

应用BP神经网络预测N80油管CO₂腐蚀速率

贺海军

大庆油田有限责任公司采油工程研究院，黑龙江大庆 163453

[摘要] 通过室内CO₂腐蚀模拟实验获得实验数据，利用灰色理论对CO₂腐蚀参数进行分析确定CO₂腐蚀的主要影响因素，建立BP神经网络腐蚀速率预测模型，利用主要影响因素进行网络训练。利用此模型预测徐深气田某井的腐蚀剖面，预测结果表明：BP神经网络预测结果与气井实验结果接近，体现了BP神经网络在处理非线性数据方面的优越性。灰色理论、神经网络预测模型的研究对于徐深气田CO₂腐蚀研究有一定的指导意义。

[关键词] BP神经网络；N80油管；CO₂腐蚀速率

徐深气田地层压力、温度较高，边底水发育，产出气普遍含CO₂，CO₂含量在0.5~22%之间，生产过程中会发生一定变化^[1]。由于CO₂腐蚀危害严重，因此有必要在CO₂腐蚀速率预测方面做好工作，对腐蚀严重的气井及时采取治理措施，保证气井安全生产。

从20世纪60年代以来，国际上随着高含CO₂油气田的相继开发，对CO₂腐蚀产生的严重后果有了深刻认识，广泛开展了CO₂腐蚀的破坏机理、主要影响因素和腐蚀规律研究，并建立了数以百计的腐蚀速率预测模型。目前国际上关于CO₂腐蚀速率的预测模型^[2]主要包括经验模型(Empirical models)，半经验模型(Semi-empirical models)和机理模型(Mechanistic models)三类。这三类预测模型均存在一定的不完善性和较强的针对性，还需要对其进行更深入的研究和改进。

目前，普遍采用逐步回归法进行CO₂腐蚀速率预测，虽然该方法的数据处理技术便捷，但由于腐蚀过程的复杂性和腐蚀数据的非线性，要做出精确的定量化预测还很困难。近年来随着计算机技术，尤其是神经网络的发展，CO₂腐蚀预测有了新的途径和工具。神经网络可以处理大量含有噪声的数据，从中提取出数据中隐含的规律，用网络来拟合数据的输入和输出之间的映射关系。在腐蚀研究中主要应用其数据处理功能进行腐蚀的分类、性能预测等。腐蚀预测中的主要问题是基于数学模型的理论预测。然而大多数腐蚀现象影响因素多而且是复杂、非稳态、非线性，要找出精确的规律很难。而神经网络的优势在于，它无须人们预先给出公式的形式，而是以试验数据为基础，从中找出规律并建立模型，因而特别适合分析复杂非线性系统的特征。目前，国内外已有人利用神经网络技术，成功的分析了多种腐蚀。典型的应用方面有应力腐蚀开裂、腐蚀疲劳、自然环境中的腐蚀和腐蚀形态的识别。

本文应用BP神经网络模型，通过室内腐蚀实验数据和现场腐蚀监测数据训练网络，预测油管的腐蚀速率，对徐深气田CO₂腐蚀研究有极大的帮助。

1 实验参数确定及腐蚀实验

根据徐深气田地层水资料，按照各种组分的平均值配制实验溶液；通过对气井测试温度、压力，气井CO₂含量确定了实验参数：温度：60~160℃，CO₂分压0.2~5MPa，流速0~2.2m/s。

腐蚀模拟实验采用N80材质试片，利用高温高压反应釜完成模拟实验。在釜中放置好试片，加入实验介质，密封后通过N₂除氧2小时，设定实验温度，通入CO₂至设计的压力，调节转速，开始试验，试片在反应釜内放置一个试验周期。实验结束后，试片在水中清洗，酸中除去腐蚀产物后称重计算腐蚀速率。按照上述方法完成腐蚀实验，实验结果见表1，表2，表3。表4为4口井的现场监测数据。

表1 腐蚀实验结果

序号	温度, °C	CO ₂ 分压, Mpa	流速, m/s	腐蚀速率, mm/a
1	60	0.6	2	1.5855
2	80	0.6	2	4.2368
3	120	0.6	2	0.5855
4	140	0.6	2	0.4678
5	80	0.6	0	1.2824
6	80	0.6	0.6	6.3421
7	80	0.6	1.0	11.4838
8	80	0.6	2.5	13.5828
9	80	0.2	0	0.9354
10	80	0.6	0	1.2824
11	80	1.0	0	1.3549
12	80	2.0	0	1.4506

表 2 不同 HCO_3^- 浓度的腐蚀实验结果

序号	温度, °C	CO_2 分压, MPa	HCO_3^- 浓度, mg/L	腐蚀速率, mm/a
1	80	0.6	0	2.8106
2	80	0.6	1165	1.2824
3	80	0.6	2000	0.6267
4	80	0.6	5000	0.3289

表 3 不同 Cl^- 浓度的腐蚀实验结果

温度, °C	CO_2 分压, MPa	Cl^- 浓度, mg/L	腐蚀速率, mm/a
80	0.6	90	1.0596
80	0.6	1000	1.7274
80	0.6	2000	1.0968
80	0.6	3000	0.7477
80	0.6	5000	1.1540

表 4 现场监测数据

序号	井号	温度 °C	分压 Mpa	监测腐蚀速率 mm/a
1	X1	59	0.244	0.3605
2	X1	59	0.244	0.3515
3	X1	59	0.244	0.3472
4	X2	73	0.606	1.1136
5	X2	73	0.606	1.1138
6	X2	112	0.648	0.4500
7	X3	80	0.491	1.0319
8	X3	107	0.522	0.2876
9	X4	52	0.490	0.5728
10	X4	110	0.693	0.2876
11	X4	89	0.495	1.0319

2 利用灰色理论判断腐蚀影响的主要因素

灰色理论在腐蚀研究领域的应用主要包括关联分析和灰色预测等。如李平等人用灰色关联的方法研究了胺类缓蚀剂的结构与缓蚀效率之间的关系,得到了缓蚀效率最高的缓蚀剂结构特征,为合成缓蚀剂提供了有效的依据;他们还用灰色预测模型建立了碳钢在 3.5%NaCl 和油田污水中腐蚀速率随时间变化的数学模型,有较高的预测精度。孔德英利用灰关联和灰预测研究了海水中碳钢、低合金钢的腐蚀规律。

设影响因变量 y 的自变量共有 n 个,通过实验测得下列 1 组数据:

$x_{11}, x_{21}, x_{31}, \dots, x_{n1}, y_1$

$x_{12}, x_{22}, x_{32}, \dots, x_{n2}, y_2$

.....

$x_{1l}, x_{2l}, x_{3l}, \dots, x_{nl}, y_l$

将以上自变量数据进行均值化处理:

$$x_1^{(0)}(k) = \frac{x_{1k}}{\frac{1}{l} \sum x_{1k}}, \quad k=1, 2, \dots, l$$

.....

$$x_n^{(0)}(k) = \frac{x_{nk}}{\frac{1}{l} \sum x_{nk}}, \quad k=1, 2, \dots, l$$

于是得到 n 个子序列:

$$X_1 = \{x_1^{(0)}(1), x_1^{(0)}(2), \dots, x_1^{(0)}(l)\}$$

.....

$$X_n = \{x_n^{(0)}(1), x_n^{(0)}(2), \dots, x_n^{(0)}(l)\}$$

同样,对因变量 y 进行均值化得到一个母序列为:

$$Y = \{y_0^{(0)}(1), y_0^{(0)}(2), \dots, y_0^{(0)}(l)\}$$

令 $N = \{1, 2, \dots, n\}$, $L = \{1, 2, \dots, l\}$

$$\Delta_1 = \min_{i \in N} \min_{k \in L} |y_0^{(0)}(k) - x_i^{(0)}(k)|$$

$$\Delta_2 = \max_{i \in N} \max_{k \in L} |y_0^{(0)}(k) - x_i^{(0)}(k)|$$

$$\Delta_3 = |y_0^{(0)}(k) - x_0^{(0)}(k)|$$

$$\xi_{0,1}(k) = \frac{\Delta_1 + \rho \Delta_2}{\Delta_3 + \rho \Delta_2}, \quad k=1, 2, \dots, 1$$

$\xi_{0,1}(k)$ 反映了第 k 个时刻子因素 x_i 与母因素 y_0 的相对差值。当绝对差值 $|y_0(k) - x_i(k)|$ 越大时, $\xi_{0,1}(k)$ 越小; 当 $|y_0(k) - x_i(k)|$ 越小时, $\xi_{0,1}(k)$ 越大。因此, $\xi_{0,1}(k)$ 的大小反映了 x_i 对 y_0 的影响程度。称 $\xi_{0,1}(k)$ 为 x_i 与 y_0 在 k 时刻的关联系数。式中 ρ 为分辨系数, 一般在 0 与 1 之间取值, 常取 $\rho=0.5$ 。关联系数的数很多, 为便于比较, 将各个时刻取平均值得到一个值称为关联度:

$$r_{0,1} = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l \xi_{0,1}(k), i \in N$$

关联度反映了因素之间的关系的密切程度。根据关联度的大小排列就可以看出子因素对母因素的影响程度^[3]。

根据实验数据, 依据以上原理, 选择气井腐蚀速率作为腐蚀系统的母因素; CO_2 分压、温度、流速、PH、 Cl^- 、 HCO_3^- 等作为子因素。采用灰色关联度来分析各个腐蚀因素对腐蚀速率的影响程度, 编制灰色关联的分析程序, 见图 1, 输入相关实验数据后得出, 各种影响因素和 N80 腐蚀速率之间的关联度。见表 5。

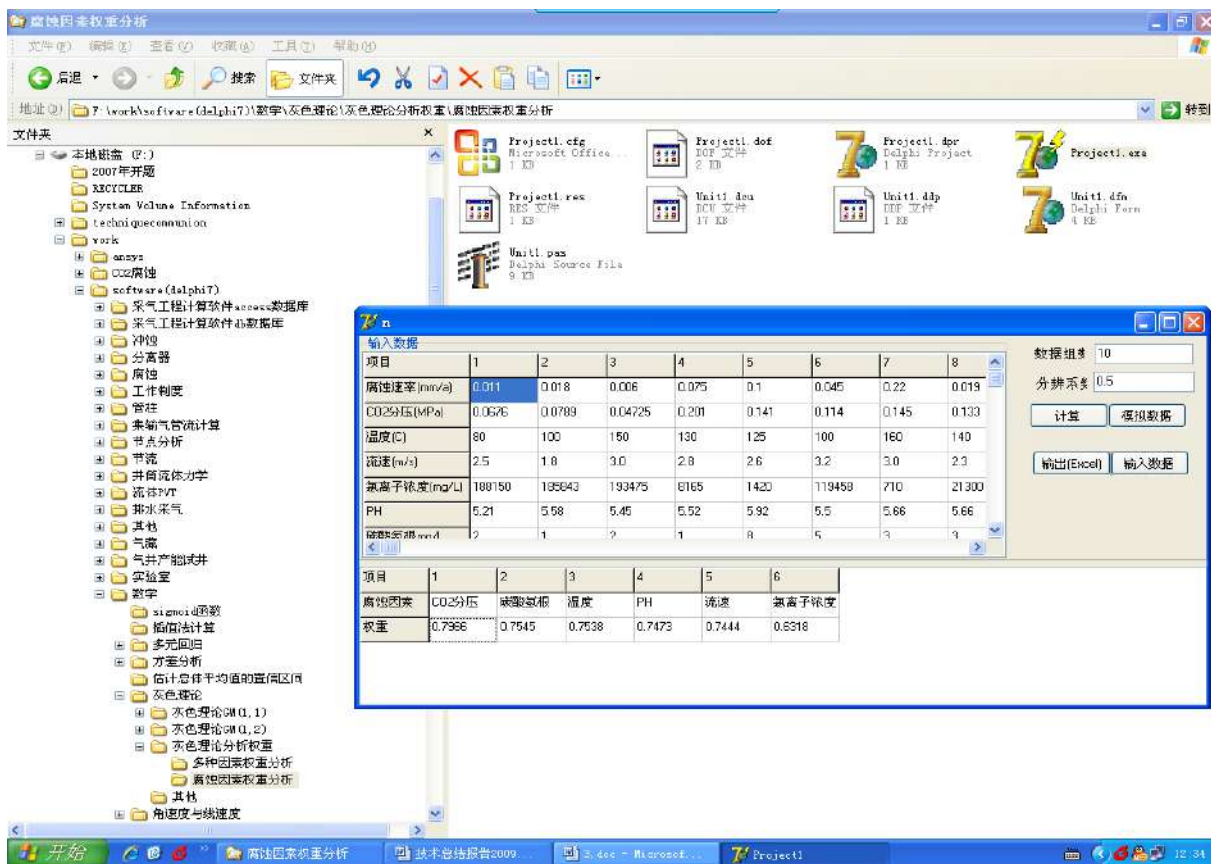


图 1 灰色关联分析程序界面

表 5 腐蚀因素的关联度

因素	CO_2 分压	温度	流速	碳酸氢根	氯离子
关联度	0.88	0.87	0.82	0.67	0.78

关联度越大, 则表明该因素的相关影响程度愈大, 对腐蚀速率影响越大。一般认为灰色关联度 >0.7 的腐蚀因素对腐蚀有一定程度的影响, 灰色关联度 >0.8 的腐蚀因素对腐蚀有显著的影响。通过灰色关联度分析, 建立腐蚀速率预测模型首选对腐蚀有显著影响的因素, 即灰色关联度大于 0.8 的腐蚀因素。

3 神经网络预测模型

BP 网络学习算法^[4, 5, 6, 7] (误差逆传播算法, Error Back Propagation Training) 可解决多层网络训练时连接的权调整问题, 是迄今为止应用最广泛的网络, 可用于语言综合, 自适应控制等。网络不仅有输入层节点, 输出层节点, 还有隐含层 (中间层) 节点 (可以是一层或多层), 对于输入信号, 要先向前传播到隐节点, 经过作用函数后, 再把隐节点的输出信号传播到输出节点, 最后输出结果, 节点函数常采用 S 函数。其网络结构如图 2 所示 (中间层数为 1 层):

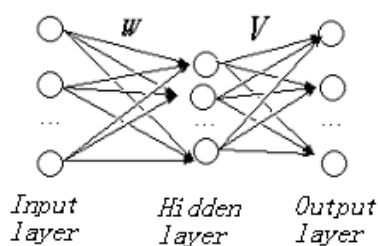


图 2 BP 网络结构示意图

这个算法的学习过程，由正向传播和反向传播组成，正向传播过程中，输入信号从输入层逐层向下传播，依次经过中间层的处理，每一层的输出状态只影响到下一层的神经元的状态，如果在输出层得不到理想的输出，则反向传播，将误差信号沿原来的连通路返回，通过对各层的权值的修改，使误差信号最小。

4 神经网络训练及CO₂腐蚀速率预测

对于一口井的开采过程来说，井筒流体的 PH 值、气体流速、地层水中 HCO₃⁻ 和 Cl⁻ 的含量等因素变化较小，对腐蚀影响不显著，前面的灰色理论分析也证明了这一点。影响腐蚀的主要因素也就是温度、压力的变化。

因此在使用神经网络预测腐蚀速率时，仅考虑温度和 CO₂ 分压的变化，也就是 2 个输入节点（温度和 CO₂ 分压）、1 个输出节点（腐蚀速率）的三层网络结构，其中隐层节点数为 7，网络权值和阈值的初始值为计算机内部根据所设计的网络结构随机选取，建立 BP 神经网络预测模型；算法采用改进的 BP 反向误差传播算法。利用室内实验数据和现场监测数据进行网络训练，用训练好的网络构建不同温度和压力下的腐蚀速率。见图 3，X 轴代表 CO₂ 分压，Y 轴代表温度，Z 轴表示不同温度和压力下的腐蚀速率，从图看出，压力越高，腐蚀越严重，而当温度超过一定数值后，腐蚀速度下降。与室内实验得出的腐蚀规律基本符合。

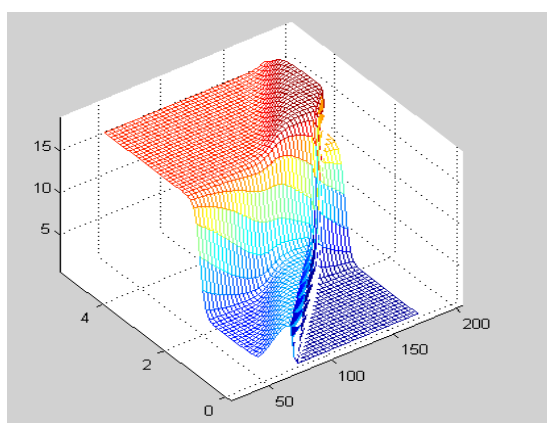


表 3 不同温度和压力下的腐蚀速度预测结果

利用神经网络模型预测徐深气田某井的腐蚀剖面，预测结果见表 5 和图 4。

表 5 某井不同井深的腐蚀速率预测结果

深度, m	温度, °C	压力, MPa	CO ₂ 分压, MPa	腐蚀速率, mm/a
500	31.57	29.98316	0.140	0.8413
1000	50.06	30.98725	0.145	1.3894
1500	68.54	32.01193	0.150	2.2459
2000	87.03	33.0569	0.155	2.8116
2500	105.5	34.1219	0.160	0.4436
3000	123.75	35.20674	0.165	0.4438
3500	138.14	36.31132	0.170	0.4438

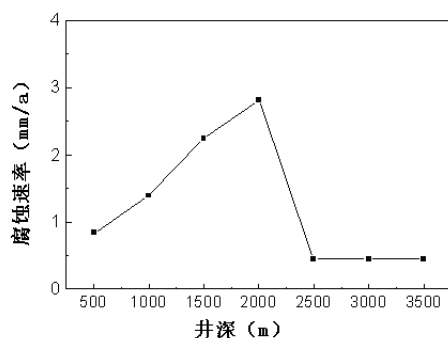


图 4 某井不同井深的腐蚀速率（预测值）

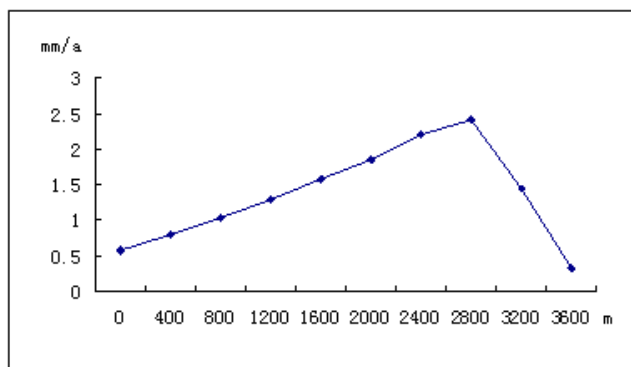


图5 某井国外软件预测结果

从图4可以看出,该井腐蚀速率最大值出现在井深2000米左右,温度80~90℃范围内,这个预测结果与前面实验所得的腐蚀规律是吻合的。图5是使用国外软件预测的结果,比较二图可知,最大腐蚀速度相差不大,但腐蚀最严重的井深稍微有差别,上面的预测是根据徐深气田腐蚀环境进行室内实验得到的数据来进行的网络训练,认为图4更准确一些。

5 结论

BP神经网络数学模型在预测腐蚀速率时不需推导繁琐的数学公式,只需要简单的目标样本,即可利用训练好的人工神经网络进行比较精确的腐蚀速率预测。训练样本越多,预测样本的输出越符合实际,效果越好。

基于已有的CO₂腐蚀研究成果和实验数据,将计算机技术、灰色理论和神经网络等技术应用到CO₂腐蚀模型研究中,建立CO₂腐蚀速率预测的神经网络模型,并得到较好的预测效果,在一定程度上弥补CO₂腐蚀速率常规预测模型的缺点,对徐深气田CO₂腐蚀研究具有一定的指导意义。

[参考文献]

- [1] 刚振宝,刘伟,卫秀芬等.大庆油田深层气井腐蚀规律及防腐对策[J].大庆石油地质与开发,2007,26(3):95-99.
- [2] 张国安,陈长风,路民旭,等.油气田中CO₂腐蚀的预测模型[J].中国腐蚀与防护学报,2005,25(2):119-123.
- [3] 赵景茂,左禹,张金坦.用灰色关联分析法研究气井腐蚀的影响因素[J].北京化工大学学报,2001,28(3):39-42.
- [4] 冯其红,韩松,赵文勇.应用人工神经网络方法预测油井堵水效果[J].大庆石油地质与开发,2001,20(4):42-43.
- [5] 胡小芳,韩廷亮,盖国胜.用人工神经网络预测天然气管道内腐蚀速度[J].油气储运,2004,23(9):56-58.
- [6] 欧阳,韩逢庆.基于BP神经网络的材料腐蚀预测模型[J].西南农业大学学报(自然科学版),2004,26(4):510-513.
- [7] 蒋仕章,王清华,樊成.输气管道内腐蚀速度BP神经网络预测模型[J].油气储运,2002,21(7):22-24.

作者简介:贺海军,1978年出生,男,高级工程师,大庆油田有限责任公司采油工程研究院,从事气井完井、CO₂腐蚀防护工作。邮编:163453 E-mail: hehj@petrochina.com.cn