

基于灰色马尔科夫模型的 2A12 铝合金腐蚀预测方法研究

王安东, 陈跃良, 张勇, 王晨光

(海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 目的 研究飞机结构件的腐蚀随时间的变化规律,为其寿命预测及可靠性分析提供参考。
方法 以2A12 铝合金试件为对象,利用加速腐蚀试验设备,对其进行7个周期的加速腐蚀,以获得蚀坑深度的原始数据。在此基础上,将灰色GM(1,1)模型与马尔科夫链模型相结合,建立起能够预测蚀坑深度的灰色马尔科夫模型。
结果 将预测值与试验值进行对比,结果表明,灰色马尔科夫模型预测精度在0~4.5%之间,预测结果比较准确。
结论 该灰色马尔可夫模型能够较好地反映该型铝合金在腐蚀过程中蚀坑深度的变化趋势,建立起了一种新的腐蚀预测方法。

关键词: 灰色马尔科夫模型; 铝合金; 腐蚀; 预测

DOI:10.7643/issn.1672-9242.2014.06.004

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)06-0022-07

The Research on 2A12 Aluminum Corrosion Prediction Method Based on Gray Markov Model

WANG An-dong, CHEN Yue-liang, ZHANG Yong, WANG Chen-guang

(Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering University, Qingdao 266041, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the changing rule of corrosion of aircraft structure parts with time, and to provide a reference for the life prediction and reliability analysis. **Methods** 2A12 aluminum alloy specimens was taken as the object, and the equipment of accelerated laboratory corrosion test was used to perform 7 cycles of accelerated corrosion, to obtain the original data of the depth of corrosion pits. On this basis, combining the gray GM(1,1) model and the Markov chain model, the gray Markov model was established, which could be used to forecast the depth of corrosion pits. **Results**

收稿日期: 2014-07-04; **修订日期:** 2014-08-14

Received : 2014-07-04; **Revised :** 2014-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(51075394;51377503)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51075394;51377503)

作者简介: 王安东(1990—),男,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向为腐蚀防护与控制等。

Biography: WANG An-dong(1990—), Male, from Zhoukou, Henan, Master student, Research focus: corrosion prevention and control.

通讯作者: 陈跃良(1962—),男,浙江东阳人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为结构损伤、疲劳与断裂、强度理论与安全评定准则、腐蚀防护及控制等。

Corresponding author: CHEN Yue-liang(1962—), Male, from Dongyang, Zhejiang, Ph. D., Professor, Doctoral tutor, Research focus: structural damage, fatigue and fracture, strength theory and security evaluation criteria, corrosion prevention and control.

Through comparison of the predicted results with the experimental results, it was found that the prediction accuracy of grey Markov model was between 0 ~ 4.5%, and the predicted results were relatively accurate. **Conclusion** This grey Markov model could well reflect the development trend of the depth of aluminum alloy corrosion pits during the corrosion, and a new method for corrosion prediction was established.

KEY WORDS: gray Markov model; aluminum alloy; corrosion; prediction

目前,铝合金材料广泛应用于飞机的加强肋、腹板、接头件等结构。该类材料对沿海湿热环境具有较强的敏感性,易发生点蚀、晶间腐蚀等腐蚀损伤。这不仅会降低结构的剩余强度和寿命,直接影响到飞行安全,还会给机务人员带来沉重的工作负担。因此,开展飞机铝合金结构的腐蚀预测技术研究,对于预防腐蚀的发生、发展具有很强的现实意义。

飞机结构腐蚀预测的实质是通过数学方法对一定使用年限的飞机结构进行腐蚀损伤仿真^[1]。飞机结构腐蚀不易在线监测,这使得腐蚀相关数据量较少,导致在使用传统统计方法处理腐蚀量随时间的变化规律时,缺乏大样本的前提。灰色系统理论所需样本数据较少,它把一切变量看作是在一定范围内变化的灰色量,即把腐蚀量视为含有未知信息的灰色系统,利用数据列的方法建立 GM(1,1)模型,进行数据分析拟合,递推腐蚀量的变化规律^[2-3]。加之腐蚀过程的随机性、离散性较强,而马尔科夫链理论正是用来研究离散时间、离散状态的随机事件变化,并借此分析预测未来变化趋势的一种手段,其可操作性强且精度较高。

文中将灰色系统理论和马尔科夫链理论相结合,提出一种新的灰色马尔科夫预测模型用于模拟蚀坑深度的发展过程,建立起了在腐蚀环境中飞机结构腐蚀的预测方法。

1 试验方法

1.1 试件

试件材料为飞机结构常用的 2A12 铝合金,其化学组成(以质量分数计)见表 1。试件构型为狗骨状,其几何尺寸分布如图 1 所示,单位为 mm。试件厚度为 3.5 mm。

试验前,首先预处理试件:除油→封样→编号→除油→去离子水冲洗→干燥,之后放入干燥皿中备

表 1 2A12 铝合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of 2A12 aluminum alloy

元素	Al	Cu	Mg
质量分数/%	94.10 ~ 93.70	3.80 ~ 4.90	1.2 ~ 1.8
元素	Mn	Fe	Si
质量分数/%	0.30 ~ 0.90	0.00 ~ 0.50	0.00 ~ 0.50

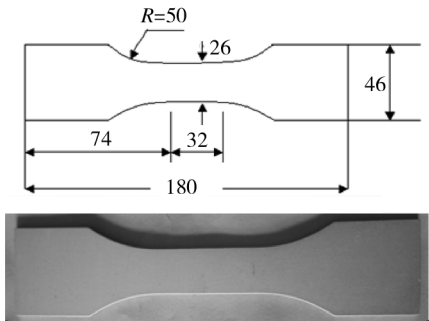


图 1 试件构型及尺寸
Fig. 1 Configuration and dimensions of the specimen

用^[4]。封样是指使用航空防水密封胶将试样的下表面及所有侧面密封,上表面留作试验面。封样完成后,应用耐水砂纸由 120#→280#→360#→600#逐级打磨试验面^[5]。之后对 6 个试样进行编号,分别为 1—6 号。

1.2 加速腐蚀试验

试验采用 ZJF-09G 周期浸润腐蚀试验箱,如图 2 所示。该试验箱主要利用与加速试验环境谱所对应的溶液实现对目标部位浸泡-烘干的加速腐蚀过程。其工作原理为:双向电动机与双向齿轮机构连接后,通过传动装置带动升降机构、托架和腐蚀溶液槽上下直线运动,以实现试件浸入腐蚀溶液或离开溶液后由远红外灯烘烤。试件在溶液中的浸润时间和溶液外的烘烤时间(即浸润周期)由双向时间控制器自动控制。



图2 ZJF-09G 周期浸润腐蚀试验箱

Fig. 2 The box for infiltration cycle corrosion test

根据南海某机场所提供的环境数据,对环境谱进行编制并当量化,得到实验室加速腐蚀试验环境如下所述。

1) 酸性 NaCl 溶液浸泡:5% (质量分数) 的 NaCl 溶液中加入稀硫酸调节,使得溶液 pH = (4 ± 0.2),保持溶液温度为(40±2)℃,以模拟盐雾和酸性气体的作用。

2) 在温度为 40℃、相对湿度 RH 为 90% ~ 100% 的潮湿空气中,用远红外线灯照射并烘干试件。应调节远红外灯功率使得试件在临近浸入溶液时恰好被烘干,以模拟潮湿空气和凝露作用的干湿交替过程。

试验件在试验箱内放置时不应相互接触。为避免环境不均匀对试件的影响,应每 12 h 随机交换试验件位置 1 次。用便携式酸度计(如图 3 所示)每间隔 5 h 测量溶液的 pH 值。若其 pH 值不在规定

的范围内,应立即更换溶液;若在规定范围内,则每间隔 48 h 更换 1 次溶液。进行周期浸润时,设置 1 个循环为 30 min,其中浸泡 8 min,烘烤 22 min,取 288 个循环为 1 个周期,共进行 7 个周期的试验。



图3 便携式酸度计

Fig. 3 Portable pH meter

1.3 试验结果

在每周周期浸润结束后将试件取出,先用清水清洗,再用 HNO₃ 清洗以去除表面腐蚀产物,之后用丙酮清洗试件并将其放入干燥箱烘干。完成上述步骤后,利用 KH-7700 光学显微镜(如图 4 所示)测量蚀坑深度。测量采取如下方法:对每个腐蚀周期下试件的腐蚀区域进行分区,每个区域的大小与显微镜拍照 1 次时所能覆盖的范围相等,对所覆盖区域内的蚀坑拍照、测量。蚀坑形状三维图如图 5 所示,每个周期点的试件均随机拍照测量 3 次。试验获得各试件前 6 个周期的蚀坑深度数据见表 2。

表 2 蚀坑深度数据

Table 2 Data of the corrosion pit depth

μm

编号	第 1 周期			第 2 周期			第 3 周期		
1 号	10.821	37.532	24.315	55.765	16.769	63.320	66.813	80.691	23.358
2 号	22.654	12.373	36.476	20.930	70.332	45.169	30.625	61.125	84.332
3 号	40.653	24.685	14.632	60.656	30.373	42.132	69.636	28.785	77.260
4 号	10.336	26.578	38.629	65.629	28.772	50.639	89.323	60.100	25.176
5 号	32.765	13.526	28.763	57.938	19.836	64.665	92.560	25.367	66.932
6 号	17.699	25.673	30.761	62.378	20.694	57.369	85.348	30.699	63.415
编号	第 4 周期			第 5 周期			第 6 周期		
1 号	28.326	94.382	92.579	110.197	40.854	114.761	111.619	43.376	125.358
2 号	30.574	94.670	80.668	118.629	107.329	58.227	50.837	118.637	119.138
3 号	27.332	89.763	90.754	109.586	98.652	46.238	115.760	49.629	120.114
4 号	85.663	94.956	35.441	109.139	119.878	43.620	133.436	103.765	39.739
5 号	99.321	89.627	37.773	50.700	90.232	119.369	107.731	40.387	137.625
6 号	97.364	92.679	34.285	51.287	92.254	108.578	122.581	109.254	52.369

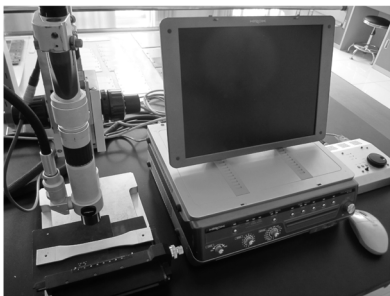


图 4 KH-7700 光学显微镜
Fig. 4 KH-7700 Optical microscope

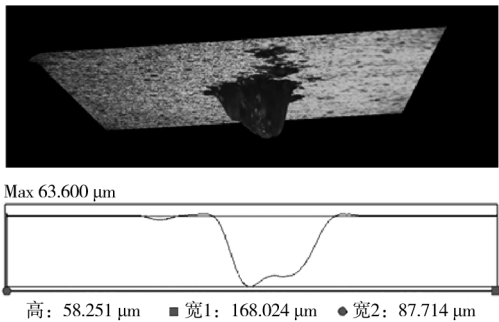


图 5 蚀坑的三维视图
Fig. 5 Three-dimensional view of corrosion pits

2 灰色马尔科夫模型预测腐蚀

灰色 GM(1,1) 模型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。马尔科夫模型则是著名的累积损伤概率模型,可以非常好地描述各种随机损伤以及损伤的状态分布,但所需数据量大^[6]。将两者组合建立腐蚀预测模型,可以将不同观测角度、不同层次的多种信息综合起来,更全面客观地反映数据变化趋势,取得较好的预测效果。灰色马尔科夫预测模型的基本思路在于,首先建立 GM(1,1) 灰色模型,求出预测曲线,再以该曲线为基础划分状态区间,结合马尔科夫链模型预测未来状态,从而求得状态转移概率及预测值区间,取区间中点,最终得到精度较高的预测值^[7]。该模型对于历史数据的要求不是很高,适用性较强,当拥有几组测量数据时,便可以使用灰色马尔科夫理论去预测蚀坑深度的发展。根据表 2 给出的蚀坑深度的试验结果计算出加速腐蚀各周期蚀坑深度的平均值见表 3。为方便计算,以下过程均采用蚀坑深度均值作为计算和对比的依据。

表 3 蚀坑深度均值
Table 3 The mean depth of corrosion pits

编 号	第 1 周期	第 2 周期	第 3 周期	第 4 周期	第 5 周期	第 6 周期
1 号	24.223	45.285	56.954	71.762	88.604	93.451
2 号	23.834	45.447	58.861	68.641	90.728	96.204
3 号	26.627	44.378	58.560	69.283	84.825	95.168
4 号	25.181	48.347	58.120	71.910	87.879	92.313
5 号	25.018	47.480	61.619	75.574	86.767	95.248
6 号	24.711	46.814	59.821	74.776	84.040	94.735

2.1 灰色 GM(1,1) 模型

1) 原始数据的光滑处理。设有原始数据序列 $x_{(1)}^{(0)}, \cdots, x_{(n)}^{(0)}$, 记为:

$$x^{(0)} = (x_{(1)}^{(0)}, x_{(2)}^{(0)}, \cdots, x_{(n)}^{(0)})$$

以试件 1 为例,其腐蚀深度随时间变化的原始序列 $x^{(0)} = (24.223, 45.285, 56.954, 71.762, 88.604, 93.451)$ 。由于该原始数据序列波动性较大,故先做灰色累加处理,将原始数据转化为规律性较强的递增数据序列,弱化其随机性。这是为建立微分方程形式的灰色 GM(1,1) 模型做准备^[8]。即:

$$x^{(1)} = (x_{(1)}^{(1)}, x_{(2)}^{(1)}, \cdots, x_{(n)}^{(1)})$$

$$x_{(k)}^{(1)} = \sum_{i=1}^k x_{(i)}^{(0)}, \quad k = 1, 2, \cdots, n$$

叠加之后所得新序列为 $x^{(1)} = (24.223, 69.508, 126.462, 198.224, 286.828, 380.279)$ 。

2) 建立灰色 GM(1,1) 模型。

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} \tag{1}$$

微分方程(1)为灰色 GM(1,1) 预测模型的白化方程,其中 a, u 为待定系数,二者的值可以通过最小二乘法拟合得到,其拟合计算公式为^[9]:

$$\begin{pmatrix} a \\ u \end{pmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_{(n)}^T \tag{2}$$

式(2)称为参数 a, u 的辨识算式,式中:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x_{(1)}^{(1)} + x_{(2)}^{(1)}) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x_{(n-1)}^{(1)} + x_{(n)}^{(1)}) & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y_{(n)} = (x_{(2)}^{(0)}, x_{(3)}^{(0)}, \cdots, x_{(n)}^{(0)})$$

微分方程(1)的解(称该解为白化方程的时间

响应函数)为^[10]:

$$\hat{x}_{(k+1)}^{(1)} = \left(x_{(1)}^{(0)} - \frac{u}{a} \right) e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (3)$$

对于试件 1, 在使用 Matlab 编程、计算后可得 a, u 的值为: $a = -0.1746, u = 40.3657$ 。式(3)即为累加生成序列 $x^{(1)} = (x_{(1)}^{(1)}, x_{(2)}^{(1)}, \dots, x_{(n)}^{(1)})$ 的预测公式, 计算得 $x^{(1)}$ 的预测值为 $x^{(1)} = (24.223, 72.948, 130.968, 200.057, 282.326, 380.289)$, 通过方程式(4)可将其还原为原始数据序列预测值:

$$\hat{y}_{(k)} = \hat{x}_{(k+1)}^{(0)} = \hat{x}_{(k+1)}^{(1)} - \hat{x}_{(k)}^{(1)} \quad (4)$$

将各数值代入(4)式中计算可得试件 1 在前 6 个加速腐蚀周期原始数据序列的预测值为: $\hat{x}^{(0)} = (24.223, 48.725, 58.020, 69.689, 82.269, 97.963)$ 。

2.2 灰色马尔科夫预测模型

在一次加速腐蚀循环后, 试件的蚀坑深度取决于在这个腐蚀循环之前的损伤程度和这个加速腐蚀循环本身, 任时刻试件的蚀坑深度完全由初始损伤状态和概率转移矩阵来决定。这样蚀坑深度就可以用一个离散时间、离散状态的马尔科夫链来描述^[11]。故在上阶段灰色 GM(1,1) 模型的基础上, 可将非平稳随机序列 $\hat{y}(k)$ 进行状态划分, 其任一状态 Q_k 可表示为:

$$Q_k \in [Q_{1k}, Q_{2k}] \quad (5)$$

式中: $Q_{1k} = \hat{y}_{(k)} + a_k \bar{y}; Q_{2k} = \hat{y}_{(k)} + b_k \bar{y}$ 。其中, $k = 1, 2, \dots, m; \bar{y}$ 为原始数据序列的均值。状态 Q_k 的含义、划分数目以及常数 a_k, b_k 的值需要根据研究对象的实际意义以及样本数据多少来划分^[12]。将由状态 Q_i 经过 k 步转移到状态 Q_j 的次数记为 n_{ij} , 状态 Q_i 出现的次数记为 n_i , 则由状态 Q_i 经过 k 步转移到状态 Q_j 的转移概率为:

$$P_{ij} = \frac{(n_{ij})_{m \times m}}{n_i} \quad (i, j \in Q)$$

将 k 转移矩阵记为 $P = (p_{ij})_{m \times m}$, 于是该系统未来时刻最可能的预测值为:

$$Y_{(k)}^* = \frac{Q_{1k} + Q_{2k}}{2} = \hat{y}_{(k-1)} + \frac{\bar{y}}{2} (a_i + b_i) \quad (6)$$

式(6)即为最终的灰色马尔科夫预测模型。

对于试件 1, 根据方程式(4)可得原始数据序列的预测方程为:

$$\hat{y}_{(k)} = 40.9189 \cdot e^{0.1746k}$$

接下来, 以该曲线为基准, 利用另外 3 条与该曲

线平行的曲线划分 3 个区域, 每个区域为一个状态, 即状态 Q_1, Q_2, Q_3 , 如图 6 所示。

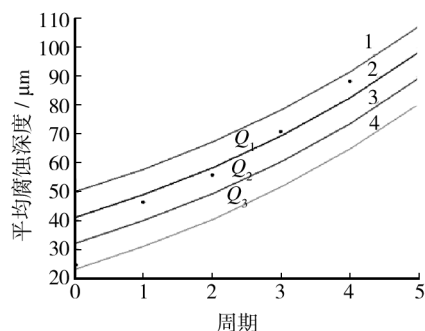


图 6 灰色马尔科夫模型状态划分

Fig. 6 Partition figure of gray Markov model state

图 6 中,

$$Q_1: [Q_{11} = \hat{y}_{(k)} + 0.14\bar{y}, Q_{12} = \hat{y}_{(k)}]$$

$$Q_2: [Q_{21} = \hat{y}_{(k)}, Q_{22} = \hat{y}_{(k)} - 0.14\bar{y}]$$

$$Q_3: [Q_{31} = \hat{y}_{(k)} - 0.14\bar{y}, Q_{32} = \hat{y}_{(k)} - 0.28\bar{y}]$$

曲线 1 方程为:

$$\hat{y}_{1(k)} = 40.9189 \cdot e^{0.1746k} + 0.14 \times 63.455$$

曲线 2 方程为:

$$\hat{y}_{(k)} = 40.9189 \cdot e^{0.1746k}$$

曲线 3 方程为:

$$\hat{y}_{2(k)} = 40.9189 \cdot e^{0.1746k} - 0.14 \times 63.455$$

曲线 4 方程为:

$$\hat{y}_{3(k)} = 40.9189 \cdot e^{0.1746k} - 0.28 \times 63.455$$

由图 6 可知, 落入状态 Q_1, Q_2, Q_3 的样本点数分别为 $n_1 = 2, n_2 = 3, n_3 = 1$ 。状态 Q_1 经一步转移到状态 Q_1, Q_2, Q_3 的次数分别为 $n_{11} = 1, n_{12} = 1, n_{13} = 0$ 。状态 Q_2 经一步转移到状态 Q_1, Q_2, Q_3 的次数分别为 $n_{21} = 1, n_{22} = 1, n_{23} = 0$ 。由于计算中的原始数据序列仅采用了前 6 周期腐蚀深度数据, 且第 6 周期为状态 Q_2 , 故此步中在计算转移概率时应从 n_2 中减去 1, 即将状态 Q_2 的样本点数视为 2。状态 Q_3 经一步转移到状态 Q_1, Q_2, Q_3 的次数分别为 $n_{31} = 0, n_{32} = 1, n_{33} = 0$ 。由此得灰色马尔科夫模型的一步转移概率为:

$$P = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(7)给出的一步转移概率矩阵可以判断出, 腐蚀深度在下个周期最有可能进入状态 Q_1 , 即

可能在灰区间 $[Q_{11}, Q_{12}]$ 中,因此根据式(6)建立的预测模型预测出第 7 周期的腐蚀深度应为:

$$Y_{(7)}^* = \frac{Q_{1k} + Q_{2k}}{2} = \hat{y}_{(6)} + \frac{\bar{y}}{2}(a_i + b_i) = 102.405$$

用相同的方法可依次计算出 2—6 号试件在第 7 个周期的腐蚀深度预测值,将其与试验实测结果进行对比^[13],见表 4。通过数据对比可以看出,在

引入灰色 GM(1,1)模型后,马尔科夫链在样本数较少的情况下,依旧能够进行较为精确的腐蚀预测,且其状态区间能够更好地解决数据序列的波动问题。在建立灰色马尔科夫预测模型后,2A12 铝合金腐蚀深度的发展趋势得到了较好的预测,其误差在 0 ~ 4.5% 之间,预测精度较高。

表 4 蚀坑深度试验值与预测值对比
Table 4 Comparison of test and predicted values of corrosion pits depth

	试 件									μm
	1 号			2 号			3 号			
实测值	136.379	47.681	110.795	128.547	120.113	59.593	125.478	120.752	70.786	
均值	98.285			102.751			105.672			
预测值	102.405			104.295			104.567			
误差	4.19%			1.50%			1.05%			
	试 件									
	4 号			5 号			6 号			
实测值	50.685	112.687	135.665	119.567	142.581	41.620	131.254	58.659	126.065	
均值	99.679			101.256			105.326			
预测值	101.584			104.847			103.578			
误差	1.91%			3.55%			1.66%			

3 结 论

- 1) 为了预测飞机结构的剩余强度、寿命并评估其可靠性,在保证飞机飞行安全的同时减轻机务工作者负担,研究飞机铝合金结构腐蚀深度随时间的变化规律模型是一项基础性工作,具有非常重要的价值。
- 2) 根据试验值与预测值的对比分析可以看出,将灰色 GM(1,1)理论与马尔科夫链理论相结合,建立起的灰色马尔科夫预测模型可以较好地解决小样本条件下的腐蚀预测问题。文中结合实例进行预测,其误差均处于 0 ~ 4.5% 之间,较为准确地反映了铝合金试件蚀坑深度随时间变化的趋势。
- 3) 文中所建立的用来预测铝合金结构中蚀坑深度随时间变化规律的灰色马尔科夫模型,其不仅为蚀坑深度发展趋势的预测提供了一种有效可行的方法,也为腐蚀发展过程中的其它状态如腐蚀速率、蚀坑数目等的预测奠定了基础。同时,还为飞机其他部位结构件的寿命预测及可靠性评估提供

了依据。

参考文献:

[1] 刘成臣,徐胜,王浩伟,等. 基于灰色模型和神经网络的铝合金腐蚀预测对比[J]. 装备环境工程,2013,10(3):1—31.
LIU Cheng-chen,XU Sheng,WANG Hao-wei,et al. Comparative Study of Prediction Models of Aluminum Alloys Based on Gray Model and Artificial Neural Network[J]. Equipment Environmental Engineering,2013,10(3):1—31.

[2] 王道文,于燕. 基于 Matlab 的灰色组合模型在蒸煮管腐蚀减薄预测中的应用[J]. 中国造纸学报,2012,27(2):50—52.
WANG Dao-wen,YU Yan. Application of Combination Gray Model for the Cooking Tube Corrosion Thinning Forecasting based on Matlab[J]. Transactions of China Pulp and Paper,2012,27(2):50—52.

[3] 邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉:华中理工大学出

- 版社,1992.
- DENG Ju-long. Grey Forecast and Decision Making[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press,1992.
- [4] 王逾涯,韩厚恩,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.
- WANG Yu-ya, HAN En-hou, SUN Zuo-dong, et al. Studies of Corrosion Behavior of LY12CZ Aluminum Alloy in EXCO Solution[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005,2(1):20—24.
- [5] 张琳,王振尧,赵春英,等. 碳钢和耐候钢在盐雾环境下的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程,2014,11(1):1—6
- ZHANG Lin, WANG Zhen-yao, ZHAO Chun-ying, et al. Study on Corrosion Behavior of Carbon Steel and Weathering Steel in Salt Spray Test[J]. Equipment Environmental Engineering,2014,11(1):1—6.
- [6] 石伯妹,吕国志,张有宏,等. 腐蚀疲劳裂纹扩展的马尔科夫链模型[J]. 飞机设计,2007,27(5):20—23.
- SHI Bo-mei, LYU Guo-zhi, ZHANG You-hong, et al. Markov Chain Model of Corrosion Fatigue Crack Growth[J]. Aircraft Design,2007,27(5):20—23.
- [7] 杜雯. 一种新的灰色马尔可夫预测模型及其应用[J]. 黄冈师范学院学报,2013,33(3):55—68.
- DU Wen. A New Markov Forecasting Model and Its Application[J]. Journal of Huanggang Normal University, 2013,33(3):55—68.
- [8] 陈永红,张大发,陈登科,等. 优化的灰色模型在核动力系统管道腐蚀速率预测中的应用[J]. 原子能科学技术,2007,4(6):707—710.
- CHEN Yong-hong, ZHANG Da-fa, CHEN Deng-ke, et al. Prediction on Corrosion Rate of Pipe in Nuclear Power System Based on Optimized Grey Theory[J]. Atomic Energy Science and Technology,2007,4(6):707—710.
- [9] 陈永红,张大发,王悦民,等. 基于灰色马尔科夫组合模型的管道腐蚀速率预测方法[J]. 核动力工程,2009,30(2):95—98.
- CHEN Yong-hong, ZHANG Da-fa, WANG Yue-min, et al. Prediction of Pipeline Corrosion Rate Based on Grey Markov Models[J]. Nuclear Power Engineering,2009,30(2):95—98.
- [10] 任永峰,毕宗岳,李周波. 3Cr 钢和碳钢在 CO₂ 环境中的腐蚀速率对比[J]. 表面技术,2013,42(1):29—38.
- REN Yong-feng, BI Zong-yue, LI Zhou-bo. Comparison of the Corrosion Rate of 3Cr Steel and Carbon Steel in CO₂ Environment[J]. Surface Technology,2013,42(1):29—38.
- [11] 秦松. 基于加权的滑动平均-马尔科夫预测模型及其应用[J]. 水资源与水利工程学报,2013,24(1):185—188.
- QIN Song. Markov Prediction Model and Its Application Based on the Weighted Sliding Average[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2013,24(1):185—188.
- [12] 张克中,毛树华,袁卫红. 马尔科夫残差修正灰色模型及其在公路网规划中的应用[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2005,29(4):503—505.
- ZHANG Ke-zhong, MAO Shu-hua, YUAN Wei-hong. Applying Modification Gray Model Based on Markov-chain to Highway Network Planning[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering),2005,29(4):503—505.
- [13] 李旭东,穆志韬,刘治国. 航空高强度 LY12CZ 铝合金腐蚀剩余强度预测. 装备环境工程,2013,37(6):1—4.
- LI Xu-dong, MU Zhi-tao, LIU Zhi-guo. Prediction of the Corrosion Residual Strength of Air High Strength LY12CZ Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering,2013,37(6):1—4.