

沈鑫,李志清,胡瑞林,等. 二氧化碳相变致裂信号反应谱分析[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(5): 645-651.

SHEN Xin, LI Zhi-qing, HU Rui-lin, et al. Response Spectrum Analysis of Carbon Dioxide Phase Change Cracking Signal[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(5): 645-651.

二氧化碳相变致裂信号反应谱分析

沈鑫^{1,2,3}, 李志清^{1,2,3*}, 胡瑞林^{1,2,3}, 高玮^{1,2,3}

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029)

摘要:为研究二氧化碳相变致裂过程对结构的影响,对现场试验得到的数据进行反应谱分析。首先将速度信号做快速傅里叶变换,分析其频谱特性,然后将速度信号直接微分,运用集合经验模态分解(EEMD)对其进行低通滤波去噪处理,提取主要特征频段的重构信号,获得清晰的加速度时程曲线,并将去噪后的加速度曲线作为输入信号,研究不同阻尼比下二氧化碳相变致裂信号反应谱。结果表明:二氧化碳相变致裂信号频率集中于低频,速度峰值与主频在安全允许范围内,适用于对振动敏感的环境;集合经验模态分解可有效抑制因对速度信号直接微分引起的高频振荡,信噪比可超过 25 dB;二氧化碳相变致裂反应谱形态简单,峰值对应周期小,有利于结构安全;相对位移和相对速度反应谱峰值随着阻尼比的增大而减小,但峰值对应的周期不变,绝对加速度和标准加速度反应谱峰值在阻尼比不为 0 时相等,不受阻尼比影响;注意反应谱上对结构影响大的周期,可以在一定程度上保证结构的稳定性。

关键词:二氧化碳相变致裂;反应谱;信号;速度;加速度;集合经验模态分解;现场试验;快速傅里叶变换

中图分类号:TD235

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2018)05-0645-07

Response Spectrum Analysis of Carbon Dioxide Phase Change Cracking Signal

SHEN Xin^{1,2,3}, LI Zhi-qing^{1,2,3*}, HU Rui-lin^{1,2,3}, GAO Wei^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Shale Gas and Geoenvironment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to study the effect of carbon dioxide phase change cracking process on the structure, the response spectrum analysis was carried out on the data obtained from field tests. First of all, the velocity signal is subjected to fast Fourier transform to analyze its spectral characteristics; then, the velocity signal is directly differentiated, the low-pass denoising is performed by using ensemble empirical mode decomposition (EEMD), and the reconstructed signal of the main characteristic frequency band is extracted to obtain a clear acceleration-time history curve; the acceleration curve after the denoising is used as the input signal to study the response spectrum of the carbon dioxide phase change cracking signal with different damping

收稿日期:2018-05-18;修回日期:2018-07-12

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(41672316, 41330643);中国科学院青年创新促进会项目(2017092)

作者简介:沈鑫(1994-),男,内蒙古兴安盟人,工学硕士研究生, E-mail: shenxin1111@126.com。

* 通讯作者:李志清(1981-),男,河北沧州人,高级工程师,工学博士, E-mail: lizhiq-2002@163.com。

ratios. The results show that the frequency of carbon dioxide phase change cracking signal is concentrated in low frequency, the peak velocity and the main frequency are within the safe allowable range, and it is suitable for vibration sensitive environment; EEMD can effectively inhibit the high frequency oscillation caused by direct differentiation of the velocity signal, and the signal to noise ratio can reach up to 25 dB; the carbon dioxide phase change cracking response spectrum is simple, and the peak corresponding period is small, which is conducive to structural safety; the peak values of the relative displacement and the relative velocity response spectrums decrease with the increase of damping ratio, but the peak corresponding cycle is constant; the peak values of the absolute acceleration and the standard acceleration response spectrums are equal at non-zero damping ratio, which is not affected by damping ratio; attention is paid to the period in the response spectrum that has a large influence on the structure, and the stability of the structure can be guaranteed to some extent.

Key words: carbon dioxide phase change cracking; response spectrum; signal; velocity; acceleration; ensemble empirical mode decomposition; field test; fast Fourier transform

0 引言

二氧化碳相变致裂是一种新型的物理致裂技术,最早由英国的 Cardox 公司提出,发明初期主要针对煤矿中的瓦斯气体和沼气附近的爆破工程。近年来,二氧化碳相变致裂技术已推广至岩石、混凝土和其他物质的快速安全爆破。该项技术将液相二氧化碳转变为气相时体积膨胀产生的高压作用于周围岩体,从而达到碎岩的目的。由于整个致裂过程无明火,二氧化碳本身又是惰性气体,所以具有安全、高效的特点。目前国内外许多学者围绕二氧化碳相变致裂技术展开大量研究。例如,在土耳其通过在煤矿钻孔中使用 Cardox 装置,使煤体被瞬间产生的大量高压二氧化碳气体撑开产生裂隙,从而提高块煤率^[1];Singh 介绍了二氧化碳相变致裂管的结构和使用方法,指出该装置可以用于采石场进行大规模开挖,由于其安全性高,也可在水库、大坝附近作业^[2];郭志兴通过在地面模拟煤体爆破,认为液态二氧化碳相变致裂可以将释放的二氧化碳气体沿煤或被爆物的天然裂缝剪切开,对多孔脆性材料爆破最适用^[3];詹德帅等通过对煤层掘进面进行高压二氧化碳爆破,研究二氧化碳爆破的增透机理,并对煤层增透影响范围进行了探讨^[4];贺超对煤层工作面进行二氧化碳强化增透试验,证明了二氧化碳预裂增透能提高煤层瓦斯抽采量,显著缩短抽采周期^[5];薛飞将二氧化碳相变致裂技术与多种静态爆破施工进行比较分析,验证了二氧化碳相变致裂技术是目前处理大面积路基碎石的首选施工方案^[6];王军等用二氧化碳相变致裂技术替代传统的炸药爆破技术,

证明了这种新型爆破技术在效果和经济上具有优越性^[7-8];黄园月等设计出了二氧化碳相变致裂快速充装系统,提高了二氧化碳相变致裂器的充装效率及致裂效果^[9-10]。

国内外对于二氧化碳相变致裂的研究多集中在煤层瓦斯增透以及管道疏通等工程应用中^[11-12],从理论分析、现场试验和数值模拟等方面揭示了二氧化碳相变致裂的增透机理,并得出致裂影响半径等工程参数;相对而言,二氧化碳相变致裂过程对结构影响的研究较少,这就使其在城市等人口密集处的应用受到限制。本文通过现场试验,对二氧化碳相变致裂信号特征进行识别,结合反应谱理论分析其对结构的影响,以期对控制振动速度、降低现场周围结构的危害以及合理安排钻孔分布等提供参考。

1 试验方案

为获取实测二氧化碳相变致裂信号,在北京市房山区进行现场试验,场地以灰岩为主,岩石的完整性好,岩性完全相同。本次试验共布置了 12 个钻孔,钻孔分布如图 1 所示。试验孔径为 120 mm,孔深为 4 m,孔距为 1.5 m,排距为 1.2 m,与作业面呈 90°。致裂管直径为 95 mm,长度为 1.2 m,每孔下

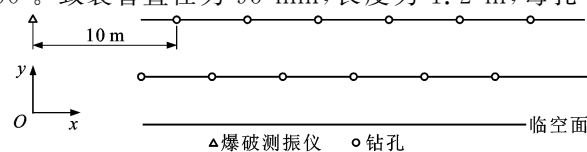


图 1 二氧化碳相变致裂现场试验钻孔分布

Fig. 1 Boreholes Distribution of Carbon Dioxide Phase Change Cracking Field Test

含两根致裂管,抵抗线距离为 1.5~2.0 m。

本次现场试验采用 Blast-UM 型爆破测振仪记录由致裂产生的速度信号,传感器能同时测量三维方向速度,测试时将传感器 x 方向对准钻孔,并将其置于距钻孔 10 m 处。将二氧化碳相变致裂管放入钻孔后,用土料将致裂管与钻孔之间的间隙密实填充,用导线将各个钻孔连接,并与起爆器相连,检查无误后,各钻孔致裂管同时起爆,射流方向垂直于钻孔。本文主要选取测点处垂直向(z 方向)振动信号为分析信号(图 2)。

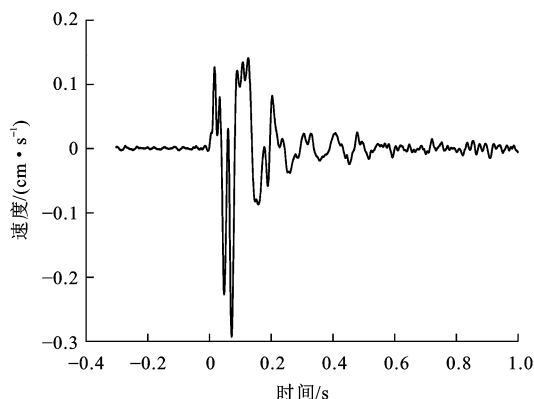


图 2 z 方向速度时程曲线

Fig. 2 Velocity-time History Curve in the z -direction

2 结果分析

2.1 速度分析

利用 Matlab 中自带的 FFT 函数对速度信号 $f(t)$ 做快速傅里叶变换,将时域信号变换为频域信号 $F(\omega)$ ^[13-14],并进一步求出功率谱($P(\omega)$)。其表达式为

$$P(\omega) = \frac{1}{2\pi} |F(\omega)|^2$$

由图 3 可知,功率谱只有一个峰值,主频为 9.463 Hz,频率集中分布在 0~50 Hz 之间,能量主要集中在

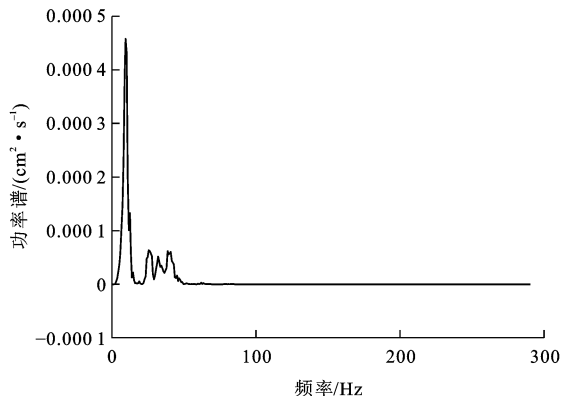


图 3 功率谱

Fig. 3 Power Spectrum

低频部分。

《爆破安全规程》(GB 6722—2014)对不同类型建筑物的振动安全标准提出具体要求^[15],其主要内容见表 1。 z 方向速度最大值为 0.292 8 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,主频为 9.463 Hz。按照一般民用建筑标准判断,距试验钻孔 10 m 处速度峰值在允许范围内(表 1),可知二氧化碳相变致裂与传统爆破相比更加安全。

表 1 爆破振动安全允许标准

Tab. 1 Blasting Vibration Safety Allowance Standard

保护对象类别	安全允许质点振动速度 $v/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$		
	$f \leq 10 \text{ Hz}$	$10 \text{ Hz} < f \leq 50 \text{ Hz}$	$f > 50 \text{ Hz}$
土窑洞、土坯房、毛石房屋	0.15~0.45	0.45~0.90	0.90~1.50
一般民用建筑	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0
工业和商业建筑	2.5~3.5	3.5~4.5	4.2~5.0
一般古建筑与古迹	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.5

注: f 为主振频率。

2.2 加速度去噪

对速度信号直接微分,得到如图 4 所示的加速度信号。由图 4 可见,加速度信号包含高频噪声成分,这是因为微分运算本身会将较弱的趋势项放大,造成加速度的高频振荡,导致加速度信号的严重失真^[16]。为获得理想的二氧化碳相变致裂器爆破振动加速度信号,必须对图 4 中信号的高频成分进行去噪处理。

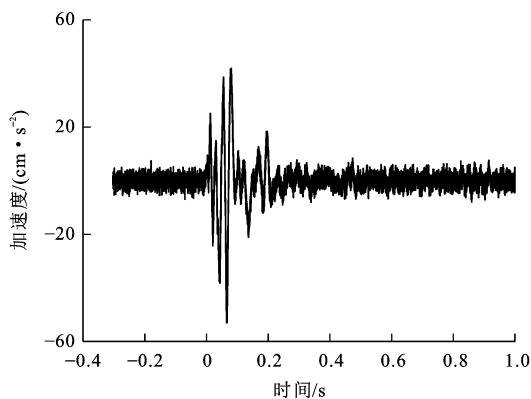


图 4 直接微分得到的加速度时程曲线

Fig. 4 Acceleration-time History Curve Obtained by Direct Differential

常用的信号去噪方法有小波分析^[17]、经验模态分解(EMD)^[18]及集合经验模态分解(EEMD)^[19]等。郑浩等证明了集合经验模态分解在处理振动信号方面的优越性^[20-22],因此,本文采用集合经验模态分解对加速度信号进行去噪处理。

集合经验模态分解的基本原理是在原始数据中

混入白噪声信号,再将重组信号进行经验模态分解,经过多次平均处理获取 IMF 分量,由于白噪声信号在整个频域内均匀分布,所以经多次处理后的噪声可忽略不计。

直接微分得到的加速度信号经集合经验模态分解后得到 IMF 分量(图 5)。各方向上的 IMF 分量按照从高频到低频的顺序依次排列,体现了集合经验模态分解的多分辨率性和自适应性。信号中的噪声主要存在于高频部分,将信号进行低通滤波处理,

即去掉高频分量 IMF1~IMF3,把其余分量重新组合,得到去噪后的信号(图 6)。

为验证信号经集合经验模态分解处理后的去噪效果,分别计算 x 、 y 、 z 方向加速度信号处理后的信噪比。其计算公式为

$$\gamma_{\text{SNR}} = 10 \log \frac{p_s}{p_n}$$

式中: γ_{SNR} 为信噪比; p_s 为去噪后信号的有效功率; p_n 为噪声的有效功率。

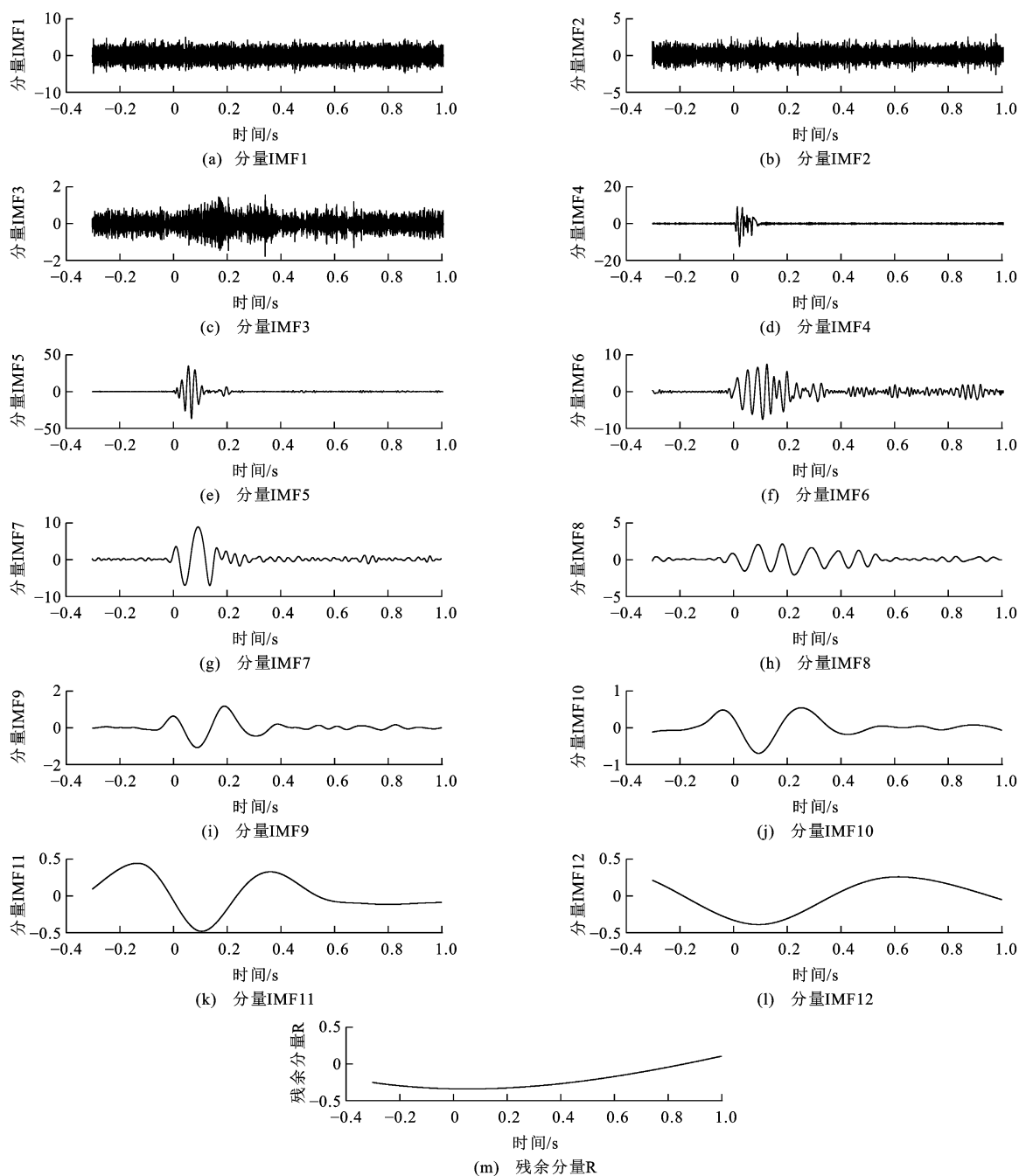


图 5 加速度的集合经验模态分解

Fig. 5 Ensemble Empirical Mode Decompositions of Acceleration

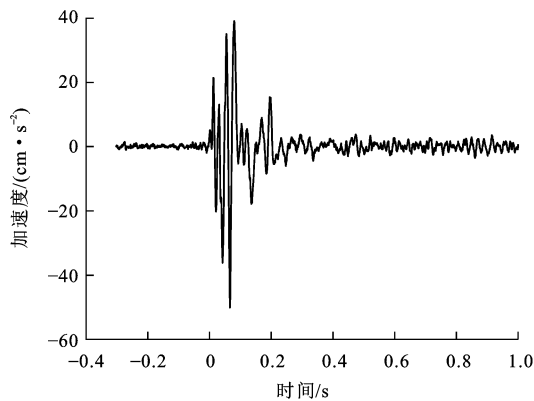


图 6 经集合经验模态分解去噪后的加速度时程曲线
Fig. 6 Acceleration-time History Curve after Denoising by Ensemble Empirical Mode Decomposition

x 、 y 、 z 方向加速度经集合经验模态分解和低通滤波处理后提高了信噪比(表 2),曲线更加准确清晰,保留了原信号波形本身的非平稳特性,去噪效果明显。

2.3 反应谱分析

反应谱是地震工程领域较为成熟的分析方法,该方法综合考虑了信号的频谱、幅值以及结构自身的动力特性(包括阻尼比、自振周期等),将地震的振

表 2 不同方向加速度经集合经验模态分解去噪后的信噪比
Tab. 2 Signal to Noise Ratio after Denoising by Ensemble Empirical Mode Decomposition of Acceleration in Different Directions

加速度方向	x 方向	y 方向	z 方向
$\gamma_{\text{SNR}}/\text{dB}$	25.148 5	39.320 4	25.547 3

动效应与结构的动力响应结合起来^[23-27]。常用计算反应谱的方法有很多,如傅里叶变换法、线性加速度法等。本文用精确法对去噪后的加速度信号进行反应谱分析。此方法是将地面运动的加速度记录相邻点间的值用分段线性差值表示,从而获得地面运动的连续表达式。得到的结果全部采用精确的分析方法,无任何舍入误差和截断误差,因此,不会引起数值计算上的误差,具有较高精度。

对图 6 中的经集合经验模态分解去噪后的加速度信号分别取结构阻尼比(ξ)为 0、0.05、0.10 进行计算,得到不同阻尼比下的反应谱(图 7)。由图 7 可知:①二氧化碳相变致裂的相对位移与相对速度反应谱类似,绝对加速度与标准加速度反应谱相似,曲线有且仅有一个尖峰,形态简单,有利于结构安全;②当结构自振周期为 0 时,相对位移与相对速度

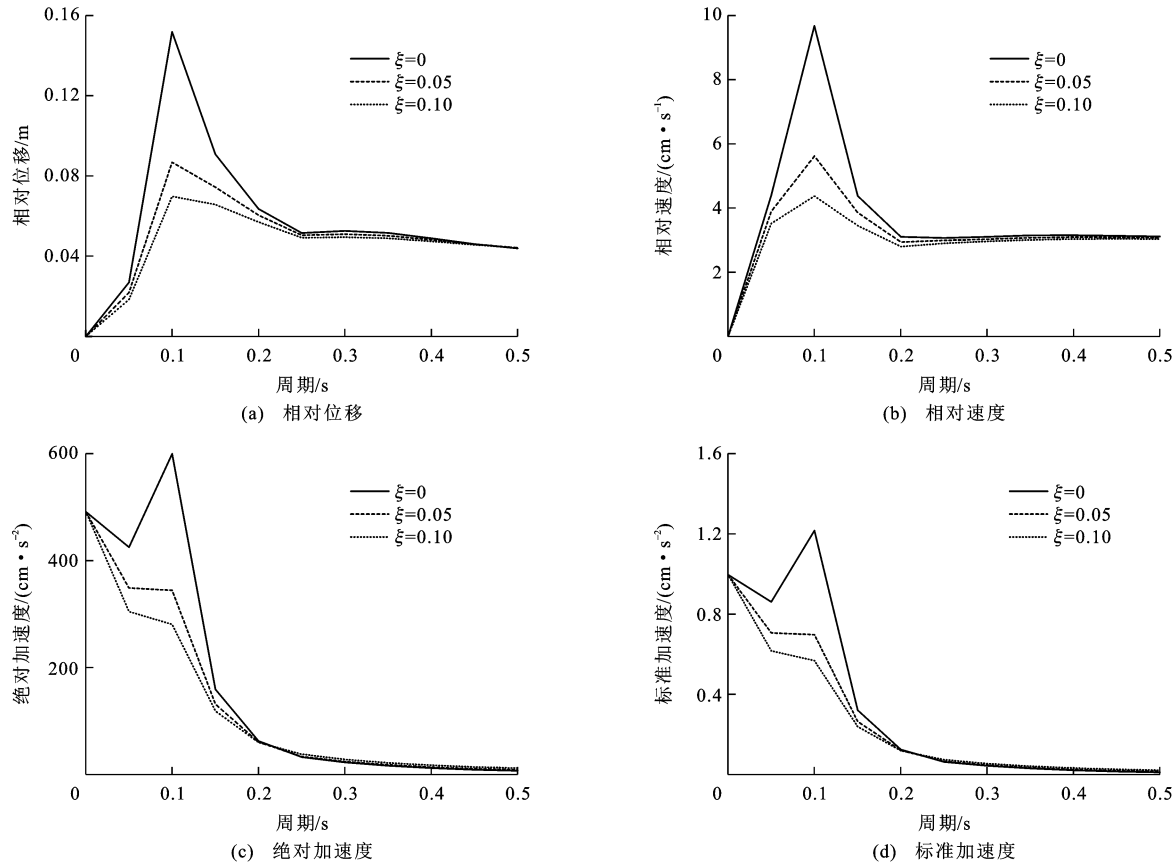


图 7 不同阻尼比下的反应谱
Fig. 7 Response Spectrums Obtained with Different Damping Ratios

反应谱为 0, 绝对加速度接近 $500 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$, 标准加速度约为 $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$, 说明结构运动与由二氧化碳相变致裂引起的地面振动能保持一致; ③不同阻尼比下的反应谱峰值大小不一, 无阻尼情况下各反应谱峰值最大, 相对位移和相对速度反应谱峰值随着阻尼比增大而减小, 但对应的周期不变, 绝对加速度和标准加速度峰值在阻尼比不为 0 时相等, 不受阻尼比影响; ④各反应谱峰值对应的周期均出现在 0.1 s, 说明此次现场试验对结构周期为 0.1 s 的建筑物影响最大, 应在二氧化碳相变致裂开始前对结构周期在 0.1 s 附近的建筑物加以防范。

3 结 语

(1) 二氧化碳相变致裂所产生的信号频率多集中于低频, 主频与峰值速度在安全允许范围内, 与传统爆破相比更加安全, 适用于在城市或其他对振动敏感的环境下施工。

(2) 利用集合经验模态分解可有效抑制因对二氧化碳相变致裂速度信号直接微分引起的高频振荡效应, 信噪比可超过 25 dB。

(3) 将去噪后的加速度信号作为输入信号求解不同阻尼比下的反应谱, 发现二氧化碳相变致裂引起的反应谱形态简单, 峰值对应周期较小, 有利于结构物安全。

(4) 相对位移和相对速度反应谱峰值随阻尼比的增大而减小; 阻尼比不为 0 情况下, 绝对加速度和标准加速度反应谱峰值不受阻尼比影响; 注意反应谱上对结构影响大的周期, 可以在一定程度上保证结构的稳定性。

参 考 文 献 :

References :

- [1] ANON. Cardox System Brings Benefits in the Mining of Large Coal[J]. Coal International, 1995, 243(1): 27-28.
- [2] SINGH S P. Non-explosive Applications of the PCF Concept for Underground Excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(3): 305-311.
- [3] 郭志兴. 液态二氧化碳爆破筒及现场试爆[J]. 爆破, 1994, 11(3): 72-74.
GUO Zhi-xing. Liquid Carbon Dioxide Blasting Cylinder and Field Test Explosion[J]. Blasting, 1994, 11(3): 72-74.
- [4] 詹德帅, 黄亮高, 邱天德. 高压二氧化碳爆破增透机理及试验研究[J]. 建井技术, 2016, 37(6): 31-34.

ZHAN De-shuai, HUANG Liang-gao, QIU Tian-de. Study on Mechanism and Experiment of High Pressure Carbon Dioxide Blasting and Permeability Improved Technology[J]. Mine Construction Technology, 2016, 37(6): 31-34.

- [5] 贺超. 基于二氧化碳深孔致裂增透技术的低透煤层瓦斯治理[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 67-72.
HE Chao. Gas Control of Low Gas Permeability Seam Based on Deep Borehole Fracturing and Permeability Improved Technology with Carbon Dioxide[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 67-72.
- [6] 薛飞. 二氧化碳爆破技术在高速公路施工中的应用[J]. 中国科技纵横, 2016(22): 93.
XUE Fei. Application of Carbon Dioxide Blasting Technology in Expressway Construction[J]. China Science and Technology Overview, 2016(22): 93.
- [7] 王军, 肖永胜. 用二氧化碳爆破技术开采某石灰石矿的大理石材[J]. 现代矿业, 2015(6): 15-17.
WANG Jun, XIAO Yong-sheng. Marble Stone Is Mined in a Limestone Mine Based on Carbon Dioxide Blasting Technology[J]. Modern Mining, 2015(6): 15-17.
- [8] 陶明, 赵华涛, 李夕兵, 等. 液态 CO_2 相变致裂破岩与炸药破岩综合对比分析[J]. 爆破, 2018, 35(2): 41-49.
TAO Ming, ZHAO Hua-tao, LI Xi-bing, et al. Comprehensive Comparative Analysis of Liquid CO_2 Phase Change Fracturing and Explosive Rock Fracturing[J]. Blasting, 2018, 35(2): 41-49.
- [9] 黄园月, 唐春晓, 尹岚岚. 二氧化碳致裂器快速充装系统的研制[J]. 煤矿机械, 2015, 36(7): 114-115.
HUANG Yuan-yue, TANG Chun-xiao, YIN Lan-lan. Development on Fast Filling System of Carbon Dioxide Fracturing Facility[J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(7): 114-115.
- [10] 黄晓实, 张范立, 张政, 等. 二氧化碳致裂器在岩石中深孔预裂爆破中的应用研究[J]. 爆破, 2017, 34(3): 131-135.
HUANG Xiao-shi, ZHANG Fan-li, ZHANG Zheng, et al. Study on Application of CO_2 Fracturing Apparatus in Pre-splitting Blasting of Rock Deep Hole[J]. Blasting, 2017, 34(3): 131-135.
- [11] 王伟, 年军, 刘啸, 等. CO_2 相变致裂增透技术在高瓦斯低渗透性厚煤层应用研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(8): 167-168.
WANG Wei, NIAN Jun, LIU Xiao, et al. Application of Carbon Dioxide Phase Change Technology in High Gas and Low Permeability Thick Coal Seam[J]. Coal Technology, 2017, 36(8): 167-168.
- [12] 赵龙, 王兆丰, 孙矩正, 等. 液态 CO_2 相变致裂增透

- 技术在高瓦斯低透煤层的应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 75-79.
- ZHAO Long, WANG Zhao-feng, SUN Ju-zheng, et al. Application of Permeability Improvement Technology with Liquid CO₂ Phase Transition Fracturing to High Gassy and Low Permeability Seam[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 75-79.
- [13] 罗新, 牛海清, 胡日亮, 等. 一种改进的用于快速傅里叶变换功率谱中的窄带干扰抑制的方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 167-175, 200.
- LUO Xin, NIU Hai-qing, HU Ri-liang, et al. A Modified Method of Suppressing Narrow-band Interference Using Fast Fourier Transform Power Spectrum[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 167-175, 200.
- [14] 赵淑红, 朱光明. 相位在地震勘探中的用途及研究[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(4): 87-89.
- ZHAO Shu-hong, ZHU Guang-ming. Application and Research of Phase in Seismic Prospecting[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2005, 27(4): 87-89.
- [15] GB 6722—2014, 爆破安全规程[S].
- GB 6722—2014, Safety Regulations for Blasting[S].
- [16] 赵明生. 基于能量原理的中深孔台阶爆破振动效应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- ZHAO Ming-sheng. Vibration Effect of Moderate-long Hole Bench Blasting Based on Energy Principle[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [17] 吴伟, 蔡培升. 基于 MATLAB 的小波去噪仿真[J]. 信息与电子工程, 2008, 6(3): 220-222, 229.
- WU Wei, CAI Pei-sheng. Simulation of Wavelet Denoising Based on MATLAB[J]. Information and Electronic Engineering, 2008, 6(3): 220-222, 229.
- [18] 李夕兵, 张义平, 左宇军, 等. 岩石爆破振动信号的 EMD 滤波与消噪[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(1): 150-154.
- LI Xi-bing, ZHANG Yi-ping, ZUO Yu-jun, et al. Filtering and Denoising of Rock Blasting Vibration Signal with EMD[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(1): 150-154.
- [19] 李军, 李佳, 张世义, 等. 采用 EEMD 算法与互信息法的机械故障诊断方法[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2018, 39(1): 7-13.
- LI Jun, LI Jia, ZHANG Shi-yi, et al. Mechanical Fault Diagnosis Method Using EEMD Algorithm and Mutual Information Method[J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science, 2018, 39(1): 7-13.
- [20] 郑浩, 朱胜龙, 欧阳昱, 等. 基于改进 HHT 算法的 GIS 机械振动信号时频分析[J]. 电气自动化, 2018, 40(1): 15-18.
- ZHENG Hao, ZHU Sheng-long, OU Yang-yu, et al. Time-frequency Analysis of GIS Mechanical Vibration Signals Based on Improved HHT Algorithm[J]. Electrical Automation, 2018, 40(1): 15-18.
- [21] 陈朝朋, 朱娜, 杨欢, 等. 基于 EEMD 及自适应滤波的轧辊磨损振动特征提取[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(1): 40-47.
- CHEN Zhao-peng, ZHU Na, YANG Huan, et al. Vibration Feature Extraction of Roll Wear Based on EEMD and Adaptive Filtering[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(1): 40-47.
- [22] 任玉卿, 王海瑞, 齐磊, 等. 基于振动信号能量熵的轴承故障诊断[J]. 计算机应用与软件, 2017, 34(9): 283-287.
- REN Yu-qing, WANG Hai-rui, QI Lei, et al. Bearing Fault Diagnosis Method Based on Energy Entropy of Vibration Signal[J]. Computer Application and Software, 2017, 34(9): 283-287.
- [23] 谭启迪, 薄景山, 郭晓云, 等. 反应谱及标定方法研究的历史与现状[J]. 世界地震工程, 2017, 33(2): 46-54.
- TAN Qi-di, BO Jing-shan, GUO Xiao-yun, et al. History and Current Situation of Research on Response Spectrum and the Calibrating Methods[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(2): 46-54.
- [24] 范磊, 龙源, 郭涛, 等. 基于反应谱理论的爆破振动破坏评估标准分析[J]. 爆破, 2010, 27(1): 5-10.
- FAN Lei, LONG Yuan, GUO Tao, et al. Harm Evaluation Standard Analysis of Blasting Vibration Based on Response Spectrum Theory[J]. Blasting, 2010, 27(1): 5-10.
- [25] 赵明生, 张亚文, 徐海波, 等. 不同微差间隔下爆破振动信号的反应谱分析[J]. 爆破, 2011, 28(1): 28-32.
- ZHAO Ming-sheng, ZHANG Ya-wen, XU Hai-bo, et al. Response Spectrum Analysis of Blasting Vibration Signal with Different Microsecond Delay Time[J]. Blasting, 2011, 28(1): 28-32.
- [26] 支成江, 陶铁军. 基于反应谱的爆破震动信号分析[J]. 现代矿业, 2014(12): 33-36.
- ZHI Cheng-jiang, TAO Tie-jun. Analysis of Blasting Vibration Signal Based on Response Spectrum[J]. Modern Mining, 2014(12): 33-36.
- [27] 赵铁军, 姜殿科, 周明, 等. 隧道周边孔爆破振动信号分析[J]. 工程爆破, 2017, 23(5): 38-43.
- ZHAO Tie-jun, JIANG Dian-ke, ZHOU Ming, et al. Vibration Signal Analysis of Tunnel Periphery Hole Blasting[J]. Engineering Blasting, 2017, 23(5): 38-43.