

# 基于改进 BP 神经网络优化的管道腐蚀速率预测模型研究

许宏良<sup>1</sup>, 殷苏民<sup>2</sup>

(1.江苏城乡建设职业学院, 江苏 常州 213147; 2.江苏大学, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** **目的** 构造金属管道腐蚀速率预测模型, 预测管道的使用寿命。**方法** 分析了二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 和硫化氢 (H<sub>2</sub>S) 对金属管道的腐蚀过程, 给出了管道腐蚀的化学反应方程式。引用了 BP 神经网络构造金属管道腐蚀速率的数学模型, 采用了改进粒子群算法对预测模型进行优化。以 45 号金属管道为例, 借助于 Matlab 软件对管道腐蚀速率进行仿真验证, 并与实验测量数据进行对比和分析。**结果** 金属管道腐蚀速率随着 CO<sub>2</sub> 或 H<sub>2</sub>S 压强的增大而逐渐增大, 仿真结果显示 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 的最大腐蚀速率分别为  $7.20 \times 10^{-5}$  mm/h 和  $5.76 \times 10^{-5}$  mm/h, 而实验测量结果显示 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 的最大腐蚀速率分别为  $7.14 \times 10^{-5}$  mm/h 和  $5.65 \times 10^{-5}$  mm/h, 采用改进 BP 神经网络预测模型所产生的相对误差在 5% 以内。**结论** 金属管道在不同压强条件下, 采用改进 BP 神经网络预测模型能够近似地预测其腐蚀速率, 为金属管道的更换提供了参考依据。

**关键词:** BP 神经网络; 改进粒子群算; 管道腐蚀; 预测模型

**中图分类号:** TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)02-0177-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.02.028

## Prediction Model of Pipeline Corrosion Rate Based on Improved BP Neural Network

XU Hong-liang<sup>1</sup>, YIN Su-min<sup>2</sup>

(1.Jiangsu Urban and Rural Construction College, Changzhou 213147, China; 2.Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**ABSTRACT:** The work aims to predict service life of pipes by building a prediction model of corrosion rate for metal pipes. Corrosion process of metal pipes under the effect of CO<sub>2</sub> or H<sub>2</sub>S was analyzed, chemical reaction equation of pipe corrosion was given, a mathematical model of corrosion rate was built for metal pipes by using BP neural network, and the prediction model was optimized in the improved method of particle swarm optimization. Taking 45<sup>#</sup> metal pipe as an example, corrosion rate of the pipe was simulated and verified with the help of Matlab software, and was compared with the experimental measurements for analysis. The corrosion rate of metal pipes increased with the increase of CO<sub>2</sub> or H<sub>2</sub>S pressure. The simulation results showed that the maximum corrosion rate of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S was  $7.20 \times 10^{-5}$  mm/h and  $5.76 \times 10^{-5}$  mm/h, respectively, while the experimental results showed the maximum corrosion rate of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S was  $7.14 \times 10^{-5}$  mm/h and  $5.65 \times 10^{-5}$  mm/h, respectively. The relative error caused by the improved BP neural network was less than 5%. For metal pipes under different pressure conditions, corrosion rate can predicted approximatively by using the improved BP neural network prediction model, which provide a

收稿日期: 2017-07-12; 修订日期: 2017-08-24

Received: 2017-07-12; Revised: 2017-08-24

基金项目: 江苏省科技支撑计划资助项目(BE2013009-1)

Fund: Supported by Science and Technology Support Program of Jiangsu Province (BE2013009-1)

作者简介: 许宏良(1967—), 男, 副教授, 研究方向为: 燃气管道腐蚀、环境工程。

Biography: XU Hong-liang(1967—), Male, Associate professor, Research focus: gas pipeline corrosion, environmental engineering.

reference basis for replacement of metal pipes.

**KEY WORDS:** BP neural network; improved particle swarm optimization; pipe corrosion; prediction model

随着金属燃气管道长时间的工作,管道腐蚀导致的安全事故明显增多。据不完全统计,在国外管道事故中,有 50%是管道腐蚀造成的。在中国,由于管道材料的发展速度较慢,管道工作的环境中存在高浓度的腐蚀性介质,管道腐蚀的速度也高于国外。因此,管道腐蚀是导致燃气管道失效的主要原因<sup>[1]</sup>。研究管道的腐蚀情况,给管道的维修提供意见,保证管道安全,具有重要意义。

以往燃气管道在运行过程中发现局部坏掉就直接替换新管道,造成了许多浪费<sup>[2]</sup>。因此,许多研究人员从不同角度对管道腐蚀展开了深入研究。例如:文献[3-4]采用马尔可夫链蒙特卡洛法研究管道腐蚀的可靠性模型,分析了管道的几何参数,构造了管道退化的轨道模型,对管道腐蚀进行了可靠性评价,借助于 MATLAB 软件对管道腐蚀进行了仿真,找出了管道失效的关键因素。文献[5]采用点位矩阵法研究管道腐蚀的剩余厚度,构造了电阻网络的数学模型,建立了腐蚀前后的电阻函数关系式,通过有限元软件仿真和实验测量数据,证明了点位矩阵法预测管道腐蚀精度较高。文献[6-7]采用灰色理论预测油气管道剩余使用寿命,建立了 GM(1,1)模型,采用最小二乘法分析管道腐蚀所测量的数据,并且与实验结果进行对比,获知 GM(1,1)模型预测管道腐蚀的精度较高,需要的样本数据较少,为管道定期检查提供了参考依据。但是,以往研究的金属管道腐蚀速率在不同压强条件下,理论与实验的相对误差较大。对此,本文分析了金属管道腐蚀原理,给出了 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 腐蚀过程所发生的化学方程式,采用了 BP 神经网络建立管道腐蚀速率的预测模型,引用了改进粒子群算法优化腐蚀速率预测模型,在 MATLAB 软件中对腐蚀速率预测模型进行仿真,并且与实验测量数据进行对比和分析,为金属管道腐蚀速率的深入研究提供了参考价值。

## 1 金属管道腐蚀原理

### 1.1 二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 腐蚀原理

二氧化碳与水发生化学反应生成碳酸,从而产生电化学腐蚀,称之为二氧化碳腐蚀。当金属管道表面有二氧化碳并且处于潮湿环境中时,管道表面就会产生一层腐蚀产物。当这种产物致密时,就会阻碍管道的持续腐蚀行为。但是,这层产物通常不致密,会与周围氧气产生一个浓度差电极,从而加速管道的腐蚀速率。二氧化碳腐蚀过程包括以下几个部分<sup>[8]</sup>。

(1) 二氧化碳溶于水生成碳酸,其化学反应为:



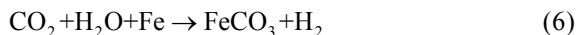
(2) 碳酸溶液分两步发生电离,其化学反应方程式为:



(3) 金属管道在碳酸溶液中产生电化学腐蚀,其化学反应方程式为:



二氧化碳总的腐蚀化学方程式为:



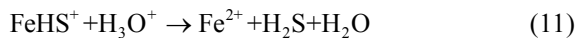
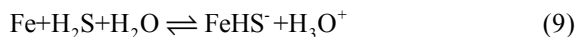
### 1.2 硫化氢 (H<sub>2</sub>S) 腐蚀原理

硫化氢在水溶液中产生电离,致使溶液呈酸性,从而腐蚀金属管道。硫化氢腐蚀主要包括两种类型:第一,硫化氢阴极反应产生的氢原子进入金属管道后发生开裂;第二,阳极电化学反应致使铁溶解,从而形成局部腐蚀。硫化氢腐蚀过程包括以下几个部分<sup>[9]</sup>:

(1) 硫化氢溶于水后产生电离,其化学反应方程式为:



(2) 铁与硫化氢水溶液产生电化学反应,其反应方程式为:



硫化氢腐蚀金属管道的主要产物有 FeS、Fe<sub>9</sub>S<sub>8</sub>、Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>、FeS<sub>2</sub> 等,因为环境不同,产生的腐蚀产物也有所差异。

## 2 BP 神经网络腐蚀预测模型

### 2.1 BP 神经网络

BP 神经网络主要由三部分组成,分别为输入层、隐含层和输出层,如图 1 所示。由已知条件确定输入节点和输出节点数量,输入层接收指令后开始传递给中间的隐含层,隐含层接收信号后进行学习和处理,将处理结果发送给输出层,若误差不满足已知要求,就将误差反馈给隐含层进行修正权值和阈值,直到满

意为止。BP 神经网络的具体算法包括以下几个步骤。

(1) 确定输入和目标样本值, 并且传递给网络。

(2) 根据权值和阈值计算各个隐含层的节点值, 主要用于激活激励函数, 表达式为<sup>[10]</sup>:

$$f(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}} \quad (13)$$

隐含层的输出值求解公式为:

$$b_j = f(s_j) \quad j=1, 2, \dots, p \quad (14)$$

其中:

$$s_j = \sum \omega_{kj} a_i - \theta_j \quad j=1, 2, \dots, p \quad (15)$$

(3) 求解各单元输出层的输入值:

$$l_t = \sum_{j=1}^p v_{jt} b_j - \gamma_t \quad t=1, 2, \dots, q \quad (16)$$

再求解各单元输出层的真实值:

$$C_t = f(l_t) \quad t=1, 2, \dots, q \quad (17)$$

(4) 求解真实值误差:

$$E_n = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^q (y_t - C_t)^2 \quad t=1, 2, \dots, q \quad (18)$$

(5) 修正隐含层各单元的权值和阈值。

(6) 判断误差是否满足已知要求, 若满足, 则停止, 否则重新开始, 直到满足为止。

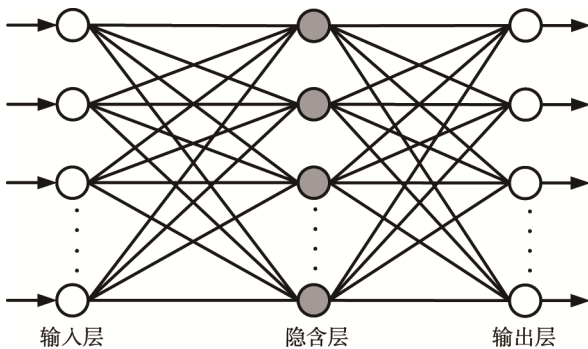


图 1 BP 神经网络控制  
Fig.1 BP neural network control

## 2.2 管道腐蚀模型

金属管道主要受到酸性物质腐蚀, 由于受到环境的污染, 空气中存在  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  气体。当金属管道腐蚀环境中主要存在  $\text{CO}_2$  气体时, 腐蚀速率随着  $\text{CO}_2$  压力的增大而增大, 管道的腐蚀数学模型为<sup>[11]</sup>:

$$\ln(V_C) = C_1 + 0.67 \left[ 1 - \left( C_2 P_{\text{H}_2\text{S}}^2 + C_3 P_{\text{H}_2\text{S}} + C_4 \right) \cdot \frac{P_{\text{CO}_2}}{500 P_{\text{H}_2\text{S}}} \right] \ln(P_{\text{CO}_2}) \quad (19)$$

式中:  $V_C$  为腐蚀速率;  $P_{\text{H}_2\text{S}}$  为  $\text{H}_2\text{S}$  的分压;  $P_{\text{CO}_2}$  为  $\text{CO}_2$  的分压;  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  和  $C_4$  为待定常数。

当金属管道腐蚀环境中的气体为  $\text{H}_2\text{S}$  时, 腐蚀速率随着  $\text{H}_2\text{S}$  压力的增大而增大, 管道的腐蚀数学模型为<sup>[11]</sup>:

$$\ln(V_C) = -0.17 + 0.89 \left[ 1 + \left( -0.54 P_{\text{CO}_2}^2 + 1.47 P_{\text{CO}_2} - 3.01 \right) \cdot \frac{P_{\text{CO}_2}}{20 P_{\text{H}_2\text{S}}} \right] \ln(P_{\text{H}_2\text{S}}) \quad (20)$$

当金属管道腐蚀环境中主要存在  $\text{H}_2\text{S}$  气体和  $\text{CO}_2$  气体时, 腐蚀速率随着  $\text{H}_2\text{S}$  压力和  $\text{CO}_2$  压力的增大而增大, 管道腐蚀数学模型为<sup>[11]</sup>:

$$\ln(V_C) = 0.1 \left[ -698.4 P_{\text{H}_2\text{S}}^2 - 14.24 P_{\text{H}_2\text{S}} + 10.34 \right] \ln(P_{\text{H}_2\text{S}}) + 0.67 \left[ 0.89 P_{\text{H}_2\text{S}}^2 + 0.48 P_{\text{H}_2\text{S}} + 1.45 \right] \ln(P_{\text{CO}_2} - 20 P_{\text{H}_2\text{S}}) + 5.49 \quad (21)$$

## 2.3 改进粒子群优化

粒子群通过迭代追随当前搜索到的最优值来寻找全局最优, 根据个体极值  $P_t$  和群体极值  $G_t$ , 不断更新自身的速度  $v$  和位置  $X$ , 其表达式为<sup>[12]</sup>:

$$v_{t+1} = w v_t + c_1 r_1 (P_t - X_t) + c_2 r_2 (P_t - G_t) \quad (22)$$

$$X_{t+1} = X_t + v_{t+1} \quad (23)$$

式中:  $w$  为惯性权重;  $c_1$ 、 $c_2$  为  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}_2$  速度更新参数;  $r_1$ 、 $r_2$  为在  $[0, 1]$  区间的随机数。

为了提高全局搜索和局部搜索的能力,  $w$  方程式采用线性关系式:

$$w = w_0 - \frac{t(w_0 - w_1)}{T} \quad (24)$$

式中:  $w_0$  为开始惯性权重;  $w_1$  为迭代最大次数惯性权重;  $t$  为当前迭代次数;  $T$  为最大迭代次数。

改进粒子群优化算法的适应度函数为管道腐蚀速率实际输出和改进神经网络输出的相对误差, 其计算公式为:

$$E = \sum_{i=1}^k \left| \frac{f'_i - f_i}{f_i} \right| \quad (25)$$

式中:  $f_i$  为管道腐蚀速率实际输出;  $f'_i$  为管道腐蚀速率改进神经网络输出。改进粒子种群设置为 100, 迭代次数为 200, 惯性权重  $w_0$ 、 $w_1$  分别为 0.9 和 0.4, 速度更新参数  $c_1$ 、 $c_2$  都为 2。改进粒子群优化的管道腐蚀模型的流程如图 2 所示。

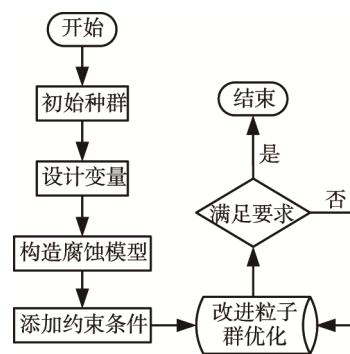


图 2 管道腐蚀模型优化流程  
Fig.2 Optimization flow chart of pipe corrosion model

3 管道腐蚀速率预测分析

采用改进神经网络腐蚀模型预测金属管道在不同压强下的腐蚀速率，预测模型在 MATLAB 软件中进行仿真。金属燃气管道采用 45#钢管，仿真参数为：管道外径 355 mm，管道壁厚 25 mm，管道长度 1 km，气体流速 1.0 m/s，土壤中 pH=6.4，土壤中氧气含量 0.04 mg/L，管道表面温度 25 ℃，测试时间 120 h。在不同压强条件下，CO<sub>2</sub> 腐蚀速率的仿真值与实验测量值如图 3 所示，H<sub>2</sub>S 腐蚀速率仿真值与实验测量值如图 4 所示，CO<sub>2</sub> 腐蚀仿真数据与实验测量数据如表 1，H<sub>2</sub>S 腐蚀仿真数据与实验测量数据如表 2。

本文采用 45#钢金属管道为研究对象，模型对于其他型号的金属管道也同样适用，预测腐蚀速率的方

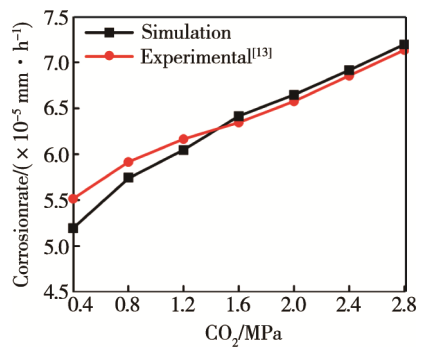


图 3 CO<sub>2</sub> 腐蚀速率  
Fig.3 CO<sub>2</sub> corrosion rate

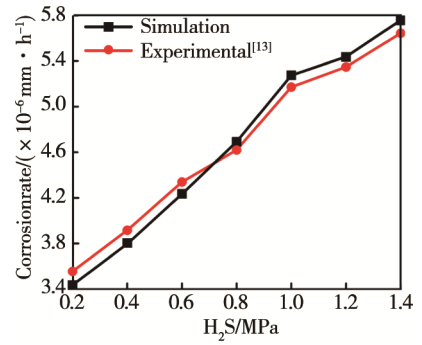


图 4 H<sub>2</sub>S 腐蚀速率  
Fig.4 H<sub>2</sub>S corrosion rate

表 1 CO<sub>2</sub> 腐蚀速率的仿真和实验结果  
Tab.1 Simulation and experimental results of CO<sub>2</sub> corrosion rate

CO <sub>2</sub> /MPa	Simulation corrosion/(×10 <sup>-5</sup> mm·h <sup>-1</sup> )	Experimental corrosion <sup>[13]</sup> /(×10 <sup>-5</sup> mm·h <sup>-1</sup> )	Error/%
0.4	5.20	5.52	4.6
0.8	5.75	5.92	2.9
1.2	6.05	6.16	1.8
1.6	6.42	6.34	1.3
2.0	6.64	6.58	0.9
2.4	6.90	6.85	0.7
2.8	7.20	7.14	0.8

表 2 H<sub>2</sub>S 腐蚀速率的仿真结果和实验结果  
Tab.2 Simulation and experimental results of H<sub>2</sub>S corrosion rate

H <sub>2</sub> S/MPa	Simulation corrosion/(×10 <sup>-6</sup> mm·h <sup>-1</sup> )	Experimental corrosion <sup>[13]</sup> /(×10 <sup>-6</sup> mm·h <sup>-1</sup> )	Error/%
0.2	3.43	3.56	3.7
0.4	3.79	3.92	3.3
0.6	4.24	4.34	2.3
0.8	4.71	4.62	1.9
1.0	5.27	5.18	1.7
1.2	5.44	5.35	1.7
1.4	5.76	5.65	1.9

法与 45#钢金属管道类似。管道表面温度选择常温 25 ℃，实际工况中管道压强与温度通常是变化的，压强与温度的变化对金属管道的腐蚀速率与 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 变化类似，理想与实际误差控制精度都在 5% 以内，如图 3 和图 4 所示。

4 结语

本文研究了 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 在不同压强条件下对金属管道的腐蚀速率，给管道维修提供了指导意见，能够避免管道腐蚀造成的经济损失。分析了 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 在酸性条件下发生的化学反应，给出了管道腐蚀的化学方程式。针对 BP 神经网络预测精度较低等问题，引用改进粒子群算法优化了腐蚀的数学模型，并且对优化模型进行实例仿真。同时，与实验测量数据进行比较和分析。研究结果显示：采用改进 BP 神经网络构造的管道腐蚀预测数学模型，预测腐蚀速率的相对误差在 5% 以内，预测精度较高，为金属管道的使用寿命预测提供了理论数据。由于 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 腐蚀实际测量较为困难，未来管道腐蚀研究的重点仍然是预测模型的研究。

参考文献：

[1] 郭章林, 刘彦香, 宫亮. 基于双曲型风险决策模型和 GIS 的城市燃气管道风险评估[J]. 城市燃气, 2013 (11): 27-31.  
GUO Zhang-lin, LIU Yan-xiang, GONG Liang. City Gas Pipeline Risk Assessment Research Based on Hyperbolic Risk Decision Model and GIS[J]. City Gas, 2013(11): 27-31.

[2] 曹明涛. 燃气管道故障识别的实验与模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
CAO Ming-tao. The Research on Gas Pipeline Faults Recognition Based on Experiment and Simulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

- [3] 吴迪. 基于马尔可夫链蒙特卡洛法的天然气管道腐蚀可靠性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.  
WU Di. Study on Corrosion Reliability of Gas Pipeline Based on Markov Chain Monte Carlo Method[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [4] CHNEDU I O, BRIAN B, DAVIES I. Markov Chain Modelling for Time Evolution of Internal Pitting Corrosion Distribution of Oil and Gas Pipelines[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 60(6): 210-225.
- [5] 万正军, 甘芳吉, 罗航, 等. 基于电位矩阵法的金属管道腐蚀剩余厚度监测研究[J]. 四川大学学报, 2013, 45(4): 98-102.  
WAN Zheng-jun, GAN Fang-ji, LUO Hang, et al. Research on Monitoring the Remaining Thickness of the Corrosion of Metal Pipe Based on the Field Signature Method[J]. Journal of Sichuan University, 2013, 45(4): 98-102.
- [6] LI G D, WANG C H, YAMAGUCHI D, et al. A Study on the Corrosion Process of Gas Pipeline Applying Grey Dynamic Model[J]. International Journal of Reliability and Safety, 2010, 4(1): 3-12.
- [7] 汤东亚, 姚安林, 马洪亮, 等. 基于灰色理论的含腐蚀缺陷油气管道剩余寿命预测分析[J]. 成都大学学报, 2011, 30(2): 181-183.  
TANG Dong-ya, YAO An-lin, MA Hong-liang, et al. Predictive Analysis on Remaining Life of Oil and Gas Pipelines with Corrosion Defects Based on Grey Theory[J]. Journal of Chengdu University, 2011, 30(2): 181-183.
- [8] 许宏良, 殷苏民. 基于动态杂散电流和二氧化碳干扰的输气管道表面腐蚀速率研究[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 206-210.  
XU Hong-liang, YIN Su-min. Surface Corrosion Rate of Gas Pipeline Based on Dynamic Stray Current and Carbon Dioxide Interference[J]. Surface Technology, 2017, 46(1): 206-210.
- [9] 王丹, 袁世娇, 吴小卫. 油气管道 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 腐蚀及防护技术研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(3): 32-35.  
WANG Dan, YUAN Shi-jiao, WU Xiao-wei. Research Progress of CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S Corrosion in Oil and Gas Pipelines and the Protection Techniques[J]. Surface Technology, 2016, 45(3): 32-35.
- [10] SHABARCHIN O, TEFAMARIAM S. Internal Corrosion Hazard Assessment of Oil & Gas Pipelines Using Bayesian Belief Network Model[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 40(3): 480-490.
- [11] HEGAZY M A, EL-ETRE A Y, EL-SHAFAIE M, et al. Novel Cationic Surfactants for Corrosion Inhibition of Carbon Steel Pipelines in Oil and Gas Wells Applications[J]. Journal of Molecular Liquids, 2016, 214(6): 349-354.
- [12] 韩韬. 基于改进 PSO 的 BP Adaboost 算法的优化与改进[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2014.  
HAN Tao. Optimization and Improvement of BP Adaboost Algorithm Based on Improved PSO[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2014.
- [13] ISLAM M A, FARHAT Z N. Characterization of the Corrosion Layer on Pipeline Steel in Sweet Environment[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(8): 3143-3154.