

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.01.010

埋地输油管道对爆破振动的动力响应^{*}

高文乐^① 李坤鹏^① 段耀奎^① 冯 娜^① 张春玉^②
①山东科技大学土木工程与建筑学院 (山东青岛,266590)
②济南鲁威科安振动检测有限公司 (山东济南,250000)

[摘 要] 为了控制爆破振动对油气管道的影响,利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对埋地管道在爆破作用下不同方向的受力过程进行数值模拟,建立埋地管道三维有限元模型,采用多物质流固耦合算法模拟爆破过程。结果表明:基于流固耦合方法模拟得到的振速与现场实测结果基本一致,利用该模拟方法研究爆破振动对埋地输油管道的影响是可行的。经过爆破模拟分析,得到埋地管道上的有效应力变化规律。迎爆面和背爆面受到的应力远高于管顶、管底受到的应力,且迎爆面的有效应力大于背爆面,说明迎爆面是最容易发生变形的;管顶和管底位于管道的中轴面上,受到的应力较小,变形也较小。

[关键词] 埋地输油管道;爆破振动;有效应力;ANSYS/LS-DYNA;流固耦合

[分类号] TU746.5

Dynamic Response of Buried Oil Pipeline to Blasting Vibration

GAO Wenle^①, LI Kunpeng^①, DUAN Yaokui^①, FENG Na^①, ZHANG Chunyu^②
① College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology (Shandong Qingdao, 266590)
② Ji'nan Luwei Kean Vibration Testing Co., Ltd. (Shandong Ji'nan, 250000)

[ABSTRACT] In order to control the impact of blasting vibration on oil and gas pipelines, software ANSYS/LS-DYNA was used to numerically simulate the force process of buried pipelines under blasting action, establish a three-dimensional finite element model of buried pipelines, and use multi-material fluid-solid coupling algorithm to simulate the blasting process. Results show that the vibration velocity obtained based on the fluid-solid coupling method is basically consistent with the field measured results. It is feasible to use the simulation method to study the impact of blasting vibration on the buried oil pipeline. Change laws of effective stress on buried pipeline were obtained by blasting simulation analysis. The effective stress on the front explosion surface and the back explosion surface is much higher than that on the top and bottom of the tube, and the effective stress of the front explosion surface is greater than the back explosion surface, indicating that the front explosion surface is the most prone to deformation. The top and bottom of the pipe are located on the central axis of the pipe, so the stress is small and the deformation is also small.

[KEYWORDS] buried oil pipeline; blasting vibration; effective stress; ANSYS/LS-DYNA; fluid-structure coupling

引言

目前,管道运输在石油运输与调配中起到重要作用,覆盖全国的油气管网格局已经形成^[1]。在管道运输过程中,难免会遇到爆破作业。爆破施工产生的爆破振动会对邻近埋地输油管道产生影响,甚至导致管道破裂,造成资源浪费,同时存在很大的安

全隐患。国内外制定的管道上方地表振速控制标准差别较大^[2],爆破振动对管道的影响无法得到准确计算。因此,可以运用数值模拟分析爆破振动对埋地管道的影响。王树江^[3]运用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立了包含炸药、岩土体、埋地管道的管土耦合模型,通过爆破动力载荷数值模拟,分析管土耦合模型受爆破动载荷的动力响应。郝郁清^[4]运用有限元软件建立管土三维数值模型,分析不同装药

^{*} 收稿日期:2020-08-31
基金项目:国家自然科学基金(51874189)
第一作者:高文乐(1966 -),男,硕士,教授,主要从事岩土力学和爆破安全技术的教学和科研工作。E-mail:wenlegao@163.com
通信作者:李坤鹏(1995 -),男,硕士研究生,主要从事岩土力学和爆破安全技术的科研工作。E-mail:1263294166@qq.com

量及爆心距工况下埋地燃气管道、地表土体对爆破振动的动力响应。黄雄^[5]运用 LS-DYNA 软件建立三维有限元模型,证明管道迎爆面中心单元应变峰值和振速峰值均随着药量的增加而增加,随着爆心距的增加而减小。舒懿东^[6]建立三维动力有限元计算模型,分析爆破振动下埋地天然气管道的管径、壁厚和埋深等参数对管道及地表振动特征和管道 Von-Mises 应力的影响规律。张玉琦等^[7]分析了爆破地震载荷作用下埋地管道的动力响应特征,研究了管道振动速度及动态应变分布特征。

上述文献均研究了爆破振动对邻近埋地管道的影响,但是仅停留在对埋地管道单个方向的分析。由此,结合邻近埋地输油管道的某港区疏港大道土石方爆破工程进行研究,对埋地管道的迎爆面、背爆面、管顶和管底 4 个面进行分析,总结不同方向结构面应力分布规律。

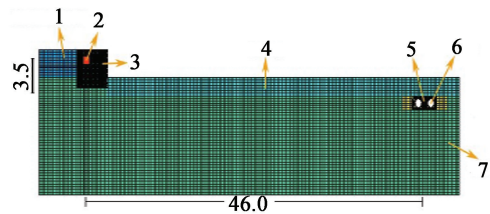
1 有限元模型

1.1 计算模型建立

碎土石层厚度为 2.0 m,两管道平均埋深为 2.8 m,相距 0.7 m,管径 1 020.0 mm,壁厚 12.7 mm。爆源与管道水平距离 46.0 m,竖直距离 3.5 m,外侧管道中心距离模型另一端外边界 4.0 m。

采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立模型,进行数值模拟。由于管道内的液体流动压力远小于管道所承受的强度,建模时不考虑管道内部液体和动压力的影响。根据对称关系,建立 1/2 模型进行简化计算,参数单位采用 cm-g-μs。令重力方向为 Y 轴负方向,垂直于管道长度方向为 X 轴正方向,平行于管道方向为 Z 轴方向。

具体位置及模型尺寸见图 1 所示。



1 - 弱风化白云质灰岩;2 - 炸药;3 - 空气域;
4 - 碎土石层;5 - 细沙;6 - 埋地管道;7 - 石灰岩。
图 1 模型尺寸示意图(单位:m)
Fig. 1 Model size diagram(unit:m)

在模型顶部炸药周围建立空气域,使得炸药爆炸后的能量在流体单元中流动,不存在单元的畸变问题。基于管道实际埋地敷设施工中会在底部铺设

垫层的情况,在模型最底部岩层和管道之间设置 20 cm 厚的土层来模拟实际情况。模型截面如图 2 所示。

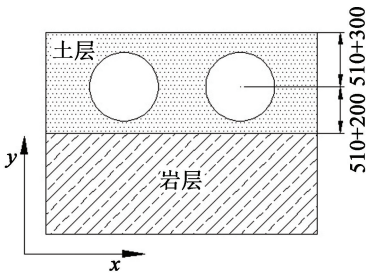


图 2 管道模型截面图(单位:mm)
Fig. 2 Section of pipe model(unit:mm)

根据所研究问题特性,采用多物质流固耦合算法,即将炸药、空气等物质与固体结构的相互作用进行耦合计算^[8]。

建模时,对流体材料(炸药及空气域)采用 ALE 算法,对固体材料(其他结构)采用 Lagrange 算法。在管道与土体接触处、炸药与被爆岩石接触处对网格进行加密,以保证计算的精度。网格划分情况如图 3 所示。

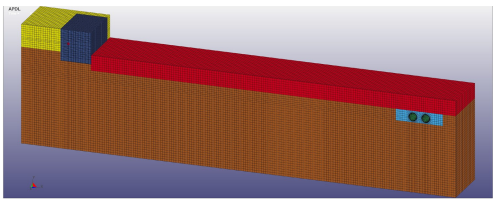


图 3 模型网格划分示意图
Fig. 3 Schematic diagram of model grid division

1.2 材料本构模型及参数

1.2.1 岩石本构模型及相关参数

被爆岩石为弱风化白云质灰岩,采用 * Mat_Plastic_Kinematic 弹塑性材料模型^[9],主要参数如表 1 所示。

| 表 1 岩体的相关力学参数 | | | | |
|--|------|--------------|--------------|--------------|
| Tab. 1 Relevant mechanical parameters of rock mass | | | | |
| 密度/ (g · cm ⁻³) | 泊松比 | 弹性模量/ GPa | 屈服强度/ MPa | 切变模量/ GPa |
| 2.65 | 0.16 | 30 | 0.03 | 0.15 |

底部石灰岩采用 HJC 模型(* Mat_Johnson_Holmquist_Concrete)^[10-11],本构参数见表 2。

1.2.2 土体本构模型及相关参数

土层采用 * Mat_Drucker_Prager 材料模型,主要的物理力学参数见表 3。

表 2 石灰岩的 HJC 模型参数

| Tab.2 Parameters of HJC model for limestone | | | | |
|---|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | | G/MPa | A | B |
| 2.3 | | 10 093 | 0.55 | 1.23 |
| C | N | f_c/MPa | T/MPa | E_{FMIN} |
| 0.009 7 | 0.89 | 60 | 4 | 0.01 |
| p_c/MPa | U_c | p_l/GPa | U_l | D_1 |
| 20 | 0.001 25 | 2 | 0.174 | 0.04 |
| D_2 | K_1/GPa | K_2/GPa | K_3/GPa | |
| 1 | 39 | - 223 | 550 | |

表 3 土体的相关力学参数

| Tab.3 Relevant mechanical parameters of the soil | | | | | |
|--|--|---------|-------------|--------------|--------------|
| 土体 | 密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 泊松 比 | 内聚力/ MPa | 弹性模量/ MPa | 内摩擦角 /rad |
| 碎石 土层 | 1.87 | 0.28 | 0.120 | 140.000 | 0.673 2 |
| 细砂 土层 | 1.95 | 0.28 | 0.004 | 9.167 | 0.628 0 |

1.2.3 炸药本构模型及相关参数

炸药采用 2#岩石乳化炸药、* Mat_High_Explosive_Burn 模型^[9],材料的主要参数见表 4。采用 JWL 状态方程模拟炸药爆轰产物的压力与体积的关系。

表 4 炸药材料参数

| Tab.4 Material parameters of explosives | | | | |
|--|---|------------|----------------|------------------|
| 密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 爆速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | 爆压/ GPa | A/GPa | |
| 1.1 | 3 000 | 3.4 | 214.4 | |
| B/GPa | R_1 | R_2 | ω | E_0/GPa |
| 18.2 | 4.2 | 0.9 | 0.15 | 4.192 |

1.2.4 管道本构模型及相关参数

管道为 X70 钢管,采用 * Mat_Plastic_Kinematic 弹塑性材料模型,服从 Von-Mises 屈服准则,管道主要的参数^[12]见表 5。

1.2.5 空气本构模型及相关参数

空气采用 * Mat_Null 材料模型和线性多项式状

表 5 管道的相关力学参数

| Tab.5 Relevant mechanical parameters of pipeline | | | | |
|--|-----|--------------|--------------|--------------|
| 密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 泊松比 | 弹性模量/ GPa | 屈服强度/ MPa | 切线模量/ GPa |
| 7.9 | 0.3 | 210.0 | 480.0 | 13.5 |

态方程 * Eos_Linear_Polynomial 描述^[13],在状态方程计算过程中不考虑偏应力。力学参数见表 6。

表 6 空气的相关力学参数

| Tab.6 Relevant mechanical parameters of air | | | | |
|---|------------------------|-------|-------|-------------------------------------|
| 密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | C_0 | C_1 | C_2 | |
| 1.29 | - 1.0 $\times 10^{-6}$ | 0 | 0 | |
| C_3 | C_4 | C_5 | C_6 | $E_0/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3})$ |
| 0 | 0.4 | 0.4 | 0 | 0.25 |

2 数值模拟准确性验证

根据工程实例建立数值计算模型,取管道正上方与爆源水平距离 46 m 的测点 1#和 61 m 的测点 2#,其实测的地表峰值振速见表 7。选取模型中与测点 1#相近位置处管道上方的地表的振速,其结果如图 4 所示。

将现场监测数据与本次数值模拟结果进行比较分析可以发现,爆破振动现场测点 1#的 X 方向、Y 方向、Z 方向峰值振速分别为 0.82、0.74、0.64 cm/s,模拟计算结果的 X 方向、Y 方向、Z 方向峰值振速分别为 0.78、0.63、0.59 cm/s,最大绝对误差为 0.10 cm/s,相对误差为 13.5%,远低于 30.0%^[14]。因此,本次数值模拟是准确的,计算模型可以较好地模拟出现场的实际情况。

3 埋地管道应力分析

埋地输油管道计算时程内的应力云图见图 5。由图 5 可知, $t=0$ ms 时刻炸药起爆,产生的冲击波从爆源中心向外传播,在 5 ms 后爆破地震波传到管道表面,随后应力波从中间沿管道轴向传播。传播过程中,管道面对爆心的迎爆面上的应力状态

表 7 爆破振动监测数据

| Tab. 7 Monitoring data of blasting vibration | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|--|------|------|--|---------------|-----------|
| 测点 | 爆心距/ m | 药量/ kg | 振速/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | | | 矢量合成振速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 达最大值的时间/ s | 主频/ Hz |
| | | | X 方向 | Y 方向 | Z 方向 | | | |
| 1 [#] | 46 | 70 | 0.82 | 0.74 | 0.64 | 0.96 | 3.727 4 | 38.83 |
| 2 [#] | 61 | 70 | 1.00 | 1.41 | 0.88 | 1.69 | 7.620 5 | 59.70 |

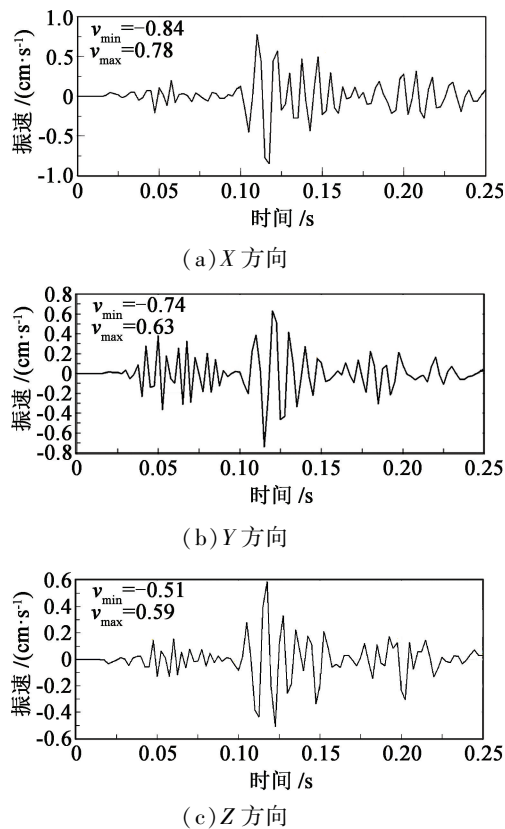


图 4 模拟测点的振动速度波形图

Fig. 4 Vibration velocity waveform of simulated measuring points

最先开始发生改变,应力值开始增大,且比管道其他位置处的应力都大;随着时间的流逝,管道上的应力先增大至最大,随后减小。

埋地输油管道不同位置处受爆破载荷的冲击和周围土体的作用不同,其动力响应也不同。取左侧埋地输油管道横截面方向上 A、B、C、D 4 个位置来研究埋地输油管道的爆破振动响应规律。管道截面取点位置见图 6。其中,A 处位于迎爆面;B、D 两处分别为管顶和管底;C 处与 A 处相对,位于背爆面。

管道横截面 4 个位置处有效应力随时间变化曲线见图 7。

由图 7 可知,爆破载荷作用下,管道近爆面(A 处)的有效应力为 1.46 MPa,管顶(B 处)有效应力为 0.77 MPa,管道背爆面(C 处)有效应力为 1.06 MPa,管底(D 处)有效应力为 0.84 MPa。其中,A 处有效应力最大,比 C 处有效应力高 37.74%,比 B、D 处分别高 89.61%、73.81%。C 处有效应力比 B、D 处高 37.66%、26.19%。

由以上分析可得:在爆破过程中,迎爆面的有效应力迅速增大至最大,之后开始衰减至 0.1 ~ 0.4 MPa 范围内。在爆破振动作用下,迎爆面和背爆面受到的应力远远高于管顶、管底的受力,且迎爆面的

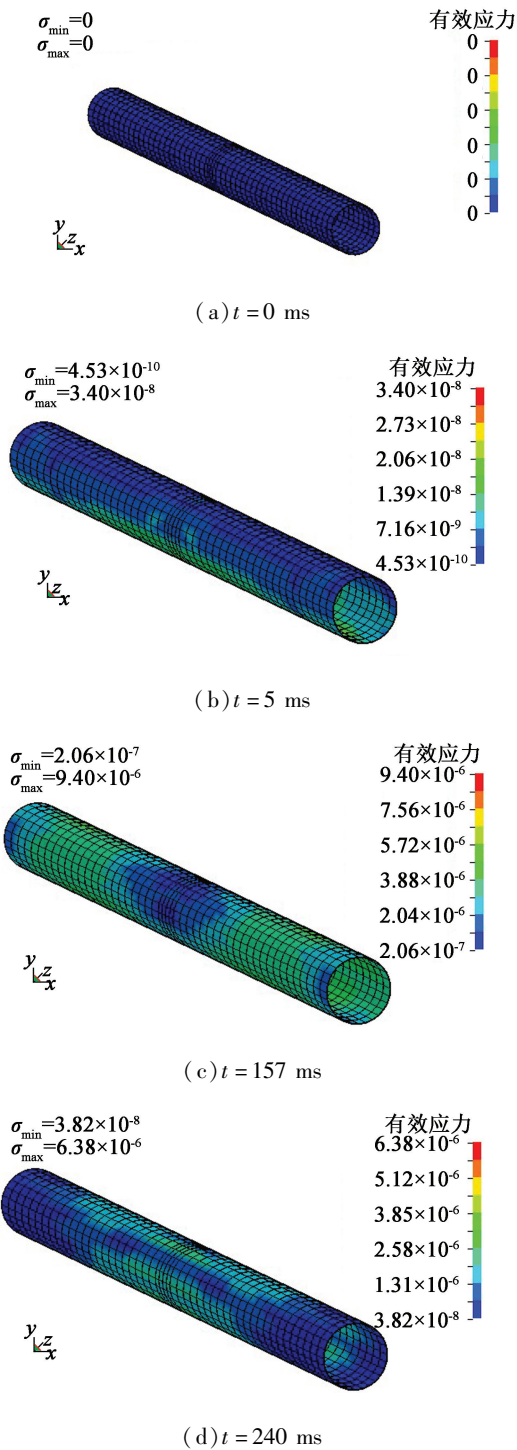


图 5 埋地管道各时刻应力云图

Fig. 5 Stress nephogram of buried pipeline at each moment

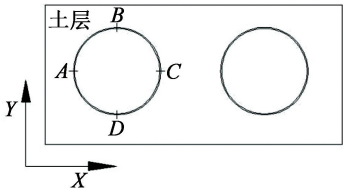


图 6 管道截面取点位置

Fig. 6 Location of measuring points at the pipeline section

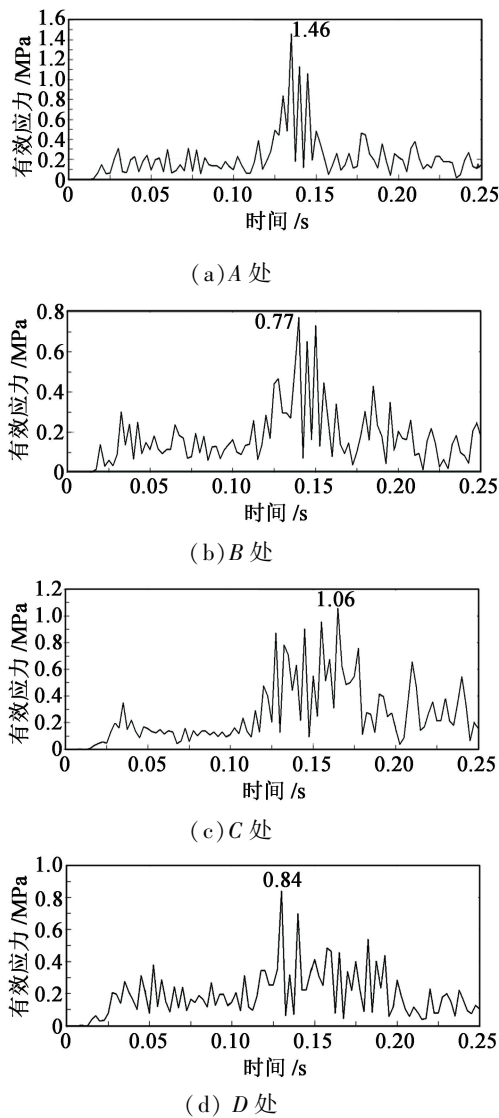


图 7 有效应力曲线
Fig. 7 Effective stress curves

有效应力要大于背爆面,说明迎爆面是最容易发生变形的。管顶和管底位于管道的中轴面上,受到的应力较小,变形也较小。背爆面有效应力比管顶和管底的有效应力高,是由于当地震波经过左侧管道传递至右侧埋地管道时,右侧管道的波阻抗与土体不同,会在右侧管道处发生反射与折射,还会受到管道直径和壁厚的影响。

4 结论

1)通过 ANSYS/LS-DYNA 流固耦合的方法模拟爆破过程,结果表明:基于流固耦合方法模拟得到的爆破振动速度与现场实测结果基本一致。因此,在实际工程中可以采用流固耦合方法进行数值模拟,研究爆破振动对埋地输油管道影响的相关问题。

2)在爆破振动作用下,迎爆面和背爆面所受应力远高于管顶、管底所受应力,且迎爆面有效应力要大于背爆面,表明迎爆面是最容易发生变形的。管顶和管底位于管道的中轴面上,受到的应力值较小,变形也较小。当爆破地震波经过左侧管道传递至右侧埋地管道时,右侧管道的波阻抗与土体不同,爆破地震波会在右侧管道处发生反射与折射,反作用于左侧管道背爆面,使得背爆面应力比管顶和管底的应力大。

参 考 文 献

[1] 蒲明, 马建国. 2010 年我国油气管道新进展[J]. 国际石油经济, 2011, 19(3):26-34,105.
PU M, MA J G. Progress of China's oil and gas pipeline development in 2010 [J]. International Petroleum Economics, 2011, 19 (3) : 26-34, 105.

[2] 彭佳伟. 隧道爆破振动下埋地长输油管道的管-土-油相互作用及振动特征[D]. 成都: 西南交通大学, 2017:1-2.
PENG J W. Research on the interaction between pipe and soil and vibration characteristics of long buried oil pipeline under blasting vibration [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017:1-2.

[3] 王树江. 爆破动载荷下埋地管道动力响应与振动能衰减研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
WANG S J. The research on dynamic response and vibration energy attenuation of buried pipeline under blasting dynamic load[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.

[4] 郝郁清. 爆破地震波对埋地燃气管道的动力响应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
HAO Y Q. Study on dynamic response of blasting seismic wave to underground gas pipeline[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.

[5] 黄雄. 爆破荷载作用下埋地钢管的动力响应研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018.
HUANG X. Dynamic response of buried steel pipe subjected blasting loads [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018.

[6] 舒懿东. 爆破振动下埋地天然气管道工况参数对管土振动特征的影响分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
SHU Y D. Working condition parameters of buried gas pipeline under blasting vibration analysis of vibration characteristics of pipe and soil [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[7] 张玉琦, 蒋楠, 贾永胜, 等. 爆破地震荷载作用下高密度聚乙烯波纹管动力响应试验研究[J]. 爆炸与冲击,

2020,40(9):122-132.

ZHANG Y Q, JIANG N, JIA Y S, et al. Experimental study on dynamic response of high-density polyethylene bellows under blasting seismic load[J]. Explosion and Shock Waves,2020,40(9):122-132.

[8] 纪冲, 汤晓勇, 汤建平, 等. 地面爆炸荷载作用下土埋管道的动力响应研究[J]. 天然气与石油, 2014,32(6):1-4.

JI C, TANG X Y, TANG J P, et al. Study on dynamic response of buried pipeline affected by ground explosion load [J]. Natural Gas and Oil, 2014,32(6):1-4.

[9] 蒋楠, 周传波. 爆破振动作用下既有铁路隧道结构动力响应特性[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(6):63-68.

JIANG N, ZHOU C B. Dynamic response characteristics of existing railway tunnel structure subjected to blasting vibration[J]. China Railway Science, 2011, 32(6):63-68.

[10] 方秦, 孔祥振, 吴昊, 等. 岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法[J]. 工程力学, 2014,31(3):197-204.

FANG Q, KONG X Z, WU H, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters of rock[J]. Engineering Mechanics, 2014,31(3):197-204.

[11] 朱利明, 吴志强, 邢世玲, 等. 隧道爆破开挖施工对古建筑振动速度的影响[J]. 建筑结构, 2019, 49(10):26-29.

ZHU L M, WU Z Q, XING S L, et al. Influence of tunnel blasting and excavation on the vibration velocity of ancient buildings [J]. Building Structure, 2019, 49(10):26-29.

[12] 张坤, 郑全平, 李四伟, 等. 土中爆炸对埋地管线冲击作用的数值模拟分析[J]. 后勤工程学院学报, 2013, 29(3):12-17,23.

ZHANG K, ZHENG Q P, LI S W, et al. Numerical simulation & analysis for impact of explosion under ground on buried pipelines[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2013, 29(3):12-17,23.

[13] LS-DYNA keyword user's manual [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2018;1-16.

[14] 黄佑鹏, 王志亮, 毕程程. 岩石爆破损伤范围及损伤分布特征模拟分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(5):95-102.

HUANG Y P, WANG Z L, BI C C. Simulation analysis of blast-induced damage scope and its distribution characteristics of rocks [J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(5):95-102.

声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部