

文章编号: 0253-2697(2003)04-0086-04

腐蚀管线失效概率的评定方法

帅健 许葵

(石油大学机电学院 北京 102249)

摘要: 基于结构可靠性的一般理论,建立了腐蚀缺陷管线失效的极限状态函数,并以规则化的随机变量形式表示。采用雷-菲法求解了失效概率,提出了管线全线的失效概率分析方法,即沿管线全长以1km管线为失效概率的分析单元进行计算,这样能合理考虑管线沿线腐蚀状况的差异。对一条经过检测的输油管线的腐蚀缺陷数据、管道运行参数和管材性能参数进行了统计分析,运用新提出的概率数学模型计算了管道全线的失效概率,并与推荐的目标失效概率进行了比较,从而提出了对管线重点维修和监测的区段。本方法是在对油气输送管线的腐蚀程度检测之后再行安全评定的一个行之有效的方法。

关键词: 管线; 腐蚀; 失效概率; 安全评定; 可靠性; 数学模型

中图分类号: TE79

文献标识码: A

Assessment method for failure probability of corroded pipeline

SHUAI Jian XU Kui

(School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Based on the general theory of structure reliability, a limit-state function for assessment of failure pipeline was established and expressed as the normalized random variables. The R-F method was employed to compute the failure probability of pipeline. A mathematical model for analysis of failure probability along the total length of a pipeline was presented, in view of the difference of corrosion over the pipeline. It means that the failure probability per kilometer of a pipeline is taken as an analytical element for computation. The statistic analyses on the corrosion-inspected data, operation parameters and material performance of an inspected oil pipeline were made. The failure probability of the pipeline was computed in accordance with the new mathematical model. The computed results of failure probabilities were compared with the suggested target failure probability to determine the pipeline sections for further maintenance and inspection. The method is feasible to safety assessment of pipeline especially after corrosion of a pipeline has been detected.

Key words: pipeline; corrosion; failure probability; safety assessment; reliability; mathematical model

随着油气输送管线服役年限的延长,管体受到的腐蚀日趋严重。其原因是:①由于管道防腐层的老化、变形、龟裂、剥离,造成土壤环境中的腐蚀介质侵入管道外壁导致管体外腐蚀;②由于输送介质中的残留水和其他杂质停留在管道易积水部位而形成管壁内部腐蚀缺陷。管体腐蚀的后果是造成壁厚减薄,管道承受内压能力降低,严重时会导致管体局部腐蚀穿孔泄漏或破裂事故的发生。为了充分发挥现有管线的作用,必须对腐蚀缺陷进行可靠性的评定。但是,在役油气管线的腐蚀及运行状况相当复杂,因而影响管线安全的各种因素具有不确定性。如果在管线的安全评定中,采用确定性的方法,则当各种影响因素的不确定性较小时,评定的结果可能偏于保守;而当各种因素的不

确定性较大时,评定的结果又偏于不安全性。国外已经在管线的安全评定和强度设计中采用了可靠性的方法^[1-3],我国也应根据管线腐蚀检测和管线运行的具体情况,建立管线安全评定的可靠性方法。

1 结构可靠性基本原理

在结构可靠性的一般理论中,为了正确描述结构的工作状态,必须明确规定结构安全、适用和失效的界限,这样的界限称为结构的极限状态。国家标准(GB50153-92)对结构极限状态的定义为:“整个结构或结构的一部分超过某一特定状态就不能满足结构的某一功能要求,此特定状态为该功能的极限状态”。

结构可靠性分析的首要任务就是要建立极限状态

基金项目:中国石油天然气集团公司石油中青年创新基金项目(CX1998-27)资助。

作者简介:帅健,男,1963年8月生,1982年毕业于武汉化工学院化机专业,现为石油大学(北京)教授、博士生导师,主要从事工程力学、油气储运系统安全工程的科研与教学工作。Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

方程。如果描述结构极限状态的基本变量 x_1, x_2, \dots, x_n 为随机变量, 则结构的极限状态表示为

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1)$$

式(1)称为极限状态方程, $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 也称为功能函数。这样, 结构的可靠度可表述为结构处于可靠状态的概率, 即

$$P_r = P[Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0] \quad (2)$$

同理, 结构的失效概率表示为

$$P_f = P[Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) < 0] \quad (3)$$

由于 $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的分布函数为连续函数, 因此有 $P_r + P_f = 1$, 或 $P_f = 1 - P_r$ 。在结构可靠性问题中, 一般均有 $P_r \gg P_f$, 因此为了表达方便, 多用失效概率 P_f 表示。

也可采用可靠性指标来衡量管线的安全状况, 可靠性指标定义为^[4]: “在标准正态坐标系中, 从坐标原点到极限状态平面(广义情况下为曲面) $Z = 0$ 的最短距离”, 这也是可靠性指标的几何意义, 通常用 β 表示。

如果基本变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 都是互不相关的正态随机变量, 则状态函数 Z 服从正态分布, 可靠度 P_r 和失效概率 P_f 与可靠性指标 β 之间有如下关系:

$$P_r = \Phi(\beta), P_f = \Phi(-\beta), \beta = \Phi^{-1}(P_r) \quad (4)$$

式中 $\Phi(\cdot)$ 为标准正态函数。

2 管道承压能力的极限状态方程

缺陷管道的极限承载能力是以管道的爆破能力为标志的。如果将管道承受内压的能力归结为管道的结构功能, 则可以依据缺陷管道能承受的最大爆破压力建立极限状态方程。

2.1 缺陷管道的爆破压力

在工程应用中, 最为广泛的是 ASME B31G 标准^[5], 它的基本方程为

$$p = \bar{\sigma} \frac{2t}{D} [(1 - d/t)/(1 - M^{-1} \cdot d/t)] \quad (5)$$

$$M = \sqrt{1 + 0.6275(l/\sqrt{Dt})^2 - 0.003375(l/\sqrt{Dt})^4} \quad (l/\sqrt{Dt})^2 \leq 50.0 \quad (6)$$

$$M = 0.032(l/\sqrt{Dt})^2 + 3.3 \quad (l/\sqrt{Dt})^2 > 50.0 \quad (7)$$

$$\bar{\sigma} = SMYS + 68.95 MPa \quad (8)$$

式中 p 为缺陷管道能承受的爆破压力, MPa; $\bar{\sigma}$ 为管材的流变应力, MPa; D 为管道直径, mm; t 为管道壁厚, mm; d 为缺陷深度, mm; l 为缺陷长度, mm; M 为

鼓胀因子, $SMYS$ 为对管材规定的最小屈服极限, MPa。

2.2 承压极限状态方程

记管道的操作压力为 p_L 。按照极限状态方程的定义, 得出缺陷管道承压极限状态方程为

在 $(l/\sqrt{Dt})^2 \leq 50.0$ 时

$$\bar{\sigma} \frac{2t}{D} \left[(1 - d/t) \left\{ 1 - [1 + 0.6275(l/\sqrt{Dt})^2 - 0.003375(l/\sqrt{Dt})^4]^{-1/2} d/t \right\}^{-1} \right] - p_L = 0 \quad (9)$$

在 $(l/\sqrt{Dt})^2 > 50.0$ 时

$$\bar{\sigma} \frac{2t}{D} \left[(1 - d/t) \left\{ 1 - [0.032(l/\sqrt{Dt})^2 + 3.3]^{-1} \frac{d}{t} \right\}^{-1} \right] - p_L = 0 \quad (10)$$

为了应用方便, 将各项相关因素用规则化形式表示为

$$X_p = p_L / (2SMYS \cdot t/D), X_f = \bar{\sigma} / SMYS, X_d = d/t, X_l = l^2 / (Dt) \quad (11)$$

其中 X_p 为规则化的压力偏差, X_f 为规则化的流变应力偏差, X_d 为规则化深度的偏差, X_l 为规则化长度偏差。

将式(11)中的规则化变量代入式(9)和式(10), 得到缺陷管道承压极限状态方程为

当 $(l/\sqrt{Dt})^2 \leq 50.0$ 时

$$Z = X_M X_f X_t \left\{ (1 - X_d) / [1 - (1 + 0.6275 X_l - 0.003375 X_l^2)^{-1/2} X_d] \right\} - X_p \quad (12)$$

当 $(l/\sqrt{Dt})^2 > 50.0$ 时

$$Z = X_M X_f X_t \left\{ (1 - X_d) / [1 - (0.032 X_l + 3.3)^{-1} X_d] \right\} - X_p \quad (13)$$

考虑到最大爆破压力标准的不确定性, 在式(12)、式(13)中引入了模型偏差因子 X_M , X_M 为真实承压能力与预测承压能力之比值, 它反映了采用的缺陷管道的最大承压能力的标准接近实际情况的可靠程度。

3 失效概率的求解方法

极限状态方程式(12)、式(13)是非线性的, 并且相关的随机变量也不是标准正态分布, 因此不能用解析的方法求解上述方程的失效概率, 按照可靠性或失效概率求解的一般理论, 可采用雷-菲法求解^[4]。

雷-菲法的基本原理是根据可靠性指标的定义(可

靠性指标是标准正态坐标系中,坐标原点到极限状态曲面上的最短距离),在极限状态曲面上选取验算点,使其到坐标原点的距离逼近最短距离,从而得到可靠性指标,然后根据可靠性指标确定失效概率。雷-菲法计算的关键步骤是对极限状态曲面上的验算点进行雷-菲变换。

设 x_i^* 为极限状态曲面上的验算点,令每个随机变量的原始分布 $F_{x_i}(x_i)$ 和当量正态分布 $N(\mu_{x_i}, \sigma_{x_i}^2)$ 在验算点处具有相等的概率密度函数和分布函数,可求得当量正态分布的均值 μ_{x_i} 和标准差 σ_{x_i} 。雷-菲变换式为

$$\begin{cases} \Phi[(x_i^* - \mu_{x_i})/\sigma_{x_i}] = F_{x_i}(x_i^*) \\ \frac{1}{\sigma} \phi[(x_i^* - \mu_{x_i})/\sigma_{x_i}] = f_{x_i}(x_i^*) \\ \sigma_{x_i} = \phi\left\{\Phi^{-1}[F_{x_i}(x_i^*)]\right\} / f_{x_i}(x_i^*) \\ \mu_{x_i} = x_i^* - \sigma_{x_i}' \Phi^{-1}[F_{x_i}(x_i^*)] \end{cases} \quad (14)$$

迭代的步骤是:验算点的初值取各随机变量的均值。在第 k 轮迭代的验算点处进行雷-菲变换,用 $\{\mu_i(k), \sigma_i(k)\}$ 替换 $\{\mu_i(k), \sigma_i(k)\}$, 准备下一轮验算点 $x_i^*(k+1)$ 的迭代计算,直至满足精度为止。

4 在役管线的安全评定

失效概率作为管线安全状况的衡量指标,也可用

来对在役管线进行安全评定。以一条输油管线的两个泵站之间管段为例。该段管线长约 58km,对管道运行的历史资料的统计分析得到的结果为:该段管线的上站出站压力均值为 3.893MPa,变异系数为 0.047,推荐采用 Gumbel I 型极大值分布;下站进站压力均值为 1.465MPa,变异系数为 0.250。管材的机械性能试验结果为:管材屈服极限均值为 390.8MPa,变异系数为 0.113,拉伸强度均值为 526.2MPa,变异系数为 0.029,推荐采用正态分布。

4.1 管线腐蚀缺陷状况

通过腐蚀检测得到管线的腐蚀缺陷分布状况。共分为以下几类:L:壁厚减少 25% 以下的轻度腐蚀;L*:壁厚减少 25% 以下、腐蚀面积相对大的轻度腐蚀;M:壁厚减少 25%~50% 的中度腐蚀;M*:壁厚减少 25%~50%、腐蚀面积相对大的中度腐蚀;S:壁厚减少 50% 以上的严重缺陷;S*:壁厚减少 50% 以上、腐蚀面积相对大的严重腐蚀。该段管线检测的结果为:轻度缺陷有 1253 处,中度缺陷(包括面积大的缺陷)有 108 处,重度缺陷(包括面积相对大的缺陷)有 6 处。自上站出口始计算,缺陷的分布状况如图 1,图 1 中的缺陷密度表示 1km 管线的缺陷数,按轻度缺陷、中度缺陷和重度缺陷分类表示管线受腐蚀的程度。

由于管线沿线地域和保护条件的不同,管线的腐蚀状况变化很大。为了更详细地反映管线全线腐蚀状况和安全状况的差别,要求以 1km 为单元对管道腐蚀

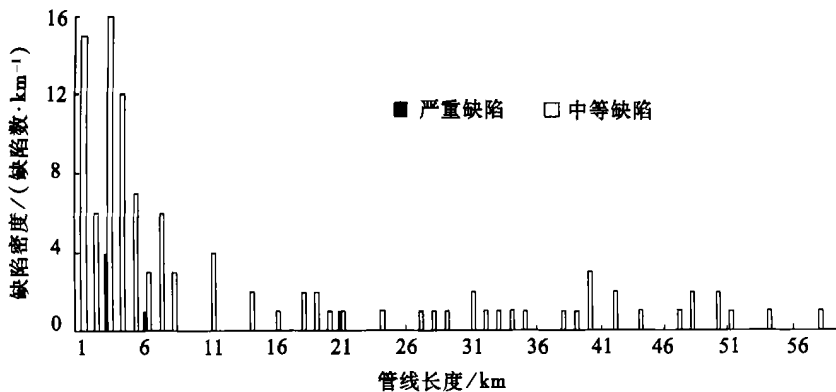


图 1 管线腐蚀缺陷的分布

Fig 1 Corrosion defects distributed along the length of pipeline

缺陷进行统计分析,确定缺陷尺寸的统计特征。腐蚀检测中仅分类给出了缺陷数目,没有缺陷深度的具体数据。为了对缺陷深度进行统计分析,用指数分布描述缺陷深度的概率特征。这是由于浅缺陷发生的概率密度大,随着缺陷深度的增加,发生缺陷概率密度逐渐减小。根据指数分布的物理意义,选用指数分布作为缺

陷深度的概率密度是合理的。指数分布函数的形式为 $F(x) = 1 - \exp^{-\lambda x}$ (18) 式中 $x > 0$; λ 为参数,由腐蚀缺陷密度数据拟合得到, $1/\lambda$ 为缺陷深度的平均值。

根据检测资料统计分析得到全线管道上的缺陷深度在指数分布意义下的平均值(图 2)。

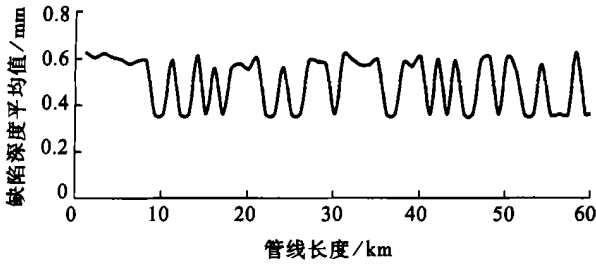


图2 管线缺陷深度均值

Fig. 2 Average depth of corrosion defects on pipeline

4.2 管线全线失效概率

由于管线沿线各种条件的复杂性,因而整条管线各段的安全程度各异。因此,应将管线分成多个部分,对每一部分完成统计分析,推断相关因素的统计分布特征,以此得到各部分管线的失效概率。对管线的分段原则应该能保证对各项因素能获取足够的统计资料,同时又体现管道的局部条件(特别是腐蚀状况和内压)的变化。

沿管线全长逐单元对管线上的腐蚀缺陷和其他因素进行统计分析,确定各项因素的概率描述,按照前面给出的管道承压能力的极限状态函数,采用雷-菲法计算失效概率。该段管道全线的失效概率如图3。

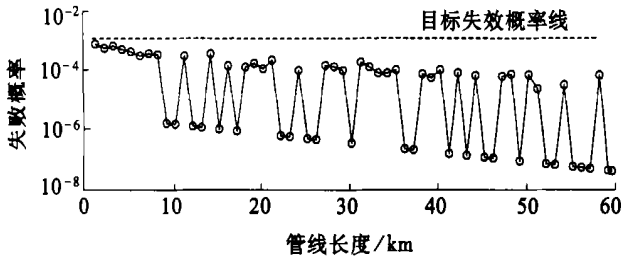


图3 管道全线失效概率

Fig. 3 Distribution of failure probability of pipeline

4.3 目标失效概率

可靠性的评定方法要求失效概率 P_f 应该等于或小于要求的目标失效概率,将之称为目标安全水平。目标安全水平定义为:对于一个可接受的特定设计的最大失效概率,超过目标失效概率视为不安全,须采取措施予以改进。

目前我国还未建立油气管线失效概率的评定标准,海洋管线工程中常用的标准^[9]和其他标准(例如API579)规定:服役条件下,一般情况的目标失效概率为 10^{-3} 。将这一概率值作为这条管线安全评定的标准。

4.4 安全评定

从图3可以看到,各处失效概率均不超过 10^{-3} ,表明该段管道的安全状况符合要求,无须对检测到的

缺陷进行维修。但应注意:自上站出口处8km地段内,腐蚀缺陷密度大,腐蚀较为严重。此处的失效概率也比较接近目标失效概率值,建议应对此段管道的腐蚀状况予以密切监视。

在对该输油管线的安全评定中,发现一些地段的失效概率超过目标失效概率,对这部分管道提出了进一步监测和维修的建议。

5 结论

(1) 根据结构可靠性的一般理论,建立了管道承压能力的极限状态方程,这一极限状态方程是管道失效概率分析的数学基础。

(2) 为了合理地评定管线的安全状况,应采用管线全线的失效概率分析方法,即对全线管段的腐蚀缺陷进行统计分析和失效概率的计算。该方法从理论上能考虑各项复杂因素的不确定性,在实际应用中又能全面提供管道的运行历史和现状的数据资料,具有工程推广使用价值。

(3) 实例计算表明,本文提出的方法是在对管线进行腐蚀检测之后对管线进行安全评定的一个行之有效的方法。

参考文献

[1] Leif Collberg, Espen H Cramer, Ola H Bjoroy. Re-qualification of pipeline systems[C]. Proceedings of the sixth-international offshore and polar engineering conference 1996, 27-34.

[2] Bai Y, Song R. Reliability-based limit-state design and re-qualification of pipelines[C]. Proceedings of the offshore mechanics and arctic engineering conference, 1998, New York, NY, USA.

[3] 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: 321-329.

[4] 何水清, 王善. 结构可靠性分析与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 60-77.

[5] ASME B31G - Manual for assessing remaining strength of corroded pipes[S]. American Society of Mechanical Engineers, 1996.

[6] Torbjorn Sotberg, Torgeir Moan, Roberto Bruschi, et al. The superb project: recommended target safety levels for limit state based design of offshore pipelines[C]. 1997 OMAE-Volume V, Pipeline Technology, ASME 1997: 71-77.

(收稿日期 2002-02-28 改回日期 2002-09-23 编辑 杨 茁)