

文章编号: 0253-2697(2015)04-0516-05 DOI:10.7623/syxb201504014

腐蚀海底管道可靠性分析

韩文海 周 晶

(大连理工大学建设工程学部 辽宁大连 116024)

摘要:为了计算海底管道在腐蚀作用下的可靠性,研究了海底管道在正常服役阶段可能受到的荷载作用,包括内压、温度、弯曲、覆土、地震作用和残余应力作用。基于 Monte Carlo 方法结合算例,计算了腐蚀海底管道在这些作用下的可靠性,得到了失效概率随时间的变化曲线。同时,研究了这 6 种作用对腐蚀海底管道的影响,描述了各种作用对腐蚀海底管道的影响程度。从影响腐蚀海底管道失效概率的角度,定义了参数灵敏性指标,对海底管道设计中经常涉及的参数如操作压力、管道半径、管壁厚度和管线埋设深度等进行了灵敏性分析,讨论了其变化对管线失效概率的影响,为实际工程中对腐蚀海底管道进行可靠性分析提供了参考。

关键词:腐蚀海底管道;可靠性;覆土作用;地震作用;残余应力

中图分类号:TE832

文献标识码:A

Reliability analysis of corroded subsea pipeline

Han Wenhai Zhou Jing

(Faculty of Infrastructure, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

Abstract: In order to calculate the reliability of corroded subsea pipeline, a corrosion model, effect of loads that count in the service period of subsea pipeline are studied, including pressure, temperature load, bending moment, overlaying soil effect, earthquake effect and residual stress effect. The reliability of corroded submarine pipe under all these effects is calculated with Monte Carlo method based on numerical example, so that the change of failure probability is obtained. Meanwhile, the effect of these loads on the failure probability of corroded subsea pipe is quantitatively analyzed. Sensitivity analysis is conducted for parameters that are usually used in design such as operational pressure, pipe radius, thickness of pipe wall and et al, in the view of failure probability. The analysis provides references for reliability calculation of corroded subsea pipeline in practice.

Key words: corroded submarine pipeline; reliability; overlaying soil effect; seismic load; residual stress effect

引用: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.

Cite: Han Wenhai, Zhou Jing. Reliability analysis of corroded subsea pipeline[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(4): 516-520.

海底管线是海上油气资源开发必不可少的重要组成部分,担负海上油气集输的重要任务,是海洋油气工程的生命线^[1,2]。在海底管道服役过程中,常受到各种荷载的作用,包括内压作用、温度作用、弯曲作用、覆盖土层作用、地震作用和残余应力作用等。复杂的荷载作用将影响到海底管道的安全运行。同时,在恶劣的海洋环境条件下,海底管道的腐蚀损伤,将加剧海底管道失效的概率,严重时将引起管道断裂,造成原油泄漏,导致严重的环境污染和巨大的经济损失^[3]。因此,考虑多种复杂作用下的腐蚀海底管道可靠性分析,对保证海底管道安全运行至关重要。

国内外许多学者在腐蚀海底管道的可靠性研究方面开展了一些工作,其中 Teixeira^[4]、赵事^[5]、支希哲^[6]

和 Caley^[7]等基于内压作用对腐蚀海底管道进行可靠性计算和剩余寿命预测;刘威^[8]、王智平^[9]和韩洋^[10]等对埋地管线在腐蚀和地震作用下的可靠性进行了研究;Amirat^[11]等研究了残余应力对腐蚀海底管道可靠性的影响。腐蚀海底管道在多种荷载综合作用下的可靠性分析却鲜见报道。

笔者通过详细分析了海底管道在服役过程中所受到的各种作用(包括内压作用、温度作用、弯曲作用、覆盖土层作用、地震作用和残余应力作用)及其对应的应力模型,结合腐蚀模型建立腐蚀海底管道失效的极限状态方程;基于 Monte Carlo 方法,结合算例,计算了腐蚀海底管道在多种复杂作用下的可靠性,得到了失效概率随时间的变化曲线;研究了内压、温度、弯曲、覆

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目“深海柔性结构非线性流固耦合振动与破坏机理”(2011CB013702)资助。

第一作者:韩文海,男,1989年9月生,2012年获大连理工大学学士学位,现为大连理工大学建设工程学部博士研究生,主要从事海底管道可靠性和极限承载力方面研究。Email:whhan@mail.dlut.edu.cn

通信作者:周 晶,男,1949年6月生,1976年获大连工学院学士学位,1986年获大连工学院博士学位,现任大连理工大学建设工程学部教授、博士生导师,主要从事工程结构抗震分析理论、模型试验技术和工程结构风险分析与评估。Email:zhouj@dlut.edu.cn

盖土层、地震和残余应力作用对腐蚀海底管道的影响程度;结合腐蚀海底管道失效概率定义了参数灵敏性指标,对海底管道设计中经常涉及的参数(包括操作压力、管道半径、管壁厚度和管线埋设深度等)进行了参数灵敏性分析,讨论了参数变化对管线失效概率的影响。

1 应力模型

海底管道在正常服役阶段可能受到的荷载作用,包括内压、温度、弯曲、覆土、地震作用和残余应力作用,其对应的应力模型分别如下。

1.1 内压应力模型

在弹性范围内,管线受内压作用产生的环向应力可表示为:

$$\sigma_{cp} = pR/h \quad (1)$$

式中: σ_{cp} 为内压产生的管道环向应力,MPa; p 为管道内压,MPa; R 为管线内径,mm; h 为管线壁厚,mm。对于腐蚀海底管道,用 $h-d(T)$ 代替 h , $d(T)$ 为最大腐蚀深度,mm; T 为管道服役时间,a。

1.2 温度应力模型

通常,为增加海底管道内输送介质或流体的流动性,需要对所输送的介质或流体进行升温。由管线内、外温差产生的管线轴向应力可以表示为^[12]:

$$\sigma_{lt} = \alpha E \Delta \theta \quad (2)$$

式中: σ_{lt} 为管线内、外温差产生的管道轴向应力,MPa; α 为管线膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; E 为管线弹性模量,MPa; $\Delta \theta$ 为管线内、外温差, $^{\circ}\text{C}$ 。

1.3 弯曲应力模型

管线弯曲引起的弯曲正应力可表示为^[12]:

$$\sigma_{lb} = ER\chi \quad (3)$$

式中: σ_{lb} 为管线弯曲产生的轴向正应力,MPa; χ 为弯曲线轴向曲率, m^{-1} 。

1.4 覆土应力模型

海底管道上覆土产生的环向弯曲应力可表示为^[12]:

$$\sigma_{cs} = \frac{6k_m C_d \gamma' B^2 ERh}{Eh^3 + 24k_d pR^3} \quad (4)$$

式中: σ_{cs} 为由于覆盖土层产生的管道环向弯曲应力,MPa; k_m 为管土相互作用引起的弯曲系数; C_d 为土压力系数; γ' 为覆土的浮容重, N/mm^3 ; B 为管道上部覆盖土槽宽度,mm; k_d 为挠曲系数。对于腐蚀海底管道,用 $h-d(T)$ 代替 h 。

1.5 残余应力模型

在内压作用下,海底管道通常在轴向方向发生破坏,因此管道环向的残余应力对于海底管道的整体性

影响较大^[11]。本文也将着重研究海底管道环向残余应力的影响。Crampton^[13]曾提出一个通过实验计算管道环向残余应力的简单方法:沿待测管道轴向逐层切开管道,测量切开前、后管道外径的变化,因此可计算出管道环向残余应力:

$$\sigma_{cr} = E'h \left(\frac{1}{D_0} - \frac{1}{D_1} \right) \quad (5)$$

$$E' = E/(1-u^2) \quad (6)$$

式中: D_0 为切开前管道的外径,mm; D_1 为切开后管道的外径,mm; u 是管道材料泊松比。

Crampton 实验需要精密的切割和测量,实验过程较为复杂,具体过程可详见文献[13]。Amirat^[14]等采用 Crampton 方法,对常用的 API X60 钢管进行实验。将实验结果进行线性化处理,得到残余应力分布公式:

$$\sigma_{cr}(r) = \sigma_{\max} \left(1 - \frac{2}{h} \right) \quad (7)$$

式中: σ_{\max} 为实验中测得的最大残余应力值,对于 X60 管道测得 $\sigma_{\max} = -70$ MPa(以拉应力为正); r 为残余应力对应点处的壁厚,mm(从外边缘记, $0 \leq r \leq h$)。对于腐蚀海底管道,考虑残余应力随着管壁的减薄而逐渐消散。当海底管道发生 $d(T)$ 腐蚀时,其残余应力最大值为(位于最外层):

$$\sigma_{cr} = \sigma_{\max} \left[1 - \frac{2d(T)}{h} \right] \quad (8)$$

1.6 地震应力模型

地震作用对于通常埋置于海床中的海底管道安全可靠性的也是一个重要的影响因素。研究表明,地震时土壤对管线的约束状态是应力分析的关键^[15],根据管土相对变形与约束力之间的关系,其相互作用状态可以分为弹性约束和塑性约束。对多次地震破坏实例的分析表明,地震时管线的破坏主要是由于轴向土壤变形引起的^[16]。在地震产生较大土壤变形时,约束管线的土壤有部分或全部进入塑性滑移状态^[15],土壤进入了塑形阶段,不会再因为其变形的增大而增大,埋地管线受到的地震应力达到最大值。

以纵波为例,地震波幅值为零的管节点截面上,其受到大小相等、方向相反的轴向地震作用力,将其等效于地震中的管线固支点,可以简化为长度为 $L/2$ 、两端固支的梁。土壤发生剪切破坏,进入塑性滑移阶段时,对应截面处的土壤作用力达到单位长度极限约束力 q_{\max} 。从工程简化计算和安全角度考虑,这里假设整个管段上的土壤都进入了塑性滑移状态。海底管线在地震波作用时,受到的最大地震应力可以表示为^[17]:

$$\sigma_{le} = \frac{q_{\max} L}{4A} \quad (9)$$

式中: σ_{le} 为轴向地震应力,MPa; L 为地震波波长,mm,

其计算过程可参见文献[18]; A 为管线截面积, mm^2 ; q_{\max} 为管线单位长度受到土壤的极限约束力, N/mm 。

目前, 管线单位长度极限约束力计算的经验公式还很少。前苏联干线管道建设科学院通过实验, 考虑了管线重力作用下, 土壤重力作用和内聚力作用下的轴向约束力, 推荐的计算式为^[19]:

$$q_{\max} = w' \tan \varphi + 2\pi D_H^2 C_h \gamma' \tan \varphi + 0.6\pi D_H c \quad (10)$$

$$\begin{cases} \text{对于砂土: } C_h = 0.416 \frac{H}{D_H} - 0.056 \frac{H^2}{D_H^2} + 0.095 \\ \text{对于黏性土: } C_h = 0.367 \frac{H}{D_H} - 0.046 \frac{H^2}{D_H^2} + 0.06 \end{cases}$$

式中: w' 为单位长度管线(包括防腐层, 如有配重, 包括配重层)的浮重度, N/mm ; D_H 为管线外径(包括防腐层厚度, 如有配重, 包括配重层厚度), mm ; γ' 为土壤浮容重, N/mm^3 ; c 为土壤内聚力, MPa ; φ 为土壤内摩擦角, $(^\circ)$; H 为管线埋置深度, mm 。对于腐蚀海底管道, 用 $D_H - 2d(T)$ (减去防腐层厚度, 如有配重, 也应减去配重层厚度)代替 D_H 。

2 腐蚀海底管道极限状态方程

2.1 腐蚀模型

一般而言, 腐蚀缺陷在长度方向上随时间变化不大。为简化计算, 假定长度方向的腐蚀缺陷生长率近似为零^[20]。对于稳态腐蚀过程, 腐蚀深度是腐蚀时间的线性函数^[21], 腐蚀模型为:

$$d(T) = d_0 + v_d T \quad (11)$$

式中: v_d 为腐蚀速率, mm/a ; d_0 为腐蚀预测选定的初始点。

2.2 极限状态方程

海底管道作为薄壁构件, 通常可研究 2 部分应力, 即轴向应力 σ_l 和环向应力 σ_c 。结合内压作用、温度作用、弯曲作用、覆土作用、地震作用产生的应力和残余应力, 管线的轴向应力和环向应力可以表示为:

$$\sigma_l = \sigma_{lp} + \sigma_{lt} + \sigma_{lb} + \sigma_{ls} + \sigma_{le} + \sigma_{lr} = -\mu\sigma_{cp} + \sigma_{lt} + \sigma_{lb} - \mu\sigma_{cs} + \sigma_{le} - \mu\sigma_{cr} \quad (12)$$

$$\sigma_c = \sigma_{cp} + \sigma_{ct} + \sigma_{cb} + \sigma_{cs} + \sigma_{ce} + \sigma_{cr} = \sigma_{cp} - \mu\sigma_{lt} - \mu\sigma_{lb} + \sigma_{cs} - \mu\sigma_{le} + \sigma_{cr} \quad (13)$$

式中: σ_{lp} 、 σ_{lt} 、 σ_{lb} 、 σ_{ls} 、 σ_{le} 、 σ_{lr} 分别为内压、温度、弯曲、覆土、地震产生的轴向应力和轴向残余应力, MPa ; σ_{cp} 、 σ_{ct} 、 σ_{cb} 、 σ_{cs} 、 σ_{ce} 、 σ_{cr} 分别为内压、温度、弯曲、覆土、地震产生的环向应力和环向残余应力, MPa ; μ 为管线材料泊松比。

海底管道通常在轴向方向发生破坏, 因此管道环向的拉应力对于腐蚀海底管道的裂缝的产生和发展影响较大, 所以对于地震应力, 重点考虑其轴向压应力。

本文采用应力失效准则, 即当管段的最小 Von Mises 有效应力达到材料的屈服强度时, 管线发生破坏^[22], 所以海底管道失效的极限状态方程为:

$$LSF = \sigma_y - \sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_c^2} - \sigma_l \sigma_c \quad (14)$$

式中: σ_y 为管线材料的屈服强度, MPa 。当 LSF 为正时, 管道安全运行; 反之, 若 LSF 为负时, 管道失效。

3 应用实例

3.1 模型参数

渤海湾蓬莱海上油气田采用 X60 海底管道输送油气, 根据设计报告和调查资料, 其参数如下: 管道屈服强度 $\sigma_y = 475 \text{ MPa}$ (变异系数为 0.05), 弹性模量 $E = 201\,000 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.3$, 管道内径 $R = 190.3 \text{ mm}$ (变异系数为 0.01), 管壁厚度 $h = 12.7 \text{ mm}$ (变异系数为 0.05), 防腐层厚度为 $\delta = 8 \text{ mm}$, 埋深为 $H = 600 \text{ mm}$ (变异系数 0.3), 管道上部覆盖土槽宽度 $B = 500 \text{ mm}$, 管道操作压力 $p = 7.8 \text{ MPa}$ (变异系数为 0.1), 管线内、外温差 $\Delta\theta = 10^\circ\text{C}$ (变异系数为 0.15), 单位长度管线(含防腐层)浮重度 $w' = 1.64 \text{ N/mm}$ (变异系数为 0.05)。

管线埋设处土壤系数为 5.2, 表面层的土壤标准贯入击数为 10, 基层土的标准贯入击数为 50, 内摩擦角 $\phi = 20^\circ$ (变异系数为 0.1), 土壤内聚力 $c = 10^{-3} \text{ MPa}$ (变异系数为 0.1), 土壤浮容重 $\gamma' = 8.9 \times 10^{-6} \text{ N/mm}^3$ (变异系数为 0.05), 其他参数如表 1 所示。

表 1 随机变量^[12]

Table 1 Random variables^[12]

变量	符号	均值	变异系数
线膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$	α	1.17×10^{-5}	0.10
土压力系数	C_d	1.32	0.20
挠曲系数	k_d	0.108	0.15
管土相互作用弯曲系数	k_m	0.235	0.15
轴向曲率	χ	-1×10^{-6}	0.10

管道运行一段时间后, 油气田进行了一次大规模检测, 经过测量统计得到管线的最大腐蚀深度为 $d_0 = 1.54 \text{ mm}$ (变异系数为 0.05), 经过考察计算取腐蚀速率 $v_d = 0.2 \text{ mm/a}$ 。假定随机变量均服从正态分布。

3.2 结果与分析

对于算例, 采用 Monte Carlo 方法, 进行 1×10^6 次模拟, 得到该腐蚀海底管道失效概率随时间的变化, 如图 1 所示(以检测时作为时间起始点)。根据指定的失效概率, 由图 1 可以对该腐蚀海底管道进行剩余寿命预测, 有利于对海底管道进行全寿命风险管理。

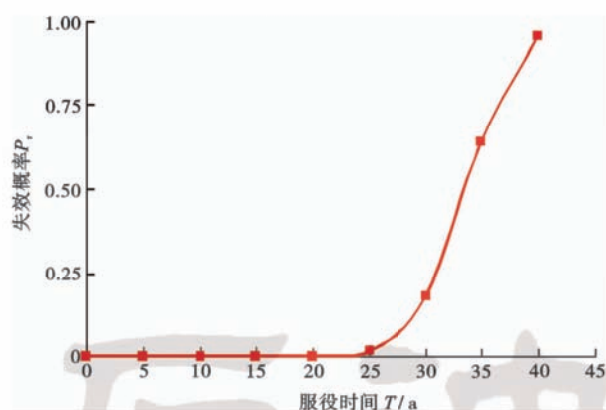
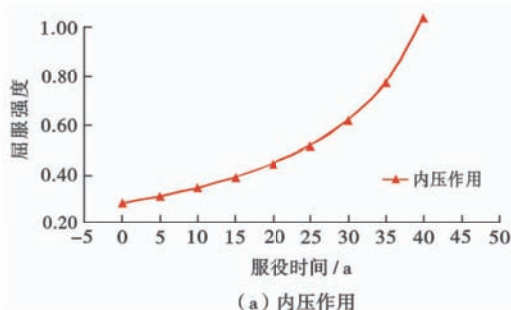


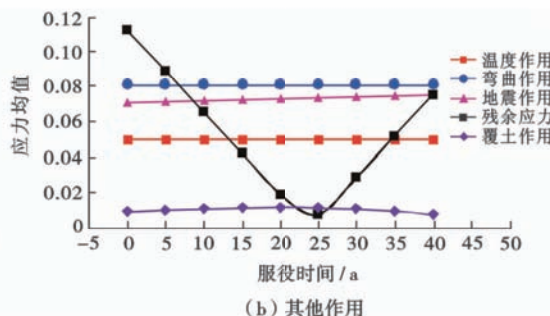
图1 失效概率 Pf 随时间变化

Fig. 1 Change of failure probability Pf versus time

在进行腐蚀海底管道可靠性计算中,充分考虑了内压作用应力 σ_{cp} 、温度作用应力 σ_{it} 、弯曲作用应力



(a) 内压作用



(b) 其他作用

图2 各作用应力均值绝对值与屈服强度比值变化

Fig. 2 Change of the ratios between mean of stress(absolute value) and strength of the pipe material

在管道设计中,为达到某些指定目的(如增大输送流体的流量、控制腐蚀、可靠性保证等),常需要调整一些参数。这些参数包括管线操作压力 p 、管道内径 R 、管壁厚度 h 、管线埋设深度 H 和管道腐蚀速率 v_d 等。研究腐蚀海底管道失效概率,这些参数的灵敏性就显得尤为重要。在 Monte Carlo 方法中,一般文献给出的敏感性指标计算方法过于复杂,无法用解析法求解。这里借鉴故障树分析法中计算基本事件临界重要度的方法来进行参数的敏感性分析^[23],定义敏感性指标为:

$$\alpha_i = \frac{\Delta P_i / P_i}{\Delta C_i / C_i} \quad (15)$$

式中: C_i 为基本随机变量; ΔC_i 为随机变量变化; P_i 为结构的失效概率; ΔP_i 为对应 ΔC_i 引起的结构失效概率的变化。 α_i 为随机变量 C_i 的敏感性指标。

根据算例,将管线操作压力 p 、管道内径 R 、管壁厚度 h 各增大 10%,管线埋设深度 H 和管道腐蚀速率 v_d 各减小 10%时,对该腐蚀海底管道进行参数灵敏性分析,得到各参数灵敏性指标的最大值(表 2)。可见管线操作压力 p 和管道内径 R 的灵敏指标相差不大,均远大于其他指标。说明两者对管线失效概率的影响相近,管线操作压力 p 和管道内径 R 的变动均

σ_{ib} 、覆土作用应力 σ_{cs} 、地震作用应力 σ_{ie} 和残余应力 σ_{cr} 对可靠性的影响。为了定量表示各应力对可靠性的影响程度,将各应力均值的绝对值(每个时间点上)除以管线屈服强度 σ_s ,得到各应力影响程度随时间变化曲线(图 2)。随着腐蚀加剧,内压作用对管线的影响逐渐增大,并且始终为影响最大的因素,而弯曲作用和温度作用的影响不随腐蚀发生变化,地震作用和覆土作用的影响变化很小。弯曲作用的影响大于地震作用的影响,说明管线的弯曲相比于地震作用对管线失效的影响更大,在对腐蚀海底管道的研究中,应加强对管线弯曲作用的研究。随着管道腐蚀,腐蚀表面残余压应力逐渐消散,当腐蚀量超过管壁中性轴之后,腐蚀表面残余应力变为拉应力,而管线上覆土的作用对管线失效的影响相比其他作用较小。

会引起管线失效概率发生较大的变化;同时增大管壁厚度 h 和通过加强防护措施减小管道腐蚀速率 v_d ,对管道失效概率的影响效果相近,而改变管线埋置深度 H 引起的管道失效概率变化较小。

表2 参数灵敏性指标最大值

Table 2 Maximum value of index of parameter sensitivity

参数	α_{\max}
操作压力 P/MPa	68.90
管道半径 R/mm	69.24
管壁厚度 h/mm	9.86
埋设深度 H/mm	0.93
腐蚀速率 $v_d/(\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$	8.54

4 结 论

(1) 根据指定的失效概率,结合失效概率随时间变化曲线,可对多种复杂作用下的腐蚀海底管道进行剩余寿命预测,有利于海底管道的安全运行和全寿命风险管理。

(2) 内压作用对海底管道的影响最大,并随着腐蚀加剧而逐渐增大,弯曲、温度、地震和覆土的作用对海底管道的影响很小。

(3) 弯曲作用的影响大于地震作用的影响,说明前者相比于后者对海底管线失效的影响更大,因此在对腐蚀海底管道的研究中,应加强对管线弯曲作用的研究。

(4) 残余应力作用对海底管道的影响表现为先减小后增大。随着管道腐蚀,腐蚀表面残余压应力逐渐消散,当腐蚀量超过管壁残余应力中性轴之后,腐蚀表面残余应力变为拉应力,且随腐蚀量增加而增大。

(5) 管线操作压力和管道半径的变化对腐蚀海底管线失效概率的影响相近,两者变化均会引起管线失效概率较大的变化。增大管壁厚度和通过加强防护措施减小管道腐蚀速率对管道失效概率的影响效果相近,而改变管线埋置深度引起的管道失效概率变化较小。

参 考 文 献

- [1] 周晶,冯新,李昕.海底管线全寿命安全运行的关键问题研究[J].工程力学,2011,28(增刊2):97-108.
Zhou Jing,Feng Xin,Li Xin. Research on critical issues of life-cycle service safety for subsea pipelines[J]. Engineering Mechanics,2011,28(Supplement2):97-108.
- [2] 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 Zuojie,et al. The overseas hydrocarbon resources strategy of Chinese oil-gas companies[J]. Acta Petrolei Sinica,2013,34(5):1023-1030.
- [3] 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]. Acta Petrolei Sinica,2013,34(4):802-808.
- [4] Teixeira A P, Soares C G, Netto T A, et al. Reliability of pipelines with corrosion defects[J]. International Journal of Pressure Vessel and Piping,2008,85(4):228-237.
- [5] 赵事,蒋晓斌,高惠临.腐蚀管道的失效概率和剩余寿命预测方法[J].油气储运,2006,25(12):28-31.
Zhao Shi,Jiang Xiaobin,Gao Huilin. Reliability method for the assessment of the failure probability and remaining life of the corroded pipeline [J]. Oil & Gas Storage,2006,25(12):28-31.
- [6] 支希哲,周红,何洁.腐蚀管道剩余寿命及参数灵敏度分析[J].西北工业大学学报,2011,29(6):983-986.
Zhi Xizhe,Zhou Hong,He Jie. Analyzing remaining life and parameter sensitivity for pipeline subjected to corrosion [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University,2011,29(6):983-986.
- [7] Caley F,Gonzalez 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.
- [8] 刘威,李杰.考虑腐蚀的城市燃气管网抗震可靠度分析[J].华中科技大学学报:城市科学版,2008,25(4):138-142.
Liu Wei,Li Jie. Seismic reliability analysis of network system considering corrosion[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology:Urban Science Edition,2008,25(4):138-142.
- [9] 王智平,李霞,刘展,等.埋地管道受到腐蚀的可靠度分析与计算[J].机械强度,2004,12(5):132-136.
Wang Zhiping,Li Xia,Liu Zhan,et al. Analysis and calculation about reliability life under soil erosion environment condition[J]. Journal of Mechanical Strength,2004,12(5):132-136.
- [10] 韩洋.城市地下管网系统的地震可靠性研究[D].大连:大连理工大学建设工程学部,2002.
Han Yang. Study on seismic reliability of urban buried pipeline network systems[D]. Dalian: Faculty of Infrastructure, Dalian University of Technology,2002.
- [11] Amirat A Mohamed-Chateaneuf A,Chaoui K. Reliability assessment of underground pipelines under the combined effect of active corrosion and residual stress [J]. International Journal of Pressure Vessel and Piping,2006,83(2):107-117.
- [12] Spangler M G, Handy R L. Soil engineering [M]. 4th ed, New York: Harper & Row,1982.
- [13] Crampton D K. Internal stress and season cracking in brass tubes [J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Engineering,1980,89(2):233-255.
- [14] Amirat A,Chaoui K,Azari Z,et al. Residual stress analysis in seamless API X60 steel gas pipelines[J]. Sciences & Technology B,2004,21(4):7-14.
- [15] 孙政策,段梦兰,张文,等.海底管线抗震设计的极限地震应力计算法[J].应用力学学报,2006,23(3):440-446.
Sun Zhengce,Duan Menglan,Zhang Wen,et al. Method for evaluating ultimate subsea pipeline stress in anti-seismic design [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2006,23(3):440-446.
- [16] 王金英,赵冬岩.渤海海底管道工程的现状和问题[J].中国海上油田:工程,1992,4(1):1-6.
Wang Jinying,Zhao Dongyan. Status quo and problems of submarine pipeline engineering in Bohai bay [J]. China Offshore Oil and Gas: Engineering,1992,4(1):1-6.
- [17] 孙政策,段梦兰,张文,等.地震波条件下海底管线抗震设计方法研究[J].石油学报,2005,26(2):115-118,120.
Sun Zhengce,Duan Menglan,Zhang Wen,et al. Design methods for pipelines against earthquake waves [J]. Acta Petrolei Sinica,2005,26(2):115-118,120.
- [18] 崔玉军.海底管道抗震的极限设计方法研究[D].天津:天津大学建筑工程学院,2007.
Cui Yujun. Research on seismic design methods for subsea pipelines [D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University,2007.
- [19] 勃洛达夫金.埋设管线[M].北京:石油工业出版社,1980.
Брежнева Лоррейн дэмиен джин. Installation of pipelines [M]. Beijing: Petroleum Industry Press,1980.
- [20] Ahammed M Melchers R E. Reliability estimation of pressured pipelines subjected to localized corrosion defects [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,1996,16(5):267-272.
- [21] Ahammed M. Probabilistic estimation of remaining life of a pipeline in the presence of active corrosion defects [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,1998,75(4):321-329.
- [22] 陈严飞.海底腐蚀管道破坏机理和极限承载力研究[D].大连:大连理工大学建设工程学部,2009.
Chen Yanfei. Study on failure mechanism and ultimate load capacity of corroded submarine pipeline [D]. Dalian: Faculty of Infrastructure, Dalian University of Technology,2009.
- [23] 章国栋,陆延孝,屠庆慈,等.系统可靠性与维修性的分析与设计 [M].北京:北京航空航天大学出版社,1990.
Zhang Guodong,Lu Yanxiao,Tu Qingci,et al. Analysis and design of system reliability and maintenance [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,1990.