

基于 F-MC 法海上油气管道点腐蚀深度预测研究

王小完, 骆正山, 王 瑞

(西安建筑科技大学管理学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为了对海上油气管道的安全状况进行科学评估, 应用 Frechet 极值分布建立海上油气管道最大腐蚀深度预测模型, 结合蒙特卡罗(MC)方法估计预测模型的参数值, 预测海上油气管道可能的最大腐蚀深度, 并通过马尔科夫链模型对管壁腐蚀的最大概率进行分析预测, 实现对海上油气管道腐蚀现状和运行情况的科学评估和预测. 实证结果表明: 该综合模型能够精确预测海上油气管道的最大腐蚀深度和腐蚀状况, 从而为合理确定管道的检测、维护、维修周期提供科学的依据.

关键词: 海上管道; Frechet 分布; F-MC 综合模型; 腐蚀预测

中图分类号: X937

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)03-0443-06

Study of F-MC method on offshore oil and gas pipelines point corrosion depth forecast

WANG Xiaowan, LUO Zhengshan, WANG Rui

(School of Management, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to scientific evaluation corrosion states of offshore oil and gas pipelines, Firstly, established the maximum depth of corrosion pit prediction model by Frechet extreme distribution, Secondly, by using MCMC, values of parameters in the model were estimated. Probable maximum corrosion depths of pipelines were predicted by using the model. Thirdly, by combining with Markov chain model, the maximum probability state of corrosion in pipeline wall was analyzed, realized the scientific evaluation and forecast of corrosion status and operation condition of the buried oil and gas pipelines, and the accuracy of the model was tested. The results show that: the combination model can well forecast the maximum depth of corrosion pit and the corrosion situation of offshore oil and gas pipelines, and provide a scientific basis for maintenance, repair and detection of the offshore pipelines. It has important guiding significance for ensuring the safe operation of oil and gas pipelines.

Key words: offshore pipeline; frechet distribution; F-MC composite model; corrosion prediction

海上油气管线是海洋油气工程的生命线^[1], 其运营受各种荷载的作用及海洋环境的影响可能失效泄漏, 导致严重的生态污染和巨大的经济损失^[2]. 海上管道腐蚀缺陷有均匀腐蚀、局部腐蚀和点腐蚀^[3], 其中点腐蚀发生的概率密度较大, 且分布在管道的不同部位. 因此, 海上油气管道腐蚀研究重点考虑点腐蚀最大腐蚀深度的确定, 该深度能完全反映整条管道的腐蚀状况, 并以此预测整条油气管道安全状况更加科学^[4].

目前, 国内外许多学者在海上管道腐蚀预测开展了一些工作, 如孙宝财等^[5]利用人工神经网络所具有的高度非线性映射功能, 对现役长输油气腐蚀管道失效压力进行预测, 并综合分析了管径、壁厚、屈服强度、环向腐蚀速率、径向腐蚀速率、

缺陷长度及腐蚀深度对腐蚀管道失效压力的影响; 程浩力等^[6]建立了基于 Excel 软件的 GM(1, 1)灰色数列预测模型, 以此来预测油气管道腐蚀速率; 陈典斌等^[7]通过建立腐蚀管道可靠性模型, 分析了可靠性指标与缺陷深度、管道壁厚、管道压力的关系; Mohd Hairil Mohd 等^[8]采用 ANSYS 非线性有限元方法研究了不同腐蚀损伤和荷载的内部压力和弯矩对海上管道剩余强度的影响; Teixeira 等^[3]和 Caleyó 等^[9]基于内压作用对腐蚀海上管道进行可靠性计算和剩余寿命预测. 但有关海上油气管道点腐蚀深度预测方面的研究却鲜见报道.

1 最大腐蚀深度预测模型

海上油气管道外壁点腐蚀发生的概率密度较

收稿日期: 2016-07-25

修改稿日期: 2017-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271278); 陕西省重点学科建设专项资金资助项目(E08001); 陕西省教育厅自然专项基金资助项目(16JK1465).

作者简介: 王小完(1975—), 女, 副教授, 主要从事管道风险评估理论、建模与方法、企业信息化方面的教学和科研工作.

E-mail: luozhengshan@163.com

大,而在发生点蚀的情况下,管道的可靠性不取决于腐蚀平均深度,而取决于最大腐蚀深度^[10].

1.1 海上管道腐蚀极值分布

对于极值的统计规律研究,大多数人选用较为保守的 Gumbel 分布^[11-15],尽管 F. Caley^[16]等研究管道的最大腐蚀深度采用 Weibull 分布和 GEV 分布都可以描述最大点蚀深度的统计规律,但我们通过实验,将有点蚀缺陷的高钢级油气管道试样(无防腐层)浸泡在海水中3年以上,通过数据分析并结合 E. M. Robert 等^[17]研究海水对低碳钢的腐蚀研究发现:长期浸泡在海水中油气管道外壁最大点蚀深度的统计规律更符合 Frechet 分布,其分布函数为:

$$F_{\parallel}(y) = \exp\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{-\alpha}\right],$$

$$x \in (\gamma, +\infty); \gamma \in (-\infty, x); \alpha > 0; \beta > 0 \quad (1)$$

式中: $F_{\parallel}(y)$ 为腐蚀深度不超过 x 的概率(x 为最大腐蚀深度的随机变量); γ 为位置参数; α 为阈值参数; β 为尺度参数; y 为变量代换, $y = (x - \gamma) / \beta$.

1.2 参数估计

假设有 N 个腐蚀深度 x , 该腐蚀深度数据随机抽取至同环境下某条管道上的最大腐蚀深度, 将 N 个最大腐蚀深度按照从小到大排序, 样本序列为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$, 则第 i 个测量值的统计概率为

$$F(y_i) = i / (N + 1), i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

将获得的检测数据进行统计分析, 将 y 代入式(1)得:

$$F_{\parallel}(y) = \exp(-y^{-\alpha}) \quad (3)$$

由(3)得出相应隐函数方程:

$$y = \sqrt[-\alpha]{-\ln F_{\parallel}(y)} \quad (4)$$

对 N 个测量值 x_i 对应的统计概率 $F(y_i)$ 进行数据拟合, 可得 $\sqrt[-\alpha]{-\ln F_{\parallel}(y)}$ 与腐蚀深度 x_i 之间的关系, 求得统计参数 γ, α, β 的值.

1.3 海上油气管道最大腐蚀深度预测

利用 Frechet 分布对海上油气管道腐蚀深度预测时, 依据检测的最大腐蚀点深度 $x_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 进行.

预测步骤如下:

(1) 采用马尔科夫链蒙特卡罗(MCMC)方法估计如 1.2 节所述参数 γ, α, β 的值.

(2) 用小面积样本最大腐蚀深度估计大面积样本最大腐蚀深度时, 需采用概率统计回归期 T_M . 其定义为

$$T_M = 1 / (1 - F_{\parallel}(y)) \quad (5)$$

回归期的意义为取得最大腐蚀深度 x_m 所需测量的最大面积与单位测量面积的倍数, 即 $T_M = L / l$, 其中 L 为管道的长度, l 为取样管段的长度. (3) 将式(5)带入式(4), 从而求得整条管道线的最大腐蚀深度 x_m :

$$y = \sqrt[-\alpha]{-\ln(1 - 1 / T_M)} \quad (6)$$

$$x_m = \beta y + \gamma \quad (7)$$

2 MC 模型

海上油气管道点腐蚀属于离散变量且具有随机性. 令 $\{X_n, n = 1, 2, \dots\}$ 为一离散的随机变量序列, n 表示每一变量值 X_n 所对应的时间点. 所有 $X_n, n \in [1, 2, \dots]$ 为状态空间, 记为 E . 对任意正整数 n 及任意状态, $i_1, i_2, \dots, i_n, i_{n+1} \in E$, 若 $\{X_n\}$ 具有以下性质:

$$P(X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n, \dots, X_2 = i_2, X_1 = i_1) = P(X_{n+1} = i_{n+1} |$$

则由 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 构成随机过程称为马尔可夫链^[18]. 式中 $P(X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n)$ 称为转移概率.

MC 应用在海上油气管道腐蚀状况预测模型中, 其优势在于 MC 模型对未来状态可靠性预测仅关注其当前状态, 而与过去状态无关, 这对我国海上管道历史数据缺乏, 评估与预测其风险意义重大. 为描述海上油气管道腐蚀随时间变化过程, 需建立状态转移概率矩阵. 假设转移概率 $P(X_{m+1} = i_{n+1} | X_n = i_n)$ 不随 n 的变化而变化(转移概率不随时间变化), 说明一步转移概率不变^[19]. 对任意状态 $i, j \in E$, 一步转移概率为:

$$P_{i,j} = P(X_{n+1} = j | X_n = i) = P(X_2 = j | X_1 = i) = M_{i,j} / M_i \quad (8)$$

式中: $P_{i,j}$ 为已知 $X_n = i$ 的条件下, $X_{n+1} = j$ 的转移概率; $M_{i,j}$ 为从状态 i 经过一步转移到状态 j 的转移次数; M_i 为处于状态 i 的次数.

一步转移概率矩阵由 $m \times m$ 方阵 P 表示, m 为被划分的状态数, 即

$$P = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \cdots & P_{1,m} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \cdots & P_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ P_{m,1} & P_{m,2} & \cdots & P_{m,m} \end{bmatrix}$$

P 具有下列性质:

$$\sum_{j=1}^m P_{i,j} = 1; 0 \leq P_{i,j} \leq 1, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, m$$

系统处于任一初始状态, 经过 n 步, 必定处于某状态. 已知 P , n 步转移矩阵 $P^{(n)}$ 可由切普曼-柯尔莫哥洛夫方程计算: $P^{(n)} = P^{(n-1)}P = P^n$. 假设系统处于某一初始状态, 记为 S_0 , 经过 n 步, 所处状态 S_n 可用式(9)计算.

$$S_n = S_0 P^{(n)} = S_0 P^n \tag{9}$$

表 1 管壁的腐蚀损伤评价

Tab. 1 The corrosion and damage evaluation of pipe wall

腐蚀等级	最大腐蚀深度/pit · mm ⁻¹
轻度	<1% 小于管理厚度 1%
中度	1~2% 管壁厚度的 1~2%
重度	管壁厚度的 2~50%
非常严重	管壁厚度的 50%~80%
穿孔	>80%的管壁厚度

根据点腐蚀状况计算出油气管道各段最大腐蚀深度如表 3 所示:

将各段计算最大腐蚀深度从小到大进行排序并编号, 按照(9)式计算各点的累计概率函数, 得表 4 数据.

表 3 油气管道最大腐蚀深度

Tab. 3 Oil and gas pipelines maximum corrosion depth

腐蚀段标号	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
腐蚀深度/mm	0.89	1.03	1.648	1.236	1.133	1.545	2.781	2.06	2.472
腐蚀段标号	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17	L18
腐蚀深度/mm	1.854	3.399	1.854	2.884	7.725	8.652	6.901	5.768	4.326

表 4 计算各点的累计概率函数值

Tab. 4 Calculate the cumulative probability function value at every point

序号	腐蚀段标号	最大腐蚀深度/mm	累计概率函数	$-\frac{a}{\sqrt{-\ln F_{\parallel}(y)}}$	序号	腐蚀段标号	最大腐蚀深度/mm	累计概率函数	$-\frac{a}{\sqrt{-\ln F_{\parallel}(y)}}$
1	L1	0.89	0.052 6	1.080 1	10	L9	2.472	0.526 3	-0.443 3
2	L2	1.03	0.105 3	0.811 3	11	L7	2.781	0.578 9	-0.604 0
3	L5	1.133	0.157 9	0.612 9	12	L13	2.884	0.631 6	-0.777 6
4	L4	1.236	0.210 5	0.443 6	13	L11	3.399	0.684 2	-0.968 9
5	L6	1.545	0.263 2	0.288 9	14	L18	4.326	0.736 8	-1.186 0
6	L3	1.648	0.315 8	0.142 1	15	L17	5.768	0.789 5	-1.442 4
7	L10	1.854	0.368 4	-0.001 4	16	L16	6.901	0.842 1	-1.761 1
8	L12	1.854	0.421 1	-0.145 2	17	L14	7.725	0.894 7	-2.195 8
9	L8	2.06	0.473 7	-0.291 4	18	L18	8.652	0.947 4	-2.918 1

3 实证研究

某在役海上油气管道总长为 5.4 km, 运行 10 年有余, 管道规格 D355 mm×10.3 mm, 管材型号为 API 5L X56. 依据表 1 对该管道的外管壁腐蚀状况进行划分, 划分结果见表 2.

表 2 管壁腐蚀状态

Tab. 2 The corrosion states of pipe wall

腐蚀等级	最大腐蚀深度/mm	腐蚀状态
轻度	<1	1
中度	1~2	2
重度	2~5.15	3
非常严重	5.15~8.24	4
穿孔	>8.24	5

根据表 4 以及已有腐蚀数据可得随服役年限增加腐蚀深度变化情况, 如图 1 所示, 由此看出, 局部管道外壁腐蚀最大腐蚀深度值与 $y=a+bx$ 存在近似线性关系, 这也正说明了最大腐蚀深度服从 Frechet 分布.

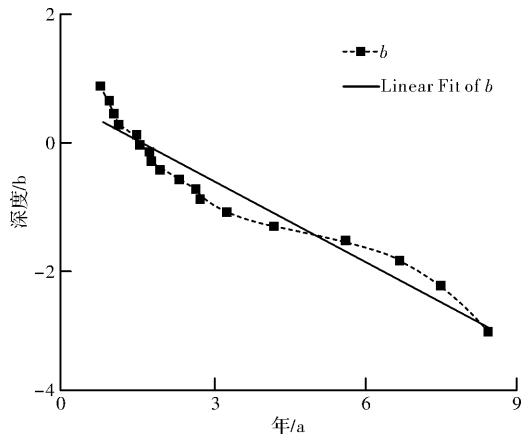


图 1 油气管道随服役年限增长点腐蚀深度变化

Fig. 1 with the service life of oil and gas pipelines growth point corrosion depth change

3.2 管壁最大腐蚀深度预测

近年对该管道试验点进行了 6 次常规检测, 根据检测结果得出管壁的最大腐蚀深度见表 5.

表 5 管壁最大腐蚀深度数据

Tab. 5 The data of maximum corrosion depth of pipe wall

检测 序列	最大腐蚀 深度/mm	检测 序列	最大腐蚀 深度/mm
1	0.86	4	1.65
2	0.99	5	2.01
3	1.23	6	2.22

应用 Frechet 极值分布建立管道最大腐蚀深度预测模型, 用马尔科夫链蒙特卡罗(MCMC)方法估计参数, 通过模型预测出可能的最大腐蚀深度.

基于 MCMC 方法估计海上油气管道最大腐蚀深度预测模型的参数, 在运用 MCMC 方法进行数据模拟中, 选定迭代次数为 10 000 次, 对 Frechet 分布进行 Gibbs 抽样, 获得参数的 Gibbs 迭代轨迹和迭代历史, 其中迭代轨迹随机选择迭代次数第 9 500~10 000 次, 如图 2(a)~(c)所示.

从图 2 所示参数的 Gibbs 迭代轨迹和迭代历史基本趋于稳定, 即收敛. 参数估计见表 6, 表中给出了用 MCMC 方法所得到的各参数的后验均值、标准差, MC 抽样误差、中位数和 97.5% 的置信区间, 由此来综合做出初步的统计推断.

上述图表数据表明, 通过 MCMC 方法得到的模型参数值是比较精确的. 因此, 通过软件模拟, 得估计参数 $\alpha=0.133\ 4$, $\beta=-0.426\ 8$, $\gamma=0.673\ 0$. 根据式(7)计算最大腐蚀深度 $=8.829\ 3\ \text{mm}$.

表 6 参数模拟估计结果

Tab. 6 Simulation results for values

参数	均值	标准偏差	MC-抽 样误差	中值	97.5% 置信区间
α	0.133 4	0.097 9	0.001	0.132 4	(0.012, 0.33)
β	-0.426 8	0.078 8	0.001	-0.425 8	(-0.62, -0.23)
γ	0.673 0	0.046 3	0.001	0.667 2	(0.47, 0.87)

根据 Frechet 极值分布灰色预测模型的管壁最大腐蚀深度预测结果, 并结合管壁腐蚀损伤评价标准对管壁的腐蚀状态进行划分, 管壁腐蚀状态的划分结果见表 7.

表 7 管道腐蚀状态划分结果

Tab. 7 The results of pipeline corrosion states division

时间/a	最大腐蚀 深度/mm	状态	时间/a	最大腐蚀 深度/mm	状态
0	0	1	6	2.11	3
1	0.86	1	7	3.54	3
2	1.07	2	8	4.86	3
3	1.35	2	9	6.13	4
4	1.68	2	10	7.45	4
5	1.99	2	11	8.25	5

3.3 管壁腐蚀最大状态概率预测

为确定海上油气管道管壁腐蚀状态随时间的发展变化规律, 建立管壁腐蚀状态转移矩阵. 确定转移矩阵 P 为

$$P=\begin{bmatrix}1/2 & 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3/4 & 1/4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2/3 & 1/3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2 & 1/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

管道腐蚀状况预测:

以管壁原始状态为预测的初始状态, 其腐蚀状况为状态 1, 写成向量 $S_0=[1\ 0\ 0\ 0\ 0]$. 利用式(9)进行计算, 得到预测值如表 8 所示. 可以看出, 时间为 11 年时, 腐蚀管道状态进入了腐蚀状态 5, 表明管道可能发生穿孔, 其概率为 0.33.

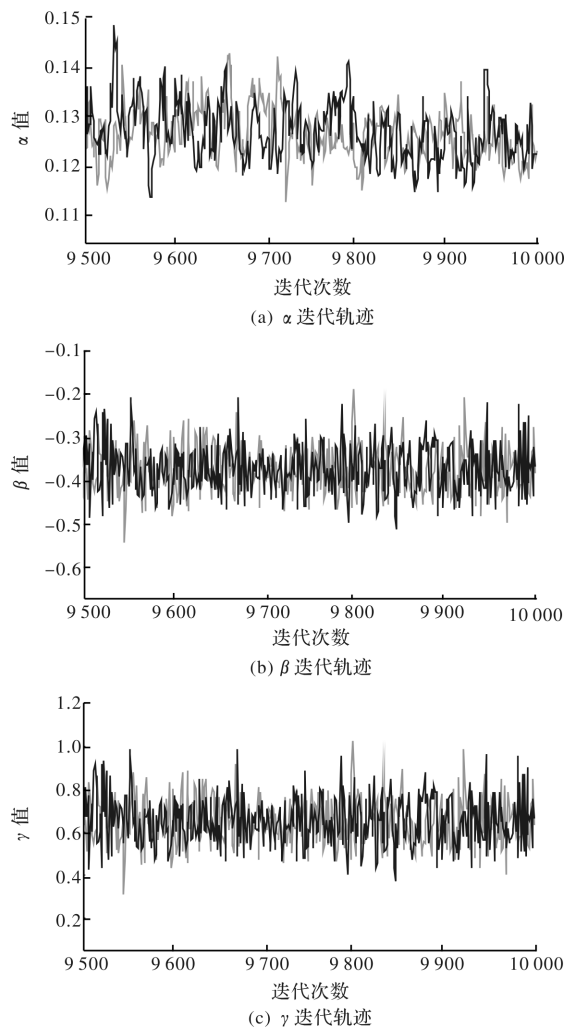


图 2 运用 MCMC 法对参数 α 、 β 、 γ 进行 10 000 次模拟轨迹

Fig. 2 Using MCMC method to the parameter alpha, beta, gamma 10 000 times of simulation on trajectory

表 8 管壁腐蚀状态分布概率预测值

Tab. 8 The prediction of distribution probability of pipeline corrosion states

时间/a	状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	状态 5	最大概率状态
2	0.25	0.63	0.13	0	0	2
3	0.13	0.59	0.24	0.04	0	2
4	0.06	0.51	0.31	0.1	0.02	2
5	0.03	0.41	0.33	0.15	0.07	2
6	0	0.75	0.25	0	0	2
7	0	0.56	0.36	0.08	0	2
8	0	0.42	0.38	0.16	0.04	2
9	0	0.32	0.38	0.2	0.12	3
10	0	0.24	0.32	0.22	0.22	3
11	0	0.18	0.27	0.22	0.33	5
12	0	0.13	0.22	0.2	0.44	5

通过表 8 的预测结果，我们可以看出，腐蚀管道进入状态 3 以后，极有可能经过一定时间就达到状态 5，而由状态 3 转化到状态 4 的时间可能不到 1 年，即少于预测的间隔时间。由此可以得出结论，在该管道运行到第 10 年时，就需要更换新管。因此，采用马尔可夫链，预测腐蚀海上油气管道腐蚀状况更具可靠性，并且能够确定出合理的管线维修或更换时间。

4 结论

通过研究得到以下三个基本结论：

(1)通过实验进一步研究表明，点腐蚀随时间增长腐蚀深度的变化规律符合 Frechet 分布，进而结合实验及监测数据的研究分析确定了海上油气管道外腐蚀情况随时间变化的基本规律；

(2)在确定海上油气管道腐蚀情况随时间变化的规律的基础上，运用 F-MC 方法，构建了海上油气管道外壁点腐蚀综合预测模型，实现对海上油气管道点腐蚀概率和最大腐蚀深度的定量预测；通过实证研究表明，该模型预测结果与实际检测数据高度吻合，验证了模型的正确性。

(3)该研究为实现海上油气管道可靠性评估由定性研究向定量研究转化提供了重要方法和理论基础，也可为海上油气管道的维护、维修和完整性管理提供决策支持。

参考文献 References

[1] 穆龙新,潘校华,田作基,等. 中国石油公司海外油气资源战略[J]. 石油学报,2013,34(5):1023-1030.
MU Longxin,PAN Xiaohua,TIAN Zuoji,et al. The overseas hydrocarbon resources strategy of Chinese oil-gas companies[J]. ActaPetrolei Sinica,2013,34(5):1023-1030.

[2] 张抗. 依靠自主设备开发深海油气[J]. 石油学报,2013,34(4):802-808.
ZHANG Kang. Developing oil and gas from deep waters with the self-manufactured equipment[J]. ActaPetrolei Sinica,2013,34(4):802-808.

[3] TEIXEIRA AP, SOARES CG, NETTO TA, et al. Reliability of pipelines with corrosion defects[J]. International Journal of Pressure Vessel and Piping, 2008,85(4):228-237.

[4] 张新生,曹乃宁,王小完. Gumbel 分布的油气管道的剩余寿命预测[J]. 中国安全科学学报,2015,25(9):96-101.
ZHANG Xinsheng, CAO Naining, WANG Xiaowan. Residual life prediction of oil and gas pipeline based on

- Gumbel distributeon[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(9):96-101.
- [5] 孙宝财,李淑欣,俞树荣,等. 改进 BP 算法的腐蚀管道剩余强度预测[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2011, 31(5):404-408.
- SUN Baocai, LI Shuxin, YU Shurong, et al. Prediction of remaining strength of corroded pipelines based on improve BP algorithm[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2011, 31(5):404-408.
- [6] 程浩力,吕仁军,姜炜,等. 基于 Excel 的 GM(1,1)模型在预测油气管道腐蚀速率中的应用[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(4):378-380.
- CHENG Haoli, LÜ Renjun, JIANG Wei, et al. Application of GM(1,1) model based on excel to prediction of oil and gas pipeline corrosion rate[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(4):378-380.
- [7] 陈典斌,韩东霏,马俊英,等. 基于 VB/GM(1,1)/MATLAB 的腐蚀管道剩余寿命预测及结构可靠度分析[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(2):197-205.
- CHEN qianbin, HAN Dongfei, MA Junying, et al. Prediction analysis of remaining life and plane frame structure displacement reliability of corroded pipelines based on VB/GM(1,1) MATLAB[J]. Corrosion & Protection, 2015, 36(2):197-205
- [8] MOHD Hairilmohd, BYEONG JoonLee, CUI Yushi, et al. Residual strength of corroded subsea pipelines subject to combined internal pressure and bending moment[J]. Ships and Offshore Structures, 2015, 10(5):554-564.
- [9] CALEYO F, GONZALE J L, HALLEN J M. A study on the reliability assessment methodology for pipelines with active corrosion defect[J]. International Journal of Pressure Vessel and Piping, 2002, 79(1):77-86.
- [10] 王蕾,李帆. 埋地钢质燃气管道点蚀数据的概率统计分析[J]. 煤气与热力, 2004, 24(12):657-659.
- WANG lei, LI fan. Probability statistics analysis of pitting data for buried steel gas pipeline[J]. Gas & Heat, 2004, 24(12):657-659.
- [11] 王水勇,任爱. 利用 Gumbel 极值分布预测管道最大腐蚀深度[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008, 20(5):358-360.
- WANG Shuiyong, REN Ai. Evaluation of maximum corrosion depth of pipe by Gumbel extreme value probability distribution[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2008, 20(5):358-360.
- [12] 宋宜四,高万夫,李发根. 极值理论应用于埋地管道土壤腐蚀坑深研究[J]. 油气储运, 2009, 28(1):33-35.
- SONG Yisi, GAO Wanfu, LI Fagen. Study on application of extreme statistical method to corrosion pit depth of buried pipeline[J]. OGST, 2009, 28(1):33-35.
- [13] TANIGUCHI N, SUZUKI H, KAWASAKI M, et al. Propagation behavior of general and localised corrosion of carbon steel in simulated groundwater under aerobic conditions[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2011, 46(2):117-123.
- [14] ALAMILLA J L, ESPINOSA-MEDINA M A, SOSA E. Modeling steel corrosion damage in soil environment[J]. Corrosion Science, 2009, 51:2628-2638.
- [15] JIAN S, HAN K. The remaining life prediction and in-ternal inspection interval analysis for large-scale crude oil storage tank[C]//Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference, IPC2010. New-york: American Society of Mechanical Engineers, 2010:241-246.
- [16] CALEYO F, VELAZQUEZ J C, VALOR A, et al. Probability distribution of pitting corrosion depth and rate in underground pipelines: A Monte Carlo study [J]. Corrosion Science, 2009, 51(9):1925-1934.
- [17] ROBERT E M. Extreme value statistics and longterm marine pitting corrosion of steel[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2008, 23(4):482-488.
- [18] 王如君,王天瑜. 灰色—马尔科夫链模型在埋地油气管道腐蚀预测中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(4):102-106.
- WANG Rujun, WANG Tianyu. Application of grey Markov chain model in corrosion forecast of buried oil and gas pipelines [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(4):102-106.
- [19] 骆正山,王耀峰,张大睿,等. 基于指数型地下油气库系统可靠性置信区间研究[J]. 西安建筑科技大学学报自然版. 2013, 45(2):434-438
- LUO Zhengshan, WANG Yaofeng, ZHANG Darui, et al. Based on the exponential underground fuel storage services system reliability confidence interval[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & tech. , 2013, 45(2):434-438.

(编辑 吴海西)