

均匀腐蚀下管道可靠度及参数敏感度研究

刘庆刚,于新奇,彭培英

(河北科技大学机械电子与工程学院,河北石家庄 050018)

摘要:分别采用一次二阶矩法和 Monte-Carlo 法对某存在均匀腐蚀的管道进行了可靠性分析,结果发现 Monte-Carlo 方法分析结果可靠度数值略低于一次二阶矩法;可靠性分析发现,虽然管道的平均应力始终小于屈服应力,但管道可靠度随着均匀腐蚀的发生呈现加速下降趋势,至运行 20 年可靠度仅为 0.58,已经无法安全使用;管道可靠性参数分析发现,对管道可靠度影响最大的为壁厚,其次为材料强度性能,然后为材料的载荷状况,材料载荷对可靠度的影响程度取决于这种载荷对管道总体应力的贡献程度。

关键词:均匀腐蚀;管道;可靠度;一次二阶矩;Monte-Carlo

中图分类号:TH114 文献标志码:A

Reliability of pipeline under uniform corrosion conditions and the sensitivity of the influence factors

LIU Qing-gang, YU Xin-qi, PENG Pei-ying

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China)

Abstract: In this article First Order Second Moment method and Monte-Carlo methods are used to calculate the reliability of the pipelines under uniform corrosion conditions. The results show that the data obtained by Monte-Carlo is a little lower than that by First Order Second Moment. Reliability assessment also shows that the reliability is continuously decreasing while the stress of the pipeline is still lower than yield limit of the material. At the 20th year of the pipeline's use, the reliability is only 0.58, and the pipeline is not safe anymore. The parameters analysis of influence factors show that the thickness is the most important factor that influence the reliability, while yield limit is the second and load is the third. The influence of different loads to the reliability is decided by their awards to the total stress of the pipeline.

Key words: uniform corrosion; pipeline; reliability; First Order Second Moment; Monte-Carlo

均匀腐蚀是化工管道及油气长输管道运行过程中常见的现象之一,也是造成管道失效的主要原因之一^[1-2]。目前,在管道的设计中,一般将影响管道安全的各种参数当做定值,根据其应力水平进行强度设计。然而,在实际生产中,管道的尺寸、材料性能、载荷等不是定值,管道的外径、壁厚等都存在偏差,管道材料的机械性能参数往往具有分散性,管道的内压、拉力、弯矩等都可能由于某种原因而发生波动^[3-4],因此,在判断管道安全状态时,除了进行以应力水平为基础的强度校核外,还需要进行可靠性分析。管道在均匀腐蚀条件下,除了应力水平的升高,其可靠度也将逐年下降,因此,有必要对管道在整个寿命周期内的可靠度进行研究,以判断管道的运行安全状态。

收稿日期:2011-06-03;责任编辑:冯 民

作者简介:刘庆刚(1981-),男,河北邢台人,副教授,博士,主要从事化工设备与机械强度、安全评价及风险分析方面的教学研究。

可靠度与管道的实际工作环境有关,设计环境、材料性能、管道尺寸等多方面参数均会影响管道的可靠度,因此,对管道可靠度影响参数的分析和研究对保障管道的安全具有一定的指导意义。

笔者分别采用一次二阶矩法和 Monte-Carlo 法对存在均匀腐蚀的管道进行可靠性分析,同时对管道可靠度的影响参数的敏感性进行研究。

1 可靠度计算模型

采用应力-强度干涉模型^[5]进行管道均匀腐蚀状态的可靠性分析,如图 1 所示。

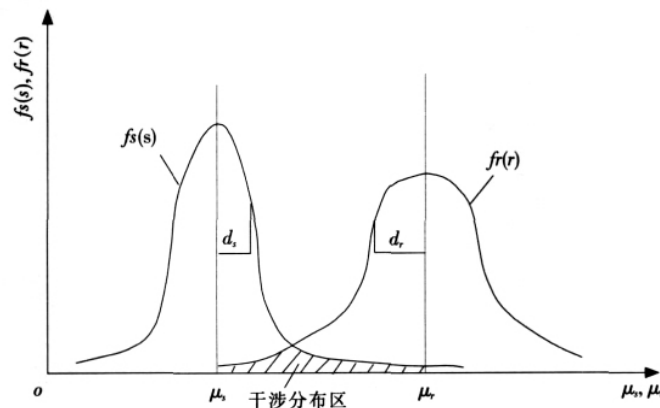


图 1 应力-强度干涉模型

Fig.1 Stress-strength interference model

图中, $f_s(s)$ 表示应力概率密度函数, $f_r(r)$ 表示强度的概率密度函数, 只有当强度大于应力时, 结构才是可靠的。因此, 在这一模型下, 将强度大于应力的概率定义为结构的可靠度系数 β ,

$$\beta = - \left(\frac{\mu_r - \mu_s}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}} \right) \quad (1)$$

式中: β 为结构可靠度系数; μ_s, μ_r 为应力、强度均值; σ_s, σ_r 为应力、强度标准差。

结构可靠度 R 可根据 β 查标准正态分布累积概率密度函数 $F_N(0, 1)$ 得到,

$$R = F_N(0, 1) \Big|_{x=-\beta} \quad (2)$$

一般情况下, 应力和强度参数均为正态分布^[6]。

可靠度的计算一般采用一次二阶矩法^[7]和 Monte-Carlo 法^[8], 笔者分别采用 2 种方法计算, 并对结果进行对比分析。

1.1 一次二阶矩法

一次二阶矩法是指将应力或者强度的计算公式按照 Taylor 级数基数展开来计算其均值和标准差的可靠性分析方法。

$$\mu_y \approx f(x_1, x_2, \dots, x_n) \Big|_{x_i=\mu_x} \quad (3)$$

$$\sigma_y^2 \approx \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f(x)}{\partial x_i} \Big|_{x_i=\mu_x} \right]^2 \sigma_x^2 \quad (4)$$

1.2 Monte-Carlo 法

Monte-Carlo 法是将随机数赋予各种适当的物理意义, 并建立模拟工程实际情况的概率模型, 以将各种随机过程的概率特征与数学分析问题的解答联系起来。对于一些不容易构造成数学模型以进行可靠分析的复杂情况, 应用 Monte-Carlo 法来求解较为有效。

在此计算过程中, 独立的随机变量有 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 根据假定, 这些变量均服从正态分布。则用 Monte-Carlo 法计算管道可靠度的步骤如下。

- 1) 确定各独立随机变量的分布规律及其标准差;
- 2) 生成 $[0, 1]$ 区间的均匀分布的随机数, 对各独立随机变量进行抽样;
- 3) 进行管道应力计算, 根据剩余强度理论得到相应的失效模式, 确定极限方程 $g(X)$;

- 4) 将各抽样值代入状态方程, 检验是否满足 $g(X) > 0$;
- 5) 重复步骤 2) — 步骤 4) N 次 (N 是随机模拟总次数), 累计 $g(X) > 0$ 的次数 N_a ;
- 6) 计算管道的可靠度: $P_f = N_a / N$, 并输出结果。

2 均匀腐蚀条件下管道可靠度计算

2.1 一次二阶矩法

分别采用 S_P 和 r_P 表示结构的应力和强度, 则应力均值为 μ_{S_P} , 标准差为 σ_{S_P} , 强度为 μ_{r_P} , 标准差为 σ_{r_P} 。

2.1.1 管道应力参数计算

应力 S_P 由管道内压、轴向应力和弯矩 3 部分引起, 其计算公式为

$$S_P = \frac{P_P(D_0 - t_0 + Ka)}{4(t_0 - Ka)} + \frac{32M_Z D_0}{\pi[D_0^4 - (D_0 - 2t_0 + 2Ka)^4]} + \frac{4F_P}{\pi[D_0^2 - (D_0 - 2t_0 + 2Ka)^2]} \quad (5)$$

式中: P_P 为管道内压; D_0 为管道外径; t_0 为管道壁厚; K 为腐蚀速率; a 为管道服役年数; M_Z 为管道弯矩; F_P 为管道拉力。

则应力的均值 μ_{S_P} 为

$$\mu_{S_P} = \frac{\mu_{P_P}(\mu_{D_0} - \mu_{t_0} + Ka)}{4(\mu_{t_0} - Ka)} + \frac{32\mu_{M_Z}\mu_{D_0}}{\pi[\mu_{D_0}^4 - (D_0 - 2t_0 + 2Ka)^4]} + \frac{4\mu_{F_P}}{\pi[\mu_{D_0}^2 - (\mu_{D_0} - 2\mu_{t_0} + 2Ka)^2]} \quad (6)$$

应力的标准差 σ_{S_P} 为

$$\sigma_{S_P} = \left[\left(\frac{\partial S_P}{\partial P_P} \right)^2 \sigma_{P_P}^2 + \left(\frac{\partial S_P}{\partial M_Z} \right)^2 \sigma_{M_Z}^2 + \left(\frac{\partial S_P}{\partial F_P} \right)^2 \sigma_{F_P}^2 + \left(\frac{\partial S_P}{\partial D_0} \right)^2 \sigma_{D_0}^2 + \left(\frac{\partial S_P}{\partial t_0} \right)^2 \sigma_{t_0}^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

式中: σ_{P_P} 为压力 P_P 的标准差; σ_{M_Z} 为弯矩标准差; σ_{F_P} 为管道拉力标准差; σ_{D_0} 为外径标准差; σ_{t_0} 为管道壁厚标准差。

2.1.2 管道强度参数

强度 r_P 为金属的屈服极限 σ_s , 其均值为 μ_{σ_s} , σ_s 的标准差可以根据相应材料性能参数得到, 一般为 $(0.05 \sim 0.10)\mu_{\sigma_s}$ 。

2.1.3 管道可靠度计算

将式(5) — 式(7)代入式(1)、式(2)计算可得到管道的可靠度参数。根据上述过程编制相应计算机程序来完成可靠度的计算。

2.2 Monte-Carlo 法

极限方程为 $g(X) = \sigma_s - S_P$, 按照 1.2 步骤编制计算机程序完成可靠度的计算。

3 管道应力及可靠度变化趋势

某管道, 其相关参数为 $\mu_{P_P} = 2.1 \text{ MPa}$, $\sigma_{P_P} = 0.3 \text{ MPa}$; $\mu_{M_Z} = 0.5 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$, $\sigma_{M_Z} = 0.03 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$; $\mu_{F_P} = 0.8 \times 10^6 \text{ N}$, $\sigma_{F_P} = 0.05 \times 10^6 \text{ N}$; $\mu_{D_0} = 457 \text{ mm}$, $\sigma_{D_0} = 0.6 \text{ mm}$; $\mu_{t_0} = 10 \text{ mm}$, $\sigma_{t_0} = 0.4 \text{ mm}$ 。

管道材料的屈服极限为 $\mu_{\sigma_s} = 488 \text{ MPa}$, $\sigma_{\sigma_s} = 48.8 \text{ MPa}$ 。

管道年均腐蚀速率为 $K = 0.1 \text{ mm}$, 运行时间为 $0 \sim 20$ 年 ($a = 0 \sim 20$)。

分别采用一次二阶矩法和 Monte-Carlo 法计算管道 20 年间的可靠度和应力情况, 结果见图 2 和图 3。

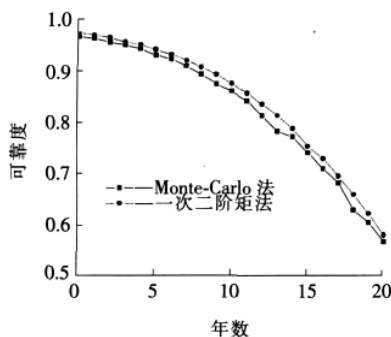


图 2 20 年间管道可靠度变化

Fig. 2 Changes of the reliability in 20 years

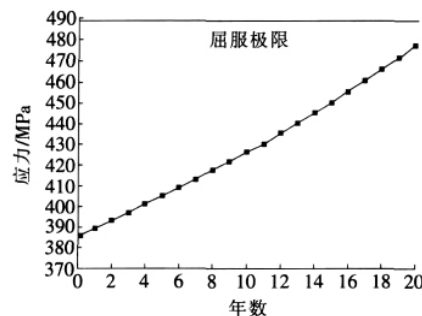


图 3 20 年间管道平均应力变化

Fig. 3 Changes of the average stress of the pipeline in 20 years

当各参数的标准差从 0.01 变化到 0.2 的过程中,分别采用一次二阶矩法和 Monte-Carlo 法进行分析,得到不同均匀腐蚀程度的可靠度情况,见图 4—图 6。

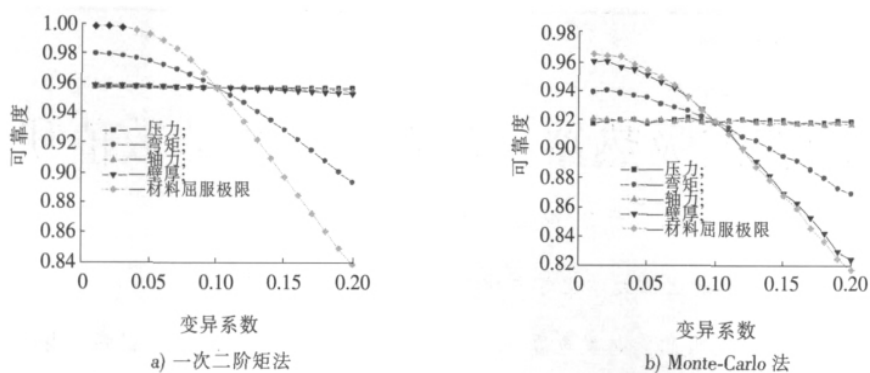


图 4 未发生均匀腐蚀情况下管道可靠度情况($a=0$)

Fig. 4 Reliability of the pipeline without corrosion($a=0$)

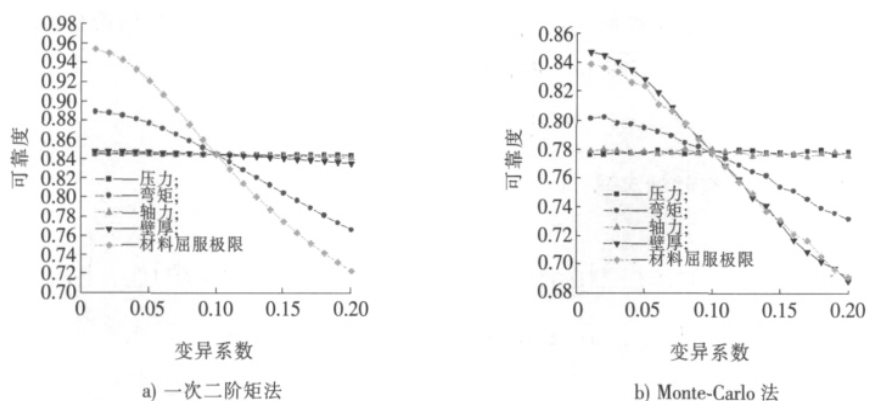


图 5 均匀腐蚀情况下管道可靠度情况($a=10$)

Fig. 5 Reliability of the pipeline with corrosion($a=10$)

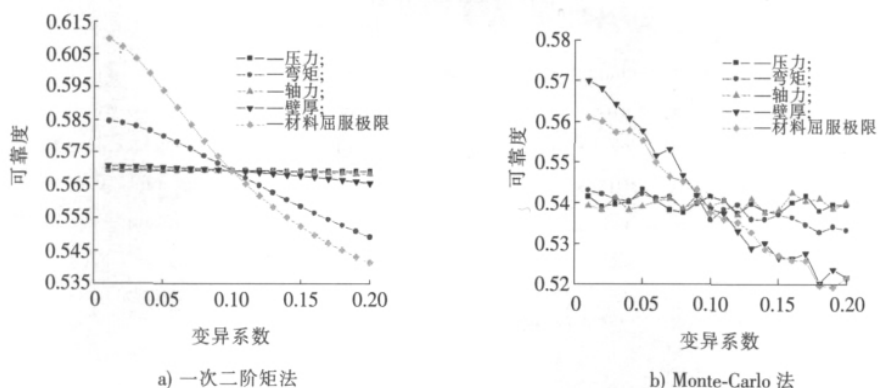


图 6 均匀腐蚀情况下管道可靠度情况($a=20$)

Fig. 6 Reliability of the pipeline with corrosion($a=20$)

4 结 论

1)一次二阶矩法和 Monte-Carlo 法求解可靠度结果基本一致,说明 2 种方法均适用于管道均匀腐蚀条件下的可靠性分析;但 Monte-Carlo 法分析结果可靠度略低于一次二阶矩法,这是因为一次二阶矩法在运用 Taylor 公式展开式对高阶项进行了截断造成一定的误差所致。

(下转第 55 页)

- ty, 2002, 15(32):494-467.
- [3] MARTINEZ J S, CASTRO F C. Improving the high-frequency response of the folded-cascode amplifiers[A]. IEEE ISCAS'96[C]. Atlanta: [s. n.], 1996. 500-503.
- [4] MOTA D, PHANG K. Fundamentals of fully differential op-amps and CMFB circuits design[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 39(18):37-68.
- [5] NAGARAJ K, FETTERMAN H S. A 250 MW, 8 b, 52 M sample/s Parallel pipelined A/D converter with reduced number of amplifiers [J]. IEEE JSSC, 1997, 32(3):312-320.
- [6] HEO S C, JANG Y C, PARK S H, et al. An 8-bit 200 MSps CMOS folding interpolating ADC with a reduced number of preamplifiers using an averaging technique[J]. IEEE ASIC/SOC, 2004, 18(5):27-32.
- [7] CHIU Y, GRAY P R, NIKOLIC B. A 14-b 12-MSs CMOS pipelined ADC with over 100 dB SFDR[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2004, 21(7):2 139-2 151.
- [8] KAMATH B Y, MEYER R G, GRAY P R. Relationship between frequency response and settling time of operational amplifiers[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1974(SC-9): 347-352.
- [9] ROBANA M, YUZMAN Y, TAN K Y. Design of single-state folded-cascode gain boost amplifier for 100 mW 10 bit 10 MS/s pipelined ADC[D]. San Francisco: University of California, 1998.
- [10] 甄可龙, 吕善伟, 张 岩. 强电磁脉冲对抗对雷达接收机的天线耦合分析[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology), 2011, 32(2):147-151.
-

(上接第 43 页)

2) 管道可靠度随着均匀腐蚀而逐年加速降低, 运行 3.8 年时可靠度仍保持在 0.95 以上; 到 8.6 年时, 可靠度保持在 0.90 以上; 运行 20 年可靠度仅为 0.58。

3) 运行 20 年, 管道平均应力水平依然小于材料屈服极限, 但可靠度仅为 0.58, 说明管道的安全状态不但需要考虑应力水平, 还需考虑由于参数随机性带来的可靠性问题。

4) 对管道可靠度参数分析发现, 管道壁厚参数对可靠度影响最大, 其次是材料屈服极限, 然后是载荷参数。载荷参数的影响程度取决于对管道整体应力的贡献程度(本例中弯矩影响最大, 对总体应力水平的贡献程度约为 79%)。

5) 在壁厚对可靠度影响程度的分析中, 2 种方法结果存在明显不一致, 这是因为管道应力方程对壁厚的一次偏导数过大, 影响了一次二阶矩法的分析精度造成的。当应用一次二阶矩法进行可靠度分析时, 需校验各参数一阶偏导, 如一阶偏导过大则不适合采用。

参考文献:

- [1] 何东升, 郭 简, 张 鹏. 腐蚀管道剩余强度评价方法及其应用[J]. 石油学报(Acta Petrolei Sinica), 2007, 28(6):125-128.
- [2] 罗 鹏, 赵 霞, 张一玲, 等. 国外天然气管道内腐蚀直接评价案例分析[J]. 油气储运(Oil & Gas Storage and Transportation), 2010, 29(2):137-141.
- [3] 黄小光, 韩忠英. 海底管道疲劳损伤与疲劳寿命的可靠性计算[J]. 油气储运(Oil & Gas Storage and Transportation), 2010, 29(11): 827-831.
- [4] 刘 锴, 郑贤斌. 在役油气管道安全可靠性评估方法初探[J]. 油气田环境保护(Environmental Protection of Oil & Gas Fields), 2010 (12):48-51.
- [5] 戴树和, 王明娥. 可靠性工程及其在化工设备中的应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1987.
- [6] 罗希延, 赵荣国, 蒋永洲, 等. 航空发动机涡轮盘用 GH4133B 合金常温力学性能统计分析[J]. 机械工程学报(Journal of Mechanical Engineering), 2010, 46(11):75-83.
- [7] 罗文强, 龚 珏, 杨瑞琰. 一次二阶矩方法在斜坡稳定性概率评价中的应用[J]. 地球科学-中国地质大学学报(Earth Science-Journal of China University of Geosciences), 1998, 23(6):639-642.
- [8] 张亦飞, 王永新, 王信棠, 等. 基于 Monte Carlo 模拟的隧道围岩组合分类法[J]. 应用基础与工程科学学报(Journal of Basic Science and Engineering), 2009, 17(2):138-143.