

# 腐蚀和残余应力对油气管道不规则区可靠性的影响分析

王晓敏, 骆正山, 赵乐新

(西安建筑科技大学, 西安 710055)

**摘要:** **目的** 针对油气管道的运行安全问题, 建立油气管道局部腐蚀模型, 对管道不规则区域的可靠性进行准确分析。**方法** 首先, 对管网中不同的不规则区域管道的腐蚀进行简单分析, 每个区域都有局部腐蚀缺陷, 任何区域的破坏都会导致整个管网的破坏。其次, 定义各区域的有限元模型, 考虑文献中给出的局部腐蚀模型和常用应力模型。再次, 利用概率分析方法给出真实的腐蚀参数和时间模型, 并采用蒙特卡洛模拟算法进行求解, 得出不同腐蚀速率下管道的不规则区域的失效概率。最后, 以三种不同腐蚀速率的数值算例分析各种因素对腐蚀管道可靠性的影响。**结果** 受腐蚀和残余应力的影响, 不规则区域的可靠性明显大于规则区域。考虑不同区域的残余应力, 破坏概率随残余应力的增加而增加, 特别是高腐蚀速率时, 失效概率增加, 而低腐蚀速率时, 这种敏感性降低。法兰的可靠性更受有无残余应力腐蚀的影响。常规区(基)的可靠性最好。**结论** 管道不规则区域对腐蚀和残余应力的响应机制不同于规则区域, 所提出的方法相比于传统方法, 能够更有效地评价不规则区域的可靠性。

**关键词:** 油气管道; 腐蚀; 残余应力; 不规则区; 有限元模型; 蒙特卡罗模拟; 可靠性

**中图分类号:** TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)04-0278-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.04.032

## Corrosion and Residual Stress on Reliability of Irregular Area of Pipeline

WANG Xiao-min, LUO Zheng-shan, ZHAO Le-xin

(Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**ABSTRACT:** The work aims to establish a local corrosion model for oil and gas pipelines to solve the problem of operation safety and analyze the reliability of irregular areas. The pipeline corrosion in different irregular areas was firstly analyzed. Each area had local corrosion defects, and the failure of any area would lead to the failure of the whole pipeline network. Secondly, the finite element model of each region was defined. The local corrosion model and stress model given in the literatures were considered. Finally, the real corrosion parameters and time models were given by probability analysis, and the actual life of each area was obtained. Finally, three numerical examples with different corrosion rates were given to illustrate the influence of various factors on the reliability of corroded pipelines. Due to the influence of corrosion and residual stress, the reliability of

收稿日期: 2019-05-27; 修订日期: 2019-09-27

Received: 2019-05-27; Revised: 2019-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(41877527); 陕西省社科基金项目(2018S34)

Fund: National Natural Science Foundation of China(41877527) and Shaanxi Social Science Fund Project(2018S34)

作者简介: 王晓敏(1983—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为管道的腐蚀速率预测及油气管道风险评估。

**Biography:** WANG Xiao-min(1983—), Female, Ph. D., Research focus: pipeline corrosion rate prediction, oil and gas pipeline risk assessment.

**通讯作者:** 骆正山(1969—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为管道腐蚀速率预测、油气管道风险评估。邮箱: fxpgyjs@163.com

**Corresponding author:** LUO Zheng-shan(1969—), Male, Doctor, Professor, Research focus: pipeline corrosion rate prediction, oil and gas pipeline risk assessment. E-mail: fxpgyjs@163.com

**引文格式:** 王晓敏, 骆正山, 赵乐新. 腐蚀和残余应力对油气管道不规则区可靠性的分析[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 278-283.

WANG Xiao-min, LUO Zheng-shan, ZHAO Le-xin. Analysis of corrosion and residual stress on reliability of irregular area of pipeline[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 278-283.

irregular region was significantly greater than that of regular region. Considering the residual stress in different regions, the failure probability increased with the increase of residual stress, especially at high corrosion rate, the failure probability increased; while at low corrosion rate, the sensitivity decreased. The reliability of flange was more affected by whether there was residual stress corrosion. The conventional zone (base) had the best reliability. The response mechanism of irregular area to corrosion and residual stress is different from that of regular area. Compared with traditional method, the method proposed in this paper can evaluate the reliability of irregular area more effectively.

**KEY WORDS:** oil and gas pipeline; corrosion; residual stress irregular area; finite element model; Monte Carlo simulation; reliability

油气管道是重要的能源基础设施，与工业生产和人民生活密切相关。随着时间的推移，早期铺设的管道多因腐蚀问题，出现不同程度的损伤，有造成管道破裂、油气泄露的潜在风险，亟待识别和修复。目前，大部分学者更多的是研究直管的腐蚀问题，然而，管道不规则区域的腐蚀对管道的结构完整性和安全性影响更大。随着管道服役时间的推移，不规则区域管壁变薄，从而造成局部应力集中，达到一定程度后，就有可能发生管道泄漏、破裂，造成重大经济损失，并对环境产生重要影响。2013 年 11 月 22 日的青岛原油泄漏爆炸事件的三大直接原因之一就是管道不规则区腐蚀造成的原油泄漏，直接经济损失过亿。因此，不规则区管道的可靠性是管道运行和维护领域的一个重要问题。

目前，国内外人员对管道的可靠性进行了大量的研究工作。常用的腐蚀管道失效压力预测模型主要有 ASME B 31G<sup>[1]</sup>、RSTRENG<sup>[2]</sup>、DNV RP F101<sup>[3]</sup>等，但是这些模型都只考虑了单一因素对管材屈服强度或抗拉强度的影响。A. P. Teixeira 等人<sup>[4]</sup>模拟了不同程度的腐蚀损伤，以确定不同参数对腐蚀管道爆裂倒塌概率的影响。Y. Sahraoui 等人<sup>[5]</sup>提出了腐蚀管道的时间相关概率分析，考虑了与时间有关的内部压力和三种类型的故障。上述方法所提出的因素均建立在理论分析层面，未采用实际的现场数据进行验证。Amirata 等人<sup>[6]</sup>使用了耦合腐蚀和物理测量的残余应力模型，对残余应力进行了物理测量，确定了不同内部压力和腐蚀速率下的可靠性指标。以上的研究工作中，考虑不规则区域的腐蚀和可靠性的研究较少，更多的是建立在理论分析层面，未采用实际的数据进行模拟验证。本文基于不规则区域的有限元模型<sup>[6-7]</sup>，并以陕京管线为例，建立管道可靠性计算模型，采用蒙特卡洛模拟方法<sup>[8-9]</sup>来预测在不同速率下管道的失效概率。对不规则区域给予更多的重视，以便更好地管理管线的使用寿命。

1 力学模型

1.1 管道的腐蚀

腐蚀是影响管道安全运行最常见的失效模式，对油气输送行业和服务构成严重的威胁。近 30 年来，

人们对腐蚀管道的失效机理和失效概率进行了深入的研究，对腐蚀管道的残余应力进行了评定。在现有的编码中，ASME B31G 的应用最为广泛，人们在 ASME B31G 方法的基础上，引入新的因子对其进行了改进<sup>[10]</sup>。在有限元分析和实验研究的基础上，DNV 和 BG 随后制定了统一的管道腐蚀评价准则<sup>[11]</sup>。Ali 等人<sup>[4-5]</sup>最近进行了重要的实验和数值工作，显示了坑深及其几何形状对估计管道穿孔风险的影响。本文采用非线性数值分析和小尺度实验相结合的方法，对管道腐蚀缺陷进行了研究。对于随机腐蚀场<sup>[7]</sup>，腐蚀缺陷由随时间变化的深度  $e_{lc}(t)$  和长度  $l_{lc}(t)$  决定，如式 (1) 和式 (2) 所示。式中， $\gamma_{lc}$  为腐蚀常数， $\alpha_{lc}$  为局部腐蚀分数， $\Delta k_{lc}$  为特定的局部腐蚀速率。

$$e_{lc}(t) = (k_{uc} + \alpha_{lc} \Delta k_{lc}) t^n \tag{1}$$

$$l_{lc}(t) = \gamma_{lc} (k_{uc} + \alpha_{lc} \Delta k_{lc}) t^n \tag{2}$$

1.2 受腐蚀影响的管壁失效

管道油气泄漏主要是由管壁上形成的孔洞引起的，而孔洞很大程度上是由腐蚀缺陷引起的<sup>[12]</sup>。因为油气管道是加压运输，管内压力较高。当管壁局部位置薄到一定的程度时，就会丧失设计强度。在较大的管内压作用下，因该局部位置应力集中，完全有可能造成局部破裂<sup>[13]</sup>，从而发生大面积漏油、漏气。

1.3 残余应力模型

管道中的残余应力来自于线圈生产过程中的制造工序，其中包括管道装配的焊接过程。这些应力是影响结构可靠性的主要因素之一，对作业安全有不利影响，甚至影响用于输送碳氢化合物的结构安全，促使研究人员对其进行深入研究，旨在测量残余应力。研究人员会对他们的结果进行比较。郭瑞彬、张一良等人<sup>[9-10]</sup>对管道弯头、法兰、对焊等所谓不规则区域的残余应力进行了定义，见表 1。本文利用 ANSYS 软件建立了三种几何模型，如图 1 所示。

表 1 不规则区残余应力  
Tab.1 Residual stress in irregular area

Considered zone	Residual stress
Base metal	$\sigma_{Rs1} = 0.21\sigma_y$
Butt welding zone	$\sigma_{Rs2} = 0.26\sigma_y$
Flange zone	$\sigma_{Rs3} = 0.32\sigma_y$
Elbow zone	$\sigma_{Rs4} = 0.29\sigma_y$

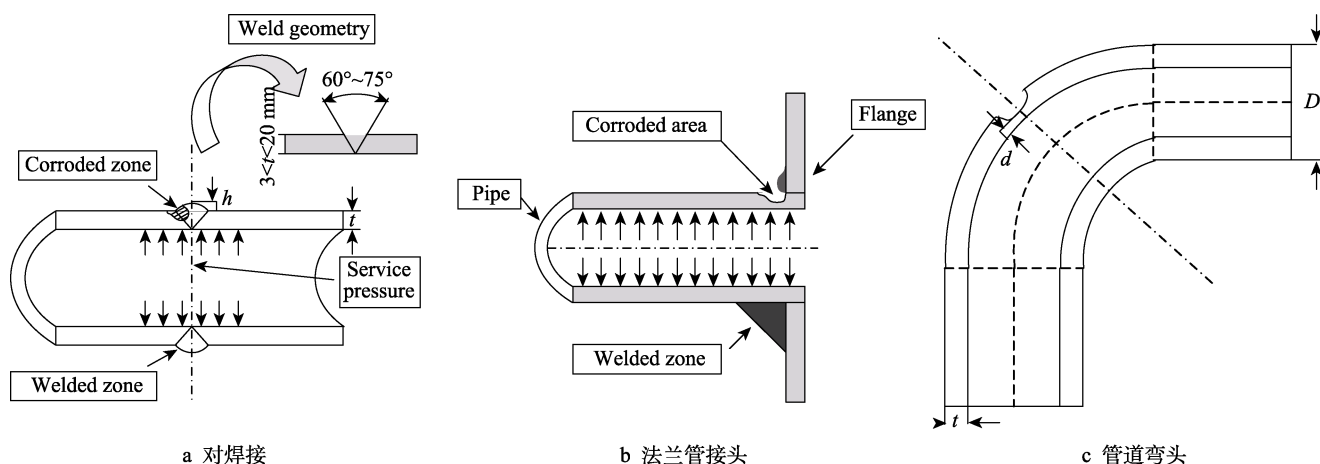


图1 腐蚀区示意

Fig.1 Sketch of corroded zone: a) butt welding; b) flange pipe joint; c) elbow

## 2 有限元模型

### 2.1 模型的建立

对于埋地管道来说,管道内压是主要荷载。在本文的弹塑性有限元分析中,根据腐蚀管道的具体情况,仅考虑了管道内压,相比之下,其余的荷载(自重、土壤压力、静水压力等)都很小,因此均忽略不计。因为缺陷附近所受应力较大,被腐蚀处及附近首先发生破坏,管道内壁裂纹缺陷主要是局部缺陷。将特征缺陷模型定义的腐蚀缺陷用于有限元分析模型<sup>[8]</sup>的建立。以陕京管线作为原型研究,试验油气管道详细信息见表2。

对于三维模型<sup>[7]</sup>,影响区附近单元的尺寸更细化,在管道非影响段上实现了四面体网格映射,腐蚀段建立了三角形网格。选择4节点和6节点两种平面单元类型,采用3个自由度,如图2所示。管道法兰模型共有18 241个节点,在0.4 MPa的工作压力下,腐蚀深度为5 mm时,最大的Von Mises应力为379.9 MPa。

三种情况(对焊、法兰、弯头)的损伤面积均采用布尔值软件,通过受影响区域的相减运算得到,该受影响区域表示管道主体的腐蚀情况。图2定义了不同的不规则区域,可以在管网中找到不同的不规则区域,局部腐蚀也可以在有限元中建模,以观察其对管道结构完整性的影响。

表2 管道特性

Tab.2 Pipeline characteristics

Parameter	Type/Value
Pipeline	API 5L X70
Outer diameter $D$	508 mm
Pipeline wall thickness	9.5 mm
Young modulus $E$	206 GPa
FY	485 MPa
Ultimate strength	520 MPa
Poisson coefficient	0.3
Service pressure	4 MPa

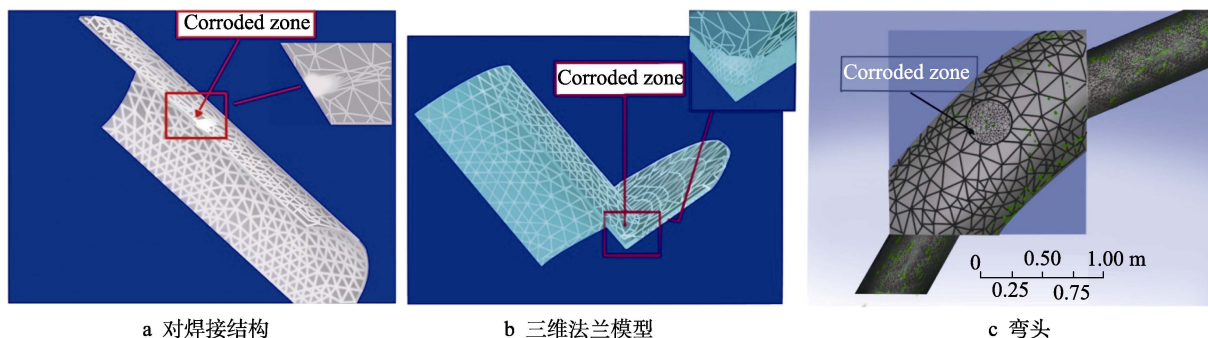


图2 有限元模型

Fig.2 FE model: a) butt configuration; b) 3D flange pipe joint; c) Elbow

### 2.2 Von Mises 力学理论

Von Mises 是一种屈服准则,屈服准则的值通常

称为等效应力。根据第四强度准则,腐蚀缺陷区的等效应力超过屈服极限强度时,认为失效。采用这种弹性失效的准则,Von Mises 表达式为<sup>[11]</sup>:

$$\sigma_s = \left\{ \frac{1}{2} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_s$  为屈服应力, MPa;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  分别为该点的第一、第二、第三主应力, MPa。

## 2.3 边界条件设定

由于现实中的油气管道是无限和无位移的, 在模拟中, 笔者将截取一段油管, 并将其两端进行全约束。

## 2.4 加载求解计算

油气管道在运行的过程中, 受力复杂, 内壁压力是对其影响最大的, 因而忽略其他载荷因素, 只考虑输油气时的运行内压。将 Von Mises 应力视为腐蚀深度的函数<sup>[14]</sup>, 在不同的腐蚀深度 (1~7 mm), 当增量为 1 mm 时, 管道厚度百分比分别为 10.52%、21.05%、31.57%、42.10%、52.63%、63.15%、73.68%。每施加 4 MPa 的压力, 观察 Von Mises 应力的变化。

采用有限元软件算出各个不规则区域, 宽为 1 mm 和深为 7 mm 时, 不同长度的腐蚀深度对油气管道影响的最大等效应力值。最后用相关软件对上面数据进行处理, 自动生成腐蚀深度与最大应力的关系。

图 3 显示了各奇异区域的 Von Mises 应力随腐蚀深度的变化规律, 法兰和对焊接这两种模型的演变形式相似。在 5.5 mm 深的弯头处, 可观察到高应力。根据有限元模拟计算结果, 提出了各区域腐蚀深度对 Von Mises 应力的影响随时间变化的力学模型<sup>[15]</sup>:

$$\sigma_{\text{Base}}(t) = 1062.5 + 41.5d(t) + 5d^2(t) \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{Butt}}(t) = 1055.2 + 13.92d(t) - 0.7d^2(t) \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{Elbow}}(t) = 990.57 + 79.56d(t) + 1.31d^2(t) \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{Flange}}(t) = 1002 + 21.2d(t) + 0.93d^2(t) \quad (7)$$

$$d(t) = e_{lc}(t) + l_{lc}(t) \quad (8)$$

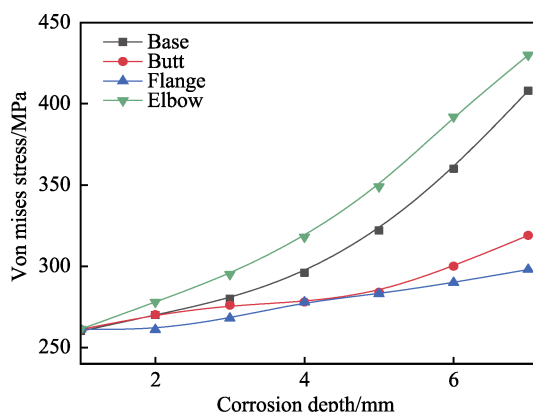


图 3 Von Mises 应力与腐蚀深度的关系  
Fig.3 Relationship between Von Mises stress evolution and corrosion depth

随着时间的推移, 管壁厚度也逐渐损失。由 MEF 得到的不同不规则区域的腐蚀深度<sup>[16]</sup>引起的 Von Mises 应力随时间变化的近似模型如图 4 所示。结果表明, 法兰和对焊接的 Von Mises 应力增长缓慢, 弯头处的 Von Mises 应力增长较快, 这就解释了腐蚀缺陷处耐蚀性较差的原因。将管道寿命模拟时间缩短为 50 年, 使其能承受工作压力。

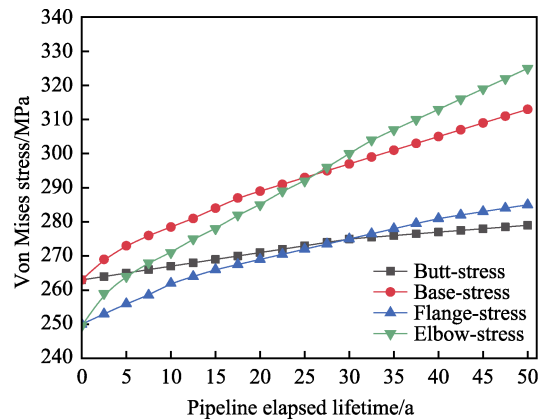


图 4 腐蚀深度与 Von Mises 应力的关系  
Fig.4 Relationship between corrosion depth and Von Mises stress

## 3 可靠性分析

油气管道不规则区可靠性分析的目的是通过了解其失效概率随时间的演化, 更好地管理这些结构的运行安全性。它还测定了设计变更对管道完整性的影响, 以使新产品合格, 并提高其使用寿命期内的性能。为了确定管道的可靠性, 采用基于变量随机抽样的蒙特卡罗模拟方法<sup>[17]</sup>计算管道的失效概率。按其分布, 考虑了大量的模拟。基于大数理论, 可以用失效样本数  $N_f$  与抽芯总数  $N$  的比值来计算失效概率<sup>[3]</sup>:

$$P_f = \frac{N_f}{N} \quad (9)$$

### 3.1 极限状态函数

为了计算腐蚀毛刺管道各不规则区域的失效概率, 必须定义极限状态函数。相应的极限状态函数<sup>[12]</sup>为:

$$G(t) = \sigma_y - \sigma_v \quad (10)$$

式中:  $\sigma_v$  为 Von Mises 应力;  $\sigma_y$  为屈服强度。  $G(t) > 0$  时, 结构是完整的。通过替换每个不规则区域的应力表达式, 得到极限状态函数, 见表 3。  $\delta$  为模型误差系数,  $\alpha$  为残余应力变化因素。应该注意的是, 错误经常发生在结构退化建模中。因此, 误差系数  $\delta$  在这个模型中可以解释为这些错误的措施。

腐蚀管道中各不规则区域的失效概率<sup>[18]</sup>为:

$$f_{(t)} = P[G(x_i, t) \leq 0] = \phi(-\beta(t)) \quad (11)$$

表 3 各区域的极限状态函数  
Tab.3 The limit state function of each zone

Irregular zone	Limit state function
Base metal	$G(t)=\sigma_y - \delta \left\{ p \cdot \left[ (5d(t))^2 + 41.5d(t) + 1062.5 \right] + \alpha \cdot \delta_{Rs1} \right\}$
Butt welding zone	$G(t)=\sigma_y - \delta \left\{ p \cdot \left[ (-0.7d(t))^2 + 13.29d(t) + 1055.2 \right] + \alpha \cdot \delta_{Rs2} \right\}$
Flange zone	$G(t)=\sigma_y - \delta \left\{ p \cdot \left[ (1.3d(t))^2 + 79.56d(t) + 990.57 \right] + \alpha \cdot \delta_{Rs3} \right\}$
Elbow zone	$G(t)=\sigma_y - \delta \left\{ p \cdot \left[ (0.93d(t))^2 + 21.2d(t) + 1002 \right] + \alpha \cdot \delta_{Rs4} \right\}$

### 3.2 数值应用

对管道腐蚀的不规则区进行数值模拟,是为了揭示腐蚀现象和残余应力对管道可靠性的影响<sup>[19]</sup>。假定管道参数如下:外直径为  $D$ ,名义壁厚为  $e_0$ ,内部压力为  $P^{[20]}$ ,材料为管线钢 X70,屈服强度为  $\sigma_y$ ,数据见表 4。随机变量的分布视为正常。

表 4 管道模型的输入数据  
Tab.4 Input data of the pipeline model

Variable	Corrosion rate	Mean value	Coefficient of variation
Diameter/mm		508	—
Wall thickness/mm		9.5	—
Yield pressure/MPa		485	0.07
Internal pressure/MPa		4	0.25
Corrosion rate $K$	Low	0.16	0.016
	Moderate	0.37	0.037
	High	0.67	0.067
Corrosion parameters $N$		0.53	—
Model error $\sigma$		1	0.15
Residual stress variation factor $\alpha$		1	0.2

### 4 分析与讨论

为了研究腐蚀和残余应力对管道的影响,对三个不规则区域(弯头区域、对接焊区和法兰区)与规则区域进行了对比。在不同的腐蚀速率下,管道失效概率随服役年限(0~50年)的变化如图 5 所示。

在腐蚀速率较低的情况下,管道三个奇异区域的失效概率比常规区域大得多。此外,与其他两个区域(弯头和对接焊区域)相比,法兰区域具有更大的失效概率,对接焊缝区的失效概率最低。

在中等腐蚀速率下,当管道使用年限为 0~10 年时,弯头、对接焊、法兰三个不规则区域的失效概率始终高于常规区域。相比于其他两个不规则区域,对接焊区的失效概率最小。在管道使用寿命超过 10 年的情况下,弯头的失效概率变得尤为重要。最小的概率总是出现在规则区域。比较三种区域的失效概率发现,法兰区域是最高的。研究还发现,在中等腐蚀条件下,对接焊缝区和规则区的两种失效概率更接近。

在高腐蚀速率下,对于使用寿命>10 年的管道,最大的失效概率总是出现在法兰区,弯头区域的失效概率增长得非常快。对于其他三个区域(基础区域、弯头区域和对接焊区域),发现基础区域的失效概率大于其他两个区域。与其他腐蚀速率相比,在腐蚀速率较高的情况下,基础区域和对接焊区的失效概率更接近。

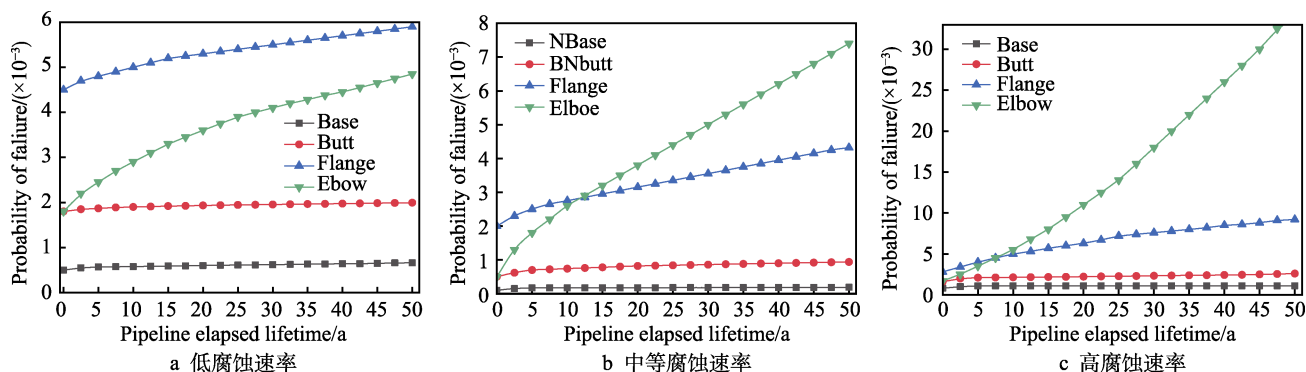


图 5 不同腐蚀速率下的失效概率

Fig.5 Failure probability under different corrosion rates: a) low corrosion rate; b) moderate corrosion rate; c) high corrosion rate

不规则腐蚀区域的失效概率随时间的演化规律如图 6 和图 7 所示。图 6 展示了恒定压力下腐蚀区域的

失效概率,图 7 展示了常数  $a$  不同取值下的失效概率,以上讨论考虑了模型中不同参数可能发生的随机变化。

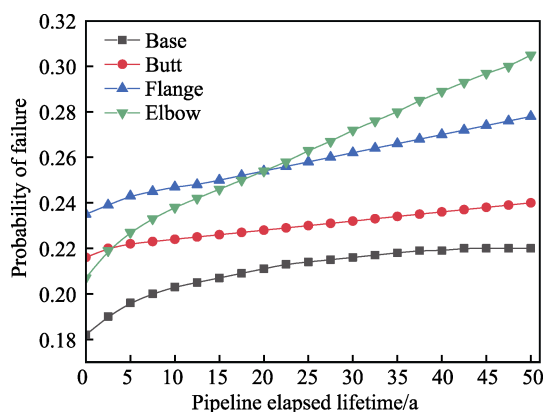
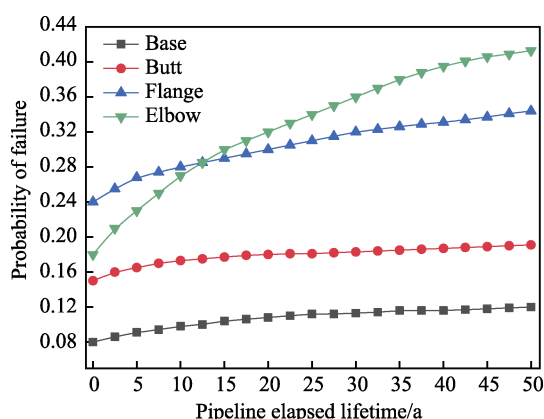


图 6 恒定压力下的失效概率

Fig.6 Failure probability under a constant pressure

图 7 不同常数  $a$  取值下腐蚀区域的失效概率Fig.7 Probability of the corrosion region under the change of the value of constant  $a$ 

## 5 结论

本文研究了腐蚀和残余应力对管道腐蚀不规则区结构可靠性的影响,采用概率的方法对管道不规则区域的可靠性进行了研究,利用蒙特卡罗模拟计算任意奇异区域的失效概率。通过数值分析,明确了有无残余应力时腐蚀奇异带的可靠性。主要结论如下:

1) 不规则区域的可靠性受腐蚀和残余应力的影响明显大于规则区域。

2) 考虑不同区域的残余应力,破坏概率随残余应力的增加而增加。考虑到不同区域的残余应力,特别是高腐蚀速率时,失效概率增加,而低腐蚀速率时,残余应力对失效概率的敏感性降低。

3) 法兰的可靠性更受有无残余应力腐蚀的影响,常规区的可靠性最好。

研究表明,在对管线进行检测时,需要对不规则区域给予更多的重视,以便更好地管理管线的使用寿命。

### 参考文献:

- [1] LAYOUNI M, HAMDI M S, TAHAR S. Detection and sizing of metal-loss defects in oil and gas pipelines using pattern-adapted wavelets and machine learning[J]. Appl soft comput, 2017, 52: 247-261.
- [2] RAJABIPOUR A, MELCHERS R E. A numerical study of damage caused by combined pitting corrosion and axial stress in steel pipes[J]. Corros sci, 2013, 76: 292-301.
- [3] CHENG A, CHEN N. An extended engineering critical assessment for corrosion fatigue of subsea pipeline steels[J]. Eng fail anal, 2018, 84: 262-275.
- [4] WANG S, ZHANG D, CHEN K, et al. Corrosion fatigue behaviors of steel wires used in coalmine[J]. Materials design, 2014, 53: 58-64.
- [5] LIN Y C, DENG J, JIANG Y, et al. Effects of initial  $\delta$  phase on hot tensile deformation behaviors and fracture characteristics of a typical Ni-based superalloy[J]. Materials design, 2014, 55: 949-957.
- [6] ZHU X K, LEIS B N. Evaluation of burst pressure prediction models for line pipes[J]. International journal of pressure vessels & piping, 2012, 89: 85-97.
- [7] ZHOU W, HUANG G X. Model error assessments of burst capacity models for corroded pipelines[J]. International journal of pressure vessels & piping, 2012, 99-100: 1-8.
- [8] LI Q, SUN C, HUANG Z, et al. Reliability analysis of Lan Chengyu corroded pipeline with associated defects[J]. Petroleum, 2015(1): 244-250.
- [9] TEIXEIRA A P, SOARES C G, NETTO T A, et al. Reliability of pipelines with corrosion defects[J]. International journal of pressure vessels & piping, 2008, 85: 228-237.
- [10] VOIGT C, STORM J, ABENDROTH M, et al. The influence of the measurement parameters on the crushing strength of reticulated ceramic foams[J]. J mater res, 2013, 28: 2288-2299.
- [11] ZHEMANYUK P D, PETRIK I A, CHIGILEYCHIK S L. Using orbital welding in the manufacture and repair of thin wall pipelines[J]. Welding international, 2016, 30: 649-652.
- [12] 高爽, 樊星宇, 巩晓龙. 沟槽状凹陷应力集中区域的有限元分析[J]. 电子制作, 2014(4): 52-53.  
GAO Shuang, FAN Xing-yu, GONG Xiao-long. Finite element analysis of stress concentration area in groove depression[J]. Practical electronics, 2014(4): 52-53.
- [13] 姜晓红, 洪险峰, 郑景娜, 等. 油气管道凹陷的评价与管理[J]. 长江大学学报(自科版), 2014(5): 118-121.  
JIANG Xiao-hong, HONG Xian-feng, ZHENG Jing-na, et al. Evaluation and management of oil and gas pipeline sag[J]. Journal of Yangtze University (natural science edition), 2014(5): 118-121.
- [14] BOHORA S B, CAO Q V. Prediction of tree diameter growth using quantile regression and mixed-effects models[J]. Forest ecology & management, 2014, 319: 62-66.

- cation[J]. Chemical industry and engineering progress, 2016, 35(s1): 188-194.
- [38] LAI C W, LAUA K S, CHOUB P M, et al. CdSe/TiO<sub>2</sub> nanotubes for enhanced photoelectrochemical activity under solar illumination: Influence of soaking time in CdSe bath solution[J]. Chemical physics letters, 2019, 714: 6-10.
- [39] WANG X T, WEI Q Y, ZHANG L, et al. CdTe/TiO<sub>2</sub> nanocomposite material for photogenerated cathodic protection of 304 stainless steel[J]. Materials science and engineering: B, 2016, 208: 22-28.
- [40] ZHANG J J, ZIA U R, ZHENG Y B, et al. Nanoflower like SnO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> nanotubes composite photoelectrode for efficient photocathodic protection of 304 stainless steel[J]. Applied surface science, 2018, 457: 516-521.
- [41] BU Y Y, CHEN Z Y, AO J P, et al. Study of the photoelectrochemical cathodic protection mechanism for steel based on the SrTiO<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> composite[J]. Journal of alloys and compounds, 2018, 731: 1214-1224.
- [42] WANG H, LIANG W, ZHANG W, et al. Preparation and photoelectric properties of Pt/TiO<sub>2</sub> nanotube electrodes by a pre-doping method[J]. Thin solid films, 2018, 653: 101-106.
- [43] 于濂清, 张志萍, 周小岩, 等. Ag 改性 TiO<sub>2</sub> 纳米管阵列的光电化学性能研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015(3): 183-187.
- YU Lian-qing, ZHANG Zhi-ping, ZHOU Xiao-yan, et al. Photoelectrochemical properties of Ag-TiO<sub>2</sub> nanotube arrays[J]. Journal of China University of Petroleum(natural science edition), 2015(3): 183-187.
- [44] YANG X, WANG W, WU L, et al. Effect of confinement of TiO<sub>2</sub> nanotubes over the Ru nanoparticles on fischer-tropsch synthesis[J]. Applied catalysis A: General, 2016, 526: 45-52.
- [45] 李一平. 硼、钨的改性方式对 TiO<sub>2</sub> 纳米管光催化性能的影响[J]. 中国陶瓷, 2018, 54(10): 11-16.
- LI Yi-ping. Effect of boron and ruthenium modifying methods on the photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> nanotubes[J]. Chinese ceramics, 2018, 54(10): 11-16.
- [46] TIAN H W, SHEN K, HU X Y, et al. N, S co-doped graphene quantum dots-graphene-TiO<sub>2</sub> nanotubes composite with enhanced photocatalytic activity[J]. Journal of alloys and compounds, 2017, 691: 369-377.
- [47] QIAN B, DAI H, TANG S, et al. Enhanced photocathodic protection performance of graphene quantum dots sensitized TiO<sub>2</sub> nanotube arrays for 304 stainless steel[J]. Optics, 2019, 178: 128-134.
- [48] 程修文, 刘惠玲, 王璞, 等. 石墨烯薄膜修饰 TiO<sub>2</sub> 纳米管光电极制备及性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(6): 30-33.
- CHENG Xiu-wen, LIU Hui-ling, WANG Pu, et al. Preparation and performance of graphene film decorated TiO<sub>2</sub> nano-tubes photoelectrode[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(6): 30-33.
- [49] 曹艳敏, 张华荣, 马兴平, 等. TiO<sub>2</sub>/氧化石墨烯复合纳米管的制备与光催化性能[J]. 功能材料, 2015, 46(s2): 155-159.
- CAO Yan-min, ZHANG Hua-rong, MA Xing-ping, et al. Preparation and photocatalytic properties of TiO<sub>2</sub>/grapheme oxide composite nanotubes[J]. Functional materials, 2015, 46(s2): 155-159.
- [50] NOOTHONGKAEW S, THUMTHAN O, AN K S. Minimal layer graphene/TiO<sub>2</sub> nanotube membranes used for enhancement of UV photodetectors[J]. Materials letters, 2018, 218: 274-279.

(上接第 283 页)

- [15] LIU D, LI T, LIANG D. Incorporating logistic regression to decision-theoretic rough sets for classifications[J]. Int j approx reason, 2014, 55: 197-210.
- [16] VALOR A, CALEYO F, HALLEN J M, et al. Reliability assessment of buried pipelines based on different corrosion rate models[J]. Corros sci, 2013, 66: 78-87.
- [17] 封子艳, 南蓓蓓, 杨志刚, 等. 不同尺寸双腐蚀缺陷管道剩余强度研究[J]. 油气田环境保护, 2015, 25(3): 4-8.
- FENG Zi-yan, NAN Bei-bei, YANG Zhi-gang, et al. Residual strength of pipeline with dual corrosion defects with different sizes[J]. Oil and gas field environmental protection, 2015, 25(3): 4-8.
- [18] 刘啸奔, 张宏, 唐凯, 等. 基于有限元的含凹陷 X60 管道极限压力研究[C]// 2013 中国国际管道会议论文集. 北京: 北京科技大学腐蚀与防护中心, 2013.
- LIU Xiao-ben, ZHANG Hong, TANG Kai, et al. Finite element based research on the ultimate pressure of sunken X69 pipeline [C]// China international Pipeline Conference 2013. Beijing: The Corrosion and Protection Center, University of Science & Technology Beijing, 2013.
- [19] 张日向, 顾孜昌, 姜萌. 考虑双腐蚀缺陷影响的内压钢管有限元分析[J]. 钢结构, 2010, 25(2): 79-81.
- ZHANG Ri-xiang, GU Zi-chang, JIANG Meng. Finite element analysis on inside pressure pipeline with double corrosion defects[J]. Steel structure, 2010, 25(2): 79-81.
- [20] 王勇, 李洋, 孙世斌, 等. 腐蚀缺陷管道剩余强度 ANSYS 有限元模拟可行性研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2014(3): 12-16.
- WANG Yong, LI Yang, SUN Shi-bin, et al. Feasibility of finite element analysis on residual strength of pipeline with corrosion defects[J]. Ordnance material science and engineering, 2014(3): 12-16.