

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.01.006

## 基于爆破振动与松动圈分析的 水封洞库爆破方案比选\*

叶海旺<sup>1a,1b,1c</sup>, 张鹏辉<sup>1a</sup>, 蒙云琪<sup>2</sup>, 张兆龙<sup>2</sup>, 傅家亮<sup>3</sup>, 白金鑫<sup>3</sup>, 刘磊<sup>3</sup>, 余梦豪<sup>1a</sup>, Doumbouya Sekou<sup>1a</sup>

(1. 武汉理工大学 a. 资源与环境工程学院; b. 关键非金属矿产资源绿色利用教育部重点实验室;  
c. 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 武汉 430070; 2. 中铁四院集团工程运维有限责任公司, 武汉 430063;  
3. 滁州市兴天矿业有限公司, 滁州 239399)

**摘要:** 合理的爆破施工方式是保证水封洞库稳定性和水封性的关键, 在某水封洞库进行爆破地震波检测、声波探测, 并结合 HHT 信号分析方法, 通过 EMD、EEMD 分解方法对比, 识别并弱化信号模态混叠效应以提高信号分析准确性, 最后利用边际谱、瞬时能量谱、三维能量谱、围岩松动圈等评价不同爆破方案对水封洞库开挖爆破的影响。结果表明: EEMD-Hilbert 分析方法可以一定程度上改善传统 EMD 分解带来的模态混叠问题, 通过 EEMD 分解重构后的振速时程曲线更加平滑、可靠性更高; 通过信号重构后的边际谱分析, 发现双侧壁导坑法频带分布在 200~380 Hz 范围, 单侧壁导坑法的频段范围更窄, 集中在 110~250 Hz 之间, 两组方案的低频能量均占比较少; 双侧壁导坑法瞬时能量峰值高于单侧壁导坑法, 两组方案瞬时能量均主要集中在首段掏槽孔上, 分别占总瞬时能量的 41.67% 和 23.73%, 单侧壁导坑法瞬时能量分布更为平均且较双侧壁导坑法更低; 通过声波探测分析: 双侧壁导坑法两侧拱腰松动圈范围约 1.0~1.2 m, 单侧壁导坑法扩挖面、导洞面松动圈范围分别为 0.8 m、1.0~1.2 m。通过 EEMD-Hilbert 与声波探测联合分析可知, 单侧壁导坑法相对更适合该洞库爆破施工。

**关键词:** 水封洞库; 爆破方案; EEMD-HHT; 时频能量; 松动圈

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)01-0044-12

## Blasting Scheme Optimization of Water-sealed Cavern Excavation based on Blasting Vibration and Loose Zone Analysis

YE Hai-wang<sup>1a,1b,1c</sup>, ZHANG Peng-hui<sup>1a</sup>, MENG Yun-qi<sup>2</sup>, ZHANG Zhao-long<sup>2</sup>,  
FU Jia-liang<sup>3</sup>, BAI Jin-xin<sup>3</sup>, LIU Lei<sup>3</sup>, YU Meng-hao<sup>1a</sup>, Doumbouya Sekou<sup>1a</sup>

(1. a. School of Resources and Environmental Engineering; b. Ministry of Education Key Laboratory of Key Non-metallic Mineral Resources Green Utilization; c. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;  
2. China Railway Siyuan Group Engineering Operation and Maintenance Co., Ltd., Wuhan 430063, China; 3. Chuzhou Xingtian Mining Co., Ltd., Chuzhou 239399, China)

收稿日期 (Date of reception): 2024-09-03

网络首发日期 (Published online): 2024-12-20

作者简介: 叶海旺 (1971-), 男, 安徽省安庆市, 博士、教授, 主要从事采矿、爆破、安全等方面的教学和科研工作, (E-mail) yehaiwang369@hotmail.com。

通讯作者: 余梦豪 (1997-), 男, 博士研究生, 主要从事采矿、爆破等方面的科研工作, (E-mail) 576888642@qq.com。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFC1909602); 湖北省重点研发计划项目 (2021BCA152)

**About the author:** YE Hai-wang (1971-), male, born in Anqing City, Anhui Province, Ph. D, professor, mainly engaged in mining, blasting, safety and other aspects of teaching and research work, (E-mail) yehaiwang@sina.com.

**Corresponding author:** YU Meng-hao (1997-), male, doctoral candidate, mainly engaged in scientific research in mining, blasting and other fields, (E-mail) 576888642@qq.com.

**Fund Programs:** National key research and development plan project (No. 2020YFC1909602), Hubei Province key research and development project (No. 2021BCA152)

**Abstract:** A reasonable blasting construction method is critical to maintaining caverns' stability and water-sealing integrity. In this study, seismic wave detection and acoustic wave detection were conducted within a water-sealed cavern. The HHT signal analysis method was used to process the seismic wave signals generated by blasting, and both Empirical Mode Decomposition (EMD) and Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) were applied to compare and reduce signal mode aliasing, improving the accuracy of signal analysis. The marginal spectrum, instantaneous energy spectrum, three-dimensional energy spectrum, and loose zones in surrounding rock were used to evaluate the influence of different blasting schemes on the water-sealed caverns. The results show that the EEMD-Hilbert analysis method effectively mitigates mode aliasing issues caused by traditional EMD decomposition, producing a smoother and more reliable vibration velocity time-history curve. Marginal spectrum analysis of the reconstructed signal reveals that the frequency band of the double-sided wall heading method ranges from 200 to 380 Hz. In contrast, the frequency band of the single-sided wall guide pit method is narrower, concentrated between 110 and 250 Hz, with relatively lower frequency energy in both conditions. The combined instantaneous energy of the double-sided wall guide method is higher than that of the single-sided wall guide method, with 41.67% and 23.73% of the total instantaneous energy concentrated in the first section of the cutting hole for each method, respectively. The instantaneous energy distribution of the single-sided wall guide method is more uniform and lower than that of the double-sided. The range of loosening rings on both sides of the arch waist in the double-sided wall heading method is about 1.0 to 1.2 m. In contrast, the single-sided wall guide pit method measured 0.8 meters and 1.0 to 1.2 meters on the expanding excavation surface and guide tunnel surface, respectively. A joint analysis of the EEMD Hilbert method and acoustic detection indicates that the single-sided wall guide pit method is more suitable for blasting excavation in water-sealed caverns.

**Key words:** water-sealed cavern; blasting scheme; EEMD-HHT; time-frequency energy; loose zone

目前,石油储备主要分地下水封洞库和地表罐体储备两种方式。相比于地表罐体储备,地下水封洞库具有损耗少、维护费用低、安全性高、使用寿命长等优势,故而成为国际主流储油方式<sup>[1-3]</sup>。地下水封洞库是由主洞室、竖井、水幕系统等组成的地下复杂洞室群,洞室具有高边墙和大跨度,不同功能洞室纵横交错,间距较小等特点。根据其储油原理,主洞室需包裹于动态地下水环境中,防止油品泄漏从而实现稳定、高效储存。保证洞室稳定性和水封效果是洞库建设和运营的关键和确保储油系统安全稳定的基础<sup>[4,5]</sup>。爆破方法以其成本和工艺的优势成为岩体强度高、围岩完整性好的大型地下掘进施工中的首选方式之一。但爆破施工过程中释放的巨大能量会对周边岩体造成一定的负面效应<sup>[6]</sup>。选择合适的爆破施工方式,尽可能控制爆破作业所带来的负面效应是十分必要的。

通过对爆破施工产生的爆破地震波信号、声波探测信号进行采集和分析可以为研究爆破产生的负面提供依据。这些信号中蕴含着丰富的信息,包括爆破地震波频率、能量的传播、衰减规律以及围岩松动圈范围等。其对于优化爆破设计、提高爆破效率、减轻对周边围岩的潜在破坏具有重要意义<sup>[7]</sup>。目前常用的地震波信号分析方法主要有三种:傅里叶分析、小波变换、HHT 分析<sup>[8]</sup>。相较于传统的傅里叶分析和小波变换,HHT 变换凭借经验模态分解 (EMD) 技术,展示出对信号的瞬时变化、随机特性

以及传播介质的复杂性的卓越适应性。这使得 HHT 分析在爆破工程领域得到了广泛的认可与应用<sup>[9]</sup>。付晓强等基于 EMD 对隧道爆破信号进行分解并提取主成分分量,为后续识别各段别实际雷管爆破时间奠定基础。但 HHT 分析方法同样存在一些问题,相关研究发现,采用 EMD 分解出的固有模态函数易出现模态混叠现象<sup>[10]</sup>。针对该问题,韦啸等采用 EEMD 对地铁隧道爆破振动信号进行分解,结果表明,该方法在保留 EMD 原有自适应性优点的同时能消除 EMD 分解产生的 IMF 分量间信号混叠问题<sup>[11]</sup>。通过声波探测技术可以识别围岩松动圈范围,进而得到围岩的损伤分布。马其华等使用单孔超声波探测法确定了隧道围岩松动圈松动范围,并通过 FLAC3D 软件验证声波法的实用性和优越性<sup>[12]</sup>。陈亚楠等通过单孔声波探测得到围岩松动圈随爆破次数增加的演化规律<sup>[13]</sup>。

目前鲜有学者对水封洞库这类地下复杂洞室群的爆破施工导致的负面效应进行系统化的研究,而爆破效果的优劣又是影响水封洞库长期稳定运行的关键。基于某水封洞库开挖爆破工程,采集爆破地震波和声波探测数据,分别利用 EEMD-HHT 和声波波速分析提取、重构、分析不同爆破方案爆破地震波信号的频谱特征及洞室周边围岩的松动圈范围,得到不同方案条件的时频能量分布与围岩松动范围,进而得到较为适宜的爆破施工方案。

# 1 工程概况与数据采集

## 1.1 工程背景

某水封洞库工程涵盖地下洞罐区和地上辅助建筑工程两大部分。地下部分岩体大体上呈北东方向展布,构造稍发育、岩体基本完整,岩体质量等级为Ⅱ~Ⅲ级。洞库设计库容达 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,由主洞室、竖井、水幕系统、施工巷道和连接巷道等部分组成。用作储油的主洞室共八个分为四个洞罐,两个主洞室间布置一条施工支洞。其中主洞室埋深约80 m,上层开挖高度为9 m,宽为20 m;施工支洞高9 m,宽9 m;主洞室与施工支洞的直线距离仅24 m。

受时间和空间所限,该库区地下工程需要各类洞室同时施工。基于该地下工程作业条件的复杂性与洞室油储所需的水封性,有必要采取一系列方法分析不同爆破方案爆破施工带来的负面效应对周边围岩的影响程度,从而选取一种较为合适的爆破方案。

## 1.2 爆破方案

主洞室上层断面高为9.0 m宽为20 m。现场采用两种爆破工艺开挖,两组方案炮孔直径均为42 mm,装填直径32 mm的2#岩石乳化炸药,根据方案不同分为数段,按首段延期10 ms,剩余孔位段间延期时

间为50 ms,使用工业数码电子雷管起爆,掏槽方式均采用楔形掏槽。其中,方案一采用双侧壁导坑(中导-两侧扩挖-毫秒延期)方案,中导与扩挖同时起爆,设计循环进尺4 m,单次爆破作业共设置180个炮孔,按照炮孔的位置和功能不同设置8段延期。方案二采用单侧壁导坑(单侧导洞-单侧扩挖-毫秒延期)方案,一次爆破中,导洞先爆,扩挖后爆,设计循环进尺4.2 m,单次爆破作业共设置230个炮孔,按照炮孔的位置和功能不同设置16段延期。图1为不同方案掌子面现场,炮孔布置如图2所示,爆破工艺参数如表1所示。

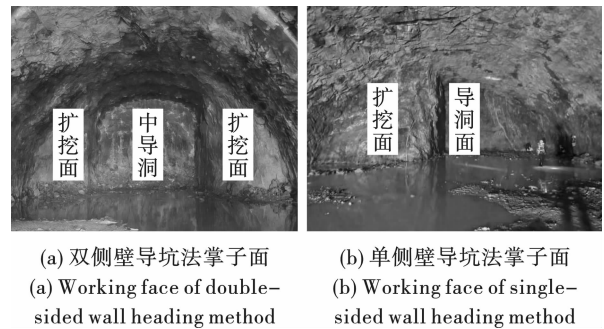


图1 不同方案掌子面布置

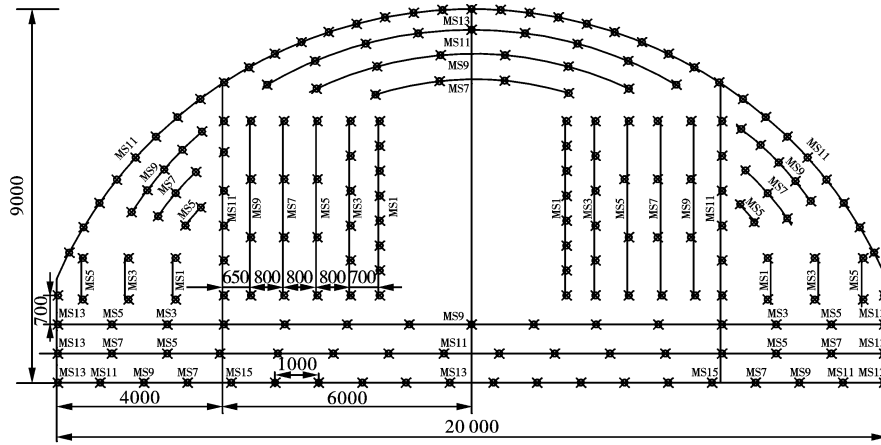
Fig. 1 Working face layouts of different schemes

表1 不同方案装药参数

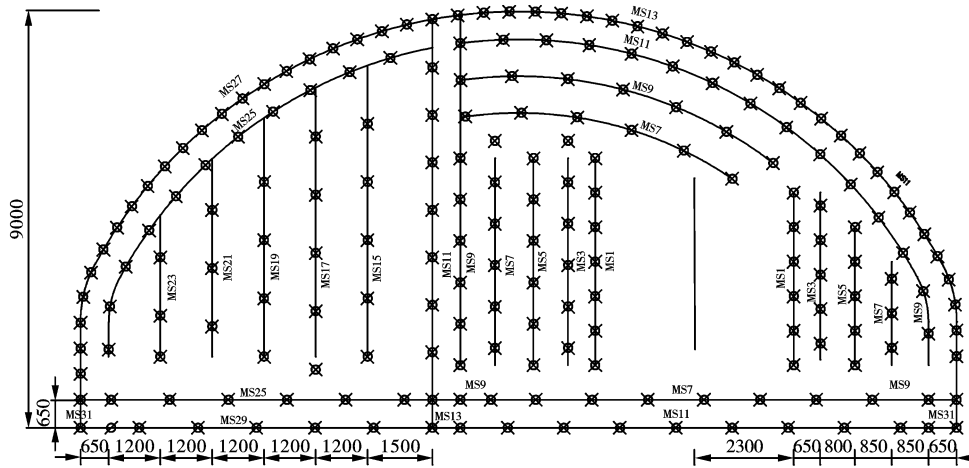
Table 1 Charging parameters of different blasting schemes

雷管段位		炮孔类型		孔深/m		单孔药量/kg		总药量/kg	
双侧壁法	单侧壁法	双侧壁法	单侧壁法	双侧壁法	单侧壁法	双侧壁法	单侧壁法	双侧壁法	单侧壁法
1	1	掏槽/辅助	掏槽孔	4.80	4.90	3.0/1.8~2.7	3.0	57.6	42
3	3	掏槽/辅助	掏槽孔	4.45	4.70	3.0/1.8~2.7	3.0	52.2	42
5	5	掏槽/辅助	掏槽	4.25/4.00	4.35	3.0/1.8~2.7	3.0	60	36
7	7	掏槽/辅助/周边	掏槽/辅助	4.10/4.00/4.00	4.25/4.20	3.0/1.8~2.7/0.9	3.0/1.8~2.7	52.8	82.4
9	9	掏槽/辅助/周边	掏槽/辅助	4.05/4.00/4.00	4.22/4.20	3.0/1.5~2.4/0.9	3.0/1.8~2.7	55.4	79.2
11	11	辅助/周边	辅助/周边	4.00/4.00	4.20/4.20	0.9~1.8/0.9	2.4/0.9	30	73.8
13	13	周边	周边	4.00	4.20	0.9	1.8~2.7	33.3	19.8
15	15	周边	辅助	4.00	4.20	0.9	1.8~2.7	1.8	13.5
-	17	-	辅助	-	4.20	-	1.8~2.7	-	13.5
-	19	-	辅助	-	4.20	-	1.8~2.7	-	16.2
-	21	-	辅助	-	4.20	-	1.8~2.7	-	13.5
-	23	-	辅助	-	4.20	-	1.8~2.7	-	7.2
-	25	-	辅助	-	4.20	-	1.8~2.7	-	45.9
-	27	-	周边	-	4.20	-	0.9	-	20.7
-	29	-	周边	-	4.20	-	0.9	-	5.4
-	31	-	周边	-	4.20	-	0.9	-	0.9
合计								343.1	512

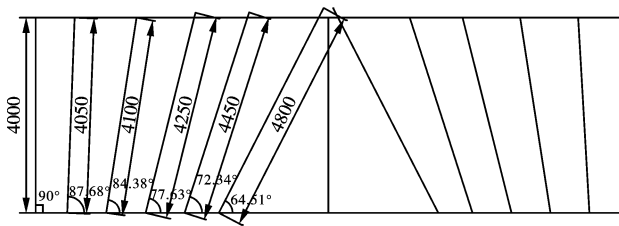
注:不同方案均按雷管段位不同设置首段10 ms延期,其余各段50 ms延期顺序起爆;总药量为各段位不同功能炮孔装药合。



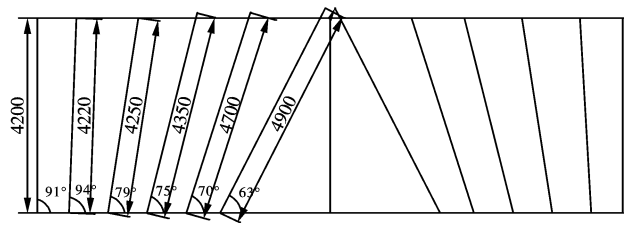
(a) 双侧壁导坑法炮孔布置  
(a) Double-sided wall heading method hole layout



(b) 单侧壁导坑法炮孔布置  
(b) Single-sided wall guide pit method hole layout



(c) 双侧壁导坑法掏槽孔参数  
(c) Cut hole parameter of double-sided wall heading method



(d) 单侧壁导坑法掏槽孔参数  
(d) Cut hole parameter of single-sided wall heading method

图 2 不同方案炮孔布置与掏槽孔参数(单位:mm)

Fig. 2 Hole layouts and cut hole parameters of different blasting schemes(unit:mm)

## 2 振动监测与分析

### 2.1 爆破振动监测方案

现场测试使用中科生产的 TC-4850-3 爆破振动监测仪,设置触发延时 100 ms,采样率 16 k。在施工支洞垂直导洞爆心处设置监测点,其中:双侧壁导坑法距导洞爆心距为 34.30 m(高差 4.55 m,水平距离 34 m),单侧壁导坑法距导洞爆心距为 30.35 m(高程 3.9 m,水平距离 30.1 m)。洞室相对位置关

系、测点布置、测振设备布置如图 3 所示。

### 2.2 质点振速分析

为确保数据的可靠性和准确性,针对不同方案各进行五次爆破地震波监测。测得峰值振动速度见表 2,表中 FFT 主频指地震波振幅最大处的频率。

为使信号分析具有代表性,学者们倾向于选择地震波信号中的三相信号中的最大峰值振速方向作为研究对象<sup>[14]</sup>。由表 2 可知,垂向(Z 方向)的峰值振速最大。因此,后续分析中,选取典型垂向信号进

行分析,典型垂向时程曲线如图4所示。

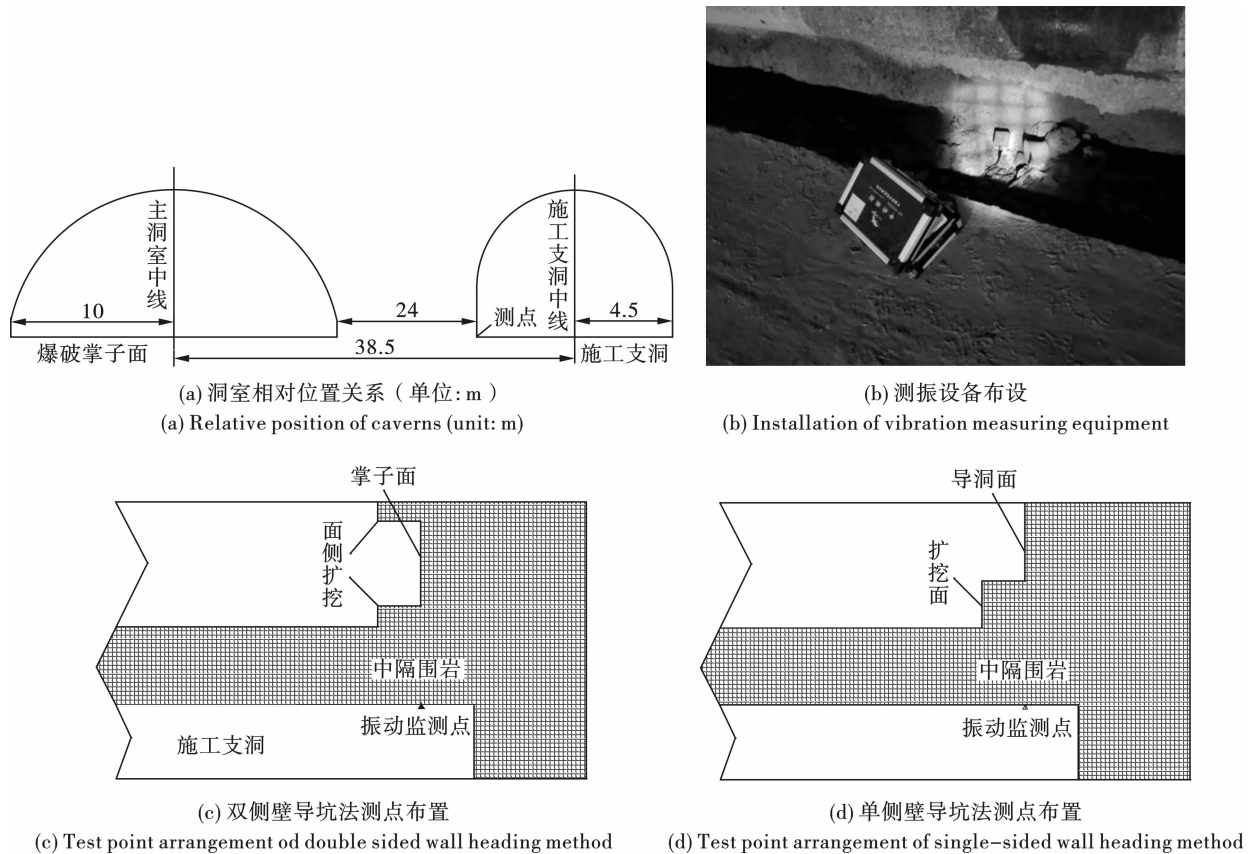


图3 洞室布置与爆破振动监测方案

Fig. 3 Cavern layout and blasting vibration monitoring scheme

表2 现场监测峰值振速

Table 2 Field monitoring peak vibration velocity

爆破方案	组数	径向(X方向)		切向(Y方向)		垂向(Z方向)		合速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
		PPV/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	FFT 主频/ Hz	PPV/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	FFT 主频/ Hz	PPV/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	FFT 主频/ Hz	
双侧壁 导坑法	1	2.0529	31.4	3.5856	29.2	9.7642	97.6	9.7920
	2	7.0102	133.4	4.3719	178.9	10.3351	138.4	11.2869
	3	5.7631	236.4	8.0262	11.1	8.3318	70.9	9.9350
	4	4.5103	68.5	3.3403	55.1	7.6478	214.1	7.9148
	5	5.3611	284.4	7.3198	114.9	8.6130	199.4	9.7183
单侧壁 导坑法	1	4.8058	139.0	3.0546	240.7	7.9265	321.0	8.0085
	2	3.8971	13.9	4.1502	71.8	5.8796	110.3	6.1374
	3	6.0611	98.8	6.1896	94.8	5.0460	545.2	8.6597
	4	4.7337	141.3	4.2724	118.4	4.9064	207.0	7.6550
	5	4.3618	314.3	4.4838	192.3	5.1435	20.3	5.7148

### 2.3 实测信号的分解与重构

现场采集的爆破地震波信号中常含随机、复杂的杂散噪音,其难以预测且会对分析产生干扰,通过对原始信号的分解重构,可以在保留或增强信号的关键特征的同时去除其中的噪声成分,为后续的信

号处理提供更有用的数据<sup>[15]</sup>。

将不同方案的典型垂向信号数据导入 Matlab 程序,分别进行 EMD、EEMD 分解得到垂向信号在不同时间尺度和频率上的时程关系。其中,设置 EMD 分解参数相对误差为 0.2;EEMD 分解中添加

的高斯白噪声组次数  $N$  为 100, 高斯白噪声标准差  $\sigma$  为 0.2。IMF 分量能量指信号经 EMD、EEMD 分解后各 IMF 分量所携带的能量。其与振幅的平方成

正比, 此处通过计算各 IMF 分量的振幅平方和来估算其能量。经过 EMD、EEMD 分解后所产生的各 IMF 分量和残余分量及各分量能量如图 5、表 3 所示。

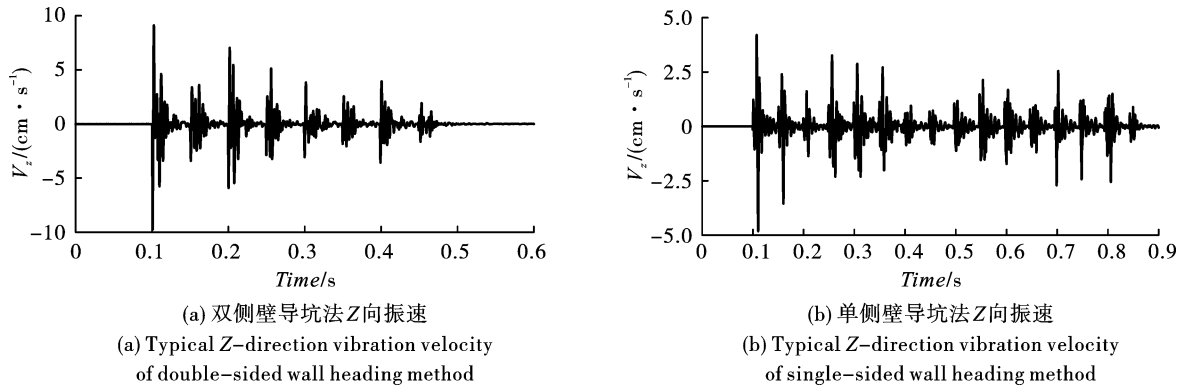


图 4 不同方案典型 Z 向振速时程曲线

Fig. 4 Typical Z-direction vibration velocity of different working schemes

表 3 不同方案条件下各分层能量

Table 3 Each layer's Energy of different measurement point

爆破方案	分析方法	IMF 分量能量分布/( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
双侧壁法	EMD	3976.91	304.99	198.76	7.90	4.53	6.40	1.26	0.56	0.22	-	-	-
	EEMD	4.16	1263.79	1423.10	413.98	118.05	21.67	4.71	1.71	0.62	0.24	0.04	0.16
单侧壁法	EMD	1059.28	1106.77	356.92	38.51	19.74	2.35	1.97	0.84	0.40	-	-	-
	EEMD	15.98	14.05	255.05	663.01	266.80	13.75	2.48	0.87	0.42	0.21	0.17	0.05

不同方法分解得到各分量按频率由高到低进行排列, 两组方案标准信号均通过 EMD 分解得到 8 个 IMF 分量和一个残余分量, 经过 EEMD 分解则得到了 11 个 IMF 分量和一个残余分量。

图 5(a)、5(c) 中, 双侧壁导坑法的原始垂向信号经过 EMD 分解产生的  $IMF_1 \sim IMF_2$  分量, 单侧壁导坑法的  $IMF_1 \sim IMF_3$  存在模态混叠问题, 其混杂了多个相近的特征时间尺度; EEMD 分解后各 IMF 分量间相对平整光滑, 特征时间尺度区分明显, 即 EEMD 分解方法在保留 EMD 分解自适应性的基础上, 有效改善了 IMF 分量间的模态混叠问题。

模态混叠会影响信号分析的准确和可靠性, 为提高信号分析的可靠性, 将信号进行重构以最大限度消除干扰因素。分别将双侧壁导坑法经 EEMD 分解后的 IMF 分量中的  $IMF_1$  和残余分量, 单侧壁导坑法的  $IMF_1$ 、 $IMF_2$  和残余分量去除。重构信号如图 6 所示。

### 2.4 重构信号的时频能量分析

#### (1) 边际谱分析

将处理后的重构信号导入 Matlab 程序进行 Hilbert 变换得到边际谱, 不同爆破方案的典型垂向信

号的 EEMD 重构信号边际谱如图 7 所示。

如图 7 所示, 不同方案的振动频率集中在不同的范围: 双侧壁导坑法测点距爆心 34.30 m, 边际能量主要在 200 ~ 380 Hz 范围内分布, 并在 258 Hz 处达到峰值  $0.027 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ; 单侧壁导坑法测点距爆心 30.35 m, 能量主要集中在 110 ~ 250 Hz 之间并出现两个较为明显的波峰, 分别为 170 Hz 的  $0.0064 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  和 200 Hz 的  $0.0055 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ; 单侧壁导坑法爆心距稍近, 但频带分布较双侧壁导坑法更小。

#### (2) 瞬时能量谱与三维能量谱分析

边际谱可以得到爆破地震波能量与频率之间的关系, 但难以分析不同延期时段爆破产生的地震波对周边围岩的影响程度。瞬时能量谱可以分析爆破地震波能量在时程上的累积与波动, 而能量大小将影响岩石损伤和破碎效果。能量越大, 通常能导致岩石更充分的破碎。三维能量谱可以同时展示信号在时间和频率上的能量分布, 有助于更全面地理解信号的特性<sup>[16]</sup>。表 4 为不同方案各雷管延期时段爆破的瞬时能量; 瞬时能量谱和三维能量谱如图 8、图 9 所示。

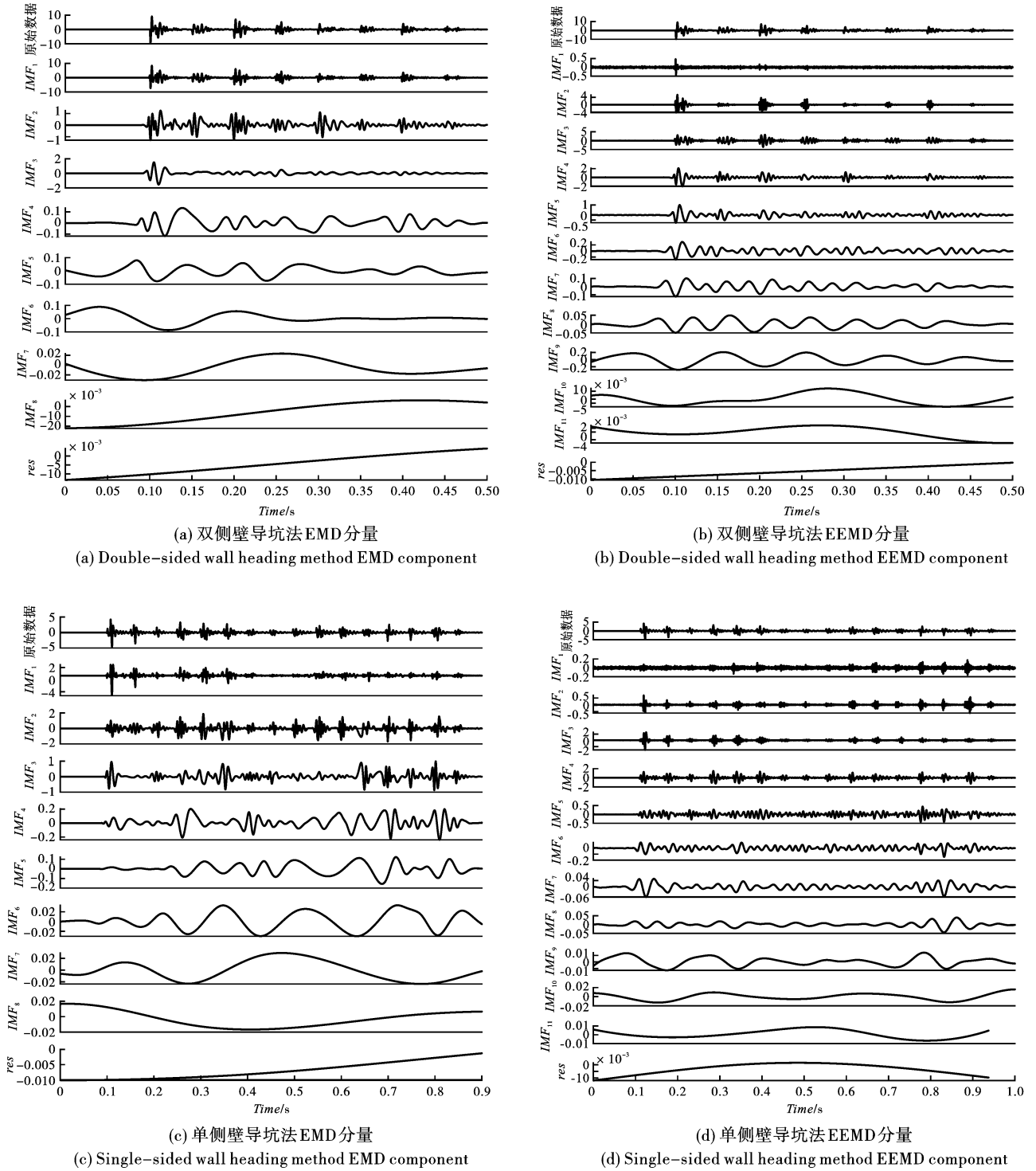


图 5 不同方案的原始信号的 EMD 和 EEMD 分量

Fig. 5 EMD and EEMD components of raw signals under different operating schemes

由图 8 可知:瞬时能量谱中各段峰值时差约为 50 ms 且与原始信号振速时程曲线分布基本一致,证明了瞬时能量谱的可靠性;结合图 8、图 9 和表 4 分析可知:双侧壁导坑法、单侧壁导坑法瞬时能量累计分别为  $262.39 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $90.38 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ,不同方案的瞬时能量峰值均出现在首段,其余段位炮孔爆破产生的峰值能量较首段炮孔均显著降低,其中双

侧壁导坑法首段药量 57.6 kg 对应瞬时峰值能量  $109.34 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ,约占总瞬时能量的 41.67%,单侧壁导坑法首段药量 42 kg 对应瞬时峰值能量  $21.43 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ;相较双侧壁导坑法,单侧壁导坑法各段位瞬时能量更均匀,并普遍小于双侧壁导坑法。从瞬时能量角度来看,单侧壁导坑法更优。

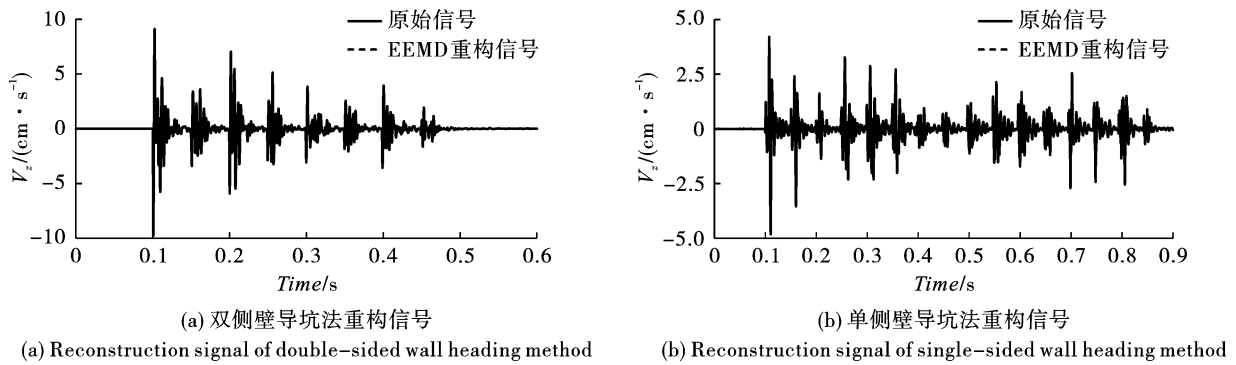


图 6 不同方案的原始与重构信号

Fig. 6 Original and reconstructed signals of different working schemes

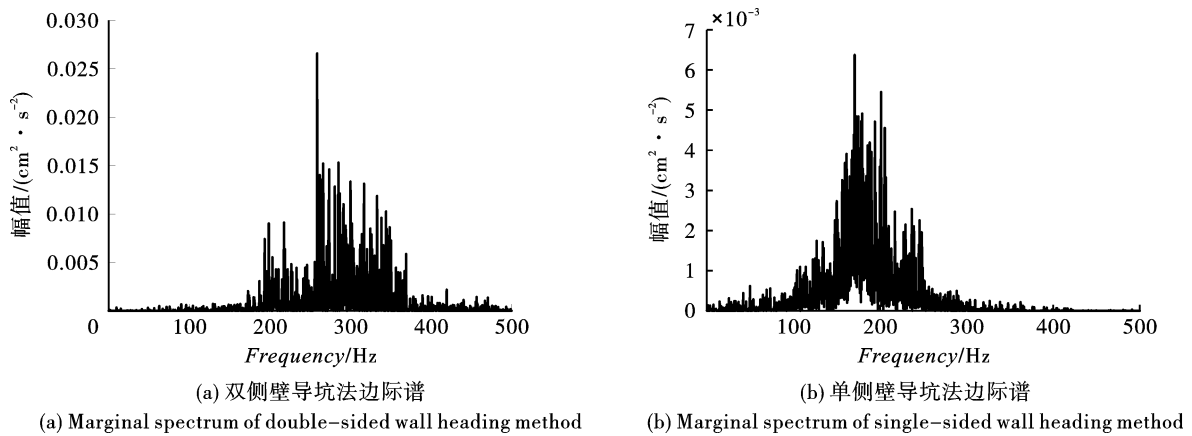


图 7 不同方案的重构信号边际谱

Fig. 7 Marginal spectra of reconstructed signals of different working schemes

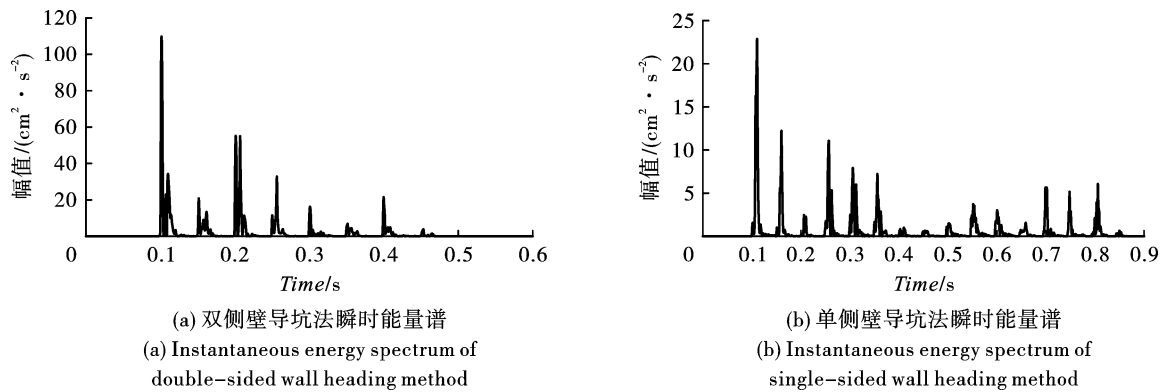


图 8 不同方案的瞬时能量谱

Fig. 8 Instantaneous energy spectrum of different working schemes

### 3 声波探测与分析

#### 3.1 声波探测方案

上述 EEMD-Hilbert 分析得到了不同爆破方案的各延期时段爆破地震波时频能量在周边洞室的分布规律,但围岩破坏并不仅受某段爆破影响,而是不同功能炮孔联合做功的结果,不同功能炮孔都会对围岩产生一定程度的损伤<sup>[17]</sup>。为弥补 EEMD-Hil-

bert 分析的不足,进一步分析不同爆破方案对其围岩破坏的优劣,引入声波探测,分析不同爆破方案各段延期爆破对洞室围岩的累计损伤情况。

声波探测技术通过测量声波在围岩中的传播速度和波形特征得到围岩的松动圈范围,进而得到围岩的损伤分布<sup>[18]</sup>。下面对不同方案爆破施工的周边围岩松动范围进行声波测速分析。

现场试验采用非金属声波检测仪 RSM-SY6

(c),不同爆破方案均在洞室两侧边墙距爆源 10 m 处各布置 1 个钻孔孔径 70 mm,孔深 3.2 m 的声波

钻孔进行声波探测。具体布置如图 10 所示。

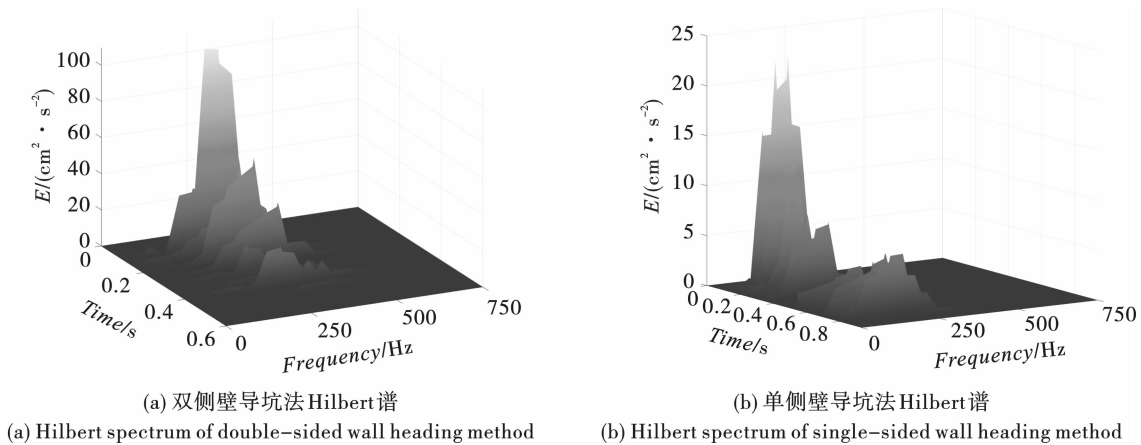


图 9 不同方案的三维 Hilbert 谱

Fig. 9 Three-dimensional Hilbert spectrum of different working schemes

表 4 不同方案的段间瞬时能量分布

Table 4 Each delay's instantaneous energy distribution of different operating schemes

雷管 段位	双侧壁导坑法		单侧壁导坑法		雷管 段位	双侧壁导坑法		单侧壁导坑法	
	单段药量/ kg	瞬时能量/ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )	单段药量/ kg	瞬时能量/ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )		单段药量/ kg	瞬时能量/ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )	单段药量/ kg	瞬时能量/ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )
1	57.6	109.34	42.0	21.43	19	-	-	16.2	3.74
3	52.2	20.33	42.0	12.11	21	-	-	13.5	2.94
5	60.0	54.73	36.0	2.38	23	-	-	7.2	1.56
7	52.8	31.75	82.4	11.02	25	-	-	45.9	5.51
9	55.4	15.69	79.2	7.86	27	-	-	20.7	4.96
11	30.0	6.75	73.8	7.01	29	-	-	5.4	6.10
13	33.3	19.98	19.8	1.01	31	-	-	0.9	0.64
15	1.8	3.82	13.5	0.62	合计	343.1	-	512	-
17	-	-	13.5	1.49					

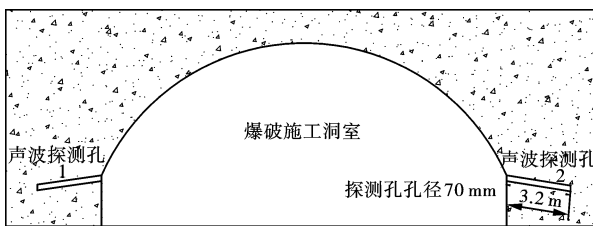


图 10 声波探测监测方案

Fig. 10 Acoustic detection and monitoring program

### 3.2 围岩松动圈测试结果

将不同方案条件下爆破施工的洞室不同位置围岩声波探测数据进行统计,波速测试结果如表 5 所示。

为直观展示不同方案爆破后的洞室围岩松动范围,将表 5 数据绘制成不同爆破方案条件下探测孔 1、孔 2 的声波波速与钻孔深度关系曲线,如图 11 所示。

分析表 5、图 11 可知:双侧壁导坑法的洞室两侧围岩爆破后的声波波速在 1.0 ~ 1.2 m 处发生突

变,其余深度波速变化较小,即双侧壁导坑法爆破引发的洞室两侧围岩松动范围为 1.0 ~ 1.2 m;单侧壁导坑法扩挖面爆破后在深度 0.8 m 处发生较大变化,导洞侧声波波速在 1.0 ~ 1.2 m 处发生突变,其余深度变化较小;单侧壁导坑法导洞侧与双侧壁导坑法两侧扩挖导致的爆破松动范围大体一致,扩挖面较单侧壁导坑法影响更小。声波探测结果证明:单侧壁导坑法的围岩松动范围较双侧壁导坑法小,从主洞室围岩的松动范围方面来看,单侧壁导坑法更适合该水封洞库爆破施工。

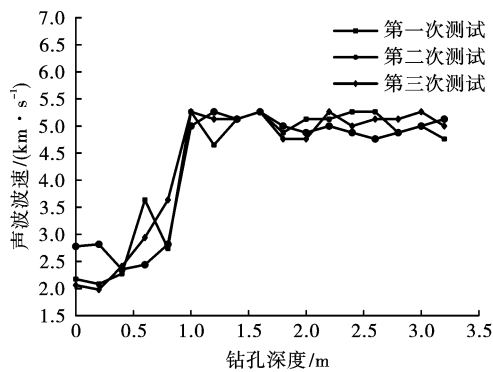
## 4 结论

(1)通过对原始信号的 EMD 和 EEMD 分解,证明 EEMD 能更好地对爆破振动信号进行分解,识别信号中的噪音成分,通过 EEMD 分解重构,可以更准确地分析爆破地震波信号蕴含的信息、减少杂散噪音的干扰。

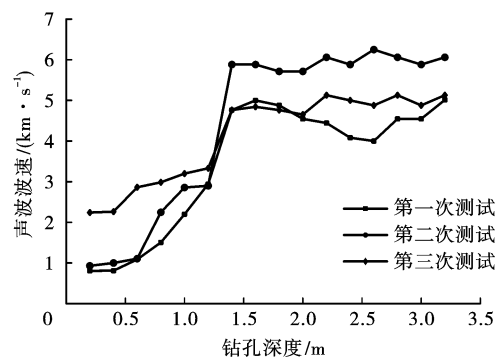
表 5 不同方案各探测点声波探测数据

Table 5 Acoustic detection data of each detection point under different working schemes

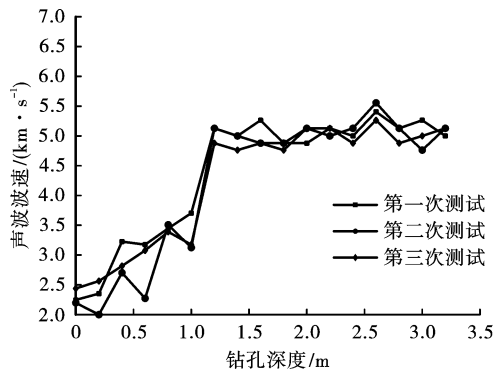
钻孔 深度/m	不同方案各探测孔声波波速/( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )											
	探测孔 1						探测孔 2					
	双侧壁导坑法			单侧壁导坑法(扩挖面)			双侧壁导坑法			单侧壁导坑法(导洞面)		
	组 1	组 2	组 3	组 1	组 2	组 3	组 1	组 2	组 3	组 1	组 2	组 3
0.0	0.806	0.930	2.241	2.174	2.778	2.062	0.813	0.980	1.990	2.247	2.198	2.439
0.2	0.810	1.000	2.262	2.083	2.817	1.980	0.893	1.036	2.000	2.353	2.000	2.564
0.4	1.087	1.105	2.862	2.273	2.353	2.410	1.000	1.212	2.073	3.226	2.703	2.817
0.6	1.504	2.247	2.985	3.636	2.439	2.941	1.504	1.176	3.150	3.175	2.273	3.077
0.8	2.198	2.857	3.199	2.740	2.817	3.636	2.857	1.869	1.860	3.448	3.509	3.390
1.0	2.941	2.899	3.330	5.263	5.000	5.263	3.128	2.444	1.794	3.704	3.125	3.175
1.2	4.762	5.882	4.762	4.651	5.263	5.128	5.000	4.082	3.263	5.128	5.128	4.878
1.4	5.000	5.882	4.842	5.128	5.128	5.128	4.878	4.348	5.797	5.000	5.000	4.762
1.6	4.878	5.714	4.762	5.263	5.263	5.263	4.762	4.000	5.634	5.263	4.878	4.878
1.8	4.545	5.714	4.651	4.878	5.000	4.762	4.000	4.000	5.128	4.878	4.878	4.762
2.0	4.444	6.061	5.128	5.128	4.878	4.762	3.509	4.545	5.556	4.878	5.128	5.128
2.2	4.082	5.882	5.000	5.128	5.000	5.263	4.167	4.348	5.714	5.128	5.000	5.128
2.4	4.000	6.250	4.878	5.263	4.878	5.000	4.651	4.444	5.714	5.000	5.128	4.878
2.6	4.545	6.061	5.128	5.263	4.762	5.128	4.878	4.167	5.263	5.405	5.556	5.263
2.8	4.545	5.882	4.878	4.878	4.878	5.128	4.762	5.263	5.714	5.128	5.128	4.878
3.0	5.012	6.061	5.128	5.000	5.000	5.263	4.545	6.061	5.634	5.263	4.762	5.000
3.2	5.000	5.128	5.128	4.762	5.128	5.000	5.562	5.731	5.554	5.479	6.240	5.378



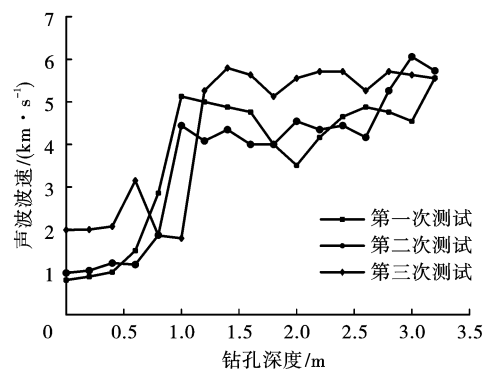
(a) 双侧壁导坑法声波波速(探孔 1)  
(a) Acoustic wave velocity of double-sided wall heading method (Borehole 1)



(b) 双侧壁导坑法声波波速(探孔 2)  
(b) Acoustic wave velocity of double-sided wall heading method (Borehole 2)



(c) 单侧壁导坑法声波波速(导洞)  
(c) Acoustic wave velocity of double-sided wall heading method (guide tunnel)



(d) 单侧壁导坑法声波波速(扩挖)  
(d) Acoustic wave velocity of double-sided wall heading method (expanding excavation)

图 11 不同方案波速-孔深关系曲线

Fig. 11 Relationship curve between wave velocity and hole depth under different working scheme

(2)对重构信号进行 Hilbert 变换,双侧壁导坑法的爆破地震波信号蕴含的能量主要集中在 200 ~ 280 Hz,单侧壁导坑法的振动频率则集中在 110 ~ 250 Hz 之间并出现两端较为明显的波峰;两组爆破方案频率均高于围岩自振频率,低频能量占比少。

(3)通过瞬时能量谱和三维 Hilbert 谱分析不同爆破方案的不同延期段别的瞬时能量分布:双侧壁导坑法瞬时能量合值高于单侧壁导坑法;两组方案的瞬时能量最大值均出现在掏槽孔,分别占总能量的 41.67% 和 21.43%;单侧壁导坑法的瞬时能量在各延期时段上分布更均匀且较双侧壁导坑法低,故更适用于该水封洞库爆破开挖。

(4)利用声波探测对不同方案爆破后的围岩松动范围分析;双侧壁导坑法两侧拱腰围岩松动范围与单侧壁导坑法导洞面大致相同,深度为 1.0 ~ 1.2 m;扩挖面围岩松动深度为 0.8 m。进一步证明单侧壁导坑法更适用于该水封洞库爆破开挖。

### 参考文献 (References)

- [1] 李倩冬. 地下水封油库技术的发展及在我国的应用前景[J]. 化工管理, 2017(25): 16-17.
- [1] LI Qian-dong. Development of underground water sealed oil storage technology and its application prospects in China[J]. Chemical Management, 2017, (25): 16-17. (in Chinese)
- [2] 郭 响. 地下储气库建设技术研究现状及建议[J]. 石化技术, 2017, 24(8): 46.
- [2] GUO Xun. Research and proposals on underground gas storage construction technologies[J]. Petrochemical Technology, 2017, 24(8): 46. (in Chinese)
- [3] 丁国生. 全球地下储气库的发展趋势与驱动力[J]. 天然气工业, 2010, 30(8): 59-61.
- [3] DING Guo-sheng. Developing trend and motives for global underground gas storage[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(8): 59-61. (in Chinese)
- [4] 曹洋兵. 大型地下水封储气库围岩变形破坏机制与锚喷支护研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- [4] CAO Yang-bing. Deformation-Failure Mechanism and Bolt Shotcrete Support of Surrounding Rock in Large Underground Water Sealed Liquefied Petroleum Gas Storage Caverns[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese)
- [5] 彭振华, 李俊彦, 孙承志, 等. 地下水封洞库的库址选择研究[J]. 油气储运, 2008, 27(1): 60-62.
- [5] PENG Zhen-hua, LI Jun-yan, SUN Cheng-zhi, et al. Site determination on underground water-sealing oil storage in rock caverns[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2008, 27(1): 60-62. (in Chinese)
- [6] 杨仁树, 李成孝, 陈 骏, 等. 我国煤矿岩巷爆破掘进发展历程与新技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 224-241.
- [6] YANG Ren-shu, LI Cheng-xiao, CHEN Jun, et al. Development history and new technology research progress of rock roadway blasting excavation in coal mines in China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 224-241. (in Chinese)
- [7] 张 帅, 薛江龙, 杨健康, 等. 基于 HHT 分析的大断面软岩隧道爆破振动控制效果研究[J]. 工程爆破, 2023(6): 158-166.
- [7] ZHANG Shuai, XUE Jiang-long, YANG Jian-kang, et al. Research on the vibration control effect of large section soft rock tunnel blasting based on HHT analysis[J]. Engineering Blasting, 2023(6): 158-166. (in Chinese)
- [8] 张日强, 闫大洋, 曹 洋, 等. 矿山爆破振动信号时频分析的研究进展综述[J]. 世界有色金属, 2021(16): 130-131.
- [8] ZHANG Ri-qiang, YAN Da-yang, CAO Yang, et al. Review of research progress on time-frequency analysis of mining blasting vibration signals[J]. World Nonferrous Metals, 2021(16): 130-131. (in Chinese)
- [9] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998: 903-995.
- [10] 付晓强, 刘纪峰, 张会芝, 等. 隧道爆破信号主分量特征提取与毫秒延期识别研究[J]. 隧道建设, 2019, 39(S1): 117-124.
- [10] FU Xiao-qiang, LIU Ji-feng, ZHANG Hui-zhi, et al. Principal component feature extraction and millisecond delay recognition of tunnel blasting signal[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(S1): 117-124. (in Chinese)
- [11] 韦 啸, 高文学, 王林台, 等. 基于 EEMD 的地铁隧道爆破振动信号分析与应用研究[J]. 隧道建设, 2019, 39(8): 1293-1300.
- [11] WEI Xiao, GAO Wen-xue, WANG Lin-tai, et al. Analysis and application of metro tunnel blasting vibration signal based on EEMD[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(8): 1293-1300. (in Chinese)
- [12] 马其华, 王宜泰. 声波法测试巷道围岩松动圈的现场应用[J]. 煤炭工程, 2009(8): 103-105.
- [12] MA Qi-hua, WANG Yi-tai. Field application of acoustic-wave method to test roadway surrounding rock loose zone[J]. Coal Engineering, 2009(8): 103-105. (in Chinese)
- [13] 杨艳国, 范 楠. 基于单孔声波法测试巷道围岩松动圈试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 93-100.

- [13] YANG Yan-guo, FAN Nan. Experimental study on surrounding rock loosening circle by single-hole acoustic wave testing method [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 93-100. (in Chinese)
- [14] 曹晓立, 高文学, 吕洪涛, 等. 爆破振动信号的 Hilbert-Huang 变换分析与应用研究 [J]. 兵工学报, 2016, 37(S2): 107-113.
- [14] CAO Xiao-li, GAO Wen-xue, LV Hong-tao, et al. Hilbert Huang transform analysis and application research of blasting vibration signals [J]. Journal of Ordnance Industry, 2016, 37(S2): 107-113. (in Chinese)
- [15] 赵明生, 梁开水, 罗元方, 等. EEMD 在爆破振动信号去噪中的应用 [J]. 爆破, 2011, 28(2): 17-20, 59.
- [15] ZHAO Ming-sheng, LIANG Kai-Shui, LUO Yuan-Fang, et al. Application of EEMD in blasting vibration signal de-noising [J]. Blasting, 2011, 28(2): 17-20, 59. (in Chinese)
- [16] 关晓磊, 颜景龙. 爆破振动信号的 HHT 时频能量谱分析 [J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(5): 535-541.
- [16] GUAN Xiao-lei, YAN Jing-long. The HHT time-frequency power spectrum analysis of the blasting vibration signal [J]. Explosion And Shock Waves, 2012, 32(5): 535-541. (in Chinese)
- [17] 单仁亮, 黄博, 耿慧辉, 等. 爆破动载作用下新喷射混凝土累积损伤效应的模型实验 [J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(3): 289-296.
- [17] SHAN Ren-liang, HUANG Bo, GENG Hui-hui, et al. Model experiment to study cumulative damage effects of young shotcrete under blasting load [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(3): 289-296. (in Chinese)
- [18] 邓军, 王津睿, 任帅京, 等. 声波探测技术在矿井领域中的应用及展望 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(6): 149-162.
- [18] DENG Jun, WANG Jin-rui, REN Shuai-jing, et al. Application and prospect of acoustic detection in the mining sector [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(6): 149-162. (in Chinese)

(上接第43页)

- [14] 周靖轩. 预应力与动态冲击下巷道复合围岩与结构力学响应及损伤特征研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [14] ZHOU Jing-xuan. Mechanical response and damage of roadway composite surrounding rock and structure under coupling of high prestress and dynamic impact [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021. (in Chinese)
- [15] XU Y, DAI F, XU W N, et al. Numerical investigation of dynamic rock fracture toughness determination using a semi-circular bend specimen in split Hopkinson pressure bar testing [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(3): 731-745.
- [16] 刘钊, 张树辉, 臧小静. 含双垂直缺陷岩体爆生裂纹扩展行为试验研究 [J]. 爆破, 2024, 41(1): 21-26, 66.
- [16] LIU Zhao, ZHANG Shu-hui, ZANG Xiao-jing. Experimental study on propagation behavior of blast-induced crack in rock mass with double vertical defects [J]. Blasting, 2024, 41(1): 21-26, 66. (in Chinese)
- [17] ZHOU Zi-long, LI Di-yuan, MA Guo-wei, et al. Failure of rock under dynamic compressive loading [J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(3): 339-343.
- [18] 王浩, 宗琦, 汪海波, 等. 冲击荷载下饱水凝灰岩断裂韧性及裂纹扩展分形特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(7): 1709-1719.
- [18] WANG Ha, ZONG Qi, WANG Hai-bo, et al. Fractal characteristics of fracture toughness and crack propagation of saturated tuff under impact loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(7): 1709-1719. (in Chinese)
- [19] CHEN R, XIA K, DAI F, et al. Determination of dynamic fracture parameters using a semi-circular bend technique in split Hopkinson pressure bar testing [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(9): 1268-1276.
- [20] FREW D J, FORRESTAL M J, CHEN W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar [J]. Experimental Mechanics, 2002, 42: 93-106.
- [21] 方士正, 杨仁树, 李炜煜, 等. 基于 NSCB 方法的冻结红砂岩动态断裂特性试验 [J]. 工程科学学报, 2023, 45(10): 1704-1715.
- [21] FANG Shi-zheng, YANG Ren-shu, LI Wei-yu, et al. Investigation of dynamic fracture characteristics of frozen red sandstone using notched semi-circular bend method [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(10): 1704-1715. (in Chinese)