

文章编号:1673-9469(2024)04-0018-10

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.04.003

地震波斜入射下埋地腐蚀管道地震响应分析

薛景宏^{1,2}, 陆大伟¹, 李东瑞¹, 程安顿¹, 韩通¹

(1. 东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318;

2. 黑龙江省教育厅 防灾减灾及防护工程重点实验室, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 以埋地 X80 管道为研究对象, 探讨入射角和腐蚀参数以及保温层对管道腐蚀区域地震响应的规律。在 P 波和 SV 波激励下, 入射角 θ_v 和 θ_h 大约为 60° 和 45° 及 30° 和 45° 时, 管道腐蚀区域中心应力达到最大值 556.7 和 559.7 MPa; 相比垂直入射下的 441.3 和 437.0 MPa, 分别增大了 26.1% 和 28.0%。入射角为最大响应角度时, P 波和 SV 波下腐蚀深度、长度和宽度对腐蚀管道应力影响占比分别为 58.0% 和 51.9%、22.8% 和 27.1% 以及 19.2% 和 21.0%。管道保温层厚度的增加, 会有效减小地震作用下管道腐蚀区的最大应力。因此, 在管道抗震设计与维护中, 应关注地震波入射角度和腐蚀深度, 并考虑保温层的隔震作用。

关键词: X80 腐蚀管道; 地震波斜入射; 黏弹性人工边界; 安全评价; P 波; SV 波

中图分类号: TU96+8

文献标识码: A

Seismic Response Analysis of Buried Corroded Pipelines Under Incident Seismic Waves

XUE Jinghong^{1,2}, LU Dawei¹, LI Dongrui¹, CHENG Andun¹, HAN Tong¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

2. Heilongjiang Key Laboratory of Disaster Prevention, Mitigation and Protection Engineering,
Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: This paper takes buried X80 pipeline as the research object, and discusses the influence law of incidence angle, corrosion parameters and insulation layer on seismic response of pipeline corrosion area. Under the excitation of P wave and SV wave, the stress in the center of the pipeline corrosion area reaches the maximum value of 556.7 and 559.7 MPa and increases by 26.1% and 28.0% when the incidence angles θ_v and θ_h are 60° and 45° and 30° and 45° , respectively, compared to that of 441.3 and 437.0 MPa under the vertical incidence. When the incidence angle was the maximum response angle, the influence ratio of corrosion depth, length and width on corrosion pipe stress under P wave and SV wave was 58.0% and 51.9%, 22.8% and 27.1%, and 19.2% and 21.0%, respectively. The increase of the thickness of the pipeline insulation layer can effectively reduce the maximum stress in the corrosion zone of the pipeline under earthquake. Therefore, in the seismic design and maintenance of pipelines, we should pay attention to the incidence angle of seismic waves and corrosion depth, and consider the seismic isolation effect of insulation layer.

Key words: X80 corroded pipeline; seismic wave of oblique incidence; viscous-spring boundary; safety assessment; P waves; SV waves

地下管道在现代工业生产和居民生活中扮演
着重要角色, 由于受到地震动的非一致性影响, 加

之复杂的地质条件和腐蚀影响, 地震响应呈现出
复杂性, 因此抗震问题十分严峻。

收稿日期: 2024-04-21

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2020D25); 国家自然科学基金资助项目(51178087)

作者简介: 薛景宏(1968-), 男, 吉林梨树人, 博士, 教授, 从事土木工程防灾减灾方面的研究。

斜入射地震波对于埋地结构地震响应的影响是一个研究热点,很多学者对此展开了研究。杜修力等^[1]提出了一种高精度的应力人工边界条件,使得人工边界结合有限元的完全解耦的近场波动数值模拟方法具有了统一的稳定性评判标准。马笙杰等^[2]把地震波的输入与黏弹性人工边界相结合,通过 ABAQUS 二次开发实现了地震波在有限元软件中的输入。随着地震波输入逐渐成熟,学者进行了地震波频率、峰值加速度、入射角等因素影响规律的研究。吴静波等^[3]研究发现地震波以 45°角入射时,管道应力响应最大。代建波等^[4]通过双台阵地震模拟振动台研究,发现多点激励比一致激励对管道周围土体的变形和破坏作用更强,从而产生更大的管道应变。埋地管道在长期运行过程中,会受输送介质和周围环境等影响而发生腐蚀,管道的结构强度和稳定性会被削弱,抗震能力会逐渐下降。谭现东等^[5]通过数值模拟发现,地震作用下管道内腐蚀接近壁厚的 60% 或者管道外腐蚀接近壁厚的 70%,管道有断裂危险。Li 等^[6]建立了地震作用下季节性冻土地区含单腐蚀管道模型,研究发现腐蚀深度对管道腐蚀区中心最大竖向、轴向位移的影响大于腐蚀长度的影响。伍颖等^[7]建立了地震作用下高落差埋地含腐蚀 X80 管道有限元模型,研究发现腐蚀深度的影响程度远远超过腐蚀长度和腐蚀宽度。Wang 等^[8]建立考虑岩土不连续性的腐蚀管道模型,发现地震下腐蚀缺陷的空间变化导致了应力或应变的重新分布。

目前,关于埋地管道地震响应的研究主要集中在单个参数的影响上,然而,在实际工程中,埋地腐蚀管道地震响应往往受多个参数的影响。因此,本文基于 ABAQUS 软件,建立了含腐蚀缺陷的埋地输气管道模型,研究了地震波斜入射和腐蚀参数对含腐蚀缺陷埋地管道力学响应的影响,以及保温层的隔震效果,旨在为埋地管道的抗震设计、剩余强度分析及安全评价提供参考。

1 地震动的输入

1.1 黏弹性人工边界的设置

在模型中,土的侧向边界和底部边界均设为黏弹性边界,而顶部表面设为自由表面。黏弹性人工边界切向和法向的弹簧系数和阻尼系数可表示为

$$K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R}, C_{BT} = \rho c_s \quad (1)$$

$$K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R}, C_{BN} = \rho c_p \quad (2)$$

式中: K_{BT} 、 K_{BN} 一切向、法向弹簧的刚度系数; C_{BT} 、 C_{BN} 一切向、法向阻尼器的阻尼系数; α_T 、 α_N 一切向和法向的黏弹性边界的修正系数,其取值为 $\alpha_T = 0.67$, $\alpha_N = 1.33$ ^[9]; G —模型介质的剪切模量; R —波源至人工边界点的距离; c_s 、 c_p —模型介质的剪切波、压缩波的波速。

由于常规动力边界不适用于静力分析,数值模拟过程中存在边界不统一的矛盾。为了解决这一问题,本文采用马笙杰等^[10]提出的静动力边界转换方法来进行静动力耦合计算。该方法首先使用固定边界计算由重力引起的单元应力和边界节点应力,然后将其作为动力分析的初始条件,最终进行地震动力分析。这样能够确保边界的一致性,避免黏弹性人工边界对后续动力反应的影响。

1.2 地震波输入方法验证

为验证建立的地震波三维输入方法的模拟精度,从三维半无限空间中截取一个 200 m×200 m×200 m 的正方体有限范围,其顶端自由,底面和四个侧面设置黏弹性边界。半空间介质的质量密度为 2 630 kg/m³,弹性模量为 32.5 GPa,剪切模量为 13.32 GPa,泊松比为 0.22。根据公式计算出介质的剪切波速为 2 250 m/s,压缩波速为 3 756 m/s。模型输入 P 波和 SV 波均为单一脉冲位移波^[11],脉冲波从模型底部原点入射,平行于 XY 平面,如式(3)所示,位移时程如图 1(a)所示。

$$f(t) = 16 \left[G\left(\frac{t}{T_0}\right) - 4G\left(\frac{t}{T_0} - \frac{1}{4}\right) + 6G\left(\frac{t}{T_0} - \frac{1}{2}\right) - 4G\left(\frac{t}{T_0} - \frac{3}{4}\right) + G\left(\frac{t}{T_0} - 1\right) \right] \quad (3)$$

式中: $G(x) = (x)^3 H(x)$, $H(t)$ 为 Heaviside 阶梯函数。

当入射角为 15°,P 波和 SV 波到达地表中心点时的位移时程如图 1(b)和图 1(c)所示。从图中可知,P 波竖直向的最大数值解为 1.941 m,与理论解的 1.932 m 相比,误差为 0.47%;SV 波水平向的最大数值解为 1.890 m,与理论解的 1.932 m 相比,误差为 2.17%。可以看出,模拟结果与理论解吻合度较高,验证了本文模拟方法的合理性和有效性。

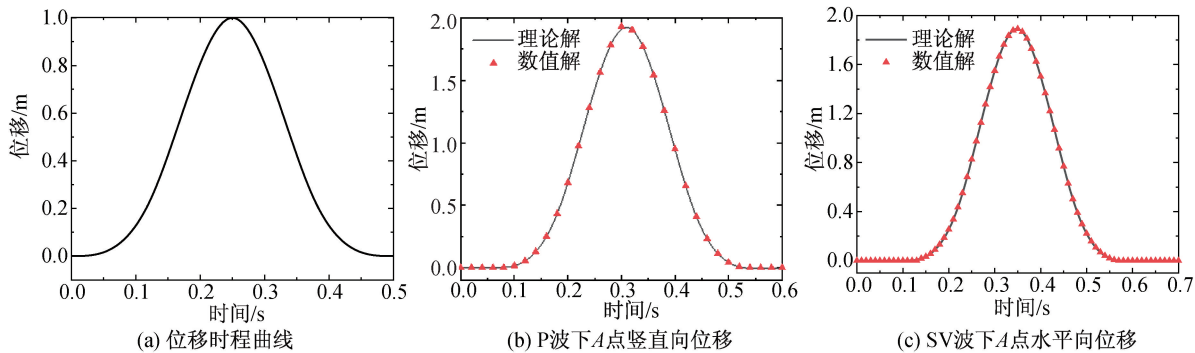
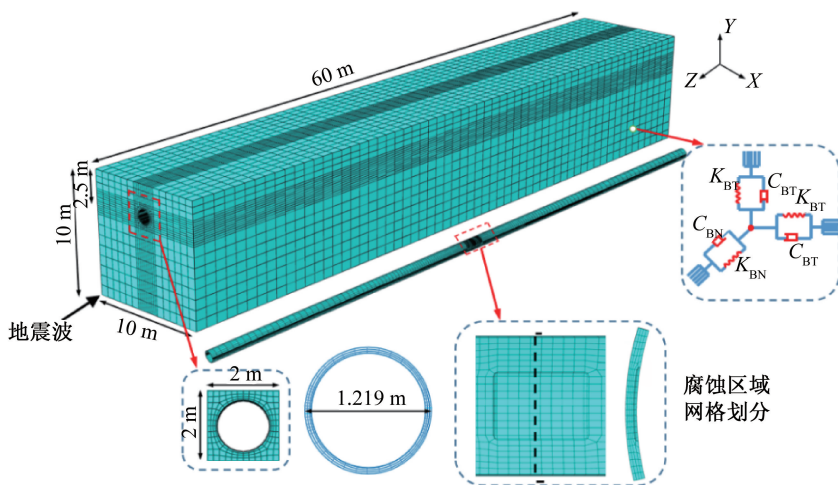


图1 模型验证
Fig. 1 Model validation

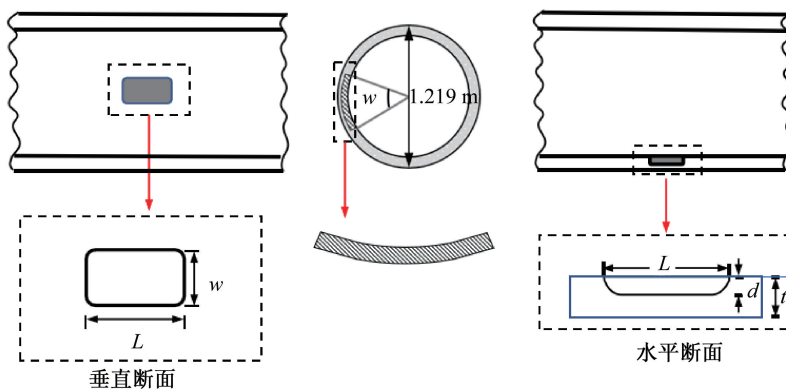
2 三维有限元模型建立

有限元模型见图2(a),管道直径 D 为1 219 mm,壁厚 t 为22 mm,划分网格时在腐蚀区域进行了加密处理,管道沿厚度方向划分为4层,划分单元总数为40 040。土体尺寸为60 m(长) \times 10 m(宽) \times 10 m(高),管道周围2.0 m \times 2.0 m正方形范围内

的土体网格沿径向分为4层,并进行径向偏精度控制,使靠近管道的单元尺寸逐渐减小,总共划分了33 120个单元。模型单元的最大尺寸不超过地震波长的 $1/8 \sim 1/10$ ^[12],以确保动力计算的准确性。管道与土体均采用八节点三维实体缩减积分单元模拟。在模型的边界上设置黏弹性人工边界,分别加在土体的底面和四个侧面上。



(a) 模型示意图



(b) 管道腐蚀示意图

图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

本研究中,管道腐蚀为内腐蚀,腐蚀设置在管壁水平直径的端部^[13]。根据腐蚀管道失效压力评价标准,控制腐蚀宽度 w 为 160 mm (宽度角为 15°),腐蚀深度 d 取 $0.3t$ (t 表示管道壁厚),腐蚀长度 L 取 250 mm,腐蚀尺寸如图 2(b) 所示。为了验证所选腐蚀缺陷尺寸的合理性,运用 DNV-RP-F101 标准^[14] 对最大腐蚀缺陷的失效压力进行计算。X80 管道的流变应力取 625 MPa,计算求得失效压力为 20.85 MPa,大于管道的设计压力 10 MPa,说明腐蚀缺陷尺寸取值具有合理性。

根据中俄油气管线某一地区埋地管道的实际情况和实测数据,将模型周围土壤类型设定为砂土,其密度为 1920 kg/m^3 ,弹性模量为 23.4 MPa,泊松比为 0.32,内摩擦角为 26° ^[15]。参考“西气东输”工程中的管道参数^[16],钢材等级设置为 API 5L X80,其密度为 7800 kg/m^3 ,杨氏模量为 207 GPa,泊松比为 0.35,屈服强度为 552.0 MPa。钢材的应力-应变关系选择 Ramberg-Osgood 模型,其表达式为

$$\varepsilon = \frac{\sigma_s}{E} \left[\frac{\sigma}{\sigma_s} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^N \right] \quad (4)$$

式中: ε —总应变; σ_s —管道材料的屈服强度,MPa; σ —应力,MPa; E —管道的弹性模量,MPa;

α 和 N —模型参数,对于 X80 管材分别取 0.86 和 28。

为了考虑管道和土壤材料的几何非线性,本文采用非线性接触单元来模拟管土相互作用。管道与土体之间采用面面接触,其中管土接触面的切向行为设为“罚”接触,法向行为设为“硬”接触,摩擦系数取为 0.354^[17]。为了更准确反映结构阻尼的实际情况,选取瑞利阻尼进行模拟计算,并通过无阻尼的自振模拟计算得出第 1 阶和第 3 阶自振频率^[18]。根据文献[19]选取土的阻尼比为 0.2,计算得出土的阻尼系数值 α 和 β 分别为 2.683、0.0149^[20]。

3 地震波选取及工况设置

通过查阅《建筑抗震设计规范》GB 50011—2022^[21]和《中国地震动参数区划图》GB 18306—2015^[22]可知,中俄油气管道所在地的场地类别多为 II 类场地。该地区的抗震设防烈度有 6 度和 7 度,本文选取 7 度抗震设防烈度作为其基本设防烈度,其地震动峰值加速度取值范围为 $0.09g$ 至 $0.19g$ 。根据油气输送管道线路工程抗震技术规范,采用罕遇地震动参数(50 年超越概率为 2%)进行抗震校核,罕遇地震加速度峰值为基本地震加速度峰值的 1.6~2.3 倍。在本文中,地震波峰

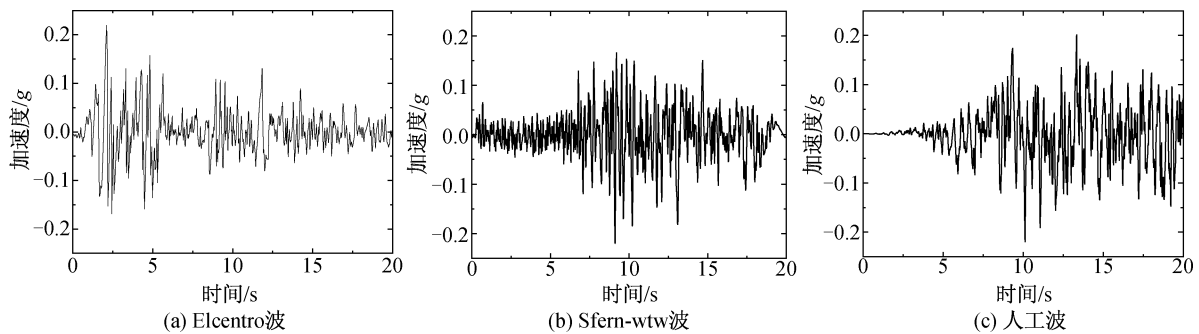


图3 地震加速度时程

Fig. 3 Seismic acceleration time-history

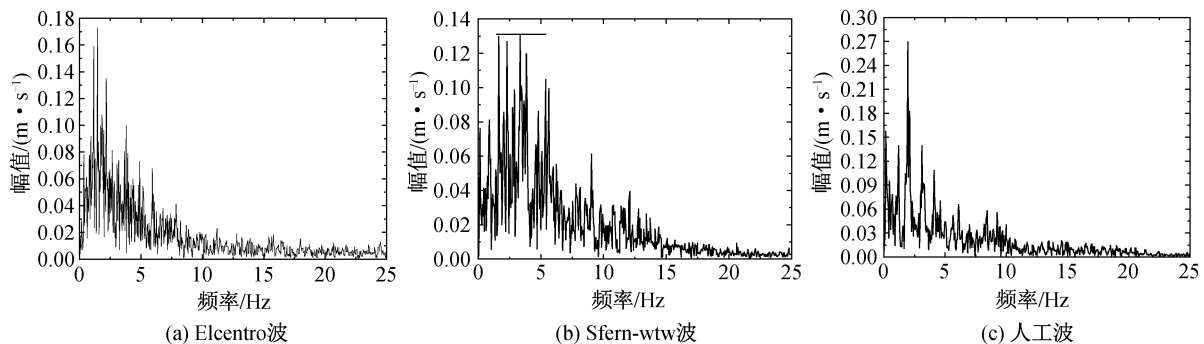


图4 傅里叶变换谱

Fig. 4 Fourier transform spectrum

值加速度取值为 $0.22g$ 。本研究选取的地震波为 1+2 模式,即 1 个人工地震波和 2 个自然地震波,根据 II 类场地的地震参数和场地的标准反应谱合成人工波。此外,通过与太平洋地震工程研究中心地震数据库的目标反应谱对比,选择了两个与目标谱一致的实测自然波,即 El-Centro 波和 Sfernw-
wtw 波地震波如图 3 和图 4 所示。

地震波的入射方向由 θ_v 和 θ_h 定义, θ_h 是与管道轴向(水平)的夹角, θ_v 是输入波与垂直方向的夹角。本文中,P 波和 SV 波的 θ_v 分别取为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 89° , θ_h 分别取为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 。当 θ_v 为 0° 时,地震波为垂直入射,工况分类见表 1。

4 埋地腐蚀管道地震响应分析

4.1 入射角对埋地管道腐蚀区域地震响应影响分析

以 El-Centro 波、WTW 波和人工波作为 P 波和 SV 波输入,对应于不同 θ_v 和 θ_h 组合的应力最大值见图 5 和图 6。

根据图 5 和图 6 可知,在 P 波和 SV 波作用下,保持入射角 θ_h 不变而改变 θ_v 时,随着入射角

表 1 腐蚀缺陷管道工况设置

Tab. 1 Setting of working condition of pipeline with corrosion defects

工况	腐蚀宽度/mm	腐蚀长度/mm	腐蚀深度/mm	$\theta_v/(\circ)$	$\theta_h/(\circ)$
1	160	250	6.6	0	—
2—8	160	250	6.6	15	0
9—15	160	250	6.6	30	15
16—22	160	250	6.6	45	30
23—29	160	250	6.6	60	45
30—36	160	250	6.6	75	60
37—43	160	250	6.6	89	90

度 θ_v 的增加,埋地管道腐蚀区的应力急剧上升。尤其是当 θ_v 达到 60° 时,P 波和 SV 波的 Mises 应力达到最大值,然后缓慢下降;当保持 θ_v 不变而增加 θ_h 时,P 波和 SV 波的应力先增大后减小,在 θ_h 为 45° 时达到最大值。以人工波为例,在 P 波和 SV 波入射下,管道腐蚀区域的 Mises 应力最大值分别为 556.65 MPa 和 559.65 MPa ,相比垂直入射时的应力值分别增大了 26.13% 和 28.06% 。因此,在分析管道在地震作用下的影响时有必要考虑地震波的斜入射。

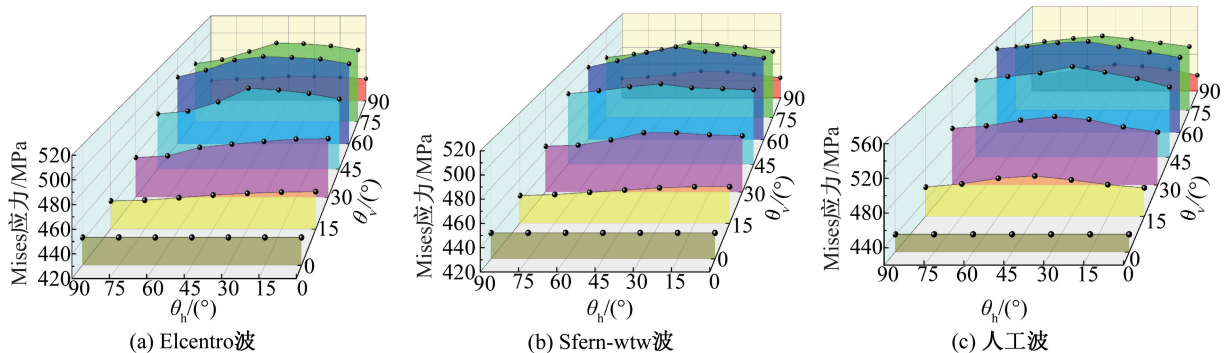


图 5 P 波下管道腐蚀区域中心应力最大值

Fig. 5 Maximum stress at the center of corroded zone under P waves

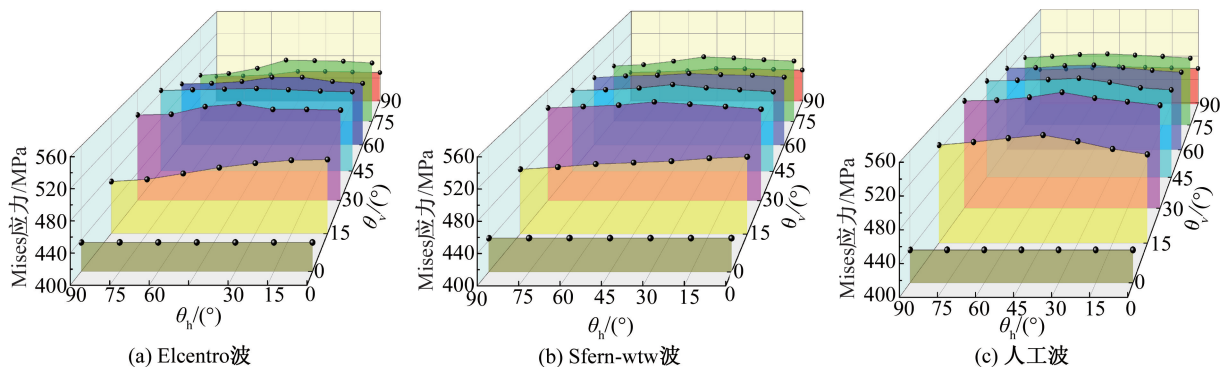


图 6 SV 波下管道腐蚀区域中心应力最大值

Fig. 6 Maximum stress at the center of corroded zone under SV waves

在相同入射角度组合下,SV 波下管道腐蚀区域的 Mises 应力增长速率明显高于 P 波下的增长速率。在最不利的入射角度下,SV 波下管道腐蚀区域中心的最大 Mises 应力(559.65 MPa)高于 P 波下的最大 Mises 应力(556.65 MPa)。因此,SV 波比 P 波对管道的应力影响更为显著,可能更容易导致管道达到破坏状态。

4.2 腐蚀参数对埋地管道腐蚀区域地震响应影响分析

基于 P 波和 SV 波的最大地震响应角度,以人工波作为输入波,分析腐蚀参数变化对管道地震响应的影响并进行了敏感性分析。这些腐蚀参数包括腐蚀长度、腐蚀宽度以及腐蚀深度。在分析过程中,假定管道内的运行压力不变,取为 10 MPa。

4.2.1 腐蚀缺陷长度对管道腐蚀区域地震响应影响

设置腐蚀宽度为 160 mm,腐蚀深度取 0.3t,只改变腐蚀长度。考虑到本文所选用的 X80 管材是高强度韧性材料,选择塑性失效准则进行管道的失效评估。根据 DNV-RP-F101 标准来计算单腐蚀管线失效力,计算公式为

$$S = \frac{\sigma_u D}{D - t} \frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{D}} \frac{1}{t \sqrt{1 + 0.31 \frac{L^2}{Dt}}} \quad (5)$$

式中: S—管道失效力,MPa; σ_u —管道的极限抗拉强度,MPa; D—管道外直径,m; t—壁厚,m; L—管道腐蚀长度,m; d—管道腐蚀深度,m。

由式(5)计算可知,在 P 波作用下,管道腐蚀长度达到 325 mm 时,管道腐蚀区达到失效力;在 SV 波作用下,腐蚀长度达到 314 mm 时,管道腐

蚀区达到失效力。考虑到管道服役过程中可以通过内检测方法及时发现严重腐蚀,从而进行维修。因此,选取腐蚀长度为 100、150、200、250 和 300 mm 的管道,通过比较不同腐蚀长度条件下的地震响应曲线,探究腐蚀长度对埋地管道在地震作用下的影响。

由图 7 和图 8 可以看出,在 P 波作用下,腐蚀长度为 100 和 150 mm 时,高应力主要分布在腐蚀区内,腐蚀区外侧应力相对较小。随着腐蚀长度增加到 200 mm,腐蚀区域呈现红色的高应力开始向腐蚀区外侧扩散;在 SV 波作用下,腐蚀长度为 100 mm 时,腐蚀区外侧已经呈现红色的高应力。随着腐蚀长度的增加,腐蚀区域呈现红色的高应力向腐蚀区外侧扩散越来越大。

腐蚀长度增加会导致管道在地震作用下的最大应力增加,由于管道已经达到屈服状态,管道应力增长幅度较小。腐蚀长度从 100 mm 增长到 300 mm,P 波下腐蚀区最大 Mises 应力值分别为 553.92、554.84、556.16、556.65 和 556.97 MPa,增长速率分别为 0.166%、0.238%、0.088%、0.057%;SV 波下腐蚀区最大 Mises 应力值分别为 556.28、557.65、559.01、559.65 和 560.13 MPa,增长速率分别为 0.246%、0.245%、0.115%、0.086%。可以看出腐蚀长度从 200 mm 增加到 250 mm,应力增长速率开始降低;当腐蚀长度达到一定数值后,随着腐蚀长度的继续增加,管道的地震响应变化逐渐减小。

4.2.2 腐蚀缺陷宽度对管道腐蚀区域地震响应影响

设置腐蚀长度为 100 mm,腐蚀深度为 0.3t,针对不同腐蚀宽度(160、320、480、640 mm)的管道进行地震响应计算。通过比较不同腐蚀宽度下的地

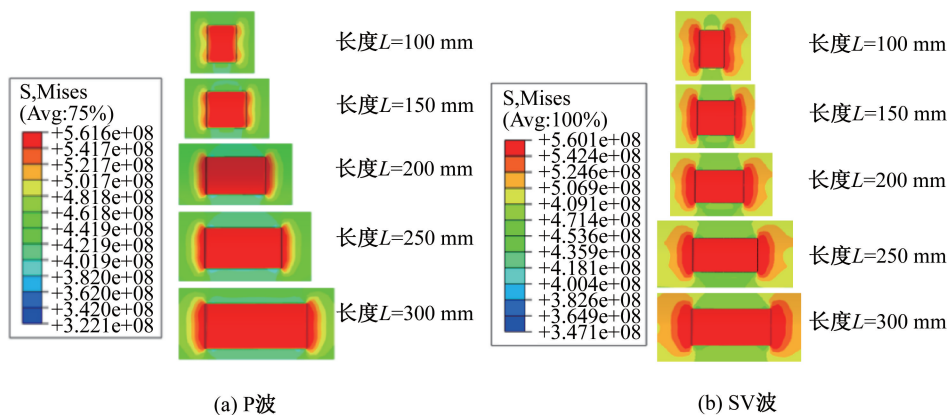


图 7 不同腐蚀长度下管道腐蚀区的应力云图

Fig. 7 Stress cloud diagram of pipeline corrosion zone under different corrosion lengths

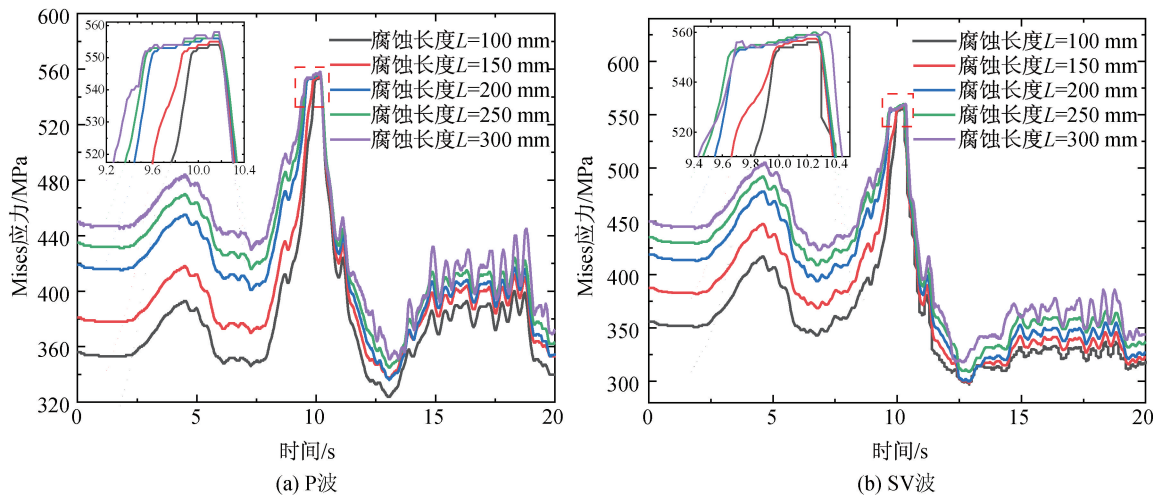


图 8 不同腐蚀长度下管道腐蚀区的应力时程曲线

Fig. 8 Stress time history curve of corrosion zone of pipeline under different corrosion lengths

震响应曲线,探究腐蚀宽度对埋地管道在地震作用下的影响。

结合图 9 和图 10 可知,在地震作用下的应力响应达到最大响应之前,腐蚀宽度增加,管道腐蚀区 Mises 应力最大值逐渐增大。腐蚀宽度由 160 mm 增

加到 640 mm,P 波下对应的应力值分别为 552.05、554.34、555.01、555.66 MPa,其对应的增长速率分别为 0.415%、0.121%、0.117%;SV 波下对应的应力值分别为 554.00、556.99、558.03、558.94 MPa,对应的增长速率分别为 0.540%、0.187%、0.163%。

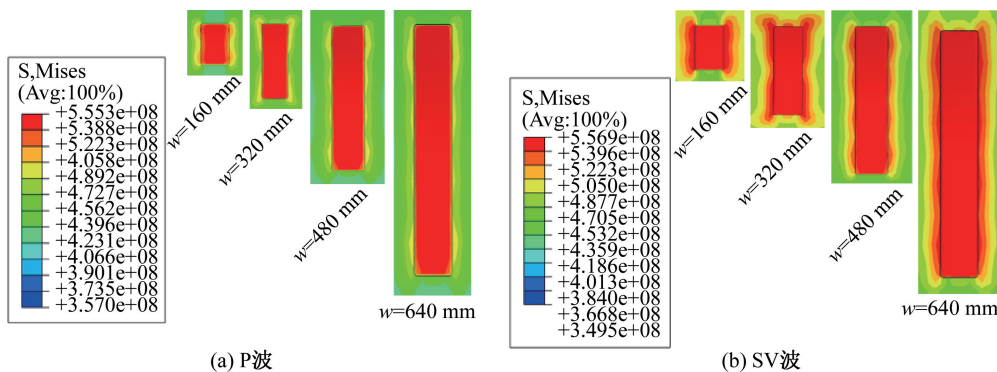


图 9 不同腐蚀宽度下管道腐蚀区的应力云图

Fig. 9 Stress cloud diagram of pipeline corrosion zone of pipeline under different corrosion widths

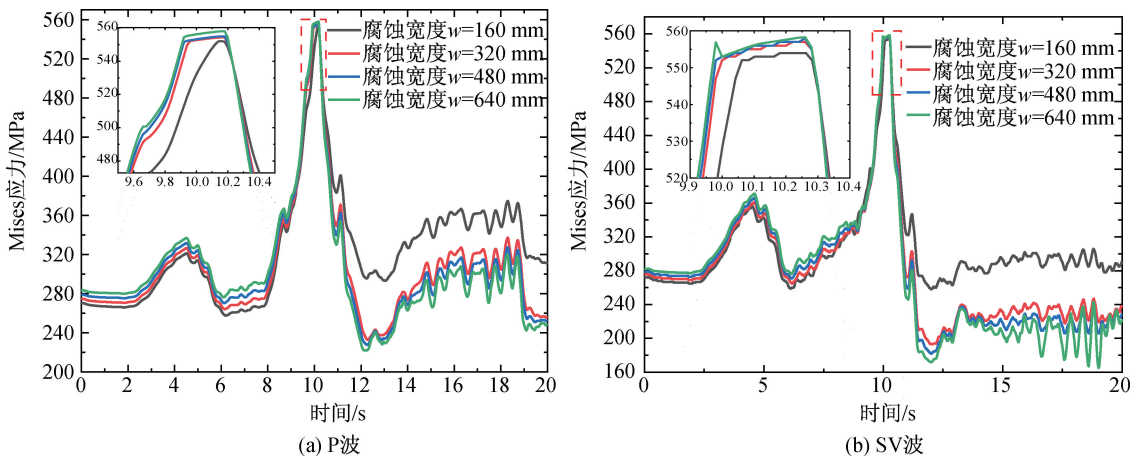


图 10 不同腐蚀宽度下管道腐蚀区的应力时程曲线

Fig. 10 Stress time history curve of corrosion zone of pipeline under different corrosion widths

腐蚀宽度从 160 mm 增加到 320 mm 的过程中,应力增长速率较快。当腐蚀宽度从 320 mm 到 640 mm 的过程中,应力增长速率迅速下降。可以看出,当腐蚀达到一定宽度时,腐蚀宽度的变化对埋地含腐蚀管道地震响应影响逐渐减小。当经过地震波的主震之后,在地震余震过程中,随腐蚀宽度的增加,地震作用下的管道应力响应反而减小,这与腐蚀长度变化趋势相反。

4.2.3 腐蚀缺陷深度对管道腐蚀区域地震响应影响

根据 DNV-RP-F101 标准,当腐蚀长度为 100 mm,腐蚀宽度为 160 mm 时,在 P 波和 SV 波作用下腐蚀区的腐蚀深度达到约为 0.7t 时,管道发生失效。因此,选取不同腐蚀深度(0.2t、0.3t、0.4t、0.5t 和 0.6t)对管道进行地震响应深度影响分析。通过比较不同腐蚀深度条件下的地震响应曲线,探究腐蚀深度对埋地管道在地震作用下的影响。

由图 11 可以看出,腐蚀深度增加,管道腐蚀区

的应力分布呈现出 X 字状,管道内部受到的应力分布不均匀,导致不同部位的应力方向产生差异。由图 12 可以看出,管道的应力响应在 10 s 时达到最大,并且随着腐蚀深度的增加,管道腐蚀区的 Mises 应力最大值逐渐增大,这主要是管道壁变薄,地震波引起的应力更为集中造成的。对应腐蚀深度从 0.2t 增加到 0.6t,P 波下的应力值增长速率分别为 0.406%、0.433%、0.424%、0.530%;SV 波下的应力值增长速率分别为 0.406%、0.408%、0.407%、0.532%。在腐蚀深度从 0.2t 增加到 0.5t 的过程中,应力增长速率保持稳定,而当腐蚀深度达到 0.6t 时,应力增长速率明显变大。这可能是由于腐蚀深度达到一定程度时,管道整体结构发生了显著变化,随着腐蚀深度继续增加,甚至可能引发局部失稳。

4.2.4 敏感性分析

敏感度系数为参数变化引起的响应变化与参数变化量的比率,对于埋地含腐蚀管道的抗震问

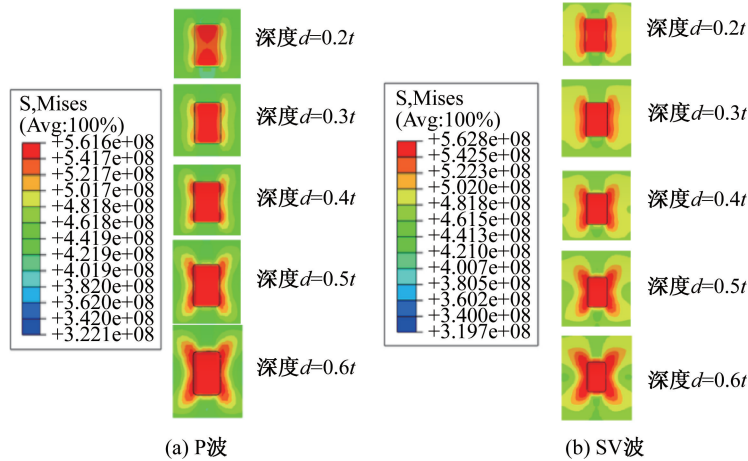


图 11 不同腐蚀深度下管道腐蚀区的应力云图

Fig. 11 Stress cloud diagram of pipeline corrosion zone of pipeline under different corrosion depths

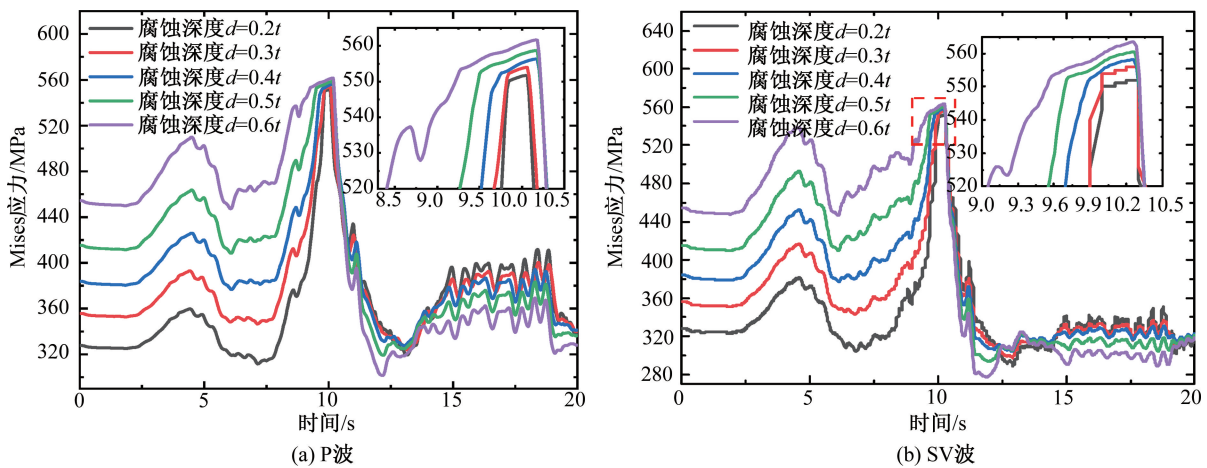


图 12 不同腐蚀深度下管道腐蚀区的应力时程曲线

Fig. 12 Stress time history curve of corrosion zone of pipeline under different corrosion depths

题,存在多个参数的影响,如腐蚀长度、腐蚀宽度和腐蚀深度,对于每个参数,都可以计算其敏感度系数,其中为了将长度和宽度参数变化统一,腐蚀宽度通过线性插值计算。以管道腐蚀深度 $0.2t$ 、腐蚀长度 100 mm 及腐蚀宽度 100 mm 为基准,按下式分别计算出各腐蚀参数对管道最大等效应力的敏感度系数:

$$f = \frac{\Delta\sigma/\sigma}{\Delta F/F} \quad (6)$$

式中: f —敏感度系数; $\Delta\sigma/\sigma$ —最大等效应力变化量; $\Delta F/F$ —参数变化量。

表2展示了不同参数变化量对应的最大等效应力变化量,根据式(6)计算各参数对管道最大等效应力的敏感度系数,敏感度系数与各参数变化量的关系如图13所示,用1、2、3、4表示管道腐蚀参数的四种情况。

从图13可以得到,P波和SV波下腐蚀深度、长度和宽度对腐蚀管道应力影响占比分别为58.0%和51.9%、22.8%和27.1%以及19.2%和21.0%,腐蚀深度对地震作用下埋地腐蚀管道最大等效应力影响最大,P波相比于SV波对腐蚀深度更为敏感。因此,在管道的管理和维护中,应特别注意和控制腐蚀深度,这将有助于降低管道的最大等效应力,从而降低管道损坏的风险。

4.3 保温层厚度对埋地管道腐蚀区域隔震效果分析

保温层不仅能保温隔热,还能对管道的抗震性能产生影响。保温层选聚乙烯材料,其弹性模量为 175.12 MPa ,泊松比为 0.443 。选取不同保温层厚度(0 、 20 、 40 、 60 mm),通过比较不同保温层厚度条件下的地震响应曲线,分析保温层厚度对埋地腐蚀管道抗震性能的影响。

根据图14,保温层厚度分别为 0 、 20 、 40 、 60 mm 时,P波下对应的腐蚀区最大等效应力依次为 556.65 、 463.99 、 416.50 、 374.87 MPa ,其增长率分别为 -16.65% 、 -10.24% 、 -10.00% ;SV波下对应的腐蚀区最大等效应力依次为 559.65 、 468.34 、 420.67 、 378.64 MPa ,其增长率分别为 -16.32% 、 -10.18% 、 -9.99% 。由此可知,增加保温层厚度可以有效减小管道腐蚀区的最大等效应力,从而减轻地震对管道的影响。造成这一现象的原因在于保温层具有较小的弹性模量,容易变形,因此可以缓冲前期地震动对管道的影响,从而保护管道免受破坏。

5 结论

1)在本文研究的工况和角度步长下,P波和

表2 参数变化量与应力变化量对应表

Tab. 2 Table of parameter variation and stress variation

L/ mm	$\Delta F/F$	$\Delta\sigma/\sigma$		w/ mm	$\Delta F/F$	$\Delta\sigma/\sigma$		d/ mm	$\Delta F/F$	$\Delta\sigma/\sigma$	
		P	SV			P	SV			P	SV
150	0.5	0.001 66	0.002 46	150	0.5	0.001 25	0.001 37	0.3t	0.5	0.004 06	0.004 06
200	1.0	0.004 04	0.004 91	200	1.0	0.003 19	0.003 86	0.4t	1.0	0.008 41	0.008 16
250	1.5	0.004 93	0.006 06	250	1.5	0.004 48	0.005 52	0.5t	1.5	0.012 69	0.012 26
300	2.0	0.005 51	0.006 92	300	2.0	0.005 13	0.006 36	0.6t	2.0	0.018 05	0.017 64

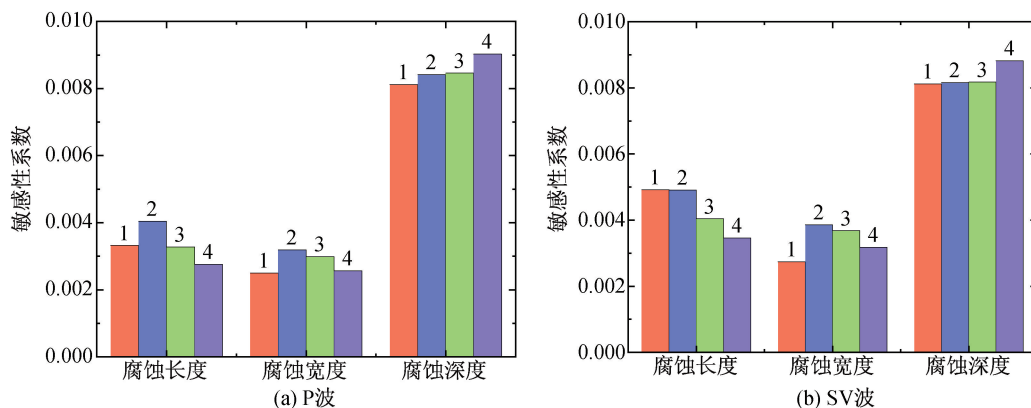


图13 敏感性系数与参数变化量的关系曲线图

Fig. 13 Relationship between sensitivity coefficient and parameter changes

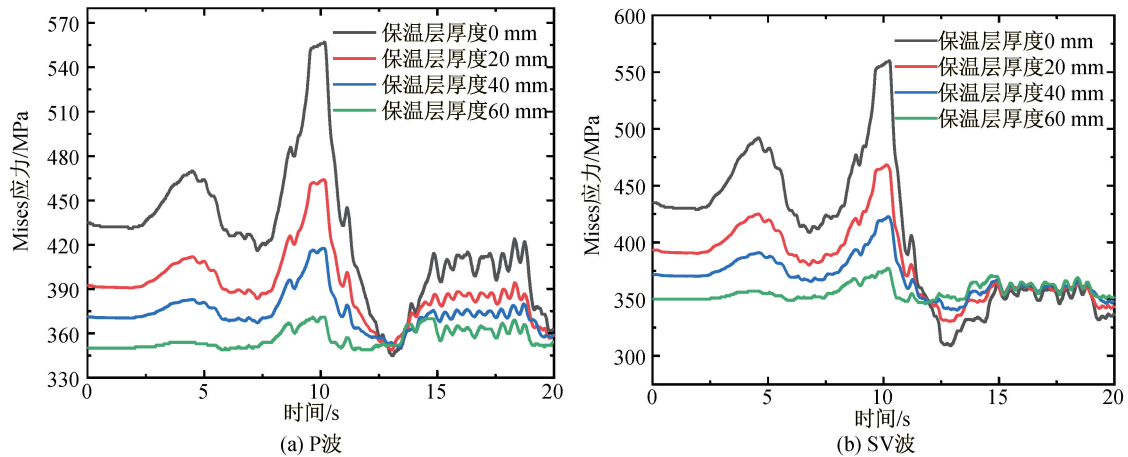


图14 不同保温层厚度下管道腐蚀区的应力响应

Fig. 14 Stress response of the corroded zone of pipelines under different insulation layer thicknesses

SV波斜入射时,管道腐蚀区域中心的最大等效应力相比垂直入射时分别增大了26.1%和28.0%,因此地震波斜入射角度对管道响应影响明显。

2) 不同类型地震波激励下腐蚀区域中心应力存在显著差异,因此地震波的频谱特性对腐蚀管道地震响应影响较大。

3) P波和SV波斜入射时,腐蚀深度对腐蚀区域最大等效应力的影响最大,在敏感性分析中,腐蚀深度占比分别为58.00%和51.94%,在管道维护中要重点监控腐蚀深度。

4) 保温层可以有效减小管道腐蚀区域的最大等效应力,隔震效果明显,随着保温层厚度的增加,管道的抗震性能逐渐提升。

参考文献:

- [1] 杜修力, 赵密, 王进廷. 近场波动模拟的人工应力边界条件[J]. 力学学报, 2006(01): 49-56.
- [2] 马笙杰, 迟明杰, 陈红娟, 等. 黏弹性人工边界在ABAQUS中的实现及地震动输入方法的比较研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(07): 1445-1457.
- [3] 吴静波, 杜强, 曾祥国, 等. 埋地管道三参量粘弹性边界地震模型及其动力响应研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2022, 36(03): 240-250.
- [4] 代建波, 王利, 胡成涛, 等. 纵向多点激励下埋地油气管道地震响应试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(02): 259-269.
- [5] 谭现东, 王亚洲, 耿锦川. 带腐蚀缺陷的架空输油管道抗震完整性分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(08): 1098-1102.
- [6] LI X L, YANG Z X, LIU X Y. Analysis of seismic time-history effect of single corroded pipeline in seasonally fro-

zen soil region[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2023, 206: 105035.

- [7] 伍颖, 李都, 陈朗. 高落差埋地X80含腐蚀缺陷管道地震响应研究[J]. 石油机械, 2023, 51(04): 144-154.
- [8] WANG Y H, ZHANG P, QIN G J. Reliability evaluation of local corrosion of X80 pipeline subjected to accidental earthquake considering geotechnical discontinuities[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021, 189: 104254.
- [9] 刘晶波, 杜义欣, 闫秋实. 粘弹性人工边界及地震动输入在通用有限元软件中的实现[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(S): 37-42.
- [10] 马笙杰, 迟明杰, 陈学良, 等. 静动力边界转换及其合理性验证方法的研究[J]. 地震学报, 2023, 45(01): 1-14.
- [11] 丁海平, 张如艳, 于彦彦. SV波入射下相邻半圆凸起地形地震响应分析[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(05): 44-55.
- [12] 黄景琦. 岩体隧道非线性地震响应分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [13] LI X L, CHEN G T, LIU X Y, et al. Analysis and evaluation on residual strength of pipelines with internal corrosion defects in seasonal frozen soil region[J]. Applied Sciences, 2021, 11(24): 12141.
- [14] Det Norske Veritas. Recommended practice DNV RP-F101 corroded pipelines: DNV 2015[S]. Norway: Det Norske Veritas. 2015.
- [15] JIN H J, HAO J Q, CHANG X L, et al. Zonation and assessment of frozen-ground conditions for engineering geology along the China-Russia crude oil pipeline route from Mohe to Daqing, Northeastern China[J]. Cold Regions Science & Technology, 2010, 64(3): 213-225.

(下转第35页)

动性、力学性能及竖向膨胀率均得到改善,通过正交试验优化后的矿物掺合料最佳掺量为:硅灰5%、粉煤灰6%、矿粉8%。

参考文献:

- [1] 丁成,杨医博. 水泥基灌浆材料性能与组成材料研究进展[J]. 河南科学, 2021, 39(08): 1250-1256.
- [2] 张勇,田文丽,马超然,等. 我国水泥基灌浆材料研究进展[J]. 混凝土, 2018(06): 124-126,131.
- [3] 王红霞,王星,何廷树,等. 灌浆材料的发展历程及研究进展[J]. 混凝土, 2008(10): 30-33.
- [4] 汪良强,符海龙. 机制砂在干混砂浆中的应用和发展趋势[J]. 工程技术研究, 2020, 5(06): 143-144.
- [5] 刘通. 机制砂特性对水泥基材料性能影响的试验研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2021.
- [6] 潘小平,吴漫天,徐建华,等. 机制砂特点与干混砂浆的生产及施工[J]. 建设机械技术与管理, 2019, 32(02): 52-56.
- [7] 程勇刚. 机制砂对灌浆料性能的影响研究[J]. 福建建材, 2022(03): 23-25.
- [8] 张杰. 全机制砂制备高性能灌浆料试验研究[J]. 公路工程, 2017, 42(03): 278-281.
- [9] 赵淑静. 一种石灰石机制砂制备高性能灌浆料的试验

研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2021.

- [10] 单俊鸿,张景华,王荣荣,等. 矿物掺合料对机制砂水泥基自流平砂浆性能的影响[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021, 38(03): 1-6,68.
- [11] 陈涛. 高性能水泥基灌浆料制备技术、力学性能与微观机理研究[D]. 广州:广州大学, 2020.
- [12] LI X J, HAO J Y, ZHANG Q. Effect of mineral admixtures on the properties of grouting materials made from ternary complex system[J]. Advances in Cement Research, 2019.
- [13] 李天水. 高性能水泥基灌浆料研制及性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2018.
- [14] 董军军. 高性能套筒灌浆料的研制及性能研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2016.
- [15] 赵同义. 机制砂制灌浆材料在装配式建筑中的应用研究[D]. 郑州:郑州大学, 2018.
- [16] 吴吉昊,李志华,张聪. 硅灰掺量对水泥基灌浆料与老混凝土界面粘结强度的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(12): 3989-3995.
- [17] 冷达,张雄,沈中林,等. 水泥基灌浆材料主要成分对其新拌及硬化性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2008(05): 12-16.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第27页)

- [16] CHENG X D, MA C, YANG W D, et al. Failure mode analysis of X80 buried steel pipeline under oblique-reverse fault[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 125: 105723.
- [17] 代建波,马静,胡成涛,等. 横向非一致地震激励下埋地管道的动力响应分析[J]. 地震工程学报, 2022, 44(6): 1277-1286.
- [18] 马俊玲,丁海平. 土层地震反应分析中不同阻尼取值的影响比较[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(05): 517-523+547.

- [19] 肖东辉,马巍,赵淑萍,等. 冻土动力学参数研究的成果综述与展望[J]. 冰川冻土, 2015, 37(6): 1611-1626.
- [20] 郭思远. 城镇埋地排水管道地震响应分析[D]. 大连:大连理工大学, 2020.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2022[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2022.
- [22] 全国地震标准化技术委员会. 中国地震动参数区划图:GB 18306—2015[S]. 北京:中国标准出版社, 2016.

(责任编辑 周雪梅)