

腐蚀油气管线的可靠性分析

徐伟, 刘茂

(南开大学城市公共安全研究中心, 天津 300071)

[摘要] ASME B31G 是国际通用的评价腐蚀管线失效应力的标准, 考虑到这种方法的保守性, 以修正后的 B31G 模型作为研究腐蚀管线失效应力的基础, 考虑管壁厚度、腐蚀速率、工作压力、缺陷深度等随机变量, 构建腐蚀油气管线可靠性极限状态函数。然后, 采用一次二阶矩法对腐蚀管线进行可靠性分析, 得出管线的失效概率、可靠性指标以及剩余使用寿命。此外, 为了更加规范的管理腐蚀管线, 参照美国石油组织的相关规定, 对不同失效概率的管线进行了等级划分。在最后的案例分析中, 还讨论失效概率对不同变异系数对的敏感性, 计算结果表明失效概率对管壁厚度的变异系数最为敏感。

[关键词] 管线腐蚀; 可靠性分析; 一次二阶矩; 失效概率

[中图分类号] X913.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)09-0069-04

1 前言

输送油气的管线通常铺设在地下, 由于输送介质和周围土壤的影响, 服役期间的油气管线不可避免会出现老化的现象, 这无形中加大了管线的失效几率。根据美国运输安全局报告的统计资料表明, 腐蚀占油气管线失效事故的 43.6%; 英国天然气公司报道, 在油气管线失效的原因中, 腐蚀占 40% 以上^[1]。我国在役油气管线 80% 以上已运行了 30 多年, 腐蚀现象比较严重, 按照设计折旧时间计算, 已超过了使用寿命期限^[2]。因此, 如何确保管线运行安全, 确定腐蚀管线的失效概率就成为世界各国争相关注和亟待解决的难题。

一般情况下, 人们通常采用确定性算法来预测压力管线在腐蚀状态下的剩余强度^[3]。但是, 由于载荷参数和抗力参数存在不确定性, 这类方法不能够准确评估管道的腐蚀程度和失效可能性, 文章采用不确定性分析方法计算腐蚀管道的失效概率, 这对于腐蚀管道的安全评价具有一定指导意义, 其计算结果也会更加符合管道的实际腐蚀状况。其中, 可靠性评价是一种基于可靠性理论, 对腐蚀管线进

行可靠性分析的不确定性分析方法。

国内外对此领域颇有一定研究。例如, 刘永寿等人运用 B31G 公式对腐蚀管道的剩余强度与可靠性进行了分析^[4], 但是 B31G 公式对于修正后的 B31G 而言, 具有一定的保守性, 所得的计算结果也不够精确; 赵事等人应用修正的 B31G 公式预测腐蚀管道的失效概率和剩余寿命^[5], 但是欠缺对不同失效概率进行分级处理; A. P. Teixeira 等人应用一次二阶矩法 (FORM) 对腐蚀管线进行可靠性分析, 并用 Monte Carlo 作对比实验, 结果显示两者得出的失效概率非常接近, 说明用 FORM 评估腐蚀管线的可靠性具有很强的可信度^[6]; Ouk Sub Lee 等人在运用 FORM 分析油气管线可靠性时, 考查了随机变量的不同概率分布类型对可靠性的影响; 通过演算得知 B31G 公式的失效概率要比修正后的 B 31G 要大, 也就是说 B31 公式要更加保守^[7]。

文章所指的腐蚀管线的可靠性分析就是基于修正后的 ASME B31G 模型作为可靠性分析的数学模型, 运用 FORM 法研究腐蚀管线的失效概率, 对照美国石油组织规定, 判定管道的失效等级, 最后讨论随机变量的变异系数对失效概率的影响。

[收稿日期] 2009-09-20

[基金项目] 国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2006BAJ16B08)

[作者简介] 刘茂(1945-), 男, 辽宁抚顺市人, 南开大学教授, 主要从事安全工程方面的研究工作; E-mail: lmsafety@nankai.edu.cn

2 可靠性分析

数学模型的构建和失效概率的计算是分析油气管线腐蚀可靠性的两个主要方面。

2.1 修正后的 ASME B31G 数学模型

ASME B31G 是评估腐蚀管线最为常用的方法,该模型用于预测腐蚀管道失应力力的方程如下:

$$S_p = S_f \left[\frac{1 - A/A_0}{1 - A/(A_0 M)} \right] \quad (1)$$

式(1)中, S_p 是腐蚀管线的失应力力,MPa; S_f 是管材的流变应力,MPa; A 是缺陷在侧面上的投影面积, mm^2 ; A_0 是管线在缺陷处的初始横截面积, mm^2 ; M 是 folias 膨胀系数。

流变应力(S_f)属于管材理化性质的一部分,它与管材的屈服强度相关,公式如下所示:

$$S_f = (Y_s + 68.95 \text{ MPa}) \quad (2)$$

式(2)中, Y_s 是管材的屈服强度。管道在缺陷处的初始横截面积可通过如下公式得到:

$$A_0 = Lt \quad (3)$$

式(3)中, L 是腐蚀缺陷的轴向投影长度; t 是管壁厚度,两者的单位都是 mm。

研究发现,为了能够得到更加真实的金属损失面积,可采用如下数学模型:

$$A = Ld \quad (4)$$

式(4)中, d 是缺陷的平均深度,mm。可以通过增加测量次数得到与实际值更加吻合的平均速度。

folias 膨胀系数(M)与缺陷长度 L ,管径 D 和管壁厚度 t 相关。对于 M 的计算公式,Kiefner 和 Vieth 给出了一个更加精确、非保守的数学表达式,公式如下所示:

当 $\frac{L^2}{Dt} \leq 50$ 时,

$$M = \sqrt{1 + 0.6275 \frac{L^2}{Dt} - 0.003375 \frac{L^4}{D^2 t^2}} \quad (5)$$

当 $\frac{L^2}{Dt} > 50$ 时,

$$M = 0.032 \frac{L^2}{Dt} + 3.3 \quad (6)$$

根据上述 S_f , A_0 和 A 的表达式,可以将 S_p 的数学表达式替换成如下形式:

$$S_p = (Y_s + 68.95 \text{ MPa}) \left[\frac{1 - d/t}{1 - d/tM} \right] \quad (7)$$

腐蚀缺陷的腐蚀速率主要与管线的材质、输送

介质以及周边土壤环境相关。O'Grady T J II 等人通过研究可知:在稳态下将腐蚀速率视为线性发展也是合理的^[8]。基于上述假定,提出稳态下的管线腐蚀率,表达式如下:

$$R_d = \frac{\Delta d}{\Delta T} \quad (8)$$

$$R_L = \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad (9)$$

式(8),式(9)中, Δd 是两次测量缺陷深度之间的差值,mm; ΔL 是两次测量缺陷长度之间的差值,mm; ΔT 是两次测量时间之间的差值,单位一般为年(a); R_d 是指管线缺陷深度方向的腐蚀率,mm/a; R_L 是指管线中心线方向的腐蚀率,mm/a。反之,腐蚀率 R_d 和 R_L 也可用于计算暴露若干年后(T_s 时刻)的缺陷深度和缺陷长度,公式如下:

$$d = d_0 + R_d(T_s - T_0) \quad (10)$$

$$L = L_0 + R_L(T_s - T_0) \quad (11)$$

式(10),式(11)中, T_0 是最后一次检测的时刻; d_0 , L_0 , R_d 和 R_L 分别是 T_0 时刻测量出的缺陷深度、缺陷长度、径向腐蚀率和轴向腐蚀率。

对于压力管线,如果管壁厚度相对于管径比较小,并且流体密度相对于流体压力比较低,那么腐蚀管线的失应力力可表述为:

$$P_{fp} = \frac{2S_p t}{D} \quad (12)$$

将 S_p 的表达式代入可得腐蚀管线的失应力力,公式如下:

$$P_{fp} = \frac{2(Y_s + 68.95)t}{D} \left[\frac{1 - \frac{[d_0 + R_d(T - T_0)]}{t}}{1 - \frac{[d_0 + R_d(T - T_0)]}{tM}} \right] \quad (13)$$

2.2 失效概率的计算

在结构可靠性理论中,极限状态是结构“可靠”与“失效”的分界线,通常用某一数学模型来表示极限状态,这种方程被称为极限状态方程(LSF)。LSF 的数学表达式如式(14)所示:

$$Z = R - L \quad (14)$$

式(14)中, R 代表抗力参数, L 代表载荷参数。FORM 就是基于 LSF 来计算可靠性指标,从而得到失效概率的。假定 R 和 L 相互独立,并服从正态分布,此时的失效概率可表示为:

$$P_f = P[Z \leq 0] = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma_z} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{Z - \mu_z}{\sigma_z}\right]^2\right\} dZ = \int_{-\beta}^{-\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{U^2}{2}\right\} dU = \Phi(-\beta) \quad (15)$$

式(15)中, μ_z 和 σ_z 分别是变量 Z 的平均值和标准偏差; 新变量 $U = (Z - \mu_z)/\sigma_z$; Φ 是标准正态变量的累积分布函数; β 是可靠性指标。

将上述理论应用到腐蚀油气管线的可靠性分析上, 建立腐蚀油气管线的极限状态函数:

$$Z(P_{fp}, P_0) = P_{fp} - P_0 = \frac{2(Y_s + 68.95)t}{D} \left[\frac{1 - \frac{(d_0 + R_d(T - T_0))}{t}}{1 - \frac{(d_0 + R_d(T - T_0))}{tM}} \right] - P_0 \quad (16)$$

式(16)中, P_{fp} 为腐蚀管线的失效力, 相当于式(14)中的抗力参数, P_0 为腐蚀管线的工作压力, 相当于式(14)中的载荷参数。计算腐蚀管线的失效概率 P_f 就是确定出现 $Z \leq 0$ 状态的概率。计算公式如式(17)

$$P_f = P(P_{fp} - P_0 < 0) = \Phi(-\beta) \quad (17)$$

在利用 FORM 进行腐蚀管线的可靠性分析时, 部分随机变量的概率分布很可能是非正态的, 这里运用 Rackwitz - Fiessler 变换实现当量正态化^[7]。

此外, β 还与随机变量的变异系数有关, 为了研究不同变异系数对 β 造成的影响, 下节就讨论失效概率对不同随机变量变异系数的敏感性。

为了对油气管线实现更好的目标管理, 美国石油组织 (American petroleum institute, API) 对压力容器的失效概率进行了分级^[9], 见表 1。

表 1 失效概率等级

Table 1 Failure probability levels

| 失效概率范围 | 等级 | 定性的表述 |
|--|----|-------|
| $1 \times 10^{-4} \sim 1.0$ | 5 | 非常高 |
| $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$ | 4 | 高 |
| $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ | 3 | 中等 |
| $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-6}$ | 2 | 低 |
| $< 1 \times 10^{-8}$ | 1 | 非常低 |

3 案例分析

参考文献[10]和[11], 假设文章对某根服役 9 年的钢制管线进行可靠性检测, 测定出某一腐蚀缺陷处的随机变量的统计参数见表 2。

根据计算流程, 在 Matlab 环境中编制相应的语言程序, 得到该缺陷处的失效概率和可靠性指标随管线暴露时间的变化曲线, 见图 1。

从图 1 可看出, 随着暴露时间的增加, 失效概率

呈现出非线性地增大, 可靠性指标逐渐下降。

表 2 随机变量的统计参数

Table 2 Statistical parameters of random variables

| 参数 | 表述 | 概率分布 | 均值 μ | 变异系数 COV |
|-------|------------------------------|--------|----------|----------|
| d_0 | 腐蚀缺陷深度/mm | 正态分布 | 2.5 | 0.15 |
| D | 管径/mm | 正态分布 | 751 | 0.02 |
| Y_s | 管材的屈服强度/MPa | 对数正态分布 | 385 | 0.07 |
| t | 管壁厚度/mm | 正态分布 | 13.4 | 0.05 |
| R_d | 径向腐蚀速率/(mm·a ⁻¹) | 正态分布 | 0.3 | 0.20 |
| R_L | 轴向腐蚀速率/(mm·a ⁻¹) | 正态分布 | 18 | 0.20 |
| L_0 | 腐蚀缺陷长度/mm | 正态分布 | 245 | 0.05 |
| P_0 | 工作压力/MPa | 正态分布 | 5.0 | 0.1 |
| T_s | 管线暴露时间/a | 常量 | — | — |
| T_0 | 最后一次检测时刻/a | 常量 | — | — |

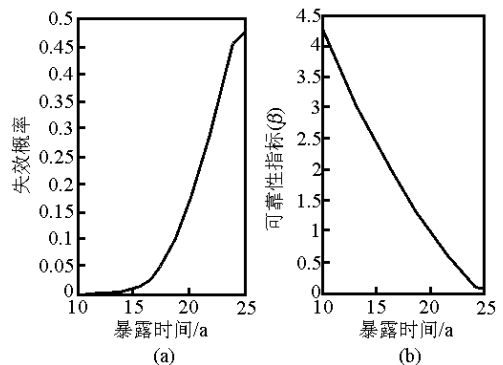


图 1 失效概率和可靠性指标与暴露时间之间的关系

Fig. 1 The relationship diagram between failure probability or reliability index and exposure time

腐蚀管线的剩余寿命可根据目标失效概率来确定, 参考表 1 中的规定, 将 10^{-4} 作为评定腐蚀管线剩余寿命的标准。由计算结果可知该缺陷处在暴露 12 年时的失效概率为 9.72×10^{-4} , 可以判定该管线的剩余寿命为 12 年。

文章还考察 P_0 , d_0 , t 和 R_d 这 4 个随机变量的变异系数的敏感性。数据分析得出的结果见图 2 和图 3。

4 结语

1) 考虑到 ASME B31G 模型的保守性, 文章应用修正后的 ASME B31G 数学模型来计算腐蚀管线的失效力, 这样得出的结果更加符合真实情况。

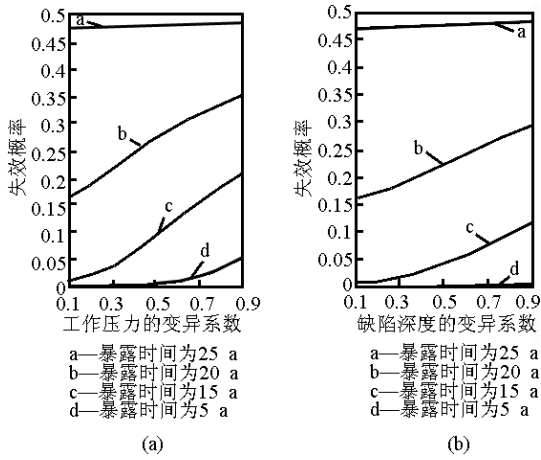


图2 不同变异系数对应的失效概率图

Fig. 2 Failure probability versus different coefficients of variation

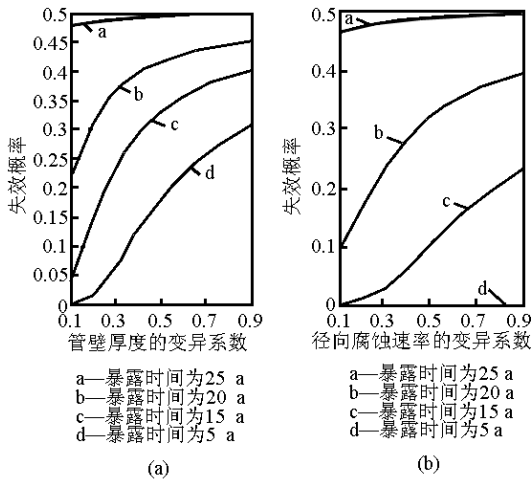


图3 不同变异系数对应的失效概率图

Fig. 3 Failure probability versus different coefficients of variation

随着服役时间的延长,管线的失效概率逐渐变大,从算例中可以看出,从暴露第15年开始管线的失效概率几乎呈现直线增长的态势。此外,参照美国石油组织制定的腐蚀管线的失效等级,将第5等级作为衡量剩余寿命的标尺,算例中的管线剩余寿命为12年。

2)在研究失效概率对变异系数的敏感性中发现,随着变异系数的增大,失效概率也会随之逐渐变

大。而且,在一定阶段,变异系数对失效概率的影响很大,所以在对管线进行可靠性分析时,需要认真对待相关参数的变异系数。

3)失效概率对管壁厚度的变异系数最为敏感;对管道进行中期评价时,对管道各个参数的监测和分析非常重要。如果要对腐蚀管线进行初期可靠性评估,只有准确地确定管壁厚度,才能获得更加实际的失效概率;如果是中期和中后期评价,需要准确的获取工作压力、缺陷深度和径向腐蚀速率的变异系数,才能得到更加真实的失效概率。

参考文献

- [1] Levin S T. Cause and frequency of failures on gas mains in the USSR [J]. Pipes and Pipeline Int, 1993, 38(4): 9-13
- [2] 王春兰. 油气长输腐蚀管道剩余强度评价技术研究[J/OL]. 西南石油学院, 2003. http://www.lw23.com/lunwen_940435507
- [3] Lee O S, Kim D H. Reliability of buried pipeline using FORM and Monte Carlo simulation [J]. Key Engineering Materials, 2006, 321-323: 1543-1547
- [4] 刘永寿, 王文, 冯震宙, 等. 腐蚀管道的剩余强度与可靠性分析[J]. 强度与环境, 2008, 35(3): 52-57
- [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
- [6] Teixeira A P, Guedes S C, Netto T A, et al. Reliability of pipelines with corrosion defects [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(4): 228-237
- [7] Lee O S, Kim D H. Effect of distribution types of variables on reliability estimation of buried pipelines [A]. Third International Conference on Experimental Mechanics and Third Conference of the Asian Committee on Experimental Mechanics [C]. 2005: 141-147
- [8] O'Grady T J II, Hisey D T, Kiefner J F. Pressure calculation for corroded pipe developed [J]. Oil and Gas Journal, 1992, 42: 64-68
- [9] American Petroleum Institute. Risk-based Inspection Base Resource Document [G]. USA: API Recommended Practice, 581, 2000
- [10] 施哲雄, 王志文. 基于模拟的腐蚀管道可靠性分析[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(7): 67-70
- [11] Cosham A, Hopkins P, Macdonald K A. Best practice for the assessment of defects in pipelines - corrosion [J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(7): 1245-1265

(下转 77 页)