

机场环境下飞机LY12CZ结构腐蚀损伤预测方法研究

刘治国¹, 边若鹏², 蔡增杰¹

(1. 海军航空工程学院 青岛分院, 山东 青岛 266041; 2. 海军驻保定地区军事代表室, 河北 保定 072152)

摘要: 依据LY12CZ材料的EXCO溶液浸泡加速腐蚀试验数据、飞机LY12CZ构件在机场环境下的真实腐蚀损伤数据以及腐蚀损伤等效原则和当量关系原理, 获得了该材料在2种环境下腐蚀的当量因子均值 $\bar{\alpha}=0.023\ 6$, 构建了LY12CZ材料于EXCO溶液中浸泡腐蚀的神经网络腐蚀深度预测模型。在此基础上提出了利用所建的神经网络模型和所获的当量因子进行机场环境下飞机用LY12CZ材料腐蚀损伤预测研究方法。预测结果表明该方法有效、可行。

关键词: LY12CZ 铝合金; EXCO 溶液; 当量因子; 神经网络; 腐蚀损伤; 预测方法

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)05-0035-04

Forecasting Method of Aircraft LY12CZ Structure Corrosion Damage in Airport Environment

LIU Zhi-guo¹, BIAN Ruo-peng², CAI Zeng-jie¹

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

2. Navy Military Representative Office in Baoding, Baoding 072152, China)

Abstract: Accelerated corrosion test of LY12CZ aluminum alloy was carried out in EXCO solution and the corrosion depth of the alloy was measured. Further more corrosion damage of aircraft LY12CZ structure with different service periods in true airport environment was counted. Based on the corrosion damage data of the two different environments and the corrosion damage equivalent relation, the equivalent relation factor between the EXCO solution and true airport environment was found. Then the neural network model based on EXCO solution test data with the BP algorithm was established. The corrosion damage of aircraft LY12CZ structure in the true airport environment was forecasted with the built model and the equivalent relation factor was found to be 0.023 6 under the two environments. The prediction results showed that the forecasting method is effective and applicable for LY12CZ corrosion damage estimation.

Key words: LY12CZ aluminum alloy; EXCO solution; equivalent relation factor; neural network; corrosion damage; forecasting method

LY12CZ 铝合金是飞机主体结构材料, 在飞机服役过程中易受机场环境作用发生腐蚀损伤^[1], 从而对飞机结构寿命及可靠性产生影响^[2-4]。因此, 笔者开展了飞机LY12CZ结构寿命及可靠性研究, 并对其在

收稿日期: 2011-04-25

作者简介: 刘治国(1976—), 男, 辽宁瓦房店人, 硕士, 讲师, 主要从事飞机结构腐蚀疲劳及可靠性研究。

机场环境下的腐蚀损伤进行了预测评估。

目前对飞机 LY12CZ 结构件腐蚀损伤的研究主要依据加速腐蚀试验原理展开^[5-7],对试验数据采用数学方法建立实验室环境下的腐蚀损伤动力学规律模型^[7],根据当量关系对其服役环境下的腐蚀损伤进行评估研究^[7-8]。飞机 LY12CZ 结构在真实服役环境中的腐蚀损伤受多种因素影响^[9-10],与实验室加速条件下的腐蚀损伤相关性存在较大差异,根据试验结果建立飞机服役环境下 LY12CZ 结构的腐蚀损伤动力学规律难以对其服役环境中的腐蚀损伤进行准确的预测和评估。

笔者根据 EXCO 溶液浸泡加速腐蚀数据和当量关系理论,尝试将其与神经网络相结合,进行 LY12CZ 铝合金腐蚀损伤预测研究,即利用加速试验数据、机场环境腐蚀与 EXCO 溶液腐蚀当量因子和 BP 神经网络进行飞机 LY12CZ 铝合金构件腐蚀损伤预测。预测结果表明,该组合方法能够较为准确地预测飞机 LY12CZ 结构在机场环境中服役一定年限的腐蚀损伤程度。

1 LY12CZ 试件 EXCO 溶液浸泡加速腐蚀试验

EXCO 溶液浸泡腐蚀是研究铝合金腐蚀损伤常用的加速试验方法^[6,11]。EXCO 溶液成分及浓度: NaCl 4.0 mol/L, KNO₃ 0.5 mol/L, HNO₃ 0.1 mol/L。试验过程参照 HB 5455—1990 进行,共测量了 24, 48, 72, 120, 168, 240 h 这 6 个周期的试件腐蚀深度数据,其测量值和统计值见表 1。

表 1 在 EXCO 溶液中不同腐蚀周期的腐蚀深度

Table 1 The corrosion depth of LY12CZ in EXCO solution for different time

加速腐蚀 周期 t/h	平均腐蚀深 度 d/mm	加速腐蚀周 期 t/h	平均腐蚀深 度 d/mm
24	0.30	120	0.76
48	0.39	168	0.82
72	0.47	240	1.02

对表 1 中试验数据采用最小二乘法进行拟合处理,得到 LY12CZ 试件于 EXCO 溶液中腐蚀动力学方程为:

$$d=0.25+0.003\ 4t\quad R=0.99\quad (1)$$

式中: R 为相关系数。拟合直线如图 1 所示。

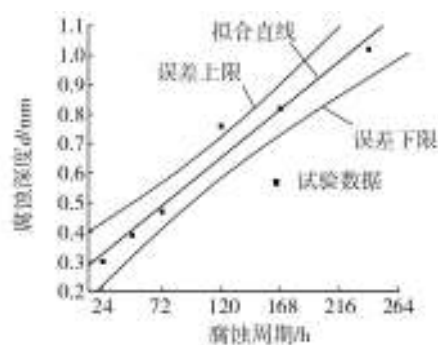


图 1 腐蚀深度随浸泡周期变化拟合直线

Fig. 1 The fitted line based on corrosion depths and corrosion periods in EXCO solution

根据临界相关系数定义:在显著度水平为 0.99 时满足假设分布的线性相关系数,其计算公式为:

$$R_c = \frac{t_\alpha(n-2)}{\sqrt{(n-2) + t_\alpha^2(n-2)}}\quad (2)$$

式中: n 为样本总体; t_α 为在显著度水平 α 下 t 分布分位数。当显著度 $\alpha=0.99$ 时,根据式(2)计算得 $R_c=0.275\ 8$,而式(1)中相关系数 $R=0.99$,远远大于 R_c 值。从图 1 中可见:对回归系数置信估计(显著性水平 $\alpha=0.99$)几乎所有数据点都在区间内,因而拟合方程式(1)能够满足下文当量因子计算的精度要求。

2 飞机典型 LY12CZ 构件机场环境下腐蚀损伤数据统计

计算当量因子还需要统计 LY12CZ 材料在机场服役环境中的真实腐蚀损伤数据,某型机 LY12CZ 前梁缘条腹板结构在机场环境中不同服役年限的腐蚀深度数据统计值见表 2^[1]。

表 2 某型机 LY12CZ 翼梁缘条腹板不同服役年限下的腐蚀深度均值

Table 2 The average corrosion depths of aircraft LY12CZ structure after different service year

服役年限 t/a	6	7	8.5	10	12.5
腐蚀深度均值 $\bar{d}/mm$	0.84	1.31	1.62	1.90	2.04

3 当量因子计算

当量因子是联系材料在真实环境中自然腐蚀和实验室环境中加速腐蚀之间的桥梁,定义为:飞机结构材料在机场环境和加速试验环境下达到相同腐蚀程度时,机场环境作用时间 t_1 与加速试验环境作用时间 t_2 的比值。其表达形式通常为: $\alpha=t_1/t_2$, α 为当量因子,表示加速试验1个周期(天数或小时数)相当于机场环境作用时间 α (年数)^[12]。

根据腐蚀损伤等效原则,使用式(1)和表2中腐蚀深度数据计算EXCO溶液浸泡腐蚀与机场环境腐蚀的当量因子,计算过程和计算结果见表3。

表3 当量因子计算及均值

Table 3 The calculation result of equivalent relation factor

服役年限 t/a	6	7	8.5	10	12.5
腐蚀深度 d/mm	0.84	1.32	1.62	1.90	2.04
EXCO 溶液浸泡周期 t_1/h	172.01	313.7	403.7	484.3	526.5
当量因子计算 α	0.034 9	0.022 3	0.021 1	0.020 6	0.023 8
当量折算系数均值 $\bar{\alpha}$	0.023 6				

注: $t_1=(d-0.25)/0.003 4$

料在EXCO溶液中腐蚀损伤的神经网络模型。模型采用3层BP网络,输入层神经元数目为1,表示EXCO溶液浸泡加速腐蚀试验周期;输出层神经元数目为1,表示不同试验周期对应的LY12CZ试件腐蚀深度数值;隐含层数目尝试不同的数值,当其数目为70时,网络具有较好的稳定性和较快的收敛速度,所以网络结构定为1-70-1。

网络训练模式采用批处理训练模式,训练算法采用Levenberg-Marquardt算法^[15]。将表1中浸泡腐蚀周期为24,48,72,120,168,240 h作为网络输入数据,而与其对应的腐蚀深度数值作为网络的期望输出出来训练网络,其训练过程如图2所示。图2中曲线表示网络训练收敛过程,直线表示训练精度要求。图2表明在训练进行到24个步长时,网络精度达到预设的要求,表明网络收敛速度较快。

将腐蚀周期为48,120,240 h作为网络输入,计算与输入腐蚀周期对应的腐蚀深度,计算结果及相对误差见表4。从表4可见,BP神经网络模型预测腐蚀损伤相对于其他数学方法精度较高。

通过计算可得 $\bar{\alpha}=0.023 6$,即LY12CZ材料在EXCO溶液中浸泡1 h的腐蚀量相当于其在典型机场环境下作用0.023 6 a的腐蚀量,或在EXCO溶液中浸泡42.3 h的腐蚀量相当于其在典型机场环境下作用1 a的腐蚀量。

4 BP腐蚀损伤神经网络预测模型

材料腐蚀是受多种因素影响的非线性过程,适于采用神经网络理论进行研究^[10]。文献[13—14]采用神经网络方法对具体材料的腐蚀损伤进行预测,计算结果表明预测精度很理想。

文中利用神经网络理论构建了预测LY12CZ材

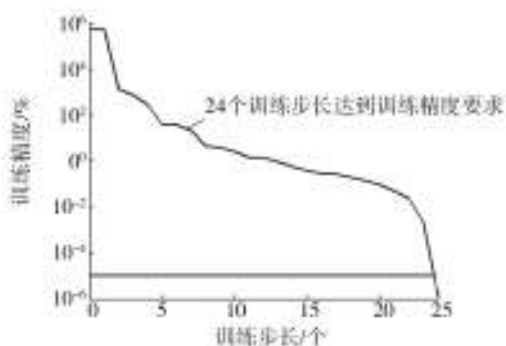


图2 BP神经网络训练过程

Fig. 2 The training process of BP Neural Network

5 应用实例

基于上述分析,提出了加速试验、当量因子、神经网络相组合进行LY12CZ材料于真实服役环境下腐蚀损伤预测的方法。具体算例如下。

对机场环境下服役7 a的飞机典型LY12CZ构件腐蚀损伤程度进行预测。根据当量因子均值 $\bar{\alpha}=$

表4 BP神经网络预测结果与试验及各种拟合方法计算结果比较

Table 4 Comparison of calculation results between the BP Neural Network and others mathematical methods

试验周期/h	试验结果/mm	腐蚀深度预测					
		BP网络方法		分段拟合方程方法 ^[6]		一元回归方法	
		预测结果/mm	相对误差/%	预测结果/mm	相对误差/%	预测结果/mm	相对误差/%
24	0.30	0.300 0	0	0.280 0	6.67	0.331 6	10.53
48	0.39	0.390 2	0.05	0.395 8	1.49	0.431 2	10.56
120	0.76	0.761 1	0.15	0.721 5	5.07	0.658 0	13.42
240	1.02	1.018 0	0.19	1.026 5	0.64	1.066 0	4.51

0.023 6,可计算出与其腐蚀损伤等效的EXCO溶液浸泡时间 $t_1=296.6$ h,利用文中所构建BP神经网络预测模型,将 t_1 作为网络输入,计算得到的网络输出为1.305,即为机场环境下典型LY12CZ构件服役7 a时所对应的腐蚀深度数据,即 $d_{\text{预测}}=1.305$ mm。将这一计算结果与飞机典型LY12CZ结构于机场环境下服役7 a时的损伤状况进行比对,发现仿真计算结果具有较高的精度,误差只有0.8%,说明文中采用的方法确实有效可行。

6 结论

服役环境下飞机典型结构腐蚀损伤预测对研究飞机寿命及可靠性至关重要,但由于结构设计、空间尺寸及测量仪器等方面限制,通常在进行寿命评估时不能够对典型结构的腐蚀损伤进行直接观测。文中提出了利用EXCO溶液浸泡加速试验、当量因子、神经网络理论相组合进行飞机LY12CZ构件的腐蚀损伤评估,从实际操作过程及仿真计算结果可见,该方法预测结果与实际腐蚀损伤程度极为吻合,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 沈海军. 高强度铝合金腐蚀疲劳机理与腐蚀疲劳全寿命工程模型[D]. 西安:西北工业大学,2002.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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,2002,2(1):98—101.
- [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] 刘延利,钟群鹏,张峥. 基于人工神经网络的预腐蚀铝合金疲劳性能预测[J]. 航空学报,2001,3(2):135—139.
- [10] 王海涛,韩恩厚,柯伟. 腐蚀领域中人工神经网络的应用进展[J]. 腐蚀科学与防护技术,2004,5(3):147—150.
- [11] 谢伟杰,李获,胡艳玲,等. LY12CZ和7075T7351铝合金在EXCO溶液中腐蚀动力学的统计研究[J]. 航空学报,1999,20(1):34—38.
- [12] 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.
- [13] 刘治国,穆志韬,金平. LY12CZ腐蚀疲劳寿命的神经网络研究[J]. 装备环境工程,2008,5(3):24—27.
- [14] 刘治国,穆志韬,贾民平. LY12CZ腐蚀损伤及日历寿命预测的神经网络研究[J]. 装备环境工程,2008,5(5):78—81.
- [15] 董长虹. MATLAB神经网络与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2005:64—91.