

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.009

## 装药结构对爆破振动能量传递的影响研究\*

苟倩倩<sup>1</sup>,赵明生<sup>1,2</sup>,张光雄<sup>3</sup>,池恩安<sup>1,2</sup>,余红兵<sup>2</sup>,余伟成<sup>4</sup>

(1. 贵州大学矿业学院, 贵阳 550025; 2. 保利新联爆破工程集团有限公司, 贵阳 550002;  
3. 保利民爆哈密有限公司, 哈密 839000; 4. 武汉爆破有限公司, 武汉 430000)

**摘要:** 针对某石方钻爆工程单耗大、临近建(构)筑物振动响应较大问题,现场进行了连续耦合装药、径向不耦合装药、中部空气间隔装药及水不耦合装药的4组爆破试验。将测得的试验数据进行基于CEEMDAN的光滑降噪模型去噪,以各频带与原始信号的相关系数及均方误差为指标,筛选出优势分量,通过计算其能量值来判断4种装药结构下爆破振动的破坏力大小,并且对比分析了4种工况下岩体爆破块度。结果表明:空气不耦合装药爆破振动速度-时程曲线携带的能量最小,破坏力最小,水不耦合装药次之,但水不耦合装药爆破能有效降低岩石大块率及粉尘危害。

**关键词:** 装药结构; 爆破振动; 信号降噪; 能量传递

**中图分类号:** X936      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-487X(2020)01-0065-07

## Effect of Charge Structure on Energy Transfer of Blasting Vibration

GOU Qian-qian<sup>1</sup>, ZHAO Ming-sheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Guang-xiong<sup>3</sup>, CHI En-an<sup>1,2</sup>, YU Hong-bing<sup>2</sup>, YU Wei-cheng<sup>4</sup>

(1. Mining College of Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. BaoLi XinLian Blasting Engineering Group Co Ltd, Guiyang 550002, China;

3. Poly Explosive Hami Co Ltd, Hami 839000, China;

4. Hubei Wuhan Blasting Co Ltd, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** To solve the problems of large single consumption and large vibration response of adjacent buildings (structures) in a rock drilling blasting project, four sets of blasting tests about the continuous coupling charge, radial uncoupled charge, central air-decked charge and water uncoupled charge were carried out on site. The measured test data were denoised based on the CEEMDAN smooth noise reduction model. The correlation coefficient and mean square error between each frequency band and the original signal were taken as indicators to select the dominant components. The energy values were calculated to judge the destructive force of blasting vibration under the four types of charging structures, and the rock fragmentation under four working conditions was compared and analyzed. The results show that the vibration velocity-time history curve of the air-uncoupled charge blasting has the smallest energy and the least destructive force, followed by the water-uncoupled charge blasting, but the water-uncoupled charge blasting can effectively reduce the rock mass and dust hazard.

**Key words:** charge structure; blasting vibration; signal noise reduction; energy transfer

收稿日期: 2019-06-27

作者简介: 苟倩倩(1993-), 女, 陕西咸阳人, 硕士, 主要从事爆破工程研究与安全技术研究, (E-mail)1093191798@qq.com。

通讯作者: 赵明生(1982-), 男, 黑龙江双城市人, 博士、研究员, 主要从事爆破工程与安全技术研究, (E-mail)99113294@qq.com。

基金项目: 贵州省高层次创新型人才培养(百层次)-黔科合人才(2016)4030号; 2017年新疆维吾尔自治区天池百人计划

在岩土工程的钻爆过程中,装药结构的改变对振动能量传递及爆破效果都有一定的影响,其主要原因是介质的改变会使得波在传播的过程中发生衰减,使得作用在岩石上的初始脉冲压力有所改

变。建(构)筑物在受地震波的影响主要变现为“塑性累积损伤”和“最大位移首次超越”两种破坏形式,最大瞬时输入能量会引起结构较大的位移增量,如果超过结构最大允许位移就会破坏;如果未超过最大允许值就会引起塑性变形及累积破坏<sup>[1]</sup>。文献[2]分别对耦合装药、空气不耦合装药、水不耦合装药进行了理论分析,得出水不耦合介质的储能作用最强,空气不耦合介质的储能作用次之,最后是耦合装药。此外,炸药与孔壁的接触情况,即耦合系数也是重要影响因素。一般情况下,耦合装药爆破时,其产生的应力波峰值最大,持续时间最短;而随着不耦合系数增大,应力波峰值逐渐减小,持续时间有所延长<sup>[3]</sup>。学者们应用试验、理论分析、数值模拟对装药结构对爆炸产生的应力分布及效果影响有了大量的研究<sup>[4-8]</sup>,但对装药结构对爆破振动信号所携带的能量及其破坏力大小的研究甚少。因此,研究不同装药结构爆破振动信号能量对提高炸药利用率及建(构)筑物抗震能量分析极为迫切。

鉴于此,对不同装药结构进行了现场试验研究,通过将各工况下振动信号进行CEEMDAN分解的IMFS重新计算组合得到降噪算法,以降噪均方差及曲线曲折度定义的最小函数目标值作为判定准则进行判定模型降噪程度,并分别对各组降噪后的振动信号进行时频分析,分析不同装药结构情况下爆破振动能量分布的规律、破坏力大小及爆破效果。

## 1 信号降噪模型建立及HHT分析

### 1.1 CEEMDAN及HHT简介

自适应噪声完备经验模态分解(Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise, CEEMDAN)是近几年Torres提出的<sup>[9]</sup>,它由EMD分解改进而来,其通过在每个EMD分解时添加有限次自适应白噪声,计算唯一余项获取固有模态,实现精确的信号特征提取<sup>[10]</sup>。CEEMDAN分解不但克服了EMD分解时的模态混叠问题,而且还解决了EEMD分解时完备性较差及多次增加集成次数来降低重构误差而导致的计算效率低的问题<sup>[11]</sup>。

对CEEMDAN分解得到的IMF分量进行Hilbert变换,即可得到每个IMF分量的瞬时频谱,把所得到的所以IMF分量的瞬时频谱全部加起来就可以得到原始信号的Hilbert谱。Hilbert变换通过线性变换

得到的瞬时频率,该方法强调了原始信号的局部特性,避免了傅立叶变换会产生信号本身没有的高、低频成分,具有直观的物理含义<sup>[12]</sup>。

### 1.2 信号降噪模型的建立

#### (1) 设计滤波器

将CEEMDAN分解的IMFS通过组合构成高通、低通、带通的滤波器<sup>[13]</sup>。假设由CEEMDAN分解出的IMFS有 $N$ 个(不包含余项),则滤波算法具体的表达式为

$$A1 = s(n) - IMF1$$

$$A2 = s(n) - IMF1 - IMF2$$

$$A3 = s(n) - IMF1 - IMF2 - IMF3$$

...

$$An = s(n) - IMF1 - IMF2 - IMF3 - \dots - IMF_n(1)$$

#### (2) 定义曲线曲折度及降噪均方误差

为判定上述滤波算法的优劣性,现由曲线的曲折度和降噪均方误差指标来判断算法有效性。

设有两条曲线 $P(t)$ 、 $Q(t)$ ( $0 \leq t \leq 1$ ),如果曲线 $P$ 在点 $P(1)$ 处的二阶倒数等于曲线 $Q$ 在点 $Q(0)$ 的二阶倒数,则曲线光滑。

$$K_{P(1)} = \frac{|P''(1)|}{|1 + P'(1)|^{3/2}} + \frac{|Q''(0)|}{|1 + Q'(0)|^{3/2}} = K_{Q(0)}(2)$$

将点 $P(1)$ 、 $Q(0)$ 处的二阶倒数按照离散公式展开得

$$P''(1) \approx \frac{P(1-2h) - 2P(1-h) + P(1)}{h^2}(3)$$

$$Q''(0) \approx \frac{Q(1+2h) - 2Q(0+h) + Q(0)}{h^2}(4)$$

由于曲线光滑,则点 $P(1)$ 、 $Q(0)$ 一阶导数相等,即可得到在 $x=x_0$ 点处的光滑指标

$$SN_{x=x_0} = f(x_0+2h) - f(x_0-2h) - 2[f(x_0+h) - f(x_0-h)](5)$$

式中: $h$ 为步长,取值1;当 $x_0$ 趋于零时, $x_0$ 附近的点对应曲线越光滑,即曲折度越小,信号降噪曲线越光滑,越偏离原始含噪信号。

设原始信号为 $s_i$ ,降噪后的信号为 $\bar{s}_i$ ,则降噪偏差均方差可定义为

$$MES = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{s}_i - s_i)^2}{n}}(6)$$

由式(6)可知,降噪均方误差越小,降噪信号曲线越接近原始信号曲线,即降噪均方误差越小,降噪信号曲线与原始信号相似度越高。

(3) 基于CEEMDAN最优降噪光滑模型判定准则

通过上述定义可知, 滤波算法的曲折度指标  $SMSE_f$  的值越小, 降噪后的信号曲线越光滑; 降噪均方误差  $MSE_f$  的值越小, 降噪信号与原始信号相似度越高, 因此, 建立约束条件

约束条件

$$\begin{cases} \min \{SMSE_f\} \\ \min \{MSE_f\} \end{cases} \quad (7)$$

则爆破振动信号滤波算法目标函数可以写成

$$\min \{f\} = \min \{aSMSE_f + (1 - a)MSE_f\} \quad (8)$$

式中,  $\alpha$  为曲线降噪均方误差的权重因子,  $1-\alpha$  为曲线曲折度的权重因子。

## 2 现场试验

结合贵阳市龙洞堡机场场平爆破工程, 对耦合装药、径向不耦合、轴向空气间隔以及水不耦合装药进行了 4 组爆破实验。施工区主要为中风化白云岩, 以闭合隐节理为主, 岩体普氏系数为 6~8。4 组实验单孔装药结构如图 1 所示, 其中, 孔深 10 m, 炮孔直径 115 cm, 单孔药量 64 kg, 选用 2 号岩石乳化炸药, 径向不耦合装药中药卷直径 75 cm, 不耦合系数  $k=1.53$ ; 轴向中部空气间隔装药中, 空气层比例为装药长度的 15%<sup>[14]</sup>, 装药时采用直径 110 cm 的

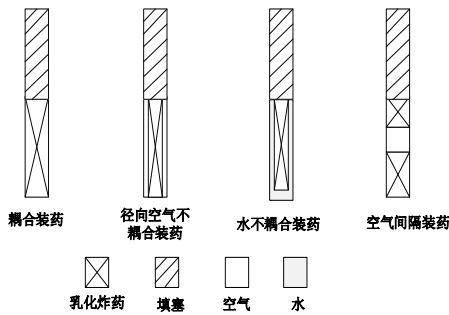


图 1 四种装药结构图

Fig. 1 Four charge structure diagrams

PVC 管间隔装药; 水不耦合装药中注水长度也为装药长度的 15%。测点分别布置在距离炮孔 30 m 处。现场试验装药参数如表 1 所示, 空气间隔与水孔装药实验如图 2 所示。

## 3 基于 CEEMDAN 的最优降噪光滑模型的信号时频分析

### 3.1 振动信号降噪处理

现分别选取 4 组实验 20 m 处的垂直速度-时程曲线进行分析<sup>[15]</sup>, 如表 2 所示。连续耦合装药、径向不耦合装药、空气间隔装药及水不耦合装药的爆破振动信号分别记为  $S1$ 、 $S2$ 、 $S3$ 、 $S4$ 。为精确提取原始信号中有用的特征信息, 现将信号  $S1$ 、 $S2$ 、 $S3$ 、 $S4$  垂直速度-时程数据分别进行基于 CEEMDAN 的光滑降噪算法去噪。4 个信号经分解后分别产生了 12 个固有模态分量及余项, 经式 (1) 分别产生了 12 个算法,  $\alpha$  分别取 0.1~0.3 时, 算法 A5 的目标函数都最小, 其次是算法 A4; 当  $\alpha$  分别取 0.4~0.9 时, 算法 A4 的目标函数最小, 在此取  $\alpha$  为 0.4 作为降噪均方误差的权重因子选取目标函数确定最优算法。限于文章篇幅, 现列取信号  $S1$  垂直速度的最优算法对比及原始图和降噪信号的对比图, 如图 3、图 4 所示。信号  $S2$ 、 $S3$ 、 $S4$  也做同样降噪处理。由图 3 可知: 在 12 个算法中, 算法 4 的目标函数最小, 故采用算法 4 对信号  $S1$  进行降噪。



图 2 中部空气间隔、水不耦合装药

Fig. 2 Central air separation, water uncoupled charge

表 1 试验参数表

Table 1 Test parameter table

装药结构	孔数/个	孔深/m	孔径/cm	药卷直径/cm	装药长度/m	单孔药量/kg
连续耦合	6	10	115	75	4.9	64
径向不耦合	6	10	115	75	5.3	64
空气间隔	6	10	115	75	5.8	64
水不耦合	6	10	115	75	5.8	64

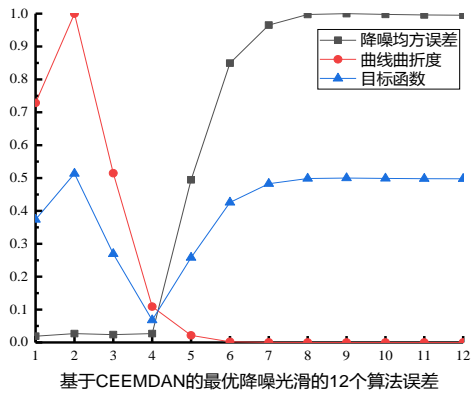


图3 信号S4分解后降噪算法误差

Fig. 3 Noise reduction algorithm error after signal S4 decomposition

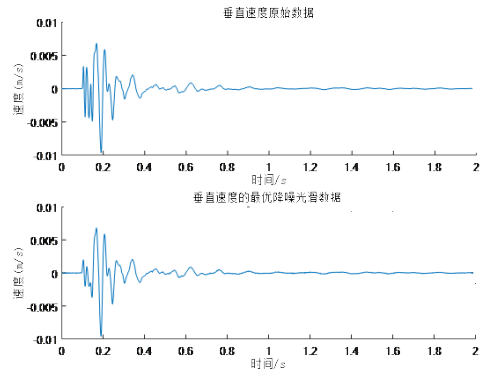


图4 信号S4原始及降噪图

Fig. 4 Signal S4 original and noise reduction map

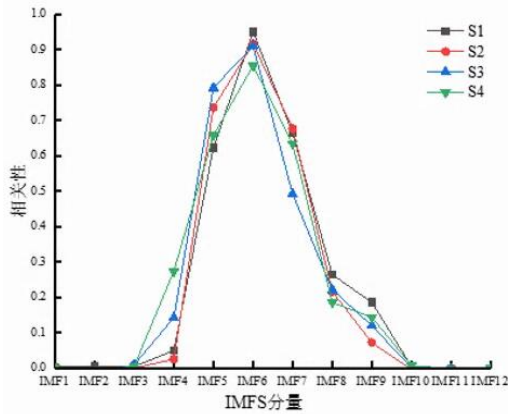


图5 信号S1、S2、S3、S4各分量与原信号相关性

Fig. 5 Correlation between the components of the signals

S1, S2, S3, and S4 and the original signal

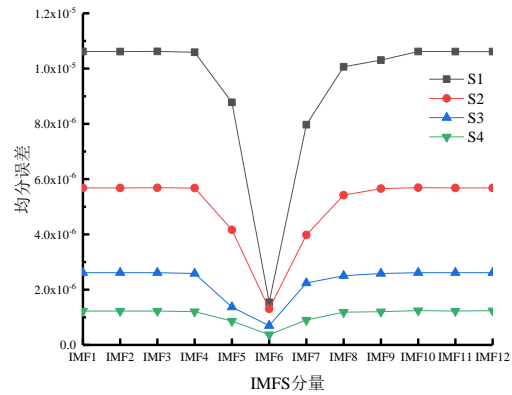


图6 信号S1、S2、S3、S4各分量与原信号均方误差

Fig. 6 The mean square error of the components S1, S2, S3,

S4 and the original signal

表2 测点20m处速度原始数据

Table 2 Speed raw data at 20 m

信号	水平径向速度 /(cm·s <sup>-1</sup> )	主频/Hz	水平切向速度 /(cm·s <sup>-1</sup> )	主频/Hz	垂直速度 /(cm·s <sup>-1</sup> )	主频/Hz
S1	2.08	14.71	1.46	14.09	1.99	23.81
S2	1.50	15.87	1.12	20.83	1.92	19.23
S3	1.21	15.87	1.03	19.23	1.25	23.81
S4	0.61	14.93	0.55	18.52	1.21	22.22

3.2 不同装药结构下信号优势分量筛选

为分析4种不同装药结构爆破振动信号所携带的能量,现将其去噪信号进行CEEMDAN分解后分别得到13个IMFS,为进一步了解每个IMFS与原始信号的相关性和密切程度,分别计算相关系数及与原始信号的均方误差(去掉余项),如图5、图6所示。可以看出:4种装药结构下爆破振动信号经CEEMDAN分解的固有模态分量IMF6的相关性最大,IMF5、IMF7次之;4种装药结构下经CEEMDAN分

解的固有模态分量的均方误差都在10<sup>-5</sup>数量级以下,其中信号S2、S3、S4分解的固有模态分量都达到了10<sup>-6</sup>数量级,说明经CEEMDAN分解固有模态分量与原始信号的误差极小。四种装药结构下经CEEMDAN分解的固有模态分量IMF5~IMF7的相关性较大,均方误差较小。因此,在通过Hilbert变换后,主要选择IMF5~IMF7优势分量的所占能量进行比较分析,其能准确的体现原始信号的特征信息。

### 3.3 不同装药结构下信号时频分析

表 3 为各信号优势分量能量及总能量分布情况, 可以看出信号 S1、S2、S3、S4 的总能量分别为 0.0502、0.0282、0.0068、0.0122; 其所分解的 IMF5~IMF6 所占总能量的百分比分别为 93.7%、86.9%、87.1%、95.2%, 即在装药量等实验参数相同的情况下, 连续耦合装药的振动信号所携带的能量最大, 径向不耦合装药和空气间隔装药次之, 水不耦合装药最小。

图 7 给出了信号 S1、S2、S3、S4 的三维能量谱,

它可以直观的反应出幅值能量和频率随时间变化的规律。4 种装药结构下爆破振动信号的能量主要集中在 10~50 Hz, 高于 50 Hz 的频率携带的能量较少, 并且持续时间不超过 0.5 s; 站在总能量角度, 结合幅值坐标及染色棒刻度数值, 四种装药结构下爆破振动信号所携带的能量从大到小依次为 S1、S2、S3、S4。另外, 在时间 0.5 s 和频率 80 Hz 以后信号 S1~S4 所携带的能量几乎为零, 这进一步说明了基于 CEEMDAN 分解的光滑降噪算能有效去掉高频噪声, 精确提取了爆破振动信号所携带的有用信息。

表 3 信号 S1、S2、S3、S4 优势分量能量比  
Table 3 Signal S1, S2, S3, S4 dominant component energy ratio

	能量				百分比%			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
IMF5	0.0031	0.0026	0.0034	0.0008	6.3	9.2	27.8	12.2
IMF6	0.0385	0.0184	0.0076	0.0044	76.7	65.3	62.1	64.7
IMF7	0.0054	0.0035	0.0006	0.0007	10.7	12.4	5.3	10.2
总能量、百分比	0.0502	0.0282	0.0122	0.0068	100.0	100.0	100.0	100.0

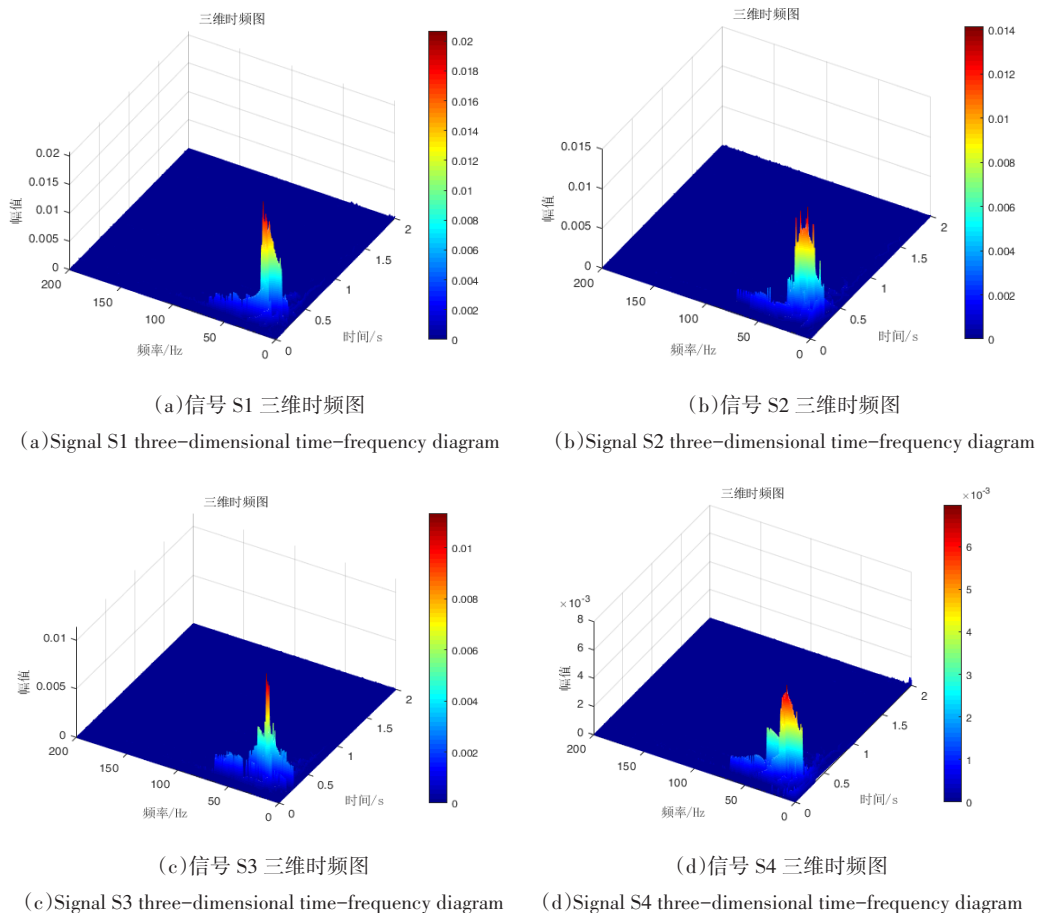


图 7 信号 S1、S2、S3、S4 三维时频图

Fig. 7 Three-dimensional time-frequency diagram of signals S1, S2, S3, and S4

图8以4种信号各个频带总能量为指标进一步反映了信号各频带破坏力大小,可以看出:信号S1分解的固有模态分量IMF5~IMF7所占能量明显大于信号S2、S3和S4,在每个信号的IMFS所占能量趋势上也呈现出信号S1最大,信号S2和S4次之,S3最小。

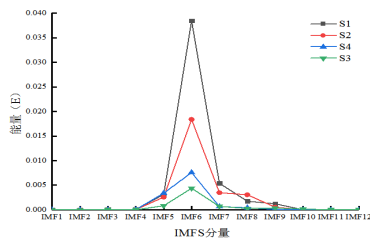


图8 信号S1、S2、S3、S4各分量破坏力大小

Fig. 8 The magnitude of the destructive force of the components S1, S2, S3, and S4

#### 4 不同装药结构爆破效果对比

图9为4种装药结构下爆破后的岩石块度对比图,可以看出4种装药结构在相同实验条件下爆破效果差别较大。连续耦合装药时,大块度岩石所占比例较大,需要二次破碎;径向不耦合装药岩石大块率有所下降,但也不利于铲装;轴向空气间隔装药和水不耦合装药爆破后大块率明显下降,水不耦合装药岩石块度更为均匀,并且有效减少了爆破粉尘。

通过上述分析可知,该地质条件及实验参数相同的情况下不同装药结构爆破振动信号透射到岩石的能量也不同,即在装药量、孔深、孔径等参数一样的情况下,连续耦合装药的振动信号所携带的能量最大,破坏力最大,径向不耦合装药和水不耦合装药次之,空气间隔装药破坏力最小。

此因炸药爆炸产生的炮轰产物进一步膨胀使得岩石的极限破碎强度随着爆轰压力的加载速度的增加而增加,连续耦合装药时,由于炸药与孔壁直接接触,使得初始脉冲压力作用于岩石,在岩石破碎区的耗能就有所增大,导致粉碎区以外产生大块岩石;而空气不耦合装药与水不耦合装药中的空气介质和水介质都使得应力波的作用时间增大,进而增大了应力波传递给岩石的比能量,炮轰产物在形成岩石中的准静态应力场后贯通各个炮孔,增加了破碎区的范围。但是由于水的密度远大于空气密度,比空气的压缩性小,降低了消耗在介质压缩变形上的能量,进一步提高了炸药能量利用率,并且一定程度的降低了爆破粉尘。



(a)连续耦合装药



(b)径向不耦合装药

(a)Continuous coupling charge (b)Radial uncoupling charge



(c)轴向中部空气间隔装药



(d)水不耦合装药

(c)Axial central air space charge (d)Water uncoupled charge

图9 四种装药结构爆破效果

Fig. 9 Four charge structure blasting effects

#### 5 结论

四种工况爆破振动信号进行基于CEEMDAN的光滑降噪处理后进行时频分析表明:连续耦合装药产生的振动信号携带的能量最大,破坏力最大,径向不耦合和水不耦合其次,空气间隔装药携带的能量最小,破坏力最小;轴向中部空气间隔装药和水不耦合装药能有效减少岩石大块率,增加炸药能量利用率,提高经济效益,并且以水为不耦合介质时能有效减小扬尘量。

因此,针对该土石方爆破单耗大及周围建(构)筑物振动响应较大的问题,结合实际生产建议采用轴向中部空气间隔装药,在多雨季亦可采取水不耦合装药,在相同的炸药量下,即可提高炸药能量利用率来减小炸药单耗,又能有效减小其对临近建(构)筑物的累积损害。

#### 参考文献(References)

- [1] 魏晓刚,麻凤海,刘书贤. 爆破开采对采空区地面建筑抗震性能的影响分析[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(9): 102-108.
- [1] WEI Xiao-gang, MA Feng-hai, LIU Shu-xian. Analysis of impact of blasting mining on seismic performance of ground buildings in coal mining area[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(9): 102-108. (in Chinese)
- [2] 宗琦,孟德君. 炮孔不同装药结构对爆破能量影响的理论探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(4): 641-645.

- [2] ZONG Qi, MENG De-jun. Theoretical discussion on the influence of different charge structures of blast hole on blasting energy [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(4): 641-645. (in Chinese)
- [3] 梁为民, LIU Hong-yuan. 不耦合装药结构对岩石爆破的影响[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(12): 1215-1218.
- [3] LIANG Wei-min, LIU Hong-yuan. Influence of air-coupled charge on rock blasting [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(12): 1215-1218. (in Chinese)
- [4] 顾文彬, 王振雄, 陈江海, 等. 装药结构对爆破震动能量传递及爆破效果影响研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(2): 207-211.
- [4] GU Wen-bin, WANG Zhen-xiong, CHEN Jiang-hai, et al. Influence of charge structure on the energy transfer of blasting vibration and explosive effect [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(2): 207-211. (in Chinese)
- [5] 陈健. 装药结构对爆炸地震效应影响的实验研究 [C]//全国危险物质与安全应急技术研讨会论文集, 2013: 1098-1103.
- [5] CHEN Jian. Experimental study on the effect of charge structure on explosion seismic effects [C]// Proceedings of National Symposium on Hazardous Substances and Safety Emergency Technology, 2013: 1098-1103. (in Chinese)
- [6] 孙磊. 装药结构对爆炸效能影响的理论与数值模拟[D]. 淮南:安徽理工大学, 2011.
- [6] SUN Lei. Theoretical study and numerical simulation of the effect of charge structure on explosion efficiency [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [7] 种玉配, 熊炎林, 齐燕军. 轴向不耦合装药结构形式优化仿真研究[J]. 工程爆破, 2018, 24(2): 1-7.
- [7] ZHONG Yu-pei, XIONG Yan-lin, QI Yan-jun. Simulation research on optimization of axial uncoupling charge structure [J]. Engineering Blasting, 2018, 24(2): 1-7. (in Chinese)
- [8] 楼晓明, 王振昌, 陈必港, 等. 空气间隔装药孔壁初始冲击压力分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(11): 2875-2884.
- [8] LOU Xiao-ming, WANG Zhen-chang, CHEN Bi-gang. Initial shock pressure analysis for hole wall with air-decked charge [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(11): 2875-2884. (in Chinese)
- [9] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2011: 4144-4147.
- [10] 张建文, 刘洋, 张大朋, 等. 基于CEEMDAN与小波自适应阈值的去噪新方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(10): 14-18.
- [10] ZHANG Jian-wen, LIU Yang, ZHANG Da-peng. A new method of combined denoising based on CEEMDAN and wavelet adaptive thresholding [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(10): 14-18. (in Chinese)
- [11] 张建伟, 侯鸽, 暴振磊, 等. 基于CEEMDAN与SVD的泄流结构振动信号降噪方法[J]. 振动与冲击, 2017, 36(22): 138-143.
- [11] ZHANG Jian-wei, HOU Ge, BAO Zhen-lei, et al. A signal de-noising method for vibration signals from flood discharge structures based [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(22): 138-143. (in Chinese)
- [12] 李夕兵, 凌同华, 张义平. 爆破振动信号分析理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 84-85.
- [13] 郑一, 孙晓峰, 陈健, 等. 基于集合经验模态的随钻脉冲信号优良降噪算法[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 750-753.
- [14] ZHENF Yi, SUN Xiao-feng, CHEN Jian, et al. Extracting pulse signals in measurement while drilling using optimum denoising methods based on the ensemble empirical mode decomposition [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 750-753. (in Chinese)
- [14] 周后友, 池恩安, 张修玉, 等.  $\Phi 42$  mm炮孔空气间隔装药爆破对岩体破碎效果的影响研究[J]. 爆破, 2018, 35(4): 63-68.
- [14] ZHOU Hou-you, CHI En-an, ZHANG Xiu-yu, et al. Influence of air-decking charge blasting with  $\Phi 42$  mm blast hole on rock fragmentation [J]. Blasting, 2018, 35(4): 63-68. (in Chinese)
- [15] 赵明生, 梁开水, 李本伟. 段药量对爆破振动信号时频特性的影响研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(7): 85-88.
- [15] ZHAO Ming-sheng, LIANG Kai-shui, LI Ben-wei. Influence of deck charge on time-frequency characteristics of a blasting vibration signal [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(7): 85-88. (in Chinese)