

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231013005

逆断层作用下局部腐蚀埋地管道的失效模式研究*

韩俊艳^{1,2}, 赵文乐¹, 帅义², 侯本伟¹, 郭富强³, 杜修力¹

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院, 北京 102249; 3. 林州建筑职业技术学院, 河南 安阳 450046)

摘要:含腐蚀缺陷管道在断层作用下的失效往往发生在管道腐蚀区域等管道结构力学性能薄弱部位。为深入探讨含腐蚀缺陷管道在断层错动时对管道失效模式的影响,基于弹塑性有限元理论,建立含腐蚀缺陷管道横穿逆断层的三维模型。在此基础上探究了腐蚀位置、腐蚀深度及断层错动量等参数对逆断层作用下管道局部腐蚀区域、管体应力应变分布及其失效模式的影响。结果表明:断层错动时管道的主要失效模式表现为断层下盘管道顶部和断层上盘管道底部局部屈曲破坏,断层下盘管道底部和断层上盘管道顶部处于受拉状态;上盘管道顶部发生局部腐蚀,管道的主要失效模式表现为断层上盘管道顶部拉伸破坏和管道底部局部屈曲破坏控制的双失效模式;下盘管道顶部发生局部腐蚀,管道的主要失效模式仍为屈曲破坏失效,但在较小断层错动量下管道已发生屈曲破坏失效;不同腐蚀位置对腐蚀管道的应力分布影响显著,局部腐蚀缺陷导致的壁厚减薄削弱了管道抵抗变形的能力,断层下盘管道顶部腐蚀比上盘管道顶部腐蚀对管道抗震性能退化的影响更大,进而影响上盘管道失效模式的变化;随着腐蚀程度的加深,断层上盘管道局部腐蚀引起的应变呈近似线性增长的趋势,而断层下盘处腐蚀引起的应变呈非线性增长的趋势。

关键词:埋地管道;失效模式;数值模拟;腐蚀缺陷;逆断层

中图分类号: TU 457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)06-1386-12

Effect of Local Corrosion on Failure Mode of Buried Pipeline Under Reverse Fault

HAN Junyan^{1,2}, ZHAO Wenle¹, SHUAI Yi², HOU Benwei¹, GUO Fuqiang³, DU Xiuli¹

(1. Beijing University of Technology, Key Laboratory of Urban and Engineering Safety and Disaster Reduction of Ministry of Education, Beijing 100124, China; 2. China Petroleum University (Beijing), Safety and the Marine Engineering Institute, Beijing 102249, China; 3. Linzhou College of Architectural Technology, Anyang 450046, China)

Abstract: Under the action of faults, the failure of pipelines with corrosion defects mainly occurs in weak parts of pipeline structure, such as corrosion areas. To explore the impact of corrosion-defect pipelines on the failure mode during fault displacement, a three-dimensional model of corrosion-defect

* 收稿日期:2023-10-13;修回日期:2024-01-12

基金项目:北京市自然科学基金(8212005)、国家重点研发项目(2022YFC3004300)、国家自然科学基金项目(52220105011)资助

作者简介:韩俊艳(1983—),女,副教授,硕导,博士。主要从事地下结构抗震方面的研究。E-mail:junyanhan@bjut.edu.cn

通信作者:帅义(1987—),男,副教授,硕导,博士。主要从事新能源输送管道安全保障新技术与装备方面的研究。

E-mail:yshuai@cup.edu.cn

pipelines crossing a reverse fault was established based on elastic-plastic finite element theory. On this basis, parameters such as corrosion position, corrosion depth, and fault dislocation were explored regarding their influence on local corrosion areas, pipe stress-strain distribution, and failure modes under the action of the reverse fault. The results showed that the main failure mode of the pipeline during fault displacement was local buckling damage at the top of the downthrown segment and the bottom of the upheld segment, with the bottom of the downthrown segment and the top of the upheld segment in tension. When the top of the upheld pipe segment was locally corroded, the main failure mode of the pipeline was a dual failure mode of tensile failure at the top of the upheld segment and local buckling failure at the bottom. When the top of the downthrown pipe segment was locally corroded, the main failure mode remained buckling failure, but the pipeline experienced buckling failure at a smaller fault dislocation. Different corrosion locations significantly affected the stress distribution of the corroded pipeline. Corrosion at the top of the downthrown pipe segment had a greater impact on the degradation of the pipeline's seismic performance compared to corrosion at the top of the upheld pipe segment, which in turn influenced the changes in the failure mode of the upheld pipe segment. As corrosion deepened, the strain caused by local corrosion at the top of the upheld pipe segment followed a nearly linear growth trend, while the strain caused by corrosion at the bottom of the downthrown pipe segment followed a nonlinear growth trend.

Keywords: buried pipeline; failure mode; numerical simulation; corrosion defect; reverse fault

0 引言

长距离输气管道作为国家重要的基础设施和民生工程,覆盖区域广阔,不可避免会穿越地震断层区。如中缅管道沿途穿越活动断层18条^[1],涉及了多条地震带,极易受到永久性地面位移(PGD)的影响。多次震后调查披露断层引起的地面PGD会造成埋地管道结构破坏,如1906年的旧金山地震^[2]、1971年的圣费尔南多地震^[3]、1999年的土耳其伊兹米特地震^[4]和1999年的集集地震^[5],与断层相交的管道均发生了较为严重的破坏。

天然气管道在长期的运输过程中,管内输送介质与管外环境存在较大温差,管道中的腐蚀性介质如CO₂、H₂S以及挥发性有机酸,会随着天然气中的水分在管道顶部冷凝成液滴。从而引起的顶部内腐蚀(Top of the line corrosion, TLC),导致管道壁厚减薄、强度降低,严重时还会发生泄漏,造成灾难性事故和重大的经济损失^[7]。由美国腐蚀工程师国际协会发起的一项调查发现,在墨西哥湾因为TLC导致了陆上15%和海上50%的管道故障^[6]。综合以上两种情况,有必要对断层作用下埋地内腐蚀管道抗震性能展开研究。

目前国内外一些学者的研究主要集中在断层

作用下无腐蚀管道的失效模式^[8-11,15-17]、加固措施^[18]、失效准则^[19-22]等方面。对腐蚀管道的研究主要集中在内压等简单荷载作用下的破坏形式的研究,陈平伟等^[23]研究了塑性失效准则下含腐蚀管道在不同腐蚀缺陷深度、长度对管道极限压力的影响。帅健^[24]研究了不同腐蚀参数在轴向应力作用下对管道极限内压的影响,并建立腐蚀管道的极限内压预测公式。类似的研究虽考虑了管道内压和简单轴向力的作用,但忽视了土体以及外部环境对管道的影响,考虑断层和腐蚀缺陷耦合作用下的研究相对较少。李鸿鹏^[25]研究了穿越45°倾角正断层的埋地管道在断层错动时不同缺陷深度、面积及位置对埋地管道应力应变的影响,研究发现缺陷深度对管道的影响远大于缺陷面积。2018年,缪文振^[26]研究了不同缺陷程度、缺陷位置、断层形式对跨断层埋地管道力学性能的影响规律。虽然上述研究对腐蚀深度、腐蚀位置等因素展开了讨论,但腐蚀对上、下盘管道的破坏放大效应及其失效模式影响的研究尚不多见。

为进一步研究逆断层错动作用下,管道不同腐蚀位置、不同腐蚀深度及不同断层错动量等参数对其失效模式的影响,本文在前人研究的基础上,建立了考虑局部腐蚀影响的埋地腐蚀管道三维有限元数值模型,研究了腐蚀厚度、腐蚀位置、断层错动

量等参数对管道失效模式的影响规律。研究成果可为管道不同管段的抗震措施研究提供理论支撑。

1 三维数值模型建立

1.1 模型几何尺寸及单元选择

本文采用通用有限元分析软件 ABAQUS 建立三维自由场逆断层含局部腐蚀管道数值模型。管道和断层的交叉角度 θ 以及断层与地表的断层倾角 β 对于埋地管道的失效模式十分关键,研究表明,逆断层在交叉角度 $\theta=90^\circ$ 时和断层倾角 $\beta=60^\circ$ 时可以比较完整的展示管道在逆断层作用下产生的不同失效模式破坏^[29-30]。因此,本文将主要探讨在逆断层 $\theta=90^\circ$ 和 $\beta=60^\circ$ 时局部腐蚀对管道失效模式的影响。埋地管道选用 API 5L X65 管道,采用各向同性三维壳单元建模,埋深设置为 3 m^[27],直径(含壁厚) $D=0.9144$ m,壁厚 $t=0.0119$ m;为消除边界对管道响应的影响,土体尺寸 8 m \times 6.8 m \times 30 m,采用六面体实体单元,如图 1 所示。

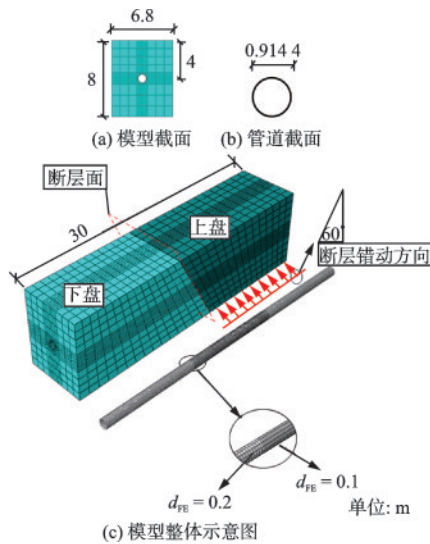


图 1 逆断层-管道三维数值分析模型

Fig.1 Reverse fault-pipeline 3D numerical analysis model

1.2 模型材料及相关参数

土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型^[28],考虑胡克定律和库伦破坏准则,通过设置摩擦角和膨胀角来模拟土体应变软化等物理力学特性。管道采用美国石油协会(API)X65 钢应力应变弹塑性本构,以模拟管道在断层作用下产生的塑性变形。应力应变关系如式(1)所示:

$$\epsilon = \frac{\sigma_y}{E_p} \left[\frac{\sigma}{\sigma_y} + \lambda \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^N \right] \quad (1)$$

式中, ϵ 为总应变; σ 为应力; σ_y 为屈服应力,取 448.5 MPa; E_p 为初始弹性模型,取 201 GPa; λ 和 N 为无量纲参数,分别取 0.533 和 14。图 2 为 X65 管道的应力-应变曲线。

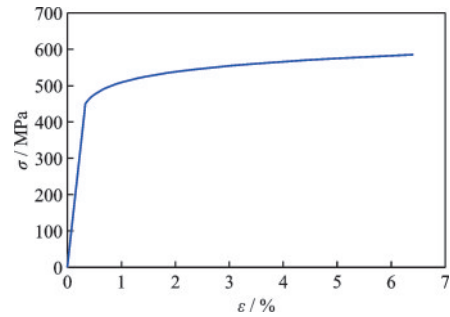


图 2 X65 钢材的 Ramberg-Osgood 本构模型

Fig.2 Ramberg-Osgood constitutive model of X65 steel

表 1 土体的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soil

名称	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模 量/MPa	泊松比 v	内摩擦 角 $\varphi/(\circ)$	黏聚 力/Pa	膨胀角 $\psi/(\circ)$
黏土	1960	20	0.3	33.5	26000	3

1.3 断层及管土相互作用模拟

在模拟断层场地的有限元模型中,有两种较为普遍的模拟方式。一种是把断层破裂带视为强度较小的介质(并采用黏性单元),另一种则采用不连续的模型通过摩擦接触连接到一起。两种方法各有优劣,摩擦接触模型在理论上可以更加真实的模拟断层错动产生的物理变形和力学变化^[29]。因此本文采用摩擦接触模型,面对面的离散方式以及罚函数和硬接触来模拟断层的错动作用,土体之间摩擦系数选用 0.7^[30]。管-土之间摩擦系数选用 0.3^[31-32]。

在计算中网格需要足够精细来模拟真实的屈曲现象和管-土相互作用,已有研究表明网格大小在 0.2 m 以下满足模拟要求^[28],保证计算精度的同时为提高计算速度,在断层面相交 10 m 内的管道采用精细化网格,其余部分的网格相对比较稀疏。

该模型施加荷载分为两个步骤。首先将土体周围和底部表面固定,对整个模型施加重力荷载,用来模拟整个模型的初始地应力条件和变形。左

侧(下盘)固定,右侧(上盘)代表移动块沿着断层方向60°施加位移错动,用于模拟逆断层活动,两者在法线方向上固定。

根据经验统计方程预测地震引起的断层错动量^[33],得到断层错动量和地震震级之间的对应关系,并以此为参考设置模型的错动量。

$$\log_{10}d_{\max} = M - 2.247 \log_{10}(k/L_R) + 0.6489M + 0.0518s - 0.3407v - 2.9850 - 0.1369M^2 + (-0.0306S_L^1 + 0.2302S_L^2 + 0.5792S_L^3) + [-0.3898r - 0.2749(1-r)]R/100 \quad (2)$$

式中, M 为震级; R 为震中距(km); H 为震源深度; L_R 为破裂长度。

由上述公式得到50年超越概率30%时错动量为1.2 m,超越概率为63%时错动量为0.99 m。本文采用拟静力方法施加断层错动量,设置动力隐式分析步,断层错动量为0.3~1.2 m,每隔0.1 m设置一种工况。为消除动力效应的影响,在每个时间增量步中所允许施加的最大断层错动量为0.02 mm^[34]。

1.4 腐蚀管道模型

表2为庆哈管线首站-中一站总里程62.8 km中所测得的数据,其中金属管道体积型缺陷共有9 625处^[35],根据不同腐蚀程度的占比,设计出剩余壁厚60%、70%、80%、90%、100%(0.6 t 、0.7 t 、0.8 t 、0.9 t 和 $t=0.0119$ m)五种工况,随着腐蚀程度的加深,剩余壁厚逐渐减小。

表2 不同剩余壁厚区间占比

Table 2 Proportions of residual wall thicknesses in different intervals

腐蚀深度/%	缺陷点个数	占比/%
90~100	1 295	13.4
80~90	3 277	34.5
70~80	2 672	27.8
60~40	2 261	23.5
50~50	30	3.1
40~60	0	0

管道腐蚀位置根据对无腐蚀管道地震响应分析结果,考虑管道受力的最不利情况,分别在上、下盘管道应变最大处(距断层 L)设置腐蚀缺陷。图3为腐蚀管道模型示意图。研究表明,腐蚀区域大小多为管线上半段面积的50%^[36]。因此,腐蚀区域拟

定为 $S^2=0.28$ m²的正方形。

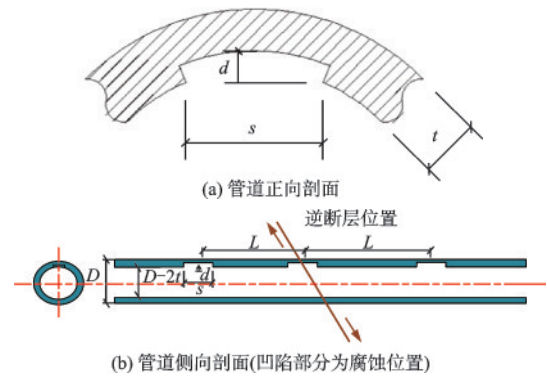


图3 腐蚀局部管道模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of corroded local pipe model

注: d 为腐蚀深度, S 为腐蚀区域的边长, t 为壁厚

2 跨断层含腐蚀管道失效准则

对于位移荷载控制下的管道,当管材应力达到屈服强度进入塑性阶段时,管道残余应变仍可以继续维持管道使用^[37]。本文根据《油气输送管道线路工程抗震技术规范》,选用基于应变的管道设计准则。在管道受到断层错动时考虑以下三种不同极限状态进行分析和量化,并将其作为管道失效准则。

2.1 拉伸破坏

管道因受到断层的错动,产生的管壁拉应变超过管道的极限抗拉承载力而产生破裂。很多规范在考虑埋地管道腐蚀缺陷、焊缝、温度等对管道力学性能的影响后,采用物理试验和断裂力学的方法分析得到以下建议值(见表3)。

表3 不同规范标准的极限拉伸应变

Table 3 Ultimate tensile strain of different specifications

标准	极限拉伸应变/%
DNV-OS-F101(2007)	2.0
ASCE-ALA(2001)	2.0
IRRK-GSDMA(2007)	3.0
Eurocode 8-part 4(2006)	5.0

根据国际通用的基于应变的管道拉伸应变设计标准中的建议值,考虑钢管本身具有的延性。本文采用的容许拉伸应变 $[\epsilon_T]$ 为3%。

2.2 局部屈曲

在断层错动影响下,管道在距离断层一定位置处会产生受压褶皱变形。当压缩应变超过一定限度时,管壁会因失稳出现凹陷和隆起褶皱状态,当屈曲进一步加强会出现更严重的压溃现象。因此,根据 CSA Z662^[38] 规范给出的相关说明,本文管道采用的容许压缩应变 $[\epsilon_c]$ 可以表示为:

$$\epsilon_c^{crit} = 0.5\left(\frac{t}{D}\right) - 0.0025 + 3000\left(\frac{\sigma_h}{E}\right)^2 \quad (3)$$

$$\sigma_h = \begin{cases} \frac{PD}{2t}, \frac{PD}{2t\sigma_y} \leq 0.4 \\ 0.4\sigma_y, \frac{PD}{2t\sigma_y} > 0.4 \end{cases} \quad (4)$$

式中, ϵ_c 为容许压缩应变; t 为壁厚; D 为管道直径; σ_y 为环向应力; P 为管道内压; σ_h 为管材的屈服应力,本文采用的容许压缩应变 $[\epsilon_c]$ 为 -0.016 。

2.3 椭圆化变形

腐蚀程度加深引起的管道壁厚损失在断层错动影响下会导致管道横截面形状改变,进而发生严重的弯曲使管道圆形截面扁平,加剧了管道刚性的损失,使内检测器无法通过,从而影响管道正常使用条件下的运输能力^[37]。管道横截面变形通常采用椭圆化的方式展现。本文采用无量纲参数椭圆率 f 来衡量管道椭圆化程度,表示如下:

$$f = \frac{\Delta D}{D} \quad (5)$$

式中, D 为管道外径; ΔD 为管道外径的变化量,当椭圆率达到0.15时管道发生破坏^[39]。本文最终选择的跨断层含腐蚀管道失效模式判别准则见表4。

表4 本文所选失效模式判别

Table 4 Identification of the selected failure modes in this paper

失效模式	对应指标	本文选取限值
拉伸断裂	容许拉伸应变 $[\epsilon_T]$	0.03
屈曲破坏	容许压缩应变 $[\epsilon_c]$	-0.016
椭圆化变形	容许椭圆率 $[f]$	0.15

3 结果与分析

3.1 模型的有效性验证

为了验证有限元模型的有效性,采用 Jalali 在德

黑兰谢里夫理工大学进行的4英寸 API-5L B 级钢管道全尺寸物理模型试验结果进行对比分析^[15],该试验在大型逆断层模型箱里进行,如图4所示。



图4 Jalali的试验模型照片

Fig.4 Photo of Jalali's test model

建立的有限元模型采用了和试验中相同的材料本构和尺寸见表5,并根据试验所加荷载在有限元模型上分别施加0.2 m和0.6 m的斜断层错动。图5为有限元模型与试验管顶纵向应变的对比图,如图所示该有限元模型成功的预测了最大应变和屈曲管段的位置,上盘处管道顶部的峰值应变,试验和有限元结果分别是0.02和0.018,下盘处管道顶部的峰值应变,试验和有限元结果分别是 -0.095 和 -0.081 (数值大小差异小于20%)。导致

表5 Jalali的埋地管道足尺试验参数

Table 5 Full-scale test parameters of buried pipeline by Jalali

参数类型	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	内摩擦角	埋深/ m
参数数值	1790	33	0.32	33.5	1
参数类型	直径/mm	断层倾角/ ($^\circ$)	壁厚/ mm	径厚比	错动量/ m
参数数值	114.3	61	4.4	26	0.6

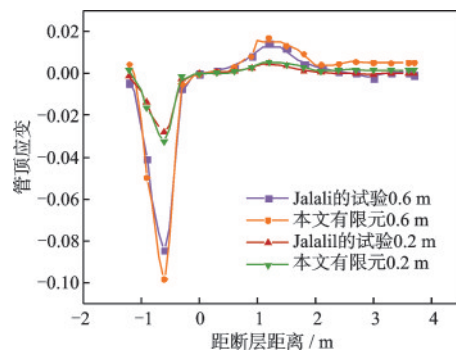


图5 管顶的轴向应变

Fig.5 Axial strain at the top of the pipe

差异的原因可能是断层错动时造成的试验土体土质不均匀和孔隙率变化,此外,由于初始应力等客观条件的影响,也是导致差异的原因之一。因此,本文所建立的有限元模型适用于逆断层错动时埋地管道的失效模式分析。

3.2 不同腐蚀位置管道的失效模式分析

采用ABAQUS建立逆断层作用下局部腐蚀管道三维有限元模型,研究在断层错动量为0.9 m时,不同腐蚀位置、不同腐蚀深度对管道顶部应力应变分布和失效模式的影响。管道腐蚀位置分别取上盘、下盘和断层相交处管道的顶部,剩余壁厚取0.6t、0.7t、0.8t、0.9t和t(t=0.011 9为完整管道壁厚)。

3.2.1 管道腐蚀位置在断层处的失效模式

图6、图7为断层处发生管道顶部腐蚀,断层错动量0.9 m时不同剩余壁厚(0.6t、0.7t、0.8t、0.9t和t)管道顶部和底部的轴向应变图。如图6所示,沿管轴方向不同腐蚀程度管道的应变曲线基本重合,管顶腐蚀缺陷基本不影响管道底部的应变响应。如图7所示,管顶腐蚀缺陷只在 $x=[14.7\text{ m}, 15.3\text{ m}]$ 范围内影响管道的应变响应,在剩余壁厚为0.6t时应变最大值0.003,远未达到允许拉伸应变,因此在下一部分的失效模式分析中不在讨论断层管道处发生腐蚀的情况。对比图6、图7可知,逆断层作用下,下盘管道顶部和上盘管道底部受压产生屈曲失效破坏,最大压缩应变分别为-0.052和-0.086 3;管道在下盘底部和上盘顶部处于轴向受拉状态,尚未达到容许拉伸应变。图8为断层处发生管道顶部腐蚀,断层错动量0.9 m时不同剩余壁厚(0.6t、0.7t、0.8t、0.9t和t)管道的Mises应力云图。由图8可知,逆断层作用下,下盘处管道顶部受压,底部受拉;上

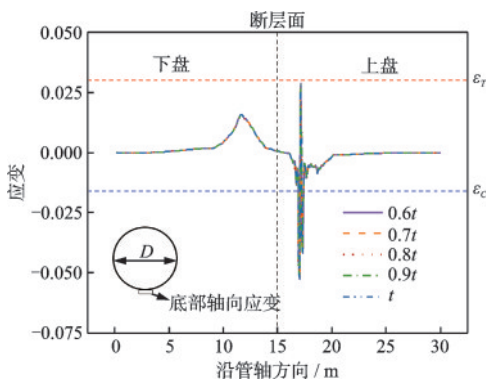


图6 断层管道腐蚀时管底的轴向应变
Fig.6 Axial strain at the bottom of fault pipe during corrosion

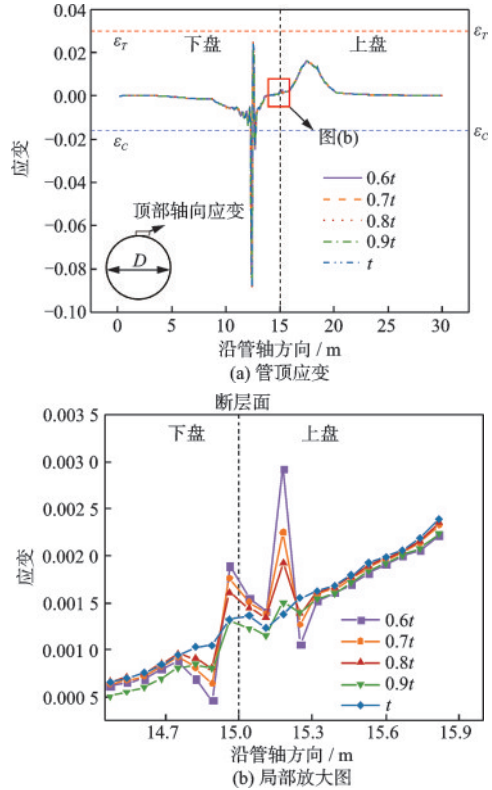


图7 断层管道腐蚀时管顶的轴向应变
Fig.7 Axial strain at the top of fault pipe during corrosion

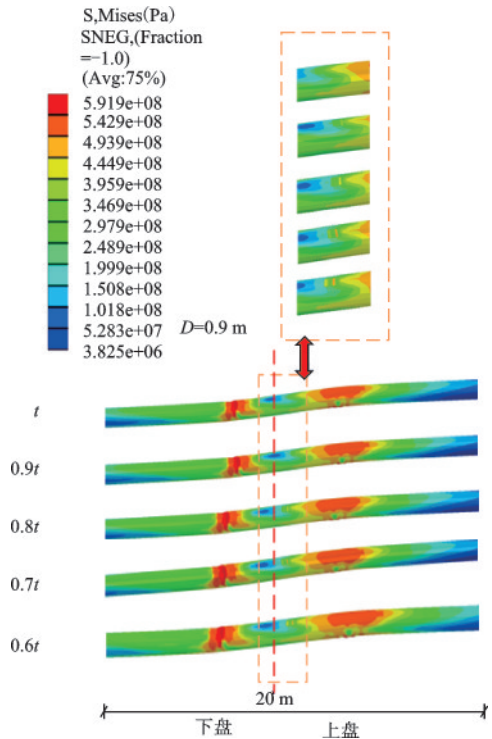


图8 断层管道腐蚀时部分管道的应力云图
Fig.8 Stress nephogram of part of fault pipe during corrosion

盘处管道顶部受拉,底部受压,管道整体呈现S型变形,整个管道在距离断层两侧3.2 m出现2处明显

弯曲,并伴随着应力集中,管道由于受压管壁褶皱而发生的局部屈曲破坏。结果表明:上、下盘管道的主要失效模式是局部屈曲破坏,管道在断层处发生顶部内腐蚀不影响穿断层管道的失效破坏模式。

3.2.2 管道腐蚀位置在上盘处的失效模式

图9、图10为上盘管道距断层 $L=3.2\text{ m}$ 处发生顶部腐蚀,断层错动量 0.9 m 时不同剩余壁厚($0.6t$ 、 $0.7t$ 、 $0.8t$ 、 $0.9t$ 和 t)管道顶部和底部的轴向应变图。如图9所示,与腐蚀发生在断层处相似,沿管轴方向不同腐蚀程度管底轴向应变曲线基本重合,管顶腐

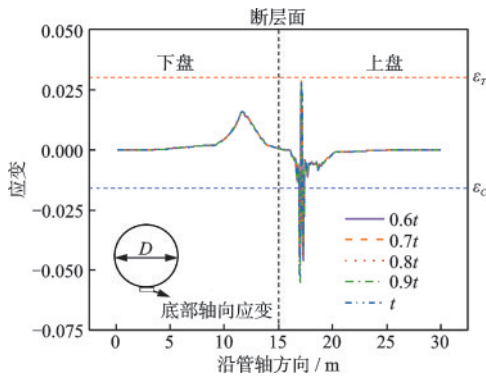


图9 上盘管道腐蚀时管底的轴向应变

Fig.9 Axial strain at the bottom of the upheld pipe during corrosion

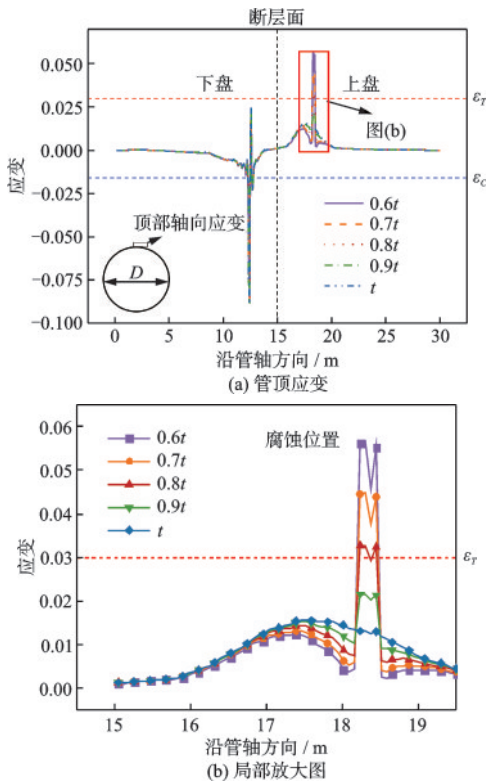


图10 上盘管道腐蚀时管顶的轴向应变

Fig.10 Axial strain at the top of the upheld pipe during corrosion

蚀缺陷不影响管道底部的应变响应。由图10可知,随着腐蚀程度的加深,在 $S^2=0.28\text{ m}^2$ 的腐蚀区域外一定范围 $x=[17\text{ m}, 19.3\text{ m}]$ 内会对管道应变产生相对较大的影响。管道应变随着剩余壁厚的减小而增大,当管壁变薄时,腐蚀位置的应变呈现近似线性增长的趋势,每减少10%的厚度应变会增加0.01;在剩余壁厚为 $0.8t$ 时,腐蚀区域的拉伸应变超出0.03。图11为上盘管道距断层 $L=3.2\text{ m}$ 处发生腐蚀,断层错动量 0.9 m 时不同剩余壁厚($0.6t$ 、 $0.7t$ 、 $0.8t$ 、 $0.9t$ 和 t)管道的Mises应力云图。由图11可知,管道在上盘处发生腐蚀与断层处发生腐蚀时整个管道的变形模式基本一致,但与之不同之处在于管道不仅产生了由于受压管壁褶皱而发生的局部屈曲破坏,且由于上盘管道顶部腐蚀程度的加深,管道发生了拉伸破坏。结果表明:上盘管道顶部发生局部腐蚀时,下盘管道的主要失效模式仍是局部屈曲破坏,上盘管道的失效模式由管道底部发生的局部屈曲破坏单独控制,转变为管道底部的局部屈曲破坏与管道顶部的拉伸破坏控制的双失效模式。

3.2.3 管道腐蚀位置在下盘处的失效模式

图12、图13为下盘管道距断层 $L=3.2\text{ m}$ 处发生顶部腐蚀,断层错动量 0.9 m 时不同剩余壁厚($0.6t$ 、 $0.7t$ 、 $0.8t$ 、 $0.9t$ 和 t)管道顶部和底部的轴向应

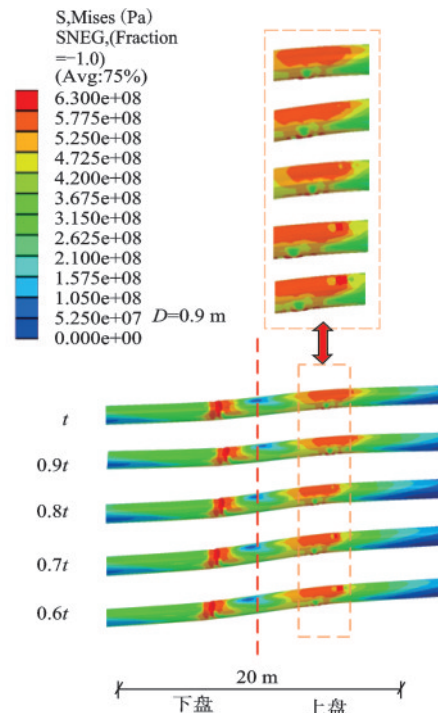


图11 上盘管道腐蚀时部分管道的应力云图

Fig.11 Stress nephogram of part of the upheld pipe during corrosion

变图。由图 12 可知,下盘管道管顶腐蚀缺陷基本不影响整个管道管底轴向应变曲线,但对下盘管顶应变曲线影响较大,随着腐蚀程度的加深其出现了较大的波动。由图 13 可知,与完整壁厚的管道峰值应变相比,0.9t 的管道峰值应变增幅为 24%,0.8t 的管道增幅为 70%,0.7t 的管道增幅为 99%,下盘处的管顶峰值应变从完整管道的 -0.0801 增加到 $0.6t$ 的 -0.1817 ,增幅达 126%;壁厚每减少 10%,腐蚀区域管道的应变变化十分剧烈,呈不规则非线性的增长趋势。图 14 为下盘距断层 $L=3.2$ m 处发生腐

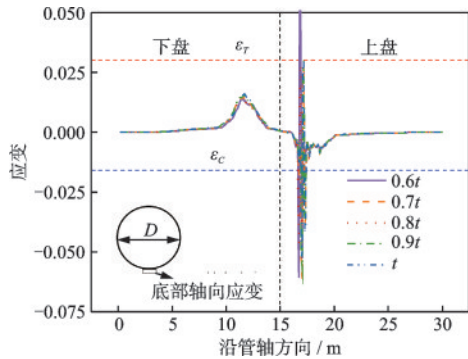


图 12 下盘管道腐蚀时管底的轴向应变

Fig.12 Axial strain at the bottom of the downthrown pipe during corrosion

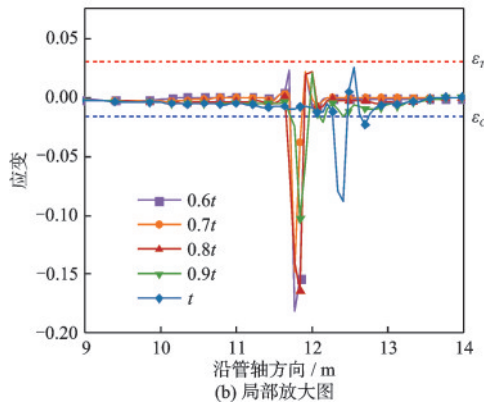
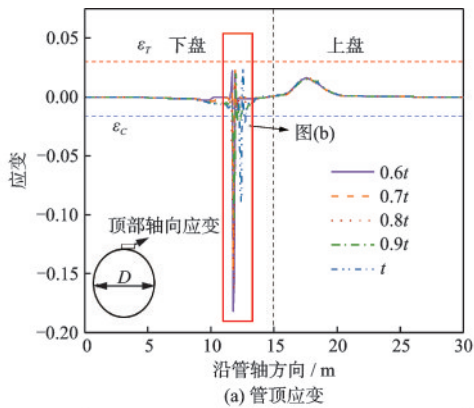


图 13 下盘管道腐蚀时管顶的轴向应变

Fig.13 Axial strain at the top of the downthrown pipe during corrosion

蚀,断层错动量 0.9 m 不同剩余壁厚管道的 Mises 应力云图。由图 14 可知,整个管道的变形模式与前两种工况基本一致,不同之处是下盘管道顶部腐蚀对其截面变形影响较显著,随着腐蚀程度的加深,腐蚀区域的应力水平逐渐高于周围区域的应力水平,变形更加集中,产生了更明显的截面变形,管道的主要失效模式为屈曲破坏。

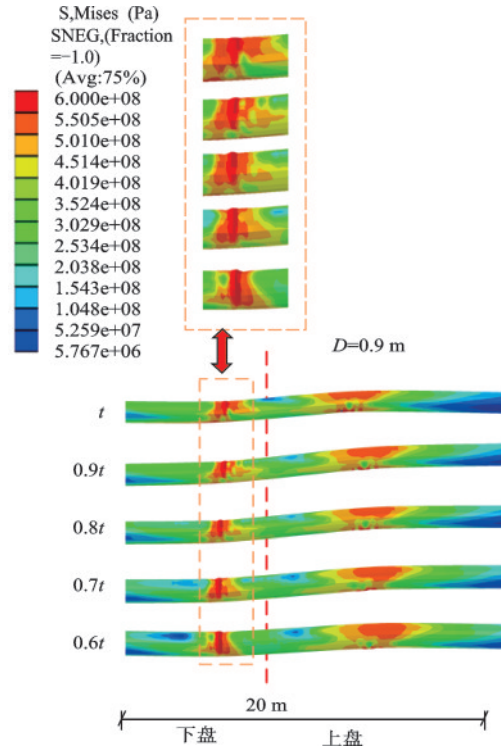


图 14 下盘管道腐蚀时部分管道的应力云图

Fig.14 Stress nephogram of part of the downthrown pipe during corrosion

研究表明,从管道失效模式上来看,上盘管道发生腐蚀后,随着断层错动量的增加,上盘管道的失效模式由管道底部屈曲破坏控制的单一失效模式转变为管道底部的局部屈曲破坏与管道顶部拉伸破坏控制的双失效模式,断层或下盘处管道腐蚀均未改变其屈曲破坏的主要失效模式,但下盘管道腐蚀加剧了管道的屈曲破坏。从腐蚀放大效应上来看,不同腐蚀位置对管道局部应变的放大效应显著,以下盘管道腐蚀导致的应变响应最大,上盘管道腐蚀导致的应变响应次之,管道断层处腐蚀导致的应变响应最小。

3.3 不同断层错动量下管道的失效模式分析

3.3.1 腐蚀位置在上盘处的失效模式分析

图 15 和图 16 为上盘距断层 $L=3.2$ m 处发生不

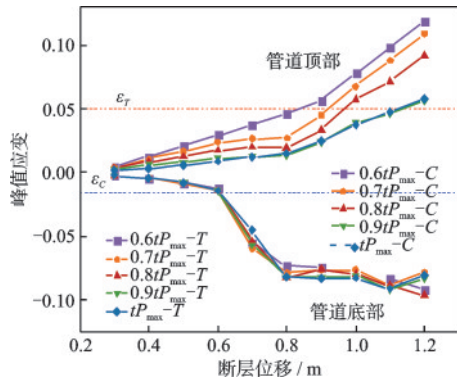


图 15 上盘管道腐蚀时上盘管道的峰值轴向应变

Fig.15 Peak axial strain of the upheld pipe during corrosion

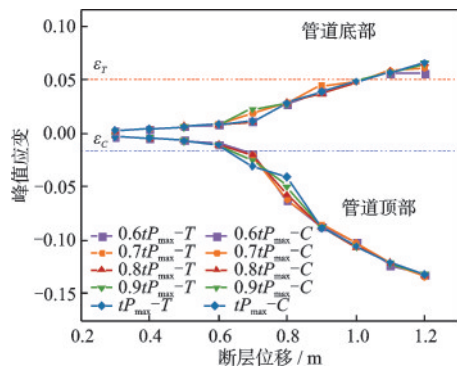


图 16 上盘管道腐蚀时下盘管道的峰值轴向应变

Fig.16 Peak axial strain of the downthrown pipe during corrosion of the upheld pipe

不同程度腐蚀时上盘管道和下盘管道的峰值应变图(图中C为压缩应变,T为拉伸应变)。由图15可知,不同腐蚀程度下,上盘管道底部的压缩应变曲线无明显差异,而上盘管道顶部的拉伸应变曲线较为明显;断层错动量超出0.6 m后,不同腐蚀程度下上盘管道底部几乎同时发生局部屈曲破坏的单一失效模式;管道顶部的拉伸应变曲线产生了明显差异,断层错动量超出0.8 m后,上盘管道发生了底部屈曲破坏和顶部拉伸破坏的双失效模式。由图16可知,上盘管道腐蚀对下盘管道应变影响较小,下盘管道的顶部压缩和底部拉伸应变稍有波动,但基本不影响下盘管道的主要失效模式。图17为不同断层错动量下峰值椭圆率变化趋势图。由图17可知,管道的椭圆率随着断层错动量的增大而变大,在断层错动量超出0.6 m后,腐蚀程度对管道的椭圆率的影响才表现出来,在断层错动量超出0.9 m后,不同腐蚀程度的管道逐渐出现椭圆化变形破坏的失效模式。

表5为三种失效模式对应的上盘管道失效临界

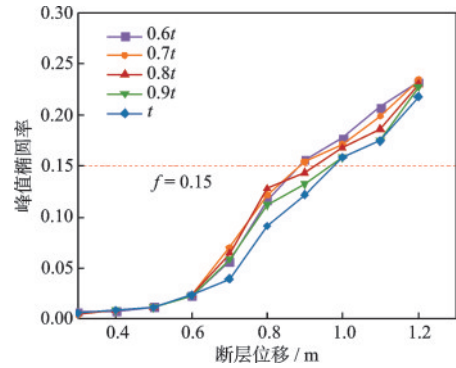


图 17 上盘管道腐蚀时的管道峰值椭圆率

Fig.17 Peak ellipticity of the upheld pipe during corrosion

断层错动量。由表5可知,随着上盘管道腐蚀程度的加深,管道拉伸破坏和椭圆化变形对应的临界错动量不断减小,屈曲破坏对应的临界错动量最小且几乎没有变化,以0.8t为例,断层错动量超出0.9 m后,上盘管道同时存在着底部屈曲破坏、顶部拉伸破坏及椭圆化变形破坏三种失效模式。结果表明,上盘管道发生顶部腐蚀时,腐蚀程度的加深会减弱管道抵抗拉伸破坏和椭圆化变形的能力;随着断层错动量和腐蚀程度的增加,上盘管道的失效模式由单一失效模式控制转变为多失效模式控制。

3.3.2 腐蚀位置在下盘处的失效模式分析

图18和图19为下盘距断层L=3.2 m处发生不同程度腐蚀时管道上盘和管道下盘的峰值应变图。由图18可知,下盘管道腐蚀对上盘管道应变影响较小,上盘管道的顶部压缩和底部拉伸应变虽有一定的波动,但基本不影响上盘管道的主要失效模式。由图19可知,随着断层错动量的增加,不同腐蚀程度下盘管顶压缩应变产生了明显差异;随着管道腐蚀程度的加深,管道发生屈曲破坏的断层错动量逐渐减小,在管道剩余壁厚为0.6t时,断层错动量

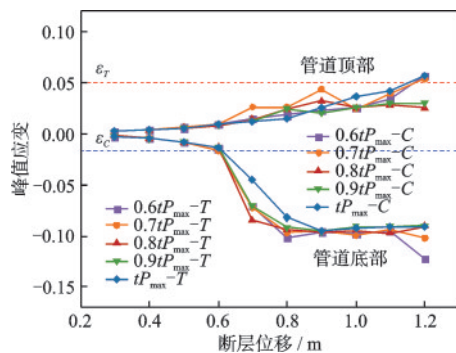


图 18 下盘管道腐蚀时上盘管道的峰值轴向应变

Fig.18 Peak axial strain of the upheld pipe during corrosion of the downthrown pipe

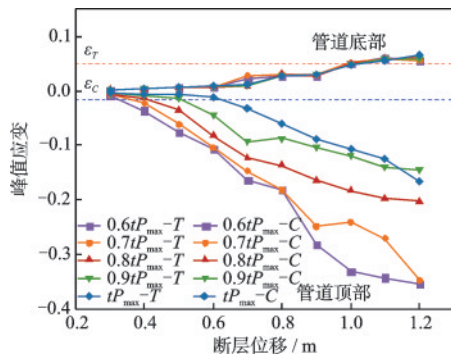


图19 下盘管道腐蚀时下盘管道的峰值轴向应变

Fig.19 Peak axial strain of the downthrown pipe during corrosion

0.33 m下盘管顶位置已发生局部屈曲破坏。图20为不同断层错动量下峰值椭圆率趋势图。由图20可知,管道的椭圆率随着断层错动量的增大而变大,但在断层错动量超出0.4 m后,腐蚀程度对管道的椭圆率的影响已表现出来,在断层错动量超出0.9 m后,不同腐蚀程度的管道逐渐出现椭圆化变形破坏的失效模式。

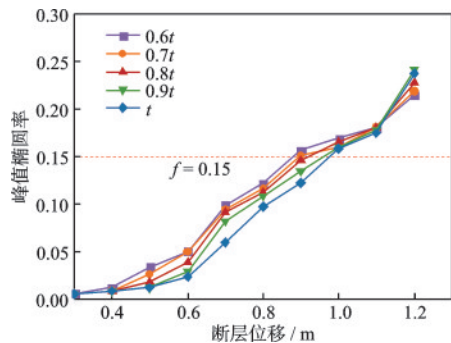


图20 下盘管道腐蚀时的管道峰值椭圆率

Fig.20 Peak ellipticity of the downthrown pipe during corrosion

表6、7为三种失效模式对应的上、下盘管道失效临界错动量。由表7可知,随着下盘管道腐蚀程度的加深,管道屈曲破坏和椭圆化变形对应的临界错动量不断减小,尤其是管道的屈曲破坏所对应的断层错动量急剧减小,拉伸破坏对应的临界错动量最大且几乎没有变化,断层错动量超出0.87 m,但未达到1.15 m时,下盘管道发生了屈曲破坏、椭圆化变形破坏的多失效模式;断层错动量超出1.15 m后,下盘管道同时存在着屈曲破坏、拉伸破坏及椭圆率变形破坏三种失效模式。结果表明,下盘管道发生顶部腐蚀时,腐蚀程度的加深会减弱管道抵抗屈曲破坏和椭圆化变形的能力,尤其是抵抗屈曲破坏

的能力;随着断层错动量和腐蚀程度的增加,下盘管道的失效模式将由单一失效模式控制转变为多失效模式控制。

表6 上盘不同腐蚀程度管道的失效临界错动量

Table 6 Critical fault displacement of pipes with different corrosion levels of the upheld pipe

失效模式	剩余壁厚				
	0.6t	0.7t	0.8t	0.9t	t
屈曲破坏	0.65	0.65	0.64	0.63	0.64
拉伸破坏	0.84	0.95	0.98	1.2	1.2
椭圆化变形	0.88	0.89	0.94	0.93	0.99

表7 下盘不同腐蚀程度管道的失效临界错动量

Table 7 Critical fault displacement of pipes with different corrosion levels in the downthrown pipe

失效模式	剩余壁厚				
	0.6t	0.7t	0.8t	0.9t	t
屈曲破坏	0.33	0.38	0.44	0.53	0.65
拉伸破坏	1.15	1.15	1.18	1.17	1.15
椭圆化变形	0.87	0.89	0.92	0.97	0.99

4 结 论

基于弹塑性有限元理论,建立含腐蚀缺陷管道横穿逆断层的三维模型。以管道峰值应变和截面椭圆率作为评估指标探究了不同腐蚀位置、不同腐蚀深度及不同断层错动量等参数对逆断层作用下管道局部腐蚀区域、管体应力应变分布及其失效模式的影响。结论如下:

(1)管道未发生腐蚀时,在断层错动作用下,断层错动量超出0.7 m,管道的失效模式表现为断层下盘管道顶部和断层上盘管道底部屈曲破坏的单一失效模式;断层错动量超出1.0 m,上下盘管道的破坏均出现屈曲和椭圆化变形破坏的双失效模式;断层错动量超出1.2 m,上下盘管道的破坏均出现多失效模式。

(2)上盘管道发生顶部腐蚀时,与未发生腐蚀管道相比,随腐蚀程度的加深管道在断层错动量超过0.9 m时已出现屈曲和拉伸破坏的双失效模式,腐蚀区域管道的应变呈现近似线性增长的趋势,每减少10%的厚度应变大致增加0.01;上盘顶部腐蚀对管道抵抗拉伸破坏的能力影响最大。

(3)下盘管道发生顶部腐蚀时,与未发生腐蚀

管道相比,随腐蚀程度的加深管道在断层错动量超过0.4 m时已出现屈曲破坏的单一失效模式,腐蚀区域管道的应变变化较为剧烈,呈不规则非线性的增长趋势,下盘顶部腐蚀对管道抵抗屈曲破坏的能力影响最大。基本不影响其失效模式由单一破坏模式向多破坏失效模式的转变的断层错动量,与未发生腐蚀时管道基本相同。

参考文献:

- [1] 周子栋,林罡,徐娜,等.中缅油气管道(国内段)工程建设难点及对策[J].石油工程建设,2014,40(4):52-54.
Zhou Z D, Lin G, Xu N, et al. Difficulties and countermeasures in the construction of China-Myanmar oil and gas pipeline (domestic section) [J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2014, 40(4):52-54. (in Chinese)
- [2] Eidinger J, De Castro L, Ma D. The 1906 earthquake impacts on the San Francisco and Santa Clara water systems—What we learned, and what we are doing about it [J]. *Earthquake Spectra*, 2006, 22(2_Supl): 113-134.
- [3] MaCaffrey M A. Buried pipeline response to reverse faulting during the 1971 San Fernando Earthquake [J]. *Pressure Vessels & Piping Division*, 1983, 77: 151-159.
- [4] Eidinger J. Performance of Thames water 2.2 meter diameter pipeline at North Anatolian fault crossing [J]. *G&E Report*, 2001, 48(01).
- [5] Tsai J S, Jou L D, Lin S H. Damage to buried water supply pipelines in the chichi (Taiwan) earthquake and a preliminary evaluation of seismic resistance of pipe joints [J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2000, 23(4):395-408.
- [6] Jing J, Xiao F, Yang L, et al. Experimental and simulation study of atomization concentration of corrosion inhibitor in a gas pipe [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 49: 8-18.
- [7] 刘欢.某酸性气田集输管线内腐蚀与控制技术研究 [D].成都:西南石油大学,2018.
Liu H. An acid gas gathering pipeline internal corrosion and control technology research [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018. (in Chinese)
- [8] Karamitros D K, Bouckovalas G D, Kouretzis G P. Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2007, 27(3): 200-211.
- [9] Kennedy R P, Williamson R A, Chow A M. Fault movement effects on buried oil pipeline [J]. *Transportation Engineering Journal of ASCE*, 1977, 103 (5) : 617-633.
- [10] Wang L R L, Yeh Y H. A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1985, 13 (1): 75-96.
- [11] 金浏,李鸿晶.穿越逆冲断层的埋地管道非线性反应分析 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2010, 30(2):130-134.
Jin L, Li H J. Nonlinear response analysis of buried pipeline crossing thrust fault [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2010, 30(2):130-134. (in Chinese)
- [12] 樊苏楠,闫相祯.地震载荷作用下长输管线穿越断层应变设计 [J]. *石油机械*, 2015, 43(12):114-118.
Fan S N, Yan X Z. Fault strain design of long haul pipeline crossing under seismic load [J]. *China Petroleum Machinery*, 2015, 43(12):114-118. (in Chinese)
- [13] Zhang J, Zhang L, Liang Z. Buckling failure of a buried pipeline subjected to ground explosions [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 114: 36-47.
- [14] Ha D, Abdoun T H, O'Rourke M J, et al. Earthquake faulting effects on buried pipelines—case history and centrifuge study [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2010, 14(5): 646-669.
- [15] Jalali H H, Rofooei F R, Attari N K A, et al. Experimental and finite element study of the reverse faulting effects on buried continuous steel gas pipelines [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 86: 1-14.
- [16] Fadaee M, Farzaneganpour F, Anastasopoulos I. Response of buried pipeline subjected to reverse faulting [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 132: 106090.
- [17] Li L, Qiao L, Fan J, et al. Mechanical behavior of polyethylene pipes under strike-slip fault movements [J]. *Polymers*, 2022, 14(5): 987.
- [18] 张婷.逆断层作用下埋地管道碳纤维预增强方法研究 [D].北京:中国石油大学,2020.
Zhang T. Research on carbon fiber prestrengthening method of buried pipeline under reverse fault [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2020. (in Chinese)
- [19] 赵旭,崔建阳,钟紫蓝,等.逆断层作用下埋地连续钢管的力学性能 [J]. *北京工业大学学报*, 2022, 48(7):729-738.
Zhao X, Cui J Y, Zhong Z L, et al. Mechanical properties of buried continuous steel pipe under reverse fault [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2022, 48(7):729-738. (in Chinese)
- [20] 韩银杉,张宏.走滑断层作用下管道应变解析计算方法的适用性 [J]. *油气储运*, 2016, 35(12):1329-1336.

- Han Y S, Zhang H. Applicability of analytical calculation method for pipeline strain under strike-slip fault [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2016, 35(12):1329-1336.(in Chinese)
- [21] 黄建忠, 杨永和, 刘伟, 等. 穿越地震断裂带的管道安全监测预警系统[J]. 天然气工业, 2013, 33(12):151-157.
Huang J Z, Yang Y H, Liu W, et al. A safety monitoring and early warning system for pipelines traversing seismic fault zones [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(12):151-157. (in Chinese)
- [22] Marzocchi W, Melini D. On the earthquake predictability of fault interaction models [J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(23): 8294-8300.
- [23] 陈平伟, 王峰会, 王绍明. 含腐蚀缺陷 X70 钢剩余强度分析[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(2):3.
Chen P W, Wang F H, Wang S M. Analysis of residual strength of X70 steel with corrosion defects [J]. Corrosion and Protection, 2011, 32(2):3. (in Chinese)
- [24] 赵鹏程, 帅健, 唐雨, 等. 轴向应力对腐蚀缺陷管道极限内压的影响[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(3):70-75.
Zhao P C, Shuai J, Tang Y, et al. Effect of axial stress on ultimate internal pressure of corroded defective pipelines [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(3): 70-75. (in Chinese)
- [25] 李鸿鹏. 断层内含体积型缺陷的埋地管道错动反应分析[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
Li H P. Staggered response analysis of buried pipeline with volume defects in fault [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014. (in Chinese)
- [26] 缪文振. 含腐蚀缺陷高强度管线钢在活动断层中的反应分析[D]. 荆州: 长江大学, 2019.
Miao W Z. Reaction analysis of high strength pipeline steel with corrosion defects in active faults [D]. Jinzhou: Yangtze University, 2019. (in Chinese)
- [27] Mohitpour M, Golshan H, Murray M A. Pipeline design & construction: a practical approach [M]. New York: ASME press, 2007: 403-404.
- [28] Anastasopoulos I, Gazetas G, Bransby M F, et al. Fault rupture propagation through sand: finite-element analysis and validation through centrifuge experiments [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(8): 943-958.
- [29] Trifonov O V. Numerical stress-strain analysis of buried steel pipelines crossing active strike-slip faults with an emphasis on fault modeling aspects [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2015, 6(1): 04014008.
- [30] 西气东输二线管道工程穿越工程施工技术规范: QSY GJX 0114—2008[S]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [31] 输油(气)钢质管道抗震设计规范: SY/T 0450—2004 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [32] Vazouras P, Karamanos S A, Dakoulas P. Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(11): 1361-1376.
- [33] 刘艳琼. 活动断层的地震地表永久位移研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013.
Liu Y Q. Study on permanent seismic surface displacement of active fault [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013. (in Chinese)
- [34] 汪振, 钟紫蓝, 赵密, 等. 正断型断裂模拟及其对山岭隧道影响研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10):1876-1884.
Wang Z, Zhong Z L, Zhao M, et al. Simulation of normal fault type and its effect on mountain tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10):1876-1884. (in Chinese)
- [35] 马明利. 庆一哈输油管道腐蚀缺陷评估与补强技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.
Ma M L. Study on corrosion defect evaluation and reinforcing technology of Qinghai-Harbin Pipeline [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011. (in Chinese)
- [36] 张伟刚, 赵会军, 周立辉, 等. 湿气管线的顶部腐蚀研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(5):492-496.
Zhang W G, Zhao H J, Zhou L H, et al. Research progress on top-of-line corrosion in wet gas pipelines [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2015, 27(5):492-496. (in Chinese)
- [37] 马川. 斜逆断层作用下埋地 X80 钢管的失效模式研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
Ma C. Buried under oblique thrust, the failure mode of X80 steel pipe research [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020. (in Chinese)
- [38] Canadian Standards Association. Oil and gas pipeline systems: CSA Z662 [S]. Mississauga, Ontario, Canada: Canadian Standards Association, 2007.
- [39] Gresnigt A M. Plastic Design of Buried Steel Pipelines in Settlement Areas [J]. Heron, 1986, 31(4):1-113.

(本文编辑:周小潭)