

文章编号: 1007-7294(2026)02-0295-12

不规则腐蚀缺陷管道的极限弯矩研究

罗韦宏¹, 苏宣合², 苏冠力¹, 卢 苇¹

(1. 广西大学 机械工程学院, 南宁 530004; 2. 中国石油化工股份有限公司 天然气分公司, 北京 100029)

摘要: 管道不规则腐蚀缺陷与管道失效之间的复杂关系让管道安全评估面临巨大挑战。为研究不规则腐蚀缺陷参数与管道失效弯矩之间的关系, 本文首先基于净截面垮塌准则, 建立了不规则腐蚀缺陷管道在内压、轴向力和弯矩单独或组合作用下的极限弯矩理论计算模型; 然后通过文献的实验数据和有限元分析验证了该模型的准确性和可靠性; 最后以 API-5L-X80 管线钢为例, 分析了三种工况下缺陷形状、深度比、长度比以及深浅缺陷相对位置对不规则腐蚀缺陷管道极限弯矩的影响。研究表明: 管道的极限弯矩与腐蚀缺陷的形状有关, 考虑腐蚀缺陷形状的极限弯矩计算结果可避免低估剩余强度; 不规则腐蚀缺陷的深度比(或长度比)的增加会降低管道的极限弯矩, 在深度比(或长度比)一定时, 腐蚀缺陷的深度(或长度)越大, 极限弯矩减小的速率就越快, 此外, 添加内压和轴向力载荷也会使极限弯矩减小; 当深腐蚀缺陷位于浅腐蚀缺陷的正中位置时, 极限弯矩最小, 随着深腐蚀缺陷从浅腐蚀缺陷的正中位置向边缘位置移动, 管道的极限弯矩逐渐增大但变化不明显。本文提出了一种物理概念清晰、计算便捷的不规则腐蚀缺陷管道失效评估方法, 丰富和发展了管道安全评定的相关理论。

关键词: 管道; 不规则腐蚀缺陷; 组合荷载; 极限弯矩

中图分类号: TB125 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2026.02.010

Research on ultimate bending moments of pipelines with irregular corrosion defects

LUO Wei-hong¹, SU Xuan-he², SU Guan-li¹, LU Wei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Natural Gas Division, Sinopec Corporation, Beijing 100029, China)

Abstract: The complex relationship between irregular corrosion defects and pipeline failure presents substantial challenges for pipeline safety assessments. To investigate the interaction between irregular corrosion defect parameters and pipeline failure bending moments, a theoretical calculation model for the ultimate bending moment of pipelines with irregular corrosion defects was first established under the individual or combined effects of internal pressure, axial force, and bending moment, based on the Net Section Collapse criterion. Then, the accuracy and reliability of the proposed model were verified through experimental data from the literature and finite element analyses. Finally, taking API 5L X80 pipeline steel as an example, the impacts of defect shape, depth ratio, length ratio, and relative position of shallow and deep defects on the ultimate bending moment of pipelines with irregular corrosion defects were analyzed under three different working conditions. The research results indicate that the ultimate bending moment of the pipeline is related to the shape of the corrosion defect. Considering the shape of the corrosion defect in the

收稿日期: 2025-07-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52066002); 广西自然科学基金资助项目(2019GXNSFAA185024)

作者简介: 罗韦宏(1998-), 男, 硕士研究生; 卢 苇(1974-), 博士, 教授, 通讯作者, E-mail: luwei@gxu.edu.cn。

calculation of the ultimate bending moment can avoid the underestimation of residual strength. The increase in the depth length ratio of irregular corrosion defects reduces the ultimate bending moment of the pipeline. When the depth length ratio remains constant, the larger the depth/length of the corrosion defect, the faster the rate of decrease of the ultimate bending moment. Additionally, adding internal pressure and axial force loads also reduces the ultimate bending moment. When a deep corrosion defect is located in the center of a shallow corrosion defect, the ultimate bending moment reaches its minimum. As the deep corrosion defect moves from the center towards the edge of the shallow corrosion defect, the ultimate bending moment of the pipeline gradually increases but the change is not significant. This paper presents a failure assessment method with the merits of clear physical concept and convenient calculation for pipelines with irregular corrosion defects, which enriches and develops the relevant theories of pipeline safety assessment.

Key words: pipeline; irregular corrosion defect; combined load; ultimate bending moment

0 引言

管道因其经济、安全、高效等特点,在传统的油气运输中得到广泛的应用^[1-3]。随着海洋油气资源的开发利用,越来越多的管道被敷设在海底;此外,绿色低碳能源技术的发展也使管道大量用于液化天然气、氢气以及掺氢天然气的运输^[4-6]。在服役期间,海底管道不仅需要承受输送介质的内部压力,还会受到地面运动和环境变化(如温差、海水流动)产生的轴向力和弯矩载荷,导致管道产生较大的塑性变形,变形量可达3%左右^[7]。然而,由于输送介质和环境因素的影响,管道不可避免地会出现腐蚀缺陷。腐蚀缺陷会导致管道整体或局部减薄,从而降低其强度,给管道带来巨大的安全隐患^[8]。为防止油气泄漏事故,提高海上绿色低碳能源运输的安全性,有必要对腐蚀缺陷管道进行全面合理的剩余承载力评估^[9]。国内外学者针对腐蚀管道失效进行了大量实验研究及有限元分析。然而,实际管道的腐蚀形状和大小具有任意性,且其承受的载荷也不尽相同,这导致实验成本过高,而有限元分析也不可能涵盖所有实际情景,通常在建模计算时均需要合理的假设以简化问题并突出实质,故这些研究的最终目标大多是建立计算方法和经验方程,以满足工程需要^[10-12]。目前,已基于腐蚀简化模型提出了一系列计算腐蚀管道剩余强度的标准规范,如ASME-B31G方法^[13]、RSTRENG 0.85 dL方法^[14]和DNV-RP-F101方法^[15]等。然而,它们大多只适用于因内压引起的管道失效分析,未考虑轴向力和弯矩对管道失效的影响,对腐蚀管道失效弯矩载荷的研究仍不充分。此外,一些研究在分析中忽视了一般情况下缺陷形状较复杂的特征,错误地将不规则腐蚀缺陷简化为规则腐蚀缺陷,从而导致管道极限载荷估算结果出现较大误差^[16]。

管道的失效模式主要包括断裂失效、塑性失效和疲劳失效^[17]。油气运输管道多采用韧性较高的延性材料,存在腐蚀缺陷的管道主要发生塑性失效,因此塑性极限荷载成为评估其承载能力和结构完整性的关键指标。Kanninen等^[18]提出的净截面垮塌(Net Section Collapse, NSC)准则是现今应用最广泛的缺陷管道失效评估方法之一,该准则认为存在缺陷的管道达到全截面塑性状态时,截面上的应力呈均匀分布,且此时应力值的大小等于管材的流变应力。进一步地,Miller^[19]总结了存在周向贯通裂缝和部分贯通内表面裂缝的管道在轴向力、弯矩等复合载荷作用下的极限载荷。金志江等^[20]推导了复杂载荷作用下含未焊透缺陷的压力管道塑性极限载荷理论解,并验证了利用净截面垮塌准则计算管道理论塑性极限荷载是可靠的。此外,Huang等^[21]采用沙堆类比法计算了含周向焊接缺陷的薄壁管道的塑性极限扭矩,推导了含焊接缺陷管道在轴向力、扭矩和弯矩共同作用下塑性极限载荷的统一理论解,并指出净截面垮塌准则也适用于含体积缺陷油气管道的安全性评价。

尽管人们对净截面垮塌准则进行了广泛而深入的研究,但目前尚未建立评价不规则腐蚀缺陷的计算模型。本文基于净截面垮塌准则,提出一种针对不规则腐蚀缺陷管道的极限弯矩计算方法;以

API-5 L-X80 管线钢为例,探讨腐蚀缺陷参数对管道极限弯矩的影响规律,旨在为不规则腐蚀缺陷管道的安全评定提供理论指导。

1 不规则腐蚀缺陷管道极限弯矩的计算模型构建

由于管道输送介质的具体情况复杂多变,腐蚀缺陷的深度往往并非恒定,实际检测发现,管道腐蚀缺陷多表现为不规则形状,其特征为存在一个或多个突起峰的凹陷轮廓^[10],如图1所示。为深入研究腐蚀缺陷管道的失效载荷与腐蚀几何形状之间的关系,通常采用缺陷最大深度 d 与平均深度 d_{ave} 的比值作为缺陷不规则程度的评价标准^[22],即

$$\frac{d}{d_{ave}} = \frac{d_d/d_s}{1 + (d_d/d_s - 1)(L_d/L_s)} \quad (1)$$

式中: d_d 为深腐蚀缺陷深度(mm), d_s 为浅腐蚀缺陷深度(mm), L_d 为深腐蚀缺陷周向长度(mm), L_s 为浅腐蚀缺陷周向长度(mm)。

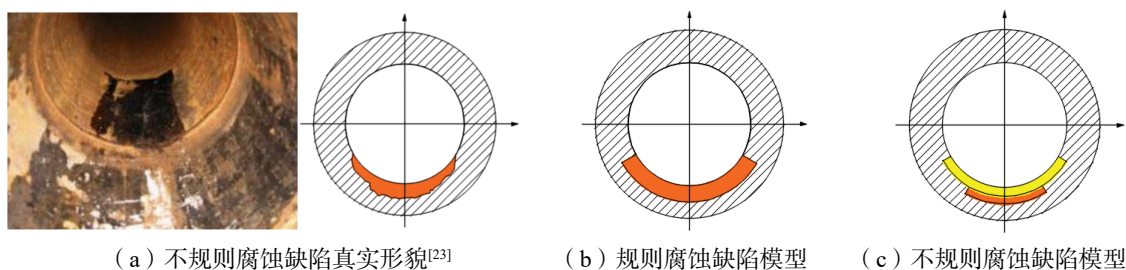


图1 管道腐蚀缺陷示意图

Fig.1 Schematic diagram of corrosion defects for pipelines

当 $1.0 \leq d/d_{ave} < 1.2$ 时,缺陷属于规则形状缺陷;当 $d/d_{ave} \geq 1.2$ 时,缺陷被归类为不规则形状缺陷^[22]。在实际研究中,通常采用一个浅腐蚀缺陷中包含一个深腐蚀缺陷的管道缺陷模型来分析不规则腐蚀缺陷,如图2所示。

依据净截面垮塌准则,可作如下定义和简化^[20,23]: (1)管道材料视为理想弹塑性材料,其屈服应力等于流变应力 σ_0 ,取屈服强度 σ_y 和抗拉强度 σ_u 的平均值,即 $\sigma_0 = (\sigma_y + \sigma_u)/2$; (2)管道在外载荷作用下达至塑性极限时,管道截面形状不发生变化; (3)由于重力的作用,腐蚀常发生在管道内壁底部并呈对称分布,因此假设管道首先发生对称分布的浅腐蚀,而深腐蚀则在浅腐蚀的基础上发展而来,深腐蚀缺陷可在浅腐蚀缺陷中移动,在计算中不考虑腐蚀缺陷沿管道轴向的变化。基于上述分析,参考图2可推导不规则腐蚀缺陷管道极限弯矩的计算模型。

分别以深腐蚀缺陷的对称轴 y 和浅腐蚀缺陷的对称轴 y' 为基准建立分析不规则腐蚀缺陷管道应力的坐标系。当管道同时承受内压 P 、轴向力 N 以及弯矩 M 的共同作用时,将弯矩 M 分解到 y 轴和 z 轴,有

$$M_y = M \sin \phi, \quad M_z = M \cos \phi \quad (2)$$

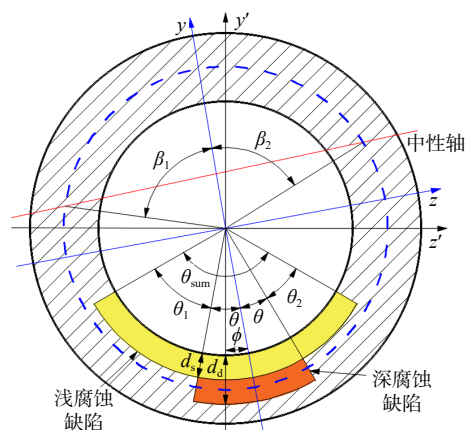


图2 不规则腐蚀缺陷管道极限弯矩计算分析示意图

Fig.2 Schematic diagram of pipelines with irregular corrosion defects for ultimate bending moments calculation and analysis

式中: ϕ 为深腐蚀缺陷对称轴 y 与浅腐蚀缺陷对称轴 y' 的夹角 ($^\circ$), M 为弯矩载荷 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)。

在内压 P 、轴向力 N 以及弯矩 M 的共同作用下, 管道的周向应力产生于内压 P , 管道的周向应力 σ_θ 为

$$\sigma_\theta = \left(R - \frac{t}{2}\right) \frac{P}{t} \quad (3)$$

式中: t 为管道壁厚 (mm), R 为管道平均半径 (mm), P 为管道承受的内压 (MPa)。

当管道在外载荷作用下处于塑性极限时, 中性轴将管道缺陷截面划分为拉伸侧 (中性轴以上且正应力为拉应力) 和压缩侧 (中性轴以下且正应力为压应力), 考虑到截面上的等效应力等于流变应力, 即

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma - \sigma_\theta)^2 + \sigma^2 + \sigma_\theta^2]} = \sigma_0 \quad (4)$$

式中: σ 为轴向正应力 (MPa), σ_{eq} 为等效应力 (MPa)。

由式(3)和(4)计算得

$$\sigma_a = \frac{\sigma_\theta + \sqrt{4\sigma_0^2 - 3\sigma_\theta^2}}{2} \quad (5)$$

$$\sigma_b = \frac{\sigma_\theta - \sqrt{4\sigma_0^2 - 3\sigma_\theta^2}}{2} \quad (6)$$

式中: σ_a 为中性轴以上拉伸侧的拉应力 (MPa), σ_b 为中性轴以下压缩侧的压应力 (MPa)。

当管道达到塑性极限时, 由管道的轴向力平衡得

$$(2\pi - \beta_1 - \beta_2) R t \sigma_a - 2 \left(R - \frac{t}{2} + \frac{d_d}{2}\right) d_d \theta \sigma_a - \left(R - \frac{t}{2} + \frac{d_s}{2}\right) d_s (\theta_1 + \theta_2) \sigma_a + (\beta_1 + \beta_2) R t \sigma_b = \pi R_i^2 P + N \quad (7)$$

式中: β_1 、 β_2 分别为 y 轴左、右侧中性轴与 y 轴的夹角 ($^\circ$), 见图 2, θ 为深腐蚀缺陷所对的半角 ($^\circ$), θ_1 、 θ_2 分别为 y 轴左、右侧浅腐蚀缺陷区 (扣除与深腐蚀缺陷重叠部分) 所对的圆心角 ($^\circ$), R_i 为管道内径 (mm), N 为轴向力 (kN)。

化简式(7)得

$$\beta_1 + \beta_2 = C_1 [\pi - C_2 \theta - C_3 (\theta_1 + \theta_2) - C_4] \quad (8)$$

其中, $C_1 = \frac{2\sigma_a}{\sigma_a - \sigma_b}$, $C_2 = \frac{d_d}{t} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{t}{R} + \frac{1}{2} \frac{d_d}{R}\right)$, $C_3 = \frac{d_s}{2t} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{t}{R} + \frac{1}{2} \frac{d_s}{R}\right)$, $C_4 = \frac{\pi R_i^2 P + N}{2 R t \sigma_a}$

当管道达到塑性极限时, 管道绕 y 轴与 z 轴的力矩平衡方程分别为

$$\begin{aligned} & \int_{\theta}^{\pi-\beta_1} \sigma_a R^2 t \sin \alpha d\alpha - \int_{\theta}^{\theta+\theta_1} \sigma_a \left(R - \frac{t}{2} + \frac{d_s}{2}\right)^2 d_s \sin \alpha d\alpha - \int_{\theta}^{\pi-\beta_2} \sigma_a R^2 t \sin \alpha d\alpha + \\ & \int_{\theta}^{\theta+\theta_2} \sigma_a \left(R - \frac{t}{2} + \frac{d_s}{2}\right)^2 d_s \sin \alpha d\alpha + \int_0^{\beta_1} \sigma_b R^2 t \sin \alpha d\alpha - \int_0^{\beta_2} \sigma_b R^2 t \sin \alpha d\alpha = M \sin \phi \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_a R^2 t \cos \alpha d\alpha - \int_0^{\frac{\pi}{2}-\beta_1} \sigma_a R^2 t \sin \alpha d\alpha - \int_0^{\frac{\pi}{2}-\beta_2} \sigma_a R^2 t \sin \alpha d\alpha - \int_0^{\beta_1} \sigma_b R^2 t \cos \alpha d\alpha - \int_0^{\beta_2} \sigma_b R^2 t \cos \alpha d\alpha - \\ & \int_{\theta}^{\theta+\theta_1} \sigma_a \left(R - \frac{t}{2} + \frac{d_s}{2}\right)^2 d_s \cos \alpha d\alpha - \int_{\theta}^{\theta+\theta_2} \sigma_a \left(R - \frac{t}{2} + \frac{d_s}{2}\right)^2 d_s \cos \alpha d\alpha - 2 \int_0^{\theta} \sigma_a \left(R - \frac{t}{2} + \frac{d_d}{2}\right)^2 d_d \cos \alpha d\alpha = M \cos \phi \end{aligned} \quad (10)$$

化简式(9)和(10)得

$$R^2 t (\sigma_a - \sigma_b) (\cos \beta_1 - \cos \beta_2) + \frac{4}{d_s} C_3^2 R^2 t^2 \sigma_a [\cos (\theta + \theta_1) - \cos (\theta + \theta_2)] = M \sin \phi \quad (11)$$

$$R^2 t (\sigma_a - \sigma_b) (\sin \beta_1 + \sin \beta_2) + \frac{4}{d_s} C_3^2 R^2 t^2 \sigma_a [2 \sin \theta - \sin (\theta + \theta_1) - \sin (\theta + \theta_2)] - \frac{2}{d_d} C_2^2 R^2 t^2 \sigma_a \sin \theta = M \cos \phi \quad (12)$$

若以无缺陷管道的极限弯矩 $M_0 = 4 R^2 t \sigma_0$ 为比较基准, 引入无量纲应力 $n_\theta = \sigma_\theta / \sigma_0$ 和无量纲弯矩

$n_m=M/M_0$, 那么由式(12)可得

$$n_m = \frac{1}{4\cos\phi} \left\{ (\sin\beta_1 + \sin\beta_2) \sqrt{4-3n_\theta^2} - \frac{1}{d_d} C_2^2 t \left(n_\theta + \sqrt{4-3n_\theta^2} \right) \sin\theta + \frac{2}{d_s} C_3^2 t \left(n_\theta + \sqrt{4-3n_\theta^2} \right) [2\sin\theta - \sin(\theta+\theta_1) - \sin(\theta+\theta_2)] \right\} \quad (13)$$

根据式(8)、(11)和(13), 可推导出不同载荷作用下不规则腐蚀缺陷管道的极限弯矩。例如, 当 $\sigma_a=-\sigma_b$ 、 $n_\theta=0$ 、 $\phi=0$ 、 $C_4=0$ 时, 可得在弯矩(M)工况下深腐蚀缺陷处于浅腐蚀缺陷正中位置时的极限弯矩为

$$n_m = \frac{1}{2} (\sin\beta_1 + \sin\beta_2) - \frac{1}{2d_d} C_2^2 t \sin\theta + \frac{1}{d_s} C_3^2 t [2\sin\theta - \sin(\theta+\theta_1) - \sin(\theta+\theta_2)] \quad (14)$$

此时有

$$\beta_1 = \beta_2 = \frac{C_1 [\pi - C_2 \theta - C_3 (\theta_1 + \theta_2)]}{2} \quad (15)$$

当 $N=0$ 、 $\phi=0$ 时, 可求得在内压+弯矩($P+M$)联合作用工况下, 深腐蚀缺陷处于浅腐蚀缺陷正中位置时的极限弯矩; 当 $\phi=0$ 时, 也可求得在内压+轴向力+弯矩($P+N+M$)工况下深腐蚀缺陷处于浅腐蚀缺陷正中位置时的极限弯矩, 这两种情况下的弯矩均按式(13)计算, 此时有

$$\beta_1 = \beta_2 = \frac{C_1 [\pi - C_2 \theta - C_3 (\theta_1 + \theta_2) - C_4]}{2} \quad (16)$$

2 理论计算模型的验证

2.1 理论计算与实验数据的对比分析

本文选取 Miyazaki^[24] 的腐蚀缺陷管道四点弯矩实验数据来验证所建立的理论计算模型(弯矩工况)。该实验以管道断裂时的弯矩为管道失效弯矩, 利用净截面法建立模型的估算结果与之比较会偏小, 因此可选适当的安全系数^[21,24], 本文取 1.2。实验值与计算值如表 1 所示。分析发现, 基于相关规范计算的结果与实验结果之间存在较大误差, 平均相对误差为 20.75%; 而有限元模拟计算结果和基于本文理论模型计算的结果, 两者与实验结果之间的相对误差几乎都小于 10%, 平均相对误差分别为 3.25%、6.55%。这说明有限元模拟方法和本文建立的理论计算模型均能够满足含腐蚀缺陷管道安全评估的实际工程要求, 且二者在一定程度上都优于现行规范的计算方法; 同时, 相较于有限元模拟方法, 本文建立的理论计算模型物理意义明确且计算过程简洁。

表 1 弯矩工况下极限弯矩的实验值与计算值对比

Tab.1 Comparison between experimental values and calculated values for ultimate bending moments under action of bending moment

编号	管材	R/mm	t/mm	D/mm	$\theta_{\text{sum}}/^\circ$	实验值 ^[24] / ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	API RP-579-1/ ASME FFS-1 ^[25]		有限元模拟		本文理论模型	
							计算值/	相对	计算值/	相对	计算值/	相对
							($\text{kN}\cdot\text{m}$)	误差/%	($\text{kN}\cdot\text{m}$)	误差/%	($\text{kN}\cdot\text{m}$)	误差/%
1	STS410	52.85	8.6	1.7	180	39.6	35.40	10.61	40.15	1.39	42.72	7.88
2	STS410	52.85	8.6	4.3	180	38.4	27.50	28.39	35.92	6.46	34.87	9.19
3	STS410	52.85	8.6	6.9	180	29.5	16.67	43.49	30.91	4.78	33.67	14.14
4	STS410	52.85	8.6	3.0	180	38.8	31.75	18.17	36.83	5.08	38.64	0.41
5	STS410	52.85	8.6	4.3	90	37.5	32.13	14.32	37.25	0.67	39.48	5.28
6	STS410	52.85	8.6	4.3	60	38.6	34.37	10.96	39.86	3.26	41.76	8.19
7	STS410	52.85	8.6	6.9	60	38.1	30.74	19.32	37.67	1.13	37.80	0.79

注: 相对误差=(实验值-本文理论模型计算值或现行规范计算值、或有限元模拟计算值)/实验值 $\times 100\%$

2.2 理论计算与有限元模拟的对比分析

利用管道的实际失效数据建立管道失效评估模型无疑是最理想的,但目前尚缺乏足够的实际管道失效数据,而实验又难以完全模拟管道的实际运行情况,考虑到当前有限元法在解决涉及非线性力学方面的问题时具有显著优势,故本文通过有限元法模拟不规则腐蚀缺陷管道在不同载荷工况下的极限弯矩,以进一步验证所建立的理论计算模型。

2.2.1 有限元建模与模拟分析

API-5 L-X80 管线钢广泛用于输送石油、天然气、氢气等的管道制造,因此本文以其为研究对象。管道的外径 D_0 为 457.2 mm、壁厚 t 为 9.53 mm,材料的弹性模量 $E=200$ GPa、泊松比 $\nu=0.3$ 、屈服强度为 534.1 MPa、极限抗拉强度为 718.2 MPa。在进行有限元分析时,采用 Benjamin 提出的真实应力-应变关系,如图 3 所示^[22]。

本文采用软件 ANSYS 19.2 进行建模与模拟分析。有限元网格划分见图 4(a),根据圣维南原理,为消除局部效应的影响,管道有限元模型的长度设置为其直径的 6 倍;为确保有限元计算的精度,腐蚀区域沿厚度方向设置为 6 层网格,远离腐蚀缺陷的区域设置为 2 层网格,并在缺陷处进行倒角处理,以减小应力集中效应。

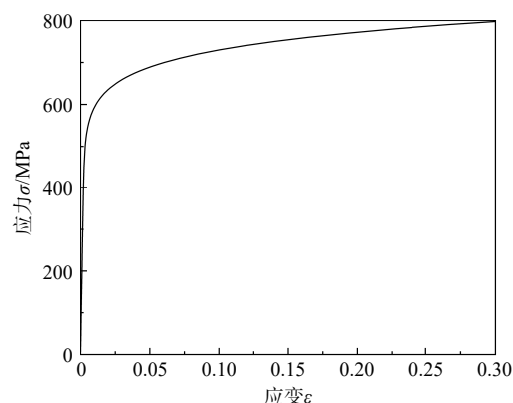


图3 API-5 L-X80 管线钢的真实应力-应变曲线^[22]

Fig.3 Real stress-strain curve of API-5 L-X80 pipeline steel

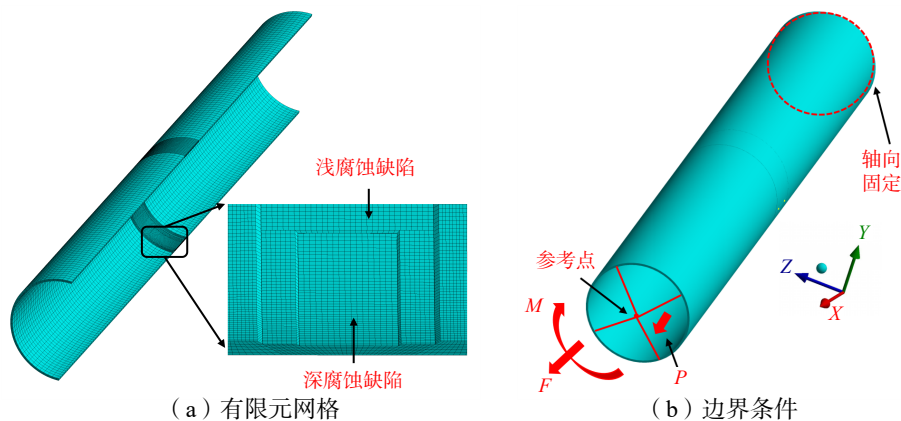


图4 不规则腐蚀缺陷管道有限元分析模型

Fig.4 Finite element analysis model of pipelines with irregular corrosion defects

在有限元计算分析中,设置的载荷条件为弯矩、内压+弯矩、内压+轴向力+弯矩,分别对应管道的三种实际工况;管道的工作压力为 12 MPa,故在内压+弯矩、内压+轴向力+弯矩的工况中,内压均设定为 12 MPa,轴向力设定为 2000 kN。以内压+轴向力+弯矩工况为例,载荷的加载过程分为两个步骤,首先内压作为径向压力直接施加在管道内表面,在管道模型左端施加轴向力,并对管道右端节点进行轴向约束,以防止刚体位移;然后,对管道模型左端施加弯矩载荷至管道失效。管道模型的边界条件详见图 4(b)。实体单元中不存在转动自由度,弯矩不能直接作用于管端,需借助 MPC185 单元在管道左端中心点处定义一个参考点,并在端部形成一个管道模型外部的刚性平面,将弯矩载荷通过刚性平面传递到管道的端面上。采用塑性失效准则作为失效判据,即当管道模型内表面任一点最大应变的 von Mises 屈服应力达到材料的极限抗拉强度时,所对应的载荷即为管道的极限弯矩。有限元模拟分析结果(图 5)表明,腐蚀缺陷区域的应力最先达到材料的失效极限,与管道的实际失效行为高度一致,可见利用该有限元模拟来检验前文建立的理论计算模型是可行的。

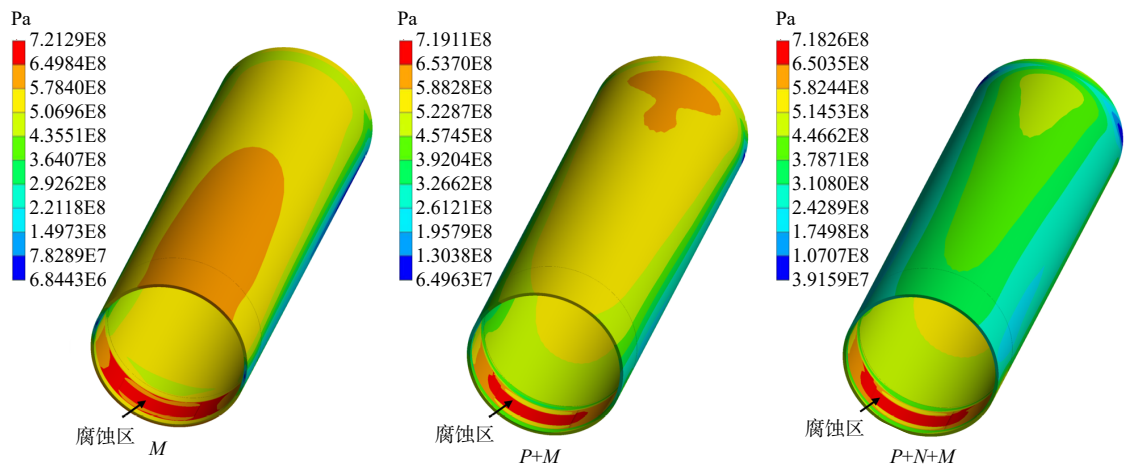


图 5 不规则腐蚀缺陷管道的有限元模拟分析结果

Fig.5 Finite element simulation results of stress for pipelines with irregular corrosion defects

2.2.2 理论计算模型的验证

上述三种工况下,不规则腐蚀缺陷管道模型参数及对应的计算结果见表 2。表中的计算结果包括本文方法、有限元以及相关规范三种方法的计算值,结果表明,在三种工况下,根据相关规范计算的结果与有限元模拟计算结果之间存在较大误差,最大相对误差达 21.67%;与之相比,依据本文理论模型的计算结果与有限元模拟计算结果的相对误差均在 5% 以内,可见本文提出的理论计算模型可更好地满足工程计算要求。

表 2 不同工况下三种方法极限弯矩的计算结果

Tab.2 Calculated results of ultimate bending moments using different methods for different loading conditions

编号	角度/ $^{\circ}$		深度/mm		有限元模拟计算值		
	θ_1 (θ_2)	2θ	d_s	d_d	M	$P+M$	$P+N+M$
1	60	60	2	3	0.84	0.78	0.63
2	60	60	2	3.5	0.83	0.76	0.60

编号	本文理论模型			API RP-579-1/ASME FFS-1 ^[25]								
	计算值			相对误差/%			计算值			相对误差/%		
	M	$P+M$	$P+N+M$	M	$P+M$	$P+N+M$	M	$P+M$	$P+N+M$	M	$P+M$	$P+N+M$
1	0.86	0.75	0.60	2.38	3.85	4.76	0.82	0.71	0.53	2.38	8.97	15.87
2	0.84	0.74	0.58	1.20	2.63	3.33	0.78	0.67	0.47	6.02	11.84	21.67

注：相对误差=（有限元模拟计算值-本文理论模型计算值或相关规范计算值）/有限元模拟计算值×100%

3 分析与讨论

3.1 腐蚀缺陷形状对管道极限弯矩的影响

一般情况下,管道腐蚀缺陷的形状复杂多变。然而,在部分腐蚀缺陷管道的安全评估中,不规则腐蚀缺陷常被错误地简化为规则腐蚀缺陷模型,这导致简化模型与实际腐蚀的尺寸和形状存在较大差异,从而引起较大的评估误差。针对腐蚀缺陷形状复杂程度不同的特点,需要采用分级评估方法^[19]。腐蚀缺陷形状较简单的管道通常采用一级评估方法,如 ASME-B31G 方法和 DNV-RP-F101 单点评价方法;而对于腐蚀缺陷形状较复杂的管道,则宜使用二级评估方法,如 DNV-RP-F101 中针对不规则腐蚀

形状缺陷管道的评估方法。目前,关于一级和二级评估方法的研究主要适用于内压主导的失效情况,尚缺乏针对内压、轴向力和弯矩共同作用下管道失效弯矩的研究。故本文建立理论计算模型,通过对比规则腐蚀缺陷管道与不规则腐蚀缺陷管道的极限弯矩,以此探讨实际工程中未考虑腐蚀缺陷形状对评估结果可能产生的潜在影响。

依据表3中的参数,分别计算了规则腐蚀缺陷管道和不规则腐蚀缺陷管道的极限弯矩,两者的无量纲极限弯矩值对比结果如图6所示。考察表3和图6发现,腐蚀缺陷形状的不规则程度和载荷类型,对管道的极限弯矩影响显著,不规则腐蚀缺陷的极限无量纲弯矩均大于规则腐蚀缺陷。在单一弯矩载荷下,不规则腐蚀缺陷管道的极限弯矩与规则腐蚀缺陷管道的极限弯矩相比,其最小和最大偏差分别为6.75%和23.35%;在依次添加了内压和轴向力载荷后,不规则腐蚀缺陷的极限弯矩与规则腐蚀缺陷的极限弯矩之间的差异增大,最小偏差分别增加至9.91%和19.48%,而最大偏差则分别达到了31.16%和49.39%。主要原因是,若将不规则腐蚀缺陷当作规则腐蚀缺陷进行评估,则忽略了缺陷处未腐蚀区的承载力,引起一定的计算偏差;而在依次添加了内压和轴向力载荷后,管道的等效应力增大,未腐蚀区的承载力增强,从而导致两者的计算偏差进一步增大。若采用相关规范将不规则腐蚀缺陷都简化为规则腐蚀缺陷进行评估,将会低估管道的剩余强度,导致评估偏于保守,造成不必要的修理或更换。

表3 规则腐蚀缺陷和不规则腐蚀缺陷管道的计算参数

Tab.3 Calculation parameters for pipelines with regular/irregular corrosion defects

对比组别	规则腐蚀缺陷			不规则腐蚀缺陷			
	d/mm	$2\theta/^\circ$	d_s/mm	d_d/mm	$\theta_1 (\theta_2) / ^\circ$	$2\theta/^\circ$	d/d_{ave}
1	6	120	2	6	30	60	1.50
2	6	120	3	6	30	60	1.33
3	6	120	4	6	30	60	1.20
4	6	120	2	6	15	90	1.20
5	6	120	2	6	25	70	1.38
6	6	120	2	6	35	50	1.64
7	6	120	2	6	45	30	2.00
8	6	120	2	6	55	10	2.57

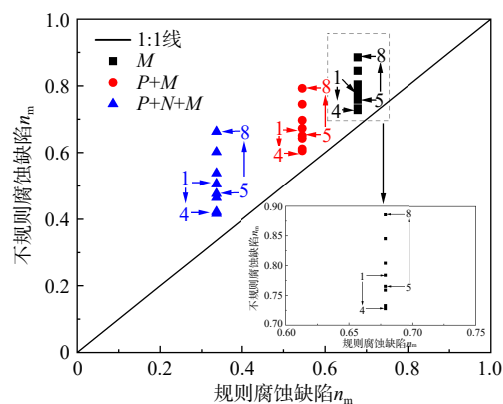


图6 规则腐蚀缺陷管道与不规则腐蚀缺陷管道的极限弯矩对比

Fig.6 Comparison of ultimate bending moments between pipelines with regular and irregular corrosion defects

3.2 不规则腐蚀缺陷的参数分析

在3.1节的讨论中,我们发现规则腐蚀缺陷管道和不规则腐蚀缺陷管道的极限弯矩存在较大差异。深度比(深腐蚀缺陷深度与浅腐蚀缺陷深度之比 d_d/d_s)、长度比(深腐蚀缺陷周向长度与浅腐蚀缺陷周向长度之比 L_d/L_s)和深浅腐蚀缺陷相对位置,是不规则腐蚀缺陷管道安全评估的关键参数,本节详细讨论它们对管道极限弯矩的影响。

3.2.1 深度比对不规则腐蚀缺陷管道极限弯矩的影响

考察图7发现,随着深度比 d_d/d_s 的增大(即缺陷的不规则程度增大),管道的无量纲极限弯矩 n_m 大致呈线性减小(详见图中的拟合直线)。对比图7(a)和(b)可知,对应于一定的 d_d/d_s 和 d/d_{ave} ,随着浅腐蚀缺陷深度 d_s 增大,无量纲极限弯矩 n_m 减小的速率增加,其原因在于,浅腐蚀缺陷或深腐蚀缺陷的深度越大,管道的壁厚就越薄,致使剩余强度更低。此外,观察图7还可以发现,在依次添加内压和轴向力载荷后,管道的无量纲极限弯矩 n_m 降低得更快,以图7(a)为例,深度比从1.4增加至2.1,弯矩、内压+弯矩、内压+轴向力+弯矩等三种工况下的极限弯矩分别下降5.12%、6.85%、11.17%。这是因为施加内压和轴向力载荷后,会使管道缺陷截面上的等效应力 σ_{eq} 增大。

3.2.2 长度比对不规则腐蚀缺陷管道极限弯矩的影响

由图8可知,随着长度比 L_d/L_s 的增加(即缺陷的不规则程度增大),管道的无量纲极限弯矩 n_m 大

致呈线性减小(详见图中的拟合直线)。比较图 8(a)和(b)发现,对应于一定的 L_d/L_s 和 d/d_{ave} , 浅腐蚀缺陷的长度 L_s 越长, 管道无量纲极限弯矩 n_m 减小的速率就越快, 这是因为当浅腐蚀缺陷或深腐蚀缺陷的长度增加时, 管道截面缺失的面积增大, 导致剩余强度变小。进一步分析图 8 还发现, 在依次添加内压和轴向力载荷后, 管道的无量纲极限弯矩 n_m 的下降速率也加快, 以图 8(a)为例, 长度比从 0.11 增加至 0.56, 弯矩、内压+弯矩、内压+轴向力+弯矩等三种工况下的极限弯矩分别下降 7.19%、9.54%、15.5%。其原因与深度比的影响类似, 均为管道缺陷截面上的等效应力 σ_{eq} 增大所致。

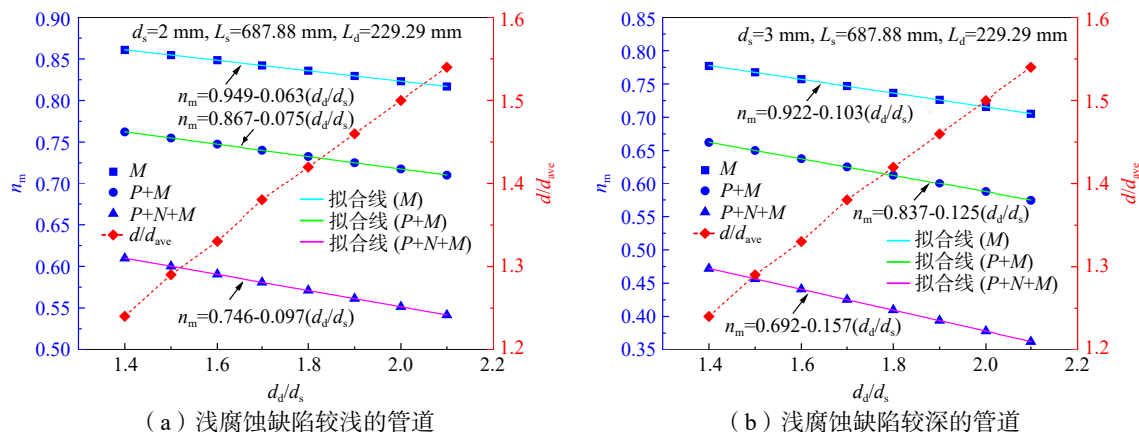


图7 不规则腐蚀缺陷管道的极限弯矩与深度比的关系

Fig.7 Relationship between the ultimate bending moments and depth ratios for pipelines with irregular corrosion defects

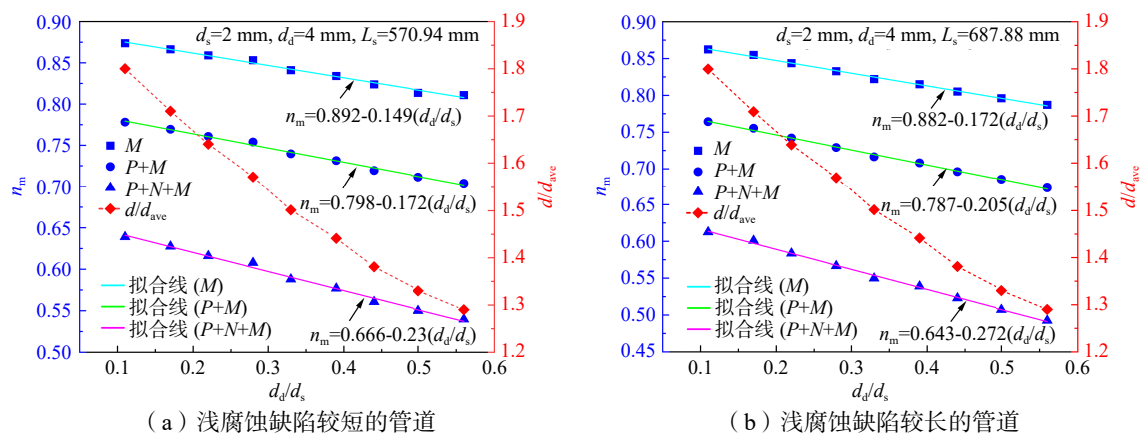


图8 不规则腐蚀缺陷管道的极限弯矩与长度比的关系

Fig.8 Relationship between the ultimate bending moments and length ratios for pipelines with irregular corrosion defects

3.2.3 深浅腐蚀缺陷相对位置对不规则腐蚀缺陷管道极限弯矩的影响

前面的研究基于 $\theta_1=\theta_2$ 的假设, 此时深腐蚀缺陷位于浅腐蚀缺陷正中位置。但现实情况是部分深腐蚀缺陷可能出现在浅腐蚀缺陷中的任意位置。若假设浅腐蚀缺陷不动, 而深腐蚀缺陷沿着管道周向移动, 那么可求得深浅腐蚀缺陷相对位置对管道极限弯矩的影响, 如图 9 所示。

考察图 9 可发现, 三种工况下管道极限弯矩的变化规律相似, 只是数值大小不同。当深腐蚀缺陷位于浅腐蚀缺陷正中位置时($\phi=0^\circ$), 管道的无量纲极限弯矩最小; 而当深腐蚀缺陷位于浅腐蚀缺陷边缘位置时($\phi=-30^\circ$ 或 30°), 管道的无量纲极限弯矩最大; 此外, ϕ 的绝对值越大, 管道极限弯矩增加得越快。原因是当浅腐蚀缺陷和深腐蚀缺陷的长度和深度不变且 $\beta_1+\beta_2$ 不变时, 若深腐蚀缺陷位于浅腐蚀缺陷的正中位置, 可认为 $\beta_1=\beta_2$, 随着深腐蚀缺陷的位置偏离正中位置, ϕ 和 $\beta_2(\beta_1)$ 增大、而 $\beta_1(\beta_2)$ 减小, 导致管道无量纲极限弯矩 n_m 增大。值得注意的是, 当深浅腐蚀缺陷相对位置变化时, 管道的最大无量纲极限弯矩与最小无量纲极限弯矩之间的差值较小; 具体而言, 当 ϕ 从 0° 变化到 30° 时, 弯矩、内压+弯

矩、内压+轴向力+弯矩等三种工况下的极限弯矩分别增加 2.05%、2.43%、3.08%。可见在进行管道安全评估时,若无法精确定位深、浅腐蚀缺陷的相对位置,可按深腐蚀缺陷位于浅腐蚀缺陷正中位置的情况进行估算,其结果不仅能满足要求,往往还有一定余量。

3.3 一些讨论

综上所述,通常不应将不规则腐蚀缺陷视为规则腐蚀缺陷处理,否则会低估管道的安全性;无论是浅腐蚀缺陷还是深腐蚀缺陷,其深度和长度的增加均会降低管道的极限弯矩;但深浅腐蚀缺陷相对位置对管道极限弯矩的影响较小,因此在一定程度上可不考虑相对位置的差异,均按最不利情况计算。这意味着在管道设计与维护过程中,我们应重点关注腐蚀缺陷形状及深度比、长度比等参数对管道结构安全性的影响。由于管道内部不可避免地存在如 H_2S 等腐蚀性物质,导致腐蚀缺陷难以完全避免^[26]。因此,从管道安装与维护的角度出发,必须实施全面且高效的防腐策略,以期延长管道的使用寿命并显著增强其安全性能。此外,在管道运行过程中,应避免超压使用,严格遵循相关规范,并在设计阶段充分考虑减少管道轴向力的措施。

根据腐蚀检测状况及腐蚀速率预测模型^[24],我们能够利用本文构建的理论计算模型快速、便捷地整理出工程实践中频繁出现的腐蚀形状参数(诸如深度比、长度比、深浅腐蚀相对位置等)与各种载荷(包括内压、轴向力和弯矩及它们的组合等)之间的复杂定量关系,进而对油气管道的安全状况进行较精准评估。

4 结 论

由于油气管道中出现不规则腐蚀缺陷的概率远高于规则腐蚀缺陷,因此研究不规则腐蚀缺陷对油气管道失效的影响越来越受到重视。本文基于净截面垮塌准则,建立了针对不规则腐蚀缺陷在内压、轴向力和弯矩单独或组合作用下极限弯矩的计算模型;进而以 API-5L-X80 管线钢为例,研究了弯矩、内压+弯矩、内压+轴向力+弯矩等三种载荷工况下腐蚀缺陷形状、深度比、长度比以及深浅腐蚀缺陷相对位置对不规则腐蚀缺陷管道极限弯矩的影响。主要结论如下:

(1) 通过与相关文献的实验数据对比以及有限元模拟仿真分析,证明了本文提出的理论计算模型能够较好地预测不规则腐蚀缺陷管道的极限弯矩,提供了一种物理概念清晰、计算便捷的不规则腐蚀缺陷管道失效评估方法。基于此方法,可归纳、梳理工程实践中大量出现的腐蚀形状参数(深度比、长度比、深浅腐蚀相对位置等)与载荷(内压、轴向力和弯矩等)的定量关系,以此来编制简易实用的不规则腐蚀缺陷管道极限弯矩概算图表。

(2) 进行腐蚀缺陷管道剩余强度评估时,必须考虑实际腐蚀形状对管道极限弯矩的影响。若将不规则腐蚀缺陷视为规则腐蚀缺陷进行评估,会低估管道的剩余强度,导致不必要的管道维修和更换。

(3) 深度比和长度比是影响不规则腐蚀缺陷管道极限弯矩的关键因素。深度比(或长度比)的增加会降低管道的极限弯矩;当深度比(或长度比)一定时,腐蚀缺陷的深度(或长度)越大,极限弯矩的减少速率就越快。此外,若存在内压和轴向力载荷,管道的极限弯矩也将减小,且在腐蚀缺陷相同的情况下,其减小速率比仅有弯矩载荷时更快。

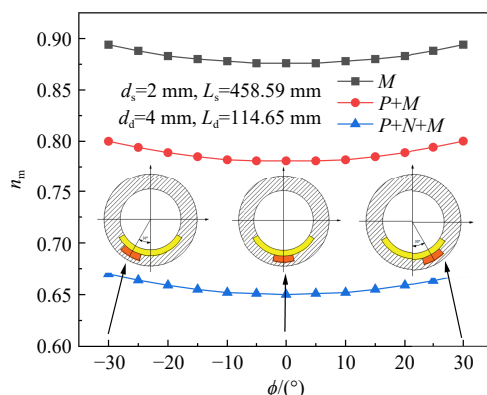


图9 深浅腐蚀缺陷相对位置对不规则腐蚀缺陷管道极限弯矩的影响

Fig.9 Influence of the relative position of deep and shallow corrosion defects on the ultimate bending moments of pipelines with irregular corrosion defects

(4)当深腐蚀缺陷位于浅腐蚀缺陷正中位置时,管道的极限弯矩最小;当深腐蚀缺陷位于浅腐蚀缺陷边缘时,极限弯矩最大。随着深腐蚀缺陷从浅腐蚀缺陷的正中位置向边缘位置移动,管道的极限弯矩逐渐增大但变化不明显,故实践中均可按深腐蚀缺陷位于浅腐蚀缺陷正中位置的情况进行估算。

参 考 文 献:

- [1] Chen C, Li C J, Reniers G, et al. Safety and security of oil and gas pipeline transportation: A systematic analysis of research trends and future needs using WoS[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123583.
- [2] Wu T Y, Jiang N, Zhou C B, et al. Evaluate of anti-explosion for high-pressure gas steel pipeline subjected to ground explosion[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 177: 106429.
- [3] Zenodini M, Arnavaz S, Zandi A P, et al. Repair welding influence on offshore pipelines residual stress fields: An experimental study[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 86(7): 31–41.
- [4] Chen Z F, Chen Y P, Wang W, et al. Failure pressure analysis of hydrogen storage pipeline under low temperature and high pressure[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(43): 23142–23150.
- [5] 张烘玮, 赵 杰, 李敬法, 等. 天然气掺氢输送环境下的腐蚀与氢脆研究进展[J]. *天然气工业*, 2023, 43(6): 126–138.
Zhang H W, Zhao J, Li J F, et al. Research progress on corrosion and hydrogen embrittlement in hydrogen–natural gas pipeline transportation[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(6): 126–138. (in Chinese)
- [6] Bakar M A A, Mustaffa Z, Idris N N, et al. Experimental program on the burst capacity of reinforced thermoplastic pipe (RTP) under impact of quasi-static lateral load[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 128: 105626.
- [7] Zhao H S, Li X, Lie T S. Strain-based fracture assessment for an interface crack in clad pipes under complicated loading conditions[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 198: 106992.
- [8] Foorginezhad S, Mohseni-dargah M, Firoozirad K, et al. Recent advances in sensing and assessment of corrosion in sewage Pipelines[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 147: 192–213.
- [9] Eastvedt D, Naterer G, Duan X L. Detection of faults in subsea pipelines by flow monitoring with regression supervised machine learning[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 161: 409–420.
- [10] Chen Z F, Chu W P, Shi L, et al. Study on burst pressure of subsea pipelines with asymmetrical corrosion defects[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 155: 107722.
- [11] 赵鑫波, 易先中, 易 军, 等. 复杂腐蚀缺陷对管道损伤失效的特性研究[J]. *机床与液压*, 2023, 51(18): 197–204.
Zhao X B, Yi X Z, Yi J, et al. Study on the characteristics of complex corrosion defects on pipeline damage and failure[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2023, 51(18): 197–204. (in Chinese)
- [12] Chen Z F, Yan S T, Ye H, et al. Double circular arc model based on average shear stress yield criterion and its application in the corroded pipe burst[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 149: 515–521.
- [13] 杨理践, 刘凤艳, 高松巍. 基于腐蚀缺陷管道的剩余强度评价标准应用[J]. *沈阳工业大学学报*, 2014, 36(3): 297–302.
Yang L J, Liu F Y, Gao S W. Application of evaluation criteria for remaining strength of pipeline based on corrosion defect[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2014, 36(3): 297–302. (in Chinese)
- [14] 马 彬, 帅 健, 李晓魁, 等. 新版 ASME B31G-2009 管道剩余强度评价标准先进性分析[J]. *天然气工业*, 2011, 31(8): 112–115.
Ma B, Shuai J, Li X K, et al. Advances in the newest version of ASME B31G-2009[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(8): 112–115. (in Chinese)
- [15] Netto T A, Ferraz U S, Estefen S F. The effect of corrosion defects on the burst pressure of pipelines[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2005, 61(8): 1185–1204.
- [16] Mondal C B, Dhar S A. Burst pressure of corroded pipelines considering combined axial forces and bending moments[J]. *Engineering Structures*, 2019, 186: 43–51.
- [17] 在用含缺陷压力容器安全评定: GB/T 19624-2019[S]. 2019.

- Safety assessment of in-service pressure vessels containing defects: GB/T 19624-2019[S]. 2019. (in Chinese)
- [18] Kanninen M F, Broek D, Marschall C W, et al. Mechanical fracture predictions for sensitized stainless steel piping with circumferential cracks[R]. Final Report EPRI NP-192, 1976.
- [19] Miller A R. Review of limit loads of structures containing defects[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1988, 32(1-4): 197–327.
- [20] 金志江, 王晓芳, 竺国荣, 等. 复杂载荷下含未焊透缺陷压力管道塑性极限载荷分析[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(6): 800–804, 808.
- Jin Z J, Wang X F, Zhu G R, et al. Plastic limit load analysis of pressure pipes containing incomplete welding defects under combined loadings[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(6): 800–804, 808. (in Chinese)
- [21] Huang X G, Cheng B L, Zhang D H, et al. A unified theoretical solution of plastic limit load for the thin-walled pipeline with an incomplete welding defect[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021, 191: 104358.
- [22] 孙明明, 赵海盛, 方宏远, 等. 基于等效形状的不规则缺陷管道失效压力评估方法[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 319–329.
- Sun M M, Zhao H S, Fang H Y, et al. Failure pressure evaluation method of pipeline with irregular-shaped defect based on equivalent shape[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 319–329. (in Chinese)
- [23] 陈严飞, 李 昕, 周 晶. 不规则腐蚀缺陷管道极限承载力研究[J]. 工程力学, 2009, 26(11): 190–196.
- Chen Y F, Li X, Zhou J. Ultimate bending capacity of pipe with arbitrary corrosion defects[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(11): 190–196. (in Chinese)
- [24] Miyazaki K, Kanno S, Ishiwata K, et al. Fracture behavior of carbon steel pipe with local wall thinning subjected to bending load[J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 191(2): 195–204.
- [25] American Petroleum Institute. Fitness-for-service: API RP-579-1/ASME FFS-1[S]. American Petroleum Institute, 2021.
- [26] 吕林林, 王 杰, 祁庆芳, 等. 基于 KPCA-IGOA-ELM 的油气混输管道腐蚀速率预测模型[J]. 油气储运, 2023, 42(7): 785–792.
- Lv L L, Wang J, Qi Q F, et al. Corrosion rate prediction model of oil-gas mixed transportation pipelines based on KPCA-IGOA-ELM[J]. Oil & Gas Storage and Transport, 2023, 42(7): 785–792. (in Chinese)