

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0399

# 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\*

张玉琦<sup>1</sup>, 蒋楠<sup>1,2,3</sup>, 贾永胜<sup>2,3</sup>, 周传波<sup>1</sup>, 罗学东<sup>1</sup>, 吴廷尧<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 江汉大学工程爆破湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430024;

3. 武汉爆破有限公司, 湖北 武汉 430024)

**摘要:** 为研究爆破地震荷载作用下埋地高密度聚乙烯 (high-density polyethylene, HDPE) 波纹管的动力响应规律, 通过现场预埋管道的爆破试验, 结合爆破地震与动态应变等测试手段, 分析了爆破地震荷载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的分布特征, 基于 von Mises 屈服准则分析评价了管道安全性, 提出了爆破振动速度控制标准。试验研究结果表明: 试验中管道与地表振速以及管道动态应变随爆心距的减少, 随炸药量的增加而增大; 爆破地震波振动主频高, 管道振动主频高于地表; 相同爆破工况条件下, 管道上方地表振速普遍大于管道振速; 管道截面背爆侧峰值轴向应变以拉应变为主, 迎爆侧峰值环向应变以压应变为主; 本试验管道安全控制振速可取 20 cm/s, 此时管道处于安全状态。

**关键词:** 爆破地震; HDPE 波纹管; 现场试验; 响应特征; 安全控制

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Experimental study on dynamic response of high-density polyethylene bellows under blasting seismic load

ZHANG Yuqi<sup>1</sup>, JIANG Nan<sup>1,2,3</sup>, JIA Yongsheng<sup>2,3</sup>, ZHOU Chuanbo<sup>1</sup>, LUO Xuedong<sup>1</sup>, WU Tingyao<sup>1</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Hubei Key Laboratory of Engineering Blasting, Jiangnan University, Wuhan, 430024, Hubei, China;

3. Wuhan Explosion & Blasting Co., Ltd, Wuhan, 430023, Hubei, China)

**Abstract:** The dynamic response of buried high density polyethylene (HDPE) bellows under blasting seismic load was studied. First, the blasting test of buried pipeline was carried out by combining the blasting seismic test and dynamic strain test. Secondly, the dynamic response characteristics of buried pipeline under blasting seismic load were analyzed. Then, the characteristics of vibration velocity and dynamic strain distribution were studied. Finally, the pipe safety was evaluated based on the von Mises yield criterion, and the blasting vibration velocity control standard was proposed. The experimental results show that the vibration velocity of pipeline and ground and the dynamic strain of pipeline increase with the decrease of core distance and the increase of explosive quantity. The dominant frequency of blasting seismic wave is higher. The dominant frequency of pipeline is higher than the surface. Under the same blasting condition, the ground vibration velocity above the pipeline is generally higher than that of the pipeline. The peak axial strain on the back explosion side of the pipeline section is mainly tensile strain, and the peak circumferential strain on the front explosion side is mainly compressive strain. The vibration

\* 收稿日期: 2019-10-18; 修回日期: 2020-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(41807265、41972286); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CUGQY1931)

第一作者: 张玉琦(1995—), 男, 硕士研究生, yuqiz@cug.edu.cn

通信作者: 蒋楠(1986—), 男, 博士, 副教授, happyjohn@foxmail.com

velocity of the pipeline can be safely controlled by  $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , and the pipeline is in a safe state.

**Keywords:** blasting earthquake; HDPE bellows; field test; response characteristics; safety control

近年来,随着城市基础设施建设不断推进,埋地管道工程交错纵横、环境复杂多变。高密度聚乙烯(high-density polyethylene, HDPE)材料由于强度高、耐高温、抗腐蚀、无毒、耐磨,且成本相对于普通铁管、钢管等较低,被广泛应用于地下管道燃气运输与给排水工程中。与此同时,城市交通发展迅速,地铁等地下工程建设大量兴起,这些工程常与既有地下管道并行、交叉、跨越。地下工程的开挖过程中常遇到岩硬岩石,爆破作为高效开挖的方式得到了大量应用,但爆破施工中常会对临近管线造成影响。为此,研究爆破荷载作用下埋地 HDPE 管道的动力响应,分析得到管道的控制振速,具有工程实际意义及理论研究价值。

当前,对于爆破振动荷载对邻近管道的影响,大量学者已开展了相关研究工作<sup>[1-4]</sup>。采用室内试验的方法研究管道变形特征方面,Ha 等<sup>[5]</sup>利用离心机试验研究 HDPE 管道变形规律,并结合应力应变数据得到管道横向力和变形关系。Abdoun 等<sup>[6]</sup>利用离心机试验研究了 HDPE 管道不同埋深和管径的受力性能。王海涛等<sup>[7]</sup>开展室内相似模型试验,研究地铁隧道钻爆法施工时岩体和邻近埋地管道的振动特性及管道动力响应规律。此外,还有大量学者利用数值模拟的方法来研究埋地管道的动力响应<sup>[8-10]</sup>。Francini 等<sup>[11]</sup>利用爆破数值计算研究邻近埋地管道以及其上方地表的振动规律,提出了相应的安全判据。Jiang 等<sup>[12]</sup>利用北京地铁 16 号线现场监测数据,通过 LS-DYNA 建立 3D 数值模型,分析了地铁隧道爆破的影响,研究了管道及周围土体的动力响应特征。张震等<sup>[13]</sup>通过现场检测,利用 LS-DYNA 建立数值模型,研究了浅埋爆破振动作用下埋地混凝土管道截面不同位置的振动速度。目前,关于爆破振动条件下邻近预埋管道动力响应的研究,多采用数值软件与室内模型试验,进行现场全尺度试验的研究较少。然而数值模型和室内模型试验处理管道内部条件及周围外部环境较为简单,这使得与工程实际情况相比差别较大,且研究对象大多是对铸铁、混凝土等质地坚硬的管道,对 HDPE 波纹管这种应用广泛但质地较软的管道的研究却较少。

本文以武汉市城区典型土层埋置的给排水管道系统为工程依托,通过爆破振动荷载作用下埋地 HDPE 波纹管响应特征的现场足尺度试验,结合爆破振动与动态应变等测试手段,分析爆破振动荷载作用下埋地 HDPE 波纹管的动力响应特征,通过理论计算探究 HDPE 波纹管爆破振动安全控制标准。

## 1 现场爆破试验方案

目前,武汉市因为 HDPE 管道的诸多优点,对 HDPE 波纹管在给排水系统进行了广泛应用。本试验以在建的武汉地铁 8 号线洪小区间竖井基坑爆破工程为背景,邻近基坑为中科院武汉岩土所新建高层建筑,该建筑排水管道利用 HDPE 波纹管,直径 500 mm,埋置深度 1.5 m,埋置土层为粉质黏土,管道与基坑直线距离 15 m,基坑爆破工程最大单段药量约为 9.6 kg。根据上述工程特点,选取了武汉爆破公司位于武汉市经济技术开发区处的试验场地。结合武汉市地区岩土勘察资料,试验场地上部为 4~5 m 的粉质黏土层,下部为 8~10 m 的强风化粉质砂岩,场地在试验所需深度范围内无地下水,符合爆破试验要求<sup>[14]</sup>。

### 1.1 试验目的与模型参数

试验目的在于探究不同药量、不同爆心距下爆破振动作用下埋地 HDPE 波纹管的响应特征,即最大段装药量、测点距离、爆破振动振速、管道应变四者之间的关系。试验确定条件:爆破区域地质环境条件、管道类型、管道埋深及最大容许应变等。变化条件:药包药量、管道与爆区中心的距离等。根据武汉市地区地层地质勘察资料与工程实际<sup>[15-18]</sup>,武汉市的埋地 HDPE 波纹管多埋置于粉质黏土地层,直径为 100~2 600 mm 不等。受土动力学参数影响,与岩石介质相比,地震波在粉质黏土内传播差异很大。故研究该地层中埋地给排水用 HDPE 管道的受爆破振动作用下响应特征,对类似工程邻近 HDPE 管道的安全性评估具有指导意义。因此试验场地应选取为粉质黏土层,管道埋深(管顶至地面)

为 2.0 m。HDPE 波纹管尺寸为: 外径  $D=88$  cm, 内径  $d=80$  cm, 壁厚 1 cm, 波高 3 cm, 波峰宽 5 cm, 波峰间距 3 cm, 管道尺寸如图 1 所示; 泊松比  $\mu=0.46$ ; 密度  $\rho=936$  kg/m<sup>3</sup>, 杨氏模量  $E=834.9$  MPa, 环刚度  $E_h=8$  Pa, 强度极限  $\sigma_u=31.6$  MPa, 延伸率  $\xi=1.16$ 。开挖沟槽尺寸为: 长 6.0 m、宽 1.0 m、深 3.0 m; 炸药采用 2#岩石乳化炸药, 炮孔直径为 90 mm, 药卷直径 70 mm。

由于实际工程中, 管道结构具有弯道等结构, 但直管段为主要部分, 且由于管道的连接多采用弹性密封圈来连接, 强度按要要求要大于管身, 故本试验主要通过研究管段中以及管段周围岩土层中布置相应的动态测试仪器。因为本试验预埋管道轴向长度为 6 m, 且埋置土层为典型粉质黏土层, 故其约束条件可以看作与实际工程相似。由于试验属一期试验, 仅对无压空管状态施加不同的爆破振动荷载, 对于有压管道, 将在二期试验时对管道两端密闭并施加不同水位压力, 以期研究给排水系统中 HDPE 管道运行时所受爆破振动荷载的动力响应问题。

各试验工况具体用量与炸药埋深等参数如表 1 所示。现场试验整体布局如图 2 所示, 图中 1~9 为工况号。

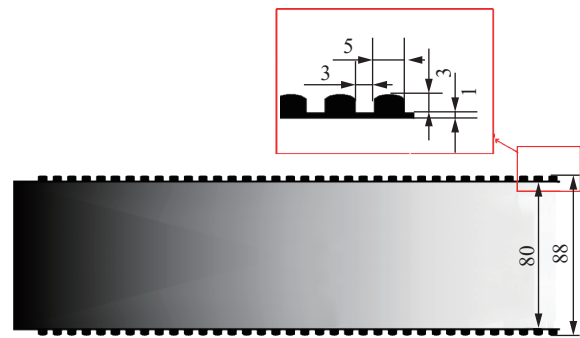


图 1 管道尺寸示意(cm)

Fig. 1 Pipe size diagram (cm)

表 1 工况参数

Table 1 Working condition parameter

工况	炸药埋深/m	炸药量/kg	水平距离/m
1	6.5	8	25
2	6.5	8	20
3	6.5	8	15
4	6.5	8	10
5	4	8	25
6	4	8	20
7	4	8	15
8	4	8 <td 10	
9	4	9.6	5

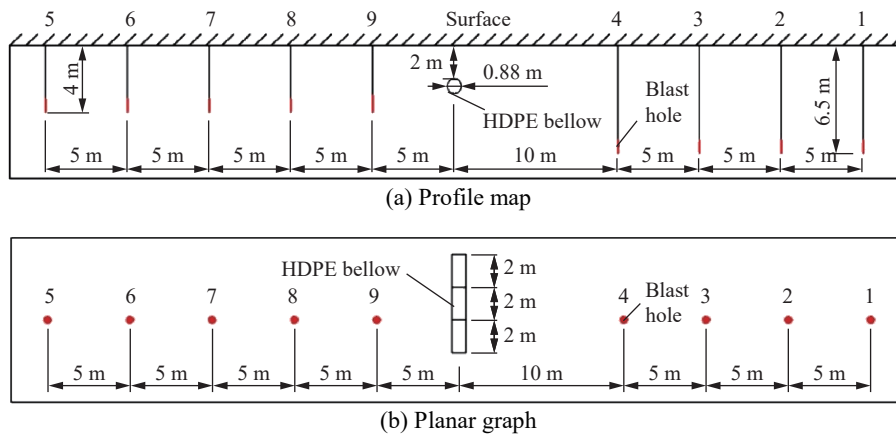


图 2 现场试验示意图

Fig. 2 Field test diagram

### 1.2 试验测试系统

根据试验设计方案, 为研究 HDPE 波纹管爆破振动效应的响应特征规律, 利用动态测试仪器对管段中以及管段周围岩土层进行测量, 通过在爆破试验时对相关数据进行实时动态量测。试验所测数据包括: 管道轴向动应变( $\epsilon_a$ )与环向动应变( $\epsilon_h$ )、管体振速( $v_p$ )、管道上方地表振速( $v_g$ )。

为研究埋地管道与管道上方地表的振动速度, 振动速度测试系选用 TC-4850 爆破测振仪。

根据既定的试验方案, 在管道内部布置监测截面, 并在管道对应的正上方地表布置多个振动速度测

点,其振动速度测试点  $D_1 \sim D_7$  的位置如图3所示。其中截面  $A$ 、 $B$  为管道三等分点截面,即管口截面与截面  $A$ 、 $B$  之间距离为2 m。

为研究管道在爆破振动过程中的动应变,考虑土体影响,选择在管道内表面,沿管道轴向和环向粘贴应变片进行测量。实验应变利用 DH5956 系统采集,采集频率设置为 20 000 Hz。参考振动测点,管道动应变截面测点布置如图4所示,其中在两个监测断面上,沿着管道截面共布置6个测点( $P_1, P_2, \dots, P_6$ ),并在环向和轴向各布置5个应变片。

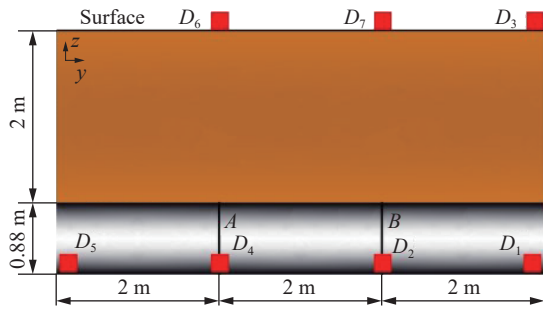


图3 振动速度测点示意图

Fig. 3 Vibration velocity measuring point diagram

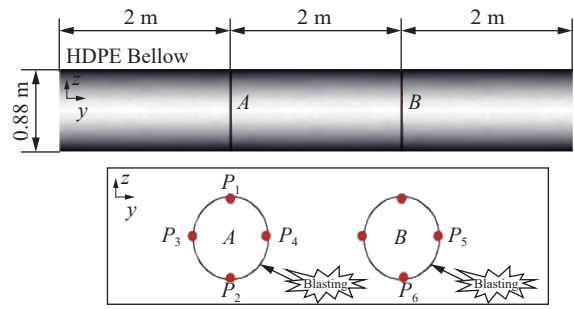


图4 动应变测点示意图

Fig. 4 Dynamic strain measurement point diagram

### 1.3 试验步骤

根据试验方案,试验步骤如下,试验流程如图5所示。



图5 爆破实验方案设计流程

Fig. 5 Blasting experiment plan design flow

(1) 试验前对按照预先设计选定的试验场地进行平整, 对土层进行密实度测试, 然后在预留场地利用小型挖掘机和人工开挖宽约 1.0 m、深约 3.0 m 的沟槽。按照前文提到的炮孔设计, 利用液压钻机进行炮孔钻凿。

(2) 按照预先设计测点布设方案, 管道内部安好三矢量振动速度传感器, 利用 502 胶水粘好应变片, 将连接线接头拉至管道外。

(3) 将布好测试仪器的管道放置于沟槽内, 按照设计的分层回填高度进行填土回填。各层回填时进行夯实, 夯实后再利用密实度检测仪测定密实度。为保证管道土体接触紧密不松动, 控制密实度在 90% 以上。逐层回填使沟槽内土体高度与地表高度相同。回填后, 在监测截面正上方地表安装好振动速度传感器。

(4) 将接收仪器与预留外露的连接线连接, 放在安全范围内并进行覆盖保护。

(5) 按照试验方案设计的炸药量, 进行炸药的装填与堵塞, 连接电子雷管与起爆器。检查现场, 逐个引爆炮孔内炸药, 引爆时间间隔为 30 min。

(6) 每个炮孔爆破结束时仪器自动进行应变、振速等数据的采集。每个炮孔起爆前检查前一次爆破效果并调试仪器状态。

## 2 试验结果分析

### 2.1 振动测试结果

根据前文所述试验方案, 得到 9 种工况下爆破振动试验数据, 为研究地表振动速度衰减规律模型, 将地表三个测点 9 次工况下的结果列出, 如表 2 所示。据表 2 中统计结果可以看出, 管体与地表振动速度峰值  $v_g$ 、 $v_p$  随着药量的增大而增大, 随着距离的增大而减小, 符合爆破振动波衰减规律。

表 2 地表合振动速度峰值

Table 2 Resultant peak velocity at surface

工况	测点 $D_6$ 速度/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	测点 $D_7$ 速度/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	测点 $D_3$ 速度/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1	4.44	5.80	4.92
2	3.60	4.71	3.67
3	7.85	8.87	7.58
4	11.37	12.54	8.89
5	4.86	3.69	3.05
6	4.74	3.73	3.01
7	7.41	7.38	4.34
8	15.20	16.54	11.61
9	28.06	32.71	15.30

由于实际工程中管道位于地表以下, 不能直接测到管道内部质点振动速度, 所以选取其管道正上方地表为测点进行监测。为了直观地观察管道与地表振速变化规律, 根据结果, 本试验管道振动监测点  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_4$  以及地表测点  $D_3$ 、 $D_7$ 、 $D_6$  峰值合振动速度变化关系如图 6 所示。

需要说明: 由于仪器原因, 测点  $D_5$  未测到数据, 但爆破地震波具有对称性, 由于测点  $D_4$  与爆源组成的平面与管道轴线垂直, 因此测点  $D_5$  处峰值振速与  $D_2$  基本一致。

由图 6 可知, 同一工况条件下, 地表振速一般大于管道内部振速, 管道及其正上方地表测点振速随着爆心距离的减小而不断增大。当爆源距离管道 5 m、炸药量 9.6 kg 时, 爆破地震波能量达到最大, 各监测点的振动速度达到最大值。

为进一步了解本爆破试验中地震波的传播特性, 全面地分析试验管道本身的动态响应特征, 现根据现场监测的振动数据, 将  $D_2$ 、 $D_7$  两个截面上 9 种不同工况下  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的主频率进行统计, 如图 7 所

示。其中,根据统计结果, $x$ 方向主频更低, $z$ 方向更大。结合两个测点的整体比较,管道内部质点主频明显大于上方地表。根据主频统计结果,试验测得的主频最小值为 10.738 Hz,最大值为 166.67 Hz。试验所测主频多集中在 10~50 Hz 之间,爆破地震波频率多在高频段,而管道固有频率低于 10 Hz,因此爆破地震波使管道结构产生共振几率较小,管道此时是处于安全状态的。

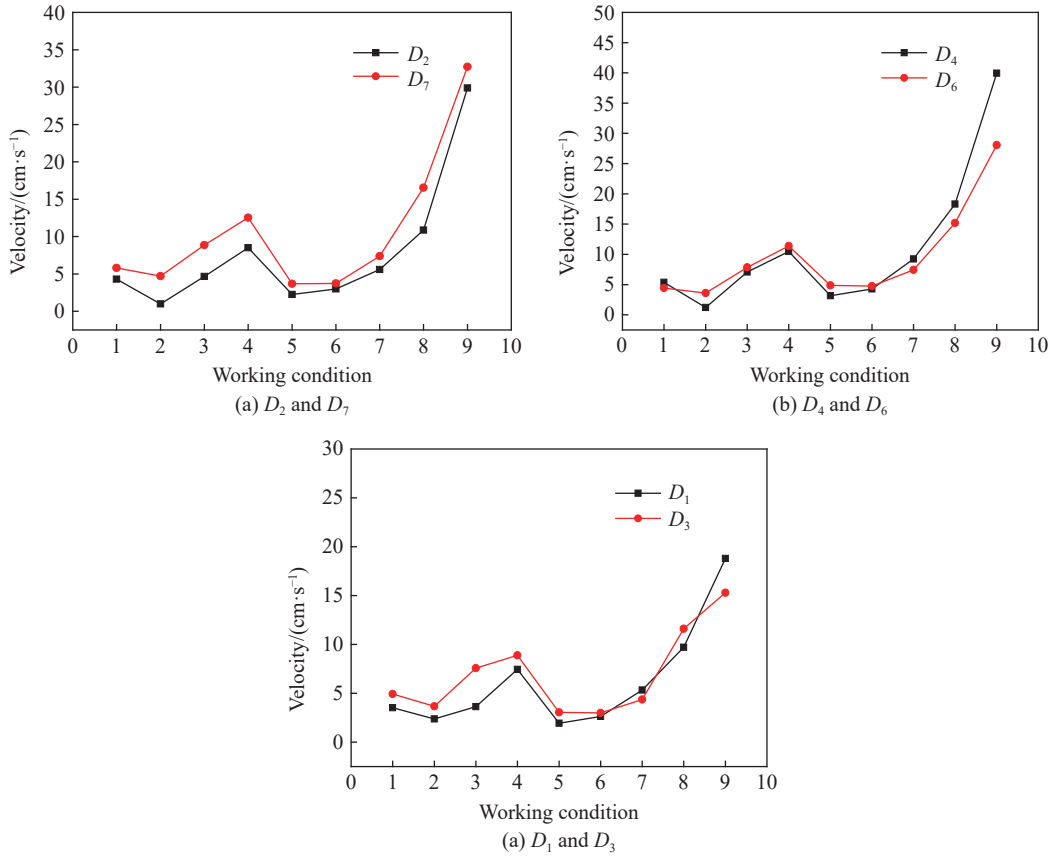


图6 测点峰值振速

Fig. 6 Peak particle velocities

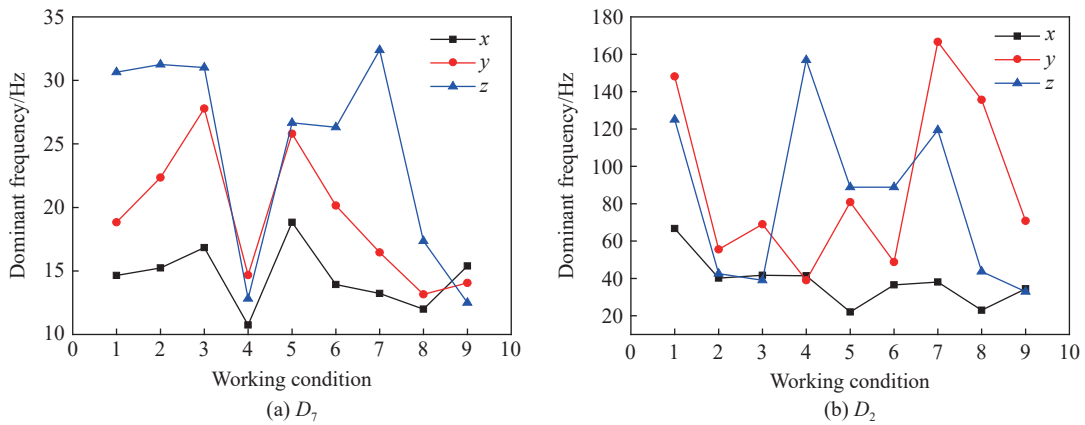


图7 主频率分布

Fig. 7 Dominant frequency distribution

## 2.2 动应变测试结果

由于爆破试验过程中应变数据的测量会受到外界因素的干扰,所测得数据噪声过大,根据测试系统

所测的实验数据, 利用 MATLAB 处理实验所测动态应变数据, 得到平滑的应变曲线<sup>[14]</sup>。将数据输出, 并对 9 种工况爆破实验的峰值应变数据进行分析。根据前文可知, 截面 A 受爆破振动作用响应最大, 故将该截面作为动应变的主要研究对象。将通过去噪处理的截面 A 上 4 个测点的数据进行统计, 得到 9 种工况下的轴向与环向应变峰值数据如图 8 所示。

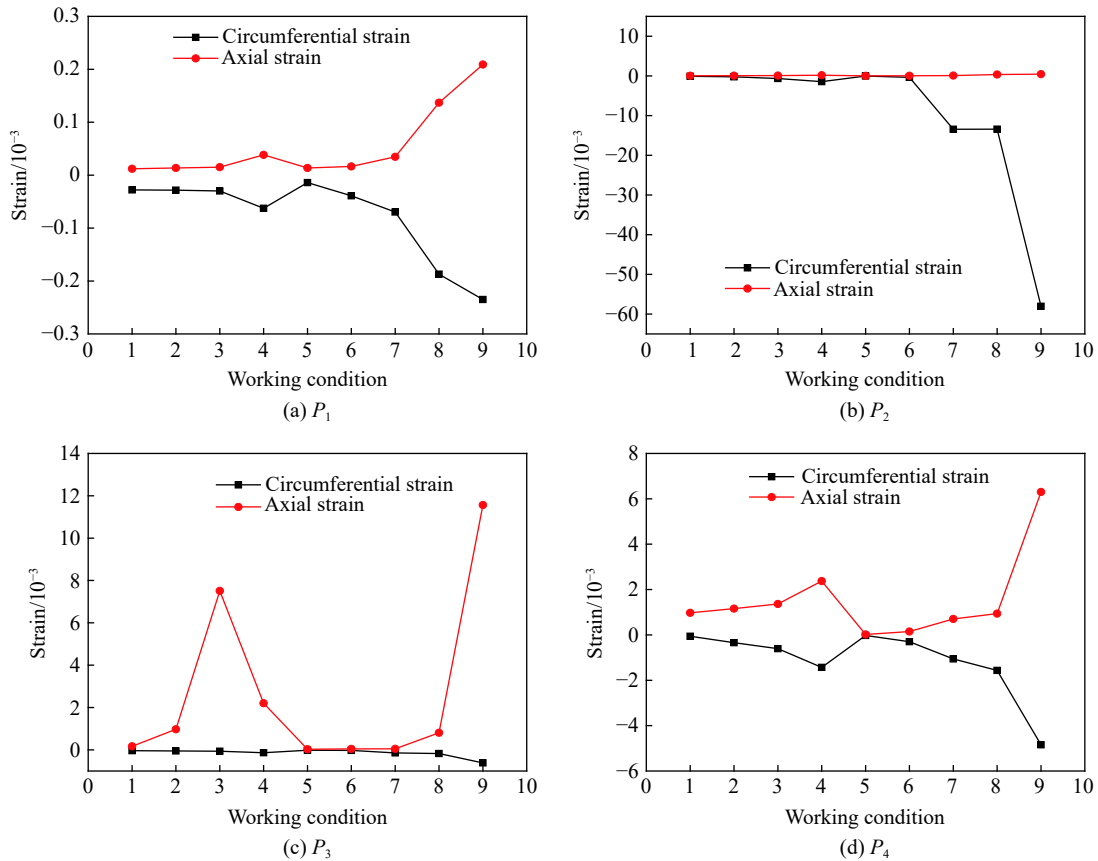


图 8 截面 A 各测点峰值应变  
Fig. 8 Peak strain at each measuring point of section A

根据图中结果可知, 管道危险截面上各测点的动应变峰值均呈现出随爆心距的减小、炸药量的增加而增大的规律。且在工况 9 时, 该管道各监测点的应变数据达到最大值, 与振动速度测试结果一致。由图可知, 管道迎爆侧轴向峰值应变以拉应变为主, 环向峰值应变以压应变为主; 背爆侧轴向峰值应变以拉应变为主, 轴向拉应变最大值出现在背爆侧 P<sub>3</sub> 处, 为 1.16×10<sup>-4</sup>。管道迎爆侧环向压应变最大值出现在迎爆侧 P<sub>2</sub> 处, 为 5.8×10<sup>-2</sup>, 为 HDPE 管道最危险点。结合本试验研究 HDPE 波纹管的相关物理力学性质, 其抗拉强度大于抗压强度, 参考 HDPE 波纹管破坏特征可知, 在爆破地震荷载作用下, 本试验管道更易受到环向压应力过大而受到破坏<sup>[19-20]</sup>。

### 3 管道峰值应变函数表达

#### 3.1 管道与地表峰值合振速的拟合分析

为找到爆破振动条件下, 管道与其正上方地表合振速的关系, 将同一截面上管道和地表峰值合振速进行线性拟合, 结果如图 9 所示。可以看出, 管道与地表相应测点的峰值合振速有较高的线性相关性, 拟合度为 0.96, 线性关系式为

$$v_g = 1.04v_p + 2.59 \text{ cm/s} \tag{1}$$

### 3.2 管道合振速峰值与动应变函数关系

为表示管道峰值合振速与环向动应变、轴向动应变的函数关系,将前文所述危险截面 A 迎爆侧测点 2 的轴向应变峰值与环向应变峰值分别与管道合振速峰值进行拟合,结果如图 10 所示。根据图中拟合的直线可知,管道合振速峰值与峰值应变具有明显的线性相关关系,拟合关系式为:

$$\varepsilon_a = 1.6 \times 10^{-5} v_p / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}) + 1.9 \times 10^{-5} \quad (2)$$

$$\varepsilon_h = 2 \times 10^{-3} v_p / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}) - 6 \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_a$  为轴向应变峰值,  $\varepsilon_h$  为环向应变峰值。

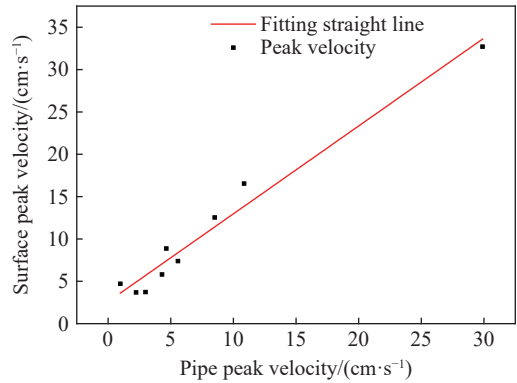


图 9 管道与地表振速拟合直线

Fig. 9 Pipeline and surface vibration fit curve

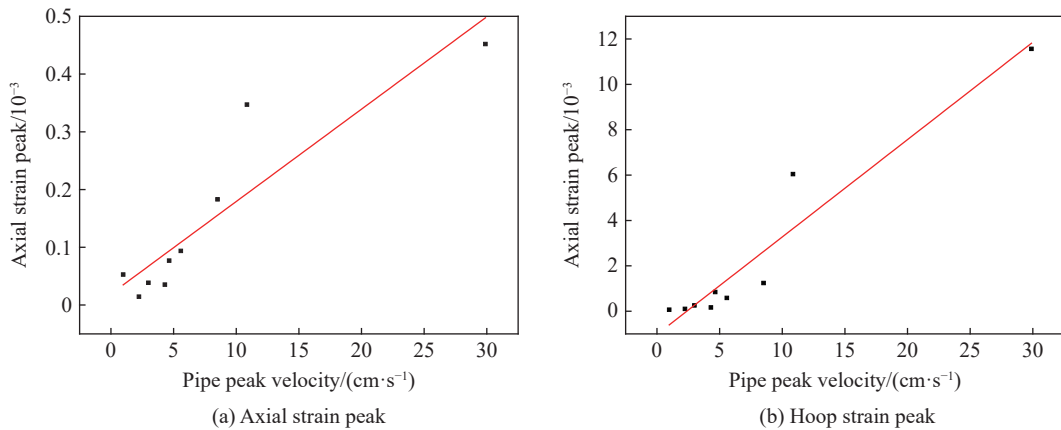


图 10 管道振速与轴向、环向应变拟合直线

Fig. 10 Straight line fitting of pipe vibration velocity with axial and circumferential strain

## 4 埋地 HDPE 波纹管受震害影响安全评估

本次试验所采用的管道为给水 HDPE 波纹管,根据前文所述试验结果,环向动应变要远大于轴向动应变,管道更易在环向发生破坏。而最大环向允许应变可根据文献 [21] 中的条目 4.4.6 来确定,即聚乙烯管道在组合作用下,最大竖向变形的计算应满足:

$$\omega_{d,\max} \leq 0.05 D_0 \quad (4)$$

式中:  $\omega_{d,\max}$  为聚乙烯管道在组合作用下最大竖向变形,  $D_0$  为管道计算直径。则环向最大允许压缩与拉伸应变均为 5%。

与其他材质管道相比,HDPE 管道容许应变更大,但根据前文所提到管道强度极限仅为  $\sigma_u = 31.6 \text{ MPa}$ ,即当管道达到允许应变时应力已经超出强度极限,故单用应变来判断管道安全状态是不合理的。

考虑到 HDPE 管道的破坏形式以屈服失效为主,采用 Von Mises 屈服准则判别 HDPE 管的失效行为。根据 Mises 屈服准则, Mises 等效应力  $\sigma_{eq}$  应不超过屈服应力  $\sigma_y$ , 即<sup>[22]</sup>:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \leq \sigma_y \quad (5)$$

式中:  $\sigma_{eq}$  为 Mises 等效应力,  $\sigma_1$  为第一主应力,  $\sigma_2$  为第二主应力,  $\sigma_3$  第三主应力,  $\sigma_y$  为屈服应力。

HDPE 管材的屈服应力和应变率的关系满足 Eyring 方程<sup>[23]</sup>, 即屈服应力与对数应变率满足:

$$\sigma_y = 30.195 + 1.246 \ln(\dot{\varepsilon} / \text{s}^{-1}) \quad (6)$$



式中:  $\dot{\varepsilon}$  为应变率。

根据前文提到的危险截面 A 迎爆侧测点 2 处各工况条件下的环向应变与轴向应变进行一次微分, 得到应变率最大值为  $0.21 \text{ s}^{-1}$ , 代入式 (6) 得到屈服应力  $\sigma_y=28.25 \text{ MPa}$ 。

根据材料力学定义, 壁厚与外径之比小于 1 : 20 为薄壁圆筒, 该管道壁厚与外径之比为 1 : 88, 因此该管道所处应力状态可以视为薄壁圆筒问题来处理, 且管道无压力, 则管道上的 3 个主应力中, 径向应力  $\sigma_r$  很小可忽略不计, 另外两个主应力分别为环向应力  $\sigma_h$ 、轴向应力  $\sigma_a$ 。根据前文所述试验测试结果, 管道环向应力普遍大于轴向应力, 则第一主应力应为环向应力  $\sigma_h$ 、第二主应力为轴向应力  $\sigma_a$ , 第三主应力为径向应力  $\sigma_r$ 。其中各应力示意如图 11 所示。

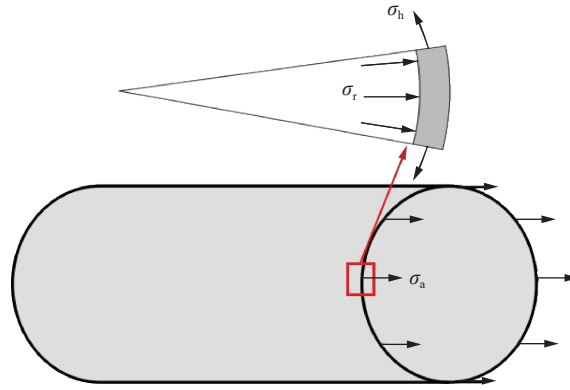


图 11 管道应力方向示意图

Fig. 11 Schematic diagram of pipeline stress direction

因为在试验过程中, 管道未发生塑性变形, 故可认为管道处于弹性变形阶段, 由胡克定律, 得到主应力方程:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_h = E\varepsilon_h \\ \sigma_2 = \sigma_a = E\varepsilon_a \\ \sigma_3 = \sigma_r = 0 \end{cases} \quad (7)$$

将式 (2)~(3) 代入式 (7), 再将所得主应力结果代入式 (5), 得到管道振动速度与屈服应力的表达式:

$$\sigma_{eq} = E \sqrt{(3.97v_p^2 - 23.9v_p + 36) \times 10^{-6}} \leq \sigma_y \quad (8)$$

将  $\sigma_y=28.25 \text{ MPa}$  代入解得  $v_p=20 \text{ cm/s}$ 。

考虑因为现场实际爆破工程施工时, 管道位于地表以下, 无法直接进行监测, 根据前文提到管道振速  $v_p$  与地表振速  $v_g$  具有线性相关关系, 由式 (1) 得到  $v_g=23.39 \text{ cm/s}$ 。

需要说明的是: (1) 计算假设土壤为线弹性均质, 且爆破地震波作用时管土无相对滑动, 管材为非线性黏弹性且满足各向同性; (2) 本计算结果未考虑埋置土层的深度、含水率等因素的影响; (3) 计算对象为直埋管道管身处, 未考虑接口、弯道等, 因为按照规范要求, 接口、弯道等薄弱环节通过法兰、套筒、热熔等处理方式, 使其强度要大于管身部分, 故以管身作为研究主体计算其控制振速是合理的; (4) 区别于其他材质的管道, HDPE 波纹管由于其良好的性能, 计算所得控制振速要大于钢管、球墨铸铁管、混凝土管道的控制振速。

参考日本供水协会 (Japan Water Work Association) 1996 年 2 月关于 1995 年 1 月 17 日在阪神发生的里氏 7.2 级大地震 (按照 1999 年国家地震局所修订的中国地震烈度表, 里氏 7.2 级地震、峰值速度约为  $1 \text{ m/s}$ ) 的报告可知, 阪神大地震中供水管道的破坏及其评估在 3 个受灾城市 (神户、西宫、Ashiya) 中, PE 管道相较于其他材质的管道来说破坏率最低, 为 0%<sup>[24]</sup>。综合上述案例表明, 实际工程中 HDPE 管抗震性能较好, 本试验研究结果表明 HDPE 管道安全控制振动速度基本可靠。

## 5 结 论

通过现场全尺度试验,结合理论分析,研究了爆破地震荷载对 HDPE 波纹管的影响,主要结论如下:

(1)测点振速随炸药量增加、爆心距减少而增大,且大部分测点管道内部振速小于地表振速,且管道内部测点振动频率大于上方地表振动频率,爆破振动主频率主要集中在 10~50 Hz,但低于自然地震频率和管道固有频率;

(2)管道截面峰值应变背爆侧轴向峰值应变以拉应变为主,迎爆侧环向峰值应变以压应变为主。

(3)通过数据拟合,管道与地表相应测点的峰值合振速有较高的线性相关性,且管道同截面轴向应变峰值、环向应变峰值分别与管道合振速峰值线性相关;

(4)基于试验结果及相关规范,对埋地 HDPE 波纹管进行受震害影响安全评估,计算得其爆破振动控制速度应为 20 cm/s,地表控制速度为 23.39 cm/s,对受爆破影响埋地 HDPE 波纹管线的抗震能力分析和安全防护提供了重要参考依据。

感谢武汉爆破有限公司谢先启院士及其团队相关领导姚颖康、刘昌邦、黄小武、钱坤、王威、岳端阳等对本实验给予的大力支持。

### 参考文献:

- [1] 王栋,何历超,王凯. 钻爆法施工对邻近埋地管道影响的现场实测与数值模拟分析 [J]. *土木工程学报*, 2017, 50(S2): 134-140. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2017.s2.021.  
WANG D, HE L C, WANG K. Field measurement and numerical simulation analysis for influence of blasting excavation on adjacent buried pipelines [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(S2): 134-140. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2017.s2.021.
- [2] GIANNAROS E, KOTZAKOLIOS T, KOSTOPOULOS V. Blast response of composite pipeline structure using finite element techniques [J]. *Journal of Composite Materials*, 2016, 50(25): 3459-3476. DOI: 10.1177/0021998315618768.
- [3] WON J H, KIM M K, KIM G, et al. Blast-induced dynamic response on the interface of a multilayered pipeline [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2014, 10(1): 80-92. DOI: 10.1080/15732479.2012.699532.
- [4] 夏宇馨,蒋楠,姚颖康,等. 粉质黏土层预埋穿插式混凝土管道对爆破振动的动力响应 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(4): 043302. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0207.  
XIA Y Q, JIANG N, YAO Y K, et al. Dynamic responses of a concrete pipeline with bell-and-spigot joints buried in a silty clay layer to blasting seismic waves [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(4): 043302. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0207.
- [5] HA D, ABDOUN T H, O'ROURKE M J, et al. Centrifuge modeling of earthquake effects on buried high-density polyethylene (HDPE) pipelines crossing fault zones [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(10): 1501-1515. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:10(1501).
- [6] ABDOUN T H, HA D, O'ROURKE M J, et al. Factors influencing the behavior of buried pipelines subjected to earthquake faulting [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(3): 415-427. DOI: 10.1016/j.soildyn.2008.04.006.
- [7] 王海涛,金慧,贾金青,等. 地铁隧道钻爆法施工对邻近埋地管道影响的模型试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S1): 3332-3339. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1409.  
WANG H T, JIN H, JIA J Q, et al. Model test study on the influence of subway tunnel drilling and blasting method on adjacent buried pipeline [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S1): 3332-3339. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1409.
- [8] ZHANG J, ZHANG L, LIANG Z. Buckling failure of a buried pipeline subjected to ground explosions [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 114: 36-47. DOI: 10.1016/j.psep.2017.11.017.
- [9] PARVIZ M, AMINNEJAD B, FIOUZ A. Numerical simulation of dynamic response of water in buried pipeline under explosion [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 21(7): 2798-2806. DOI: 10.1007/s12205-017-0889-y.
- [10] 娄敏,明海芹. 基于 LS-DYNA 海底悬空管道受坠物碰撞动力响应分析 [J]. *海洋通报*, 2015, 34(1): 113-120. DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2015.01.017.  
LOU M, MING H Q. The dynamic response analysis of submarine suspended pipeline impacted by dropped objects based on

- LS-DYNA [J]. *Marine Science Bulletin*, 2015, 34(1): 113–120. DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2015.01.017.
- [11] FRANCINI R B, BALTZ W N. Blasting and construction vibrations near existing pipelines: what are appropriate levels? [J]. *Journal of Pipeline Engineering*, 2009, 8(4): 519–531.
- [12] JIANG N, GAO T, ZHOU C B, et al. Effect of excavation blasting vibration on adjacent buried gas pipeline in a metro tunnel [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 81: 590–601. DOI: 10.1016/j.tust.2018.08.022.
- [13] 张震, 周传波, 路世伟, 等. 爆破振动作用下邻近埋地混凝土管道动力响应特性 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 46(9): 79–84. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201611089.
- ZHANG Z, ZHOU C B, LU S W, et al. Dynamic response characteristic of adjacent buried concrete pipeline subjected to blasting vibration [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 46(9): 79–84. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201611089.
- [14] 朱斌, 蒋楠, 贾永胜, 等. 下穿燃气管道爆破振动效应现场试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(12): 2582–2592. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0183.
- ZHU B, JIANG N, JIA Y S, et al. Field experiment on blasting vibration effect of underpass gas pipelines [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(12): 2582–2592. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0183.
- [15] 贾永胜, 钟冬望, 姚颖康, 等. 基坑爆破预留层对围护桩的保护作用数值分析 [J]. *工程爆破*, 2017, 23(5): 1–4, 21. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2017.05.001.
- JIA Y S, ZHONG D W, YAO Y K, et al. Numerical calculation of the barrier effect of the pre-protective layer on bored piles in deep foundation pit blasting [J]. *Engineering Blasting*, 2017, 23(5): 1–4, 21. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2017.05.001.
- [16] 张震, 周传波, 路世伟, 等. 超浅埋地铁站通道爆破暗挖地表振动传播特征 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2017, 48(8): 2119–2125. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2017.08.020.
- ZHANG Z, ZHOU C B, LU S W, et al. Propagation characteristics of ground vibration induced by subsurface blasting excavation in an ultra-shallow buried underpass [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(8): 2119–2125. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2017.08.020.
- [17] 肖文芳. 地铁隧道掘进爆破振动测试与数值模拟研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- XIAO W F. Study of vibration testing and numerical simulation on metro tunnel excavation blasting [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [18] 武卫星, 郭晓刚, 朱敏. 武汉轨道交通广虎区间隧道爆破施工方案优化 [J]. *人民长江*, 2010, 41(10): 30–33. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2010.10.009.
- WU W X, GUO X G, ZHU M. Optimization of blasting construction scheme of Guang-Hu section subway tunnels in Wuhan [J]. *Yangtze River*, 2010, 41(10): 30–33. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2010.10.009.
- [19] 钟冬望, 卢哲, 黄雄, 等. 爆破荷载下埋地 PE 管道动力响应的试验研究 [J]. *爆破*, 2018, 35(4): 1–5; 89. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2018.04.001.
- ZHONG D W, LU Z, HUANG X. Experimental study on buried PE pipeline under blasting loads [J]. *Blasting*, 2018, 35(4): 1–5; 89. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2018.04.001.
- [20] 钟冬望, 龚相超, 涂圣武, 等. 高饱和黏土中爆炸波作用下直埋聚乙烯管的动力响应 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(3): 033102. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0334.
- ZHONG D W, GONG X C, TU S W, et al. Dynamic responses of PE pipes directly buried in high saturated clay to blast wave [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(3): 033102. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0334.
- [21] 贵州省住房和城乡建设厅. DBJ52/T039-2017 室外埋地聚乙烯 (PE) 给水管道工程技术规程 [S]. 2018.
- [22] 罗利, 马燕, 张永军, 等. 地基沉降作用下埋地聚乙烯管强度失效的数值模拟 [J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(2): 473–478.
- LUO L, MA Y, ZHANG Y J, et al. Numerical simulation of strength failure of buried polyethylene pipes under foundation settlement [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(2): 473–478.
- [23] 何平笙. 高聚物的力学性能 [M]. 2 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008: 232–235.
- [24] 舒亚俐. 既有给排水管线的震害及管道抗震能力关键问题综合分析 [J]. *城市道桥与防洪*, 2013(3): 111–114. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyf.2013.03.032.
- SHU Y L. Comprehensive analysis of seismic hazard to existing water and wastewater pipelines and key issues of seismic capacity of pipelines [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2013(3): 111–114. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyf.2013.03.032.

(责任编辑 王小飞)