

点腐蚀碳素钢管系统随机失效概率模型研究

赵乐新, 骆正山, 王晓敏

(西安建筑科技大学管理学院, 陕西 西安 710055)

摘要:服役中碳素钢管的失效对管道结构安全造成影响, 为了有效预测碳素钢管系统的失效概率和剩余寿命, 引入了随时间变化的系统失效概率计算方法, 以此为基础判断点腐蚀碳素钢管是否需要维修或更换。依据时变可靠性分析方法, 结合首次穿越概率理论, 在点腐蚀碳素钢管剩余强度中引入随机参数的基础上, 建立点腐蚀碳素钢管随机失效概率模型, 对点腐蚀引起的失效概率进行量化分析, 为科学地确定碳素钢管系统的失效时间提供了理论依据。结合实例分析, 借助蒙特卡洛模拟方法验证了所建模型的可行性, 通过相关参数分析明确了影响点腐蚀碳素钢管系统失效的关键因素。结果显示, 所构建的模型可以合理预测点腐蚀碳素钢管的失效概率, 帮助管理者确定碳素钢管系统实施维修和保养的最佳时间。

关键词: 碳素钢管; 点腐蚀; 失效概率; 随机模型

中图分类号: TE988.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3962(2020)12-0962-06

Study on the Stochastic Failure Probability Model of Carbon Steel Pipe System with Pitting Corrosion

ZHAO Lexin, LUO Zhengshan, WANG Xiaomin

(School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to effectively predict the failure probability and residual life of carbon steel pipe system with pitting corrosion, a method for calculating the failure probability of carbon steel pipe system varying with time is introduced. This method can be used to judge whether the carbon steel pipe with pitting corrosion needs to be repaired or replaced. Based on the time-varying reliability analysis method and the first crossing probability theory, the stochastic failure probability model of carbon steel pipe with pitting corrosion is established by introducing stochastic parameters into the residual strength calculation of carbon steel pipe with pitting corrosion. The model quantifies the failure probability caused by pitting corrosion and provides a theoretical basis for determining the failure time of carbon steel pipe system scientifically. The feasibility of this model is verified by Monte Carlo simulation with an example, and the key factors affecting the failure of carbon steel pipe system with pitting corrosion are identified through the analysis of relevant parameters. The results show that the model can reasonably predict the failure probability of carbon steel pipes with pitting corrosion and help the managers to determine the best time for maintenance and repairment of carbon steel pipe systems.

Key words: carbon steel pipe; pitting corrosion; failure probability; stochastic model

1 前言

碳素钢管是油气输送的主要工具, 管道破损不仅影响油气正常输送, 还会带来环境污染等问题^[1, 2]。根据管道事故统计可知, 腐蚀是造成碳素钢管结构失效的主要因素之一, 它严重影响了钢管的使用寿命^[3, 4]。因此,

合理预测腐蚀钢管的失效概率, 为碳素钢管系统提供最优的维修策略, 对保障碳素钢管系统的安全运行具有深远的经济效益。

碳素钢管腐蚀损伤主要指由均匀腐蚀、局部腐蚀(点腐蚀)和腐蚀疲劳引起的管道壁变薄和开裂, 从而对系统的安全运行造成影响^[5, 6]。对于发生均匀腐蚀的碳素钢管, 面对钢管表面相同的腐蚀损耗厚度, 只需要依据钢管的剩余壁厚就可以评估其剩余强度^[7]。由于点腐蚀碳素钢管的不同腐蚀位置厚度减少不同, 其剩余强度的求解相对较难, 目前尚未针对钢管点腐蚀损伤问题形成工程适用的可靠的评定方法。传统的做法是通过等截面损失将点腐蚀等效为均匀腐蚀, 该方法评价结果偏于保守^[8-10]。因此, 针对碳素钢管系统中普遍存在的点腐蚀

收稿日期: 2019-07-21 修回日期: 2019-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41877527); 陕西省社科基金资助项目(2018S34)

第一作者: 赵乐新, 男, 1990 年生, 博士研究生

通讯作者: 骆正山, 男, 1969 年生, 教授, 博士生导师,

Email: luozhengshan@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201907016

威胁, 对点腐蚀碳素钢管的随机失效概率计算方法进行研究是非常必要和迫切的。

本文根据结构可靠性原理, 在合理计算点腐蚀碳素钢管剩余强度的基础上, 基于首次穿越概率理论, 构建点腐蚀损伤碳素钢管随时间变化的随机失效概率模型, 研究了不同因素对预测的安全运行时间影响, 为管理者开展腐蚀防护工作提供依据。

2 点腐蚀碳素钢管剩余强度随机模型

2.1 腐蚀点剩余强度

碳素钢管局部腐蚀缺陷会造成钢管薄膜应力集中现象, 集中应力达到管材强度极值时钢管结构将会失效^[11]。由文献[12]可知, 当前国内外腐蚀管道剩余强度评价主流标准有 ASME B31G 和 SY/T6151, 而采用 SY/T6151 预测的剩余强度比 ASME B31G 更保守, 所以采用标准 ASME B31G 对局部腐蚀钢管的剩余强度 Q 进行计算更适用, 剩余强度 Q 求解公式如式(1)~(3):

$$Q = \frac{2b\sigma_f}{D} \left[\frac{1 - 0.85h/b}{1 - 0.85h/(bM)} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_f = m_f \times \sigma_s \quad (2)$$

$$M = \begin{cases} \left[1 + 0.6275 \frac{L^2}{Db} + 0.003375 \left(\frac{L^2}{Db} \right)^2 \right]^{1/2} & \frac{L^2}{Db} \leq 50 \\ 0.032 \frac{L^2}{Db} + 3.3 & \frac{L^2}{Db} > 50 \end{cases} \quad (3)$$

其中, D 为钢管外径, mm; b 为钢管壁厚, mm; h 为局部腐蚀的深度, mm; L 为局部腐蚀缺陷的长度, mm; σ_f 为管材流变应力, MPa; σ_s 为管材最小屈服强度, MPa; m_f 为流变系数, 一般取值 1.1; M 为膨胀系数。

虽然上述公式给出了局部腐蚀碳素管道剩余强度的计算方法, 但是根据碳素钢管点腐蚀缺陷轴向剖面示意图(图 1)所示, 在忽略相邻蚀坑间完整厚度材料强度的条件下, 采用上述公式直接计算点腐蚀碳素钢管的剩余强度, 其结果偏于保守^[13]。

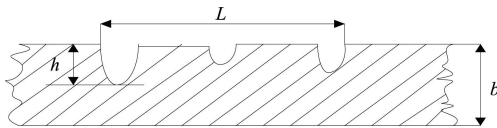


图 1 碳素钢管点腐蚀缺陷轴向剖面

Fig. 1 Axial profile of pitting corrosion defects on carbon steel pipe

在文献[13]中, 通过引入一项强度补偿量(腐蚀层厚度完整材料强度的一半)来弥补上述公式的计算缺陷,

所以点腐蚀碳素钢管的实际剩余强度估算公式如式(4):

$$Q = \frac{2.2b\sigma_s}{D} \left[\frac{1 - 0.85h/b}{1 - 0.85h/(bM)} \right] + \frac{1.1\sigma_s h}{D} \quad (4)$$

点腐蚀碳素钢管的剩余强度随腐蚀点的增长而降低, 若已知钢管的点腐蚀增长率, 可对碳素钢管 t 时刻的剩余强度进行预测, 假设点腐蚀的腐蚀增长率符合线性模型, 具体表示如式(5)和式(6)^[4]:

$$h(t) = h_0 + v_1 t \quad (5)$$

$$L(t) = L_0 + v_2 t \quad (6)$$

其中, h_0 和 L_0 分别表示局部腐蚀点初始的深度和长度, v_1 和 v_2 分别表示局部腐蚀点深度和长度方向的腐蚀速率。

综上所述, 点腐蚀碳素钢管的剩余强度表达式如式(7):

$$Q(t) = \frac{2.2b\sigma_s}{D} \left[\frac{1 - 0.85h(t)/b}{1 - 0.85h(t)/(M(t)b)} \right] + \frac{1.1\sigma_s h(t)}{D} \quad (7)$$

2.2 随机过程模型

碳素钢管系统运行过程中, 点腐蚀钢管的剩余强度发生随机变化, 根据点腐蚀相关的基本变量可构建碳素钢管剩余强度随机变化过程模型, 所以公式(7)可以表示为式(8)^[14, 15]:

$$Q(t) = f(h_0, L_0, \sigma_s, v_1, v_2, b, D, t) \quad (8)$$

其中: $h_0, L_0, \sigma_s, v_1, v_2, b, D$ 为基本随机变量, 在已知各变量概率分布条件下, 结合蒙特卡洛(Monte-Carlo)模拟分析可以获取 $Q(t)$ 的统计数据。

通过引入随机变量 ω 来描述 $Q(t)$ 的随机变化过程, ω 的均值具有统一性($E(\omega) = 1$), 其变化系数 λ 是一个常量($\lambda = 0.15 \sim 0.25$), 所以公式(8)中的随机过程模型可表示如式(9):

$$Q(t) = Q_1(t) \times \omega \quad (9)$$

其中: $Q_1(t)$ 是公式(7)中的纯时间函数。由公式(9)可求出 $Q(t)$ 的均值函数和自协方差函数如式(10)和式(11)所示^[16]:

$$\mu_Q(t) = E[Q(t)] = Q_1(t) \times E[\omega] = Q_1(t) \quad (10)$$

$$C_{QQ}(t_i, t_j) = \lambda^2 \rho_1 Q_1(t_i) Q_1(t_j) \quad (11)$$

其中: ρ_1 是 $Q(t)$ 在 t_i 和 t_j 时刻的相关系数。

3 点腐蚀碳素钢管系统随机失效概率模型

3.1 结构可靠性原理

针对点腐蚀碳素钢管进行结构可靠性分析, 首先要建立钢管结构的极限状态函数, 表示如式(12)^[17]:

$$G = g(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (12)$$

其中: G 称为安全裕度, $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为处于极限状态的变量。

若安全裕度仅与钢管结构承载能力 Q 和荷载效应 P 两个随机变量有关, 则公式(12)可表示为式(13):

$$G = g(Q, P) = Q/P \quad (13)$$

其中: 当 $G > 1$ 时, 管道结构可靠; 当 $G = 1$ 时, 管道结构处于临界状态; 当 $0 < G < 1$ 时, 管道结构失效。在点腐蚀碳素钢管系统中, 系统在 t 时刻的状态可用故障函数如式(14):

$$G = Q(t)/P_0 \quad (14)$$

其中: $Q(t)$ 是点腐蚀碳素钢管在 t 时刻的剩余强度, P_0 是系统正常运行的操作压力。在钢管结构可靠性问题中, 通常采用失效概率 P_f 衡量钢管结构的安全性, 表示如式(15):

$$P_f(t) = P[0 < G \leq 1] = P[0 < Q(t)/P_0 \leq 1] \quad (15)$$

其中: P 是事情发生的概率。

碳素钢管系统在点腐蚀影响下的失效概率 $P_f(t)$ 大于系统的故障概率阈值 P_a 时, 系统安全运行存在风险, 具体表示如式(16):

$$P_f(T_L) \geq P_a \quad (16)$$

其中: T_L 是特定评估准则下点腐蚀碳素钢管的使用寿命。

3.2 首次穿越概率理论

公式(15)是标准不等式, 可以用时变可靠性方法对其中随机变量进行分析求解。在点腐蚀碳素钢管剩余强度 $Q(t)$ 随机变化过程中, 钢管结构的可靠性大小与系统的运行时间紧密相关, 由结构可靠性理论中的首次穿越概率可知, 在特定的时间段内 $Q(t)$ 初次小于系统操作压力 P_0 的概率就是系统的失效概率 $P(t)$, 具体表示如式(17)^[18]:

$$P_f(t) = 1 - [1 - P_f(0)] e^{-\int_0^t v dt} \quad (17)$$

其中, $P_f(0)$ 是系统初始时刻的失效概率, v 是 $Q(t)$ 不断降低的平均速率。由于 v 在很多实际问题中取值较小, 所以公式(17)可以表示如式(18):

$$P_f(t) = P_f(0) + \int_0^t v dt \quad (18)$$

根据赖斯准则可以对 v 进行求解, 具体如式(19)^[19]:

$$v = v_0 = \int_{P_0}^{\infty} (\dot{P}_0 - \dot{Q}) f_{ZZ}(P_0, \dot{Q}) d\dot{Q} \quad (19)$$

其中: v_0 是 $Q(t)$ 逐渐小于 P_0 的上通速率, \dot{P}_0 和 \dot{Q} 分别是时间 t 时 P_0 和 $Q(t)$ 的导数, f_{ZZ} 是 Z 和 \dot{Z} 的联合概率密度

函数。由文献[19]可知, v_0 可以表示如式(20):

$$v_0 = \frac{\sigma_{\dot{Q}|Q}}{\sigma_Q} \varphi\left(\frac{P_0 - \mu_Q}{\sigma_Q}\right) \left\{ \varphi\left(\frac{\dot{P}_0 - \mu_{\dot{Q}|Q}}{\sigma_{\dot{Q}|Q}}\right) - \frac{\dot{P}_0 - \mu_{\dot{Q}|Q}}{\sigma_{\dot{Q}|Q}} \Phi\left(-\frac{\dot{P}_0 - \mu_{\dot{Q}|Q}}{\sigma_{\dot{Q}|Q}}\right) \right\} \quad (20)$$

其中: μ 和 σ 是关于 Q 和 \dot{Q} 的均值和标准差, φ 和 Φ 是关于 Q 和 \dot{Q} 的标准正态密度函数和标准正态分布函数。由随机过程理论可知, 公式(20)中的变量根据函数 $\mu_Q(t)$ 和 $C_{QQ}(t_i, t_j)$ 的取值可按式(21a)和式(21b)求解^[20]:

$$\mu_{\dot{Q}|Q} = E[\dot{Q} | Q = P_0] = \mu_{\dot{Q}} + \rho_2 \frac{\sigma_{\dot{Q}}}{\sigma_Q} (P_0 - \mu_Q) \quad (21a)$$

$$\sigma_{\dot{Q}|Q} = [\sigma_{\dot{Q}}^2 (1 - \rho_2^2)]^{1/2} \quad (21b)$$

其中, $\mu_{\dot{Q}}$, $\sigma_{\dot{Q}}$, ρ_2 分别按式(21c)~式(21e)求解:

$$\mu_{\dot{Q}} = \frac{d\mu_Q(t)}{dt} \quad (21c)$$

$$\sigma_{\dot{Q}} = \left[\frac{\partial^2 C_{QQ}(t_i, t_j)}{\partial t_i \partial t_j} \Big|_{i=j} \right]^{1/2} \quad (21d)$$

$$\rho_2 = \frac{C_{\dot{Q}\dot{Q}}(t_i, t_j)}{[C_{QQ}(t_i, t_i) \times C_{\dot{Q}\dot{Q}}(t_j, t_j)]^{1/2}} \quad (21e)$$

其中, Q 和 \dot{Q} 的互协方差函数如式(21f):

$$C_{\dot{Q}\dot{Q}}(t_i, t_j) = \frac{\partial C_{QQ}(t_i, t_j)}{\partial t_j} \quad (21f)$$

由随机过程理论可知, 通过对式(10)和式(11)进行求解, 式(21a)~式(21f)可以得到解答。

3.3 系统随机失效概率模型

依据系统可靠性分析理论, 结合公式(14)可求出点腐蚀碳素钢管系统的失效概率。在点腐蚀碳素钢管系统中各腐蚀点是一个串联系统, 该系统中任一单元出现故障都会导致整个系统失效, 所以在时刻 t 时系统的失效概率 $P_{f,s}(t)$ 表示如式(22)^[21]:

$$\max P_{f,i}(t) \leq P_{f,s}(t) \leq 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_{f,i}(t)] \quad (22)$$

其中, $P_{f,i}(t)$ 是系统中第 i 个腐蚀点 t 时刻引起的失效概率, 结合公式(15)求解; n 是腐蚀点个数。

4 结果与讨论

4.1 研究对象

本研究以某原油输送管道为对象, 对所构建随机失效模型进行实例验证。该管道工程于 1997 年完成, 管道全长 3 km, 钢材等级为 X52, 管材最小屈服强度 σ_s 为 359 MPa, 钢管外径 D 为 355 mm, 钢管壁厚 b 为 11.9 mm,

系统正常运行的操作压力 P_0 为 10 MPa。通过对一段碳素钢管观察共发现 3 处腐蚀点，各腐蚀点在深度方向的平均腐蚀速率 v_1 为 0.12 mm/a，在长度方向的平均腐蚀速率 v_2 为 4.5 mm/a，各腐蚀点的初始尺寸如表 1 所示。

表 1 各腐蚀点初始尺寸

Table 1 Initial dimensions of corrosion points

| Pit | Mean depth h_0 /mm | Mean length L_0 /mm |
|-----|----------------------|-----------------------|
| 1 | 2.2 | 90 |
| 2 | 1.9 | 120 |
| 3 | 1.5 | 165 |

4.2 构建模型的验证分析

结合文中构建的随机失效概率模型，可求出系统的随机失效概率变化曲线，该曲线与公式(15)通过蒙特卡洛模拟方法求解的系统失效概率曲线对比结果如图 2 所示，两种方法求解的系统失效概率曲线变化相似。当系统运行到 20 和 25 a 时，基于上文构建的时变可靠性分析方法求取的系统失效概率分别为 0.06 和 0.56，基于蒙特卡洛模拟方法求解的系统失效概率分别为 0.18 和 0.99，系统在低故障率下采用两种方法求解的失效概率相差较小，可见系统的故障率越低，采用文中构建的模型对点腐蚀碳素钢管系统随机失效概率进行预测，其结果可靠性越高。

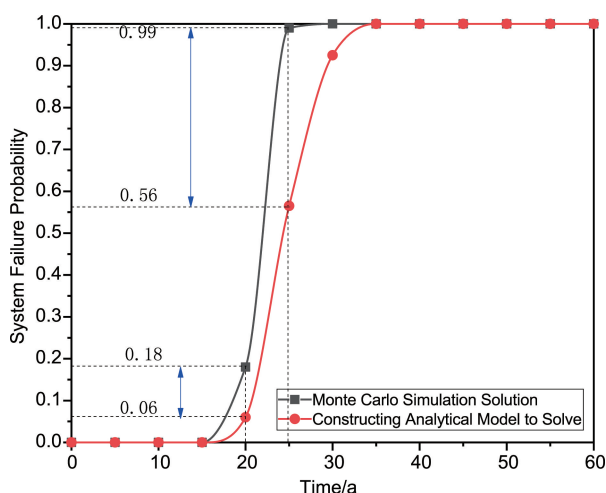


图 2 不同方法下的系统失效概率曲线

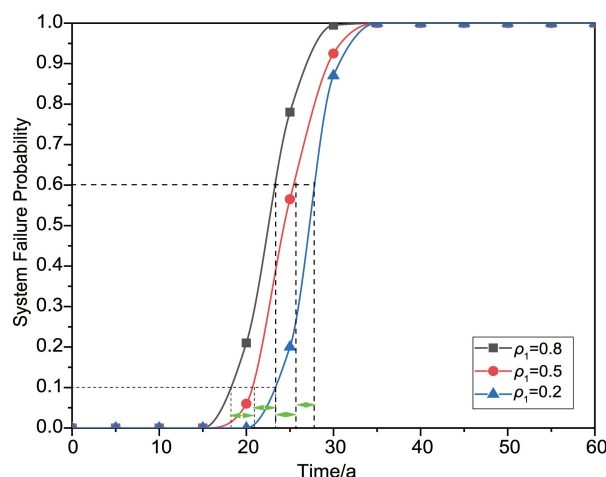
Fig. 2 System failure probability curves calculated by different methods

4.3 不同因素对系统失效概率的影响

(1) 不同的时间点相关系数对系统失效概率的影响

结合公式(22)，通过以上数据可求出不同相关系数 ρ_1 下的点腐蚀碳素钢管系统随机失效概率，具体的求解结果如图 3 所示，不同时间点相关系数的系统失效概率曲线变化相似。当系统可允许的最大失效概率为 0.1 时，

不同的时间点相关系数 ρ_1 下的运行时间分别为 17.5、21 和 23.5 a；当系统可允许的最大失效概率为 0.6 时，不同的时间点相关系数 ρ_1 下的运行时间分别为 23.5、25.5 和 27.5 a。在系统失效概率确定时，不同时间点相关系数下的运行年限相差不大，所以在点腐蚀碳素钢管系统失效的研究中，可以忽略不同时间点的相关性大小对系统失效概率的影响，由随机过程理论可知，该方法保守估计了点腐蚀碳素钢管系统的失效概率，提前预防管道安全事故的发生。

图 3 不同的时间点相关系数 ρ_1 对系统失效概率影响Fig. 3 Effect of different time-point correlation coefficient (ρ_1) on system failure probability

(2) 不同的操作压力对系统失效概率的影响

结合公式(22)，通过以上数据可求出不同操作压力 P_0 下的点腐蚀碳素钢管系统随机失效概率，具体的求解结果如图 4 所示，不同操作压力下系统失效概率曲线变化明显不同。当系统可允许的最大失效概率为 0.1 时，不同的系统操作压力 P_0 下的运行时间分别为 16、21 和 28 a；当系统的失效概率为 0.7 时，不同的系统操作压力 P_0 下可允许的最大运行时间分别为 18、27 和 38 a。在系统失效概率确定时，不同操作压力下的安全运行年限相差较大，随着系统运行年限的增长，年限差距的大小也在增加，可见系统操作压力的变化对点腐蚀碳素钢管的安全寿命有明显影响。当已知特定失效概率下的系统运行时间时，可以帮助管理者在系统可接受的操作压力下明确碳素钢管实施维修的时间。

(3) 不同的腐蚀速率对系统失效概率的影响

结合公式(22)，通过以上数据求取的不同点腐蚀速率条件下的系统失效概率变化曲线如图 5 所示，不同腐蚀速率的系统失效概率曲线变化明显不同。当系统可允许的最大失效概率为 0.1 时，不同腐蚀速率下的系统运行时间分别为 11、21 和 40 a；当系统可允许的最大失效

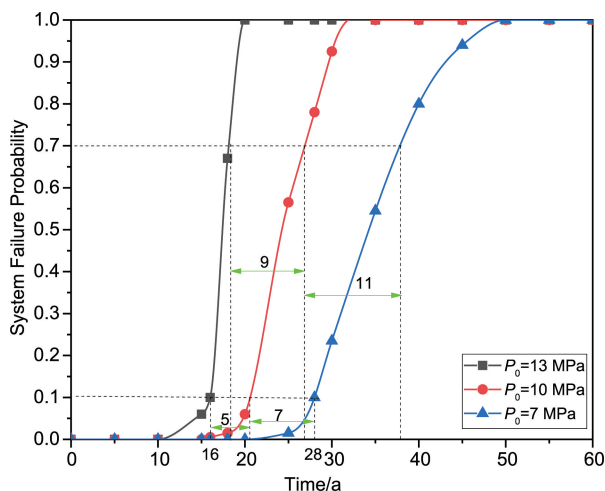


图 4 不同的操作压力 P_0 对系统失效概率影响

Fig. 4 Effect of different operating pressure (P_0) on system failure probability

概率为 0.6 时, 不同腐蚀速率下的系统运行时间分别为 13, 25.5 和 70 a。当系统的可接受失效概率确定时, 腐蚀速率对系统的安全运行年限影响较大; 系统可允许的失效概率越大, 不同的腐蚀速率造成的安全运行时间差距越明显。结合研究对象的基础数据, 求出系统失效概率为 0.1 时的安全运行时间 T_L 为 21 年, 若资产管理者在 21 年中没有对钢管进行过维修和更换, T_L 代表特定评估准则下点腐蚀碳素钢管系统首次出现故障的时间, 它有助于资产管理者制定合理的维修策略, 由此可见, 准确地测量点腐蚀的腐蚀速率有助于提高碳素钢管系统的可靠性预测。

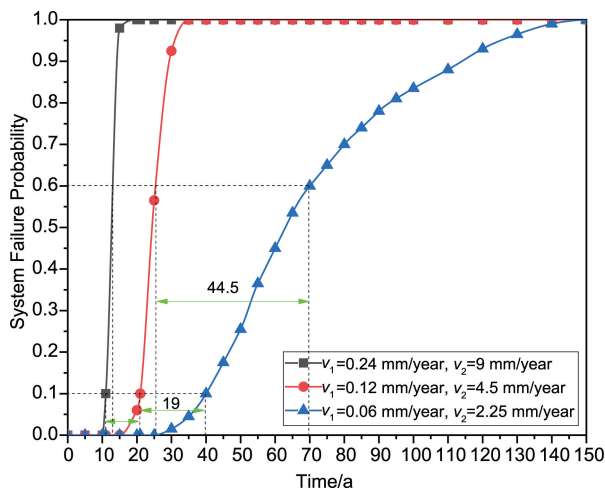


图 5 不同的腐蚀速率 (v_1 和 v_2) 对系统失效概率影响

Fig. 5 Effect of different corrosion rates (v_1 and v_2) on system failure probability

(4) 不同的钢管尺寸对系统失效概率的影响

结合公式(22), 通过以上数据求取的不同钢管尺寸

条件下系统的失效概率变化曲线如图 6 所示。当系统可允许的最大失效概率为 0.1 时, 不同钢管尺寸下的运行时间分别为 14, 21 和 24 a。当系统的失效概率确定时, 依据图 6 中的钢管尺寸变化引起的安全运行时间差距大小可知, 钢管尺寸的变小相对会加快系统失效的进程。随着钢管尺寸的变大, 点腐蚀碳素钢管系统的安全运行时间也在增加, 由此可见, 在系统其他参数不变的条件下, 大直径钢管的管道壁越厚, 系统出现故障的概率越低。

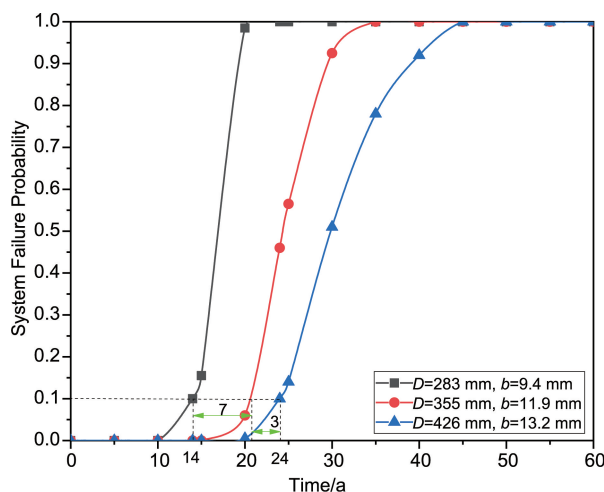


图 6 不同的钢管尺寸 (D 和 b) 对系统失效概率影响

Fig. 6 Effect of different steel pipe sizes (D and b) on system failure probability

(5) 不同的管材屈服强度对系统失效概率的影响

结合公式(22), 通过以上数据求取的不同管材屈服强度条件下系统的失效概率变化曲线如图 7 所示, 不同管材屈服强度下系统失效概率曲线变化相似。当系统可允许的最大失效概率为 0.1 时, 不同的管材屈服强度下的运行时间分别为 18, 21 和 23 a; 当系统可允许的最大

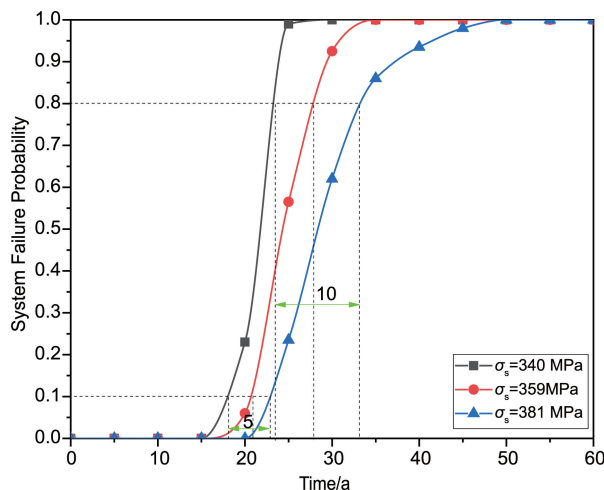


图 7 不同的管材屈服强度 (σ_s) 对系统失效概率影响

Fig. 7 Effect of different pipe yield strength (σ_s) on system failure probability

失效概率为 0.8 时, 不同管材屈服强度下的运行时间分别为 23.5, 28 和 33.5 a。由图 7 可见, 系统在特定失效概率下不同屈服强度条件下的安全运行时间的差值, 伴随失效概率的增大而变大。系统可允许的失效概率越低, 失效概率变化曲线相似度越高, 这说明低风险条件下, 管材屈服强度对点腐蚀碳素钢管系统的失效概率影响较小。

5 结 论

针对点腐蚀碳素钢管系统失效评估问题, 运用时变可靠性分析方法, 结合首次穿越概率理论, 在线性腐蚀速率模型的基础上, 通过引入随机变量建立了点腐蚀碳素钢管系统随机失效概率模型。借助蒙特卡洛仿真方法验证了所构建模型的可行性, 管理者依据模型可求出系统随时间变化的失效概率, 为制定合理的管道维修策略提供指导。

运用文中构建的模型对影响系统故障概率的相关参数进行研究发现, 系统操作压力和点腐蚀速率是影响碳素钢管系统失效的关键因素, 相比可以忽略时间点相关系数和管材屈服强度两者在系统低故障率下对失效概率的影响, 同时证实了点腐蚀影响下的大直径钢管管壁越厚, 破坏其结构完整性需要的时间越长。

参考文献 References

- [1] 蔡永桥, 卢进, 王豪巍, 等. 油气田地面工程[J], 2018, 1: 70-74.
CAI Y Q, LU J, WANG H W, *et al.* Oil-Gas Field Surface Engineering[J], 2018, 1: 70-74.
- [2] 陈莉君, 毛玥, 张娟, 等. 腐蚀科学与防护技术[J], 2019, 31(3): 303-309.
CHEN L J, MAO Y, ZHANG J, *et al.* Corrosion Science and Protection Technology[J], 2019, 31(3): 303-309.
- [3] 黄坤, 李沅桦, 孔令圳. 中国安全生产科学技术[J], 2017, 13(7): 163-167.
HUANG K, LI Y H, KONG L Z. Journal of Safety Science & Technology[J], 2017, 13(7): 163-167.
- [4] 刘晓, 陈艳华, 钟卉元, 等. 西南石油大学学报(自然科学版)[J], 2018, 40(4): 169-176.
LI X, CHEN Y H, ZHONG H Y, *et al.* Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition) [J], 2018, 40(4): 169-176.
- [5] 张杨, 岑量, 石卫国, 等. 涂料工业[J], 2016, 46(11): 13-18.
ZHANG Y, CEN L, SHI W G, *et al.* Paint & Coatings Industry[J], 2016, 46(11): 13-18.
- [6] MAHMOODIAN M, LI C Q. Journal of Petroleum Science & Engineering[J], 2017, 151: 434-438.
- [7] 郑恒伟, 杨国欣, 王东哲. 功能材料[J], 2018, 49(11): 11075-11079+11084.
ZHENG H W, YANG G X, WANG D Z. Journal of Functional Materials[J], 2018, 49(11): 11075-11079+11084.
- [8] ZHANG Y, HUANG Y, ZHANG Q, *et al.* Ocean Engineering[J], 2016, 116: 273-285.
- [9] 王芳, 张岳林, 苏里阳, 等. 舰船科学技术[J], 2017, 39(2): 6-11.
WANG F, ZHANG Y L, SU L Y, *et al.* Ship Science and Technology [J], 2017, 39(2): 6-11.
- [10] MATTOS H S D C, REIS J M L, PAIM L M, *et al.* Engineering Failure Analysis[J], 2016, 59(223): 223-236.
- [11] 王仁华, 郭海超. 海洋工程[J], 2019, 37(3): 111-119.
WANG R H, GUO H C. The Ocean Engineering[J], 2019, 37(3): 111-119.
- [12] 黄志强, 谭智勇, 谢豆, 等. 中国安全生产科学技术[J], 2015, 11(4): 118-124.
HUANG Z Q, TAN Z Y, XIE D, *et al.* Journal of Safety Science and Technology[J], 2015, 11(4): 118-124.
- [13] 赵新伟, 罗金恒, 郑茂盛, 等. 机械工程材料[J], 2006, 30(6): 26-29.
ZHAO X W, LUO J H, ZHENG M S, *et al.* Materials for Mechanical Engineering[J], 2006, 30(6): 26-29.
- [14] LI C Q, MELCHERS R E. ACI Structural Journal [J], 2005, 102(4): 543-549.
- [15] 赵维涛, 张旭. 计算力学学报[J], 2011, 28(2): 200-204.
ZHAO W T, ZHANG X. Chinese Journal of Computational Mechanics [J], 2011, 28(2): 200-204.
- [16] 贾超, 张凯, 张强勇. 岩石力学与工程学报[J], 2013, 32(5): 926-934.
JIA C, ZHANG K, ZHANG Q Y. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering[J], 2013, 32(5): 926-934.
- [17] 孙剑萍, 汤兆平, 罗意平. 中国机械工程[J], 2018, 29(7): 794-803.
SUN J P, TANG Z P, LUO Y P. China Mechanical Engineering[J], 2018, 29(7): 794-803.
- [18] 刘强, 王妙芳. 应用力学学报[J], 2019, 36(2): 480-484+517.
LIU Q, WANG M F. Chinese Journal of Applied Mechanics [J], 2019, 36(2): 480-484+517.
- [19] TONON F. Reliable Computing[J], 2007, 13(2): 195-209.
- [20] PAPOULIS A, PILLAI S U. 概率、随机变量与随机过程[M]. 保铮, 冯大政, 水鹏朗译. 第四版. 西安: 西安交通大学出版社, 2012.
PAPOULIS A, PILLAI S U. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes[M]. Translated by BAO Z, FENG D Z, SHUI P L. Fourth edition. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2012.
- [21] 王雪亮, 郭君慧, 王小丽, 等. 武汉理工大学学报[J], 2015, 37(7): 74-77.
WANG X L, GUO J H, WANG X L, *et al.* Journal of Wuhan University of Technology[J], 2015, 37(7): 74-77.

(编辑 张雨明)