

航空铝合金材料大气腐蚀环境因子灰色关联分析

王瑞峰¹, 王国才², 苏维国³, 丁文勇³

(1. 海军91911部队, 海南 三亚 572000; 2. 海军驻景德镇地区航空军事代表室, 江西 景德镇 333000;
3. 海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 结合航空铝合金材料LY12CZ在全国7个大气腐蚀试验网站暴晒腐蚀数据, 利用灰色关联分析方法计算出铝合金大气腐蚀速率和腐蚀环境因子在不同暴晒时间的关联度, 分析大气腐蚀环境因子对铝合金材料大气腐蚀的影响规律。LY12CZ自然暴晒1, 3, 6, 10 a的气象环境因子灰色关联度分析结果表明, 各暴露年限气象环境因子关联度排序相对位置均未发生变化; 对于腐蚀环境因子而言, 各暴露年限的腐蚀环境因子发生了变化。

关键词: 铝合金; 大气腐蚀; 环境因子; 灰色关联分析

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.03.007

中图分类号: TG172.3; N941.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)03-0026-06

Application of Grey Relational Analysis to Environmental Factors of Atmospheric Corrosion of Aerospace Aluminum Alloys

WANG Rui-feng¹, WANG Guo-cai², SU Wei-guo³, DING Wen-yong³

(1. Naval 91911 Unit, Sanya 572000, China;

2. Naval Aeronautical Military Representative Office in the Jingdezhen Area, Jingdezhen 333000, China;

3. Qingdao Campus of Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao 266041, China)

Abstract: Grey relational method was applied to evaluate the effect of environmental factors on atmospheric corrosion of LY12CZ aluminum alloys combined with the corrosion data obtained from 7 of the national atmospheric corrosion test stations. Analysis results indicated that the influence order of the meteorological factors in atmospheric corrosion exposing for one year, three years, six years and ten years is always the same. For pollutant factors, the sorted result is changeable at different exposure time.

Key words: aluminum alloy; atmospheric corrosion; environmental factor; grey relational analysis

在金属材料大气腐蚀研究中, 研究大气腐蚀和环境因素的相关性极为重要。大气腐蚀环境因素多种多样, 它们对材料大气腐蚀的影响程度各有不同, 并且铝合金材料的大气腐蚀有其自身特点, 其耐大气腐蚀性主要取决于表面氧化膜的性质和对不同环境因素的敏感性。金属材料的大气腐蚀是一个涉及

收稿日期: 2013-01-24

作者简介: 王瑞峰(1972—), 男, 山东平阴人, 工程师, 主要研究方向为装备维修管理。

多因素、多步骤的复杂系统。能够影响大气腐蚀的环境因素有很多,如气温、湿度、大气中腐蚀性成分(Cl^- , SO_2 , NO_2 等)、降水(含降雨、降雪、雾、凝露等)、降尘、干湿交替状态和交替频次等。对于特定的材料,在特定的大气环境中,上述因素影响金属腐蚀的程度又各不一样。因此,在不同大气腐蚀环境和不同暴晒时间下分析腐蚀速率与环境因子的关联性对研究腐蚀机理有很重要的实际意义。近年,很多国内研究者对碳钢和低合金钢的大气腐蚀进行了广泛的研究,但是很少有文献对航空铝合金材料进行大气腐蚀的研究工作^[1-12]。灰色关联分析方法提供了一种有效处理少量表面无规律数据样本的方法,可以分析不同因素对事物的影响规律。影响金属材料腐蚀的大气环境正是一个信息不完整、不充分的灰色系统,而该系统的各种腐蚀因素(如大气成分、气象条件等)对金属材料腐蚀的影响就构成了一个典型的灰色关联空间。

我国于1984年已初步建成了全国大气腐蚀试验网站。文中收集了包含北京、青岛、武汉、江津、广州、北京和武汉共7个城市的环境参数和航空铝合金LY12CZ在各试验站的腐蚀数据。利用灰色关联分析后计算出LY12CZ铝合金大气腐蚀速率和腐蚀环境因子在不同暴晒时间的关联度,并按关联度排序,以此找出不同腐蚀年限的最大影响环境因子,以及不同环境因子随腐蚀年限的变化规律。

1 灰色关联分析原理

灰色系统研究的对象是一个信息不完全、关系不明确的由主行为与因子构成的系统,即一个灰色关联空间。灰色关联是指事物的不确定关联,灰色关联分析的基本任务是基于因子间的影响程度或因子序列的微观或宏观几何接近来分析和确定因子间的影响程度。灰色关联度是序列之间联系紧密程度的数量表征^[13]。灰色关联分析步骤如下。

1) 确定比较序列和参考序列。系统参考序列表示为:

$$X_0 = \{X_0(k) | k=1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

比较序列表示为:

$$X_i = \{X_i(k) | k=1, 2, \dots, m\} \quad (2)$$

式中: n 为参考序列的因子个数; m 为比较序列

因子个数。

2) 数据初始化。为保证建模的质量与系统分析的正确性,对收集得到的原始数据必须进行数据变换和处理,见式(3)。消除量纲,使其具有可比性。

$$X_i(k) = \frac{X_i(k)}{X_{i,\max}} \quad (k=1, 2, \dots, n, i=1, 2, \dots, m)$$

$$X_{i,\max} = \max\{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

3) 一阶差分序列表示为:

$$\Delta_i(k) = \|X_0(k) - X_i(k)\| \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

4) 两级最大差与最小差表示为:

$$\min \Delta_i(k) = \min\{\Delta_i(1), \Delta_i(2), \dots, \Delta_i(n)\} \quad (5)$$

$$\min \min \Delta_i(k) = \min\{\min \Delta_i(1), \min \Delta_i(2), \dots, \min \Delta_i(n)\} \quad (6)$$

$$\max \Delta_i(k) = \max\{\Delta_i(1), \Delta_i(2), \dots, \Delta_i(n)\} \quad (7)$$

$$\max \max \Delta_i(k) = \max\{\max \Delta_i(1), \max \Delta_i(2), \dots, \max \Delta_i(n)\} \quad (8)$$

5) 灰色关联系数见式(9)。

$$\xi_i(k) = \frac{\min \min \Delta_i(k) + p \max \max \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + p \max \max \Delta_i(k)} \quad (9)$$

式中: p 为分辨系数,一般来讲,分辨系数越大,分辨率越大。关联度是把各个时刻的关联系数集成为一个平均值,即把过于分散的信息集中处理。 p 通常取0.5。

$$[\xi] = \begin{bmatrix} \xi_1(1) & \dots & \xi_1(n) \\ \vdots & & \vdots \\ \xi_m(1) & \dots & \xi_m(n) \end{bmatrix} \quad (10)$$

6) 灰色关联度计算见式(11)、式(12)。

$$y_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

$$\{y_i\} = \{y_1, y_2, \dots, y_m\} \quad (12)$$

7) 按关联度大小排序。 $\{y_i\}$ 按数值大小排序,并进行灰色关联分析。

2 LY12CZ环境因子灰色关联分析

铝合金材料的大气腐蚀是液膜下的电化学腐蚀,电解液薄膜是由空气中水分在金属表面的吸附凝聚及溶有空气污染物形成的^[14]。因此,可以认为环境因子由两部分组成,一是决定液膜形成和液膜持续时间的气象环境因子,另一个是决定表面液

膜腐蚀介质成分和浓度的腐蚀环境因子^[15-16]。气象环境因子和腐蚀环境因子在各试验站 1984—1994 年间的航空铝合金 LY12CZ 板材做成标准试验件,在各

表 1 全国大气腐蚀试验网站环境参数

Table 1 Climatic parameters and atmospheric pollutants of the test sites

地点	青岛	江津	万宁	琼海	广州	北京	武汉
温度/°C	12.5	18.4	24.6	24.5	22.4	12	16.9
相对湿度/%	71	81	86	86	78	57	77
降雨量/(mm·a ⁻¹)	643	5339	6736	1881.4	1494.4	551.8	1243.5
相对湿度大于80%时数/(h·a ⁻¹)	4049	5339	6736	6314	5048	2358	4871
雨日数/(d·a ⁻¹)	92	132	122	149	158	65	114
雾日数/(d·a ⁻¹)	46	24	11	7	4	11	6
露日数/(d·a ⁻¹)	76	229	122	243	137	75	152
日照	2077.9	1317	2026	2072	1607	2559	1621
年日照百分率/%	46	29	45	47	37	50	38
Cl浓度/(mg·m ⁻³)	0.1287	0.0054	0.0382	0.0237	0.0056	0.0127	0.0147
Cl沉积率/(mg·(100 cm ²) ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.2498	0.0067	0.4353	0.1988	0.0235	0.0049	0.0105
SO ₂ 浓度/(mg·m ⁻³)	0.1046	0.234	0.0752	0.0487	0.0318	0.1073	0.1003
SO ₂ 沉积率/(mg·(100 cm ²) ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.7042	0.6973	0.0756	0.1822	0.1068	0.4415	0.2756
NH ₃ 浓度/(mg·m ⁻³)	0.0290	0.0766	0.0108	0.0311	0.0152	0.026	0.061
NH ₃ 沉积率/(mg·(100 cm ²) ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.0396	0.0933	0.0128	0.2843	0.0834	0.0579	0.061
H ₂ S浓度/(mg·m ⁻³)	0.0106	0.0048	0	0.0291	0.0071	0.0001	0.0038
H ₂ S沉积率/(mg·(100 cm ²) ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.0130	0.0038	0.0220	0.0291	0.0152	0.0001	0.0038
NO ₂ 浓度/(mg·m ⁻³)	0.0379	0.066	0.0009	0.0077	0.0352	0.022	0.0887
pH	6.1	4.29	5.01	5.9	5.73	5.5	6.35
雨水 Cl浓度/(mg·m ⁻³)	11 044	1994	7053.5	1873	353		917
SO ₄ ²⁻ 浓度/(mg·m ⁻³)	81 654	31 642	4665	9525	13 702	81 654	11 390
水溶性沉降/(g·m ⁻² ·(30 d) ⁻¹)	2.2246	31 642	1.3753	2.8823	1.2948	7.5334	4.2229
非水溶性沉降/(g·m ⁻² ·(30 d) ⁻¹)	4.2949	3.4338	1.1509	0.0661	3.9885	7.8193	11.7784

试验站大气环境中分别暴晒 1, 3, 6, 10 a, 腐蚀数据见表 2^[9]。

分别把气象环境因子和腐蚀环境因子作为比
表 2 LY12CZ 大气暴晒腐蚀速率

Table 2 Average atmospheric corrosion rate of LY12CZ

地点	平均腐蚀速率/(μm·a ⁻¹)			
	1 a	3 a	6 a	10 a
青岛	2.6000	1.4649	1.0145	0.7739
万宁	1.5100	0.5512	0.2873	0.1776
琼海	0.3100	0.2795	0.2536	0.2361
广州	0.3000	0.2867	0.2808	0.2765
北京	0.1600	0.1337	0.1180	0.1077
江津	1.5000	1.0203	0.8309	0.5387
武汉	0.1800	0.1237	0.0984	0.0832

较序列,把平均腐蚀速率作为相应的参考序列。将比较序列和参考序列代入式(1)~(12),可以计算得到环境因子和腐蚀速率之间的灰色关联度,见表 3 和表 4。

3 说明和讨论

3.1 气象环境因子灰色关联分析

气象环境因子和年平均腐蚀速率在腐蚀 1, 3, 6, 10 a 后的灰色关联度直方图如图 1 所示。

从图 1 和表 3 可以看出,各气象环境因子按关联度排序的相对位置没有变化,说明气象环境因子对

表3 LY12CZ暴露不同年限气象环境因子关联度

Table 3 Grey relational grade of meteorological factors for different exposure time of LY12CZ

气象环境因子		1 a	3 a	6 a	10 a
温度	X1	0.6029	0.6189	0.6494	0.6172
相对湿度	X2	0.6927	0.7150	0.7122	0.6811
降雨量	X3	0.5507	0.5679	0.5990	0.5647
相对湿度大于80%时数	X4	0.6603	0.6802	0.7026	0.6649
雨日数	X5	0.6478	0.6625	0.6937	0.6561
雾日数	X6	0.9357	0.9340	0.9017	0.8752
露日数	X7	0.5413	0.5431	0.5486	0.5622

表4 LY12CZ暴露不同年限腐蚀环境因子关联度

Table 4 Grey relational grade of pollutant factors for different exposure time of LY12CZ

腐蚀环境因子		1 a	3 a	6 a	10 a
Cl ⁻ 浓度	X1	0.9690	0.9622	0.9467	0.9281
Cl ⁻ 沉积率	X2	0.9252	0.9005	0.8852	0.8710
SO ₂ 浓度	X3	0.8786	0.8885	0.9028	0.9196
SO ₂ 沉积率	X4	0.9233	0.9519	0.9425	0.9227
NH ₃ 浓度	X5	0.7963	0.8172	0.8272	0.8438
NH ₃ 沉积率	X6	0.7096	0.7283	0.7405	0.7561
H ₂ S浓度	X7	0.8834	0.8809	0.8714	0.8628
H ₂ S沉积率	X8	0.8661	0.8466	0.8323	0.8209
NO ₂ 浓度	X9	0.8363	0.8604	0.8789	0.8837
pH	X10	0.8656	0.8694	0.8519	0.8385
雨水 Cl ⁻	X11	0.9821	0.9554	0.9339	0.9148
SO ₄ ²⁻	X12	0.9460	0.9362	0.9182	0.9016
沉降 水容	X13	0.7845	0.7921	0.8057	0.8230
非水容	X14	0.8329	0.8524	0.8372	0.8204

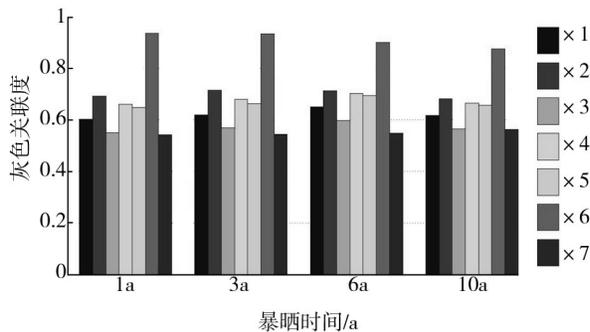


图1 LY12CZ暴露不同年限气象环境因子关联度

Fig. 1 Grey relational analysis of meteorological factors for different exposure time of LY12CZ

LY12CZ 铝合金腐蚀的影响没有随暴晒年限的变化而变化,依次为雾日数、湿度、相对湿度大于80%时数、雨日数、温度、降雨量和露日数。可以明显发现雾日数的关联度始终大于0.8,明显高于其他环境因子,这也说明雾日数在气象环境因子中对LY12CZ铝合金腐蚀的影响贡献最大。相对湿度直接决定表面液膜的形成和持续时间。相对湿度大于80%时数被认为对大气腐蚀影响较大,灰色关联分析也证明了这一点。值得注意的是,温度按关联度排序位置靠后,但是通过大多数加速腐蚀试验发现,温度对金属材料腐蚀有很大的影响,这需要进一步研究。

3.2 腐蚀环境因子灰色关联分析

腐蚀环境因子和年平均腐蚀速率在腐蚀1,3,6,10 a后的灰色关联度直方图如图2所示。腐蚀环境因子序列见表5。

从图2和表5可以发现,大气中Cl⁻浓度、大气中

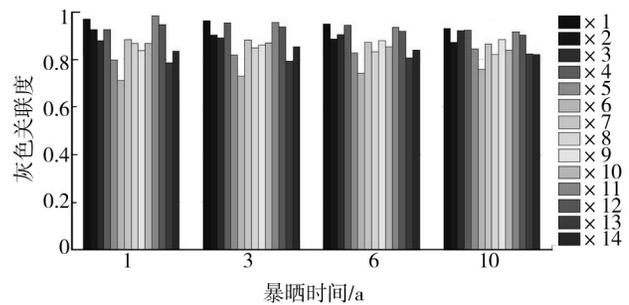


图2 LY12CZ暴露不同年限腐蚀环境因子关联度

Fig. 2 Grey relational analysis of pollutant factors for different exposure time of LY12CZ

Cl⁻沉积率、大气中SO₂浓度、大气中SO₂沉积率、雨水中Cl⁻含量、雨水中SO₂含量始终位于序列前面。大气中NH₃沉积率、水溶性沉降、大气中NH₃浓度、非水溶性沉降、H₂S沉积率始终位于排序的后面。雨水中Cl⁻含量随着大气暴晒年限的增加在排序中的位置逐渐下降,暴晒1 a排序第一,暴晒3 a排序第二,暴晒6 a排序第三,暴晒10 a排序第四。雨水中SO₄²⁻含量随着大气暴晒年限的增加在排序中的位置逐渐下降。大气中Cl⁻浓度排序位置没有较大变化,暴晒1 a排序第二,暴晒3,6,10 a排序第一。大气中SO₂浓度和SO₂沉积率随着大气暴晒年限的增加在排序中的位置明显上升。大气中Cl⁻沉积率随着大气暴晒年

表5 腐蚀环境因子序列
Table 5 Order of pollutant factors

次序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1 a	X11	X1	X12	X2	X4	X7	X3	X8	X10	X9	X14	X5	X13	X6
3 a	X1	X11	X4	X12	X2	X3	X7	X10	X9	X14	X8	X5	X13	X6
6 a	X1	X4	X11	X12	X3	X2	X9	X7	X10	X14	X8	X5	X13	X6
10 a	X1	X4	X3	X11	X12	X9	X2	X7	X5	X10	X13	X8	X14	X6

限的增加在排序中的位置逐渐下降。

随着大气暴晒年限的增加,铝合金材料经历了点蚀、晶间腐蚀、剥蚀,在不同腐蚀阶段,腐蚀影响因子的显著性各有不同^[9]。在腐蚀的开始阶段,铝合金主要发生点蚀,Cl⁻活化作用较强,离子半径小,穿透力强,容易透过氧化性保护膜内极小的孔隙,直接与金属发生反应,生成可溶性化合物。Cl⁻被金属吸附的能力强,它被优先吸附,并从金属表面把氧排挤掉,从而导致被蚀金属表面供氧不足,氧化性保护膜不能及时得到修复,引起铝合金表面氧化膜破裂,发生点蚀,并促使腐蚀继续发展。高浓度SO₄²⁻和NO₃⁻使Cl⁻较难在铝合金表面吸附,减少了点蚀的发生,并使铝合金表面生成厚的不具保护性的水化物氧化膜,SO₄²⁻与铝合金材料的腐蚀作用在钝化膜破坏后体现出来。随着暴露年限的增加,Cl⁻依然起主导作用,但是SO₂腐蚀作用明显提高。Cl⁻和SO₂的协同效应很快体现出来。液膜中SO₄²⁻和NO₃⁻浓度会抑制Cl⁻,并使铝合金材料处于全面腐蚀状态。在SO₄²⁻和NO₃⁻作用下铝合金以均匀腐蚀为主,孔蚀形成的闭塞电池很难得到发展,铝合金腐蚀速率大大下降。通过对铝合金材料大气腐蚀机理研究发现,Cl⁻在腐蚀初期影响很大,随着腐蚀的发展,SO₄²⁻占据了主导地位,这一点也被腐蚀环境因子灰色关联分析所证明。

4 结语

利用灰色关联方法分析大气腐蚀环境因素与航空铝合金大气腐蚀的相关性,并考虑时间的累积作用,研究铝合金大气腐蚀影响因素随时间的变化规律。

1) 气象环境因子作为腐蚀的必要因子是铝合

金属材料大气腐蚀的首要条件。通过对LY12CZ自然暴晒1,3,6,10 a的气象环境因子灰色关联度结果分析来看,各暴露年限的两种材料气象环境因子关联度排序相对位置均未发生变化,依次为雾日数、湿度、相对湿度大于80%时数、雨日数、温度、降雨量、露日数。

2) 腐蚀环境因子作为腐蚀的决定性因子对铝合金材料大气腐蚀速率起到决定性作用。通过对LY12CZ自然暴晒1,3,6,10 a的腐蚀环境因子灰色关联度相对位置结果分析来看,各暴露年限的两种材料腐蚀环境因子关联度排序相对位置有规律地发生了变化。大气中Cl⁻浓度、大气中Cl⁻沉积率、大气中SO₂浓度、大气中SO₂沉积率、雨水中Cl⁻含量、雨水中SO₂含量始终位于序列前面,对铝合金材料大气腐蚀影响较大,是主要的环境因子;大气中NH₃沉积率、水溶性沉降、大气中NH₃浓度、非水溶性沉降、H₂S沉积率始终位于序列后面,对铝合金材料大气腐蚀影响较小。

3) Cl⁻在LY12CZ大气腐蚀的各个阶段对腐蚀的影响较大,但是SO₂腐蚀作用随着大气暴晒年限的增加明显提高。

参考文献:

- [1] FOLEY R T, NGUYEN T H. The Chemical Nature of Aluminum Corrosion V. Energy Transfer in Aluminum Dissolution[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1982, 129(3):464—467.
- [2] 郝献超,李晓刚,董超芳.不同暴露时间下不锈钢在典型地区大气腐蚀的灰色分析[J].北京科技大学学报,2008,30(5):503—504.
- [3] 陈群志,孙祚东,韩恩厚,等.典型飞机结构加速腐蚀试验方法研究[J].装备环境工程,2004,1(3):14—16.
- [4] 萧以德,张三平,曹献龙,等.我国大气腐蚀研究进展[J].装备环境工程,2005,2(5):3—16.

- [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, WOOD 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.