

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0443

# 高饱和黏性土中爆炸波作用下直埋 钢管(空管)动态响应\*

龚相超<sup>1</sup>, 钟冬望<sup>1</sup>, 司剑峰<sup>1</sup>, 何理<sup>2</sup>

(1. 武汉科技大学理学院工程力学系, 湖北 武汉 430065;

2. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 设计和实施了系列爆炸波作用下钢管的动态响应实验, 获得了管道应变、振动速度和加速度及地表振动速度的时间历程。分析实验数据可知: 在爆炸波近中场, 峰值应变大小同管土相对刚度因数负相关, 并随比例距离呈幂函数形式衰减, 且在爆炸波不同分区衰减指数不同; 地表峰值粒子速度、各管的峰值振动速度和测点峰值应变之间具有良好的线性关系。对各测量量做 FFT (Fast Fourier Transformation) 频谱分析得: 振动信号主要集中在低频段, 质心频率在 10~60 Hz 范围内, 频谱同天然地震波谱有明显差异, 动应变谱质心频率随药量增加亦呈幂函数形式衰减; 考虑了爆腔因素以后, 管道和地表振速频谱的质心频率和比例距离取对数后具有线性衰减关系。实验所得数据可应用于相似条件下管道的抗震计算, 一些结论可作为深入研究爆炸波作用下埋地管道冲击振动机理的依据。

**关键词:** 爆炸波; 频谱分析; 埋地管道; 动应变; 振动速度; 振动加速度

中图分类号: O382; TD235.1

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Dynamic responses of hollow steel pipes directly buried in high-saturated clay to blast waves

GONG Xiangchao<sup>1</sup>, ZHONG Dongwang<sup>1</sup>, SI Jianfeng<sup>1</sup>, HE Li<sup>2</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, Hubei, China;

2. MOE Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

**Abstract:** A series of experiments were designed and implemented to explore dynamic responses of steel pipes to blast waves. The time histories of dynamic strains, vibration velocities and accelerations of the steel pipes were obtained, and the vibration velocity-time curves were gained. It is known by analyzing the experimental data that in the near and middle fields of the blast wave, the peak dynamic strains are negatively correlated with the relative stiffness coefficient of the pipe and the soil, and they follow the attenuation law of the power function with scaled distance; that the attenuation indexes are different for the blast wave propagating in the different sections of the field. The peak particle vibration velocities of the ground and the pipes have good linear correlations with the peak strains of the measuring points at the pipes. On the basis of the spectrum analysis by the fast Fourier transform on each test quantity, it is found that the spectrum energy of each test quantity is mainly concentrated in the low-frequency band, the centroid frequency is in 10–60 Hz, but there are obvious differences compared to the spectra of natural seismic waves. The centroid frequency of the dynamic strain spectrum is decayed in the exponent form of a power

\* 收稿日期: 2018-11-07; 修回日期: 2019-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(51574184); 三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放研究基金(2017KZD02)

第一作者: 龚相超(1974—), 男, 博士研究生, 副教授, [gxc741@163.com](mailto:gxc741@163.com)

通信作者: 钟冬望(1963—), 男, 博士, 教授, [zhongdw123@wust.edu.cn](mailto:zhongdw123@wust.edu.cn)

function with the increase of the explosive charge. By taking logarithm, there is a linear attenuation relationship between the scaled distance and the centroid frequencies of velocity spectra that the blasting cavity factor is considered. The test data can be directly applied to the seismic calculation under similar conditions, and some conclusions can be used as the theoretical basis for further study of the impact damage mechanism of buried pipelines.

**Keywords:** blast wave; spectrum analysis; buried pipe; dynamic strain; vibration velocity; vibration acceleration

我国城市化的高速发展推动了城市管网的建设,地下生命线的规模在不断扩大,守护地下生命线安全的责任也越来越重。与此相矛盾的是:工程中往往需要在服役管道附近进行爆破作业,而我国现行的《爆破安全规程(GB6722—2014)》和《中华人民共和国石油天然气管道保护法》中都没有明确规定埋地管道的安全振速标准,使得在爆破方案制定、爆破作业进行和爆破安全监理时缺少法律法规层面的指导。

近几年,我国专家学者们对确保爆炸波作用下埋地管道安全的振速标准的研究较多,所推荐的地表峰值振速安全阈值为 $2\sim 15\text{ cm/s}$ <sup>[1-4]</sup>,范围很大。应该承认:这些标准都有一定的参考价值,各有成功的工程案例为背景,但大都缺乏深入的机理研究,因此,所推荐的振速标准缺乏公信力。国外学者提出的安全阈值一般在 $5\sim 10\text{ cm/s}$ 范围内<sup>[5]</sup>,很多公司按 $5\text{ cm/s}$ 的标准执行。在Siskind等<sup>[6]</sup>的报告中,还记录有峰值振速分别达 $6.4$ 、 $31.8$ 和 $145\text{ cm/s}$ 爆炸作业中毗邻管道未被破坏的工程案例,甚至在美国陆军工兵部队试验中的峰值速度高达 $427\text{ cm/s}$ ,报道称未见泄露发生。

实际上不同材质和型号的管道,相同爆炸波作用下的响应差异可能是很大的:动应力(应变)水平不同;管道的强度(屈服)极限和抗冲击性能也不同。尤为关键的是:不同装药和场地条件下,爆炸波的产生和衰减差异性特别大。而单一的振速标准并不能反映出这些差异性。

关于爆炸波作用下埋地管道的计算,代表性的研究有:Dowding提出的计算公式,该式由具有恒定幅值的平面波推到而来<sup>[7]</sup>;Esparza等根据模型和现场试验数据提出的经验公式<sup>[8]</sup>;George等基于谐波假设采用圆柱薄壳模型推导出的半理论半经验公式<sup>[9]</sup>;还有Amir等基于爆炸波压力衰减规律并采用弹性地基梁模型推导出的半理论半数值计算式<sup>[10]</sup>。这些研究成果都有各自的适用条件,Dowding的计算式<sup>[7]</sup>可作为远场平面波作用下埋地管道响应的上限;Esparza经验公式<sup>[8]</sup>强调适用的场地条件和实验环境;后两类半理论公式<sup>[9-10]</sup>采用了不同模型且对爆炸波做了简化,其适用范围需进一步研究。

从现有成果来看,爆炸波作用下埋地管道动态响应机理的实验研究、抗震计算和理论研究并不多。本文中,对爆炸波近中场作用下直埋于高饱和土中的钢质管道进行系列实验研究;分析管道在不同的爆心距和爆源埋深条件下,不同位置测点峰值应变的衰减规律;研究管道应变、加速度以及管道和地面速度频谱特征;以期所得结果可为深入研究爆炸波作用下埋地管道冲击振动机理提供可靠资料和依据,实验数据可对类似工程抗爆设计提供参考。

## 1 实验概况

### 1.1 实验管道

实验中采用3根不同公称直径的20#无缝钢管作为研究对象。钢管的外径 $D$ 、壁厚 $\delta$ 、总长 $L$ 见表1。钢管的材料力学性能参数:杨氏模量 $E_p$ ,210 GPa;泊松比 $\mu$ ,0.30;屈服极限 $\sigma_{ps}$ ,245 MPa;密度 $\rho$ ,7 850 kg/m<sup>3</sup>;抗拉强度 $\sigma_{pb}$ ,410 MPa;延伸率 $\xi$ ,25%。

### 1.2 实验场地和管道

实验场地为内湖湖区改造通过填埋黄黏土建设而成。实验场紧邻污水处理池,土体含水率和饱和度随土深变化很大,饱和度为60%~100%,土深0.5、1.0、1.5 m处的含水率分别为19.3%、27.1%和39.8%。管道埋设如图1所示,3根不同口径的钢管埋深不同、平行铺设,管道

表1 管道几何参数

Table 1 Geometrical parameters of pipes

管道编号	$D/\text{mm}$	$\delta/\text{mm}$	$L/\text{m}$
S1	110	4.24	4.6
S2	160	4.70	4.6
S3	300	4.40	4.6

和爆源之间全部用原土人工一层层回填并踩实, 各管道和爆源的位置如图 2 所示。

### 1.3 实验实施

管道 S3、S2 和 S1 各分 4 个截面并分别贴 19、18 和 17 片 BX120-3AA 型电阻应变片, 待测管道截面和测试点应变片布设如图 1 和图 3 所示。使用 4 台 UT34XX 系列动态应变仪, 共 48 个通道, 采样频率设为仪器最高采样频率 128 kHz。采用 4 台 TC-4850 爆破振动测试仪测振, 分别布置在 3 根管道端部和管道中部正上方地表, 采样频率为 8 kHz。三向加速度传感器布置在管道 S2 管端, 用 1 台 UT3404 四通道采集数据, 采样频率为 128 kHz。速度和加速度传感器  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向如图 3 所示。爆源布置如图 2 所示, 将 2# 岩石乳化炸药做成球形药包, 耦合装药, 小药量下可将爆源简化成点源。爆心距  $R$  指爆源到管道中心线的垂直距离, 爆源埋深  $H$  指爆源到水平面的铅垂距离, 装药量为  $Q$ 。

实验方案如表 2 所示, 共进行 42 炮次。实验中测得的应变、速度和加速度数据量很大, 仅选取有代表性的实验数据, 对管道动态响应的几个特征量进行分析。

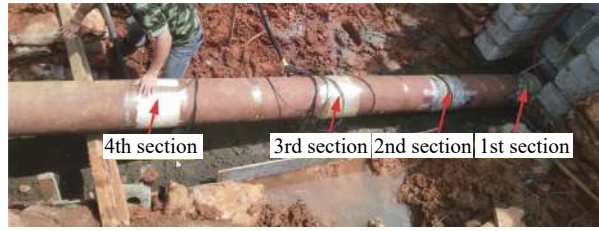


图 1 埋设管道照片  
Fig. 1 The buried pipe

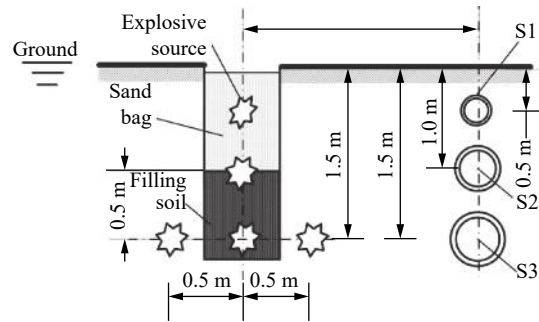


图 2 管道和爆源位置

Fig. 2 Location of pipes and explosive source

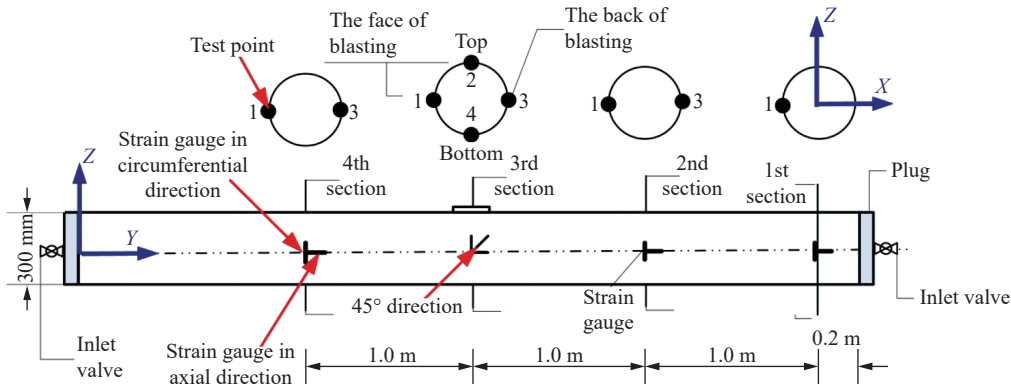


图 3 管道 S3 应变片的位置

Fig. 3 Location of strain gauges on pipe S3

表 2 实验方案

Table 2 Experimental schemes

$H/m$	$R/m$	$Q/g$						
2.0	2.2	50	75	100	125	150	175	200
	2.7	50	75	100	125	150	175	200
1.5	2.2	50	75	100	125	150	175	200
	2.7	50	75	100	125	150	175	200
	3.2	50	75	100	125	150	175	200
1.0	2.7	50	75	100	125	150	175	200

## 2 实验结果分析

### 2.1 应变分析

#### 2.1.1 峰值应变同比例距离相关性分析

定义比例距离  $\bar{R} = R/Q^{1/3}$ ,  $\bar{R}$  是受爆心距和装药量两个因素影响的综合变量。选取相同比例距离的4个具有代表性测点的两组数据做相关性分析, 参数和应变时程分别见表3和图4。动应变波形的相似性是直观的, 两组数据的峰值应变也大致相当。做相关性分析和显著性校验, 两组数据为强相关, 在显著水平(5%)下校验, 同分布假设不被拒绝的可信概率见表4。表4中项目编号规则: 前2位为管号, 第3位为截面号, 第4位为测点号, H表示环向, Z表示轴向。

表3 实验参数

Table 3 Experimental parameters

H/m	R/m	Q/g	$\bar{R}/(\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	管道编号
1.0	2.7	75	6.402	S3
1.0	3.2	125	6.4	S3

表4 校验结果

Table 4 Results of check

测点编号	相关系数	可信概率	测点编号	相关系数	可信概率
S323H	0.836	0.872	S332Z	0.855	0.893
S311H	0.786	0.834	S341Z	0.897	0.910

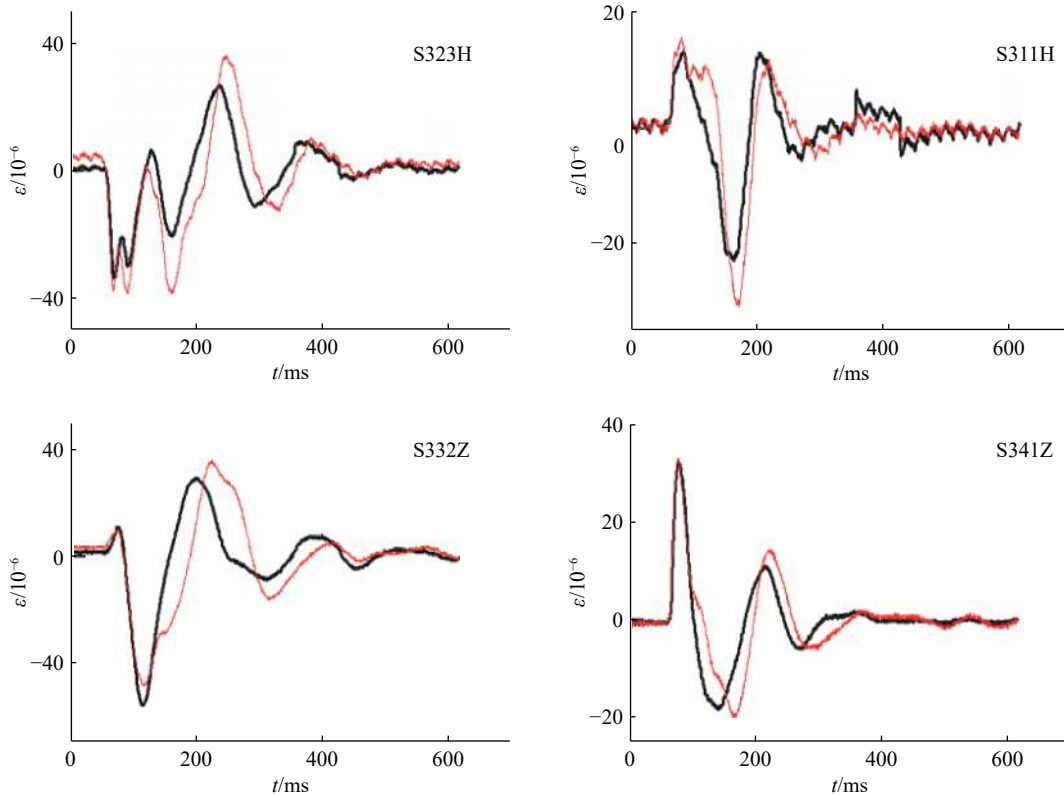


图4 不同测点的动应变波形对比

Fig. 4 Comparison of dynamic strain waveforms at different measured points

因此峰值动应变应为比例距离的函数, 参考量纲分析<sup>[11]</sup>的结果, 可采用下式拟合:

$$\epsilon_{\max} = k\bar{R}^{-\alpha} \tag{1}$$

式中:  $k$  为综合影响因数,  $\alpha$  为衰减指数。

#### 2.1.2 峰值应变衰减规律分析

根据圆形截面管土相对刚度因数  $\alpha_s$  定义式:

$$\alpha_s = (E_p/E_d)(\delta/r_0)^3 \tag{2}$$

式中:  $r_0=(D-\delta)/2$  为管道平均半径;  $E_d$  为土体变形模量, 取  $8 \text{ MPa}^{[12]}$ ; 其他参数含义和取值见 1.1 节。各管道的管土相对刚度因数分别为 13.53、5.93、0.693。管土相对刚度因数小于 1 时, 该管道为柔性管道; 管土相对刚度因数大于 1 时, 该管道为刚性管道。同样荷载作用下, 柔性管道将产生更大的环向应变。刚性管道在振动中管土相对滑移更严重, 应变传递因数小于 1, 使得应力水平降低, 因此本文中重点分析柔性 S3 管的实验数据。

取爆源埋深  $H=1.5 \text{ m}$ , 爆心距  $R=2.2, 2.7, 3.2 \text{ m}$ , S3 管测点的峰值应变数据整理如表 5~7 (数据不完整的测点未列出) 所示。数据表明: 在近距离局部冲击下, 管道产生了较大的环向和轴向应变,  $45^\circ$  方向的应变较小, 忽略管道表面压力, 各测点可近似为两向应力状态。比较所有的同测点环向和轴向动应变时程, 两者达到峰值的时间差均在几个至十几毫秒内, 且有的测点具有相同的极性(或拉或压)。

表 5 S3 管不同测点的最大峰值应变 ( $R=2.2 \text{ m}$ )Table 5 The maximum peak strains at different measured points of pipe S3 ( $R=2.2 \text{ m}$ )

$Q/g$	最大峰值应变/ $10^{-6}$									
	S321H	S341Z	S323H	S323Z	S331Z	S332H	S332Z	S333H	S333Z	S334Z
50	-31.1	35.1	-50.7	-31.7	104.3	53.8	-66.3	48.3	44.5	-58.5
75	-32.1	39.4	-51.8	-35.8	103.9	62.7	-75.4	43.8	50.4	-65.9
100	-30.7	52.9	-63.7	-35.9	97.3	61.1	-77.8	45.2	52.9	-61.6
125	-26.4	44.3	-45.2	-33.3	122.5	74.5	-81.2	60.3	54.3	-58.2
150	-42.7	60.7	-98.1	56.5	174.9	90.6	-117.7	69.6	76.4	-78.1
175	-78.5	72.2	-71.7	-64.3	187.8	93.6	-118.6	79.9	79.2	-79.3
200	-53.9	86.3	-89.2	-84.1	228.9	103.4	-131.3	100.5	90.4	-87.4

注: 压应变按绝对值最大给出, 下同。

表 6 S3 管不同测点的最大峰值应变 ( $R=2.7 \text{ m}$ )Table 6 The maximum peak strains at different measured points of pipe S3 ( $R=2.7 \text{ m}$ )

$Q/g$	最大峰值应变/ $10^{-6}$									
	S321H	S341Z	S323H	S323Z	S331Z	S332H	S332Z	S333H	S333Z	S334Z
50	-16.5	7.2	-33.7	-14.4	-26.1	44.5	14.6	21.0	7.6	-29.8
75	-22.4	10.4	-52.0	-20.2	-34.9	61.1	19.4	28.1	11.2	-28.2
100	-28.2	14.9	-67.2	-28.3	-49.4	80.7	28.8	36.2	17.9	-31.3
125	-30.5	17.6	-69.6	-30.9	-58.3	88.7	33.6	39.1	23.9	-42.0
150	-36.5	21.0	-91.0	-37.1	-71.3	102.9	42.9	48.2	30.1	-48.4
175	-38.2	33.2	-103.2	-48.5	-94.1	121.3	52.3	60.1	34.5	-57.0
200	-42.1	28.9	-103.7	-44.6	-85.7	118.9	49.3	54.5	34.3	-48.5

表 7 S3 管不同测点的最大峰值应变 ( $R=3.2 \text{ m}$ )Table 7 The maximum peak strains at different measured points of pipe S3 ( $R=3.2 \text{ m}$ )

$Q/g$	最大峰值应变/ $10^{-6}$									
	S321H	S341Z	S323H	S323Z	S331Z	S332H	S332Z	S333H	S333Z	S334Z
50	-30.2	18.6	-36.9	-22.1	-49.1	39.3	-26.9	27.6	-15.5	34.4
75	-16.2	17.4	-32.0	-22.3	-45.9	31.8	-25.5	26.2	-16.8	32.8
100	-18.6	22.7	-36.6	-26.8	-52.8	35.4	-32.9	26.5	-19.6	33.3
125	-19.1	22.5	-38.9	-32.7	-34.1	45.3	-30.7	31.1	-20.9	37.9
150	-19.3	24.7	-41.5	-37.5	-61.1	52.3	-35.1	33.0	-22.1	38.2
175	-23.0	28.0	-43.0	-36.6	-71.8	53.0	-41.3	34.8	-28.6	40.9
200	-25.9	29.5	-47.7	-38.7	-90.8	58.1	-43.0	38.7	-38.1	42.5

比较 S2 和 S3 管道截面 3 测点 3 环向和轴向应变数据, 比例距离在 4~8 范围内, 如图 5~6 所示: 近中场(对于土中爆炸土中传播的爆炸波, 本文中认为  $\bar{R} \leq 15$  为近中场,  $\bar{R} > 15$  为远场)爆炸波作用下, S3 管道产生较大的环向应变, 轴向比环向衰减指数大(绝对值)。同样爆心距下, S3 管道环向和轴向峰值应变绝对差值较大, S2 管道轴向和环向应变差值较小, S1 管的也较小。这是由于 S1 管道和 S2 管道管土相对刚度因数大、靠近地面受到反射波影响更大的缘故。

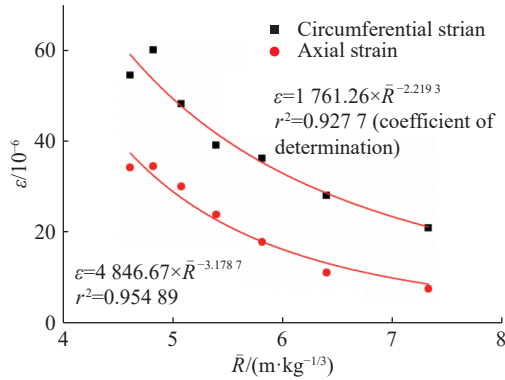


图 5 S333 应变衰减曲线 ( $R=2.7$  m,  $H=1.5$  m)  
Fig. 5 Strain decay curves of S333 ( $R=2.7$  m,  $H=1.5$  m)

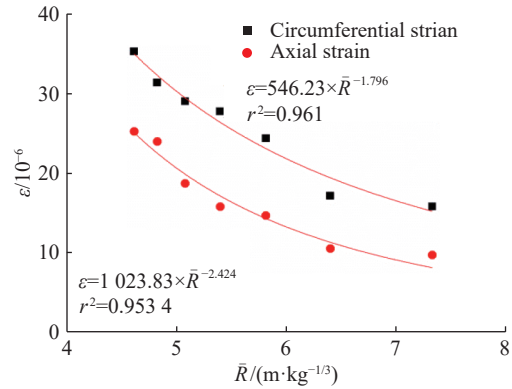


图 6 S233 应变衰减曲线 ( $R=2.7$  m,  $H=1.0$  m)  
Fig. 6 Decay curves of S332 strain ( $R=2.7$  m,  $H=1.0$  m)

对比爆源埋深  $H=1.5$  m 时 S3 管同一测点的环向或轴向应变, 其最大峰值拉应变和压应变相对大小随着爆心距的改变而发生变化, 如图 7 所示。爆心距  $R=2.2$  m 时, 轴向拉应变远比压应变大; 而爆心距  $R=2.7, 3.2$  m 时, 拉应变峰值和压应变峰值均大体相当。这是因为随着比例距离的增大, 爆炸波波形发生了变化的缘故, 由压缩波向地震波转换。据文献 [13]: 比例距离小于 6 时, 以压缩波为主; 6~30 的比例距离范围内为波形转换区, 比例距离大于 30 时为爆破地震波区。本文实验中比例距离恰好处于 3~9 范围内, 应变波波形转换特征明显。

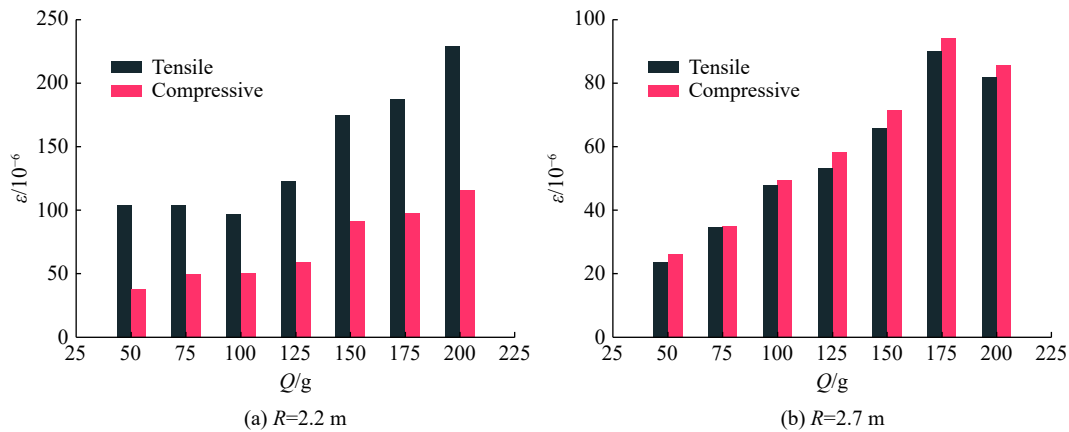


图 7 S331Z 最大拉和压应变 ( $H=1.5$  m)  
Fig. 7 The maximum tension and compression strains of S331Z ( $H=1.5$  m)

综合  $R=2.2, 2.7, 3.2$  m, 比例距离在 3~9 范围内, 埋深  $H=1.5$  m 时各药量的实验数据, S331Z 峰值拉应变衰减曲线如图 8 所示。尽管随着数据量的增大, 数据的离散性有所增大, 但决定系数仍然达 0.83553, 高度正相关, 衰减指数为 -2.745。在比例距离 3~6 范围内, 爆炸波作用下的峰值动应变可达几百个微应变, 但衰减较快, 比例距离大于 6 以后, 峰值动应变就衰减为几十个微应变了。其他测点情况相同, 取 S332 测点环向和轴向数据拟合, 如图 9 所示。轴向应变数据相关性较好, 环向数据离散性较大。

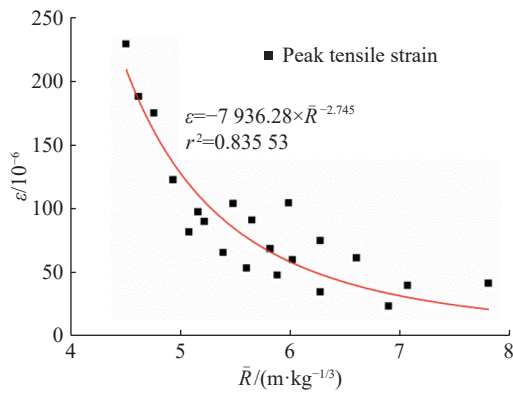


图 8 S331Z 峰值拉应变衰减曲线

Fig. 8 Decay curve of maximum tension strain for S331Z

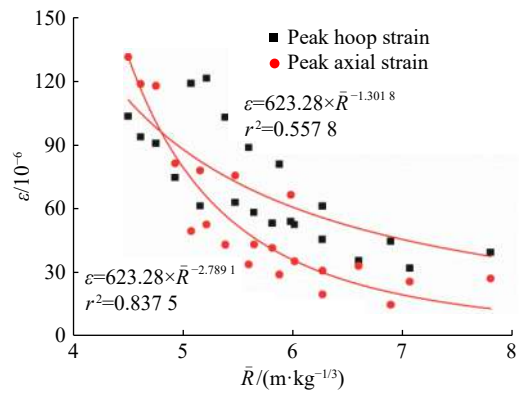


图 9 S332Z 和 S332H 最大应变

Fig. 9 Maximum strains of S332Z and S332H

结合表 5~7 和图 9 可以看出: 管道各点应变分布情况比较复杂, 小比例距离下, 迎爆面产生的环向和轴向应变较大, 随着比例距离的增大, 顶面和底面也会产生较大的动应变。

### 2.1.3 应变频谱特征

一般情况下, 爆炸波主频率较天然地震波主频率高, 小药量爆炸波的主频率高于大药量的, 可达 50 Hz 以上。然而由于土体强阻尼的作用, 管土结构响应频率较低。取爆源埋深  $H=1.5$  m, 爆心距  $R=2.7$  m 的 S3 管实验数据做 FFT 分析, 采样频率为 128 kHz, 分析采样时间为 512 ms。4 个测点动应变频谱如图 10 所示。可以看出, 无论是环向应变, 还是轴向应变, 各药量下都有一个最大峰值频率, 且峰值频率较其他极值占优, 峰值频率在 3~10 Hz 之间。然而峰值频率所含频谱信息量有限, 对比各药量的峰值频率无明显规律; 分析测振仪给出的主频, 也无明显规律且数值上存在越变; 因此采用质心频率进行研究<sup>[14]</sup>, 定义式如下:

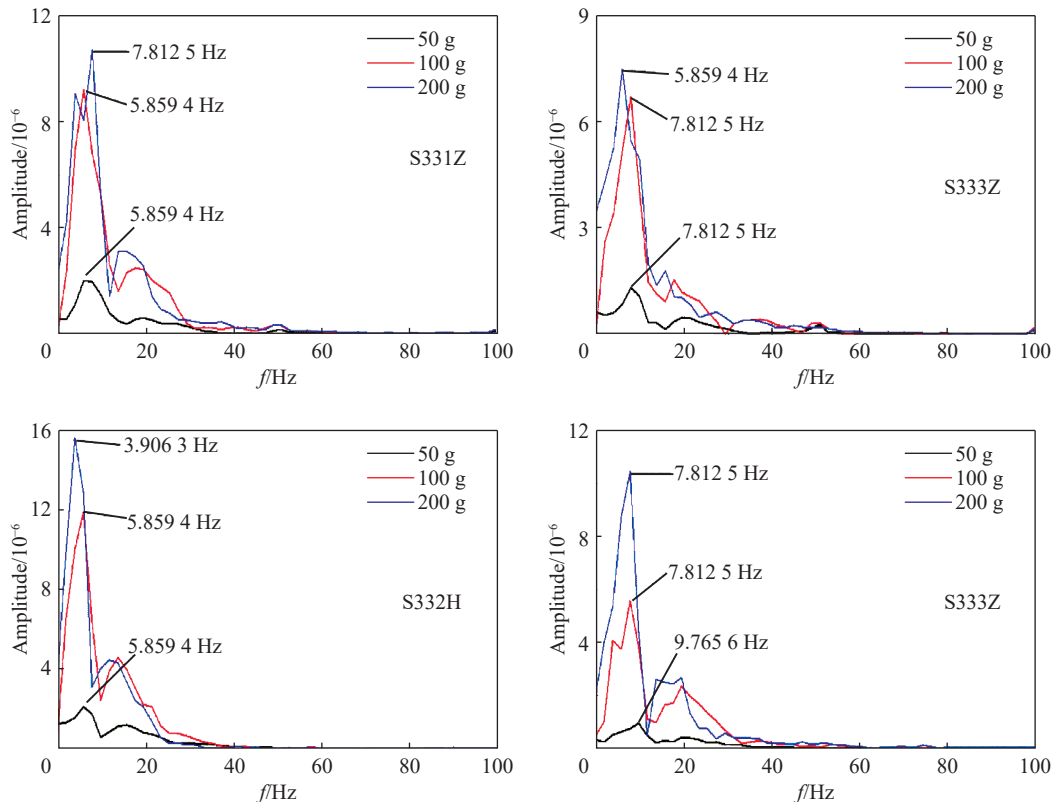


图 10 动应变频谱 ( $R=2.7$  m,  $H=1.5$  m)

Fig. 10 Spectra of dynamic strains ( $R=2.7$  m,  $H=1.5$  m)

$$f_c = \sum_{i=1}^n A_i f_i / \sum_{i=1}^n A_i \quad (3)$$

式中:  $f_i$  为傅里叶谱中频率,  $A_i$  为频率幅值。

本实验各测点的动应变频谱呈单峰或多峰结构,且峰值频率和质心频率不高,最大峰值频率小于 10 Hz,质心频率小于 50 Hz,因此管道动应变信号为低频信号。

取 0~200 Hz 低频段计算质心频率,质心频率均低于 50 Hz,且质心频率随药量增大呈幂函数衰减关系,衰减指数(绝对值)在 0.78~0.89 之间,如图 11 所示。

## 2.2 振动速度分析

### 2.2.1 峰值振动速度

爆炸波幅值随深度增大而衰减,这是由于爆炸波传播至地面时,会产生强烈的反射波,因此地表峰值振速比地下的大。而管道受到土体约束,管土的力学性质差异明显,管土之间存在滑移,所以地表振速远比管道振速大。取埋深  $H=2.0$  m、爆心距  $R=2.7$  m 时的实验数据, S3 管道振动的峰值粒子速度和地表振动的峰值粒子速度合成值如表 8 所示,按 X、Y、Z 轴最大值合成,虽然一般情况下三者最大值不是同时发生,但时间间隔很小,合成值比实际值略大。

表 8 S3 管道振动的峰值粒子速度和地表振动的峰值粒子速度 ( $R=2.7$  m,  $H=2.0$  m)

Table 8 Peak particle velocities of S3 pipe and ground vibrations ( $R=2.7$  m,  $H=2.0$  m)

$Q/g$	峰值粒子速度/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )		比值/%	$Q/g$	峰值粒子速度/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )		比值/%
	S3管道振动	地表振动			S3管道振动	地表振动	
50	4.3	13.8	31	150	9.4	25.1	37
75	3.7	11.4	32	175	12.1	30.6	39
100	4.9	15.0	33	200	14.5	35.2	41
125	5.2	13.7	38				

S3 管道振动的峰值粒子速度和地表振动的峰值粒子速度的比值随药量的不同有所波动,但在波动幅度并不大。两者随比例距离衰减曲线如图 12 所示,呈良好的幂函数衰减关系, S3 管衰减指数(绝对值)比地面的大,地面的衰减指数也比一般文献中的大,这是由于实验条件为土中爆炸,传播介质为黏土且处于爆炸波近中场的缘故。实验数据表明: S3 管道振动的峰值粒子速度和地表振动的峰值粒子速度之间具有很强的相关性,两者近似有线性比例关系,如图 13 所示。

### 2.2.2 振动速度频谱

取埋深  $H=1.5$  m、爆心距  $R=2.7$  m 时的数据,做 3 个药量下 S3 管振动速度频谱图,采样频率为 8 kHz,采样时间为 5 s,如图 14 所示,随着药量的增加,管道振动速度频谱的主频段向低频区域偏移。地面振速频谱和管道频谱图相类似,如图 15 所示,两者频率成分都主要集中在低频段,差别

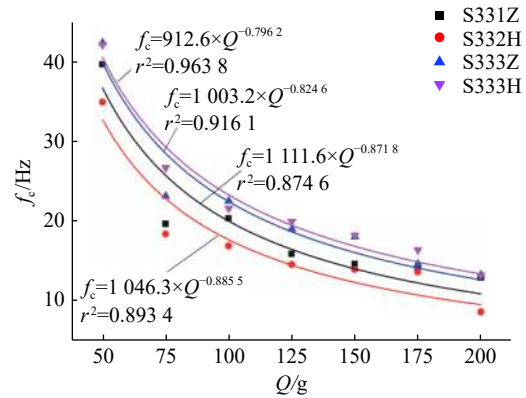


图 11 动应变质心变频率衰减曲线 ( $R=2.7$  m,  $H=1.5$  m)

Fig. 11 The decay curves of dynamic strain centroid frequencies ( $R=2.7$  m,  $H=1.5$  m)

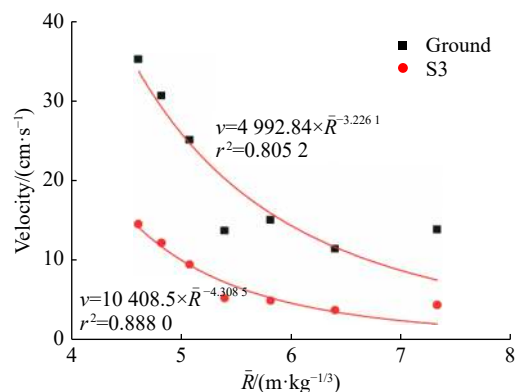


图 12 S3 管道振动的峰值粒子速度和地表振动的峰值粒子速度随比例爆距的衰减

Fig. 12 Attenuation of peak particle velocity with scaled explosion distance for vibrations of S3 pipe and ground



不大。与动应变频谱相比, 振动速度谱频带更宽; 大体上速度峰值频率比应变峰值频率高; 主频段向高频区移动。振速谱中 Z 轴方向呈多峰状态, 存在多个峰值频率。随着药量的增加, 第 1 峰和第 2 峰的峰值频率值有所降低, 第 2 峰值幅值和频宽所占比重增大, 而在动应变的频谱中第 2 峰值频率幅值和频宽被削弱, 第 1 峰值频段占据主导地位, 这是土体对管道的强阻尼作用的结果。

仍采用质心频率来研究 S3 管和地表振动的频谱特性。分析埋深  $H=2$  m、爆心距  $R=2.2$  m 时的实验数据, 取  $0\sim 200$  Hz 低频段计算质心频率, S3 管和地表振速质心频率如表 9 所示。比较两者振速质心频率, 大体上小药量时, 管道质心频率比地表质心频率高, 随着药量增大, 两者关系反转。究其原因: 前者是管道本身固有频率远较土体优势频率高, 管道振速频率要受到两者综合影响; 后者是近中场小比例距离下, 较大药量引发的爆炸波波演化不充分所致。

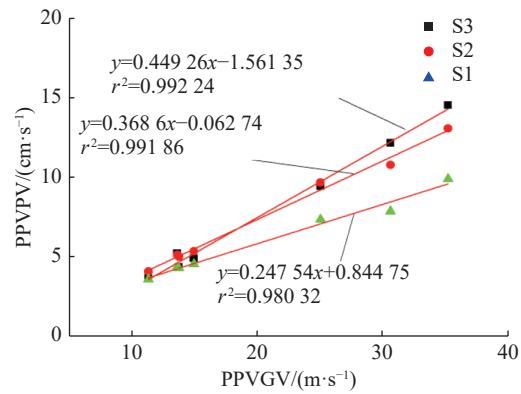


图 13 S3 管道振动的峰值粒子速度 (PPVPV) 和地表振动的峰值粒子速度 (PPVGV) 的关系

Fig. 13 Relations between peak particle velocities of S3 pipe vibrations (PPVPV) and ones of ground vibrations (PPVGV)

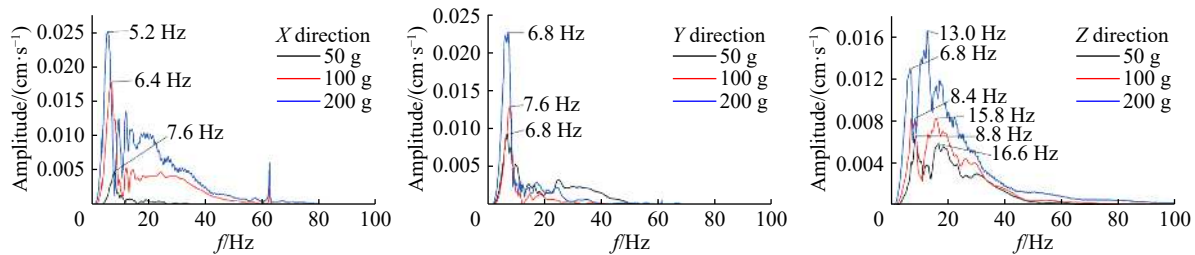


图 14 管道 S3 振动速度频谱

Fig. 14 Vibration velocity spectra of pipe S3

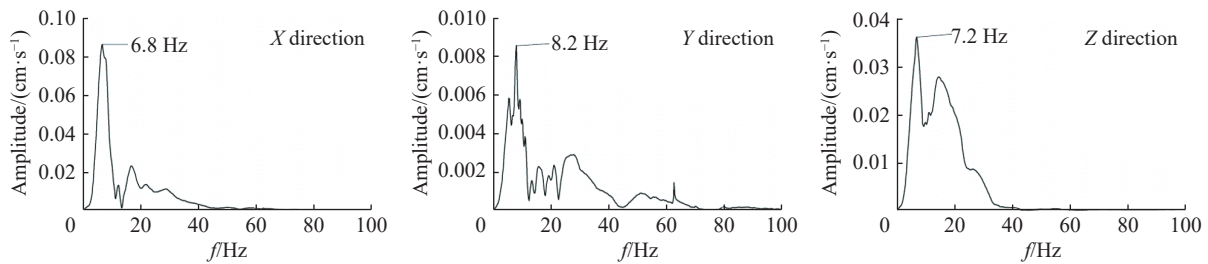


图 15 地表振动速度频谱 ( $Q=100$  g)

Fig. 15 Vibration velocity spectra of ground ( $Q=100$  g)

表 9 管道 S3 和地面振动速度质心频率 ( $R=2.7$  m,  $H=2.0$  m)

Table 9 Centroid frequencies of pipe S3 and ground vibration velocities ( $R=2.7$  m,  $H=2.0$  m)

$Q/g$	$f_c/Hz$						$Q/g$	$f_c/Hz$					
	管道			地表				管道			地表		
	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向	
50	24.3	18.0	27.5	18.3	22.3	18.3	150	22.6	26.9	28.8	29.7	16.0	29.8
75	25.1	19.7	25.8	14.9	19.6	16.4	175	20.4	23.0	22.7	32.9	16.5	39.9
100	25.4	22.4	28.8	19.1	18.0	15.5	200	33.2	24.5	26.9	36.3	15.7	45.8
125	26.2	26.2	36.8	28.6	17.0	15.2							

直观上振速质心频率的变化规律仍不明显,借鉴文献 [14] 的研究,爆炸波主频主要受到爆源(主要是爆炸空腔半径)、爆心距和传播介质性质的影响,质心频率与药量和爆心距有如下关系式:

$$f_c = k(c_p/Q^{1/3})(R/Q^{1/3})^\alpha \tag{4}$$

式中:纵波波速  $c_p$  为一常数。对式 (4) 变形,两边取对数,有:

$$\ln(f_c Q^{1/3}) = \ln(kc_p) + \alpha \ln \bar{R} \tag{5}$$

计算并拟合出的曲线如图 16 和 17 所示,虽然数据离散性较大,但衰减规律很明显。Z 方向数据离散性很大,这是管道间和地面的反射波对 Z 方向振动影响更大的缘故。

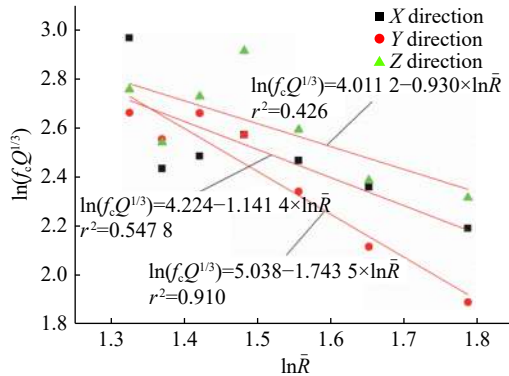


图 16 S3 管振速质心频率衰减

Fig. 16 Centroid frequency attenuation of pipe S3 vibration velocity

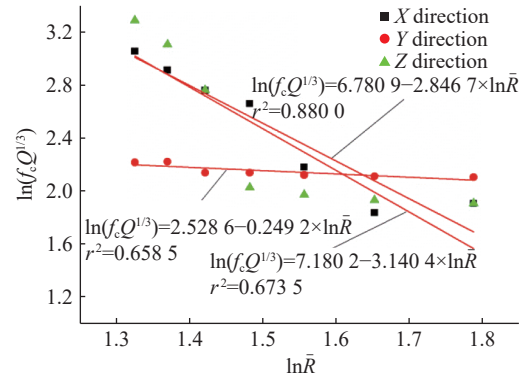


图 17 地面振速质心频率衰减

Fig. 17 Centroid frequency attenuation of ground vibration velocity

### 2.2.3 管道峰值应变和地表峰值振速相关性

取  $H=1.5\text{ m}$  和  $R=2.2\text{ m}$  时的数据,做管道峰值应变和地表峰值振速相关性分析,结果如图 18 所示。因为管道峰值应变和地表峰值振速都同比例距离具有相同形式的衰减关系,两者高度正线性相关是必然的,因此可以通过地表峰值振速来判定管道的动应变水平。

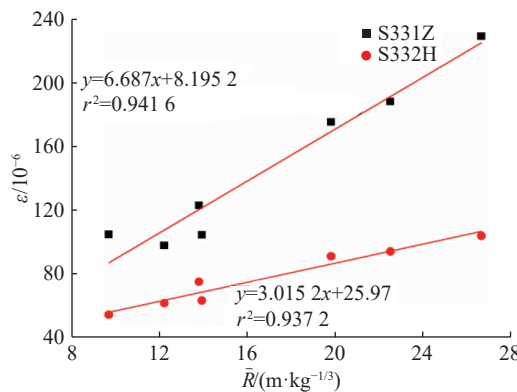


图 18 S3 管道的应变和地表振动峰值粒子速度 (PPVGV) 的关系

Fig. 18 Relationships between strain of pipe S3 and peak particle velocity of ground vibration (PPVGV)

## 2.3 振动加速度分析

爆炸波和天然地震波的加速度也存在明显差异。当前已记录到的天然地震加速度最大值为  $1.3g$ ,而本实验中 S2 管上测得的峰值振动加速度 (PPVA) 高达  $6.73g$ , PPVA (由 3 个方向峰值合成) 变化范围更大。取埋深  $H=1.5\text{ m}$ ,爆心距  $R=2.7\text{ m}$ , S2 管道加速度实验数据如表 10 所示。虽然 PPVA 在整体上同药量减小呈衰减趋势,但和 S2 管道峰值振动速度 (PPVV) 相比,其离散性大,拟合后相关性也不如 PPVV 的高。50 g 和 200 g 药量的 S2 管加速度频谱如图 19 所示。比较管道的加速度谱和速度谱,加速

度频谱成分更复杂, 峰值频率比速度峰值频率高, 主频段也向高频段移动。加速度谱 3 个方向上均呈多峰状态, 存在多个峰值频率, 且随着药量增加第 2 个峰值以及其后波峰幅值变小, 频宽变大。频谱中出现多处工频干扰。加速度质心频率( $H=1.5\text{ m}, R=2.7\text{ m}$ )如表 11 所示, 质心频率随药量增加变化不大。

表 10 S2 管道振动的峰值加速度 ( $H=1.5\text{ m}, R=2.7\text{ m}$ )

Table 10 Peak particle vibration acceleration of pipe S2 ( $H=1.5\text{ m}, R=2.7\text{ m}$ )

$Q/g$	加速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )						合成
	X方向		Y方向		Z方向		
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	
50	4.7	-11.1	3.7	0.3	6.7	-3.7	13.5
75	6.7	-12.9	4.0	0.0	8.1	-3.5	15.8
100	4.1	-10.4	2.2	-1.2	7.7	-2.5	13.2
125	4.7	-16.1	1.5	-2.9	8.4	-7.0	17.8
150	3.1	-15.5	0.9	-3.1	6.7	-6.5	17.1
175	1.7	-14.7	1.0	-3.3	6.8	-7.1	16.6
200	3.0	-18.2	0.3	-4.0	6.9	-7.4	20.1

表 11 加速度质心频率 ( $H=1.5\text{ m}, R=2.7\text{ m}$ )

Table 11 Centroid frequencies of acceleration ( $H=1.5\text{ m}, R=2.7\text{ m}$ )

$Q/g$	$f_c/\text{Hz}$		
	X方向	Y方向	Z方向
50	55.9	40.1	32.9
100	41.3	41.9	33.0
200	41.1	39.1	36.8

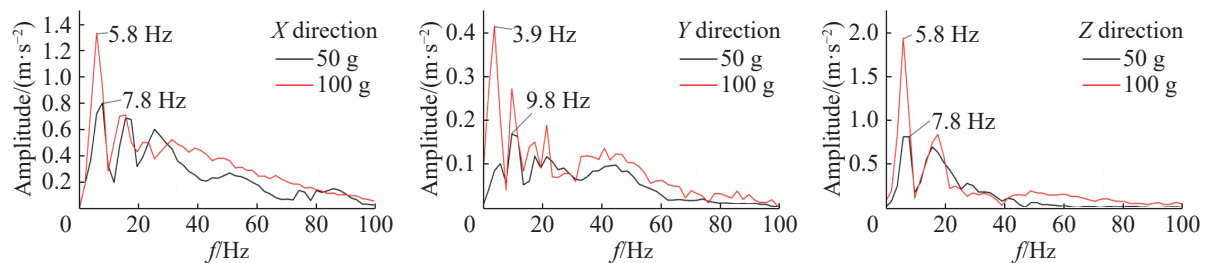


图 19 管道 S2 的加速度频谱 ( $Q=50\text{ g}$ )

Fig. 19 Acceleration spectra of pipe S2 ( $Q=50\text{ g}$ )

### 2.4 振速信号微分与积分

爆炸波是复合波, 含有多种频率成分, 且速度的峰值频率和加速度的峰值频率并不相同。理论上可以通过一种振动信号得到其他两种信号, 但在积分过程中会出现零线飘移等问题, 同时考虑到测量的便捷性、频谱特征量的读取以及后期标准的制定, 采用振动速度作为基准测量信号是较好的选择。取埋深  $H=2.0\text{ m}$ 、爆心距  $R=2.2\text{ m}$  时 S3 管道的振速数据, 微分和积分后得到位移和加速时程, S3 管位移峰值  $d_{\max}$ 、振速峰值  $v_{\max}$ 、加速度峰值  $a_{\max}$  如表 12 所示。

对比表 8 和表 12 的 S3 管振动速度数据: 小药量时, 爆心距  $R=2.2\text{ m}$  管道振速值比爆心距  $R=2.7\text{ m}$  的大, 这是必然的, 但随着药量的增大, 爆心距  $R=2.2\text{ m}$  时管道的振速值和爆心距  $R=2.7\text{ m}$  时管道的振速值相对差值变小, 这是由于管道和土体的相对滑移变大所致。

本实验中实测 S2 管的加速度峰值在  $(0.10\sim 6.73)\text{ g}$  之间, 变化范围很大。总体来说: 管道位移为 mm

量级,速度为 cm/s 量级,加速度为  $\text{m/s}^2$  量级,位移、速度及加速度量级变化范围大,具有位移小加速度大的特点,频谱成分复杂。而埋地管道在天然地震波作用下,具有较大的位移和较小的加速度值<sup>[15]</sup>,频谱成分也相对简单,和爆炸波作用下的响应差异明显。管道抗震设计的拟静力学方法中,将地震波简化为单一频率正弦波来计算的做法能否引入到工程爆破抗震计算中来,和有些学者主张将天然地震波抗震标准降低 1~2 度作为爆破抗震标准,这些都是值得深入研究和探讨的。

表 12 S3 管加速度、速度和位移峰值 ( $H=2.0\text{ m}$ ,  $R=2.2\text{ m}$ )Table 12 Peak acceleration, peak velocity and peak displacement of S3 ( $H=2.0\text{ m}$ ,  $R=2.2\text{ m}$ )

$Q/g$	$d_{\max}/\text{mm}$	$v_{\max}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$a_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$(v_{\max}\cdot d_{\max}^{-1})/\text{Hz}$	$(a_{\max}\cdot v_{\max}^{-1})/\text{Hz}$
50	0.99	7.45	12.73	75.60	170.85
75	0.82	5.89	11.23	71.69	190.78
100	1.02	7.21	15.17	70.50	210.32
125	1.33	9.33	23.59	70.40	252.82
150	1.57	10.19	20.53	64.92	201.37
175	1.88	11.85	25.31	62.91	213.55
200	2.54	16.68	41.92	65.58	251.26

### 3 结 论

天然地震波由于震源深、传播距离远,波形演化较充分,引发的埋地管道应变以轴向应变为主。远场爆炸波和天然地震波引发的管道响应类似,天然地震波的一些结论和研究成果可以引入到爆炸波抗震计算中来。而在爆炸波近中场,管道由于受到压缩波(或冲击波)的局部冲击作用,管道会产生较大的环向应变,这点和天然地震波是不同的。(1)高饱和土中爆炸波引起的管道动态响应,由于近中场存在波形演变,随着比例距离的不同而有所不同。本文实验比例距离在 3~9 范围内,管道产生了较大的环向应变。峰值应变大小和管土相对刚度因数密切相关,因数越小所产生的环向应变越大。对于柔性管道,环向应变和轴向应变量级相当,甚至大于轴向应变。(2)从动应变时间历程曲线可以看出:有的测点环向和轴向的峰值应变出现时间大致相同,且具有相同的极性(拉伸或压缩)。若像天然地震波抗震计算那样仅采用轴向应力(应变)作为管道强度安全的判据明显是低估了动应力水平。(3)管道峰值应变随比例距离增大呈现幂函数衰减规律。同一埋深下,比例距离小衰减指数(绝对值)大,比例距离大衰减指数小,总体在 1.6~2.9 之间。经傅氏谱分析得到的动应变质心频率随药量增加也呈幂函数衰减规律。(4)小比例距离(3~9)下,管道峰值振动粒子速度、地表峰值振动粒子速度和管道峰值动应变三者之间高度正相关,近似具有线性关系,这表明采用地表振速来表征管道振动和应变水平是可行的。(5)通过频谱分析可知:振速质心频率比加速度质心频率低,爆炸波作用下管道各测量的质心频率都在 10~60 Hz 之间,振动频率较低。振速质心频率在考虑爆腔因素后,随比例距离增大亦呈幂函数形式衰减。(6)在爆炸波近中场冲击作用下,埋地管道动应变频谱、振速和加速度频谱,频率成分都很丰富,且主频较天然地震波高。爆炸波近中场时频特征和天然地震波有着明显的差异,因此能否将天然地震波的抗震标准和研究成果直接用于工程爆破的抗震计算中来,值得进一步探讨。

### 参考文献:

- [1] 李强, 陈德利, 屈洋. 爆破对输气管道本体影响的监测 [J]. 油气储运, 2015, 34(2): 190-194. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.02.017.
- LI Q, CHEN D L, QU Y. Monitoring on effects of blasting on gas pipeline body distortion [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(2): 190-194. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.02.017.
- [2] 程围峰, 梁旭, 王振宇. 隧道爆破施工对邻近输油管道的影响评价 [J]. 石油工程建设, 2011, 37(4): 44-46; 9. DOI:

- 10.3969/j.issn.1001-2206.2011.04.013.
- CHENG W F, LIANG X, WANG Z Y. Assessment of blasting impact in tunnel excavation on nearby oil pipeline [J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2011, 37(4): 44–46; 9. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2206.2011.04.013.
- [3] 张紫剑, 赵昌龙, 张黎明, 等. 埋地管道爆破振动安全允许判据试验探究 [J]. *爆破*, 2016, 33(2): 12–16. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2016.02.003.
- ZHANG Z J, ZHAO C L, ZHANG L M, et al. Experimental investigation of blasting vibration safety criterion on buried pipeline [J]. *Blasting*, 2016, 33(2): 12–16. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2016.02.003.
- [4] 戴联双, 张海珊, 孟国忠, 等. 在役油气管道周边爆破作业风险分析 [J]. *油气储运*, 2012, 31(11): 801–803; 887. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2012.11.001.
- DAI L S, ZHANG H S, MENG G Z, et al. Risk analysis of blasting operations around in-service oil and gas pipelines [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2012, 31(11): 801–803; 887. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2012.11.001.
- [5] 王振洪, 侯雄飞, 边明, 等. 爆破对天然气长输管道振动影响的安全判据 [J]. *油气储运*, 2016, 35(8): 813–818. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2016.08.003.
- WANG Z H, HOU X F, BIAN M, et al. Safety criterion for impacts of bursting on long-distance gas pipeline [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2016, 35(8): 813–818. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2016.08.003.
- [6] SISKIND D E, STAGG M S, WIEGAND J E, et al. Surface mine blasting near pressurized transmission pipelines [R]. Minneapolis, MN: US Department of the Interior Bureau of Mines, 1994: 2–3; 22–23.
- [7] DOWDING C H. Blast vibration monitoring and control [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1985: 167–171.
- [8] ESPARZA E D, WESTINE P S, WENZEL A B. Pipeline response to buried explosive detonations: Vol. 2 [R]. Arlington, USA: American Gas Association, 1981: 146–152.
- [9] 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. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.08.008.
- [10] ABEDI A S, HATAF N, GHAHRAMANI A. Analytical solution of the dynamic response of buried pipelines under blast wave [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 88: 301–306. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.07.014.
- [11] 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.
- [12] 冯双, 马郎, 徐光黎. 武汉地区基坑一般黏性土的力学特性与其物理指标间的相关性研究 [J]. *安全与环境工程*, 2016, 23(5): 149–154. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2016.05.025.
- FENG S, MA Y, XU G L. Correlation between mechanical properties and physical indicators of general cohesive soil in foundation pits in Wuhan area [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2016, 23(5): 149–154. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2016.05.025.
- [13] 库特乌佐夫. 爆破工程师手册 [M]. 刘清泉, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1992: 137–138
- [14] 卢文波, 张乐, 周俊汝, 等. 爆破振动频率衰减机制和衰减规律的理论分析 [J]. *爆破*, 2013, 30(2): 1–6; 11. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2013.02.001.
- LU W B, ZHANG L, ZHOU J R, et al. Theoretical analysis on decay mechanism and law of blasting vibration frequency [J]. *Blasting*, 2013, 30(2): 1–6; 11. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2013.02.001.
- [15] 陈勇, 杨庆华. 埋地管道在地震波作用下的变形分析 [J]. *世界地震工程*, 2015, 31(4): 275–279.
- CHEN Y, YANG Q H. Deformation analysis of buried pipelines under seismic waves [J]. *World Earthquake Engineering*, 2015, 31(4): 275–279.

(责任编辑 张凌云)