

基于动态贝叶斯网络的海底管道 点蚀疲劳损伤失效模型研究

骆正山, 赵乐新, 王小完

(西安建筑科技大学 管理学院, 西安 710055)

摘 要: **目的** 研究海底管道在点腐蚀和腐蚀疲劳双重影响下的整个破坏过程, 基于动态贝叶斯网络构建系统失效模型, 对海底管道系统不同疲劳寿命下的失效概率进行预测。**方法** 将点蚀疲劳损伤过程分为腐蚀点成核、腐蚀坑增长、短裂纹扩展和长裂纹扩展四个阶段, 采用蒙特卡洛模拟方法对腐蚀点形成到短裂纹发生前的管道破坏过程进行分析, 结合疲劳裂纹扩展的动态贝叶斯网络结构图, 在充分考虑相关影响因素不确定性的基础上, 为海底点蚀管道系统提出一种创新性的概率分析方法, 对点蚀管道疲劳寿命的失效概率进行科学预测。**结果** 结合实例分析, 通过蒙特卡洛模拟方法, 求解得出腐蚀坑增长转变为短裂纹扩展状态的临界裂纹尺寸为 0.8 mm。采用动态贝叶斯网络分析方法, 对未经受维修保养的点蚀管道进行疲劳寿命预测, 当管道运行到第 35 年时将会面临失效风险。**结论** 所构建的模型可以对海底点蚀管道腐蚀疲劳寿命失效概率进行合理预测, 通过观测相关影响参数的变化, 及时更新预测结果, 有助于为海底管道系统制定有效的维修策略。

关键词: 海底管道; 点蚀; 腐蚀疲劳; 动态贝叶斯网络; 失效模型

中图分类号: TG172.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)01-0269-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.01.032

Failure Model for Pitting Fatigue Damaged Pipeline of Subsea Based on Dynamic Bayesian Network

LUO Zheng-shan, ZHAO Le-xin, WANG Xiao-wan

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

ABSTRACT: The work aims to study the whole failure process of submarine pipeline under the dual effects of pitting corrosion and corrosion fatigue, and construct a system failure model based on dynamic Bayesian network to predict the failure probability of submarine pipeline system under different fatigue life. The pitting fatigue damage process was divided into four stages: pit nucleation, pit growth, short and long crack growth. The Monte Carlo simulation method was used to analyze the pipeline failure process from pitting formation to short crack occurrence. Based on the dynamic Bayesian network structure diagram of fatigue crack growth and the uncertainties of related factors, an innovative probability analysis method for submarine pitting pipeline

收稿日期: 2019-04-15; 修订日期: 2019-07-13

Received: 2019-04-15; Revised: 2019-07-13

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)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (41877527); Shaanxi Social Science Foundation Subsidized Projects (2018S34)

作者简介: 骆正山 (1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为管理科学与工程、信息管理与信息系统、油气管道风险评估等。
邮箱: fxpgyjs@163.com

Biography: LUO Zheng-shan (1969—), Male, Professor, Doctoral supervisor, Research focus: mainly engaged in teaching and scientific research in management science and engineering, information management and information system, oil and gas pipeline risk assessment and other disciplines. E-mail: fxpgyjs@163.com

system was proposed to scientifically predict the failure probability of pitting pipeline fatigue life. Combining with the example analysis, the critical crack size of pit growth to short crack growth was 0.8 mm, which was solved by the Monte Carlo simulation method. The fatigue life of pitting pipeline without maintenance was predicted by the dynamic Bayesian network analysis method. The pipeline would face failure risk after 35 years of working. The results show that the model can reasonably predict the failure probability of corrosion-fatigue life of subsea pitting pipelines. By observing the changes of relevant influencing parameters and updating the predicted results in time, it is helpful to formulate effective maintenance strategies for subsea pipeline systems.

KEY WORDS: subsea pipelines; pitting; corrosion-fatigue; dynamic Bayesian network; failure model

海底管道是海上油气资源开发的重要组成部分,其结构的稳定性与海上油气田的安全紧密相关^[1]。在海底管道运行过程中,其性能受到传输油气和海洋环境的双重影响,管道性能的退化将会导致管道结构失效,其中腐蚀和腐蚀疲劳损伤是造成管道性能退化的主要因素^[2]。当海底管道受到腐蚀时,不但会使管道壁厚逐渐变薄,还会造成穿孔、开裂破坏,从而引起管道泄漏。当海底管道在循环荷载的不断作用下,受环向应力影响的管道材料将会发生腐蚀崩解现象,从而造成管道结构发生以点蚀为主的局部腐蚀。这为管道腐蚀疲劳裂纹的产生提供了条件,会进一步引起管道泄漏^[3-4]。海底管道发生泄漏,不仅会造成很大的经济损失,还会对海洋环境造成污染^[5]。因此,综合考虑点蚀和腐蚀疲劳损伤对海底管道结构稳定性的影响,科学地预测海底点蚀管道疲劳损伤寿命的失效概率,对保证海底管道的安全运行至关重要。

目前,针对点蚀和腐蚀疲劳双重影响的钢管结构的破坏状态已受到很多学者关注,国内外在该领域已取得一定研究成果。国外,Kondo^[6]首先提出了基于腐蚀坑增长的疲劳裂纹萌生时间预测模型,但没有完全描述出腐蚀疲劳损伤的破坏过程。Pidaparti等^[7]针对飞机面板的点蚀分类、分布和腐蚀疲劳寿命预测进行了研究,但没有考虑点蚀成核的时间对疲劳寿命的影响。Hu等^[8]针对局部腐蚀管道提出了跨尺度损伤过程的四阶段概率模型,虽然为评估管道腐蚀疲劳寿命提供了计算框架,但计算过程相对复杂。Arzaghi等^[9]基于贝叶斯网络建立了疲劳裂纹增长的概率模型,为管理者制定最优的维修策略提供参考。国内也有很多学者对钢管结构的点蚀和腐蚀疲劳寿命进行了研究。崔璐等^[10]对油井管腐蚀疲劳的裂纹萌生机理和扩展机理进行了介绍,但所建模型偏于概念构思。黄小光和王黎明^[11]基于热力学原理,构建了点蚀向腐蚀疲劳裂纹转化的临界条件,确定了腐蚀疲劳裂纹成核的临界点蚀尺寸,但没有对腐蚀疲劳寿命进行预测研究。刘治国等^[12]深入研究了点蚀对航空铝合金结构腐蚀疲劳寿命的影响,但没有提供预测腐蚀疲劳寿命的计算框架。上述研究多关注钢管结构腐蚀疲劳机理,没有完全描述出腐蚀疲劳损伤的破坏过程,且计算过程复杂。

本文针对海底点蚀疲劳损伤管道系统,在充分考虑点蚀和腐蚀疲劳损伤双重影响的基础上,基于动态贝叶斯网络提出了失效分析模型。结合腐蚀过程中相关因素的随机性影响,为海底点蚀管道系统的疲劳寿命预测提供指导。

1 贝叶斯网络

1.1 传统贝叶斯网络

贝叶斯网络(BN)是基于图论和概率论的有向无环图,用来考虑由多个节点构成的随机变量之间的不确定性因果关系,包括节点、有向边和概率三部分。它是在随机变量的独立性和链式法则条件下,对一组随机变量的联合概率分布进行评估^[13]。结合传统贝叶斯网络结构图(图1),离散随机变量 $V=\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ 的联合概率分布 $P(V)$ 表示为:

$$P(V) = P(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | P_a(X_i)) \quad (1)$$

式中: $P_a(X_i)$ 为变量 X_i 的父节点发生概率; $P(X_i | P_a(X_i))$ 为变量 X_i 父节点发生条件下子节点发生的条件概率。

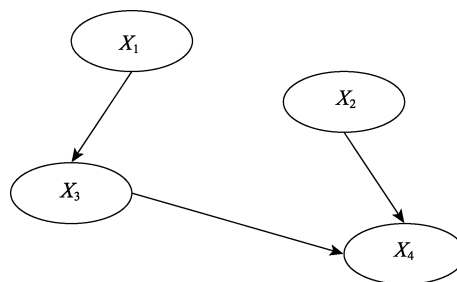


图1 传统贝叶斯网络结构
Fig.1 Structure of traditional Bayesian network

图1中描述了包含变量 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 的传统贝叶斯网络。贝叶斯网络作为一种先进的概率分析方法,已广泛应用于复杂系统的可靠性分析,它通过对相关变量的联合概率分布进行因式分解,降低了方法的复杂性,减少了计算时间。贝叶斯网络的主要优点是当系统中任何一个机会节点变量的状态发生变化

时,通过及时更新变量的联合概率分布,对复杂系统的可靠性进行高效分析。例如,当变量 X_2 变为状态 g 时,根据贝叶斯定理,对系统中各变量的联合概率分布更新表示为:

$$P(X_1, X_3, X_4 | g) = \frac{P(X_1, X_2, X_4, g)}{\sum_{X_1, X_3, X_4} P(X_1, X_2, X_4, g)} \quad (2)$$

1.2 动态贝叶斯网络

动态贝叶斯网络 (DBN) 是以传统贝叶斯网络为基础,将静态的网络结构拓展到时间维度而形成具有处理时序数据能力的模型。该模型通过对系统中变量进行模型化处理,可以表示系统的随机变化过程^[14]。DBN 对 BN 进行时间片段扩展,它将时间线分成离散的时间片段 ($t \in [0, T]$), 片段间有向边表示不同时间片段节点的条件关联,如第 $i+1$ 个时间片段上的节点变量由第 i 个时间片段上的父节点变量所决定。变量 Y_i 的条件概率 $P(Y_i | Y_{i-1}, X_i)$ 的动态贝叶斯网络如图 2 所示,它描述了变量 Y_i 被模型化后的进化过程。由图 2 可知,时间片段 t 上的变量 Y_t 由变量 Y_{t-1} 和变量 X_t 共同决定,且两个连续时间片段之间的状态转换可能取决于所建模型中变量随机变化的物理特性。因此需

要针对时间片段上的节点变量构建一个完整的条件概率表格,才能针对研究系统建立一个动态的贝叶斯网络。

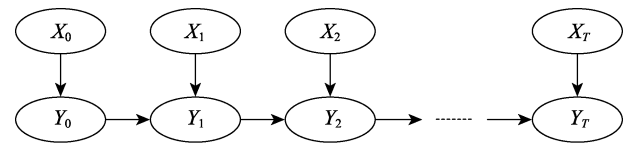


图 2 动态贝叶斯网络结构

Fig.2 Structure of dynamic Bayesian network

2 点蚀与腐蚀疲劳损伤失效模型

若对海底点蚀与腐蚀疲劳损伤管道系统建立失效模型,首先要明确由点蚀和腐蚀疲劳损伤共同作用的整个破坏过程,这有助于构建预测系统破坏状态的计算框架和动态贝叶斯网络。本文以文献[4]中提出的七阶段破坏模型为基础,对海底油气管道的使用寿命进行分析。从腐蚀点成核到结构最终失效的整个破坏过程如图 3 所示。该过程主要由腐蚀点成核时间 t_1 、腐蚀坑增长时间 t_2 、管道短裂纹扩展时间 t_3 、管道长裂纹扩展时间 t_4 四部分构成。由于腐蚀坑增长转变为短裂纹的状态过渡时间 t_5 和短裂纹增长转变为长裂纹的状态过渡时间 t_6 较短,可忽略不计^[15]。

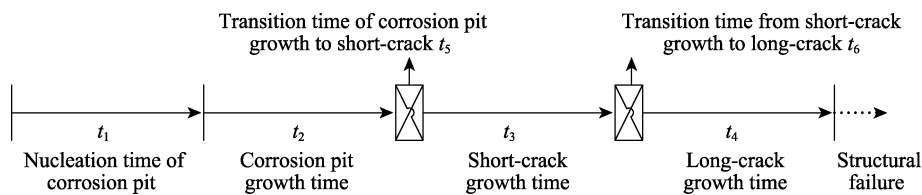


图 3 点蚀和腐蚀疲劳损伤的整个破坏过程

Fig.3 The whole damage process of pitting corrosion and corrosion fatigue damage

由图 3 可知,海底点蚀和腐蚀疲劳损伤管道的使用寿命 t_f 可表示为:

$$t_f = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (3)$$

评估海底腐蚀劣化管道使用寿命的分析方法如

图 4 所示。该方法模拟了由点蚀和腐蚀疲劳损伤综合影响导致管道裂纹扩展的整个破坏过程。在下文中,将对点蚀疲劳损伤的四个过程分别进行介绍,并构建系统失效模型。

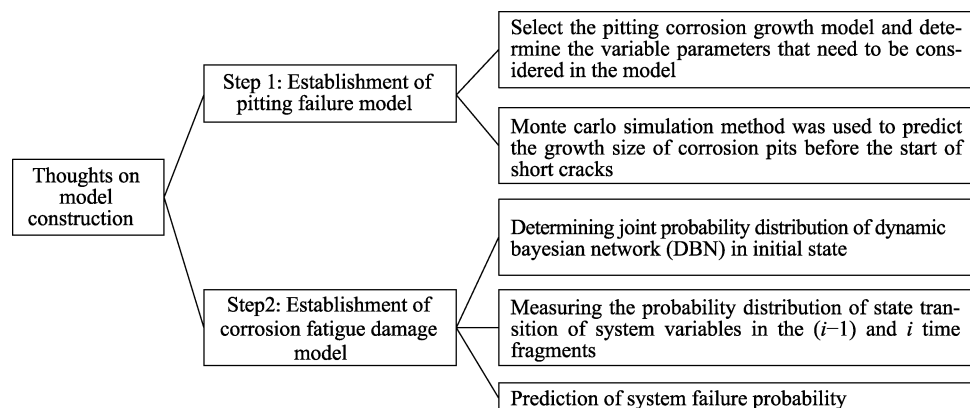


图 4 海底点蚀和腐蚀疲劳损伤管道使用寿命预测方法

Fig.4 Life prediction method for pipeline with pitting corrosion and corrosion fatigue damage

2.1 腐蚀点成核

腐蚀点成核是海底管道点蚀和腐蚀疲劳损伤破坏过程的第一个阶段。目前已有部分学者对腐蚀点的成核时间(t_1)进行研究,但 t_1 对相关影响因素(如材料性质和电化学反应等)的依赖程度尚不明确。因此本研究采用对数正态分布模型模拟腐蚀点成核时间的随机变化过程,并对具体分布参数的选取进行介绍^[16]。

2.2 腐蚀坑增长

由文献[17]可知,腐蚀坑保持半球形,以均匀体积速率增长,增长速率可以表示为:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{1}{2\pi c^2} \times \frac{MI_{p0}}{nF\rho} \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (4)$$

式中: c 为腐蚀坑的半径; M 为管道材料的分子质量; I_{p0} 为点蚀电流常数; n 为金属原子价; F 为法拉第常数; ρ 为密度; ΔH 为活化能; R 为理想气体常数; T 为温度。

腐蚀疲劳裂纹的形成,本质上是蚀坑增长和裂纹扩展相互竞争的结果。管道由腐蚀坑增长状态转变为短裂纹扩展状态与管道材料的力学性能有关,其中力学性能可以用材料的应力强度因子 ΔK 表示。腐蚀管道短裂纹扩展状态的开始由两方面因素决定:第一,腐蚀坑等效表面裂纹扩展的应力强度因子 ΔK_1 增长到腐蚀疲劳裂纹扩展的临界应力强度因子 ΔK_0 ,如式(5)中所示;第二,腐蚀疲劳裂纹扩展的速率超过腐蚀坑裂纹扩展的速率。

$$\Delta K_1 = \Delta K_0 \quad (5)$$

由文献[18]可知,管道由腐蚀坑裂纹扩展转变为腐蚀疲劳裂纹扩展的临界裂纹长度 L_1 可以表示为:

$$L_1 = \frac{Q}{\pi\alpha} \left(\frac{\Delta K_0}{2.24\Delta\sigma} \right)^2 \quad (6)$$

式中: Q 为形状系数, $Q=1.464\alpha^{1.65}$; α 为腐蚀坑的纵横比, $\alpha=a/c$ (a 为腐蚀坑主长轴长度的1/2, c 为腐蚀坑半径); $\Delta\sigma$ 是管道材料的应力变化范围。

2.3 裂纹扩展

通常采用帕里斯公式对管道腐蚀疲劳导致的长裂纹扩展进行估算分析,对腐蚀疲劳导致的短裂纹扩展尚无明确的计算方法。结合文献[19]的研究,基于帕里斯公式,在充分考虑相关参数不确定性的基础上,可以构建一种概率分析模型,对短裂纹和长裂纹的扩展尺寸进行综合分析,裂纹扩展尺寸 e 的求解公式为:

$$\frac{de}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (7)$$

式中: N 为外加循环荷载(风、电流和风浪等)的次数; C 和 m 是管道裂纹参数(短裂纹和长裂纹取

值不同); ΔK 为应力强度因子,由式(8)计算。

$$\Delta K = Y(e)\Delta\sigma\sqrt{\pi e} \quad (8)$$

式中: $Y(e)$ 为裂纹扩展尺寸的几何函数。

根据式(7)可知,在复杂海洋环境中,经每次循环荷载作用下的油气管道,其裂缝增长与裂缝的尺寸和不确定的应力变化范围有关,该公式没有直接的求解方法。由文献[20]可知,若假设几何函数 Y 是独立于裂纹扩展尺寸 e 的不变量,且材料应力变化范围 $\Delta\sigma$ 服从威布尔分布,则裂纹扩展尺寸 e 的求解公式可以表达为:

$$e_{i+1} = \left(e_i^{\frac{2-m}{2}} + USA^m \right)^{\frac{2}{2-m}}, m \neq 2 \quad (9)$$

$$S = CN\Gamma\left(1 + \frac{m}{B}\right) Y^m \pi^{\frac{m}{2}} \left(1 - \frac{m}{2}\right) \quad (10)$$

式中: A 和 B 分别为威布尔分布的比例参数和形状参数; Γ 为伽玛函数; U 为模型服从正态分布的不确定系数。

根据式(9)可知,当前时间段裂纹尺寸是前一时间段裂纹尺寸和管道裂纹参数(C 和 m)的函数。借助对管道裂纹扩展长时间观察和实验中获取的裂纹参数,结合一系列的恒定时间序列和动态贝叶斯网络中的状态转变概率 $P(e_i|e_{i-1})$,在已知短裂纹扩展状态转变为长裂纹扩展状态的临界裂纹尺寸 L_2 的前提下,可以对当前时间段的裂纹尺寸进行求解计算。

2.4 DBN 失效模型

在点蚀成核且腐蚀坑增大尚未转变为短裂纹扩展状态阶段,可以结合计算式(4)、(6),在已知最初腐蚀坑尺寸 L_0 的条件下,采用蒙特卡洛方法对最初点蚀占主导作用的管道损伤寿命进行模拟分析。在点蚀管道进入裂纹扩展的腐蚀疲劳损伤阶段,可以采用动态贝叶斯网络(DBN)对管道的剩余寿命进行估算分析。结合文献[21]中提出的通用DBN模型,在该阶段进行离散时间片段划分的基础上,具体描述了短裂纹和长裂纹的整个劣化损伤过程,如图5所示。腐蚀疲劳损伤阶段由腐蚀坑增长状态转变为短裂纹扩展状态的临界尺寸 L_1 开始,先经过 $L_{d1} \sim L_{dn}$ n 个时间片段(每个时间片段代表1年)的短裂纹扩展。当短裂纹尺寸扩展到转变为长裂纹扩展状态的临界尺寸 L_2 时,管道腐蚀疲劳损伤进入长裂纹扩展状态。再经过 $L_{c1} \sim L_{cm}$ m 个时间片段的长裂纹扩展,最终第 i 个时间片段的裂纹实际尺寸 L_i 超过系统正常运行可以容忍的最大裂纹尺寸 L_f 时,系统将会出现故障。因此点蚀疲劳损伤管道最终失效模型可以表达为:

$$G = L_f - L_i \quad (11)$$

式中: G 为系统的极限状态。当 $G > 0$ 时,系统正常运行;当 $G \leq 0$ 时,系统出现故障。

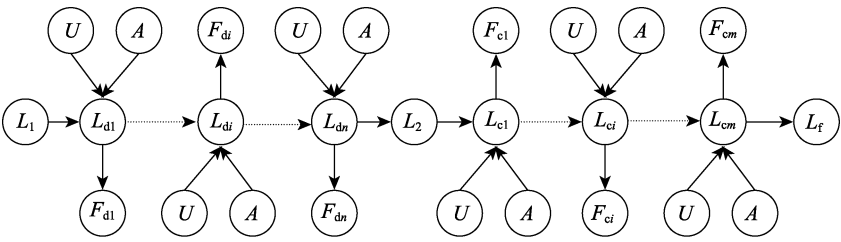


图 5 海底管道点蚀疲劳损伤模型中的动态贝叶斯网络
Fig.5 Dynamic Bayesian network diagram for pitting fatigue damage model of submarine pipelines

3 案例分析

为验证上述腐蚀疲劳损伤管道失效模型的适用性，以高钢级 X70 的某海底石油管道为研究对象，对所建模型进行实例验证。假设该海底管道每年需要承受循环荷载破坏的次数 $N=10^6$ ，管道失效的点蚀疲劳损伤裂缝尺寸 $L_f=10\times10^{-3}\text{ m}$ ，模型中的具体相关变量见表 1。

表 1 海底管道点蚀疲劳损伤模型中的相关变量
Tab.1 Relevant variables in pitting fatigue damage model of submarine pipelines

Number	Variable description	Mean
1	Stress range $\Delta\sigma$	60 MPa
2	Ambient temperature T	293 K
3	Weibull scale parameter A	5.35 MPa
4	Weibull shape parameter B	0.66
5	Uncertainty coefficient U	1
6	Corrosion pit size L_0	$1.98\times10^{-6}\text{ m}$
7	Critical size of crack L_2	$2.0\times10^{-3}\text{ m}$
8	Longitudinal-transverse ratio of corrosion pits α	0.7
9	Critical stress intensity factor ΔK_0	$2.4\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
10	Tube density ρ	$7.8\times10^6\text{ g/m}^3$
11	Pitting current constant I_{p0}	0.5 C/s
12	Faraday constant F	96 485 C/mol
13	Ideal gas constant R	$8.314\text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$
14	Atomic valence of metals n	2
15	Molecular mass of pipes M	55.75
16	Activation energy ΔH	$5.0\times10^4\text{ kJ/mol}$
17	Short/long crack growth exponent m_d, m_c	3.0
18	Material parameter for short crack C_d	2.17×10^{-13}
19	Material parameter for long crack C_c	1.45×10^{-14}
20	Geometry function Y	1

通过式（4）、（6），结合表 1 数据，采用蒙特卡洛模拟方法，求解的腐蚀坑增长状态转变为短裂纹扩展状态的临界裂纹尺寸 L_1 的均值 $E[L_1]=8\times10^{-4}\text{ m}$ ，该变量的累计概率分布如图 6 所示。在图 6 中，裂纹尺寸被划分为 20 个离散的指数增长区间，这为动态贝叶斯网络分析提供了最大的裂纹破坏尺寸，使最后时

间片段内的均匀间隔长度不会因为概率较低而导致舍入误差。

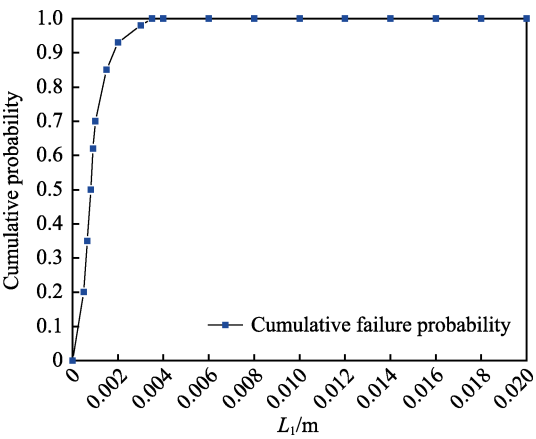


图 6 临界裂纹尺寸 L_1 的累积概率分布
Fig.6 Cumulative probability distribution of critical crack size L_1

通过上文中裂纹扩展公式，依据图 5 中动态贝叶斯网络模型，结合以上数据，可以得出海底点蚀疲劳损伤管道寿命的累积概率分布，如图 7 所示。根据图 7 可知，在海底点蚀管道系统运行的第 3 年，由于腐蚀坑增长将会使系统进入腐蚀疲劳损伤阶段，此时短裂纹扩展将会加大管道系统的破坏速度。在海底点蚀管道系统以短裂纹扩展状态经过 12 年以后，系统将会进入长裂纹扩展状态，这时管道系统的破坏速度明显加快。若在前 15 年中未对发生点蚀损伤的海底管道进行维修保养，在第 20 年，系统的累积故障概率

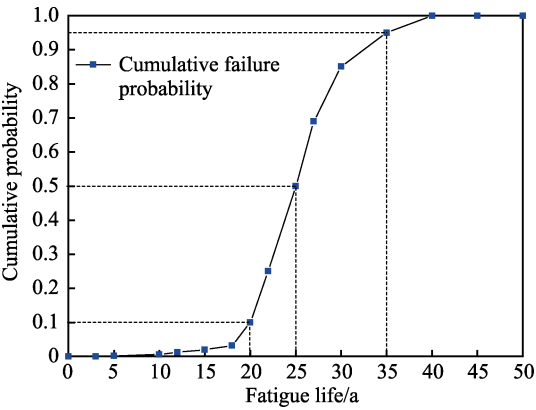


图 7 海底点蚀疲劳损伤管道寿命的累积概率分布
Fig.7 Cumulative probability distribution of fatigue life of submarine pitting corrosion damaged pipelines

将会快速增长到 0.1。在第 25 年,系统的累积故障概率将会增长到 0.5。大约再运行 10 年,系统结构将会面临失效风险,此时系统累积故障概率为 0.95。

图 7 中结果表明,在循环荷载作用下,海底点蚀疲劳损伤管道系统运行期间,结合具有监测能力的 DBN 模型,可用上文提出的方法对系统的疲劳寿命进行预测。通过观测相关影响参数的实时变化,依据疲劳裂纹尺寸的大小更新预测结果,从而借助最新的预测数据,为系统制定最优的维修保养计划。

4 结论

1) 针对循环荷载作用下的海底点蚀疲劳损伤管道,在充分考虑点蚀和腐蚀疲劳损伤双重影响的基础上,把点蚀疲劳损伤分为腐蚀点成核、腐蚀坑增长、短裂纹扩展和长裂纹扩展四个阶段。基于动态贝叶斯网络(DBN),提出了一种预测管道点蚀疲劳损伤寿命的概率分析方法。

2) 采用蒙特卡洛模拟方法对腐蚀点成核到形成短裂纹扩展阶段进行分析,当腐蚀坑的尺寸增长到 0.8 mm 时,管道破坏将会进入腐蚀疲劳裂纹扩展阶段。借助动态贝叶斯网络分析方法,对短裂纹和长裂纹扩展阶段的疲劳寿命进行预测分析。通过计算结果可知,若海底管道发生点蚀后未进行任何维修保养,系统运行 20 年后的故障概率为 0.1,再经过 15 年的无修运转后,系统的故障概率将会达到 0.95。

3) 通过提出的失效分析模型,结合相关影响参数的实际观测数据,可以对海底管道腐蚀疲劳寿命预测结果进行实时更新,为系统进行有效的检测、检查和制定最优的维修策略提供帮助。

参考文献:

- [1] 韩文海,周晶. 腐蚀海底管道可靠性分析[J]. 石油学报, 2015, 36(4): 516-520.
HAN Wen-hai, ZHOU Jing. Reliability analysis of corroded subsea pipeline[J]. Acta petrolei sinica, 2015, 36(4): 516-520.
- [2] 马钢,白瑞. 海底腐蚀管道剩余强度评估方法对比[J]. 焊管, 2018, 41(9): 25-29.
MA Gang, BAI Rui. Comparison of remaining strength evaluation methods for seabed corrosive pipes[J]. Welded pipe and tube, 2018, 41(9): 25-29.
- [3] 蔡永桥,卢进,王豪巍,等. 海底管道腐蚀缺陷评价方法的对比与应用[J]. 油气田地面工程, 2018, 37(1): 70-74.
CAI Yong-qiao, LU Jin, WANG Hao-wei, et al. Comparison and application of assessment methods for corrosion defects of submarine pipelines[J]. Oil-gas field surface engineering, 2018, 37(1): 70-74.
- [4] HU P, MENG Q, HU W, et al. A continuum damage mechanics approach coupled with an improved pit evolution model for the corrosion fatigue of aluminum alloy[J]. Corrosion science, 2016, 113: 78-90.
- [5] 李新宏,朱红卫,陈国明,等. 海底管道泄漏油气扩散规律数值仿真与对比分析[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(2): 608-614.
LI Xin-hong, ZHU Hong-wei, CHEN Guo-ming, et al. CFD-based comparative analysis for the oil & gas dispersion behavior resulting from the submarine pipeline leakage[J]. Journal of safety and environment, 2017, 17(2): 608-614.
- [6] KONDO Y. Prediction of fatigue crack initiation life based on pit growth[J]. Corrosion, 1989, 45(1): 7-11.
- [7] PIDAPARTI R M, JAYANTI S, SOWERS C A, et al. Classification, distribution, and fatigue life of pitting corrosion for aircraft materials[J]. Journal of aircraft, 2015, 39(3): 486-492.
- [8] HU J, TIAN Y, TENG H, et al. The probabilistic life time prediction model of oil pipeline due to local corrosion crack[J]. Theoretical and applied fracture mechanics, 2014, 70: 10-18.
- [9] ARZAGHI E, ABAEI M, ABBASSI R, et al. Risk-based maintenance planning of subsea pipelines through fatigue crack growth monitoring[J]. Engineering failure analysis, 2017, 9: 928-939.
- [10] 崔璐,李臻,王建才,等. 油井管的腐蚀疲劳研究进展[J]. 石油机械, 2015, 43(1): 78-83.
CUI Lu, LI Zhen, WANG Jian-cai, et al. Progress in research on corrosion fatigue of oil-well tubing[J]. China petroleum machinery, 2015, 43(1): 78-83.
- [11] 黄小光,王黎明. 腐蚀疲劳点蚀演化及腐蚀疲劳裂纹成核机制研究[J]. 船舶力学, 2016, 20(8): 992-998.
HUANG Xiao-guang, WANG Li-ming. Pit evolution and crack nucleation mechanism study of corrosion fatigue[J]. Journal of ship mechanics, 2016, 20(8): 992-998.
- [12] 刘治国,王海东,穆志韬. 基于微观结构的航空铝合金点蚀扩展行为研究[J]. 航空工程进展, 2017, 8(2): 143-148.
LIU Zhi-guo, WANG Hai-dong, MU Zhi-tao. Research of aircraft aluminum alloys pitting corrosion growth behavior based on microstructure[J]. Advances in aeronautical science and engineering, 2017, 8(2): 143-148.
- [13] 陈雍君,李宏远,汪雯娟,等. 基于贝叶斯网络的综合管廊运维灾害风险分析[J]. 安全与环境学报, 2018(6): 2109-2114.
CHEN Yong-jun, LI Hong-yuan, WANG Wen-juan, et al. Disaster risk analysis of utility tunnel operation and maintenance based on the bayesian network[J]. Journal of safety and environment, 2018(6): 2109-2114.
- [14] 江磊,王小敏,蔺伟. 基于动态贝叶斯网络的列控中心可靠性及可用性评估[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(3): 182-188.
JIANG Lei, WANG Xiao-min, LIN Wei. Reliability and availability evaluation of train control center based on dynamic bayesian network[J]. Journal of transportation

- systems engineering and information technology, 2018, 18(3): 182-188.
- [15] 李昌范, 何宇廷, 张胜, 等. 7B04-T6 铝合金腐蚀疲劳交替寿命预测模型[J]. 航空动力学报, 2016, 31(5): 1073-1080.
- LI Chang-fan, HE Yu-ting, ZHANG Sheng, et al. Life prediction model of 7B04-T6 aluminum alloy under alternate action of corrosion and fatigue[J]. Journal of aerospace power, 2016, 31(5): 1073-1080.
- [16] 吴甜宇, 李涛. 交变应力与环境耦合作用下拉索腐蚀疲劳损伤机理研究[J]. 公路, 2015(4): 104-109.
- WU Tian-yu, LI Tao. Damage and failure mechanism of the stayed-cable with corrosion fatigue under alternating stress and environmental coupling[J]. Highway, 2015(4): 104-109.
- [17] 韩忠英, 黄小光, 王黎明. 基于损伤演化律的腐蚀疲劳寿命预测方法及应用[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(2): 333-338.
- HAN Zhong-ying, HUANG Xiao-guang, WANG Li-ming. The application of life prediction method for corrosion fatigue based on damage evolution law[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(2): 333-338.
- [18] 于雯, 李曙生, 嵇春艳. 腐蚀裂纹损伤下船舶管路抗冲击时变剩余强度研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(9): 103-107.
- YU Wen, LI Shu-sheng, JI Chun-yan. Research on the residual strength of ship pipeline on the shock resistance under corrosion and crack damage[J]. Ship science and technology, 2017, 39(9): 103-107.
- [19] ARZAGHI E, ABAEI M, ABBASSI R, et al. Risk-based maintenance planning of subsea pipelines through fatigue crack growth monitoring[J]. Engineering failure analysis, 2017, 79: 928-939.
- [20] 苏维国, 穆志韬, 刘涛, 等. 基于损伤检测的腐蚀疲劳寿命预测概率模型[J]. 装备环境工程, 2009, 6(5): 33-38.
- SU Wei-guo, MU Zhi-tao, LIU Tao, et al. Probability model for prediction of corrosion fatigue life based on damage inspection[J]. Equipment environmental engineering, 2009, 6(5): 33-38.
- [21] 李志强, 徐廷学, 安进, 等. 冗余系统共因失效动态贝叶斯网络建模[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 190-198.
- LI Zhi-qiang, XU Ting-xue, AN Jin, et al. Common cause failure modeling for redundant system based on dynamic bayesian network[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2018, 39(3): 190-198.

(上接第236页)

- [22] MUSIL Jindrich, ZEMAN Petr, DOHNAL Pavel. Ti-Si-N films with a high content of Si[J]. Plasma process and polymers, 2007, 4(2): S574-S578.
- [23] VEPREK S, KARVANKOVA P, VEPREK-HEIJMAN M G J. Possible role of oxygen impurities in degradation of nc-TiN/a-Si₃N₄ nanocomposites[J]. J vac sci technol, 2005 (B23): L17-L21.
- [24] YAMAMOTO K, SATO T, TAKAHARA K, et al. Properties of (Ti,Cr,Al)N coatings with high Al content deposited by new plasma enhanced arc-cathode[J]. Surface and coatings technology, 2003, 174-175: 620-626.
- [25] ZHANG Xu-hai, QIU Yue-dong, TAN Zheng, et al. Effect of Al content on structure and properties of TiAlCN coatings prepared by magnetron sputtering[J]. Journal of alloys and compounds, 2014, 617: 81-85.
- [26] RIBEIRO E, MALCZYK A, CARVALHO S, et al. Effects of ion bombardment on properties of d.c. sputtered superhard (TiSiAl)N nanocomposite coatings[J]. Surface and coatings technology, 2002, 151-152: 515-520.
- [27] 吴志立, 李玉阁, 吴彼, 等. 高功率调制脉冲磁控溅射沉积 TiAlSiN 纳米复合涂层结构调控与性能研究[J]. 无机材料学报, 2015, 30(12): 1254-1260.
- WU Zhi-li, LI Yu-ge, WU Bi, et al. Microstructure controlling and properties of TiAlSiN nanocomposite coatings deposited by modulated pulsed power magnetron sputtering[J]. Journal of inorganic materials, 2015, 30(12): 1254-1260.
- [28] ZHU Li-hui, SONG Cheng, NI Wang-yang, et al. Effect of 10% Si addition on cathodic arc evaporated TiAlSiN coatings[J]. Trans nonferrous met soc China, 2016(26): 1638-1646.
- [29] VEPREK S, MAENNLING H D, KARVANKOVA P, et al. The issue of the reproducibility of deposition of superhard nanocomposites with hardness of ≥ 50 GPa[J]. Surface & coating technology, 2006(200): 3876-3885.