

理论与实验研究

基于灰色模型和神经网络的铝合金腐蚀预测对比

刘成臣¹, 徐胜², 王浩伟¹, 张金奎¹

(1. 中国特种飞行器研究所, 湖北 荆门 448035; 2. 海军装备部航订部, 北京 100841)

摘要: 采用NaCl溶液对铝合金试验件进行预腐蚀试验, 产生腐蚀坑, 获取了不同腐蚀时间下的腐蚀数据, 然后进行疲劳加载试验。分别利用灰色模型和BP神经网络建立了腐蚀深度及疲劳寿命与腐蚀时间相关性的预测模型, 对两种预测模型的精度进行了对比。研究发现, 在缺乏足够统计数据的情况下灰色模型预测精度优于神经网络算法。

关键词: 铝合金; 腐蚀损伤; 模型; 预测

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.03.001

中图分类号: TG172.5; V216.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)03-0001-04

Comparative Study of Prediction Models of Aluminum Alloys Based on Gray Model and Artificial Neural Network

LIU Cheng-chen¹, XU Sheng², WANG Hao-wei¹, ZHANG Jin-kui¹

(1. China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China;

2. Science Order Department of Naval Aeronautic Equipment, Beijing 100841, China)

Abstract: Aluminum alloy was tested through pre-corrosion in NaCl solution. The corrosion pits were detected to get corrosion damage data of different corrosion time. Corrosion fatigue test of the pre-corroded specimen was carried out. Gray prediction model and BP neural network algorithms were selected to establish predictive model of the relation between fatigue lives, corrosion depth, and corrosion time. The accuracy of both two prediction model were compared. The result showed that the prediction accuracy of gray prediction model is higher than BP neural network algorithm when the statistics is lack.

Key words: aluminum alloy; corrosion damage; model; prediction

腐蚀是飞机结构的一种主要损伤形式, 飞机结构的腐蚀不仅直接影响飞行安全, 而且给后勤维修工作带来沉重负担。铝合金大量用于飞机结构, 但其对腐蚀环境敏感, 在沿海湿热环境下容易发生腐蚀, 影响飞机结构疲劳寿命^[1-3]。因此, 开展飞机铝

合金结构腐蚀预测研究具有很强的针对性及现实意义。飞机结构腐蚀损伤预测的实质是通过数学方法对一定使用年限的飞机结构件进行腐蚀损伤仿真。由于飞机腐蚀影响因素很多, 难以确定各影响因素与腐蚀之间的关系^[4-5]。

收稿日期: 2013-01-18

作者简介: 刘成臣(1985—), 男, 湖北钟祥人, 硕士, 工程师, 主要从事飞机结构腐蚀防护和控制工作。

以 $GM(1,1)$ 模型、BP神经网络两种预测方法对铝合金腐蚀损伤进行预测研究,为飞机结构日历寿命预测提供参考依据。

1 预腐蚀及疲劳试验

1.1 试验件几何参数

试验件为平板式,尺寸如图1所示,厚度为3.5 mm,材料为LY12CZ。

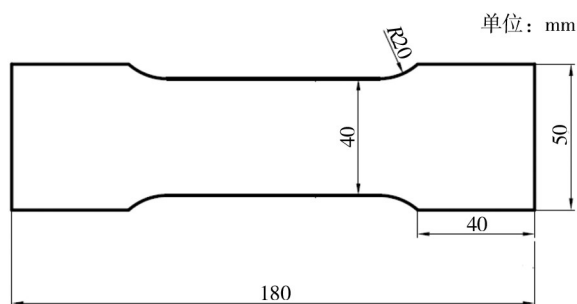


图1 试验件几何尺寸

Fig. 1 Geometry of the test piece

1.2 加速腐蚀试验

采用周期浸润的方法进行试验,环境谱如图2所示,每个循环34 min,其中烘烤28 min、浸泡6 min,取332个循环为1个周期,共进行5个周期的试验。每周期检测1次,每次取3件进行检测。

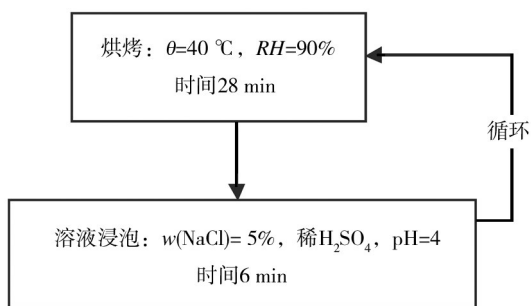


图2 铝合金加速环境谱

Fig. 2 Accelerated environment spectrum for aluminum alloy

腐蚀溶液由 $w(\text{NaCl})=5\%$ 的溶液组成,其中加入少量稀 H_2SO_4 ,使pH为4~4.5;溶液温度 $\theta=40\text{ }^{\circ}\text{C}\pm$

$2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试件到达预定周期后,去除腐蚀产物并烘干,利用QUESTAR三维光学显微镜对腐蚀深度及蚀坑宽度进行测量。测量后,在试验机上进行疲劳试验,采用轴向等幅加载方式,最小与最大应力比 $R=0.02$,加载频率 $f=20\text{ Hz}$,最大拉应力 $S_{\max}=256.4\text{ MPa}$ 。

1.3 试验结果

对不同腐蚀作用时间下的平均蚀坑深度、宽度进行了测量,结果见表1。

表1 不同腐蚀周期下的腐蚀数据

Table 1 Corrosion data of different corrosion cycle

腐蚀时间 (周期)	平均腐蚀 深度/ μm	蚀坑宽度/ mm	平均疲劳 寿命/次
0	—	—	122 013
1	27.3	0.162	73 561
2	46.2	0.203	64 231
3	65.2	0.301	49 654
4	77.8	0.382	39 864
5	92.6	0.441	32 864

2 铝合金预测腐蚀损伤

2.1 $GM(1,1)$ 模型

$GM(1,1)$ 模型^[6]适合于研究既包含已知信息,又包含未知信息的“小样本”、“贫信息”的不确定系统。通过对已知信息的研究,提炼和挖掘有价值的信息,进而用已知信息揭示未知信息,使系统不断“白化”。

分别选择1—4周期的平均腐蚀深度、蚀坑宽度、平均疲劳寿命数据为原始数据序列构建 $GM(1,1)$ 模型。首先对原始数据序列进行一次累加,使累加后的数据呈现一定的规律,然后用微分方程描述该数据。设给定原始时间序列 $x^{(0)}$,并记作:

$$x^{(0)} = \{x_t^{(0)} \mid t = 0, 1, \dots, n\} \quad (1)$$

累加后,生成的序列为 $x^{(1)}$,称 $x^{(1)}$ 为 $x^{(0)}$ 的一阶累加生成序列,记作:

$$x_t^{(1)} = \sum_{n=1}^t x_n^{(0)} \quad (2)$$

式中: $t=1, 2, \dots, n$ 。

累加序列消弱了数据的随机干扰,能够突出系统蕴含的内在规律。对生成序列 $x^{(1)}$ 建立白化微分方程,见式(3)。

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (3)$$

式中: a, b 为模型参数。

定义 $x^{(1)}$ 灰导数为 d_t , 其表达式见式(4)。

$$d_t = x_t^{(0)} = x_t^{(1)} - x_{t-1}^{(1)} \quad (4)$$

式中: $t=1, 2, \dots, n$ 。

令 $z^{(1)}$ 为数列 $x^{(1)}$ 的紧邻均值数列, 即:

$$z_t^{(1)} = 0.5x_t^{(1)} + 0.5x_{t-1}^{(1)} \quad (5)$$

式中: $t=2, 3, \dots, n$ 。

则式(3)的微分方程变为:

$$x_t^{(0)} = az_t^{(1)} = b \quad (6)$$

式中: $t=2, 3, \dots, n$; $x_t^{(1)}$ 为灰导数; a 为发展系数;

$z_t^{(1)}$ 为白化背景值; b 为灰作用量。

将 $t=2, 3, \dots, n$ 代入式(6)得到:

$$Y = Bu \quad (7)$$

其中:

$$Y = (x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})^T, u = (a, b)^T,$$

$$B = \begin{bmatrix} -z_2^{(1)} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z_n^{(1)} & 1 \end{bmatrix}$$

利用最小二乘法求得式(7)的解为:

$$u = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (8)$$

选用表1中的数据,对数据序列进行累加处理后,获得预测结果见表2。

表2 GM(1,1)模型预测值与试验值对比

Table 2 Comparisons of values between GM(1,1) model prediction and the experimental result

试验 周期	平均腐蚀深度/ μm		精度/%	蚀坑宽度/mm		精度/%	疲劳寿命/次		精度/%
	预测值	试验值		预测值	试验值		预测值	试验值	
1	26.1	27.3	95.6	0.148	0.162	91.4	74 621	73 561	98.5
2	43.3	46.2	93.7	0.232	0.203	87.5	67 843	64 231	94.6
3	63.8	65.2	97.8	0.299	0.301	99.3	42 935	49 654	86.4
4	72.5	77.8	93.1	0.415	0.382	92.0	35 652	39 864	89.4
5	85.3	92.6	92.1	0.502	0.441	87.8	26 650	32 864	81.9

2.2 BP神经网络模型

BP神经网络^[7]是一种多层前馈神经网络,该网络主要特点是信号前向传递,误差反向传播。输入信号从输入层经隐含层逐层处理,直至输出层。如果输出层与期望输出存在较大误差,则反向传播,根据误差调整网络权值和阈值,使神经网络输出不断逼近期望输出。

根据研究目的,选择试验周期1,2,3,4作为网络输入,相对应的腐蚀深度、蚀坑宽度和疲劳寿命作为网络输出进行网络训练,分别建立 $1 \times 30 \times 3$ 三层网络和 $1 \times 30 \times 30 \times 3$ 四层网络对铝合金腐蚀数据进行处理。隐含层的传递函数为logsig,输出层传递函数为pureline。神经网络经过训练后,建立起输入与输出之间的非映射关系,利用映射关系进行预测

得到腐蚀深度、蚀坑宽度和疲劳寿命,见表3—4。

2.3 预测结果对比

利用上述两种预测模型的结果,分别从训练精度和预测精度两个方面进行对比,训练精度分析采用1—4周期的数据,预测精度分析采用5周期的数据,对比结果如图3所示。

由图3可以得到如下结果。

1) GM(1,1)模型预测结果无论在训练精度和预测精度上都好于BP神经网络预测结果。GM(1,1)模型训练值平均误差不超过7%,预测值平均误差为14%;BP神经网络训练值的平均误差在15%,预测值平均误差为21%。GM(1,1)模型可以很好地描述铝合金腐蚀深度、蚀坑宽度、疲劳寿命随腐蚀时间的变化。

表3 三层神经网络预测值与试验值对比

Table 3 Comparisons of values between three-layer neural network prediction and the experimental result

试验 周期	平均腐蚀深度/ μm		精度/%	蚀坑宽度/mm		精度/%	疲劳寿命/次		精度/%
	预测值	试验值		预测值	试验值		预测值	试验值	
1	24.0	27.3	88	0.177	0.162	91	65 469	73 561	89
2	36.5	46.2	79	0.233	0.203	85	55 880	64 231	87
3	54.1	65.2	83	0.368	0.301	78	36 247	49 654	73
4	66.1	77.8	85	0.435	0.382	86	31 493	39 864	79
5	98.2	92.6	94	0.501	0.441	86.7	30 541	32 864	69

表4 四层神经网络预测值与试验值对比

Table 4 Comparisons of values between four-layer neural network prediction and the experimental result

试验 周期	平均腐蚀深度/ μm		精度/%	蚀坑宽度/mm		精度/%	疲劳寿命/次		精度/%
	预测值	试验值		预测值	试验值		预测值	试验值	
1	24.3	27.3	89	0.135	0.162	83	62 526	73 561	85
2	37.4	46.2	81	0.154	0.203	76	50 100	64 231	78
3	49.5	65.2	76	0.240	0.301	79	33 764	49 654	68
4	65.4	77.8	84	0.313	0.382	82	29 898	39 864	75
5	103.5	92.6	89.5	0.525	0.441	81	21 032	32 864	64

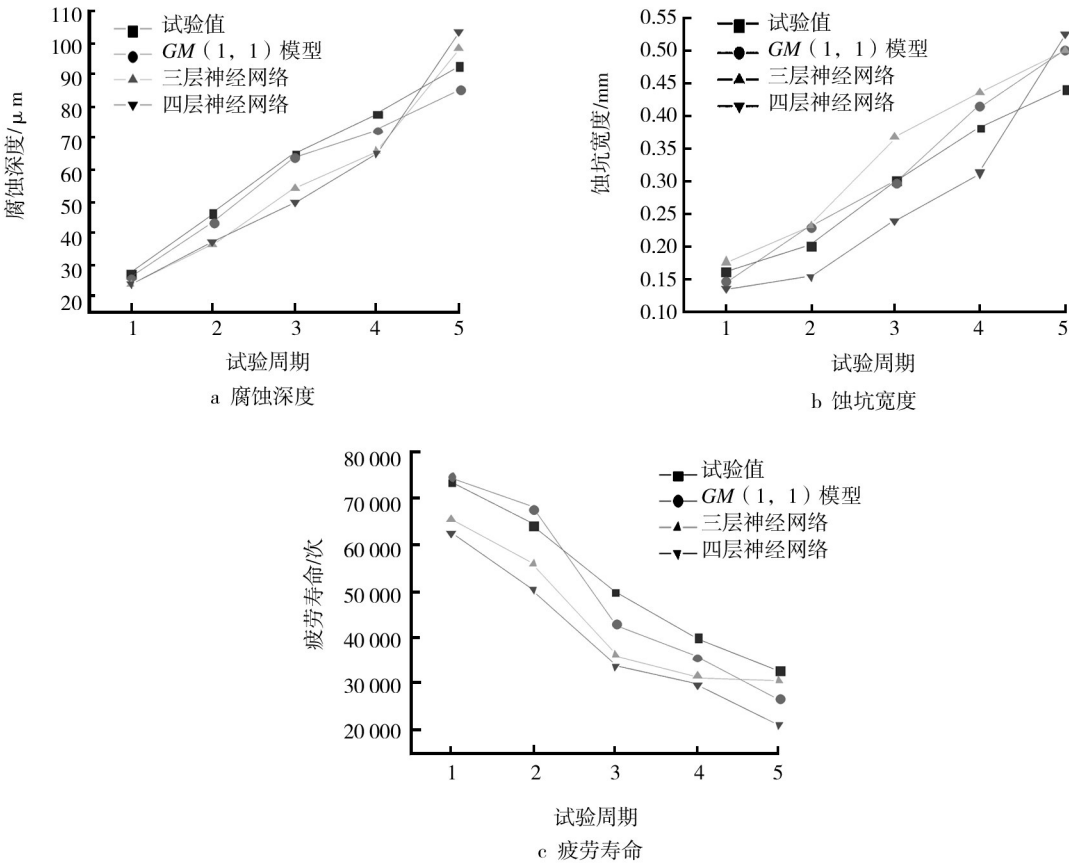


图3 试验值与预测值对比

Fig. 3 Comparisons between test value and predicted value

- [5] 裴和中,雍岐龙,金蕾.金属材料大气腐蚀与环境因素的灰色关联分析[J].钢铁研究学报,1999,11(4):52—54.
- [6] 梁彩凤,郁春娟,侯文泰.不锈钢的大气腐蚀研究:12年暴露实验总结[J].中国腐蚀与防护学报,1999,19(4):227—230.
- [7] PYUN S I, MOON S M, AHN S H, et al. Effects of Cl^- and Ions on Anodic Dissolution of Pure Aluminum in Alkaline Solution[J]. Corrosion Science, 1999, 41(4):653—667.
- [8] BRAGARD A A, BONNARENS H E. Prediction at Long Terms of the Atmospheric Corrosion of Structural Steels from Short-term Experimental Data[C]// Atmospheric Corrosion of Metals: A Symposium. ASTM International, 1982, 767:339.
- [9] 曹楚南.中国材料的自然环境腐蚀[M].北京:化学工业出版社,2005:30—80.
- [10] SKERRY B S, JOHNSON J B, WOD J C. Corrosion in Smoke, Hydrocarbon and SO_2 Polluted Atmospheres: I. The General Behavior of Iron[J]. Corrosion Science, 1988, 28(7):657—659.
- [11] ELOLA A S, OTERO T F, PORRO A. Evolution of the Pitting of Aluminum Exposed to the Atmosphere[J]. Corrosion, 1992, 48(10):854—863.
- [12] 王海涛,韩恩厚,柯伟.碳钢、低合金钢大气腐蚀的灰色模型预测与灰色关联分析[J].腐蚀科学与防护技术,2006,18(4):278—283.
- [13] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中科技大学出版社,2005:2—21.
- [14] MENDOZA A R, CORVO F. Outdoor and Indoor Atmospheric Corrosion of Carbon Steel[J]. Corrosion Science, 1999, 41(1):75—86.
- [15] ELOLA A S, OTERO T F, PORRO A. Evolution of the Pitting of Aluminum Exposed to the Atmosphere[J]. Corrosion, 1992, 48(10):854—863.
- [16] ARSHADI M A, JOHNSON J B, WOOD G C. The Influence of an Isobutane— SO_2 Pollutant System on Earlier Stages of the Atmospheric Corrosion of Metals[J]. Corrosion Science, 1983, 23:763—776.

(上接第3页)

2) 三层神经网络比四层神经网络预测结果更接近试验数据,与经验认知正好相反。分析原因,这是由于训练数据较少,只有1~4 a的腐蚀损伤数据,神经网络没有得到充分的训练,导致预测数据具有较大误差。当神经网络训练不充分时,其网络初值的选择对预测结果的影响很大。

3 结论

1) 灰色系统理论本身就是以少数据、贫信息、不确定的问题为研究对象,因此把腐蚀过程看作一个灰色系统进行研究是合理的。

2) 金属腐蚀研究中由于腐蚀的过程复杂、时间较长、数据很难高密度采集等原因,获取的腐蚀数据量一般较少,而神经网络算法需要大量的已知数据对神经网络进行训练才能得到较为准确的结果。在缺乏足够统计数据的情况下,针对铝合金LY12CZ的腐蚀,灰色模型在训练精度上优于神经网络算法,神

经网络算法在没有得到充分训练的情况下,预测精度较低。

参考文献:

- [1] 张有宏.飞机结构的腐蚀损伤及其对寿命的影响[D].西安:西北工业大学,2007.
- [2] 郭敏骁,封志华,徐伟,等.环境因素与飞机结构寿命[J].装备环境工程,2004,1(5):73—77.
- [3] 苏维国,穆志韬,刘涛,等.基于损伤检测的腐蚀疲劳寿命预测概率模型[J].装备环境工程,2009,6(5):33—37.
- [4] 刘治国,蔡增杰,边若鹏,等.飞机铝合金结构腐蚀损伤预测方法对比性研究[J].装备环境工程,2012,9(1):66—68.
- [5] 张伟,李兆凯,吕胜利,等.LC4铝合金预腐蚀损伤疲劳寿命预测[J].强度与环境,2011(2):40—43.
- [6] 黄海军,李婵,王俊.典型大气腐蚀介质的灰色预测模型分析[J].装备环境工程,2012,9(1):13—15.
- [7] 谭晓明,陈跃良,穆志韬,等.基于人工神经网络的铝合金腐蚀预测及精度分析[J].中国服饰与防护学报,2004(4):218—222.