

加速腐蚀当量加速关系研究方法综述

江雪龙, 杨晓华

(海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 为了进一步研究当量加速关系, 归纳了现有腐蚀损伤当量化的研究方法, 详细介绍了基于电化学原理、物理参量和力学损伤的当量折算法, 讨论了各种方法的优劣和所适用范围。基于电化学原理的当量加速关系研究方法适合用于制定飞机金属结构加速试验环境谱, 以物理参量为基准的当量折算法适用于建立疲劳关键部位、腐蚀关键部位的涂层及金属基体等各种加速试验环境谱的当量加速关系, 力学损伤对比法适合用于结构疲劳关键部位。最后得出针对不同材料、不同部位应该采用不同的当量加速关系的结论。

关键词: 加速腐蚀; 腐蚀损伤; 当量折算系数

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2014.06.009

中图分类号: V215.2 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)06-0050-09

Review on the Research Methods of Equivalent Accelerated Relationship in Accelerated Corrosion

JIANG Xue-long, YANG Xiao-hua

(Qingdao Campus of Naval Aeronautical Academy, Qingdao 266041, China)

ABSTRACT: In order to further study the equivalent accelerated relationship, this paper summarized the existing research on corrosion damage equivalent methods, described the equivalent conversion methods in detail based on the electrochemical principle, physical parameters and mechanical damage, and discussed the advantages and disadvantages of the various methods. The equivalent accelerated relationship research method based on electrochemical principle is suitable for developing the accelerated test environmental spectrum for the metal structure of aircraft, the equivalent accelerated relationship research method based on physical parameters is suitable for establishing equivalent accelerated relationship of accelerated test environmental spectra for the fatigue key sites, the coating of the corrosion key sites and the metal matrix, while the mechanical damage comparison method is suitable for the key sites of structural fatigue. Finally the conclusion was drawn that different equivalent accelerated relationship should be adopted for different materials and different sites.

KEY WORDS: accelerated corrosion; corrosion damage; equivalent conversion coefficient

收稿日期: 2014-06-29; 修订日期: 2014-07-16

Received : 2014-06-29; Revised: 2014-07-16

作者简介: 江雪龙(1990—), 男, 福建龙岩人, 硕士研究生, 主要研究方向为飞机结构强度、飞机寿命可靠性。

Biography: JIANG Xue-long(1990—), Male, from Longyan, Fujian, Master Student, Research focus: aircraft structure strength and the reliability life of aircraft.

为了在实验室再现自然腐蚀环境对结构材料的损伤作用,有必要寻找一种当量关系,通过当量关系将自然条件下气候环境和化学环境对金属的腐蚀作用“当量”成实验室的“严酷”试验环境的作用,以达到缩短试验时间的目的^[1-5]。加速腐蚀环境谱有很多,如何针对不同的加速试验方法、不同的研究对象,来确定相应的当量加速关系,使得加速试验真实、准确地反应外场实际环境对机体结构的损伤具有重要的工程意义^[6-9]。

确定腐蚀损伤当量加速关系的一般方法是,建立结构关键部位地面停放环境谱,选择描述腐蚀损伤发展的速度和一定时间内腐蚀程度的适当参数,以腐蚀参数相等作为准则,建立实验室加速腐蚀环境谱与外场地面停放环境谱的时间折算关系。若使用年限为 T ,实验室加速试验环境谱作用时间为 t ,则当量折算关系 β 定义为:

$$\beta = \frac{T}{t} \quad (1)$$

现有当量关系的建立通常采用下述 3 种方法:基于电化学原理的当量折算法;以物理参量为基准的当量折算法;基于腐蚀损伤相同则力学性能相同的力学损伤对比法。文中对现有的腐蚀损伤当量化研究方法纳长集粹,详细介绍了基于电化学原理、物理参量和力学损伤的当量折算法。

1 电化学原理

当金属和环境中的电解质接触时,发生的金属腐蚀现象是由于金属和电解质构成的腐蚀电池作用而引起的,这个过程称为电化学腐蚀。其腐蚀过程由阳极氧化反应和阴极还原反应这两个同时进行且相对独立的过程组成。电化学腐蚀过程中因发生电荷转移而产生电流,而化学腐蚀过程中没有电流产生。由于飞机上发生电化学腐蚀的情况远多于发生化学腐蚀的情况,因此基于电化学原理进行当量折算是合理的。目前,已有研究人员选用腐蚀电流为参量,建立了不同服役环境条件之间的当量折算关系^[10-21]。

1.1 腐蚀电流法

腐蚀电流法是基于金属电化学腐蚀规律的方法,该方法是以腐蚀电流描述腐蚀损伤发展快慢,以

腐蚀电量描述一定时间内的腐蚀程度,并基于腐蚀损伤等效原则,即腐蚀电量相等来建立当量加速关系。

由法拉第定律可知,材料在服役环境下 t 时间内的腐蚀量为:

$$Q = \frac{1}{F} \int_0^t I_c(t) dt \quad (2)$$

式中: F 为法拉第常数。在实验室加速腐蚀环境下,材料的腐蚀电流为 I'_c ,在加速腐蚀试验时间 t' 内,材料的腐蚀量 Q' 可表示为:

$$Q' = \frac{1}{F} \int_0^{t'} I'_c(t) dt \quad (3)$$

按腐蚀等效原则,材料在服役环境下的腐蚀量 Q 等于实验室加速腐蚀环境作用下的腐蚀量 Q' , $Q = Q'$,即:

$$\frac{1}{F} \int_0^t I_c(t) dt = \frac{1}{F} \int_0^{t'} I'_c(t) dt \quad (4)$$

腐蚀电流 I_c 与 I'_c 均为时间的函数,由于飞机结构材料无论在服役环境作用的使用年限范围内还是在对应的加速试验环境作用时间范围内, I_c, I'_c 的变化都很小,所以可以认为 I_c, I'_c 为常数,于是(4)式可写成:

$$I_c \times t = I'_c \times t' \quad (5)$$

那么,当量折算系数 α 可表示为:

$$\alpha = \frac{I_c}{I'_c} \quad (6)$$

1.2 环境严酷性指数

文献[22]建立了环境严酷性指数(ESI)。该指数是依据美国材料与试验协会制定的 ASTM G10289《电化学测量值计算腐蚀率和相关量的标准方法》建立的描述腐蚀损伤的环境变量。其表达式为:

$$ESI = \sum i_{cor}^m t_m = \frac{\rho h_{cor}}{K_1 EW} \quad (7)$$

式中: i_{cor}^m 为腐蚀电流密度; t_m 为在第 m 种环境下作用时间; ρ 为密度; h_{cor} 为腐蚀量; $K_1 = 3.27 \times 10^{-3}$; EW 为单元元素当量权。

可以用在不同种环境要素中材料的腐蚀电流密度之和、穿透率或腐蚀失重率来表示环境严酷性指数。根据腐蚀损伤等效原则,多种环境要素作用时间内产生的腐蚀损伤应等于标准环境要素作用时间

内产生的环境严酷性指数,则得:

$$h_{\text{cor}} = \sum K_1 \frac{i_{\text{cor}}^m}{\rho} t_m EW = K_1 \frac{i_{\text{cor}}^0}{\rho} t_0 EW \quad (8)$$

$$t_0 = \sum \left(\frac{t_{\text{cor}}^m}{t_{\text{cor}}^0} \right) t_m \quad (9)$$

令:

$$\beta_m = \frac{i_{\text{cor}}^m}{i_{\text{cor}}^0} t_m \quad (10)$$

式中: t_{cor}^0 为标准环境要素作用下的腐蚀电流;

i_{cor}^m 为第 m 种环境要素作用下的腐蚀电流。

则 β_m 称之为环境当量化系数:

$$\beta_m^{-1} = \frac{t_m}{t^0} \quad (11)$$

此意为在标准环境要素作用 1 d 的腐蚀损伤相当于在第 m 种环境要素作用时间的腐蚀损伤。

2 物理参量

衡量结构关键部位腐蚀损伤的物理量有蚀坑深度、失重、腐蚀形貌、腐蚀面积、结构表面涂层的绝缘电阻等,这些物理参量十分直观地反应腐蚀损伤的程度。以加速试验环境谱和结构地面停放环境作用下腐蚀损伤物理量相同为准则建立当量加速关系,能够较为准确地反应加速腐蚀关系^[23—26]。

2.1 蚀坑深度

对金属基体来说,腐蚀蚀坑深度是较为容易观察、测量到的物理量,其随着腐蚀时间的不断增加而变化。假设金属基体的最大蚀坑深度是服从对数正态分布,可用如下表达式表示其随时间的变化规律:

$$D = AT^\alpha \quad (12)$$

通常从腐蚀动力学规律的角度来确定金属基体当量加速关系,通过实验室加速腐蚀环境下的 $d-t$ 曲线和服役环境下的 $D-T$ 曲线进行对比分析得到当量加速关系。由加速腐蚀 t h 与大气暴露 T 年对应的腐蚀深度相等得:

$$D = AT^\alpha = At^{\alpha'} = d \quad (13)$$

由于 α 和 α' 差别很小,则有加速折算系数可表示为:

$$\beta = \left(\frac{A}{A'} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (14)$$

文献[27]研究了考虑涂层失效基体的加速折

算关系。在对涂层已失效的金属基体进行研究时,将涂层失效时间 t_0 引入,则腐蚀深度与腐蚀时间的关系为:

$$d = A(t - t_0)^\alpha \quad (15)$$

假设当材料在实验室加速环境下和在服役环境下作用所产生的腐蚀蚀坑深度相等时,实验室加速腐蚀环境下涂层失效时间在加速作用时间中的比例与服役环境下相同。则当有外场腐蚀信息 (T, D) , 加速腐蚀深度 $d = D$ 时,涂层失效时间在总时间中的比例为:

$$k = \frac{t_0}{\left(\frac{D}{A} \right)^{\frac{1}{\alpha}} + t_0} \quad (16)$$

从而地面停放涂层失效时间为:

$$T_0 = k \cdot T \quad (17)$$

则当量加速关系为:

$$\beta = \frac{T}{\left(\frac{D}{A} \right)^{\frac{1}{\alpha}} + t_0} \quad (18)$$

2.2 腐蚀失重

文献[28]以腐蚀失重为参量来描述腐蚀过程中的规律,得出实验室加速试验和大气暴露试验均符合公式:

$$\lg P = A + B \lg t \quad (19)$$

式中: P 为腐蚀失重; t 表示暴露时间; 系数 A 表示试验暴露 1 年时的腐蚀强度; 系数 B 表示试验钢在试验点蚀的钝化作用。

采用由实验室加速试验和大气暴露试验得到相同腐蚀失重所对应的时间的比值为加倍率,求得实验室加速试验和大气暴露试验得到相同腐蚀失重所对应的时间关系,即:

$$\lg P_{\text{外}} = \lg P_{\text{内}} \quad (20)$$

$$A_{\text{外}} + B_{\text{外}} \lg t_{\text{外}} = A_{\text{内}} + B_{\text{内}} \lg t_{\text{内}} \quad (21)$$

其中 $t_{\text{外}}$ 和 $t_{\text{内}}$ 对应的时间分别为年和天,得:

$$\lg t_{\text{外}} = (A_{\text{内}} - A_{\text{外}} + B_{\text{内}} \lg t_{\text{内}}) / B_{\text{外}} \quad (22)$$

2.3 腐蚀等级

文献[34]以腐蚀等级为度量参量得到铝合金在实验室和真实服役环境中腐蚀的当量折算关系。腐蚀等级是依据 HB 5192《镀层和化学覆盖层表面腐蚀等级评定方法》建立的物理量,用来度量材料

表面腐蚀损伤程度。采用材料表面孔蚀率来评定腐蚀等级,材料表面孔蚀率的表达式为:

$$\eta=\frac{S_0}{S_1}\times C\times 100\%$$

(23)

式中: η 为材料表面孔蚀率; S_0 为评价区域的腐蚀斑点面积; S_1 为评价区域的总面积; C 为腐蚀深度修正系数。不同腐蚀等级与材料表面孔蚀率的对应关系见表 1。

表 1 航空金属材料腐蚀等级与孔蚀率的对应关系

Table 1 The relationship between aircraft metal corrosion degree and pitting corrosion rate

腐蚀等级 F	孔蚀率 $\eta/\%$	腐蚀等级 F	孔蚀率 $\eta/\%$
1	0.03	5	1 ~ 3
2	0.03 ~ 0.1	6	3 ~ 10
3	0.1 ~ 0.3	7	10 ~ 30
4	0.3 ~ 1	8	30

将试验件在实验室加速环境下进行加速腐蚀,然后测量腐蚀面积,通过计算得到各自材料表面孔蚀率,最后通过表 1 查出对应的腐蚀等级,用同样的方法得到试验件在外场服役环境进行自然腐蚀的相关数据。当飞机结构材料在服役环境和实验室加速腐蚀环境中达到相同腐蚀等级时,将当量折算系数定义为服役环境作用时间 T 与实验室加速环境作用时间 t 的比值 k 。其表达形式为:

$$k=\frac{T}{t}$$

(24)

2.4 绝缘电阻

文献[40]对具有防腐蚀涂层的部位进行了研究,涂层失效过程中不发生电荷转移的电化学腐蚀而多发生物理损坏或化学降解。随着涂层老化反应的进行,涂层物理性能会发生变化,因此可选取绝缘电阻 R 作为度量参量,进行当量加速关系的研究。在服役环境下涂层的绝缘电阻 R 随时间 t 的变化规律为:

$$R=ae^{bt^m}$$

(25)

式中: R 表示绝缘电阻; a, b 表示待定参数; m 表示优化参数。

假设在实验加速环境下涂层老化模式为:

$$R=Ae^{bt^m}$$

(26)

由绝缘电阻相等则腐蚀损伤相等可以得到:

$$a e^{bt^m}=A$$

(27)

在式(27)中取 $t=0$, 对应 $t=t_0'$, 则有:

$$t_0'=\left[\frac{\ln(a/A)}{B}\right]^{1/m}$$

(28)

$$t'=\left[\frac{\ln(a/A)-bt^m}{B}\right]^{1/m}$$

(29)

扣除初值 T_0 , 则有:

$$t'=\left[\frac{\ln(a/A)+bt^m}{B}\right]^{1/m}-\left[\frac{\ln(a/A)}{B}\right]^{1/m}$$

(30)

式(30)为涂层系统老化失效的当量折算公式,通过该公式便可以建立服役环境涂层自然老化与实验室加速老化的当量关系。

3 力学损伤对比法

腐蚀环境对结构完整性影响的本质是腐蚀对结构造成力学性能的降低。力学损伤对比法是以结构关键部位在服役环境下作用一定年限后和实验室加速试验环境下作用相当时间后具有相同的力学性能(损伤变量、疲劳强度和疲劳寿命),作为确定当量加速关系的准则。

3.1 损伤变量

文献[41]以损伤变量作为度量参量对材料进行加速腐蚀研究,建立了以损伤等效为准则的当量腐蚀加速关系。损伤变量 D 反映材料因腐蚀造成的承载能力的下降即材料有效承载面积减小,其可表达为:

$$D=1-\frac{A}{A_0}$$

(31)

式中: A 为材料遭腐蚀后的有效承载面积; A_0 为材料未腐蚀的有效承载面积。

损伤变量 D 反映材料力学性能的下降情况,可以使用损伤变量 D 作为度量参量,建立当量加速关系,即将实验室加速腐蚀环境作用与服役环境腐蚀作用对材料造成的腐蚀损伤进行等效,对比各自环境下的损伤发展速率。则加速系数(acc)可表示为:

$$\beta_{acc}=\frac{v_{加速试验}}{v_{大气试验}}$$

(32)

式中: v 表示和金属的腐蚀速率具有一定对应关系的损伤发展速率。

3.2 疲劳强度

文献[42]选取细节疲劳额定值(DFR 值)作为度量参量,进行对结构件腐蚀损伤当量化的研究,提出了腐蚀损伤相同则疲劳强度相等的观点,建立了基于疲劳强度的腐蚀当量折算关系确定方法。飞机结构件的细节疲劳额定值与其在服役环境下作用时间 T 之间的关系为。

$$DFR = m_T [\lg(T+10)]^{n_T} \quad (33)$$

式中: n_T, m_T 为待定常数。当 $T=0$ 时, $DFR = DFR_0 = m_T$ (未受腐蚀作用的 DFR 值), 则式(33)可写为:

$$DFR = DFR_0 [\lg(T+10)]^{n_T} \quad (34)$$

由试验确定待定常数 n_T , 实验室加速腐蚀时间 t 与 DFR 值有如下关系:

$$DFR = DFR_0 [\lg(t+10)]^{n_t} \quad (35)$$

对于具有相同 DFR 值的试件,其在服役环境时间 T 和实验室加速腐蚀时间 t 的当量关系为:

$$[\lg(T+10)]^{n_T} = [\lg(t+10)]^{n_t} \quad (36)$$

$$\text{则 } t = 10^{[\lg(T+10)]^{n_T/n_t}} - 10 \quad (37)$$

在实际工程应用中,服役环境时间 T 和实验室加速腐蚀时间 t 的关系可近似为:

$$T = \frac{n_t}{n_T} t \quad (38)$$

则服役环境与实验室加速腐蚀之间的当量折算系数为:

$$\beta = \frac{n_t}{n_T} \quad (39)$$

通过式(37)可以将服役环境下作用时间 T 当量折算为达到相同损伤需要经过实验室加速腐蚀试验的时间 t ,并可以在较短时间内以实验室加速模拟腐蚀试验来预测结构件在服役环境下作用一定年限后的疲劳性能。

3.3 疲劳寿命

文献[43—45]以中值寿命 N_{50} 为度量参量进行加速腐蚀关系的研究,建立了基于中值寿命的当量折算关系。该方法是取服役环境下 n 年的一组模拟试件,在其对应结构部位应力谱下进行疲劳试验,得到中值疲劳寿命 $(N_{50})^*$ 。再取若干组试件分别在实验室加速腐蚀环境作用下进行不同时间 t_i 的预腐蚀处理,然后进行疲劳试验,得到对应的中值寿命

$N_{50,i}$ 。

将 $(t_i, N_{50,i})$ 数据拟合成如下幂函数式:

$$N_{50} = (N_{50})_0 - \beta t^\alpha \quad (39)$$

将 $(N_{50})^*$ 代入上式算出对应的 t^* 值,则加速系数为:

$$\beta = n/t^* \quad (40)$$

即实验室加速试验谱作用 1 d (单位时间) 相当于服役环境下 β 年。

在对复合材料加速老化研究方面,也可以选择疲劳寿命作为度量参数进行腐蚀当量化研究。文献[46]表明,复合材料在老化后的疲劳寿命与紫外线辐射的时间及最大应力 $\sigma_{\max}$ 之间存在着函数关系,这个函数关系是复杂的。建立非线性方程如下:

$$\lg N = a \times t^b + c \times \lg \sigma_{\max} + d \quad (41)$$

式中: N 为疲劳寿命; $\sigma_{\max}$ 为最大应力; t 为紫外线辐射的时间; b, c 和 d 为拟合参数。

在不同应力水平下,通过非线性拟合处理,得到复合材料加速老化后的疲劳寿命 N 与老化时间 t 的关系方程为:

$$\lg N = c + d \lg t \quad (42)$$

式中: t 为老化时间, h; c 和 d 为在不同应力水平下的拟合参数。

对于实验室加速老化环境老化后的疲劳寿命有:

$$\lg N_a = c_a + d_a \lg t_a \quad (43)$$

对于服役环境老化后的疲劳寿命为:

$$\lg N_n = c_n + d_n \lg t_n \quad (44)$$

两种老化环境条件作用下,寿命达到相同时有:

$$c_a + d_a \lg t_a = c_n + d_n \lg t_n \quad (45)$$

式中: t_a 为实验室加速老化时间; t_n 为服役环境自然老化时间。

如果给定应力水平,如 $\sigma_{\max} = 62.0$ MPa 时,由式(43)和式(47)可得:

$$\lg t_n = 1.401\ 95 + 0.491\ 411 \lg t_a \quad (46)$$

式(46)即为复合材料损伤当量折算公式。

文献[47—49]研究了基于疲劳寿命预腐蚀影响系数曲线(C - T 曲线)的当量折算关系。 C 表示预腐蚀对材料疲劳寿命的影响,称为预腐蚀影响系数,其表达式为:

$$C(T) = \frac{N(T)}{N(0)} \quad (47)$$

式中: $N(T)$ 表示预腐蚀作用时间 T 后结构的疲劳寿命; $N(0)$ 表示未腐蚀结构的疲劳寿命。

加速腐蚀因子的定义为:

$$K_p = \frac{T_p}{t_p} \left| C(T) = C(t) \right. \quad (48)$$

式中: T_p , t_p 分别表示可靠度为 p 时对应的服役环境下作用时间和实验室加速腐蚀环境下作用时间。服役环境腐蚀 T 时间和实验室加速腐蚀 t 时间对应的预腐蚀影响系数用 $C(T)$, $C(t)$ 分别表示。

4 讨论

飞机的腐蚀破坏主要类型有点蚀、晶间腐蚀、均匀腐蚀、电偶腐蚀、缝隙腐蚀、磨蚀、腐蚀疲劳和应力腐蚀开裂等,其中大部分腐蚀破坏都是电化学腐蚀。因此,可以采用腐蚀电流法确定金属结构基体加速试验环境谱的当量加速关系,但腐蚀电流法不适用于结构的非金属涂层。

目前已有铝合金和结构钢在潮湿空气与标准潮湿空气、不同浓度的NaCl溶液和水介质、不同浓度酸与水介质的折算系数,但现有的折算系数将铝合金和钢的种类繁多这一情况忽略,认为所有种类的铝合金和结构钢都用同一组折算系数,这显然不够合理。同时,腐蚀电流法使用了金属电化学腐蚀过程中腐蚀电流这一特征量,使得其研究符合腐蚀机理的规律,但腐蚀过程中腐蚀电流是变化的而且测量带有主观因数,简单的将腐蚀电流当作常数并不科学。

蚀坑深度是直接反应腐蚀程度的一种参量,它直观地表现了腐蚀区域的腐蚀情况。由于蚀坑深度的数量级不是很大,在测量时带入的误差会明显影响数据的准确性。在表示蚀坑深度的数据时还需要用到统计的方法,增加了研究的不确定性。

腐蚀失重法以室内外试验达到相同的腐蚀失重所用时间的关系来得到加速折算关系。其误差主要来自试验处理,实验员清洗锈蚀产物时的力道、除锈液使用时间不正确等试验操作环节^[29-33]。

腐蚀等级法实质上是以腐蚀面积为参量进行折算关系的研究,在等级的划分中,各级别之间并不等距,这就难免造成一定的误差^[35-39]。

以绝缘电阻来描述防护涂层在使用过程中的腐蚀损伤规律具有一定的可行性,但无法完整地描述

涂层的腐蚀损伤程度。

对于已服役多年的飞机,因其拥有丰富的腐蚀损伤数据,以物理参量为基准的当量折算法是确定当量加速关系的良好方法。在取得外场服役飞机上的数据时,可能会遇到困难,如蚀坑深度的测量需要专门的仪器,使用过程中可能受到某些部位空间限制而难以测量,腐蚀失重数据很难在外场服役飞机上得到。

损伤变量法以损伤等效为基准建立当量加速关系,本质是基于静强度原理,从而有利于研究腐蚀对材料力学性能影响。

腐蚀环境对结构完整性的影响归根到底是腐蚀造成的结构力学性能降低。因此,力学损伤对比法可以从力学性能这个层面来描述腐蚀损伤当量加速关系,而这正是研究加速腐蚀关系的目标体现。

力学损伤对比法主要用于结构疲劳关键部位,目前常用的方法是通过外场暴晒试验与实验室加速试验进行对比,但是这种方法不能反映飞机局部环境对结构的损伤作用。同时,由于寿命试验结果的分散性较大,与试验预期相悖的试验结果时有发生。

5 结语

基于电化学原理的当量加速关系研究方法适合用于制定飞机金属结构加速试验环境谱,但需要针对不同铝合金和结构钢进行不同环境下的腐蚀电流测试,以得到完整的折算系数。并且要充分考虑腐蚀电流数据分布特性,对加速腐蚀折算系数的估计量进行可靠性分析。

以物理参量为基准的当量折算法适用于建立疲劳关键部位、腐蚀关键部位的涂层及金属基体等各种加速试验环境谱的当量加速关系。该方法的重点是对腐蚀程度评定方法的确定,提高腐蚀程度评定的合理性,减少因评定人员技术素质差异所带来的误差。

力学损伤对比法适合用于结构疲劳关键部位。在研究加速腐蚀损伤时,因为得到的试验数据具有随机的和分散的特点,所以对加速腐蚀系数估计量进行可靠性分析是很有必要的。该过程对得到的加速腐蚀当量折算关系的准确性有很重要的意义。

在飞机日历寿命的研究中,确定当量加速关系是制定加速试验环境谱的关键,应该针对不同材料、

不同部位采用不同的当量加速关系。在对飞机可靠性和安全性要求不断提高的今天,应依托材料、腐蚀、电化学、疲劳寿命等学科的发展,加强实验室环境当量加速关系研究。

参考文献:

- [1] 周希沅. 中国飞机结构腐蚀分区和当量环境谱[J]. 航空学报, 1999, 20(3): 230—233.
ZHOU Xi-yuan. Corrosion Demarcation of Airplane Structures of China and Eequivalence Environmental Spectrum [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1999, 20(3): 230—233.
- [2] ROBERT N M, SCHUESSLER R L. Predicting Service Life of Aircraft Coating in Various Environments[J]. Corrosion, 1989(4): 17—21.
- [3] ALTYNOVA M M, KELLY R G, SCULLY J R, et al. Engineering Corrosion Prediction Motel for Aircraft Structure [C]//6th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference. 2002.
- [4] LUBKE K A, BUTKUS L M, JOHNSON W S. Effect of Environment on Fracture Toughness and Debond Growth of Aluminum/FM 73/Boron-Epoxy Adhesively Bonded Joints[J]. American Society for Testing and Materials, 2001(1): 42—49.
- [5] 王秀静, 陈克勤, 张炬, 等. 金属大气暴露与模拟加速腐蚀结果相关性探讨[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 94—99.
WANG Xiu-jing, CHEN Ke-qin, ZHANG Ju, et al. Investigation on Correlation of Atmospheric Exposure Test and Accelerated Corrosion Test of Metals[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 94—99.
- [6] 唐伦科. 自然曝露试验与加速腐蚀试验的相关性及防蚀设计研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
TANG Lun-ke. Research on Natural Exposure Test and Correlation of Accelerated Corrosion Test and Anticorrosion Design [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [7] 文邦伟, 张伦武, 李继红, 等. 装甲钢自然环境试验与人工加速试验的相关性[J]. 装备环境工程, 2006, 3(3): 97—101.
WEN Bang-wei, ZHANG Lun-wu, LI Ji-hong, et al. Relativity between Natural and the Artificial Accelerated Environment Test of Armor Plate[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(3): 97—101.
- [8] JACQUES L F E. Accelerated and Outdoor Natural Exposure Testing of Coatings[J]. Progress in Polymer Science, 2000, 25: 1337—1362.
- [9] JAMES M. Short Term Testing and Real Time Exposure [R]. Corrosion Paper, 1999, 2(9): 15.
- [10] LI J, LI M, SUN Z. Development of an Artificial Climatic Complex Accelerated Corrosion Tester and Investigation of Complex Accelerated Corrosion Test Methods[J]. Corrosion, 1999, 55(5): 498—501.
- [11] 李敏伟, 傅耘, 蔡良续, 等. 航空产品腐蚀损伤当量折算方法研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 224—227.
LI Min-wei, FU Yun, CAI Liang-xu, et al. Research on Corrosion Damage Equivalent Conversion Methods of Aircraft Product [J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 224—227.
- [12] 周希沅. 飞机结构的当量环境谱与加速试验谱[J]. 航空学报, 1996, 17(5): 613—616.
ZHOU Xi-yuan. Equity Environmental Spectrum And Speed Test Spectrum For Aircraft Structure [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1996, 17(5): 613—616.
- [13] 杨晓华, 金平. 飞机使用环境谱的编制[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 99—102.
YANG Xiao-hua, JIN Ping. Compile of Aircraft Operation Environment Spectrum[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 99—102.
- [14] 杨晓华, 张玓. 宁波地区当量加速环境谱的编制[J]. 装备环境工程, 2010, 7(4): 76—80.
YANG Xiao-hua, ZHANG Ding. Compiling of Environmental Spectrum of Equivalent Acceleration in Ningbo [J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(4): 76—80.
- [15] 穆志韬, 柳文林, 于战樵. 飞机服役环境当量加速腐蚀折算方法研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2007, 22(3): 301—304.
MU Zhi-tao, LIU Wen-lin, YU Zhan-qiao. Research on Accelerated Corrosion Equivalent Conversion Method of Aircraft Service Environment[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2007, 22(3): 301—304.
- [16] ZHANG Qi, CHENG J W, LIU H C. The Study of The Accelerated Corrosion Test Method for High Strength Aluminum [C]//Marine Corrosion and Control. Beijing: China Ocean Press, 2000.
- [17] CHEN Y L, JIN P. Study on Local Environmental Spectrum and Accelerated Corrosion Equivalent Spectrum of Aircraft Structure [C]// Fatigue 99. Beijing, 1999.
- [18] 陈跃良, 段成美, 金平, 等. 飞机结构局部环境加速腐

- 蚀当量谱[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(3): 99—102.
- CHEN Yue-liang, DUAN Cheng-mei, JIN Ping, et al. Local Environmental Equivalent Spectrum for Accelerated Corrosion of Aircraft Structure[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1999, 31(3): 99—102.
- [19] 董登科, 王俊扬. 关于军用飞机服役日历年限评定的当量环境谱[J]. 航空学报, 1998, 19(4): 451—455
- DONG Deng-ke, WANG Jun-yang. Equivalent Environment Spectrum Research on Service Calendar Time for Fighter Aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 19(4): 451—455.
- [20] 刘元海, 任三元. 典型海洋大气环境当量加速试验环境谱研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1): 48—52.
- LIU Yuan-hai, REN San-yuan. Study on Equivalent Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum of Typical Marine Atmosphere [J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(1): 48—52.
- [21] 刘道庆, 吴超, 陈亮. 飞机腐蚀疲劳典型部位地面停放局部环境谱及当量折算[J]. 飞机设计, 2011, 31(5): 15—17.
- LIU Dao-qing, WU Chao, CHEN Liang. Ground Parking Local Environment Spectrum & Equivalence Converting of Aircraft Typical Parts[J]. Aircraft Design, 2011, 31(5): 15—17.
- [22] 张蕾, 陈群志, 宋恩鹏. 军机某疲劳关键部位加速腐蚀当量关系研究[J]. 强度与环境, 2009, 36(2): 45—50.
- ZHANG Lei, CHEN Qun-zhi, SONG En-peng. Research on Accelerated Corrosion Equivalent Relationship for the Fatigue Critical Component of Military Aircraft[J]. Structure & Environment Engineering, 2009, 36(2): 45—50.
- [23] 张栋. 确定飞机日历年寿命用的当量环境谱研究[J]. 航空学报, 2000, 21(2): 128—133.
- ZHANG Dong. Equivalent Environment Spectrum Research of Determining Calendar Life for Aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(2): 128—133.
- [24] 曹定国, 任三元, 王浩伟. 环境严酷性指数腐蚀当量方法及其应用研究[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 634—639.
- CAO Ding-guo, REN San-yuan, WANG Hao-wei. Equivalent Method of Using ESI for Corrosion Damage and Its Application[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 634—639.
- [25] 刘治国, 边若鹏, 蔡增杰. 机场环境下飞机 LY12CZ 结构腐蚀损伤预测方法研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(5): 35—38.
- LIU Zhi-guo, BIAN Ruo-peng, CAI Zeng-jie. Forecasting Method of Aircraft LY12CZ Structure Corrosion Damage in Airport Environment [J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(5): 35—38.
- [26] 刘文琰, 李玉海. 飞机结构日历年寿命体系评定技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2004.
- LIU Wen-ting, LI Yu-hai. The Calendar Life of Aircraft Structure System Evaluation Technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2004.
- [27] 李玉海, 贺小帆, 陈群志, 等. 铝合金试件腐蚀深度分布特性及变化规律研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(1): 98—101.
- LI Yu-hai, HE Xiao-fan, CHEN Qun-zhi, et al. The Research of Characteristics and Variation of Aluminum Alloy Specimen Corrosion Depth Distribution [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(1): 98—101.
- [28] 曹楚南. 腐蚀试验数据的统计分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988.
- CAO Chu-nan. Statistical Analysis of Corrosion Test Data. [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1988.
- [29] 刘文琰, 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.
- LIU Wen-ting, LI Yu-hai, CHEN Qun-zhi, et al. The Study of Plane Structure of Coating Corrosion Accelerated Test Environment Spectrum[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(1): 109—112.
- [30] 黄先球, 郎丰军, 王靓. Q345 钢室内加速腐蚀与大气暴露的相关性研究[J]. 武汉工程职业技术学院学报, 2013, 25(2): 22—24.
- HUANG Xian-qiu, LANG Feng-jun, WANG Liang. Research of Correlativity on Indoor Accelerated Corrosion and Atmospheric Exposure of Q345 Steel [J]. Journal of Wuhan Engineering Institute, 2013, 25(2): 22—24.
- [31] 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—12.
- TAN Xiao-ming, MU Zhi-tao, ZHANG Dan-feng, et al. Equivalent Accelerated Corrosion Test Study of Navy Aircraft Structure [J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(2): 9—12.
- [32] 王绍明. 模拟大气环境加速腐蚀试验的研究[J]. 装备环境工程, 2005, 12(4): 65—68.
- WANG Shao-ming. Study on Accelerated Corrosion Test of

- Simulating Atmospheric Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 12(4): 65—68.
- [33] 王成章,汪学华,秦晓洲. 碳钢及低合金钢在重庆和万宁地区大气腐蚀规律研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(2): 23—28.
- WANG Cheng-zhang, WANG Xue-hua, QIN Xiao-zhou. Research on Atmospheric Corrosion Rule of Carbon Steel and Low Alloy Steel in Chongqing and Wanning Area[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(2): 23—28.
- [34] WANG X H, MOU X L, TIAN Y E. The Relativity of the Simulated Accelerated Test of Carbon Steel and Low Alloy Steel and Atmospheric Corrosion Test[J]. Environ Technol, 2000(4): 14.
- [35] 张福泽,叶序彬,宋钧,等. 飞机日历寿命试验的介质成分确定和加速方法[J]. 航空学报, 2008, 29(4): 873—879.
- ZHANG Fu-ze, YE Xu-bin, SONG Jun, et al. Corrosion Medium Composition and Accelerated Corrosion Method of Aircraft Calendar Life Test[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(4): 873—879.
- [36] 刘治国,李旭东,穆志韬. 基于腐蚀等级的航空铝合金腐蚀当量关系[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(5): 403—406.
- LIU Zhi-guo, LI Xu-dong, MU Zhi-tao. Equivalent Relation of Aero Aluminum Alloy Corrosion Based on Corrosion Grade[J]. Corrosion & Protection, 2013, 34(5): 403—406.
- [37] 张丹峰,陈跃良. 当量加速试验条件下铝合金腐蚀形态演化规律[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(3): 340—342.
- ZHANG Dan-feng, CHEN Yue-liang. Corrosion Damage Evolvement Rule of Aluminum Alloy Under Equivalent Accelerated Condition[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(3): 340—342.
- [38] 李旭东,朱武峰,张德龙,等. LC3 铝合金材料腐蚀等级评定[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 99—103.
- LI Xu-dong, ZHU Wu-feng, ZHANG De-long, et al. Corrosion Ranking Evaluation of LC3 Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 99—103.
- [39] 蔡建平,范林. 7A04 铝合金在周浸试验中的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1): 53—57.
- CAI Jian-ping, FAN Lin. Study of 7A04 Aluminum Corrosion Behavior in Alternate Immersion Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(1): 53—57.
- [40] 胡建军,陈跃良,刘军,等. 飞机结构搭接件腐蚀试验研究[J]. 强度与环境, 2011, 38(4): 49—53.
- HU Jian-jun, CHEN Yue-liang, LIU Jun, et al. Investigation on Lap-joints Material Corrosion Test of Aircraft Structure[J]. Structure & Environment Engineering, 2011, 38(4): 49—53.
- [41] 罗来正,肖勇,陈智君,等. 航空用 2D12 铝合金在海洋大气环境中的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 39—42.
- LUO Lai-zheng, XIAO Yong, CHEN Zhi-jun, et al. Research on Corrosion Behavior of 2D12 Aluminum Alloy for Aircraft in Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(4): 39—42.
- [42] 董登科,王俊扬. 关于军用飞机服役日历年限评定的当量环境谱[J]. 航空学报, 1998, 19(4): 451—455.
- DONG Deng-ke, WANG Jun-yang. Equivalent Environment Spectrum Research on Service Calendar Time for Fighter Aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 19(4): 451—455.
- [43] 毋玲,孙秦,郭英男. 高强度铝合金盐雾加速腐蚀试验研究[J]. 机械强度, 2006, 28(1): 138—140.
- WU Ling, SUN Qin, Guo Ying-nan. Accelerated Corrosion Tests of High Strength 7075 Aluminum Alloy in Salt Water Spray[J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(1): 138—140.
- [44] 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): 31—35.
- CHEN Qun-zhi, LI Xi-ming, ZHOU Xi-yuan, et al. Investigation of Corrosion Equivalent Relationships Between The Accelerated Environment And The Typical Service Environment of Aircraft Structures[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 19(4): 31—35.
- [45] 刘文珽,蒋冬滨. 飞机结构关键危险部位加速腐蚀试验环境谱研究[J]. 航空学报, 1998, 19(4): 435—438.
- LIU Wen-ting, JIANG Dong-bin. Study on Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum For Critical Area[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 19(4): 435—438.
- [46] 朱作涛,穆志韬,陈定海,等. 基于中值寿命和特征寿命相当的腐蚀当量折算关系研究[J]. 机械强度, 2011, 33(2): 253—257.
- ZHU Zuo-tao, MU Zhi-tao, CHEN Ding-Hai. Corrosion Equivalent Converting Relation Study Based on Median Life and Characteristic Life Equality[J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(2): 253—257.

- tigue [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 77: 253—261.
- [12] MURTY A S R, GUPTA U C, KRISHNA A R. A New Approach to Fatigue Strength Distribution for Fatigue Reliability Evaluation [J]. Int J Fatigue, 1995, 17(2): 91—100.
- [13] KARADENIZ H. Uncertainty Modeling in the Fatigue Reliability Calculation of Offshore Structures [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 74: 323—335.
- [14] XIE L Y. Equivalent Life Distribution and Fatigue Failure Probability Prediction [J]. Int J Pressure Vessels and Piping, 1999, 76: 267—273.
- [15] 杨晓华, 金平, 姚卫星. 用考虑置信区间长度影响的最小二乘法拟合 $S-N$ 曲线 [J]. 中国工程科学, 2004, 6(4): 41—43.
- YANG Xiao-hua, JIN Ping, YAO Wei-xing. The $S-N$ Curve Fitted by the Least Square Method Considering the Effect of Length of the Confidence Interval [J]. Engineering Science, 2004, 6(4): 41—43.
-
- (上接第 58 页)
- [47] 赵海军, 郭泉, 金平. 加速预腐蚀与疲劳试验估算飞机结构日历寿命的新方法 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(3): 229—232.
- ZHAO Hai-jun, GUO Quan, JIN Ping. A New Estimation Method of Calendar Life for Aircraft Structures Using an Accelerated Precorrosion and Fatigue Test [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2007, 19(3): 229—232.
- [48] 许风和, 李晓骏, 陈新文. 复合材料老化寿命预测技术中大气环境当量的确定 [J]. 复合材料学报, 2001, 18(2): 93—96.
- XU Feng-he, LI Xiao-jun, CHEN Xin-wen. The Determination of Atmospheric Environment Equivalence in Life-Prediction Technology of Composites Aging [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2001, 18(2): 93—96.
- [49] 刘海燕, 李喜明, 王红斌. 航空有机玻璃加速老化试验技术研究 [J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 83—87.
- LIU Hai-yan, LI Xi-ming, WANG Hong-bin. Research on Accelerated Weathering Test Technique of Perspex [J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6): 83—87.
- [50] 贺小帆, 刘文斑, 向锦武. 基于 $C-T$ 曲线的加速腐蚀因子分析 [J]. 机械强度, 2006, 28(6): 888—892.
- HE Xiao-fan, LIU Wen-ting, XIANG Jin-wu. Reliability Analysis of Acceleration Corrosion Factor for Fatigue Critical Components Based in The $C-T$ Curve [J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(6): 888—892.
- [51] 贺小帆, 刘文斑. 疲劳关键件加速腐蚀因子可靠性分析 [J]. 航空学报, 2005, 26(3): 316—319.
- HE Xiao-fan, LIU Wen-ting. Reliability Analysis of Accelerated Corrosion Factor for Fatigue Critical Components [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(3): 316—319.

(上接第 64 页)

- [10] OKAFOR A C, BHOGAPURAPU H. Design and Analysis of Adhesively Bonded Thick Composite Patch Repair of Corrosion Grind-out and Cracks on 2024 T3 Clad Aluminum Aging Aircraft Structures [J]. Composite Structures, 2006, 76: 138—150.
- [11] JONES R. A Scientific Evaluation of the Approximate 2D Theories for Composite Repairs to Cracked Metallic Components [J]. Composite Structures, 2009, 87: 151—160.
- [12] WEN S W, XIAO J Y, WANG Y R. Accelerated Ageing Behaviors of Aluminum Plate with Composite Patches under Salt Fog Effect [J]. Composites: Part B, 2013, 44: 266—273.
- [13] 张珂, 杨晓华, 匡林. 复合材料补片胶接修补剥蚀金属结构技术研究 [J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 204—207.
- ZHANG Ding, YANG Xiao-hua, KUANG Lin. Study of Composite Patch Glued Joint Repair Technology for Exfoliation Corrosion of Metallic Structure [J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 204—207.
- [14] SABELKIN V, MALL S, HANSEN M A, et al. Investigation into Cracked Aluminum Plate Repaired with Bonded Composite Patch [J]. Composite Structures, 2007, 79: 55—66.
- [15] XIONG J J, SHENOI R A. Integrated Experimental Screening of Bonded Composites Patch Repair Schemes to Notched Aluminum-alloy Panels Based on Static and Fatigue Strength Concepts [J]. Composite Structures, 2008, 83: 266—272.
- [16] 中国航空研究院. 应力强度因子手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- China Aviation Academy. Handbook of Stress Intensity Factors [M]. Beijing: Science Press, 1981.