 (6 a)	综合评定 (8 a)	划叉扩展 (8 a)	综合评定 (10 a)	划叉扩展 (10 a)	综合评定 (12 a)	划叉扩展 (12 a)
外部结构涂层(完备试件)	1		1		2		2	
外部结构涂层(划伤试件)	1	1 mm	1	1 mm	2	1 mm	2	1 mm
内部结构涂层(完备试件)	1		2		2		3	
内部结构涂层(划伤试件)	2	1 mm	3	1 mm	3	1 mm	4	1 mm

3 结论

1) 外部结构涂层(包括完备试件和划伤试件)有效期为12 a,完备试件内部结构涂层有效期为12 a,划伤试件内部结构涂层有效期为10 a。

2) 划伤试件与完备试件相比,涂层的有效期没有明显缩短,这是因为一方面试验中采用刀片划伤,划痕很细;另一方面,表明涂层与金属基体的结合力很强,抵抗腐蚀扩展的能力较好。这就表明在装备的实际使用过程中,如果涂装质量好,即使涂层有很小的划伤,也不会对涂层的有效期产生明显影响。

3) 内部结构涂层缺少面漆,对于有害介质腐蚀

的防护能力较差;划痕会对防护涂层产生一定程度上的破坏,使氧气和腐蚀性离子更容易通过涂层中的宏观缺陷和微观缺陷扩散到涂层/金属基体界面,使其抗腐蚀能力下降。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王光雍. 自然环境的腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997.
- [3] 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.
- [4] 陈群志, 康献海, 刘建光, 等. 军用飞机腐蚀防护与日历寿命研究[J]. 中国表面工程, 2010, 23(4): 1—6.

- [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] 刘文琰,李玉海. 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.
- [7] 罗振华,蔡健平,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,2003,31(3):31—35.
- [8] 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(3):35—38,46.
- [9] 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] 牟献良,张伦武,袁艺,等. 涂层老化评级方法标准中的问题探讨[J]. 装备环境工程,2010,7(6):190—192.

(上接第14页)

由于孔蚀率反映了试件表面的腐蚀损伤程度,而腐蚀损伤程度与该材料的腐蚀机理有关,相关文献关于铝合金的电化学腐蚀机理研究表明^[13—14]:铝合金电化学腐蚀在腐蚀初期的类型为点蚀,在该阶段点蚀主要沿着垂直于试件表面方向向内部和平行于表面的方向发展,腐蚀发展速度缓慢,因此孔蚀率变化趋势较为平缓;而铝合金电化学腐蚀在后期的腐蚀类型主要为剥蚀,腐蚀在向材料基体内部深入的同时,腐蚀产物堆积严重,会造成表层铝合金大面积脱落,有较多铝合金基体露出,因而腐蚀面积大幅度增加,所以点蚀率增长趋势较快。由上述分析可见,LD2铝合金点蚀率随腐蚀年限的变化规律与其电化学腐蚀机理完全吻合,说明采用基于腐蚀图像数值化分析方法得到的LD2铝合金孔蚀率变化规律合理准确。

5 结论

利用图像数字处理技术对LD2铝合金材料的加速腐蚀形貌图像进行数字化及二值化处理分析,依据二值化分析结果,计算得到不同加速腐蚀周期下的材料孔蚀率。从数据处理过程及结果来看,腐蚀图像数字化处理方法可较好地将腐蚀区和基体材料区分开,并精确地计算出孔蚀面积及腐蚀坑数目,解决了传统方法难以精确计算孔蚀面积的问题。通过孔蚀率计算发现,LD2铝合金加速腐蚀过程中孔蚀率的变化规律与其腐蚀机理完全吻合,采用的孔蚀率计算方法具有广阔的工程应用前景。

参考文献:

- [1] 苏亚军,钟建华,左霞. 铝合金型材表面接触痕的成因及

对策[J]. 表面技术,2003,32(4):69—71.

- [2] 汪定江,郭必新. 飞机铝合金结构件腐蚀的原位修复工艺研究[J]. 表面技术,2002,31(1):53—54.
- [3] 张有宏,吕国志,李仲,等. LY12CZ铝合金结构腐蚀疲劳裂纹扩展与剩余强度研究[J]. 航空学报,2007,28(2):332—335.
- [4] 杨晓华,姚卫星,陈跃良. 日历腐蚀环境下LY12CZ铝合金力学性能研究[J]. 机械强度,2003,25(2):227—228.
- [5] 崔屹. 数字图像处理技术与应用[M]. 北京:电子工业出版社,1997:51—67.
- [6] 沈庭芝. 数字图像处理及模式识别[M]. 北京:北京理工大学出版社,1998:36—49.
- [7] 穆志韬. 海军飞机结构腐蚀损伤规律及使用寿命研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2002.
- [8] 陈群志,李喜明,周希沅,等. 飞机结构典型环境腐蚀当量关系研究[J]. 航空学报,1998,19(4):414—418.
- [9] 纪纲,李红梅,张伦武. 对镀层材料外观腐蚀特征的识别及分析处理[J]. 表面技术,2001,30(1):21—24.
- [10] ITZHAK D, DINSTEIN I, ZILBERBERG T. Pitting Corrosion Evaluation by Computer Image Processing[J]. Corrosion Science, 1981, 21(1):17—22.
- [11] SILVA J W J, BUSTAMANTE A G, CODARO E N, et al. Morphological Analysis of Pit Formed on Al 2024-T3 in Chloride Aqueous Solution[J]. Applied Surface Science, 2004, 236(114):356—365.
- [12] 吕俊哲. 图像二值化算法研究及其实现[J]. 科技情报开发与经济,2004,14(2):266—268.
- [13] 王逾涯,韩恩厚,孙祚东,等. LY12CZ铝合金在EXCO溶液中的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程,2005,2(1):20—24.
- [14] 陈群志,崔常京,孙祚东,等. LY12CZ铝合金腐蚀损伤的概率分布及其变化规律[J]. 装备环境工程,2005,2(3):1—6.