

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.02.028

## 基于HHT研究断层岩溶对爆破地震波传播的影响\*

石义虎<sup>1,2</sup>, 邓德志<sup>1,2</sup>, 廖兵<sup>3</sup>, 向小东<sup>3</sup>, 胡世士<sup>4</sup>, 张聪瑞<sup>1</sup>, REFKY Adi Nata Satimin Noer<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070; 2. 中交四航局第二工程有限公司, 广州 510230;  
3. 葛洲坝兴山水泥有限公司, 兴山 443000; 4. 中国葛洲坝集团水泥有限公司, 荆门 448000)

**摘要:** 为研究在露天矿开采中边坡断层及内部岩溶对爆破地震波传播规律的影响, 对地震波经过断层和岩溶后的数据变化进行分析。在塘垭石灰岩露天矿南坡大断层上下盘和北坡+1014 m平台溶洞处布置测点采集爆破后地震波数据, 采用Hilbert-Huang变换方法处理原始波形, 从三维能量谱、边际谱及瞬时能量谱3个方面对爆破地震波经过断层及岩溶前后的变化进行了分析。结果表明: 爆破地震波穿越断层后的能量衰减十分明显, 在相同振动持续时间下, 最大瞬时能量从 $1.7 \times 10^{-5}$ 下降到 $6.0 \times 10^{-6}$ , 前后峰值能量相差约3倍, 其中高频频带60~80 Hz能量衰减至断层前1/2, 低频能量占比增加, 总体地震波能量降低, 断层从客观上阻碍了爆破地震波的传播。爆破地震波经岩溶前后的能量幅值差距不大, 最大瞬时能量从 $2.3 \times 10^{-4}$ 下降到 $1.9 \times 10^{-4}$ , 但穿越岩溶对地震波高频信号的过滤作用比较明显, 能量分布更加集中, 爆破地震波经过溶洞过程中发生了“鞭梢效应”, 经过溶洞后的质点峰值速度略大, 其振速放大系数经过计算为: 1.10~2.53, 频率整体上往低频方向发展, 建议加强溶洞上方岩体的支护。

**关键词:** 爆破振动信号; HHT变换; 断层; 岩溶; 瞬时能量

**中图分类号:** TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)02-0199-11

## Influence of Fault and Karst on Propagation of Blasting Seismic Wave based on HHT Method

SHI Yi-hu<sup>1</sup>, DENG De-zhi<sup>1,2</sup>, LIAO Bing<sup>3</sup>, XIANG Xiao-dong<sup>3</sup>, HU Shi-shi<sup>4</sup>,  
ZHANG Cong-rui<sup>1</sup>, REFKY Adi Nata Satimin Noer<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 3. Gezhouba Xingshan Cement Co., Ltd., Xingshan 443000, China; 4. China Gezhouba Group Cement Co., Ltd., Jingmen 448000, China)

**Abstract:** In order to study the influence of faults and internal karst on the propagation law of blasting seismic waves in open-pit mining, the change of seismic waves passing through faults and karst was analyzed. To collect the seismic data after blasting, monitoring points were arranged at the upper and lower walls of a large fault on the south slope and a karst cave at the +1014 m platform of the north slope of the Tangya limestone open pit mine. The Hilbert Huang transform method was used to process the original waveforms, and the changes of blasting seismic waves passing through the fault and the karst cave were analyzed by the time-spectrum energy spectrum, marginal spectrum, and instantaneous energy spectrum. The results showed that the energy attenuation of blasting seismic waves passing

收稿日期: 2023-01-04

作者简介: 石义虎(1998-), 男, 硕士研究生, 矿山安全, (E-mail) shiyihu\_ah@qq.com。

通讯作者: 张聪瑞(1991-), 男, 高级实验师, 博士, 矿山安全, (E-mail) 230352716@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金(52174087); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(项目批准号 2021IVA134)

through the fault is very obvious. With the same vibration duration, the maximum instantaneous energy decreased from  $1.7 \times 10^{-5}$  at the front of the fault to  $6.0 \times 10^{-6}$  at the rear of the fault which was reduced to about 1/3 of the previous value. Among them, the energy at the rear of the fault in the frequency band of 60 ~ 80 Hz attenuated to 1/2 of that at front the fault. At the same time, the energy proportion of lower frequency band increased while the overall seismic wave energy decreased. The fault objectively hinders the propagation of blasting seismic waves. In addition, the energy change of blasting seismic wave was not obvious with the maximum instantaneous energy changed from  $2.3 \times 10^{-4}$  to  $1.9 \times 10^{-4}$  when it passed through the karst cave. However, the filtering effect of the high-frequency signal of seismic waves passing through the karst was obvious, and the energy distribution was more concentrated. The peak particle velocity on the rear part of the karst cave was slightly larger with an amplification coefficient of 1.10 ~ 2.53. The frequency band of energy generally developed to the low-frequency direction. Therefore, it is suggested to strengthen the support of rock mass above the karst.

**Key words:** blast vibration signal; HHT transform; fault; karst; transient energy

炸药爆破过程中会引发爆破地震波的产生并朝周围岩体扩散,爆破地震波表现为体波和面波两种形式,并造成岩体质点发生振动<sup>[1,2]</sup>。由于爆破地震波含有丰富的信息,因此提取和分析爆破振动信号中的信息是研究爆破振动效应非常重要的手段<sup>[3]</sup>。

为了从非平稳的爆破振动信号中获得有用的信息,HHT时频分析技术在该领域被广泛采用<sup>[4,5]</sup>。宋肖龙采用EEMD-HHT变换方法消除高频波和杂波的干扰<sup>[6]</sup>,使得信号特征更易提取。胡刚利用HHT理论分析隧道围岩结构爆破累积损伤效应<sup>[7,8]</sup>,通过对振速波形面积与理论面积进行对比,从瞬时能量角度验证了该方法的可行性。杨长卫利用HHT谱研究地震振动作用下的边坡变形和破坏<sup>[9]</sup>。李学龙基于HHT方法对岩体单轴加载时的声发射波形特征进行分析<sup>[10]</sup>,Hilbert三维能量谱更为明显地表明了失稳破坏临界阶段的能量低频集聚。费聿鹏利用HHT能量谱分析长城附近隧道开挖的爆破能量衰减规律<sup>[11]</sup>。

综上所述,经验模态分解(EMD)和HHT频谱分析从三维图谱、边际谱和瞬时能量谱对爆破振动信号进行分析,该分析方法具有自适应性、完整性、重构能力<sup>[12,13]</sup>。HHT频谱分析方法广泛用于矿山爆破领域,但针对露天矿山边坡断层及岩溶对爆破地震波传播规律方面研究较少。塘垭石灰岩露天矿采用中深孔台阶爆破方式对矿体进行开采,但矿山岩体节理裂隙发育异常,且受多断层多溶洞的影响,对爆破地震波的传播规律有着不同程度的影响,因此在爆破地震波经过的断层和溶洞附近设立监测点,获取矿山爆破振动数据,对数据进行HHT频谱分析,从三维图谱、边际谱和瞬时能量谱对爆破振动信号进行解读,研究断层及岩溶对爆破地震波的传播影响。

## 1 基于EMD-HHT频谱分析方法

EMD-HHT分析法不再以单一的波形基底为前提,而是以实际测量的波形数据依靠自身时间变量进行频谱分解。因此利用Matlab软件编译EMD分解程序,导入爆破振动波形数据进行EMD分解处理,运行代码后将获得有限个互不相同的IMF分量。提取其中的优势频段对IMF分量进行信号重构,同时通过编译好的Hilbert变换程序,对重构后的信号进行Hilbert变换,频率幅值转化为边际谱、时频谱和瞬时能量谱等,用以研究信号本身的属性特质,综合反映时间、频率及能量等信息。EMD分解和Hilbert变换式该方法的主要两个重点步骤。

### (1) EMD分解

假设条件:所有的爆破振动信号全部由若干个不完全一致的IMF分量合成。

满足条件:每一个IMF分量的极值点和与相交零点的个数差值为一。随机时间线上的振动信号函数的极大极小值的包络线均值为零。实现流程如下:

求信号函数 $h(t)$ 的极大极小值和其上、下包络线的均值 $b_l(t)$ ,两式相减得到新序列 $l_1(t)$ ,该新序列用于剔除低频信号,即

$$l_1(t) = h(t) - b_l(t) \quad (1)$$

对上述算法循环 $k$ 次操作,直至 $l_1(t)$ 无法进行再次分解代表其均值无限接近于0。其中分解出的第一个IMF即为最高频率的分量函数。再去掉一个剩余分量信号 $m_1(t)$ ,即

$$g_1(t) = m_1(t) - h(t) \quad (2)$$

以 $m_1(t)$ 为计算对象,多次进行上述方法,获得第2个IMF分量 $g_2(t)$ ,循环进行 $n$ 次计算,计算出 $n$ 个IMF分量。循环就此完成,得出

$$h(t) = \sum_{j=1}^n g_j(t) + m_n(t) \quad (3)$$

上式  $m_n(t)$  代表残余分量, 直观表示出原始函数的平均趋势。每个 IMF 分量  $g_1(t), g_2(t), \dots, g_n(t)$  具有从高到低频率的分布特征。

(2) Hilbert 变换

对时间函数  $T(t)$  进行希尔伯特变换,  $C$  是 Cauchy 主值。

$$H(t) = \frac{1}{\pi} C \int_{-\infty}^{\infty} \frac{T(\delta)}{t - \delta} d\delta \quad (4)$$

当  $T(t)$  和  $H(t)$  形成复共轭时即可获得一个分解信号

$$P(t) = T(t) + jH(t) = b(t)e^{j\alpha(t)} \quad (5)$$

其中

$$b(t) = \sqrt{T^2(t) + H^2(t)} \quad (6)$$

$$\alpha(t) = \arctan \frac{H(t)}{T(t)} \quad (7)$$

将瞬时频率定义为  $\omega = \frac{d\alpha(t)}{dt}$ , 对每一个 IMF 分量进行希尔伯特变换求解 Hilbert 谱

$$M(\omega, t) = Re \left\{ \sum_{i=1}^n b_i(t) \exp \left[ j \int \omega_i(t) dt \right] \right\} \quad (8)$$

由式(9)可求解出振幅与时频之间的相互关系, 进而对希尔伯特谱对时间进行积分求解出边际谱

$$M(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} M(\omega, t) dt \quad (9)$$

下一步把振幅的平方对频率积分求解出瞬时能量谱

$$N(t) = \int_{\omega} M^2(\omega, t) dt \quad (10)$$

## 2 爆破振动监测

### 2.1 工程概况

塘垭水泥灰岩矿是葛洲坝兴山水泥公司的自备矿山, 于 2009 年建成投产, 资源量合计 3036.36 万 t。见图 1。矿山为山坡露天矿山, 设计范围内最高开采

标高 +1062 m, 最低开采标高 +880 m, 根据矿山地形条件、矿层赋存情况结合矿区开采现状, 设计采用自上而下的水平分层法开采, 台段高 12 m。该矿山爆破设计采用中深孔松动爆破, 炸药选用 2# 岩石乳化炸药, 药卷直径 70 mm, 炸药密度  $\xi = 1.16 \text{ g/cm}^3$ 。具体孔网参数见表 1。



图 1 塘垭水泥灰岩矿露天边坡图

Fig. 1 Open-pit slope of Tangya cement limestone mine

表 1 孔网参数

Table 1 Blast hole parameter

参数名称	参数选择
钻孔直径 $d$	90 mm
台阶高度 $H$	12 m
抵抗线 $W_{\max}$	$W = 24d + 0.90 = 3.06 \text{ m}$
堵塞长度 $h$	$h_0 = 1.5W = 4.59 \text{ m}$
炮孔间距 $a$	3.30 m
炮孔排距 $b$	3.06 m
炸药单位耗药量 $q$	$0.33 \text{ kg/m}^3$
单孔装药量 $Q$	40 kg

采用逐孔起爆方式, 选用非电导爆管起爆系统, 为保证孔内炸药可靠起爆及形成稳定爆轰, 每个炮孔内放两个起爆雷管。炮孔直径为 90 mm 共 50 个炮孔, 炮孔深度为 12 m; 单孔装药量 40 kg, 其中孔底部装 4 kg 乳化炸药, 其余装 36 kg 大包岩石炸药。同一排的炮孔孔间毫秒延期时间为 50 ms, 相邻排的炮孔孔间毫秒延期时间为 110 ms。见图 2。

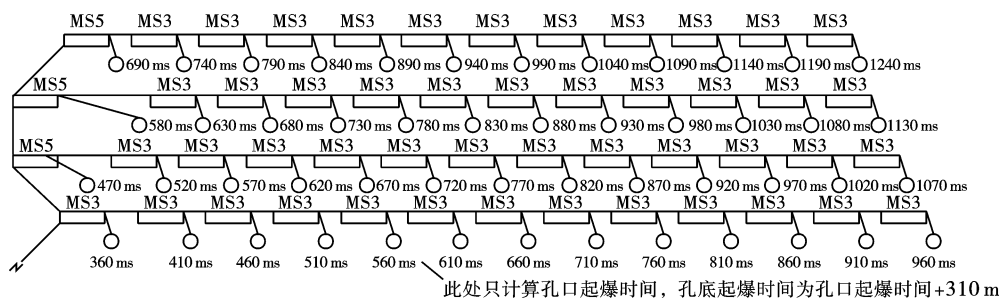


图 2 起爆网路图

Fig. 2 Detonation network diagram

本次爆破振动监测设备采用成都中科测控生产的 TC-4850 爆破振动记录仪,通过上述孔网参数及起爆方式分析,爆破振动记录仪的监测参数设置如下:采样率设置为 8 K,采样时间设置为 2 s 和采样延时设置为 -100 ms。上述参数设置可保证有效信号的可靠触发和完整记录爆破振动信号。

## 2.2 断层样例获取

针对矿山边坡大断层分布情况,在南坡一大断层上下盘布设爆破振动监测点。爆破地震波先经过断层下盘监测点最后到达断层上盘监测点。监测实施图如图 3 所示。测点的现场实际监测结果共两组(六个)爆破振动信号数据。从表 2 来看,当爆破地震波从断层下盘传播至断层上盘时,三个方向的质

点峰值振速和主频均有不同程度的下降,详见表 2。



图 3 断层监测实施图

Fig. 3 Fault monitoring implementation diagram

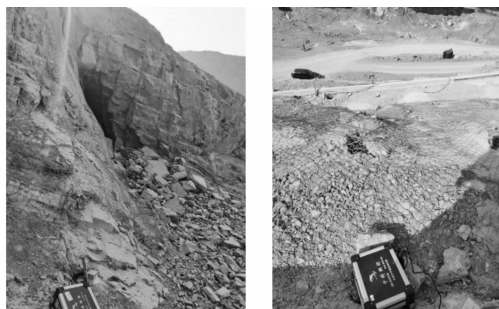
表 2 断层三向振动监测数据统计表

Table 2 Vibration monitoring data for the fault

测点	组数	X 方向		Y 方向		Z 方向		R/m	单段齐爆药量 Q/kg
		$V_x/(cm \cdot s^{-1})$	$F_x/Hz$	$V_y/(cm \cdot s^{-1})$	$F_y/Hz$	$V_z/(cm \cdot s^{-1})$	$F_z/Hz$		
下盘	1	0.652	53.462	0.472	58.392	0.418	36.036	188.1	40
上盘		0.237	41.747	0.423	48.835	0.242	42.105	211.3	40
下盘	2	4.810	27.400	3.770	39.700	2.640	48.300	106.6	40
上盘		3.760	26.300	2.420	24.400	2.130	43.800	121.6	40

## 2.3 岩溶样例获取

针对矿山边坡岩溶分布情况,在北坡 +1014 m 出露溶洞处布设爆破振动监测点。爆破地震波先经过溶洞下方岩体监测点最后到达溶洞上方岩体监测点。监测实施图如图 4 所示。在矿山爆破现场共测的两组(四个)爆破振动数据,详见表 3。



(a) 溶洞下方岩体监测点 (b) 溶洞上方岩体监测点  
(a) Monitoring point below Karst Cave (b) Monitoring point above karst cave

图 4 溶洞监测实施图

Fig. 4 Implementation diagram of cave monitoring

## 3 爆破振动 HHT 频谱分析

### 3.1 穿越断层前后爆破振动 HHT 频谱分析

#### (1) EMD 分解

矿山存在大断层对爆破地震波的传播规律特性

有着不同程度的影响,因此研究断层对爆破地震波的传播影响十分有必要。爆破振动信号能量随时间频率变化的研究在地震波跨断层传播特性的研究中起着非常重要的作用。通常,在工程爆破中对地震波的切向、径向和垂直方向的三维信号进行监测。在中国和瑞典等西方国家,爆破振动强度的指标采用质点垂直方向振速峰值。由于垂直分量具有很强的代表性,因此本分析选用第一组数据的垂直方向(Z 方向)的分量的爆破振动信号作为分析对象,其原始波形如图 5 所示。

如图 6 所示,原始信号在穿越断层之前和之后经过 EMD 分解产生了 11 个和 10 个 IMF 分量。从穿越断层之前和之后的第一个 IMF 来看,波长比较短且密集程度高,从第二个至最后一个 IMF 的变化过程来看,波长呈慢慢变长趋势且最后一个趋于平直,这表明 EMD 的分解规律是从高频至低频,最后一个为残差 IMF。在 EMD 分解中没有单一的基底函数,因此每个 IMF 分量的提取都是由信号的自身特征设定的,这就是它的适应性,使信号分析具有很大的通用性和多功能性。与此不同的是,像小波和傅里叶这样的替代性分析方法必须预先设置基底函数,基底函数本身有一定的局限性,因此各种结果的选择并不对等,一般来说甚至有很大的区别,此外还

不可避免地引入了频率扩散。

表 3 溶洞三向振动监测数据统计表

Table 3 Vibration monitoring data of karst cave

测点	组数	X 方向		Y 方向		Z 方向		R/m	单段齐爆药量 Q/kg
		$V_x/(cm \cdot s^{-1})$	$F_x/Hz$	$V_y/(cm \cdot s^{-1})$	$F_y/Hz$	$V_z/(cm \cdot s^{-1})$	$F_z/Hz$		
下方	1	0.963	38.462	1.053	53.333	1.355	36.364	109.9	40
上方		1.518	48.193	2.661	36.697	1.484	67.797	121.3	40
下方	2	2.225	26.667	1.284	36.697	1.554	37.383	115.5	40
上方		2.795	37.736	1.722	43.011	1.928	45.977	136.9	40

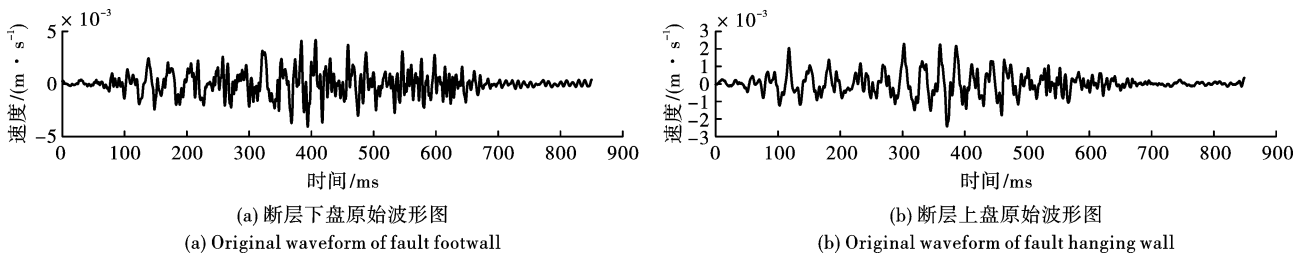


图 5 原始波形图

Fig. 5 Original waveform

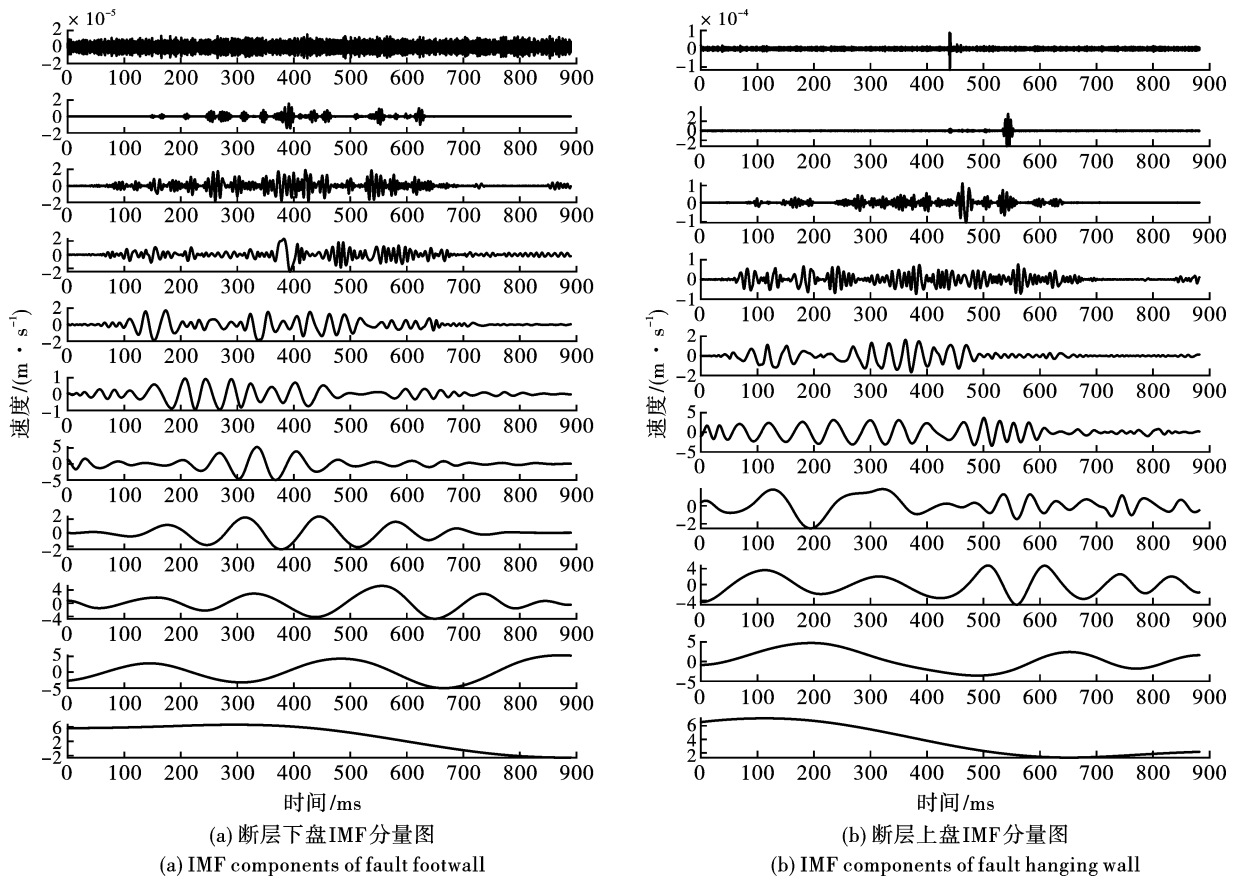


图 6 爆破地震波振动信号 EMD 分解结果图

Fig. 6 EMD decomposition results of blasting seismic waveforms

大多数被 EMD 分解的 IMF 分量具有明确的物理意义。从断层下盘 IMF 分量图来看,第一个 IMF 分量频率最高,所占能量非常小,表明它是观测中引

入的高频噪声,在分析中需要去噪。后来的 IMF 分量的频率逐步降低,表明在爆破地震波的整个传播过程中,高频被大幅度衰减,但第二个至第八个 IMF

分量的振幅较第一个 IMF 分量大幅度增加,并包含了信号的大部分能量,属原始信号的优势频段,因此边坡主要受到这些分量造成的受震影响。此外,第九个和第十个 IMF 分量是分解后频率更小的分量,这可能是信号固有的或由不同情况引起的。最后一个 IMF 代表着爆破测振仪的散失抑或是测振信号微弱的衰减趋势。这意味着 EMD 方法是一种新的主成分分析方法,它可以提取信号本身固有的从高到低的所有模态函数,并分解出许多 IMF 分量,集中了原始信号中最重要的信息。同理,从断层上盘

IMF 分量图来看,第一个至第七个 IMF 分量是进行研究的主要对象,它几乎囊括了爆破振动信号的全部能量,属于爆破振动信号中的主导振动频率,又称为优势频率。最后一个 IMF 并没有有用的分析价值和意义,可以被忽略。由于重建的信号波能排除干扰因素,更符合和便于研究爆破振动波的真实特性规律,将断层下盘的 IMF 分量去掉第一、九、十、十一个 IMF 分量和断层上盘的 IMF 分量去掉第十个 IMF 分量,进行爆破振动数据 EMD 重构,以便后续 HHT 频谱分析。见图 7。

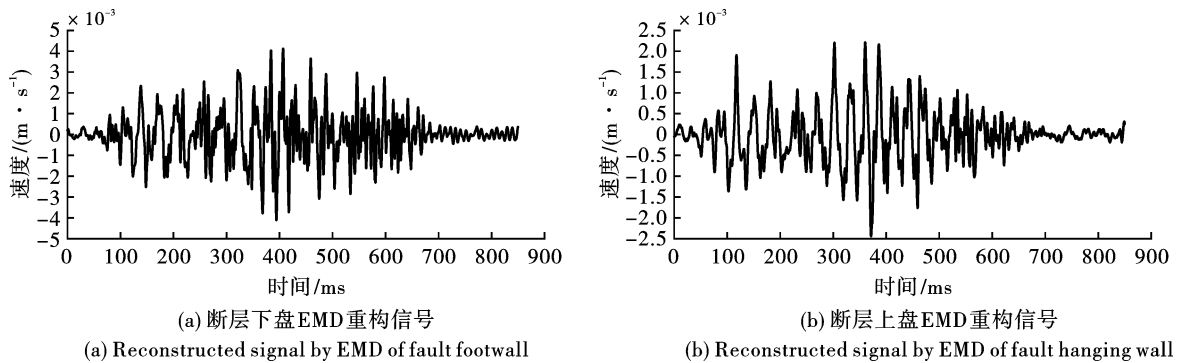


图 7 EMD 重构信号波形图

Fig. 7 Reconstructed signal by EMD

## (2) Hilbert 变换和 Hilbert 谱分析

利用 Matlab 编译的程序将处理后的爆破振动信号进行希尔伯特变换得到边际谱分析图、瞬时能量图和频率时间-能量三维谱图,利用相应图谱对爆破振动信号分析对比。

断层上下盘边际谱图(图 8)将直观地分析爆破振动信号的各个频率组成,并准确地反映每个频率部分的能量振幅。从断层上下盘边际谱图中可以看

出,断层下盘爆破振动频率主要集中在 20 ~ 40 Hz, 累计能量范围为  $0.2 \times 10^{-5} \sim 4.0 \times 10^{-5}$ ,且含有多个子频带;但是经过断层后边际谐波峰减少,子频带变少,断层上盘爆破振动频率主要集中在 20 ~ 30 Hz, 积累的能量范围变为  $0.1 \times 10^{-5} \sim 4.0 \times 10^{-5}$ ,但是低频能量占比增加,穿越断层后高频频带 60 ~ 80 Hz 积累的能量范围衰减约至 1/2, 能量分布更加集中。

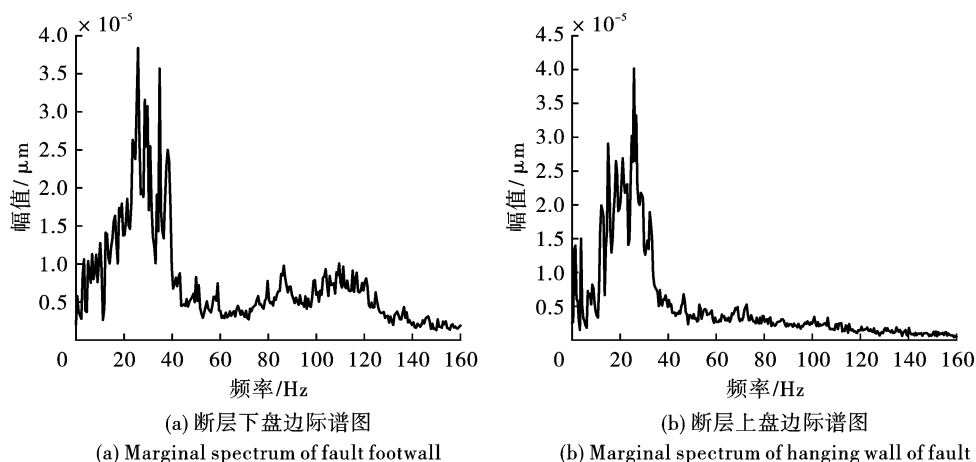


图 8 边际谱分析图

Fig. 8 Marginal spectrum analysis diagram

从断层上下盘瞬时能量图中(图 9)分析得出,

能量随时间的变化表明,这是由导爆管引起的爆破

结果,图中波峰起伏高点处瞬时能量强烈,断层下盘的波形信号起伏变化在 0.10 ~ 0.70 s 的区域内,断层上盘的波形起伏变化在 0.05 ~ 0.68 s 的区域内,断层下盘信号达到瞬时能量最高点处时间为 0.40 s 左右,此处最大的瞬时能量约为  $1.7 \times 10^{-5}$ 。跨越

断层后瞬时能量达到最大值的时间在 0.38 s 左右,此处最大的瞬时能量约为  $6.0 \times 10^{-6}$ 。将两组信息进行比对得出,跨越断层前的最大瞬时能量是跨越断层后最大瞬时能量的 3 倍左右。

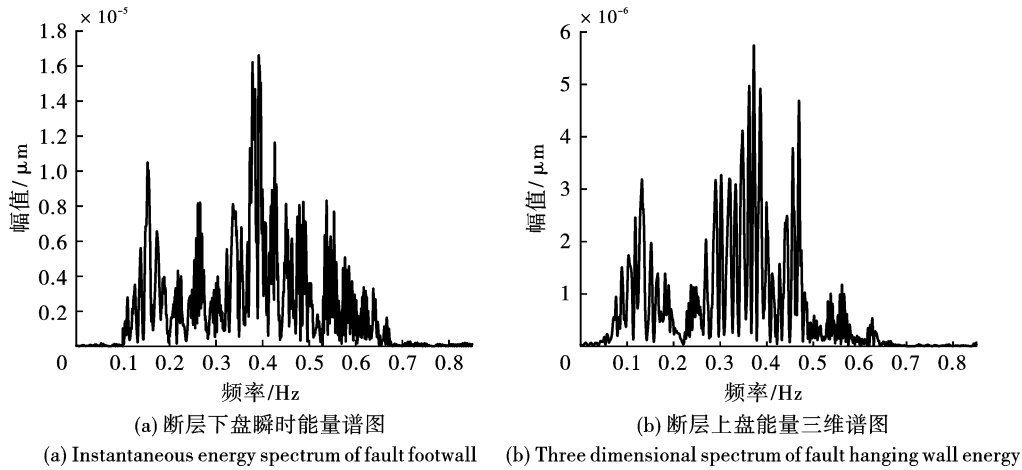


图 9 瞬时能量谱分析图

Fig. 9 Instantaneous energy analysis

如图 10 所示,图中的能量是指归一化的能量,它可以直观地复现振动信号的瞬时形态特征,并全面、清晰地复现信号能量随频率和时间的特殊分布。可以清楚看到断层下层爆破地震波的能量幅值大于断层上盘,这表明断层具有减震作用,很大程度上减弱衰退了爆破地震波的能量,这种作用效果是十分明显的。通过分析其原因表明,推断出产生这种现

象的原因是由于断层夹层中充填了大量的断层泥和高度风化的破碎物质,而正是这些物质对爆破地震波的传播起到了阻滞作用,造成其振幅下降。断层下盘地震波能量主要集中在 20 ~ 40 Hz 的中频段,断层上盘则分散在 20 ~ 30 Hz 的各个频段,说明断层对爆破地震波的高频信号具有过滤作用,频率整体往低频上发展。

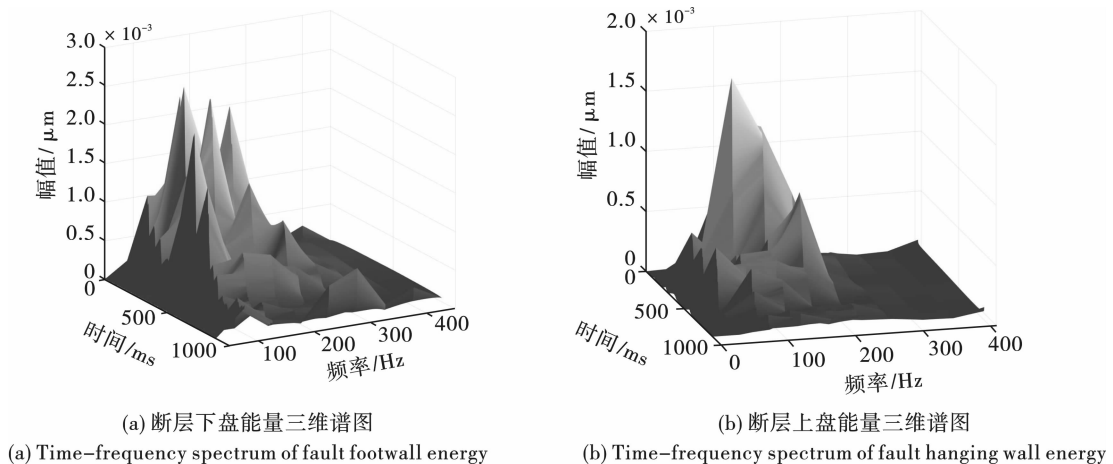


图 10 能量三维谱分析图

Fig. 10 Time-frequency spectrum

### 3.2 穿越岩溶前后爆破振动 HHT 频谱分析

#### (1) EMD 分解

本次分析选用第一组数据的竖直方向的分量的爆破振动信号作为分析对象,其原始波形如图 11

所示。

对穿越溶洞前后原始信号进行 EMD 分解,可得到 10 和 11 个 IMF 分量。见图 12。

从溶洞下方岩体 IMF 分量图来看,第一个至第

九个 IMF 分量是进行研究的主要对象,并包含了信号的大部分能量,属原始信号的优势频段,因此边坡主要受到这些分量造成的受震影响。而最后一个 IMF 代表着爆破测振仪的散失抑或是测振信号微弱的衰减趋势,没有实际研究的价值和意义,可以忽略。同理,从溶洞上方岩体 IMF 分量图来看,第三

个至第九个 IMF 分量是进行研究的主要对象。由于重建的信号波更符合爆破振动波的实际情况,将溶洞下方岩体的 IMF 分量去掉第十 IMF 分量和溶洞上方岩体的 IMF 分量去掉第一、二、十和十一个 IMF 分量,进行爆破振动数据 EMD 重构。见图 13。

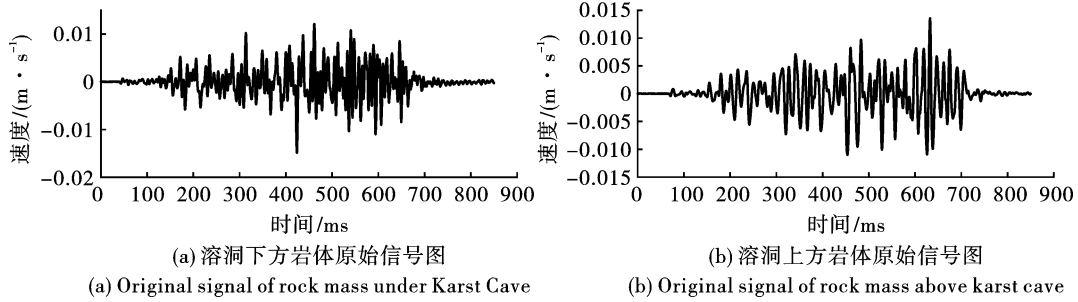


图 11 原始波形图

Fig. 11 Original waveforms

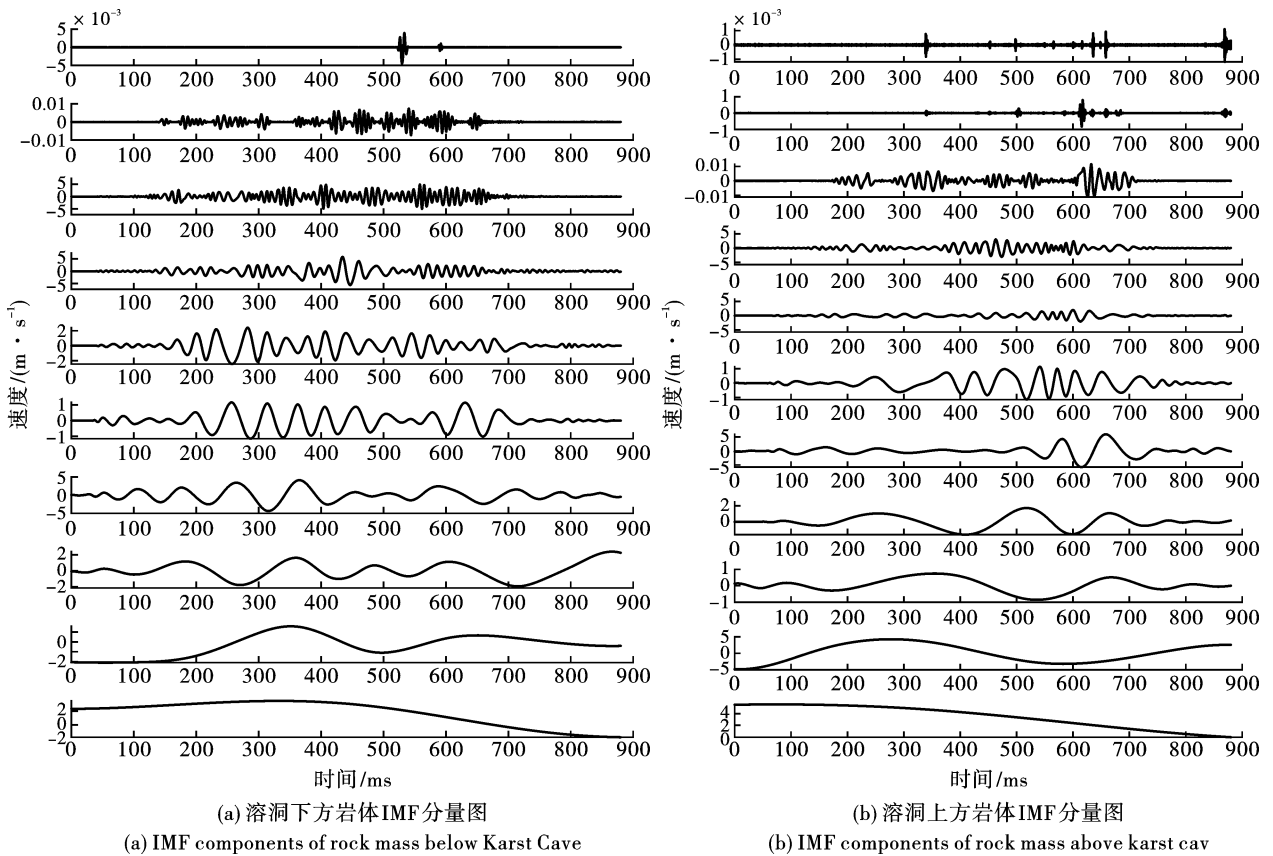


图 12 爆破地震波振动信号 EMD 分解结果图

Fig. 12 EMD decomposition results of blasting seismic waveform

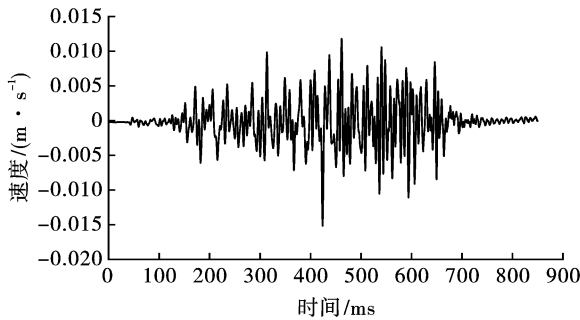
(2) Hilbert 变换和 Hilbert 谱分析

利用 Matlab 编译的程序将处理后的爆破振动信号进行希尔伯特变换得到边际谱分析图、瞬时能量图和频率时间-能量三维谱图,利用相应图谱对爆破振动信号分析对比。

由边际谱图(图 14)可以看出,溶洞下方岩体的爆破振动频率主要集中在 20 ~ 40 Hz,累计能量区域范围为  $0.1 \times 10^{-4} \sim 0.9 \times 10^{-4}$ ,但是经过溶洞后边际谐波峰减小,频带变窄,溶洞上方岩体爆破振动频率主要集中在 20 ~ 50 Hz,积累的能量范

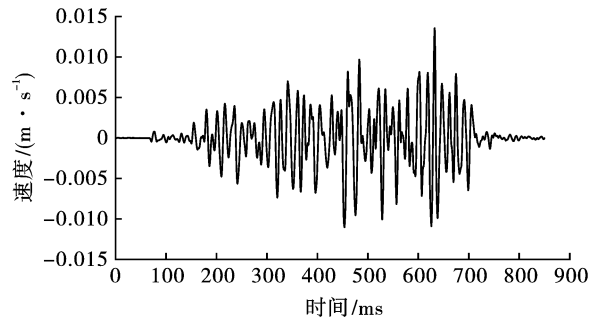
围变为  $0.1 \times 10^{-4} \sim 1.4 \times 10^{-4}$ , 能量衰减并不明显, 能量分布更加集中, 能量幅值在频域上分布有所

缩减。



(a) 溶洞下方岩体EMD重构图

(a) Reconstructed signal by EMD of rock mass under Karst Cave

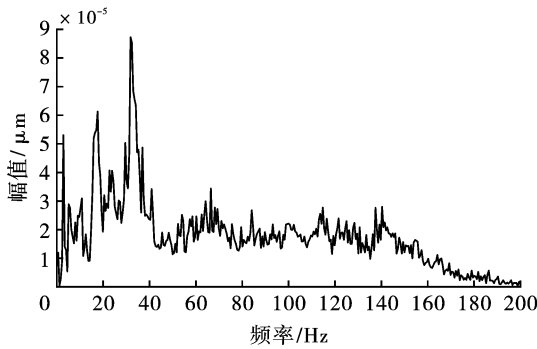


(b) 溶洞上方岩体EMD重构图

(b) Reconstructed signal by EMD of rock mass above Karst Cave

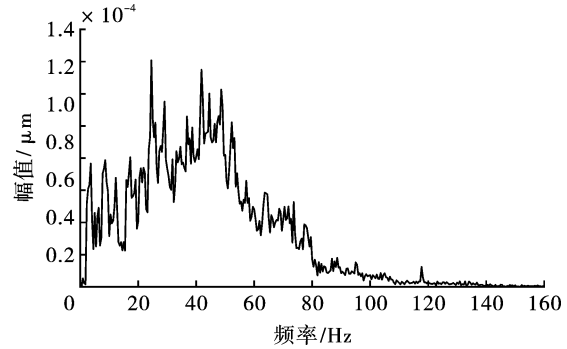
图 13 EMD 重构信号波形图

Fig. 13 EMD reconstruction signal waveform



(a) 溶洞下方岩体边际谱图

(a) Marginal spectrum of rock mass under Karst Cave



(b) 溶洞上方岩体边际谱图

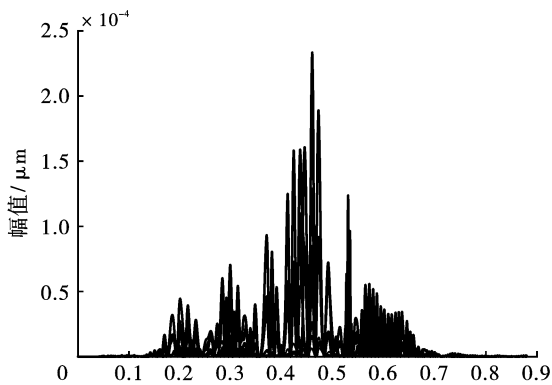
(b) Marginal spectrum of rock mass above karst cave

图 14 边际谱分析图

Fig. 14 Marginal spectrum analysis diagram

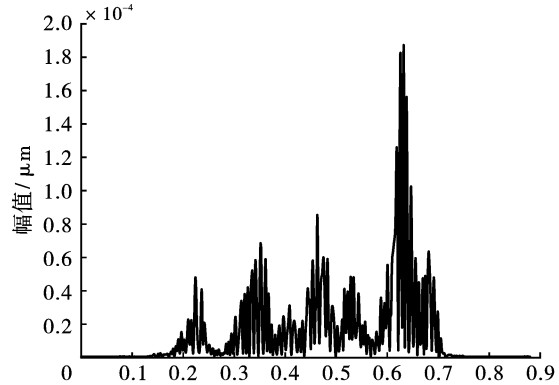
从瞬时能量图中(图 15)分析得出, 溶洞下方岩体的波形范围在 0.15 ~ 0.68 s 区域内, 穿越溶洞后的波形范围在 0.18 ~ 0.70 s 区域内, 溶洞下方岩体信号达到最大值瞬时能量时间在 0.42 s 左右, 最大

值瞬时能量约为  $2.3 \times 10^{-4}$ ; 穿越溶洞后达到最大值瞬时能量时间在 0.65 s 左右, 最大值瞬时能量约为  $1.9 \times 10^{-4}$ 。从数据中可以看出, 穿越溶洞后的最大值瞬时能量衰减并不明显。



(a) 溶洞下方岩体瞬时能量谱图

(a) Instantaneous energy spectrum of rock mass under Karst Cave



(b) 溶洞上方岩体瞬时能量谱图

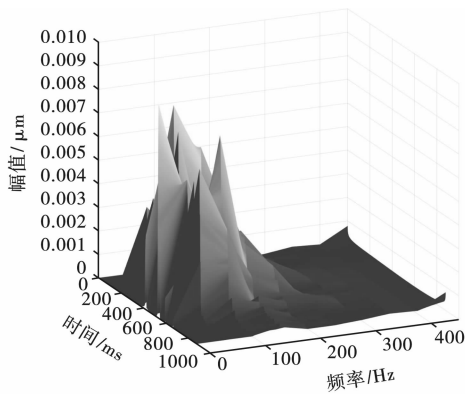
(b) Instantaneous energy spectrum of rock mass above karst cave

图 15 瞬时能量分析图

Fig. 15 Instantaneous energy analysis diagram

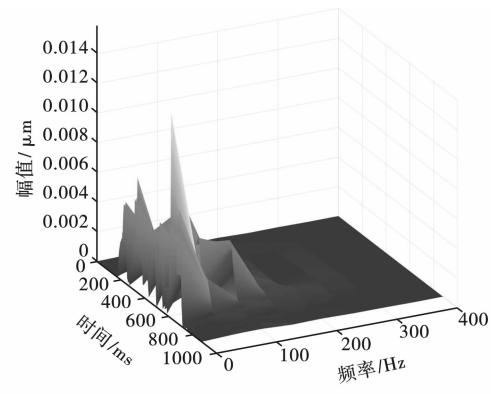
该信号的三维 Hilbert 谱如图 16 所示。可以清楚看到溶洞下方岩体爆破地震波的能量幅值大于溶洞上方岩体,但是总体能量差距不大,说明溶洞对爆破地震波能量的影响并不显著。从监测数据中可以看出,由于爆破地震波经过溶洞后的质点峰值速度要比经过溶洞前略大,有可能是爆破地震波经过溶洞过程中发生了“鞭梢效应”,其振速放大系数经过

计算为:1.10~2.53。溶洞下方岩体地震波能量主要集中在 20~40 Hz 的低频段,且一部分能量也集中在子频带 80~120 Hz 高频段;溶洞上方岩体则集中在 20~50 Hz 的频段,子频带变少。穿越溶洞后对地震波高频信号的过滤作用比较明显,频率整体上往低频方向发展。



(a) 溶洞下方岩体能量三维图谱

(a) Time-frequency spectrum of rock mass under Karst Cave



(b) 溶洞上方岩体能量三维图谱

(b) Time-frequency spectrum of rock mass above karst cave

图 16 能量三维谱分析图

Fig. 16 Three dimensional spectral analysis of energy

## 4 结论

通过利用 HHT 信号分析技术,对穿越断层和岩溶前后的岩体进行爆破地震波信号分析,揭示了爆破振动信号在穿越断层和岩溶前后的规律。

(1) 断层对爆破地震波能量的衰减作用十分明显,爆破地震波穿越断层后能量幅值下降较多,瞬时峰值能量锐减到 1/3。

(2) 溶洞对爆破地震波能量的衰减作用不明显,对地震波高频信号的过滤作用比较明显,溶洞下方岩体的爆破地震波的能量振幅相比溶洞上方岩体的差值并不大,主要能量衰减来自高频信号段。

(3) 爆破地震波经过溶洞过程中发生了“鞭梢效应”,经过溶洞后的质点峰值速度要比经过溶洞前大,其振速放大系数经过计算为:1.10~2.53。

(4) 断层在客观上阻碍了爆破地震波的传播,岩溶对爆破地震波能量的衰减作用效果并不显著且岩溶上方岩体在爆破振动的影响下更加容易失稳。

### 参考文献 (References)

[1] 雷 振,高正华,左宇军,等. 台阶爆破振动传播规律及动力响应特征研究[J]. 爆破,2019,36(4):137-145.  
[1] LEI Zhen, GAO Zheng-hua, ZUO Yu-jun, et al. Study on

vibration propagation law and dynamic response characteristics of bench blasting[J]. *Blasting*, 2019, 36(4): 137-145. (in Chinese)

- [2] 曹 峰,凌同华,张 胜. 考虑应力波透射影响的公路隧道爆破振动速度安全阈值[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(23):154-159. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.23.023.  
[2] CAO Feng, LING Tong-hua, ZHANG Sheng. Safety threshold of blasting vibration velocity of highway tunnel considering the influence of stress wave transmission[J]. *Vibration and Shock*, 2020, 39(23): 154-159. Doi: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.23.023. (in Chinese)  
[3] 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.  
[3] ZHANG Ri-qiang, YAN Da-yang, CAO Yang, et al. Review of research progress on time-frequency analysis of mine blasting vibration signals [J]. *World Nonferrous Metals*, 2021(16): 130-131. (in Chinese)  
[4] 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 Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995. DOI: 10.1098/rspa.1998.0193.  
[5] DONG E, AN L, LI Y, et al. Hilbert spectrum analysis

- method of blast vibration signal based on HHT instantaneous phase optimization[J]. Applied Acoustics, 2022, 192: 108732. DOI:10.1016/j.apacoust.2022.108732.
- [6] 宋肖龙,高文学,季金铭,等. 基于EEMD-HHT变换的爆破损伤分析方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2887-2896.
- [6] SONG Xiao-long, GAO Wen-xue, JI Jin-ming, et al. Blasting damage analysis method based on EEMD-HHT transform[J]. Journal of Central South University (NATURAL SCIENCE EDITION), 2021, 52(8): 2887-2896. (in Chinese)
- [7] 胡刚,费鸿禄,包士杰,等. 基于HHT分析隧道围岩结构爆破累积损伤效应[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(1): 249-259.
- [7] HU Gang, FEI Hong-lu, BAO Shi-jie, et al. Analysis of cumulative damage effect of blasting on surrounding rock structure of tunnel based on HHT[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(1): 249-259. (in Chinese)
- [8] 李祥龙,杨长辉,王建国,等. 基于数值模拟和频谱分析的孔间精确延时探究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(2): 99-105.
- [8] LI Xiang-long, YANG Chang-hui, WANG Jian-guo, et al. Research on accurate time delay between holes based on numerical simulation and spectrum analysis[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(2): 99-105. (in Chinese)
- [9] 杨长卫,童心豪,蔡德钧,等. 基于HHT的地震作用下基覆型边坡坍塌特性研究[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(5): 12-20.
- [9] YANG Chang-wei, TONG Xin-hao, CAI De-gou, et al. Study on collapse characteristics of foundation overburden slope under earthquake action based on HHT[J]. China Railway Science, 2021, 42(5): 12-20. (in Chinese)
- [10] 李学龙,陈绍杰,刘淑敏,等. 基于HHT分析的岩体单轴加载声发射波形特征(英文)[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(6): 1843-1856.
- [10] LI Xue-long, CHEN Shao-jie, LIU Shu-min, et al. Acoustic emission waveform characteristics of rock mass under uniaxial loading based on HHT analysis[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(6): 1843-1856. (in Chinese)
- [11] 费聿鹏. 下穿古遗址隧道爆破振动预测模型及安全界限[J]. 工程爆破, 2020, 26(5): 42-51.
- [11] FEI Yu-peng. Prediction model and safety limit of blasting vibration of tunnel under ancient ruins[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(5): 42-51. (in Chinese)
- [12] 孙苗. 爆破地震波信号处理HHT改进算法及应用研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2021. [2022-08-11]. DOI:10.27492/d.cnki.gzdz.2021.000091.
- [12] SUN Miao. Improved HHT algorithm and application research of blasting seismic wave signal processing[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021. [2022-08-11]. DOI:10.27492/d.cnki.gzdz.2021.000091. (in Chinese)
- [13] 李祥龙,赵泽虎,王建国,等. 基于EMD-HHT和小波理论的地下浅孔爆破振动规律研究[J]. 有色金属工程, 2021, 11(12): 100-108.
- [13] LI Xiang-long, ZHAO Ze-hu, WANG Jian-guo, et al. Research on vibration law of underground shallow hole blasting based on EMD-HHT and wavelet theory[J]. Nonferrous Metal Engineering, 2021, 11(12): 100-108. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

## 科技论文写作小知识——影响因子

影响因子(Impact Factor, IF)是汤森路透(Thomson Reuters)出品的期刊引证报告(Journal Citation Reports, JCR)中的一项数据。即某期刊前两年发表的论文在该报告年份(JCR year)中被引用总次数除以该期刊在这两年内发表的论文总数。这是一个国际上通行的期刊评价指标。

影响因子现已成为国际上通用的期刊评价指标,它不仅是一种测度期刊有用性和显示度的指标,而且也是测度期刊的学术水平,乃至论文质量的重要指标。影响因子是一个相对统计量。

影响因子在发展的过程中形成了两个指标:复合影响因子和综合影响因子。

复合影响因子是以期刊综合统计源文献、博硕士学位论文统计源文献、会议论文统计源文献为复合统计源文献计算。

综合影响因子主要是指文、理科综合,是以科技类期刊及人文社会科学类期刊综合统计源文献计算。

这两者都是按被评价期刊前两年发表的可被引文献在统计年的被引用总次数与该期刊在前两年内发表的可被引文献总量之比。