

# 天然气管道失效概率与安全寿命预测

## Failure Probability and Safe Life Prediction of Natural Gas Pipeline

高爽

Shuang Gao

延长石油油气勘探公司延长气田采气二厂 陕西 榆林 718500

Yanchang Petroleum Exploration Company Yulin Shaanxi Abstract 718500

**摘要:**天然气管道在使用中的故障可能导致灾难性的结果。为了避免由于管道坍塌而造成经济、环境和社会的影响,应采用合理的方法来预测钢管受腐蚀影响的安全寿命,这有利于腐蚀管道系统的维护和修理。因此,本文提出了一种基于可靠性分析方法,该方法使用首次通过概率理论对受腐蚀的油气管道进行故障评估。该方法还可以帮助管道工程师和资产经理根据他们估计的故障概率确定管道维修和更换的优先级。

**Abstract:** The failure of natural gas pipeline in use may lead to disastrous results. In order to avoid the economic, environmental and social impacts caused by the collapse of pipelines, reasonable methods should be adopted to predict the safe life of steel tubes affected by corrosion, which is conducive to the maintenance and repair of the corroded pipeline system. Therefore, this paper proposes a reliability-based method that uses the first-pass probability theory to evaluate the faults of corroded oil and gas pipelines. This approach can also help pipeline engineers and asset managers prioritize pipeline repair and replacement based on their estimated probability of failure.

**关键词:** 可靠性分析;安全寿命预测;腐蚀;天然气管道

**Keywords:** Reliability analysis; Safe life prediction; Corrosion; Natural gas pipeline

**DOI:** 10.36012/etr.v2i12.3033

### 1. 介绍

天然气占世界燃料使用量的 23%。尽管管道是一种非常安全的能源运输形式,但在管道故障的情况下,泄漏的天然气会对周围环境和人口造成相当大的危害。管道基础设施的退化和老化是管道行业面临的主要问题之一。美国超过一半的天然气管道网络的使用寿命是 40 年,俄罗斯 20%的天然气管道系统已接近设计的使用寿命。金属腐蚀是天然气管道结构完整性的普遍威胁。腐蚀是一个与时间有关的过程,它会逐渐降低管道强度,并最终导致管道故障,是许多国家/地区管道故障的主要原因。例如,在加拿大有 26000 公里的输气管道,以合理的成本预防与腐蚀相关的故障<sup>[1]</sup>。根据《世界概况》(2010 年)的数据,美国约有 800,000 公里,俄罗斯有 252,000 公里,输送原油,天然气和石油产品等产品。英国和澳大利亚的统计数据分别为 20,000 公里和 32,000 公里。在美国,腐蚀分别导致石油和天然气管道故障的 23%和 39%<sup>[1]</sup>。在美国,由于结构元件的腐蚀损坏而导致的年度损失高于包括风暴,

飓风在内的自然灾害的年度损失总额,洪水,地震和火灾<sup>[2]</sup>。

管道故障可能在经济,社会和环境方面造成灾难性的后果,从而可能导致巨大的维修成本,日常生活的中断,污染空气甚至人身伤害。这就需要一个综合的程序来估计管道故障的可能性及其剩余的安全使用寿命,这是本文的主题。

管道的强度受腐蚀影响,从而引起的管壁减少。因此,将腐蚀坑的影响纳入管道结构的分析中至关重要。确定剩余强度对于预测腐蚀的管道的故障概率以及促进管道系统的维护和维修至关重要。因此,将腐蚀坑效应纳入管道结构分析中显得尤为重要。剩余强度的测定对于预测腐蚀管的故障概率并对管道系统进行施加维护和维修至关重要。为了考虑管道腐蚀和剩余强度建模中的不确定性,可靠性分析已经成功地用于管道的安全评估和使用寿命预测。Sinha 等<sup>[3]</sup>建立了一个模型,基于模拟的概率神经网络来估计易于腐蚀的老化管道的失效概率。他们的神经网络模型中的近似值可以被视为其方法学的局限性。Teixeira 等<sup>[4]</sup>,使用蒙特卡罗模拟方法和

**【作者简介】**高爽(1996~)男,陕西靖边人,学士学位,研究方向:天然气、煤矿、化工安全管理。

一阶可靠性方法(FORM)来评估受到压力影响的腐蚀后管道的可靠性。

在当前的研究中,我们提出了一种基于可靠性分析腐蚀钢管的评估方法并建立了强度损失的随机模型,该模型涉及影响腐蚀管道残余强度的关键因素。当管道系统的剩余强度降至其工作压力以下时,它就会发生故障。采用分析时变方法来量化由于腐蚀引起的故障可能性,从而可以确定管道发生故障并因此需要维修的时间。为了对具有多个腐蚀坑的管道进行评估,采用了系统可靠性分析方法。

## 2. 强度损失模型

腐蚀管道的实际失效标准是残余强度低于工作压力。在结构可靠性理论中,该准则可以用失效函数的形式表示<sup>[4]</sup>如下公式(1):

$$G(Q, P_0, t) = Q(t) - P_0 \quad (1)$$

$Q(t)$ 是在时间  $t$  时的剩余强度(结构阻力),  $P_0$  是工作压力(负载效应)。残余强度  $Q(t)$  由于管道变质(例如腐蚀)而随时间减少。利用式(1)的失效函数,可以确定失效概率<sup>[4]</sup>如公式(2)。

$$P_f(t) = P[G(Q, P_0, t) \leq 0] = P[Q(t) \leq P_0] \quad (2)$$

$P$  是指事件的可能性。

上面的方程式,可以使用时变可靠性方法来解决。在时变可靠性问题中,一些或全部随机变量被建模为随机过程。对于涉及强度损失随机过程的可靠性问题,以剩余强度  $Q(t)$  来衡量,可靠性取决于首次出现随机过程之前的预计运行时间(在使用寿命内),越过阈值  $P_0$ 。因此,在这段时间内,第一次发生这种偏移的概率就是故障概率。在结构可靠性分析中,这称为“首次通过概率”,可以根据<sup>[4]</sup>公式(3)确定。

$$P_f(t) = P_f(0) + \int_0^t v dt \quad (3)$$

$P_f(t)$  是管壁腐蚀导致的失效概率,  $v$  是随机过程的平均速率  $Q(t)$ 。

如果管道具有多个腐蚀坑,则可以使用系统可靠性方法来估计管道的失效概率。在系统可靠性理论中,基本上有两种类型的系统。一种被称为串联系统,其中一个组件的故障构成了系统的故障。另一个称为并行系统,其中仅当所有组件都发生故障时系统才会发生故障。对于腐蚀的管道,每个腐蚀坑的故障发生将构成其全部故障。因此,串联系统更适合于腐蚀管道的故障评估。根据系统可靠性理论,串联系统

在某时刻的故障概率  $P_{f(s)}(t)$  可以通过[5](公式4)进行估算:

$$\max[P_{f(i)}(t)] \leq P^{(s)}(t) \leq 1 - \prod_{(i=1)}^n [1 - P_{f(i)}(t)] \quad (4)$$

$P_{f(s)}(t)$  是由于管道壁上第  $i$  个腐蚀坑失效而导致的管道失效概率,  $t$  和  $n$  是存在于管线腐蚀坑的数量。这样,就确定了强度随时间的损失而导致的失效概率。

## 3. 剩余强度模型

为了确定腐蚀后的管道的剩余强度,由 Kiefner 等<sup>[6]</sup>开发的分析模型通过公式(5)计算腐蚀管道的残余强度:

$$Q = (2d\sigma_f)/D_0 \left[ (1 - A/A_0)/(1 - A/(MA_0)) \right] \quad (5)$$

其中,  $d$  是管壁厚度,  $D_0$  是管路半径,  $\sigma_f$  是流动应力,  $A$  是投影到管道纵轴上的腐蚀坑的横截面面积,  $A_0$  是腐蚀之前的原始横截面面积,是导致故障前管道膨胀的 Folias 因素。

腐蚀坑随时间的增长,剩余强度由式(3)给出。预测  $t$  时的管道强度,需估计腐蚀增长率,可以使用 Sheikh 等<sup>[7]</sup>提出的钢管腐蚀增长的线性模型来估算在时间  $t$  处腐蚀坑的尺寸:

$$a(t) = a(0) + c_a t \quad (6)$$

$$l(t) = l(0) + c_l t \quad (7)$$

$c_a$  和  $c_l$  分别表示凹坑深度和长度。

考虑到以上公式,腐蚀后的管道剩余强度如公式(8)所示。

$$Q(t) = \frac{2.36d}{D_0} \left[ \frac{1 - \alpha(t)/d}{1 - \alpha(t)/m(M(t)\alpha)} \right]$$

## 4. 结论

在这项研究中,通过开发一种分析方法对由于腐蚀而引起的天然气管道中时变失效概率进行了量化,并估算了管道发生故障的时间以及需要维修或更换的时间。我们发现管材的屈服强度对失效概率的影响并不显著,而工作压力对管的使用寿命的影响却是显著的。可以得出的结论是,所提出的时变可靠性方法可以作为一种合理的工具,用于评估受腐蚀的天然气管道的失效概率,从而确定管道系统的使用寿命。

## 参考文献

- [1] S.K. Sinha and M. D. Pandey, "Probabilistic neural network for reliability assessment of oil and gas pipelines," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 17, no. 5, pp. 320-329, 2002, doi: 10.1111/1467-8667.00279.