

DOI: 10.7672/sgjs2026040111

旋挖钻施工对邻近高压燃气管道的动力响应分析

赵耀忠¹, 黎伟佳², 褚继龙³, 刘梓文², 林雨霏³, 周书东²

(1. 深圳铁路投资建设集团有限公司, 广东 深圳 300308;

2. 东莞市建筑科学研究院有限公司, 广东 东莞 523820;

3. 中电建七局南方建设有限公司, 广东 深圳 518000)

[摘要] 为分析旋挖钻施工对邻近高压燃气管道的动力响应,以深惠铁路西丽站基坑工程为背景,对现场监测与数值模拟结果进行了对比分析。结果表明:高压燃气管道附近土体各向振动峰值速度与振源距呈负相关,水平向振动速度大于垂直向振动速度,振动频率集中在0~25Hz。采用衰减关系方程对水平向和垂直向振动峰值速度进行拟合,拟合结果具有较高可信度。管道靠近振源一侧的截面峰值振速与峰值 Von-Mises 应力最大,远离振源一侧最小,燃气管道振速大于地表振速并存在线性关系。建立管道振动速度预测模型,可应用于工程中判断管道是否处于安全状态。

[关键词] 基坑;旋挖钻;燃气管道;振动;动力响应;数值模拟;监测

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0111-07

Dynamic Response Analysis of Adjacent High-pressure Gas Pipelines During Rotary Drilling Construction

ZHAO Yaozhong¹, LI Weijia², CHU Jilong³, LIU Ziwen², LIN Yufei³, ZHOU Shudong²

(1. Shenzhen Railway Investment and Construction Group Co., Ltd., Shenzhen,

Guangdong 300308, China; 2. Dongguan Institute of Building Research Co., Ltd.,

Dongguan, Guangdong 523820, China; 3. China Power Construction Seventh Bureau Southern

Construction Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: To analyze the dynamic response of rotary drilling construction to adjacent high-pressure gas pipelines, based on the foundation excavation project of Xili Station, on-site monitoring and numerical simulation were adopted. The results show that the peak velocity of soil vibration in all directions near the high-pressure gas pipeline is negatively correlated with the distance between the vibration sources. The horizontal vibration velocity is greater than the vertical vibration velocity, and the vibration frequency is concentrated in the range of 0 ~ 25Hz. The attenuation relationship equation is used to fit the peak velocities of horizontal and vertical vibrations, and the fitting results have high credibility. The peak vibration velocity and peak Von Mises stress are highest on the side of the pipeline near the vibration source, and lowest on the side away from the vibration source. The gas pipeline vibration velocity is greater than the surface vibration velocity and has a linear relationship. Establishing a pipeline vibration velocity prediction model can be applied in engineering to determine whether the pipeline is in a safe state.

Keywords: foundation excavation; rotary drilling; gas pipeline; vibration; dynamic response; simulation; monitoring

0 引言

由于天然气清洁能源的广泛使用,我国高压燃

气管道建设近年来发展迅速,在现代能源体系中占据重要地位。然而,随着工程项目与现埋地高压燃气管道邻近的情况日益增多,导致埋地管道受施工破坏的事件时有发生,造成人员伤亡、经济损失、

环境破坏等严重后果。目前,相关研究多集中在爆破开挖、盾构施工以及交通荷载对管道的影 响 3 个方面。在爆破开挖方面,朱斌等^[1]研究了基坑开挖爆破对邻近压力燃气管道的动力响应特性,通过现场监测与数值模拟相结合的方法,分析了不同运行压力条件下埋地燃气管道的振动响应特性,并建立了相关预测模型,为实际爆破工程的安全作业提供了指导。高坛等^[2]研究了基坑开挖爆破下邻近管道振动速度的安全阈值,为施工过程中的振动控制提供了参考依据。Kouretzis 等^[3]研究了地面爆破对埋地柔性管道的应变影响,提出了基于三维薄壳理论的分析方法,考虑了爆炸波的球面衰减特性。通过与数值模拟和现场实测数据对比,验证了方法的准确性,并建立了简化设计关系,提高了设计精度。张黎明等^[4]利用 TC-4850N 爆破振动测试仪和 DH3820 静态应变测试系统,通过现场试验研究了爆破振动对地下管道的影响,分析了峰值振速与管道轴向、环向应变的指数关系,并预测了管道的最大容许峰值振速及爆破施工安全距离。在盾构施工方面,戴亚军^[5]以长沙地铁 6 号线盾构侧穿湖南省博物馆为背景,研究了盾构施工振动对博物馆的影响,通过优化盾构施工参数、布置监测点并实时监测振动数据可以有效降低施工振动对博物馆的影响。Guan 等^[6]以郑州地铁 3 号线双线隧道下穿管线为工程背景,建立了考虑盾构隧道施工与既有管道相互作用的三维数值模型,并通过监测数据验证了模型的合理性,综合分析了盾构隧道施工对地面和管道沉降的影响规律。在交通荷载方面,梁莉等^[7]建立了移动恒定荷载作用下埋地柔性 PE 管道的三维力学模型,研究了交通荷载作用下埋地管道的力学性状。通过监测管道关键位置的竖向位移和 Mises 应力的时程响应,分析了管道的纵向力学特性及时程变化规律,揭示了不同结构层在移动荷载作用下的力学响应特征。张东等^[8]通过现场试验和数值模拟相结合的方法,研究了重车碾压作用下 X65 管道的力学响应特性,分析了重车质量、管径、壁厚、内压等因素对管道轴向应力的影响规律,为管道设计与防护提供了理论依据。李玉坤等^[9]通过建立车-管-土耦合模型,分析车辆荷载作用下埋地管道的动力响应规律,并研究不同承压板宽度对管道减荷效果的影响,为埋地管道的安全运行和减荷措施提供参考依据。

旋挖钻所产生的振动在土层中具有较强的传播性,对其周边建筑及地下设施的影响也不容忽视。尽管国内外在爆破开挖、交通荷载等方面对邻

近燃气管道动力响应的研究已取得丰富成果,但针对旋挖钻施工对邻近燃气管道动力响应的研究仍相对较少。本文以深惠铁路西丽站为研究对象,采用现场监测和数值模拟结合的方法,分析旋挖钻施工振动作用下既有高压燃气管道的动力响应,并通过振动衰减预测公式构建适用于该工程的振动速度预测模型。

1 振动测试

1.1 工程概况

深惠铁路西丽站位于深圳市南山区茶光路,沿茶光路自西向东敷设,为地下 4 层双岛双线车站,矩形框架结构,采用盖挖逆作法施工。高压燃气管道距离旋挖钻左侧约 3.5m,埋深 3m。依据现场地质勘察,场地素填土平均厚度为 3m,砾质黏土平均厚度 3m,土层下为全风化、中风化、微风化花岗岩,深度在 7m 以上。

管道埋设在土体中,不利于开挖揭露监测。根据现场实际情况,将测点布置于管道与旋挖钻之间垂直于管道方向的地表上,共布置 3 个监测点,分别距振源 1.5、2.5、3.5m,如图 1、2 所示。

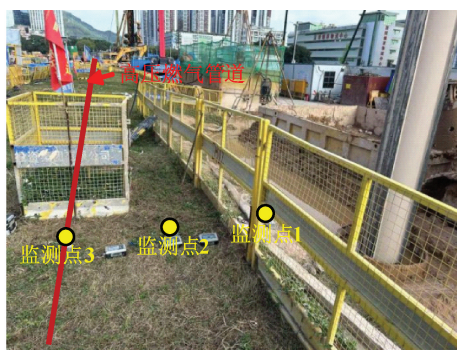


图 1 现场监测点布置

Fig. 1 Monitoring points layout on site

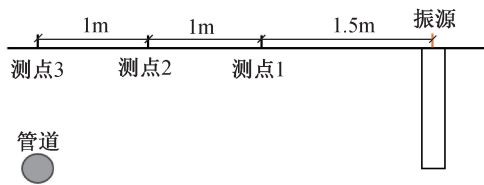


图 2 监测点布置

Fig. 2 Monitoring points layout

监测设备选用 TC-4850 爆破测振仪,该设备由测振仪和传感器组成。爆破测振仪标配三向速度传感器,频率范围 5~500Hz,量程 0~35cm/s,采样速率最高 100kps。

1.2 数据分析

在旋挖钻开始施工前开启设备,所采集的振动

信号通过测振仪转换为数字信号,选取相同时间段内3个测点的数据,并经过修正、平滑及滤波等手段处理,最终得到较为理想的信号,绘制时域图谱,再经过快速傅里叶变换(FFT)得到频域图谱(以测点3其中1个数据为例),监测点振动频率集中在0~25Hz,如图3所示。

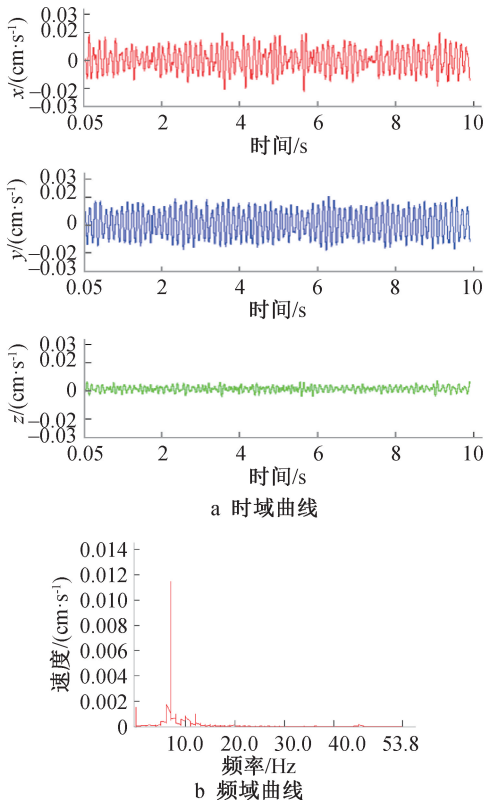


图3 测点时域频域

Fig. 3 Time domain frequency domain of measuring points

近年来,国内外诸多学者以振动衰减理论为基础,结合实际监测数据进行了研究^[10-11]。国内学者在此基础上,结合大量实际振动数据,提出在不同情况下的振动衰减预测公式,其中黄菊花等^[12],杨先健等^[13]所提出的公式具有一定代表性且应用更为广泛:

$$u_r = u_0 \left[\frac{r_0}{r} \xi_0 + \sqrt{\frac{r_0}{r}} (1 - \xi_0) \right] e^{-f_0 \alpha_0 (r - r_0)} \quad (1)$$

$$r_0 = \mu_1 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2)$$

式中: u_r 为距振源中心处地面振动速度; u_0 为 r_0 处的地面振动速度; r_0 为振源半径; r 为距振源中心的距离; ξ_0 为与振源半径等有关的几何衰减系数; f_0 为振动频率; α_0 为土能量吸收系数; μ_1 为动力影响系数; A 为桩面积。

依据能量耗散机理,将振动传播阻尼区别为材料阻尼与几何阻尼。材料阻尼与振动传播土体的

性质有关,几何阻尼则与振源的类型有关。式(1)中 ξ_0 部分反映了波速随距离的衰减情况,即几何衰减,指数部分表示波速随土体材料的衰减。近场以几何衰减为主,远场以土体的材料衰减为主。结合现场振动设备、管道位置、土质等条件,选择 u_0 和 ξ_0 作为振动衰减的拟合参数,其余参数根据GB 50040—2020《动力机器基础设计标准》选取,每个监测点选取以1s为1个时间单位内出现的振动速度峰值为研究对象。以决定系数 R^2 和均方残差(MSR)为评价指标,通过origin软件对水平向(以y向为例)和垂直向峰值振速随距振源中心的距离关系进行数值拟合。拟合参数及评价指标分别如表1,2所示,预测曲线如图4所示。

表1 振动衰减参数

Table 1 Vibration attenuation parameters

r_0/m	α_0	μ_1	f_0/Hz		A/m^2
			水平向	垂直向	
0.5	0.001 3	1	7.32	6.70	0.785

表2 公式拟合参数及评价指标

Table 2 Formula fitting parameters and evaluation indicators

方向	拟合参数		评价指标	
	$u_0/(mm \cdot s^{-1})$	ξ_0	R^2	MSR
水平y向	0.791	0.612	0.897	5.13×10^{-4}
垂直z向	0.179	0.485	0.949	1.23×10^{-5}

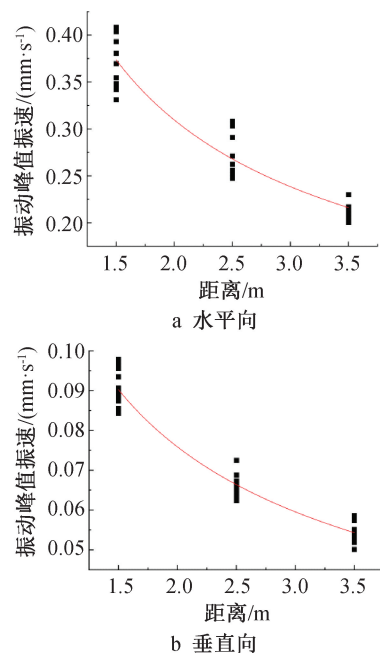


图4 振动衰减预测拟合曲线

Fig. 4 Vibration attenuation prediction fitting curve

根据拟合分析结果,得出相应的振动衰减预测公式。

水平向:

$$u_r = 0.791 \left(\frac{0.306}{r} + 0.388 \sqrt{\frac{0.5}{r}} \right) e^{0.005-0.01r} \quad (3)$$

垂直向:

$$u_r = 0.197 \left(\frac{0.243}{r} + 0.515 \sqrt{\frac{0.5}{r}} \right) e^{0.004-0.009r} \quad (4)$$

2 数值模拟

2.1 数值模型

利用有限元数值模拟软件 ABAQUS 构建管道振动响应模型,并结合现场振动监测数据进行研究^[14]。根据工程实际条件及波在土体中的传播特性,建立土体模型,其整体尺寸为 21m×21m×11m,管道模型为外径 0.45m,内径 0.4m,模型单元皆采用 C3D8R 单元。将土体自上而下简化为均质单一性的土层,不考虑土体内部的影响,每层厚度依据实际情况确定。将管道嵌入土体中,桩-土之间使用面-面接触方式,接触面的法向行为使用“硬接触”模式,即不存在侵入,仅当 2 个面压紧时才传递法向压力,接触面的切向行为服从库仑摩擦定律。为避免应力波传递至边界时发生反射直接影响模拟结果的准确性,采用无反射静-动力统一人工边界^[15],通过改变位于模型四周和底面最外层的 C3D8R 单元为无限元单元 CIN3D8,阻尼器自动嵌入在无限单元内。整体模型如图 5 所示。根据地质勘察结果选取数值模型中的材料参数,土体采用莫尔-库伦本构模型,管道材料为钢材。考虑管道内部天然气的运行存在压力,将其内部压力等效为作用于管道内表面的均布荷载,大小为 4MPa。数值模型中材料的详细参数如表 3 所示。

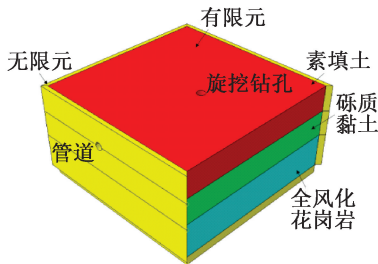


图 5 整体模型

Fig. 5 Overall model

表 3 模型材料参数

Table 3 Model material parameters

模型材料	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松 比	摩擦角/ (°)	黏聚力/ Pa
管道	7 850	210	0.30	—	—
素填土	1 850	0.025	0.27	12	10 000
砾质黏土	1 850	0.030	0.30	5	10 000
全风化花岗岩	1 890	0.040	0.28	25	28 000

聂鹏^[16]通过现场监测与数值模拟相结合得出,当测点与振源在同一深度时受到的振动影响最大。因此,取钻孔深度值与管道埋深相同,模拟管道埋深 3m,旋挖钻直径 1m、钻进深度 3m。由于旋挖钻作用荷载与时长的特点,徐信芯等^[17]和 Poletto^[18]提出,在土体钻进过程中,钻头荷载可近似为简谐激振力,如式(5)所示:

$$F = F_0 \sin \omega t \quad (5)$$

式中: F_0 为激振力的最大幅值; ω 为激振力的圆频率。旋挖钻施工期间产生的扰动力可看作为简谐激振力波形,主要作用于钻头附近一定范围内,因为钻头大小和类型的不同,钻头与岩土介质间的接触面积也有所不同,因此在孔底施加激振荷载。

2.2 模型可靠性验证

在数值模型中选取相对应地表节点的模拟数据,并与实测数据进行分析比对,从而确定数值模拟结果是否可信。模拟结果与实际结果进行比对如表 4 所示,数值模拟结果略高于现场监测点峰值振速,振速误差率在 10% 以下。将地表监测点 1 的实测水平向振速波形与数值模拟波形进行对比,如图 6 所示,两者在波段内波幅的差异较小,波形基本一致。因此,数值模型可以准确再现施工现场状况。

表 4 振动峰值速度对比

Table 4 Comparison of peak vibration velocities

方向	测点	距离/ m	模拟振速/ (mm·s ⁻¹)	实测振速/ (mm·s ⁻¹)	误差/ %
水平向	1	1.5	0.331 7	0.304 5	8.93
	2	2.5	0.286 4	0.275 5	3.96
	3	3.5	0.229 8	0.210 3	9.27
垂直向	1	1.5	0.099 1	0.090 5	9.50
	2	2.5	0.071 5	0.065 7	8.83
	3	3.5	0.059 6	0.054 9	8.57

3 管道动力响应分析

3.1 管道现实工况动力响应

选择模型中管道受影响最大的截面为研究对象,对截面内部 8 个节点进行动力响应监测,其中,节点 3 位于管道内壁靠近振源一侧,节点 7 位于管道内壁远离振源一侧,如图 7 所示。

为探究管道截面振动特性,分析在管道危险截面上内壁各节点的振速及节点所在单元的 Von-Mises 应力的分布规律。危险截面振动峰值速度与 Von-Mises 应力分布如图 8 所示。

在工程实际中管道截面近振源侧 3 节点为最大峰值振速与应力出现点,分别为 0.441mm/s, 7.09MPa;截面最小振速与应力出现在节点 7,分别为 0.292mm/s, 4.02MPa。因此,管道最大峰值振

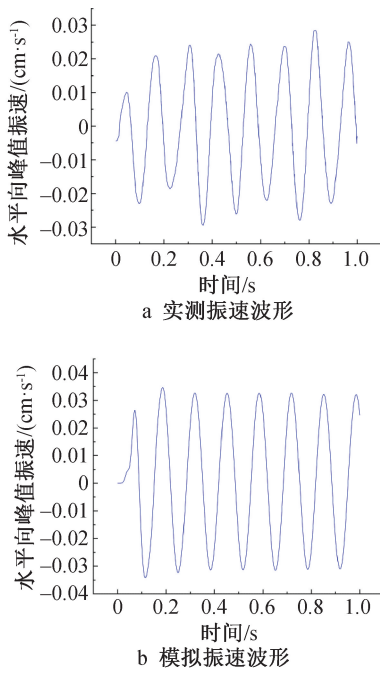


图 6 水平向振速波形对比

Fig. 6 Comparison of horizontal vibration velocity waveforms

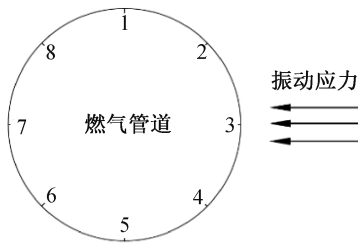


图 7 管道截面节点

Fig. 7 Pipeline section nodes

速、应力均出现在近振源侧,最小峰值振速、应力均出现在远离振源侧。由波动力学理论,当应力波在介质中传递时,节点处的振动速度幅度与其所承受的局部应力强度呈对应关系。因此,可判断管道截面近振源处为最危险部位。

3.2 管道振动速度预测

依据现场振动实测数据与数值模拟计算相结合,探究旋挖钻振动影响下预测高压燃气管道振动速度的方法。选取模型中管道截面靠近振源一侧节点与其正上方地表节点为研究对象,如图 9 所示。

由于三向合成峰值速度最大,为保证管道的安全性,以三向合成峰值振速为评估振动强度的关键指标^[19]。

管道节点振速大于地表节点振速(见图 10),两者均随着管道与振源间距的增大而对称衰减,呈现出明显的对应关系。地表振速在相当程度上能够

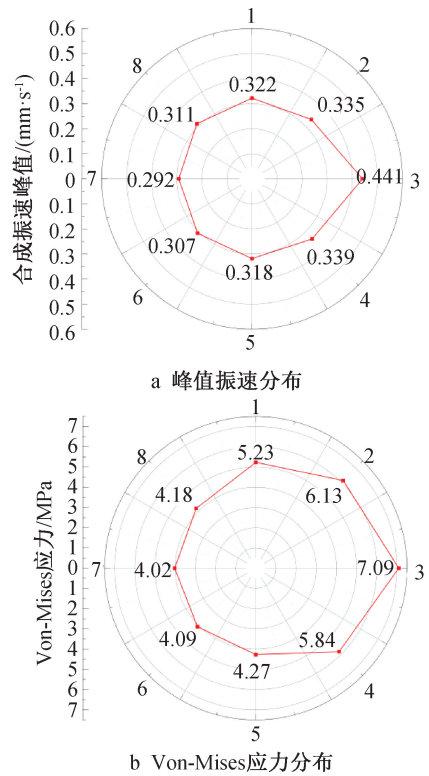


图 8 截面应力与峰值振速分布

Fig. 8 Distribution of cross-sectional stress and peak vibration velocity

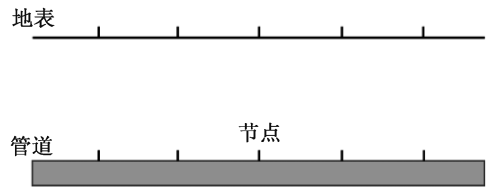


图 9 管道与地表截面

Fig. 9 Cross-section of pipeline and surface

反应正下方管道截面的振动速度特征。

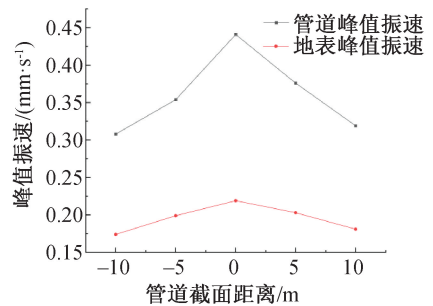


图 10 管道与地表峰值振速

Fig. 10 Peak vibration velocity between pipeline and surface

根据所得数据对两者振速进行拟合(见图 11),分析得到两者之间的关系:

$$v_p = 2.87v_g - 0.2 \quad (6)$$

式中: v_g 为管道上方地面点的最大三向合成峰值振速; v_p 为管道的最大三向合成峰值振速。根据管道振动控制条件,工程现场管道最大控制振速为 $v_p = 2\text{cm/s}$,由式(6)得到相应的地表最大控制振动速度应取为 $v_g = 0.76\text{cm/s}$,大于上述实际地表监测最大振速,因此可判断管道处于安全运行状态。

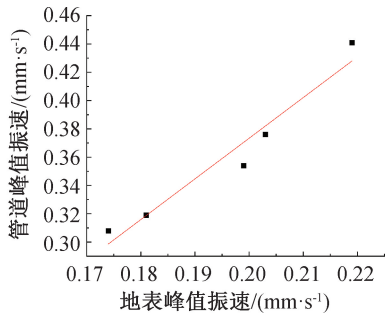


图 11 管道振速与对应地表振速拟合关系

Fig. 11 Fitting relationship between pipeline vibration velocity and corresponding surface vibration velocity

管道截面节点峰值振速与其正上方地表振速具有相关性,将地表峰值合振速数据代入式(1),与式(6)关联,可得出旋挖钻施工下燃气管道最大振动速度的规律如式(7)所示,决定系数 R^2 为0.904,可信度较高。由此,在现场数据以及参数一定的情况下,可根据式(7)对管道的振动速度进行预测与评估,以更好地评价施工振动对管道的影响。

$$u_p = \left[3.21 \left(\frac{0.334}{r} + 0.333 \sqrt{\frac{0.5}{r}} \right) e^{0.008 - 0.017r} \right] - 0.2 \quad (7)$$

式中: u_p 为管道截面峰值振速; r 为距振源中心的距离。

4 结语

本文以深惠城际西丽站为研究对象,结合监测数据与模拟结果,分析了旋挖钻振动衰减与管道的动力响应,结果如下。

1) 各向振动峰值速度与振源距为负相关,呈现明显衰减性,且水平向振动速度大于垂直向振动速度。

2) 旋挖钻施工中各向振动频率基本一致,振动频率集中在 $0 \sim 25\text{Hz}$;应用衰减关系公式对水平向及垂直向振动产生的峰值速度进行数值拟合,拟合结果决定系数 R^2 均大于85%,具有较高可信度。

3) 管道靠近振源的一侧受到的振动影响最大,远离振源一侧影响最小,管道截面近振源一侧峰值振速与峰值 Von-Mises 应力最大,管道截面近振源一侧为最危险部位。

4) 高压燃气管道振速大于其地表振速,二者之

间呈现出线性相关性。基于地表振速预测公式建立管道振动速度的数学预测模型,可应用于工程,仅需监测管道正上方地表峰值振速代入式(7)可得出管道峰值振速,便于判断管道是否处于安全状态。

参考文献:

- [1] 朱斌,蒋楠,周传波,等. 基坑开挖爆破作用邻近压力燃气管道动力响应特性研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(11): 201-208.
ZHU B, JIANG N, ZHOU C B, et al. Effect of excavation blast vibration on adjacent buried gas pipeline in a foundation pit[J]. Journal of vibration and shock, 2020, 39(11): 201-208.
- [2] 高坛,周传波,蒋楠,等. 基坑开挖爆破下邻近管道振动速度安全阈值研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(6): 2191-2195.
GAO T, ZHOU C B, JIANG N, et al. Study on the vibration velocity threshold of the adjacent pipeline under the blasting excavation of the foundation pit[J]. Journal of safety and environment, 2017, 17(6): 2191-2195.
- [3] KOURETZIS G P, BOUCKOVALAS G D, GANTES C J. Analytical calculation of blast-induced strains to buried pipelines[J]. International journal of impact engineering, 2007, 34(10): 1683-1704.
- [4] 张黎明,赵明生,池恩安,等. 爆破振动对地下管道影响试验及风险预测[J]. 振动与冲击, 2017, 36(16): 241-247.
ZHANG L M, ZHAO M S, CHI E A, et al. Experiments for effect of blasting vibration on underground pipeline and risk prediction[J]. Journal of vibration and shock, 2017, 36(16): 241-247.
- [5] 戴亚军. 长沙地铁6号线盾构侧穿博物馆振动控制与监测分析[J]. 现代城市轨道交通, 2019(6): 93-97.
DAI Y J. Vibration control and monitoring analysis of shield tunnel side crossing the museum on Changsha metro line 6[J]. Modern urban transit, 2019(6): 93-97.
- [6] GUAN X M, WANG G, WANG X C, et al. Influences of shield tunnel construction of double-line metro on settlement of existing pipeline[J]. Journal of engineering science and technology review, 2020, 13(2): 167-173.
- [7] 梁莉,苟文锦,田大浪,等. 交通荷载作用下埋地管道的三维力学性状分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(1): 72-78.
LIANG L, GOU W J, TIAN D L, et al. Analysis on 3D mechanical characteristics of buried pipeline under traffic loading[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (natural science edition), 2020, 52(1): 72-78.
- [8] 张东,张宏,周雅哲,等. 重车碾压作用下X65管道力学响应及影响因素[J]. 油气储运, 2022, 41(2): 177-184.
ZHANG D, ZHANG H, ZHOU Y Z, et al. Mechanical response of X65 pipeline under rolling compaction of heavy trucks and the influencing factors[J]. Oil & gas storage and transportation, 2022, 41(2): 177-184.
- [9] 李玉坤,裴晨亮,周鹏,等. 车辆荷载作用下埋地管道动力响应分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 4185-4193.
LI Y K, PEI C L, ZHOU P, et al. Analysis of dynamic response of buried pipeline under vehicle load[J]. Science technology and

- engineering, 2023, 23(10):4185-4193.
- [10] CHEN A J, CHENG F, WU D, et al. Ground vibration propagation and attenuation of vibrating compaction [J]. Journal of vibroengineering, 2019, 21(5):1342-1352.
- [11] GRIZI A, ATHANASOPOULOS-ZEKKOS A, WOODS R D. Pile driving vibration attenuation relationships: overview and calibration using field measurements [C]//Geotechnical earthquake engineering and soil dynamics V. Austin, Texas. American society of civil engineers, 2018.
- [12] 黄菊花, 肖祥芷, 董湘怀, 等. 关于动力机器基础激发的地面振动衰减公式的讨论[J]. 塑性工程学报, 2001, 8(3):85-88.
HUANG J H, XIAO X Z, DONG X H, et al. Discussion on formula calculating the attenuation of the ground vibration by dynamic machine foundation[J]. Journal of plasticity engineering, 2001, 8(3):85-88.
- [13] 杨先健, 徐建, 张翠红. 土-基础的振动与隔振[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
YANG X J, XU J, ZHANG C H. Vibration and vibration isolation of soil-foundation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [14] 陈福江, 段蓉蓓, 张鑫, 等. 近距离桩基施工对既有盾构隧道的振动影响分析[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(1):140-148.
CHEN F J, DUAN R Q, ZHANG X, et al. Analysis on vibration influence of the construction of short-distance pile foundation on existing shield tunnels[J]. Modern tunnelling technology, 2023, 60(1):140-148.
- [15] 王飞, 宋志强, 刘昱杰, 等. 基于 ABAQUS 无限元的静-动力统一人工边界研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6):170-177.
WANG F, SONG Z Q, LIU Y J, et al. Research on static-dynamic unified artificial boundary based on ABAQUS infinite element [J]. Journal of water resources and water engineering, 2018, 29(6):170-177.
- [16] 聂鹏. 钻孔灌注桩施工对地层及既有管沟振动影响规律研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(1):108-112.
NIE P. Study on the vibration influence law of bored cast-in-place pile construction on existing strata and pipe trenches [J]. Urban mass transit, 2025, 28(1):108-112.
- [17] 徐信芯, 焦生杰, 成建联, 等. 旋挖钻机钻杆轴向与横向耦合振动研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 37(9):1039-1044.
XU X X, JIAO S J, CHENG J L, et al. Study of coupled axial and transverse vibrations on the drill pipe for rotary drilling rig [J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science), 2014, 37(9):1039-1044.
- [18] POLETTO F. Energy balance of a drill-bit seismic source, part 1: rotary energy and radiation properties [J]. Geophysics, 2005, 70(2):T13-T28.
- [19] 郝郁清. 爆破地震波对埋地燃气管道的动力响应研究[J]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
HAO Y Q. Study on the dynamic response of blasting seismic waves to buried gas pipelines [J]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.

(上接第 48 页)

- [8] 陈业林, 梁羽. 直线加速器机房超厚防辐射混凝土施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(9):154-157.
CHEN Y L, LIANG Y. Construction technology of ultra-thick anti-radiation concrete for linear accelerator machine room [J]. Construction technology, 2025, 54(9):154-157.
- [9] 何帅全, 连敏杰, 林航. 直线加速器机房超厚钢筋混凝土墙顶板施工技术[J]. 城市住宅, 2020, 27(10):227-230.
HE S Q, LIAN M J, LIN H. Construction technology of super-thick reinforced concrete wall roof in linear accelerator room [J]. City & house, 2020, 27(10):227-230.
- [10] 康苗, 李守富, 王稼琦, 等. 重晶石重密度抗辐射混凝土制备及其大体积结构施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(19):137-142.
KANG M, LI S F, WANG J Q, et al. Preparation and construction technology of ultra-high density and large volume barite concrete in proton therapy area [J]. Construction technology, 2024, 53(19):137-142.
- [11] 周拓. 筏板基础大体积混凝土温度发展规律与裂缝防控[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(16):67-72.
ZHOU T. Temperature development law and crack prevention and control of mass concrete of raft foundation [J]. Construction technology, 2024, 53(16):67-72.
- [12] 王龙, 马柏隆, 吴寒, 等. 大体积防辐射混凝土配合比设计与优化[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(4):53-57.
WANG L, MA B L, WU H, et al. Design and optimization of bulk anti-radiation concrete mixing ratio [J]. Construction technology, 2024, 53(4):53-57.
- [13] 贾哲, 姜波, 程光旭, 等. 纤维增强水泥基复合材料研究进展[J]. 混凝土, 2007(8):65-68.
JIA Z, JIANG B, CHENG G X, et al. Research progress of fibers reinforced cement based composites [J]. Concrete, 2007(8):65-68.
- [14] 阎培渝, 周智凯, 刘卫未, 等. 高层建筑楼板混凝土抗裂性能试验研究[J]. 施工技术, 2015(24):27-29.
YAN P Y, ZHOU Z K, LIU W W, et al. Study on methods of anti-cracking ability of concrete floor of tall buildings [J]. Construction technology, 2015(24):27-29.