

## 海水对金属腐蚀因素的分析及预测

杨晓明<sup>1)</sup> 陈明文<sup>2)</sup> 张渝<sup>3)</sup> 戴明安<sup>4)</sup> 朱相荣<sup>4)</sup>

1)北京科技大学高教所,北京 100083 2)北京科技大学数力系 100083

3)北京电子工业职工中专 100010 4)冶金部青岛海洋腐蚀研究所,青岛266071

**摘要** 应用灰关联分析原理讨论了海水环境与金属腐蚀性之间的关系.基于灰关联度的计算,找出了在全浸带条件下,海水中对 A<sub>3</sub> 钢具有腐蚀影响的主要因素.利用人工神经网络 BP 算法建立了海水环境对 A<sub>3</sub> 钢的腐蚀作用模型.用该模型预测了新海水域环境下金属的腐蚀速度,取得了较好的结果.

**关键词** 灰关联分析;BP 网络;海水腐蚀预测

**分类号** O 235

## 1 海水腐蚀因素的灰关联分析

## 1.1 材料腐蚀因素分析

海水是含有生物、悬浮泥沙、溶解气体、腐烂有机物和多种盐类的复杂溶液.在海洋环境中金属的腐蚀受到各种环境因素的影响,而影响金属腐蚀速度的因素主要有海水温度、溶解氧含量、盐度、pH 值、生物活性等.

溶解氧含量是海水具有腐蚀性的一个重要因素.对于许多常用的金属来说,氧含量越高,侵蚀速度越快.温度升高通常能加速化学反应,提高腐蚀速度,但是随着温度升高,氧的溶解度随之下降,从而消弱了温度效应.盐度在各海域中变化范围不大,对金属腐蚀有一定影响,pH 值处于中性时,对腐蚀行为影响较小.生物因素是影响金属腐蚀的重要因素,生物污损的影响很复杂,有时它减少金属的腐蚀量,但多数情况下增加金属的腐蚀.

海水环境中许多因素之间是相互联系的,其中某一因素变化便会影响其他因素的数值,因此很难区分每个因素的单独作用.对于这样一个部分信息确定、部分信息不确定的系统如何分析,以及如何确定各因素的影响大小,我们引进了灰色关联度理论.

## 1.2 灰色关联度理论的应用

灰色关联度理论是一种利用数据相对较少的几何分析方法.它根据因素之间发展态势的相

似程度来衡量因素间关联程度.它对样本量的多少没有过分要求,也不需要典型的分布规律,且计算量小.

(1) 关联度分析方法<sup>[1]</sup>.

设有  $m$  个与母因素  $X_0$  有一定关联作用的子因素  $(X_1, X_2, \dots, X_m)$ . 它们有  $N$  组数据或序列:

母序列  $X_0(k), k = 1, 2, \dots, N;$

子序列  $X_i(k), k = 1, 2, \dots, N; i = 1, 2, \dots, m.$

均值化处理:  $\bar{x}_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n x_0(k); \bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n x_i(k),$

$$x'_0(k) = \frac{x_0(k)}{\bar{x}_0}, \quad x'_i(k) = \frac{x_i(k)}{\bar{x}_i},$$

其中,  $k = 1, 2, \dots, N; i = 1, 2, \dots, m.$

关联系数计算:

$\xi_i(k) =$

$$\frac{\min_k \cdot \min_i |x'_0(k) - x'_i(k)| + \eta \max_k \cdot \max_i |x'_0(k) - x'_i(k)|}{|x'_0(k) - x'_i(k)| + 0.5 \max_i \max_k |x'_0(k) - x'_i(k)|} \quad (1)$$

则关联度计算为:

$$r_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (2)$$

式中:  $r_i$  就是衡量系统因素之间关联性的量度;  $\eta$  是分辨系数,  $0 < \eta < 1$ , 一般取  $\eta = 0.5$ .  $r_i > 0.6$ , 即认为子母因素之间有关联; 如果  $r_i > r_j$ , 则认为  $X_i$  对  $X_0$  的关联程度大于  $X_j$ .

(2) 应用.

现以 A<sub>3</sub> 钢作为试验样品, 研究其在全浸带的

腐蚀情况.以其在海域的平均腐蚀率、局部腐蚀深度为母序列;以各海域的海水环境因素即pH值、温度(℃)、溶解氧(mL/L)、盐度(‰)、生物附着物(%)为子序列X,测试结果见表1.

将表1的数据按(1),(2)式计算得下面结果.

1)对于母因素 $Y_1$ ,计算结果为:

$$r_1=0.7280, r_2=0.6000, r_3=0.8201, r_4=0.6738, r_5=0.6573.$$

表1 A<sub>3</sub>钢在各海域的1年腐蚀数据

海域	环境因素(子因素)					全浸带	
	pH ( $X_1$ )	温度/℃ ( $X_2$ )	溶解氧/mL·L <sup>-1</sup> ( $X_3$ )	盐度/‰ ( $X_4$ )	生物附着物/% ( $X_5$ )	平均腐蚀率/mm·a <sup>-1</sup> ( $Y_1$ )	局部腐蚀深度/mm ( $Y_2$ )
I	8.60	13.6	32.0	5.60	50	0.19	0.41
II	8.14	17.4	24.5	5.62	80	0.19	0.59
III	8.17	20.9	27.0	5.30	100	0.20	0.65
IV	8.30	26.7	34.0	4.50	100	0.10	0.70

2)对于母因素 $Y_2$ ,计算结果为:

$$r_1=0.6122, r_2=0.7602, r_3=0.5490, r_4=0.5742, r_5=0.7938.$$

由结果可知,影响平均腐蚀速率的因素主次关系为:

溶解氧 > pH值 > 盐度 > 生物附着物 > 温度.

影响局部腐蚀深度的因素主次关系为:

生物附着物 > 温度 > pH值 > 盐度 > 溶解氧.

(3)建议.

从海水对A<sub>3</sub>钢腐蚀速率分析,上述5个因素关联度均大于0.6,即都对A<sub>3</sub>钢有影响,但影响最大的是海水中溶解氧的含量( $r_3=0.8201$ ),其次是海水中pH值( $r_1=0.7280$ ).为减少腐蚀速率,在对A<sub>3</sub>钢设施防腐中,应重点使用抗溶解氧及酸碱性涂料以减缓腐蚀影响.

从局部腐蚀深度分析,对A<sub>3</sub>钢腐蚀起主要作用的影响因素是生物附着物( $r_5=0.7938$ ),温度( $r_2=0.7602$ ),及pH值( $r_1=0.6122$ ),为减少腐蚀深度,应加强抗海水中生物附着物的防护措施.

## 2 海水腐蚀预测

使用神经网络来预测海水环境对材料的腐蚀速率是将环境因素与材料腐蚀率之间的关系视为黑箱,进而通过试验数据学习,建立输入(环境因素)与输出(材料腐蚀率)之间的作用关系.理论上已证明:任何函数都可以用3层BP神经网络以任意程度逼近,它不需要预先给出模型,而只需要一组已知条件(输入)和结果(输出)组成的学习样本,即可逼近自学习或有导师的学习获得条件与结果的对应规律.用神经网络方法可预测某材料在某特定海水环境条件下的腐蚀结果(腐蚀速率).

### 2.1 基于神经网络的海水腐蚀预测模型

预测海水腐蚀时采用了3层BP网络模型.第1层为输入层,中间为隐含层,第3层为输出层.各层次间的神经元之间形成全互连接.各层次内的神经元之间没有连接.输入层的节点数为输入向量的分量数,这里为5个,即海水温度、溶解氧含量、盐度、pH值、生物活性;输出层的节点数为输出向量的分量数,这里为1个,即平均腐蚀率;隐含层的节点数根据网络训练拟合情况选取.

海水腐蚀模型和相应的3层BP网络模型见图1.

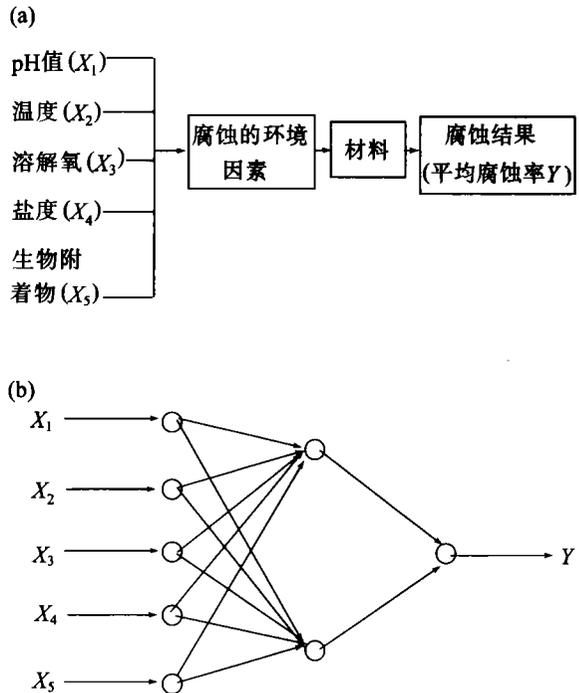


图1 海水腐蚀模型(a)和BP网络模型(b)

网络响应函数采用sigmoed 函数,即:

$$f(x) = 1 / (1 + e^{-x});$$

网络训练的误差目标函数  $E_k$ , 即:

$$E_k = 1 / 2N \sum_{i=1}^N (u_k - \hat{u}_k)^2,$$

式中:  $N$  为训练样本的数量;  $u_k$  为网络的理想输出值;  $\hat{u}_k$  为网络的实际输出值. BP 算法参见文献[2].

### 2.2 实际预测

共测得  $A_3$  钢在青岛、舟山、厦门、榆林、湛江 5 个海域的腐蚀数据(见表 2). 将前 4 个海域的数据作为学习样本, 将湛江的数据作为待测样本.

表2  $A_3$  钢在各海域的 1 年腐蚀数据

海域	环境因素(子因素)					全浸带	潮差带
	pH ( $X_1$ )	温度/ $^{\circ}C$ ( $X_2$ )	盐度/ $\%$ ( $X_3$ )	溶解氧/ $mL \cdot L^{-1}$ ( $X_4$ )	生物附着物/ $\%$ ( $X_5$ )	平均腐蚀率/ $mm \cdot a^{-1}$ ( $Y_1$ )	平均腐蚀率/ $mm \cdot a^{-1}$ ( $Y_2$ )
青岛	8.60	13.6	32.0	5.60	50	0.19	0.22
舟山	8.14	17.4	24.5	5.62	80	0.19	0.29
厦门	8.17	20.9	27.0	5.30	100	0.20	0.22
榆林	8.30	26.7	34.0	4.50	100	0.10	0.16
湛江	8.00	23.0	25.5	5.10	100	0.19	0.23

系统目标误差取  $\epsilon = 10^{-5}$ , 对于全浸带和潮差带条件下, 经学习训练, 选取 5-17-1 型网络, 经不超过  $5 \times 10^3$  次迭代, 可使系统总误差小于  $10^{-5}$ , 学习的结果见表 3.

表3 学习结果

海域	全浸带			潮差带		
	真值	学习值	相对误差%	真值	学习值	相对误差%
青岛	0.19	0.190 8	0.421 1	0.22	0.219 9	0.045 4
舟山	0.19	0.190 8	0.473 7	0.29	0.288 6	0.482 8
厦门	0.20	0.200 4	0.200 0	0.22	0.221 4	0.636 4
榆林	0.10	0.100 5	0.500 0	0.16	0.159 7	0.187 5

以经过学习的模型作为预测模型, 将湛江海域的海水环境输入, 预测结果见表 4.

从以上结果看, 人工神经网络在海水腐蚀预测中的应用还是可行的, 具有较高的预测精度, 有推广价值.

表4 湛江海域预测结果

测定项目	全浸带	潮差带
真值/ $mm \cdot a^{-1}$	0.190	0.230
预测值/ $mm \cdot a^{-1}$	0.192	0.199
相对误差/%	1.52 6	13.478

### 参 考 文 献

- 1 邓聚龙. 灰色系统(社会、经济). 北京: 国防工业出版社, 1985
- 2 焦李成. 神经网络计算. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1993

## Analysis and Forecasting for Main Factors of Corrosion to Metals in Ocean Enviroment

Yang Xiaoming<sup>1)</sup>, Chen Mingwen<sup>2)</sup>, Zhang Yu<sup>3)</sup>, Dai Mingan<sup>4)</sup>, Zhu Xiangrong<sup>4)</sup>

1)Inst of High Education, UST Beijing ,Beijing100083,China 2)Applied Science Shool, UST Beijing

3)Beijing Professional School of Electronics 4)Qingdao Inst of Ocean Corrosion, Qingdao 266071

**ABSTRACT** The relationships between ocean corrosion of metal and the ocean environment were studied by grey relational analysis methods. Under the submergence, the main factors of corrosion for  $A_3$  steel in ocean environment were found in accordance with grey relation grade. Neural network was applied to set a madel of ocean corrosion to  $A_3$  steel. Then the model is used to predict the corrosion rate of  $A_3$  steel in the new ocean environment and a satisfied result is obtained.

**KEY WORDS** grey relational analysis; corrosion; Bp network; ocean corrosion forecasting