

## 滑坡作用下X80腐蚀管道的极限宽度分析

张 鹏, 唐雪梅, 李 虎, 刘思铭

### Limit width analysis of X80 corroded pipeline pass through landslide

ZHANG Peng, TANG Xuemei, LI Hu, and LIU Siming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202108020>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于虚拟参考站技术的滑坡高精度位移监测系统设计与实践

Design and practice of high precision landslide displacement monitoring system based on VRS

张鸣之, 湛兵, 赵文, 袁旭东, 李宏祥 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 54-59

#### 甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施

Causative analysis and comprehensive treatment of the Jiangdingya Landslide in Zhouqu County of Gansu Province

张卫雄, 翟向华, 丁保艳, 张文纶, 张国华 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 7-14

#### 季节性冻土区滑坡防治工程的冻融效应分析

Analysis on the effect of freeze-thaw on landslide prevention projects in seasonal frozen soil area

杨栋, 王全成, 姜昭群 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 82-89

#### 地下水渗流对崩坡积滑坡稳定性和变形的影响——以湖南安化春风滑坡群为例

Influence of groundwater seepage on stability and deformation of colluvial deposit landslide: taking Chunfeng Landslide group in Anhua County of Hunan Province as an example

贺小黑, 彭鑫, 谭建民, 裴来政 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 96-103

#### 基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99

#### 基于RBF神经网络信息量耦合模型的滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment by the coupling method of RBF neural network and information value: A case study in Min Xian, Gansu Province

黄立鑫, 郝君明, 李旺平, 周兆叶, 贾佩钱 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 116-126



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202108020

张鹏, 唐雪梅, 李虎, 等. 滑坡作用下 X80 腐蚀管道的极限宽度分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 47-54.

ZHANG Peng, TANG Xuemei, LI Hu, *et al.* Limit width analysis of X80 corroded pipeline pass through landslide[J].

The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 47-54.

## 滑坡作用下 X80 腐蚀管道的极限宽度分析

张 鹏<sup>1</sup>, 唐雪梅<sup>1</sup>, 李 虎<sup>2</sup>, 刘思铭<sup>3</sup>

(1. 西南石油大学土木工程与测绘学院, 四川 成都 610500; 2. 四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川 成都 610500; 3. 西南石油大学机电工程学院, 四川 成都 610500)

**摘要:**针对 X80 腐蚀管道横穿滑坡时所涉及的安全预警问题, 提出将极限宽度作为管道安全状态的判别因子, 根据具体滑坡工况建立有限元模型, 分析管道不同腐蚀尺寸和空间位置对腐蚀管道的力学行为与极限宽度的影响。结果表明: 极限宽度可用于管道安全状态的评判; 腐蚀的宽度和深度与管道极限宽度呈负相关, 且对于腐蚀深度表现出高敏感性; 内腐蚀对于管道安全状态的影响大于外腐蚀; 坡度为 30° 的土质滑坡下, 外径 10.16 cm 的无腐蚀 X80 管道的临界横穿滑坡宽度为 21.2 m, 含腐蚀管道横穿滑坡时的临界腐蚀深度为 0.25 倍的壁厚; 腐蚀管道距滑坡区中部的距离大于 6 m 时对管道的极限宽度影响可忽略; 管道应力与极限宽度呈负相关, 腐蚀深度为 0.2 倍壁厚时管道最大应力始终在腐蚀处, 其余位置的应力与无腐蚀管道一致。

**关键词:** X80 管道; 滑坡; 腐蚀尺寸; 腐蚀空间位置; 极限宽度

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)04-0047-08

## Limit width analysis of X80 corroded pipeline pass through landslide

ZHANG Peng<sup>1</sup>, TANG Xuemei<sup>1</sup>, LI Hu<sup>2</sup>, LIU Siming<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. Sichuan Geological Engineering Survey Research Institute Group Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610500, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

**Abstract:** In view of the safety early warning problems involved in X80 corroded pipeline crossing landslide, it is proposed to take the limit width as the discrimination factor of pipeline safety state, establish a finite element model according to the specific landslide conditions, to analyze the influence of different corrosion sizes and spatial positions of pipeline on the mechanical behavior and limit width of corroded pipeline. The results show that the limit width can be used to evaluate the safety state of pipeline. The width and depth of corrosion are negatively correlated with the ultimate width of pipeline, and show high sensitivity to corrosion depth; the influence of internal corrosion on pipeline safety is greater than that of external corrosion; under the soil landslide with a slope of 30°, the critical cross landslide width of the non-corrosive X80 pipeline with an outer diameter of 10.16 cm is 21.2 m, and the critical corrosion depth of the corrosive pipeline crossing the landslide is 0.25 times the wall thickness; when the distance between the corroded pipeline and the middle of the landslide area is greater than 6 m, the influence on the limit width of the pipeline can be ignored; the pipeline stress is negatively correlated with the limit width. When the corrosion depth is 0.2 times the wall thickness, the maximum stress of the pipeline is always at the corrosion

收稿日期: 2021-08-21; 修订日期: 2021-10-25

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(50974105); 中国工程院重大咨询研究项目(2011-ZD-20)

第一作者: 张 鹏(1964-), 男, 上海人, 教授, 博导, 博士(后), 主要从事结构工作性能及力学行为、管道系统完整性等研究。

E-mail: zp\_awpi@sina.com

通讯作者: 唐雪梅(1997-), 女, 四川成都人, 硕士, 主要从事管道完整性管理研究。E-mail: 1512192642@qq.com

position, and the stress at other positions is consistent with that of the non-corrosive pipeline.

**Keywords:** X80 pipeline; landslide; corrosion size; corrosion space location; limit width

## 0 引言

油气管道是国民经济发展的能源大动脉,在国家能源安全战略中居重要地位。截止 2020 年,我国油气管道总长度为  $14.4 \times 10^4$  km, 根据《中长期油气管网规划》,至 2025 年,国内油气管网规模将达到  $24 \times 10^4$  km<sup>[1]</sup>。滑坡是引发管道失效的高频率地质灾害,是山区、野外管道防灾减灾的重点研究工作之一,如 2017 年 7 月 2 日,贵州省黔西南州晴隆县沙子镇段的中缅天然气管道在滑坡作用下发生断裂燃爆事故,造成 8 人死亡,35 人受伤<sup>[2]</sup>,其中顺向层滑坡的稳定性最差、最易变形<sup>[3]</sup>。腐蚀是影响管道安全运行的危害因素之一,其尺寸和空间位置具有高度不确定性。当滑坡施加在管道上的拉应力、管-土交互作用以及内压荷载三者耦合作用发生在腐蚀处将严重影响油气管道的安全运营。

针对以上问题,学者做了大量研究,1998 年,邓道明等<sup>[4]</sup>将滑坡作用下管道简化为梁,最先推导出拉压当量轴力下管道内力、变形的计算公式。2012 年,郝建斌等<sup>[5]</sup>首次将管道后土体简化为刚性楔体,对横穿滑坡下管道的推力进行了计算,表明滑坡土体、管径、埋深是影响滑坡推力的主要因素。Zahid 等<sup>[6]</sup>考虑管-土耦合作用,建立埋地天然气管道在纵向滑坡作用下的有限元模型,分析了管道的极限轴向应变。2015 年,张铄等<sup>[7]</sup>建立深层圆弧形滑坡作用下埋地长输油气管道的力学体系,并建立数值模拟模型进行管道应力的参数敏感性分析。2016 年,Kuppusamy 等<sup>[8]</sup>用数值模拟法对含交互腐蚀管道的屈曲强度进行了研究。2018 年,徐鹏飞<sup>[9]</sup>运用 ABAQUS 建立含腐蚀管道在滑坡作用下有限元模型,对管道的剩余强度进行讨论。2020 年,李非飞等<sup>[10]</sup>研究了 X80 单腐蚀管道的失效机理,并建立有限元模型,对管道腐蚀参数进行了分析,拟合了失效压力预测公式。然而,鲜有研究将滑坡宽度用作外部评判指标,以进行滑坡威胁下油气管道安全预警预报分析。

为此,创新性地提出将极限宽度作为一个判定指标,用于确定腐蚀管道的安全状态。针对不同腐蚀尺寸和空间位置,建立了有限元模型用于参数分析,研究了滑坡推力、管-土相互作用、内压下腐蚀管道的力学响应,探究了腐蚀管道的极限宽度随参数变化的敏感性,提出了可用于工程实际的临界滑坡宽度以及腐蚀的边缘影响位置。以期对腐蚀管道在滑坡灾害下的安全预警提供依据。

## 1 滑坡推力计算和极限宽度定义

### 1.1 管道及土体本构模型

土体本构模型采用运用最为广泛的莫尔-库仑模型,能较好反映土体本构关系<sup>[11]</sup>,且需要的土体参数容易测量。管道本构模型采用双折线模型<sup>[12]</sup>,为给管道提供安全预警和抢修时间,运用第四强度理论(Von Mises)作为管道失效判断准则,如式(1),以管道应力达到许用应力时认为管道失效,如式(2),按《输气管道工程设计规范(GB50251-2015)》<sup>[13]</sup>可得管道仅在内压下需达到的最小壁厚即计算壁厚,如式(3)所示。

$$\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \leq [\sigma] \quad (1)$$

$$[\sigma] = K \cdot \phi \cdot \sigma_s \quad (2)$$

$$\delta_0 = \frac{P \cdot D}{2[\sigma]} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ ——管道三个方向主应力/MPa;

$\sigma_s$ ——管道屈服应力/MPa;

$[\sigma]$ ——许用应力/MPa;

$K$ ——设计系数,埋地直管段的轴向应力与环向应力组合的当量应力时取 0.9<sup>[14]</sup>;

$\phi$ ——焊缝设计系数;

$\delta_0$ ——计算壁厚/mm;

$P$ ——内压/MPa;

$D$ ——管道外径/m。

### 1.2 管道横穿滑坡推力

在以往研究中滑坡推力普遍采用均匀分布<sup>[14-16]</sup>,忽略了滑坡区域的边缘滑坡力小于中间滑坡力的客观事实。当管道穿越土体分布较均匀的土质顺层滑坡或滑坡后缘呈马蹄形时,可假设管道受滑坡推力呈二次抛物线形状,管道横穿滑坡时,在滑坡区中部管道所受推力最大,则滑坡推力公式为:

$$q(x) = \frac{-4q_{\max}x^2}{L^2} + \frac{4q_{\max}x}{L} \quad (4)$$

式中:  $x$ ——滑坡段管道位置/m;

$q(x)$ ——滑坡推力/(N·m<sup>-2</sup>);

$q_{\max}$ ——最大滑坡推力/(N·m<sup>-2</sup>);

$L$ ——滑坡区宽度/m。

根据横穿滑坡时管道的受力特点,可将管道看作受滑坡楔形体的推力作用<sup>[5]</sup>,如图 1 所示,则最大滑坡推

力公式计算如式(5):

$$q_{\max}=f_{EC}(\cos\alpha-\sin\alpha\tan\varphi)+N_{EC}(\cos\alpha\tan\varphi+\sin\alpha)+G_{CDE+p}(\cos\beta\tan\varphi+\sin\beta)+\frac{D}{\tan\alpha}c \quad (5)$$

式中:  $f_{EC}$ ——EC 面滑坡推力/kN;  
 $N_{EC}$ ——楔形体所受支持力/kN;  
 $G_{CDE+p}$ ——滑块本身所受重力/kN;  
 $\alpha$ ——滑坡水平角度/(°),工程上近似采用 $\alpha=45^\circ-\varphi/2$ ;  
 $D$ ——管道直径/m;  
 $\varphi$ ——土体内摩擦角/(°);  
 $H$ ——管道底面深度/m;  
 $\beta$ ——埋地管道与土平面夹角,近似等于该处滑坡倾角/(°);  
 $c$ ——土体黏聚力/kPa;  
 $t$ ——管道壁厚/m;  
 $\gamma_p$ ——管道材料容重/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ );  
 $\gamma_t$ ——管输介质容重/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )。

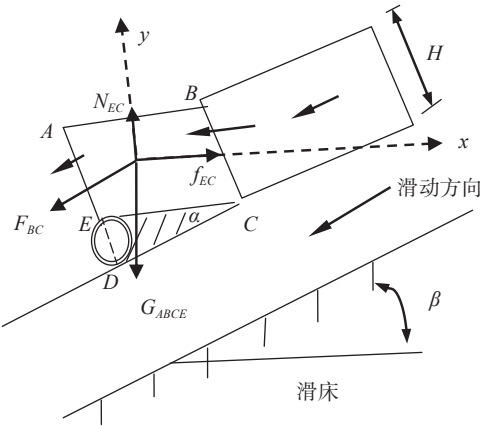


图 1 滑坡楔形体受力分析图  
Fig. 1 Force analysis of landslide wedge

1.3 管-土相互作用

滑坡发生时,滑坡体沿滑坡面向下滑动,推动管道产生应力和变形,但管道和土体的刚度差距较大导致两者变形量不一致,故管道与土体间是非线性接触且不协同变形,符合非线性接触模型。为真实反应管-土间的相互作用,在 ABAQUS 有限元中运用管-土非线性接触模型进行管-土间相互作用模拟。

1.4 管道的极限宽度定义

为给工程中横穿滑坡的管道安全状态提供一个外部预警指标,将管道应力达到许用应力时管道所能承受的滑坡作用宽度定义为滑坡作用下管道的极限承载宽度  $L$ (文中简称极限宽度)(图 2)。

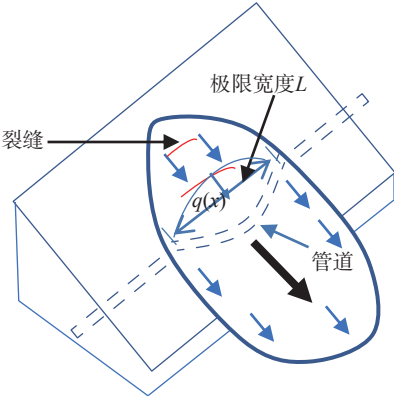


图 2 管道极限宽度示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of pipe limit width

2 有限元模型建立

中贵线某滑坡平面形态呈马蹄形,滑坡后缘以斜坡陡坎为界,坡度约  $15^\circ\sim 30^\circ$ ,滑坡体宽度  $20\sim 28\text{ m}$ ,平均长度  $60\text{ m}$ ,平均滑体厚  $3.0\text{ m}$ ,是沿软弱带滑动的浅层土质滑坡,滑坡土体与非滑坡土体性质见表 1<sup>[12]</sup>。X80 管道横穿滑坡中部,管道埋深  $1\text{ m}$ ,处于滑坡内部,管道内压为  $10\text{ MPa}$ ,管道具体性质见表 2<sup>[12]</sup>。

表 1 土体参数  
Table 1 Soil parameters

岩土参数	$E/\text{MPa}$	$\mu$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\varphi/(^\circ)$	$c/\text{kPa}$
非滑坡区域	32.5	0.35	20	25	20
滑坡区域	32.5	0.4	20	10	15

表 2 X80 管材参数  
Table 2 X80 pipe parameters

型号	外径/mm	壁厚/mm	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$E/\text{GPa}$	$\mu$	$\sigma/\text{MPa}$
X80	1 016	17.5	7 850	207	0.3	555

2.1 模型建立

取滑坡坡度为  $30^\circ$ ,管材为 X80 管道,按式(2)计算出许用应力为  $499.5\text{ MPa}$ 。建立滑坡作用下腐蚀管道的半模型,土体截面采用  $8\text{ m}\times 7\text{ m}$ ,非滑坡区土体宽度不少于 12 倍管径<sup>[17-18]</sup>,取  $12.20\text{ m}$ ,建立三个分析步,模型选取面面接触,管道外表面为主接触面,切线选用罚函数,摩擦系数为 0.5,法向选用硬接触,运用式(5)计算出最大滑坡推力为  $93\,709\text{ N/m}^2$ ,建立呈二次抛物线分布的力荷载  $q(x)$ ,作用于管道滑坡区域迎滑坡面上,方向如图 2 所示。

2.2 模型网格敏感性分析

在划分模型网格时,为精确分析腐蚀处力学行为的变化且节约计算成本,需对管道厚度方向和腐蚀处进行网格细化<sup>[19]</sup>。以腐蚀长  $20\text{ cm}$ ,宽  $3\text{ cm}$ ,深  $0.2t$  即  $3.5\text{ mm}$ ,



滑坡作用宽度 15 m, 内压 10 MPa 为例(工况 1), 建立敏感性分析模型。

将腐蚀处网格尺寸按 0.5 cm 进行划分, 其余部分按 0.25 m 进行划分, 管道厚度方向网格依次划分为 2~6 层, 且为验证非滑坡区土体宽度取 12D 时满足模型精度要求, 以网格层数 4 层为例, 建立非滑坡区长 15D、18D 的模型, 提取各模型管道腐蚀中点处轴向路径应力, 结果如图 3 所示。

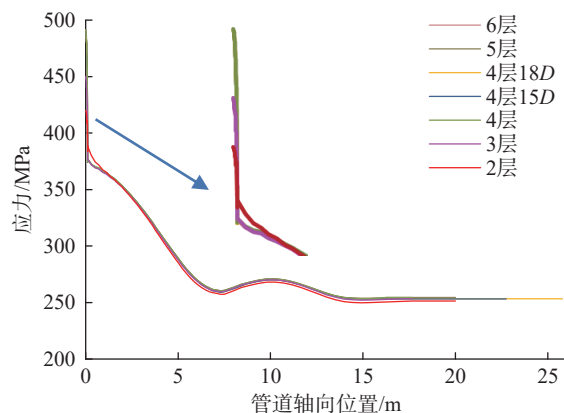


图 3 管道厚度层数应力图

Fig. 3 Stress of pipeline thickness and layers

由图 3 可知, 当管道厚度方向网格层数为 2、3 层时, 网格精度不高, 管道应力在腐蚀边缘处发生突变, 管道最大应力偏小, 曲线与 4 层时不重合; 网格层数 5 层、6 层时管道轴向应力与网格 4 层时完全重合, 故为保证计算精度与节约计算成本可将管道模型厚度方向划分为 4 层; 非滑坡区土体长 12D 时与土体长 15D、18D 时的管道最大应力相同, 且轴向分布曲线重合, 故非滑坡区土体宽度 12D 时满足模型计算精度要求。

为验证所选网格尺寸满足计算精度, 建立网格层数 4 层, 非滑坡区土体宽度 12D, 腐蚀处网格尺寸 0.1 cm, 其余部分网格尺寸 0.1 m 的网格细化模型, 提取管道腐蚀中点处轴向路径应力, 并与原模型进行对比, 其结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 网格细化后的管道轴向路径应力分布与原模型轴向路径应力分布高度重合, 管道最大应力偏差只有 0.1 MPa, 故可认为原模型的网格尺寸满足计算精度要求, 后续模型网格尺寸按照腐蚀处 0.5 cm, 其余部分 0.25 m 进行划分, 最终网格划分结果如图 5 所示。

### 3 腐蚀管道极限宽度分析

#### 3.1 腐蚀尺寸影响

##### 3.1.1 确定腐蚀尺寸

由于滑坡区中部管道所受推力最大, 故将腐蚀建于

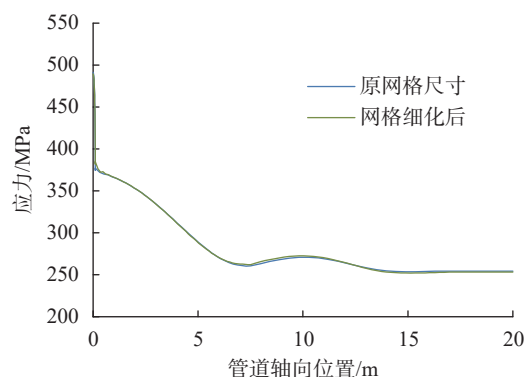


图 4 管道腐蚀网格宽度应力图

Fig. 4 Pipeline corrosion grid width stress diagram

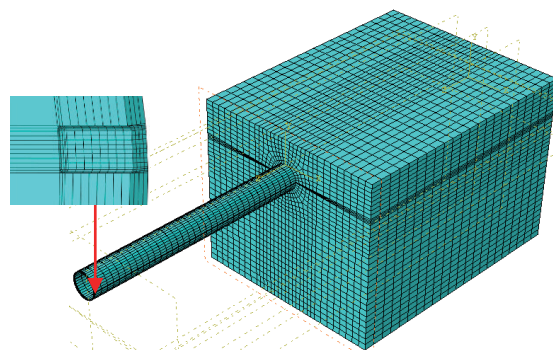


图 5 模型网格划分

Fig. 5 Model meshing

管道滑坡区中部, 以此研究腐蚀尺寸对管道极限宽度的影响。相关文献<sup>[11-12]</sup>研究表明, 腐蚀宽度对管道承载能力影响较小, 故暂不考虑腐蚀宽度对管道极限宽度的影响。按照《钢制管道管体腐蚀损伤评价方法(SY/T6151-2009)》<sup>[20]</sup>, 管道腐蚀坑深度为壁厚的 10% 至 80% 时为 2 类腐蚀, 可限期修复。按式(4)计算出管道的计算厚度为 10.16mm, 接近腐蚀深度达壁厚 40% 时的剩余壁厚 10.5mm, 管道腐蚀程度详细评价可见表 3, 结合研究<sup>[21]</sup>知, 壁厚 10%~30% 的腐蚀最具有工程研究价值。

表 3 管道腐蚀程度评价指标<sup>[22]</sup>

Table 3 Evaluation index of pipeline corrosion degree

项目	轻	中	重	严重	穿孔
腐蚀坑相对深度/%	<10	[10, 25)	[25, 50)	[50, 80)	≥80

以坡面角度为 30°, 管道内压 10 MPa 为例, 建立管道内腐蚀宽度为 3 cm<sup>[12]</sup>, 深度按壁厚的 10% 至 30% 间距 5% 确定, 宽度取 10 cm 到 30 cm 间距 5 cm 的一系列模型进行腐蚀尺寸对管道的影响分析。

##### 3.1.2 不同腐蚀尺寸的影响

为分析腐蚀尺寸和滑坡作用宽度对管道应力的影

响,选取腐蚀深度  $0.2t$  即  $3.5\text{ mm}$ ,建立不同滑坡作用宽度的管-土模型,对不同滑坡宽度下管道的应力进行分析,结果如图 6 所示。

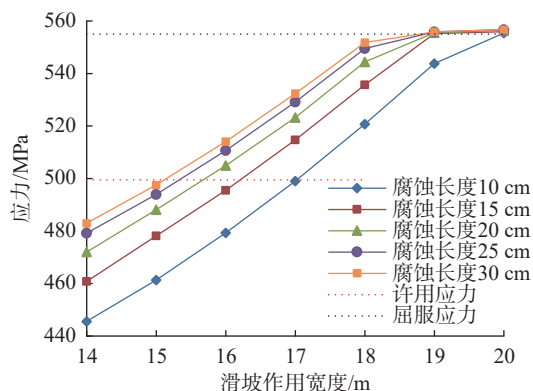


图 6 腐蚀深度  $0.2t$  时管道应力曲线

Fig. 6 Stress curve of pipeline with  $0.2t$  corrosion depth

由图 6 可知,在达到屈服应力之前,随着滑坡宽度的增加,管道的应力不断增长;随腐蚀长度的增加,管道的应力也不断增加,且增幅减小,这是由于腐蚀长度增加时整个腐蚀面积增大,管道在腐蚀处的应力集中程度相对减弱;在接近屈服强度后,随滑坡宽度的增加,管道的应力缓慢增长;选用达到许用应力时的滑坡宽度为管道的极限宽度,为管道应力达到屈服应力时留有  $3\text{ m}$  左右的安全裕度,可用于工程中在管道应力达到屈服前对滑坡进行处理或对管道腐蚀进行修复,并可对滑坡作用下的管道安全做出评判与预警。

为分析不同腐蚀尺寸对管道极限宽度的影响,以工况 1 为例,计算出腐蚀管道的极限宽度如图 7 所示。

由图 7 知,运用 ABAQUS 计算出无腐蚀管道的极限宽度为  $21.2\text{ m}$ ,故无腐蚀管道的临界滑坡承载宽度为  $21.2\text{ m}$ ;腐蚀深度为  $0.1t$ ,长度为  $10\text{ cm}$ 、 $30\text{ cm}$  时管道极限宽度分别为  $19.1\text{ m}$ 、 $18.7\text{ m}$ , $0.3t$  时分别为  $14.2\text{ m}$ 、 $4.5\text{ m}$ ,较  $0.1t$  时分别减小了  $0.35$  倍、 $3.16$  倍。可知随着腐蚀尺寸的增加,管道极限宽度不断减少,且管道的极限宽度对腐蚀深度表现出高敏感性。这是由于腐蚀深度的增加,导致管道壁厚的减薄,剩余壁厚逼近管道的计算壁厚,管道在内压与滑坡推力下容易直接爆管,故工程中应着重关注管道的腐蚀深度。

由图 7 还知,腐蚀深度为  $0.25t$ 、宽度  $30\text{ cm}$  时,管道的极限宽度为  $10.4\text{ m}$ ,腐蚀宽度越大,管道的极限宽度越小。工程中绝大部分滑坡的宽度均超过  $10\text{ m}$ ,宽度小于  $10\text{ m}$  的滑坡在管道路线选取时可进行设置挡土墙或水泥护壁等处理,可忽略其影响,故建议在工程中应控制管道腐蚀深度不超过  $0.25t$ 。

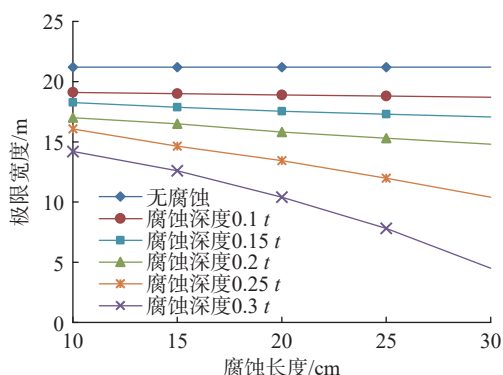


图 7 管道极限宽度变化曲线

Fig. 7 Variation curve of pipeline limit width

### 3.2 腐蚀空间位置的影响

#### 3.2.1 腐蚀径-环向位置影响分析

为研究腐蚀在不同径向位置、环向位置对管道力学行为及管道极限宽度的影响,以工况 1 为例,建立内、外腐蚀以迎滑坡面中点截面为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  为间距逆时针变动的一系列模型,如图 8 所示,计算得到内、外腐蚀在不同环向位置管道力学行为,如图 9 所示。

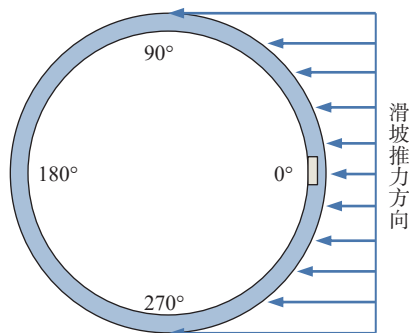


图 8 腐蚀环向位置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of circumferential position

由图 9 知,随着腐蚀环向位置的变化,腐蚀位于迎滑坡面中点即  $0^\circ$  时管道应力最大;内腐蚀管道应力始终大于外腐蚀管道应力,且曲线变化趋势一致,沿滑坡推力面中轴线呈对称分布;管道应力在  $0^\circ \sim 90^\circ$  减小,  $90^\circ \sim 180^\circ$  增大,这是由管道截面不同环向位置所受滑坡推力大小变化而致。即当腐蚀位于管道环向迎滑面中点处时,管道迎滑面受到滑坡推力作用使得管道发生挤压变形,应力变化最大,而背滑面则主要是由管道发生弯曲造成的管道背滑面处应力变化,未直接受到土体挤压作用,其应力变化相对于迎滑面较小,而管道上下两边则主要受到管道弯曲变形幅度最小,故而应力变化最小。且管道最大应力位置及管道最危险位置始终位于腐蚀处。

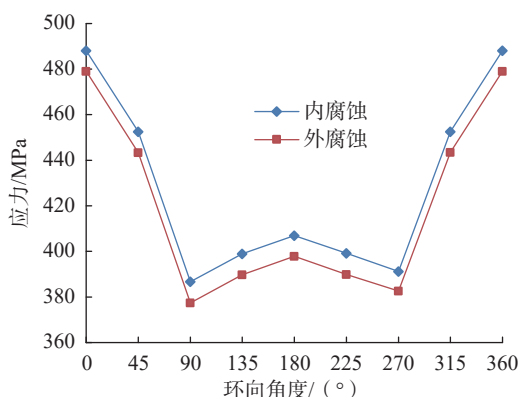


图 9 管道内外腐蚀应力对比图

Fig. 9 Comparison of corrosion stress of internal and external pipeline

为分析腐蚀不同位置下管道与无腐蚀管道的环向详细的应力分布,提取无腐蚀和内腐蚀环向位置为  $0^\circ \sim 180^\circ$ , 滑坡宽度 15 m 时管道滑坡区中部内壁面的应力值,如图 10 所示,以及以腐蚀宽度 20 cm,深度 0.2t 为例分析不同内、外腐蚀环向位置下管道的极限宽度变化规律(图 11)。

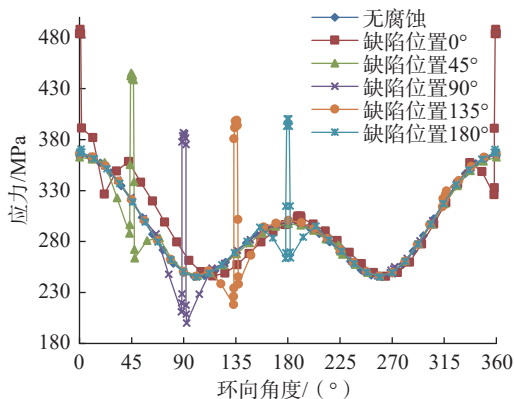


图 10 管道环向应力路径图

Fig. 10 Pipeline circumferential stress path diagram

由图 10 可知,腐蚀管道沿环向上的等效应力在腐蚀处发生了突变,且应力远超相同滑坡宽度下无腐蚀管道的最大应力,故最大应力位置始终在腐蚀处,腐蚀两侧管道应力比无腐蚀管道应力小,其余位置处的应力及其变化趋势皆与无腐蚀管道相同,这由工况 1 的腐蚀深度较大导致。

由图 11 知,随着腐蚀在管道环向位置的变化,腐蚀位于迎滑坡面中点即  $0^\circ$  时管道极限宽度最小,外腐蚀管道的极限宽度始终大于内腐蚀,即管道内腐蚀更加敏感。随着腐蚀位置沿管道环向变化,管道的极限宽度变化曲线成 M 型,沿滑坡推力面中轴线呈对称分布,即当腐蚀位于管道环向迎滑坡面中点处管道的极限宽度最

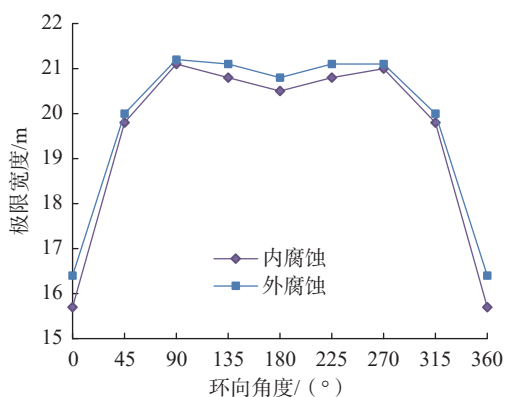


图 11 管道内外腐蚀极限宽度对比图

Fig. 11 Comparison diagram of limit width of internal and external corrosion pipeline

小。随着腐蚀位置由管道环向迎滑坡面中点向两侧交界处移动,管道的极限宽度增大,由两侧交界处向背滑坡面中点移动,管道的极限宽度减小,最大与最小极限宽度值相差 5.4 m。

### 3.2.2 腐蚀轴向位置影响分析

为研究腐蚀在管道不同轴向位置下的力学行为及管道极限宽度的变化规律,以工况 1 为例,建立腐蚀由管道滑坡区中部向滑坡边缘移动,管道滑坡中部是 0 m,间距为 0.5 m 的一系列模型,得到管道最大应力和极限宽度的变化规律,结果如图 12 所示。

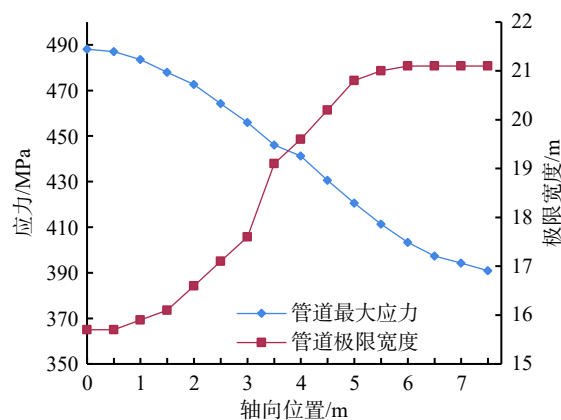


图 12 不同轴向位置腐蚀管道的最大应力和极限宽度曲线

Fig. 12 Maximum stress and limit width curves of corroded pipes at different axial positions

由图 12 可知,腐蚀位置在管道滑坡区中部时,管道最大应力为 488.1 MPa,比腐蚀在滑坡边缘时管道最大应力大 97.2 MPa。可知随腐蚀轴向位置由滑坡中部向边缘移动,管道应力不断减小,减小速度先增大后减小,且最大应力位置始终处于腐蚀处,这是由所采用的腐蚀尺寸较大导致,对于较小腐蚀尺寸时,最大应力位置的



变化情况可再进一步分析。

由图 12 还知,在腐蚀位置距管道滑坡区中部的距离不断增加的过程中,管道的极限宽度不断增加,且增速先增大后减小,增速在 3.5 m 处发生突变,当腐蚀位于管道滑坡区中部位置时,管道的极限宽度最小,为 15.7 m;当腐蚀距管道滑坡区中部 3.5 m 时,管道的极限宽度为 19.1 m,增量是腐蚀距管道滑坡区中部 3 m 时的 3 倍,且此后管道的极限宽度缓慢增加至稳定;当距管道滑坡区中部 6 m 时,管道极限宽度为 21.1 m,与无腐蚀管道极限宽度值相近。可知在腐蚀距管道滑坡区中部的距离小于 3.5 m 时腐蚀对管道安全的危害较大,3.5 m 至 6 m 腐蚀的危害不断减小,距管道滑坡区中部距离大于 6 m 的腐蚀对管道的极限宽度的影响可以忽略,工程中在管道铺设时应加强滑坡区中部左右 6 m 管道的防腐处理。

为充分分析无腐蚀和不同腐蚀轴向位置下管道的应力分布,提取管道轴向路径应力值,结果如图 13 所示。

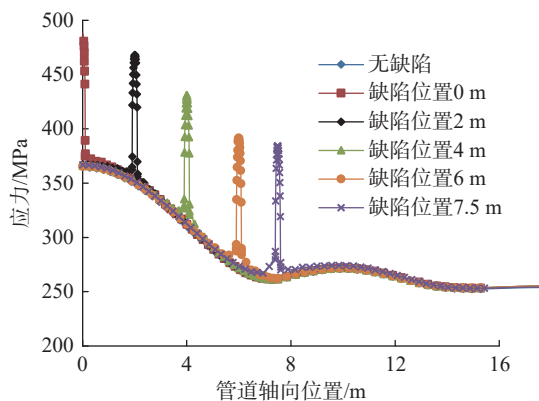


图 13 管道轴向应力路径

Fig. 13 Pipeline axial stress path

由图 13 可知,腐蚀管道轴向上应力在腐蚀处发生了突变,且始终大于相同滑坡宽度下无腐蚀管道的最大应力,分别为无腐蚀管道最大应力的 133.8%、128.3%、118.23%、107.3%、105.4%,故管道最危险位置始终在腐蚀处,且由于滑坡作用使管道弯曲,距离滑坡中部越近,管道应力越大。结合图 10、13 可知,腐蚀仅影响管道在缺陷处的应力,对管道其余位置应力的影响可以忽略。

由以上不同腐蚀尺寸和空间位置下管道的极限宽度对比实际工况下管道受到的滑坡宽度,可初步判断管道的安全性。

## 4 结论

(1)随着腐蚀尺寸的增大,管道的应力不断增加,极

限宽度不断减少,且对腐蚀深度表现出高敏感性。坡度为 30° 的土质滑坡下,外径 10.16 cm 的 X80 管道应控制管道腐蚀的深度不能超过 0.25 倍的壁厚,且拟建管道应该避免横穿宽度超过 21.2 m 的土质滑坡。

(2)内腐蚀管道的应力始终大于含外腐蚀管道的应力,管道应力与极限宽度呈负相关,腐蚀位于管道迎滑面中点时管道的极限宽度最小,工程中应加强对管道迎滑面和背滑面的防护,避免管道防腐层破坏。

(3)腐蚀在管道轴向变化的整个过程中,管道的应力不断减小,管道的极限宽度不断增加,且增速先增大后减小;腐蚀距管道滑坡区中部的距离超过 6 m 之后,对管道极限宽度的影响可以忽略,工程中应加强对管道滑坡区中部左右 6 m 管段的防腐处理,或对此范围内的滑坡进行治理。

(4)腐蚀管道仅在管道腐蚀处产生应力突变,腐蚀深度为 0.2 倍壁厚时,管道腐蚀处应力远大于管道其余位置的应力,腐蚀管道其余位置的应力与无腐蚀管道一致。根据无腐蚀和不同腐蚀尺寸与空间位置下管道的极限宽度与力学行为变化可为穿越滑坡区管道的运行安全提供依据。

## 参考文献 (References):

- [1] 高鹏,高振宇,刘广仁. 2019 年中国油气管道建设新进展 [J]. 国际石油经济, 2020, 28(3): 52-58. [GAO Peng, GAO Zhenyu, LIU Guangren. New progress in China's oil and gas pipeline construction in 2019 [J]. International Petroleum Economics, 2020, 28(3): 52-58. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李阳春,刘黔云,李潇,等. 基于机器学习的滑坡崩塌地质灾害气象风险预警研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 118-123. [LI Yangchun, LIU Qianyun, LI Xiao, et al. Exploring early warning and forecasting of meteorological risk of landslide and rockfall induced by meteorological factors by the approach of machine learning [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 118-123. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 王玉川,郭其峰,周延国. 中等倾角岩层顺向坡滑坡发育特征及形成机制分析——以拖担水库左岸坝肩滑坡为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(4): 17-23. [WANG Yuchuan, GUO Qifeng, ZHOU Yanguo. Development characteristics and formation mechanism of the medium-dip bedding slopes: A case study of the landslide on the left bank of Tuodan reservoir dam [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(4): 17-23. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 邓道明,周新海,申玉平. 横向滑坡过程中管道的内力和变形计算 [J]. 油气储运, 1998, 17(7): 18-22. [DENG



- Daoming, ZHOU Xinhai, SHEN Yuping. Calculation of pipeline inner force and distortion during transverse landslide body [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1998, 17(7): 18–22. (in Chinese with English abstract)
- [5] 郝建斌, 刘建平, 荆宏远, 等. 横穿状态下滑坡对管道推力的计算 [J]. 石油学报, 2012, 33(6): 1093–1097. [HAO Jianbin, LIU Jianping, JING Hongyuan, et al. A calculation of landslide thrust force to transverse pipelines [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(6): 1093–1097. (in Chinese with English abstract)]
- [6] ZAHID U, GODIO A, MAURO S. An analytical procedure for modelling pipeline-landslide interaction in gas pipelines [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 81: 103474.
- [7] 张铄, 吴明, 牛冉, 等. 深层圆弧形滑坡作用下长输埋地输气管道响应分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(11): 29–34. [ZHANG Shuo, WU Ming, NIU Ran, et al. Analysis on response of long distance buried gas pipeline impacted by deep circular arc landslide [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(11): 29–34. (in Chinese with English abstract)]
- [8] KUPPUSAMY C S, KARUPPANAN S, PATIL S S. Buckling strength of corroded pipelines with interacting corrosion defects: numerical analysis [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2016, 16(9): 1550063.
- [9] 徐鹏飞. 含体积型缺陷输气管道在滑坡作用下剩余强度评价技术研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2018. [XU Pengfei. Research on residual strength evaluation technology of gas pipeline containing volume defects under landslide [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李非飞, 黄坤, 吴佳丽, 等. X80管道单腐蚀缺陷失效研究 [J]. 应用力学学报, 2020, 37(1): 330–337. [LI Feifei, HUANG Kun, WU Jiali, et al. Research on failure of single corrosion defect in X80 pipeline [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(1): 330–337. (in Chinese with English abstract)]
- [11] LIU Y W, ZHANG Z W, ZHANG Y. Two-dimensional numerical analysis of differential concentration corrosion in seawater pipeline [J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2020, 67(3): 257–268.
- [12] LI G Z, ZHANG P, LI Z X, et al. Safety length simulation of natural gas pipeline subjected to transverse landslide [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 21(12): 4387–4399.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 输气管道工程设计规范: GB 50251—2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015. [The Ministry of Housing and Urban-Rural Development, PRC. Design code for gas transmission pipeline engineering: GB 50251—2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese)]
- [14] 陈利琼, 宋利强, 吴世娟, 等. 基于有限元方法的滑坡地段输气管道应力分析 [J]. 天然气工业, 2017, 37(2): 84–91. [CHEN Liqiong, SONG Liqiang, WU Shijuan, et al. FEM-based stress analysis of gas pipelines in landslide areas [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(2): 84–91. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张家铭, 尚玉杰, 王荣有, 等. 基于Pasternak双参数模型的滑坡段埋地管道受力分析方法 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2020, 51(5): 1328–1336. [ZHANG Jiaming, SHANG Yujie, WANG Rongyou, et al. Force analysis method of buried pipeline in landslide section based on Pasternak double-parameter model [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(5): 1328–1336. (in Chinese with English abstract)]
- [16] ZHANG S Z, LI S Y, CHEN S N, et al. Stress analysis on large-diameter buried gas pipelines under catastrophic landslides [J]. Petroleum Science, 2017, 14(3): 579–585.
- [17] 张会远, 管巧艳, 骆晓阳, 等. 管道穿越滑坡下静力学与数值模拟对比分析 [J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(1): 85–89. [ZHANG Huiyuan, GUAN Qiaoyan, LUO Xiaoyang, et al. Comparative analysis of statics and numerical simulation of buried gas pipeline crossing landslide [J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(1): 85–89. (in Chinese with English abstract)]
- [18] ZHANG L S, FANG M L, PANG X F, et al. Mechanical behavior of pipelines subjected to horizontal landslides using a new finite element model with equivalent boundary springs [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 124: 501–513.
- [19] SARVANIS G C, KARAMANOS S A, VAZOURAS P, et al. Permanent earthquake-induced actions in buried pipelines: numerical modeling and experimental verification [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2018, 47(4): 966–987.
- [20] 国家能源局. 钢质管道管体腐蚀损伤评价方法: SY/T 6151—2009 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2010. [The National Energy Administration. Evaluation method for corrosion damage of steel pipe body: SY/T 6151—2009 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010. (in Chinese)]
- [21] 张晓, 帅健. 基于内检测数据的管道腐蚀缺陷分布规律 [J]. 油气储运, 2018, 37(9): 980–985. [ZHANG Xiao, SHUAI Jian. Distribution regularities of pipeline corrosion defect based on in-line inspection data [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(9): 980–985. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 国家能源局. 钢质管道及储罐腐蚀评价标准埋地钢质管道内腐蚀直接评价: SY/T 0087.2—2012 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2012. [National Energy Administration. Direct evaluation of internal corrosion in buried steel pipelines: SY/T 0087.2—2012 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012. (in Chinese)]