

# 基于马尔可夫理论的油气管道腐蚀寿命预测

龚然<sup>1</sup> 倪倩<sup>1</sup> 林媛媛<sup>2</sup> 李赫<sup>3</sup> 包伟<sup>4</sup>

1 长江大学 2 西安石油大学 3 河南石油工程设计有限公司地面设计所 4 河南油田新疆采油厂

**摘要:** 为有效预测油气管道的腐蚀失效情况,建立了基于马尔可夫理论的油气管道腐蚀寿命预测模型,并结合实际数据,验证了该寿命预测模型的可行性。根据采集到的管道最小剩余壁厚历史数据,依据石油天然气行业标准SY/T 6151的规定,将管道的腐蚀状态进行分类;结合管道腐蚀机理,拟合采集的历史数据,得到管道腐蚀最小剩余壁厚预测物理模型,计算管壁腐蚀状态的转移概率矩阵;根据最后一次检测时数据,设定该时刻管道腐蚀状态为初始分布,运用马尔可夫理论,计算出管道的剩余寿命。

**关键词:** 油气管道; 马尔可夫理论; 管道腐蚀; 寿命预测

doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2015.7.001

由于油气管道服役环境的恶劣,在外防腐层破损之后,油气管道的腐蚀将会随着服役时间的增加越来越严重。当腐蚀发展到一定阶段,管道的壁厚将会越来越薄,最终将会腐蚀穿孔,发生泄漏事故,造成严重的环境污染和巨大的经济损失,部分严重的泄漏事故,还会引起爆炸和火灾<sup>[1]</sup>。因此,需要研究油气管道腐蚀的机理,建立油气管道腐蚀状况的预测模型,有效地预测管道的使用寿命。

## 1 油气管道腐蚀损伤评价标准

根据材料腐蚀机理,油气管道服役过程中,存在多种类型的腐蚀,其中点蚀是造成大部分管道腐蚀泄漏的最主要原因,也是油气管道服役时,危险性和危害性最大的腐蚀类型。当点蚀发生时,油气管道表面一般会先形成直径几微米、呈亚稳定状态的微型凹陷,随着服役时间的增加,凹陷越来越深,最终导致管道穿孔。最大点蚀深度是目前经常用于评价管道管壁腐蚀程度的重要指标<sup>[2]</sup>。

目前,对油气管道管壁腐蚀的损伤评价标准,采用我国石油天然气行业标准SY/T 6151的规定<sup>[3]</sup>。该标准中,对管道的管壁腐蚀损伤,以最大蚀坑深度为主要指标,根据腐蚀出的蚀坑深度,将管道的腐蚀情况划分为轻、中、重、严重、穿孔5个等级<sup>[4]</sup>,该标准是我国油气管道管壁腐蚀分析时的重要指标,其具体分级情况如表1所示。如果最大蚀坑深度大于油气管道服役运行允许的最小剩余壁厚,将随时会发生泄漏事故。油气管道的最小剩余壁厚,是指将原始壁厚减去最大蚀坑深度,根据SY/T 6151的规定,当最大蚀坑深度大于80%壁厚时,意味着

管道已经发生穿孔现象,因此,最小剩余壁厚是确保油气管道安全服役的临界厚度<sup>[5]</sup>。

表1 SY/T 6151规定的油气管道腐蚀评价标准

腐蚀等级	最大蚀坑深度
轻	<1 mm
中	1~2 mm
重	2 mm至50%壁厚
严重	50%~80%壁厚
穿孔	>80%壁厚

## 2 油气管道管壁腐蚀预测模型

### 2.1 马尔可夫理论

俄国数学家马尔可夫提出,某事件的发生,只受它前面刚发生事件的影响,与过去其他事件的发生情况没有关系,并将该类现象称为马尔可夫过程。针对油气管道腐蚀监测和剩余寿命预测,主要基于每次检测时管道管壁的腐蚀数据,可以认为油气管道腐蚀仅与临近时间检测数据相关,满足马尔可夫条件。因此,利用马尔可夫理论,分析油气管道管壁的腐蚀数据,建立油气管道腐蚀剩余寿命预测模型。

### 2.2 油气管道腐蚀转移矩阵

我国石油天然气行业标准SY/T 6151规定油气管道管壁腐蚀分为轻、中、重、严重、穿孔5个级别。在运用马尔可夫理论分析油气管道管壁腐蚀问题时,将该5种管壁腐蚀等级定义为5种状态,分别是:状态1对应轻、状态2对应中、状态3表示重、状态4表示严重、状态5表示穿孔。定义油气管道管壁的5种状态对应的管道壁厚取值空间为 $E = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ 。因此,根据该壁厚空间,则管道



壁厚  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  的转移概率矩阵可表示为

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} \end{bmatrix} \quad (1)$$

管道壁厚  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  的转移概率矩阵  $P$  中, 元素  $P_{ij}$  值的大小, 代表了管道各壁厚等级之间的相互变化概率。而在管道实际的服役过程中, 管道管壁最大蚀坑深度是单调递增变化的, 管道的腐蚀状况是从状态1到状态5的变化过程, 该过程不可逆, 因此可以得到  $P_{21} = P_{31} = P_{32} = P_{41} = P_{42} = P_{43} = P_{51} = P_{52} = P_{53} = P_{54} = 0$ 。而状态5为油气管道管壁的最差状态, 该状态不可能向其他状态变化, 因此可知  $P_{55} = 1$ 。综上所述, 可得油气管道不同腐蚀损伤状态间的转移概率矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ 0 & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} & P_{35} \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & P_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 2.3 油气管道腐蚀预测

为了确定油气管道腐蚀剩余寿命, 制定针对性的管道维修和检测计划, 需要对油气管道管壁腐蚀状态进行预测。在建立预测模型前, 需要采集油气管道壁厚的历史检测数据。在实际的生产中, 一般每隔一定年限, 油气管道管线运行部门会对管道进行一次腐蚀检测, 主要分为局部开挖和不开挖外检测2种检测方式。采集到油气管道管壁历史数据后, 运用马尔可夫理论, 建立油气管道的剩余寿命预测模型, 具体步骤为:

(1) 分析采集到油气管道管壁历史数据, 根据表1, 确定管道管壁腐蚀状态。

(2) 根据油气管道管壁历史数据, 结合油气管道点蚀机理和腐蚀速率物理模型, 确定理论上油气管道管壁不同时刻的初始管壁状态, 计算出油气管道管壁壁厚的转移概率矩阵。

(3) 根据油气管道管壁的初始管壁状态和转移概率矩阵, 运用马尔可夫理论, 计算油气管道管壁未来时刻的腐蚀状态分布, 从而预测油气管道的剩余寿命。

油气管道的点蚀腐蚀, 属于一种电化学腐蚀, 当管道发生点蚀时, 刚开始腐蚀速度较快, 随着管道服役时间的增长, 腐蚀速度逐渐减慢。根据材料腐蚀理论和已有研究成果, 假设油气管道管壁剩余

壁厚服从指数分布, 其壁厚变化模型为

$$\delta = G_2 e^{-h_2 t} \quad (3)$$

式中  $G_2$  和  $h_2$  为系数;  $t$  为管道服役时间 (a);  $\delta$  为在服役时间为  $t$  时的管道剩余壁厚 (mm)。

当采集到不同时刻的管道壁厚数据  $(t_1, \delta_1)$ 、 $(t_2, \delta_2)$ , 则可根据这两组数据, 求得系数  $G_2$  和  $h_2$ 。当采集到三组或三组以上不同时刻的管道壁厚数据, 运用最小二乘法, 对管道壁厚数据进行曲线拟合, 进而求得模型参数值。

确定油气管道壁厚变化模型参数后, 可以计算得到不同时刻的管道壁厚数据, 按照表1中的管道腐蚀等级评价标准, 确定油气管道的腐蚀状态。因此, 可以得到从状态1变化到状态5的一系列管道服役时间变化的管壁腐蚀状态数据, 基于这些数据, 可以求解出管道壁厚  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  的转移概率矩阵  $P$ 。

假定油气管道的最小剩余壁厚为  $K$ , 根据采集到的油气管道管壁历史数据, 定义最后一次检测所得到的最小剩余壁厚作为初始状态, 记为  $K = [K_1, K_2, K_3, K_4, K_5]$ 。因此, 可以计算出该油气管道管壁在最后一次检测之后, 第  $m$  次 ( $m \geq 1$ ) 检测时的管道壁厚的预测值为

$$K^{(m)} = K \times P^m \quad (4)$$

## 3 油气管道管壁腐蚀预测结果

某区段油气管道为  $\varnothing 720 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。采集到三次历史管道壁厚检测数据, 分别是在管道服役15年后, 测得该管道最大蚀坑深度是4.2 mm; 管道服役18年后, 该管道最大蚀坑深度是4.7 mm; 管道服役20年后, 测得该管道最大蚀坑深度是5.2 mm。

### 3.1 确定管道管壁腐蚀状态

根据表1, 对该油气管道进行腐蚀状态划分, 如表2所示。

表2 某区段油气管道  $\varnothing 720 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  管壁腐蚀状态

腐蚀状态	腐蚀等级	最大蚀坑深度/mm	最小剩余壁厚/mm
1	轻	<1	>9
2	中	1~2	8~9
3	重	2~5	5~8
4	严重	5~8	2~5
5	穿孔	>8	<2

### 3.2 计算转移概率矩阵

该油气管道最后一次检测为服役20年后, 测得该管道最大蚀坑深度是5.2 mm, 对应表2中为腐蚀状态为状态4, 因此最小剩余壁厚为  $K = [0, 0, 0, 1, 0]$ 。



根据服役15年、18年、20年检测得到的管道壁厚数据,利用曲线拟合,得到该管道最小剩余壁厚变化模型为

$$\delta = 11.62e^{-0.0612t}$$

根据该壁厚变化模型,可以算出服役时间  $t = 1, 2, \dots, n$  时刻时管道的壁厚值,从而得到该管道壁厚等级从状态1变化到状态5的全部数据,如表3所示。

表3 管道管壁腐蚀状态分布预测值

$t$	$\delta$	腐蚀状态	$t$	$\delta$	腐蚀状态	$t$	$\delta$	腐蚀状态
1	10	1	11	5.927	3	21	3.214	4
2	10	1	12	5.575	3	22	3.023	4
3	9.671	1	13	5.244	3	23	2.844	4
4	9.097	1	14	4.933	4	24	2.675	4
5	8.557	2	15	4.641	4	25	2.516	4
6	8.049	2	16	4.365	4	26	2.367	4
7	7.571	3	17	4.106	4	27	2.226	4
8	7.122	3	18	3.862	4	28	2.094	4
9	6.699	3	19	3.632	4	29	1.970	5
10	6.301	3	20	3.417	4	30	1.853	5

根据表3,可以求得该管道壁厚变化的转移率矩阵  $P$  为

$$P = \begin{bmatrix} 3/4 & 1/4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6/7 & 1/7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 14/15 & 1/15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 3.3 管道剩余寿命预测

根据马尔可夫理论和公式(4),从第20年开始,可以计算得到后续服役时间内,该管道管壁腐蚀状态分布的预测值,如表4所示。

表4 管道管壁腐蚀状态马尔可夫预测值

$t$	状态1	状态2	状态3	状态4	状态5	最大可能状态
21	0	0	0	0.933	0.067	4
22	0	0	0	0.871	0.129	4
23	0	0	0	0.813	0.187	4
24	0	0	0	0.759	0.241	4
25	0	0	0	0.708	0.292	4
26	0	0	0	0.661	0.339	4
27	0	0	0	0.617	0.383	4
28	0	0	0	0.576	0.424	4
29	0	0	0	0.537	0.463	4
30	0	0	0	0.502	0.499	4
31	0	0	0	0.468	0.532	5

根据表4中数据,该管道将在服役第31年时,进入状态5,表明此时管道将可能发生穿孔,可能会发生泄漏事故。因此从第20年算起,该管道剩余寿命为10年。

## 4 结语

根据采集到的油气管道管壁最小剩余厚度历史

检测数据,可以先根据最大蚀坑深度,对管道的腐蚀状态进行分类;然后根据点蚀的机理和物理知识,由历史检测数据拟合出管道最小剩余厚度物理模型,从而估计出管道的转移概率矩阵;根据最后一次检测时得到的管道腐蚀状态分布,设为初始分布,根据马尔可夫理论,计算出该管道的剩余寿命分布,从而预测管道的剩余寿命。

基于马尔可夫理论的剩余寿命预测方法,可以应用于其他油气管道的监测和寿命预测研究中。

### 参考文献

- [1] 李恒. 基于马尔可夫理论埋地燃气管腐蚀预测研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007: 4-7.
- [2] 王海秋, 张昌兴, 李双林, 等. 油气管道腐蚀失效概率统计与预测模型[J]. 油气田地面工程, 2007, 26 (4): 14-14.
- [3] 姬鄂豫, 陈海玲. 油气集输管道腐蚀的防治方向及安全检测[J]. 油气田地面工程, 2013, 32 (1): 42-43.
- [4] 李亚光. 输油管道腐蚀原因及防腐措施[J]. 油气田地面工程, 2014, 33 (2): 91-92.
- [5] 袁赓. 油气管道的腐蚀及预测研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011: 9-10.

[第一作者简介] 龚然: 长江大学地球科学学院在读研究生, 地质工程专业, 研究方向为油气勘探。

18629353612、260953640@qq.com

收稿日期 2015-04-14

(栏目主持 李艳秋)



中原油田开展隐患排查治理确保电网迎峰度夏

