

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0303

浅埋高压输气管道爆炸地面振动的原型试验与数值模拟研究*

马华原¹, 龙 源¹, 谢全民², 宋 歌³, 周 游⁴, 殷 勤¹

(1. 陆军工程大学野战工程学院, 江苏 南京 210007;

2. 陆军工程大学军械士官学校, 湖北 武汉 430075;

3. 解放军 31434 部队, 辽宁 沈阳 110045;

4. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 针对浅埋高压输气管道爆炸产生的地面振动效应, 采用现场试验结合数值模拟的方法展开研究。组织实施了全尺寸天然气管道爆炸试验, 掌握了高压输气管道爆炸地面振动的量级范围以及衰减规律。经试验数据分析得到, 埋地高压天然气管道爆炸造成的地面振动主要产生于物理爆炸过程中, 随后发生的天然气爆燃过程并未产生明显的地面振动。基于非线性有限元程序 LS-Dyna 建立了高压输气管道爆炸试验计算模型, 计算结果与试验现象吻合较好, 验证了模型参数设计的合理性。进一步分析了管道爆炸瞬间管内气体-管壁-土体的相互作用机理、应力分布以及裂纹扩展规律。由计算结果分析得到, 管道开裂是由于内部高压气体推动管壁向两侧扩展在裂纹尖端处形成了应力集中, 管壁冲击土体的速度可达 50 m/s, 冲击产生的塑性状态向远处传播逐渐衰减为弹性应力波, 即形成了地面振动效应。研究成果揭示了高压气体管道爆炸地面振动的主要成因, 可为爆炸事故振动预防提供理论参考和技术支持。

关键词: 管道爆炸; 地面振动; 衰减规律; 管土作用

中图分类号: O383; TE88

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

随着西气东输一线、二线、三线工程的相继落成, 我国天然气管道里程逐年攀升, 目前已建成天然气管道超 10 万公里^[1-3]。为提高管道的输送能力, 管道设计运行压力呈上升趋势。虽然管壁材料性能在不断进步, 但仍不可避免由于环境腐蚀、材料失效、自然灾害等因素导致的高压管道泄漏甚至爆炸^[4-6], 对周边人员和设施造成损伤, 严重威胁着国民经济稳定发展和人民生命财产安全。

天然气管道爆炸时产生的危害效应主要有热辐射、冲击波和地震波。其中关于热辐射和冲击波的研究已经十分深入^[7-10], 但对于天然气管道爆炸产生的地面振动效应还缺乏相关的研究。王德国^[11]利用 Autodyna 软件建立管道爆炸物理模型, 计算不同并行间距下管道受并行管线爆炸冲击超压变形量, 评定了管道受冲击变形的风险。谌贵宇等^[12]针对炸药库发生意外爆炸后地震波的传播及埋地油气管道动力响应振动过程进行了三维动态数值模拟, 获得了管道的振动速度响应特性。杜洋等^[13]提出一种计及计算稳定性的流固耦合算法, 对在内部气体爆炸作用下的管道动态断裂及爆炸流场发展进行耦合计算, 以便更加合理地预测管道内气体爆炸的后果。目前的研究工作中, 尚未见有关于全尺寸高压天然气管道爆炸产生的地面振动效应的报道, 因此本文中针对此问题开展现场实爆试验并结合数值模拟进行研究, 掌握高压输气管道爆炸地面振动的量级范围以及衰减规律、爆炸瞬间气-管-土的相互作用过程, 揭示高压气体管道爆炸地面振动的主要成因。以期研究结果可将为今后的管道爆炸事故分析以及预防提供参考。

* 收稿日期: 2018-08-21; 修回日期: 2018-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(11672331, 51608530, 51808554)

第一作者: 马华原(1992—), 男, 博士研究生, 503812350@qq.com;

通信作者: 谢全民(1983—), 男, 博士, 讲师, xiequanmin1983@163.com。

1 高压输气管道爆炸试验

1.1 试验概况

试验依托国家重点实验室哈密管道断裂控制试验场开展,选取 OD1422mm-12MPa-X80 型钢管,该型钢管已大量运用于中俄东线工程中^[14-15],具有较高的研究价值。管道的主要性能参数分别为:管体材料为 X80,弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 578 MPa,管体直径为 1 422 mm,壁厚为 22.4 mm,埋深为 1.2 m,内压为 12 MPa。

试验管道总长度为 430 m,中间为 130 m 长的试验段,两端为 150 m 长的储气段,如图 1 所示。试验前管道放置于管沟内,先不做填埋。按步骤装配各型传感器,连接调试完毕后使用泵车向管内注入天然气约 80 000 m³,使其管内压力达到 12 MPa 的标准运行状态。采取人工引入初始裂纹的方案使管道发生爆炸^[16],在管道中点延轴线方向设置长度为 80 cm 的线型聚能切割器以开辟初始裂纹,如图 2 所示。同时,为了模拟管道泄露时最严重的状况,设置了燃烧弹发射装置以引爆泄露天然气。

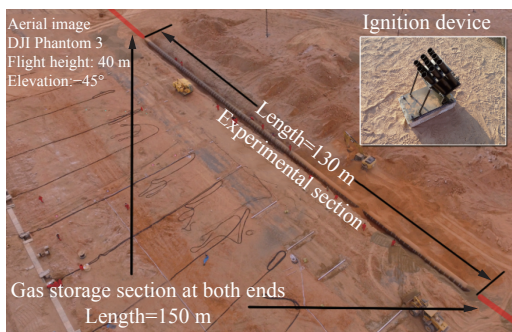


图 1 测点布设方案

Fig. 1 Layout scheme of measuring points

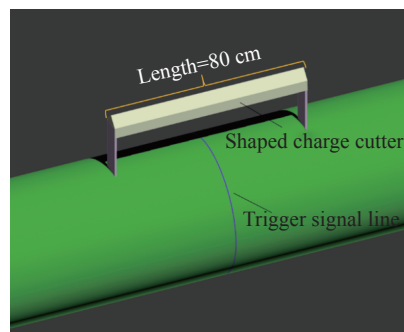


图 2 切割器装配示意图

Fig. 2 Sketch of cutter assembly

主要采集管道爆炸中心附近土中质点的振动速度和加速度数据,对应选取 TC-4850 振动速度测试仪和 Blast-UM 振动加速度测试仪^[17]。以起爆点为原点,在与管道分别呈 90° 和 45° 夹角方向设置振动测线。每条测线上布设 10 个测点,测点间距如图 3 所示(两条测线测点间距相同)。每个测点处安装磁电式振动速度传感器和压电式振动加速度传感器各一台。为获得地震波到达不同测点的时间信息,对 90° 测线上的振动加速度测试仪进行了同步触发设计^[18],触发线置于线型聚能切割器与管壁之间,起爆瞬间射流刀首先切断触发线,90° 测线振动加速度测试仪开始记录数据。其他测试仪均采用自动外触发,其中,振动速度测试仪触发阈值为 0.1 cm/s,振动加速度测试仪触发阈值为 0.1 g。测振仪的其他技术参数见表 1 所示。

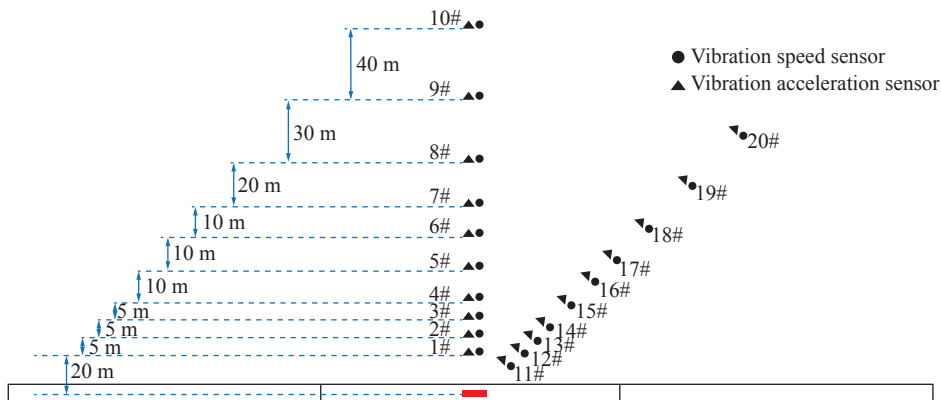


图 3 测点布设方案

Fig. 3 Layout scheme of measuring points

表 1 振动测试仪性能参数

Table 1 Technical parameters of the vibration recorders

| 型号 | 通道数 | 频响范围/Hz | 量程/(cm·s ⁻¹) | 读数精度/% | 采样率/s ⁻¹ |
|----------|-----|---------|--------------------------|--------|---------------------|
| Blast-UM | 3 | 5~300 | < 35 | 0.1 | 1 000~10 000 |
| TC-4850 | 3 | 5~500 | < 35 | 0.1 | 1 000~50 000 |

1.2 试验过程及现象分析

起爆瞬间, 现场可观察到气体夹杂大量尘土喷出, 气团接触到率先发射升空的燃烧弹后迅速爆燃。起爆后约 3 s, 气团完全爆燃, 形成巨大蘑菇云。观测站距离爆心约 2 km, 可感受到明显热辐射。爆炸结束后第一时间派出无人机前往爆心进行勘察, 可观察到现场形成长约 20 m、宽约 3 m 的爆坑。裂纹两端有残余气体持续燃烧约 5 min 后熄灭。爆炸瞬间航拍影像如图 4 所示。



图 4 爆炸过程

Fig. 4 Explosion process

待确认现场氧气浓度恢复并且无甲烷残留后, 试验人员进入现场进行勘察。近距离观测爆后管道, 可看到管壁在巨大压力下将土体向两侧撑开, 裂纹长度约 26.9 m。同时, 管道在反作用力下, 中心起爆部分下沉近 5 cm。

1.3 振动数据分析

天然气管道爆炸过程中, 出现了两次能量急速释放, 第 1 次为管壁开裂、气体喷出的物理爆炸过程, 第 2 次为泄露天然气发生爆燃的化学爆炸过程。这两个过程都可能产生地面振动^[19]。

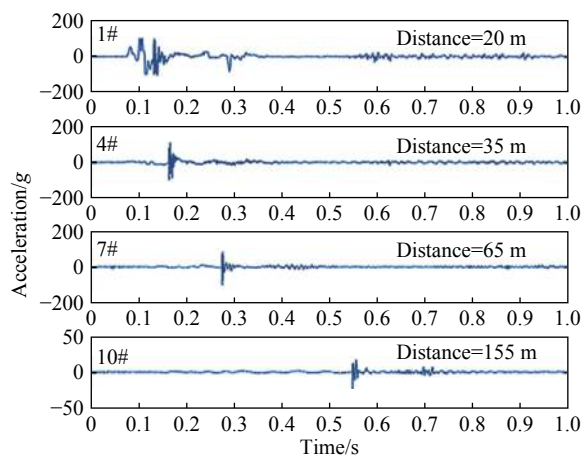


图 5 地震波到达时刻

Fig. 5 Time of arrival of seismic waves

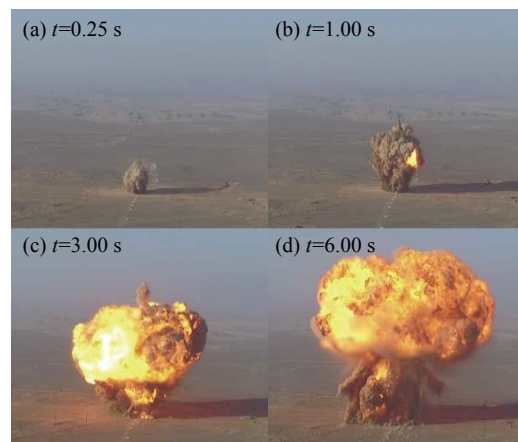


图 6 蘑菇云的形成时刻

Fig. 6 Time for mushroom cloud formation

图 5 为 90° 测线同步触发记录的加速度数据。结合图 6 的爆燃时间综合来看, 气体完全爆燃发生在起爆后 3~6 s。而地震波在起爆后 0.1 s 时便已到达测点 1#处, 到达距离爆心 155 m 的测点 10#处仅用了 0.55 s, 而此时泄露气体尚未发生爆燃。因此可以判断, 天然气管道爆炸的地面振动效应并不是泄露气体爆燃引起的, 而就时间分布情况来看, 地面振动主要发生在第 1 阶段物理爆炸过程中^[20-21]。

2 高压输气管道爆炸地面振动效应数值模拟

2.1 模型建立

由于天然气管道爆炸计算模型尺寸巨大、算法复杂, 而本课题组硬件算力受限, 因此, 本文中建立管道爆炸试验 1/4 模型。采用 solid 164 单元, 流固耦合算法。管内高压气体以及管外一定范围内采用欧拉网格, 管壁以及土体采用拉格朗日网格, 如图 7 所示。

气体模型选用 9 号材料 *MAT_NULL, 理想气体状态方程。管内气体压力为 12 MPa, 管外为常温常压, 两种气体具体参数设置如表 2 所示。为节省计算时间, 在管道轴线方向上采用渐变网格划分, 如图 8 所示。

管道模型选用 15 号材料 *MAT_JOHNSON_COOK, 具体参数见表 3。为节省计算时间并优化计算结果, 在管壁环向以及轴向上均采用渐变网格划分, 以保证在管道大变形位置网格尽量密集。由于采用渐变网格, 所以无法精确控制预制裂缝长度, 1/4 模型上预制裂纹长度为 42.15 cm, 因此裂纹总长 84.30 cm, 与实际切割器长度基本相符, 如图 9 所示。

土体模型选用 3 号材料 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC, 具体参数见表 4。为减少计算量, 管道轴线方向上建立深度为 3 m、宽度为 1.2 m 的土体, 在垂直于管道方向, 只在起爆点位置建立长为 20 m 的土体。通过定义无反射边界条件来模拟半无限土体域。管道和土体之间采用 AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE 接触。为节省计算时间, 在管道轴线和垂线方向上均采用渐变网格划分。

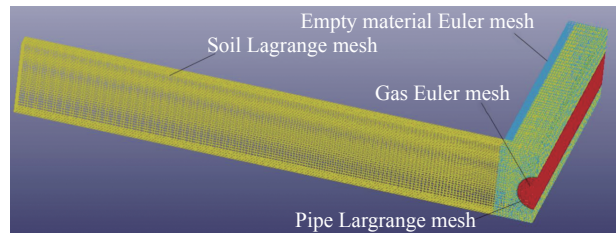


图 7 整体模型

Fig. 7 Integral model

表 2 气体模型主要参数

Table 2 Main parameters of gas model

| 部位 | 材料号 | 密度/(g·cm ⁻³) | 状态方程 | 内能/(g·cm ² ·μs ⁻²) |
|-------|-----------|--------------------------|------------------------|---|
| 管内气体 | *MAT_NULL | 9.160×10 ⁻² | *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL | 3.00×10 ⁻⁴ |
| 管外空气域 | *MAT_NULL | 1.292×10 ⁻³ | *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL | 2.50×10 ⁻⁶ |

表 3 金属模型主要参数

Table 3 Main parameters of metal model

| 部位 | 材料号 | 密度/(g·cm ⁻³) | 剪切模量/(g·cm ⁻¹ ·μs ⁻²) | 泊松比 | 状态方程 | 内能/(g·cm ² ·μs ⁻²) |
|------|-------------------|--------------------------|--|-----|----------------|---|
| 管体材料 | *MAT_JOHNSON_COOK | 7.89 | 0.77 | 0.3 | *EOS_GRÜNEISEN | 3.00×10 ⁻⁴ |

表 4 土体模型主要参数

Table 4 Main parameters of soil model

| 部位 | 材料号 | 密度/(g·cm ⁻³) | 弹性模量/(g·cm ⁻¹ ·μs ⁻²) | 泊松比 |
|------|------------------------|--------------------------|--|------|
| 土体材料 | *MAT_PLASTIC_KINEMATIC | 1.8 | 3.23×10 ⁻⁴ | 0.25 |

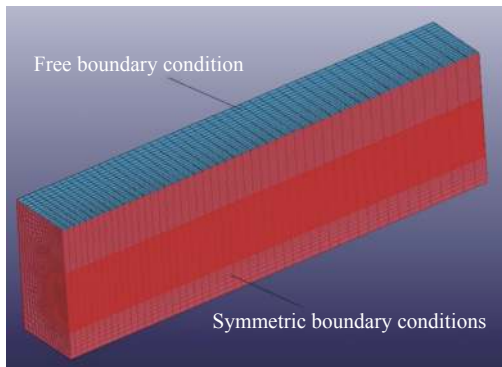


图 8 气体模型
Fig. 8 Gas model

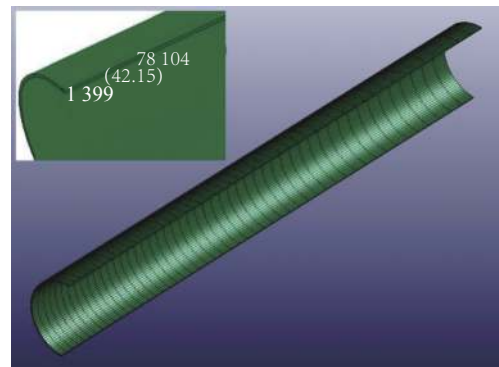


图 9 管道模型
Fig. 9 Pipeline model

2.2 计算结果及分析

图 10 为爆炸瞬间管道开裂情况的计算结果, 由图 10 可见, 管壁在初始裂缝和管内高压气体的作用下发生巨大变形, 向四周扩张。从管身的 von Mises 云图可以看出, 由于管壁在高压气体的作用下向两侧张开, 在初始裂纹处产生了巨大的应力集中, 从而导致了破坏状态的传递, 发生裂纹扩展。裂纹经历了加速起裂和减速止裂过程, 最终在 50 ms 左右停止在距离起爆中心截面约 5 m 的位置。

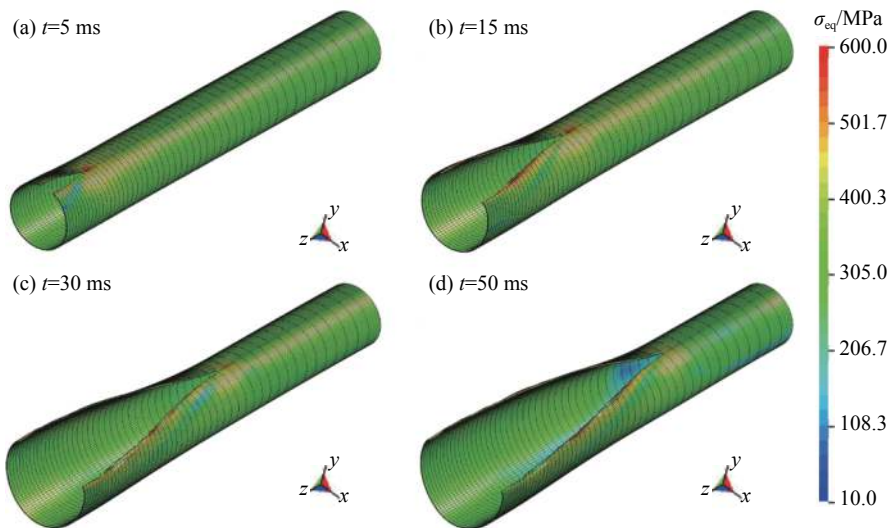


图 10 管道开裂模拟结果
Fig. 10 Simulation results of pipe cracking

图 11 为管内气体压力云图。图 12 为管内气体压力状态曲线。由图 11~12 可见, 减压波(稀疏波)从初始裂纹处进入, 向气体内部传播。在管道初始起裂气压较高时, 沿管道轴线方向管内气压梯度较大, 随着气体泄漏压强下降, 管内气压梯度逐渐缩小。气压下降至 3 MPa 左右时, 3 条曲线开始重叠。管壁裂纹在 50 ms 时停止扩展, 此时裂纹尖端位置(2 029 单元)的压力为 4 MPa。由此可见, 4 MPa 的压力不足以维持管壁裂纹的稳定扩展, 管壁自然止裂。

2.3 气体-管壁-土体相互作用

图 13 为管壁裂纹的计算结果与试验效果对比图。由图 13 可以看出, 模拟结果和试验结果具有较高的相似性, 管壁裂缝呈现中间宽末端窄的状态, 边缘经过拉伸断裂和剧烈管土作用之后呈现波浪状。由于算力有限, 模型的轴向尺寸远小于试验管道, 管内压力下降过快导致裂口长度小于试验结果。

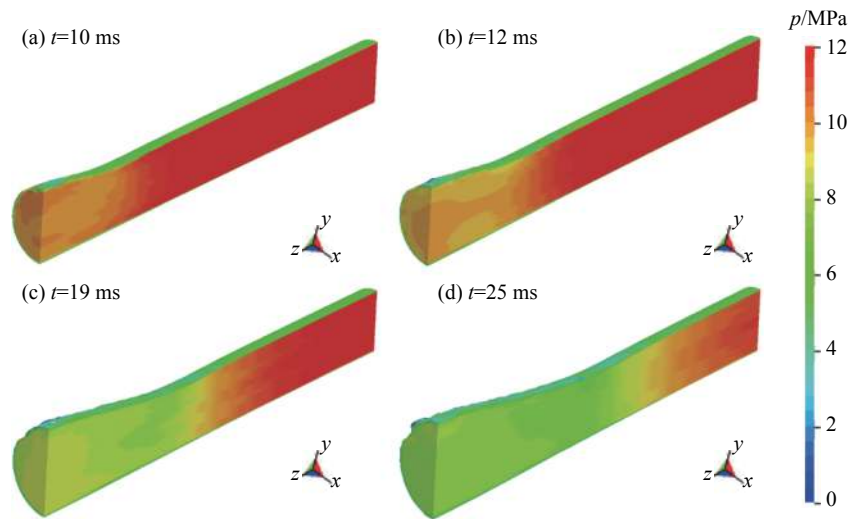


图 11 管内气体压力状态

Fig. 11 Pressure states of gas inside the pipeline

选取管壁上端裂纹边缘 3 个节点(1 401、81 780、81 784), 如图 14 所示。在后处理软件中, 读取其速度时程曲线和位移时程曲线, 如图 15 所示。由管壁中心截面计算结果来看, 管壁中心截面最终张开角度为 102°(裂纹尖端切线转动角度), 裂纹尖端位移距离超过 1 m, 管道下沉约 10 cm。由图 15 可以看出, 管道由速度矢量和曲线可以得到管壁裂缝边缘的最大运动速度达到 50 m/s, 相当于 180 km/h 的撞击。

图 16 为土中压力云图, 可以看出管道起裂阶段, 管道的变形对土体产生了强烈的挤压, 尤其在上端开裂部分, 土压力峰值主要分布于此区域。随着管壁裂口的逐渐扩大, 同时气体大量喷出所产生的反作用力导致管体下沉, 高应力区向管壁四周扩展。塑性波向外传播, 逐渐衰减为弹性波形成地面振动效应。因此结合第 1.3 节中试验结果分析, 可以初步判定管道爆炸引起的地面振动主要是由管壁开裂快速挤压土体造成的。

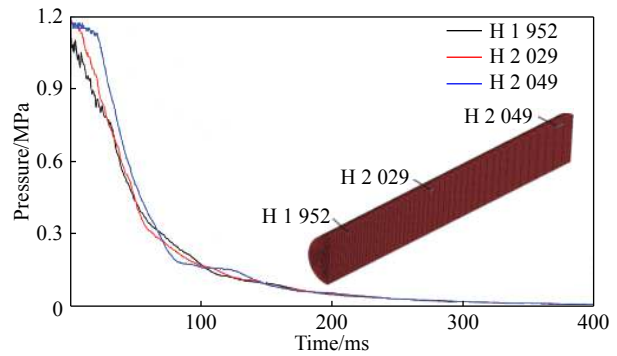


图 12 管内气体压力曲线

Fig. 12 Pressure curves of gas in pipe

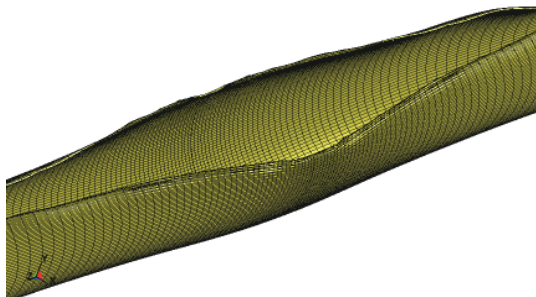


图 13 模拟结果和试验结果对比

Fig. 13 Comparison of simulation and experimental results

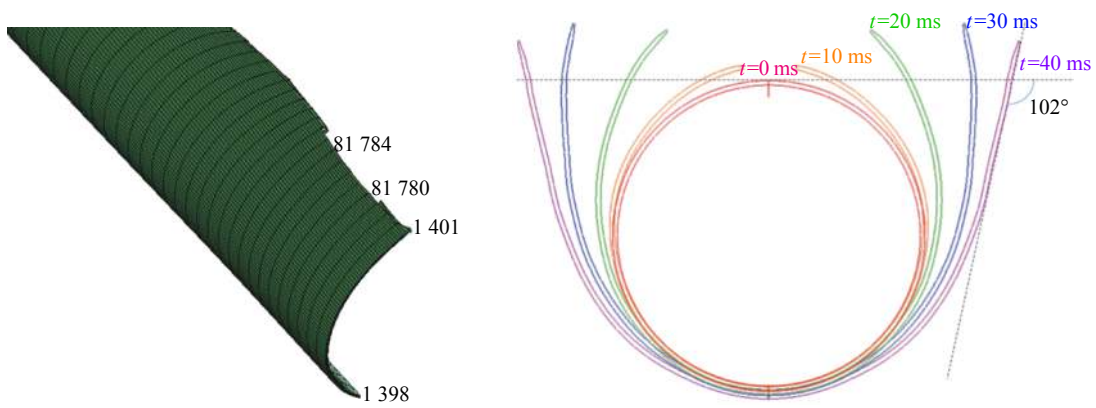


图 14 管壁开裂情况模拟结果

Fig. 14 Simulation results of pipe wall cracking

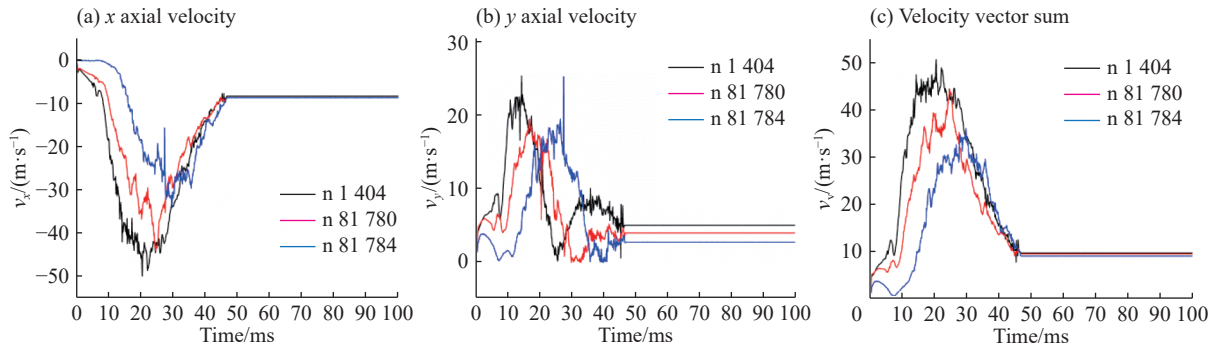


图 15 管壁开裂速度

Fig. 15 Cracking rate of pipe wall

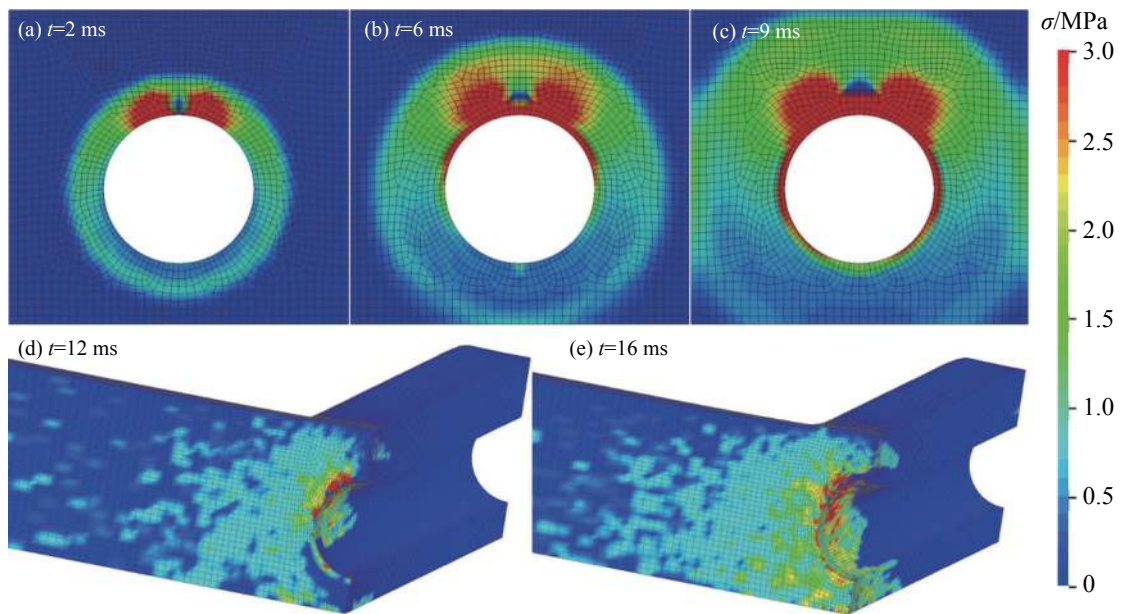


图 16 土中压力状态

Fig. 16 Pressure state in soil

从模拟结果可以看出,管道爆炸地面振动主要是由管壁快速挤压周围土体产生的。因此,这种振动应该在垂直于管道方向上较强,平行于管道方向上较弱。采用 HHT 算法分别对垂直测线上的测点 1# 的 3 个通道信号进行分析^[22-23]。得到其能量的时频分布以及瞬时能量谱,如图 17~19 所示。

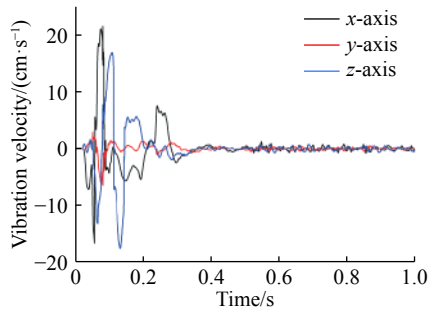


图 17 原始波形
Fig. 17 Original waveform

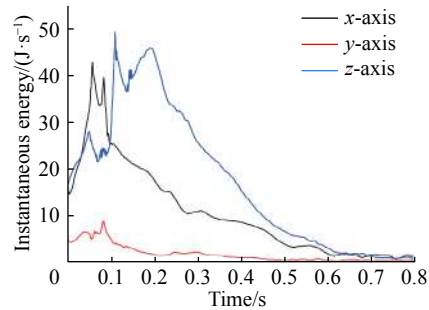


图 18 瞬时能量谱
Fig. 18 Instantaneous energy spectrum

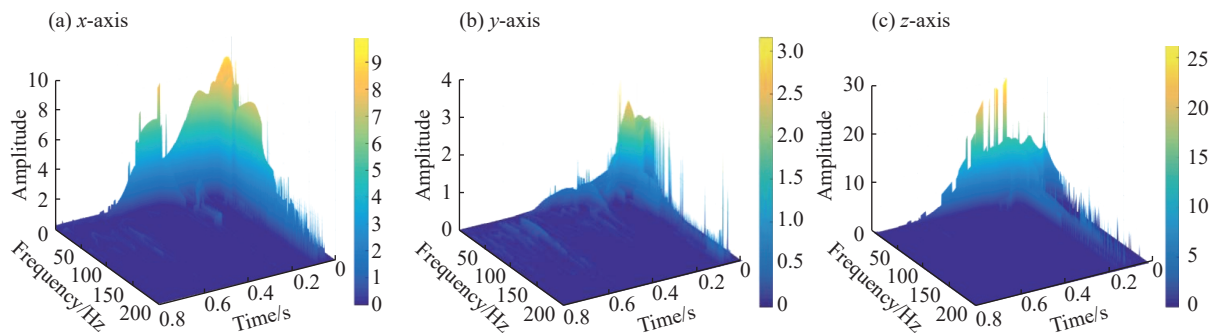


图 19 时频能量分布谱
Fig. 19 Time-frequency energy distribution spectrum

由能量时频谱可以看出,在 90°测线上,振动在垂直于管道方向(即 x 轴)以及铅垂方向(z 轴)上较为强烈。通过算法给出质点在各个平面内的运动位移,如图 20 所示。可以看出,质点在 xOy 平面内振动位移较大,因此管道附近建筑应着重加强其垂直于管道方向的抗震强度。同时从时频分布状态可以看出,管道爆炸振动信号的主频分布在 50 Hz 以下的频带内,振动初始阶段频率成分复杂,频带较宽。随着时间的推移,高频部分能量迅速衰减,只保留低频分量持续较长时间。此类主频低,时程长的振动激励极易造成结构共振,因此应着重防范^[24]。

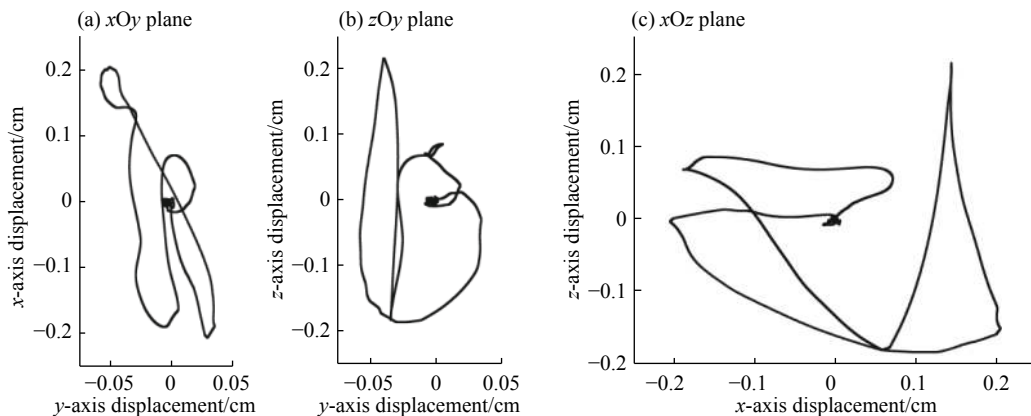


图 20 质点振动位移
Fig. 20 Particle vibration displacement

3 结 论

通过现场试验和数值模拟相结合的方式,对浅埋高压天然气管道爆炸产生的地面振动效应进行了研究。得到了适用于 OD1422 mm-12 MPa-X80 规格天然气管道的一些结论。

(1)埋地高压天然气管道爆炸造成的地面振动效应主要产生于第 1 阶段,即物理爆炸过程中。随后发生的天然气爆燃过程并未产生明显的地面振动效应。

(2)管道开裂是由于内部高压气体推动管壁向两侧扩展在裂纹尖端处形成了应力集中,管壁材料在此处率先失效断裂使得裂纹发生扩展。管道止裂是由于管内气体泄压速度大于裂纹扩展速度,气体压力不足以维持使管壁发生破坏的应力状态。

(3)管壁与土体的挤压作用主要发生在上侧管壁张开部分,同时在管道底部也有一定的挤压作用。管壁挤压土体的最大速度约为 50 m/s,挤压产生的塑性状态向远处传播逐渐衰减为弹性应力波,即形成了地面振动效应。

(4)管道爆炸引起的地面振动的质点运动方向主要分布在垂直于管道轴线的平面内,因此管道周边建筑应着重加强铅垂方向以及垂直于管道轴线的水平方向的抗震强度。

参考文献:

- [1] 王保群,林燕红,焦中良.我国天然气管道现状与发展方向[J].*国际石油经济*,2013,21(8):76-79;109-110. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7298.2013.08.012.
WANG Baoqun, LIN Yanhong, JIAO Zhongliang. Status and development direction of China's natural gas pipelines [J]. *International Petroleum Economics*, 2013, 21(8): 76-79; 109-110. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7298.2013.08.012.
- [2] 范照伟.全球天然气发展格局及我国天然气发展方向分析[J].*中国矿业*,2018,27(4):11-16;22.
FAN Zhaowei. Global natural gas development pattern and the analysis of development direction of natural gas in China [J]. *China Mining Magazine*, 2018, 27(4): 11-16; 22.
- [3] 党学博,李怀印.中亚天然气管道发展现状与特点分析[J].*油气储运*,2013,32(7):692-697.
DANG Xuebo, LI Huaiyin. Development and characteristics of central Asian natural gas pipelines [J]. *Oil and Gas Storage and Transportation*, 2013, 32(7): 692-697.
- [4] DONG Gang, XUE Lin, YANG Yun, et al. Evaluation of hazard range for the natural gas jet released from a high-pressure pipeline: a computational parametric study [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2010, 23(4): 522-530. DOI: 10.1016/j.jlp.2010.04.007.
- [5] LOWESMITH B J, HANKINSON G. Large scale experiments to study fires following the rupture of high pressure pipelines conveying natural gas and natural gas/hydrogen mixtures [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2013, 91(1): 101-111.
- [6] SKLAVOUNOS S, RIGAS F. Estimation of safety distances in the vicinity of fuel gas pipelines [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(1): 24-31. DOI: 10.1016/j.jlp.2005.05.002.
- [7] BARALDI D, KOTCHOURKO A, LELYAKIN A, et al. An inter-comparison exercise on CFD model capabilities to simulate hydrogen deflagrations in a tunnel [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(18): 7862-7872. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.06.055.
- [8] GALLEGO E, MIGOYA E, MARTIN-VALDEPENAS J M, et al. An intercomparison exercise on the capabilities of CFD models to predict distribution and mixing of H₂ in a closed vessel [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(13): 2235-2245. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.009.
- [9] SU Huayou. Analysis of characteristics of compound vibration and effects to surrounding gas pipeline caused by impact and explosion [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 26: 1835-1843. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2374.
- [10] YANG S, FANG Q, ZHANG Y, et al. An integrated quantitative hazard analysis method for natural gas jet release from

- underground gas storage caverns in salt rock. I: Models and validation [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(1): 74–81. DOI: 10.1016/j.jlp.2012.09.008.
- [11] 王德国. 基于管道爆炸数值模拟的架空天然气管道并行间距研究 [J]. *中国石油大学学报 (自然科学版)*, 2013, 37(5): 175–180. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2013.05.025.
- WANG Deguo. Safe distance of overhead parallel pipeline calculated by numerical simulation of gas pipeline explosion [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(5): 175–180. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2013.05.025.
- [12] 谌贵宇, 纪冲, 王棠昱, 等. 爆炸地震波作用下埋地油气管道动力响应研究 [J]. *天然气与石油*, 2015, 33(5): 1–5; 7. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2015.05.001.
- SHEN Guiyu, JI Chong, WANG Tangyu, et al. Research on dynamic response of buried oil and gas pipelines subjected to blasting seismic waves [J]. *Natural Gas and Oil*, 2015, 33(5): 1–5; 7. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2015.05.001.
- [13] 杜洋, 马利, 郑津洋, 等. 考虑流固耦合的管道爆炸后果预测与分析 [J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2017, 51(3): 429–435. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2017.03.001.
- DU Yang, MA Li, ZHENG Jinyang, et al. Consequences prediction and analysis of pipe explosion considering fluid-structure interaction [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2017, 51(3): 429–435. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2017.03.001.
- [14] 张振永, 张文伟, 周亚薇, 等. 中俄东线 OD 1422 mm 埋地管道的断裂控制设计 [J]. *油气储运*, 2017, 36(9): 1059–1064. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.09.013.
- ZHANG Zhenyong, ZHANG Wenwei, ZHOU Yawei, et al. The fracture control design of the OD 1422 mm buried pipeline in China-Russia eastern gas pipeline [J]. *Oil and Gas Storage and Transportation*, 2017, 36(9): 1059–1064. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.09.013.
- [15] 霍春勇, 李鹤, 张伟卫, 等. X80 钢级 1422 mm 大口径管道断裂控制技术 [J]. *天然气工业*, 2016, 36(6): 78–83. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2016.06.012.
- HUO Chunyong, LI He, ZHANG Weiwei, et al. Fracture control technology for the X80 large OD 1422 mm line pipes [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(6): 78–83. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2016.06.012.
- [16] MAHDAVI H, KENNY S, PHILLIPS R, et al. Influence of geotechnical loads on local buckling behavior of buried pipelines [C] // 7th International Pipeline Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2008: 543–551.
- [17] 李洪涛, 卢文波, 舒大强, 等. 爆破地震波的能量衰减规律研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(S1): 3364–3369.
- LI Hongtao, LU Wenbo, SHU Daqiang, et al. Study of energy attenuation law of blast-induced seismic wave [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(S1): 3364–3369.
- [18] 吕涛, 石永强, 黄诚, 等. 非线性回归法求解爆破振动速度衰减公式参数 [J]. *岩土力学*, 2007(9): 1871–1878. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2007.09.019.
- LV Tao, SHI Yongqiang, HUANG Cheng, et al. Study on attenuation parameters of blasting vibration by nonlinear regression analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007(9): 1871–1878. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2007.09.019.
- [19] 闫孔明, 刘飞成, 朱崇浩, 等. 地震作用下含倾斜软弱夹层斜坡场地的动力响应特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(11): 2686–2698.
- YAN Kongming, LIU Feicheng, ZHU Chonghao, et al. Dynamic responses of slopes with intercalated soft layers under seismic excitations [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(11): 2686–2698.
- [20] MAJKOWSKI A, KOŁODZIEJ M, RAK R J. Joint time-frequency and wavelet analysis an introduction [J]. *Metrology and Measurement Systems*, 2014, 21(4): 741–758. DOI: 10.2478/mms-2014-0054.
- [21] PRABHU K M M, SUNDARAM R S. Some results on fixed-point error analysis of Wigner-Ville distribution [J]. *Signal Processing*, 1996, 51(3): 235–240. DOI: 10.1016/0165-1684(96)00047-3.
- [22] SHI Xiuzhi, XUE Jianguang, CHEN Shouru. Two times time-frequency analysis of bilinear transformation of blasting

- vibration signal [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(12): 131–134; 185. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2008.12.005.
- [23] ZHONG Guosheng, FANG Yingguang, XU Guoyuan. Evaluation of blasting vibration effect of building structures based on wavelet transform [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(8): 121–124; 129; 182. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2008.08.038.
- [24] AHMED L, ANSELL A. Structural dynamic and stress wave models for the analysis of shotcrete on rock exposed to blasting [J]. *Engineering Structures*, 2012, 35: 11–17. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.10.008.

Prototypical experiment and numerical simulation of ground vibration resulting from explosion in shallowly buried gas pipelines

MA Huayuan¹, LONG Yuan¹, XIE Quanmin², SONG Ge³, ZHOU You⁴, YIN Qin¹

(1. *College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu China;*

2. *Ordnance NCO Academy, Army Engineering University of PLA, Wuhan 430075, Hubei, China;*

3. *No.31434 Troops of PLA, Shenyang 110045, Liaoning, China;*

4. *Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)*

Abstract: In this paper, we investigated the ground vibration effect caused by high pressure gas pipeline explosion using field experiment and numerical simulation. We found out about the magnitude range and attenuation mechanism of the ground vibration of high-pressure gas pipelines by conducting a full-scale explosion experiment of natural gas pipelines. According to the data analysis, the ground vibration caused by the explosion of the buried natural gas pipeline mainly occurred in the physical explosion process, and the subsequent natural gas deflagration process did not produce obvious ground vibration. Based on the LS-Dyna software, we established a high-pressure gas pipeline blasting experiment model, verified the rationality of the model parameter design by comparing the experimental results with the simulation results, and analyzed the process of the gas-pipe-wall-soil interaction, stress distribution and crack propagation in the pipeline explosion. We found that the pipe cracking was caused by the high-pressure gas pushing the pipe wall to the sides to form a stress concentration at the crack tip, that the pipe wall squeezed the soil at a peak speed of 50 m/s, and that the plastic state generated by the impact gradually attenuated to the elastic stress wave, forming the ground vibration effect. We also revealed the main causes of ground vibration by pipeline explosion. Our study can provide theoretical reference and technical support for the prevention of vibration-related accidents.

Keywords: pipeline explosion; ground vibration; attenuation mechanism; tube-soil action

(责任编辑 丁 峰)