

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.026

复杂充填体对爆破地震波传播特性影响研究^{*}

贾志伟¹, 帅金山², 胡 勇²

(1. 中金黄金股份有限公司, 北京 100011; 2. 湖北三鑫金铜股份有限公司, 大冶 435100)

摘 要: 为了研究复杂充填体对爆破地震波传播特性的影响, 在湖北三鑫金铜矿鸡冠咀矿区-370 m中段充填体两侧矿房内布置监测点采集数据。采用 HHT 信号分析方法, 从边际谱及瞬时能量谱角度对爆破地震波穿越充填体前后的变化进行了分析, 采用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟手段, 研究了爆破地震波穿越充填体前后岩体的最大主应力变化。结果表明: 穿越充填体前后的爆破振动主频分别为 60~80 Hz 和 50~60 Hz, 表明该充填体对爆破地震波具有过滤高频的作用, 穿越充填体后高频频带 60~80 Hz 积累的能量范围比穿越充填体前衰减了 7 倍左右, 能量分布更加扩散。穿越充填体前的最大瞬时能量是穿越充填体后 27 倍左右。爆破地震波的传播经过充填体后, 使得岩体的最大有效应力下降了 14% 左右, 充填体两侧采场区域在爆破振动的影响下较为稳定。

关键词: 爆破振动; HHT 变换; 充填体; 数值模拟

中图分类号: TD235.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2022)03-0172-09

Study on Influence of Complex Filling Body on Blasting Seismic Wave Propagation Characteristics

JIA Zhi-wei¹, SHUAI Jin-shan², HU Yong²

(1. Zhongjin Gold Corporation Limited, Beijing 100011, China;

2. Hubei Sanxin Gold Copper Limited Company, Daye 435100, China)

Abstract: In order to study the influence of a complex filling body on the propagation characteristics of blasting seismic waves, blasting vibration data have been recorded on the monitoring points placed in the stopes on both sides of a filling body at -370 m level in Jiguanzui mining area of Hubei Sanxin Gold and Copper Mine. The signal analysis method, Hilbert-Huang transform (HHT) is used to analyze the changes of blasting seismic waves before and after propagating through the filling body from the perspective of marginal spectrum and transient energy spectrum. Furthermore, ANSYS/LS-DYNA numerical simulation is used to study the changes of maximum principal stress in the rock mass before and after the blasting seismic waves propagate through the filling body. The results show that the dominant frequency range of the blast vibrations before and after passing through the filling body are 60~80 Hz and 50~60 Hz, respectively. This indicates that the filling body has an effect of filtering high frequency contents. The energy accumulated in the frequency band 60~80 Hz after propagating through the filling body has attenuated to about 1/7 of that before propagating through the filling body. In addition, the energy distribution becomes more diffuse. Moreover, the maximum instantaneous energy of the seismic waves before propagating through the filling body is about 27 times that after propagating through the filling body. Although the blasting seismic waves reduce the maximum effective stress in the rock mass by about 14%, the stopes on both sides of the filling body still can generally keep stable.

Key words: blasting vibration; HHT transform; filling body; numerical simulation

伴随着科技的发展, 矿山生产规模不断扩大, 大直径深孔爆破技术的应用越来越广泛, 对爆破振动信号的研究也在逐步深入。通过一定的手段来捕捉和收集爆破产生的振动波信号并对其进行分析和解算, 可以有效帮助我们进行爆破振动的研究。在传统的傅里叶法爆破振动信号分析法相比^[1,2], HHT (Hilbert-Huang Transform) 分析法是一种创新性的且非常适用于矿山爆破振动波分析方法^[3]。伴随着充填采矿法在矿山广泛应用, 爆破过程中爆破地震波不可避免会穿越充填体, 因此很有必要研究充填体对于爆破地震波的影响。

针对充填体和爆破振动信号 HHT 分析的问题。赵亮针对振动波的衰减规律^[4], 结合动荷载传播理论, 通过现场爆破振动实验的手段, 得出振动波在矿体和充填体中的衰减系数。袁本胜为了探究爆破振动在安庆铜矿的充填体的衰减规律^[5], 通过爆破振动实验和声波测试法的手段, 结合分析试验数据得出: 充填体破坏区的爆破振动衰减慢。刘宏颖结合实验数据中的充填体内应力和损伤因素的变化情况^[6], 分析得出充填体边界失稳很大一部分是因为爆破参数选取得不合理, 在爆破参数选取上采取大边孔距。周俊汝通过分析 HHT 频段曲线的参数信息^[7], 得出爆破振动与爆心距存在正比关系, 主频会不断衰减, 其衰减公式拟合是由于局部振动波传播过程中会出现变动。曹光磊通过使用 ANSYS-DYNA 软件^[8,9], 建立巷道掘进模型并结合动力分析, 通过分析单元峰值有效应力结果来反映岩石内部在爆破过程中的应力分布变化。田凯针对如何优化浅埋隧道控制爆破的研究问题^[10], 运用 ANSYS/LSDYNA 进行数值模拟, 分析不同爆破方法和装药结构的爆破效果, 来确定浅埋隧道爆破优化方案。李强针对巷道、硐室等地下工程的稳定性问题^[11], 通过 HHT 信号解析技术, 分析爆破振动信号与频率的关系。宋文峰和魏新江使用 HHT 分析方法^[12,13], 研究了不同爆心距处爆破地震波 Hilbert 能量及瞬时能量衰减规律。张其虎和曹晓立为了对爆破地震波信号的峰值、频率和振幅等进行了分析^[14,15], 通过 HHT 方法和 EMD 分解地震波信号, 胡刚提出采用 HHT 理论变换爆破振动信号获取瞬时能量谱^[16,17],

依据质点振动能量分析隧道围岩结构爆破累积损伤效应的新方法, 并且同爆破振速波形面积理论对比, 证明该方法的可行性。目前已有研究对于充填体对爆破地震波的影响仍处在较浅的研究阶段。

因此, 在湖北三鑫金铜矿的鸡冠咀矿区已充填矿体的基础上进行残矿回采的工程背景下, 基于 HHT 信号分析方法和 ANSYS/LSDYNA 数值模拟手段, 研究回采过程中爆破地震波在穿越充填体前后的各项参数的变化, 极具工程指导和应用意义, 可以为分析爆破振动效应和如何减少爆破振动危害提供理论依据, 为后续矿山爆破优化提供技术帮助。

1 爆破振动测试

1.1 测试方案

论文以湖北三鑫金铜矿为工程研究背景, 矿井采取充填开采方法, 按采一隔一的要求分步进行回采, 结束后再进行充填。在每个中段之间留有 10 m 厚的顶底柱作为支护, 顶底柱共分为两层, 每层高 4 m, 上部由 2 m 高的矿体来护顶。如图 1 所示。因此, 在回采间柱时, 矿房的两边都出露在充填体两侧。矿井充填骨料来自于选矿厂分级处理的粗尾砂, 胶结材料经过反复试验和优选, 目前利用新型尾砂胶结材料来替代高水材料和普通混凝土及各种充填材料。新型尾砂胶结材料不仅费用低、水化物稳定、胶结强度高而且还有用量低、早期强度高等优点。

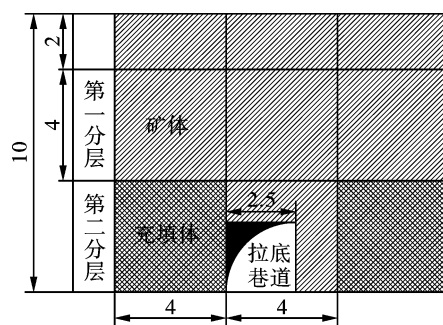


图1 回采方案示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of stoping(unit:m)

为了研究爆破地震波经过复杂充填体后的变化规律, 明确复杂充填体对爆破地震波传播特性的影响。开展爆破测振试验的主要目的是为了采集爆破振动原始信号并为优化爆破设计方案提供相关重要参数。本次测振设备选型为 TC-4850 型号, 共两台, 监测点位和设备布设范围均位于鸡冠咀矿区的 -370 m 中段中。其中号传感器布设矿房内, 号传感器布设在间隔充填体的相邻矿房内。布设传感器时尽量使爆源与传感器在同一直线上, 测点布设情

收稿日期: 2022-06-13

作者简介: 贾志伟(1965-), 男, 高级工程师, 从事黄金矿山采矿、爆破与安全管理工 32 年, (E-mail) 403888915@qq.com。

通讯作者: 帅金山(1974-), 男, 高级工程师、学士, 从事矿山采矿、爆破技术研究工作, (E-mail) 184150822@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)

况如图 2 所示。

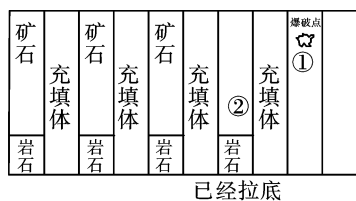


图 2 测振方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of vibration measurement plan

1.2 测试数据

爆破地震波先经过号监测点最后到达号监测点。测点的现场实际监测结果共两组爆破振动信号

数据,测得三向的振动的速度和主频,见表 1。

2 HHT 信号分析技术

(1) EMD 分解

经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 是基于数据本身的时间尺度特征,没有预先设定任何基函数的一种时频域的信号处理方法。在处理非平稳和非线性数据方面,EMD 具有明显优势,同时在分析非线性和非平稳信号序列方面尤为适用,在通信质量上具有可靠性。该方法的关键是经验模态分解,它把复杂信号分解为有限个固有模态分量 (IMF) 和一个余项。

表 1 三向振动监测数据统计表

Table 1 Monitored blasting vibration data

测点 编号	组数	X 方向		Y 方向		Z 方向		R/m	最大单段 药量 Q/kg
		$V_x/$ (cm · s ⁻¹)	F_x/Hz	$V_y/$ (cm · s ⁻¹)	F_y/Hz	$V_z/$ (cm · s ⁻¹)	F_z/Hz		
1		6.652	73.462	5.472	78.392	5.035	78.036	12	6.0
		1.237	61.747	0.923	58.835	0.842	54.105	33	6.0
2		5.810	67.400	5.770	69.700	4.640	68.300	17	5.5
		1.060	46.300	1.420	54.400	0.330	43.800	45	5.5

为了得到有意义的瞬时频率,需要让函数是对称的,局部均值为零,并且过零点和极值点的数目必须是相等的。信号是由数个本征函数组成的,单个函数必须满足下面两个前提条件:一是在函数的全部时间维度上,局部极值点和过零点的个数必须相同或最多相差一个;二是在任意时间点上,局部最大值的上包络线和局部最小值的下包络线的均值必须为零。

EMD 将输入信号分解为若干个本征模态函数和一个残差,由以下公式组成

$$f(n) = \sum_{m=1}^M IMF_m(n) + Res_M(n)I(n)$$

$$m = \sum MIMF_m(n) + Res_M(N)$$

式中: $f(n)$ 表示输入信号; $IMF_m(n)$ 表示 M_{th} 的本征模函数; $Res_M(n)$ 表示残差。

EMD 分解过程提取的过程叫作筛选,具体过程如下:

(1) 标出局部极值点。

(2) 通过三次样条插值连接极小值点构成下包络线,连接极大值点构成上包络线。

(3) 求上下包络线的均值 m_1 。

求出上下包络线均值,同时用输入信号减去该数值

$$X(t) - m_1 = h_1 X(t) - m_1 = h_1$$

上述过程的一次迭代不能保证 h_1 是本征模函数 (IMF), 需要重复上述过程,直到 h_1 是本征模函数 (IMF)。

(2) HHT 变换

对时间函数 $T(t)$ 进行 Hilbert 变换, C 是 Cauchy 主值。

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

当 $T(t)$ 和 $H(t)$ 形成大小相同,角度相反的两个复数时即可得到一个分解信号

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

其中

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

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

定义瞬时频率为 $\omega = \frac{d\alpha(t)}{dt}$, 为了求解 Hilbert

谱,对每一个 IMF 分量进行希尔伯特变换

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

由上式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

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

瞬时能量谱的计算方式是把振幅的平方对频率积分

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

3 穿越充填体爆破振动 HHT 分析

3.1 EMD 分解

该矿山的爆破地震波的传播特性与充填体有着非常密切的关系,因此研究充填体对爆破地震波的

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穿越充填体传播特性的研究中起着非常重要的作用。由于地震波的传播方式分为三种类型,包括切向、径向和垂直方向,所以在工程爆破中,对三维信号进行监测。在一些西方国家中,以质点竖直方向的振速峰值来作为爆破振动强度的指标。而垂直方向又具有很强的典型性,因此爆破振动信号选用第一组数据的竖直方向(Z 方向)的分量作为分析对象,其原始波形如图 3 所示。

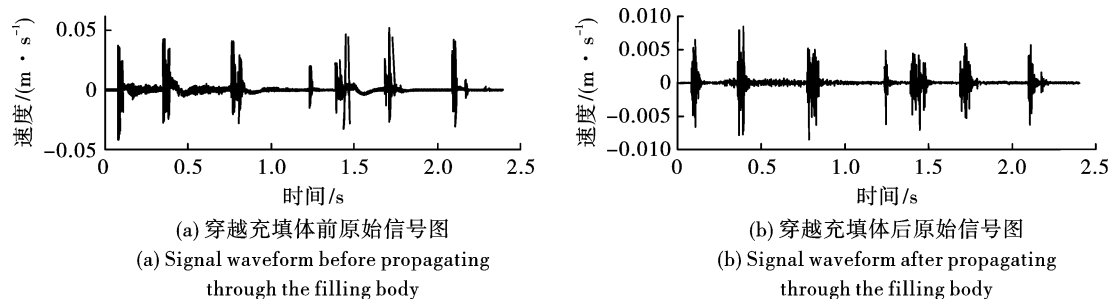


图 3 爆破振动原始信号图

Fig. 3 Blasting vibration waveforms

如图 4 所示,原始信号在穿越充填体之前和之后通过 EMD 分解分别产生了 IMF 分量 16 个和 15 个。EMD 的分解规律是从高频至低频,剩下一个为残差 IMF。基底函数在 EMD 分解中没有单一的,是由信号的自身特征设定的每个 IMF 分量的提取,这就是它的适应性,让信号分析拥有很大的通用性和多功能性。与此不同的是,替代性分析方法如小波和傅里叶,必须先行设置基底函数,基底函数自身就有一定的局限性,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。

IMF 分量是由 EMD 分解出来的,且大都拥有明确的物理意义。从穿越充填体前 IMF 分量图来看,第一个至最后一个的 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,大幅度衰减是高频部分,但第二个至第五个 IMF 分量的振幅较第一个 IMF 分量的振幅大跨度增加,并且信号的大部分能量都被其包括,它属于原始信号的优势频段。此外,第十四个至第十六个 IMF 分量是分解后频率更小的部分,这可能是信号本身原有的或由不同情况产生的。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向。这意味着 EMD 方法是一种新型的主成分分析方法,它可以提取信号本身原有的由高到低的所有模态函数,并分解出许多 IMF 分量,整合了原始信号中最重要的信息。同理,从穿越充填体后 IMF 分量图来看,第一

个至第十二个 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,在爆破振动信号中属于主导的振动频率,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出干扰因素,更符合和便于研究爆破振动波的真实特性规律,因此,将穿越充填体前的 IMF 分量去掉第十四、十五和十六个 IMF 分量和穿越充填体后的 IMF 分量去掉第十三、十四和十五个 IMF 分量,进行爆破振动数据 EMD 重构,以便后续的 HHT 频谱分析。见图 5。

3.2 HHT 频谱分析

爆破振动信号处理后再进行希尔伯特变换得到边际谱分析图和瞬时能量图,利用相应图谱对分析对比爆破振动信号。

穿越充填体前后边际谱图(图 6)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。从穿越充填体前边际谱图中可以得出,爆破振动频率在穿越充填体前重点聚集在 60 ~ 80 Hz, 累计能量范围为 $0.3 \times 10^{-4} \sim 0.2 \times 10^{-6}$; 爆破振动信号经过充填体后边际谐波峰减少,子频带变多,穿越充填体后爆破振动频率主要集中在 50 ~ 60 Hz, 积累的能量范围变为 $0.2 \times 10^{-6} \sim 0.7 \times 10^{-5}$, 但是低频能量占比增加,穿越充填体后高频频带 60 ~ 80 Hz 积累的能量范围比穿越充填体前衰减了 7 倍,能量分布更加扩散。

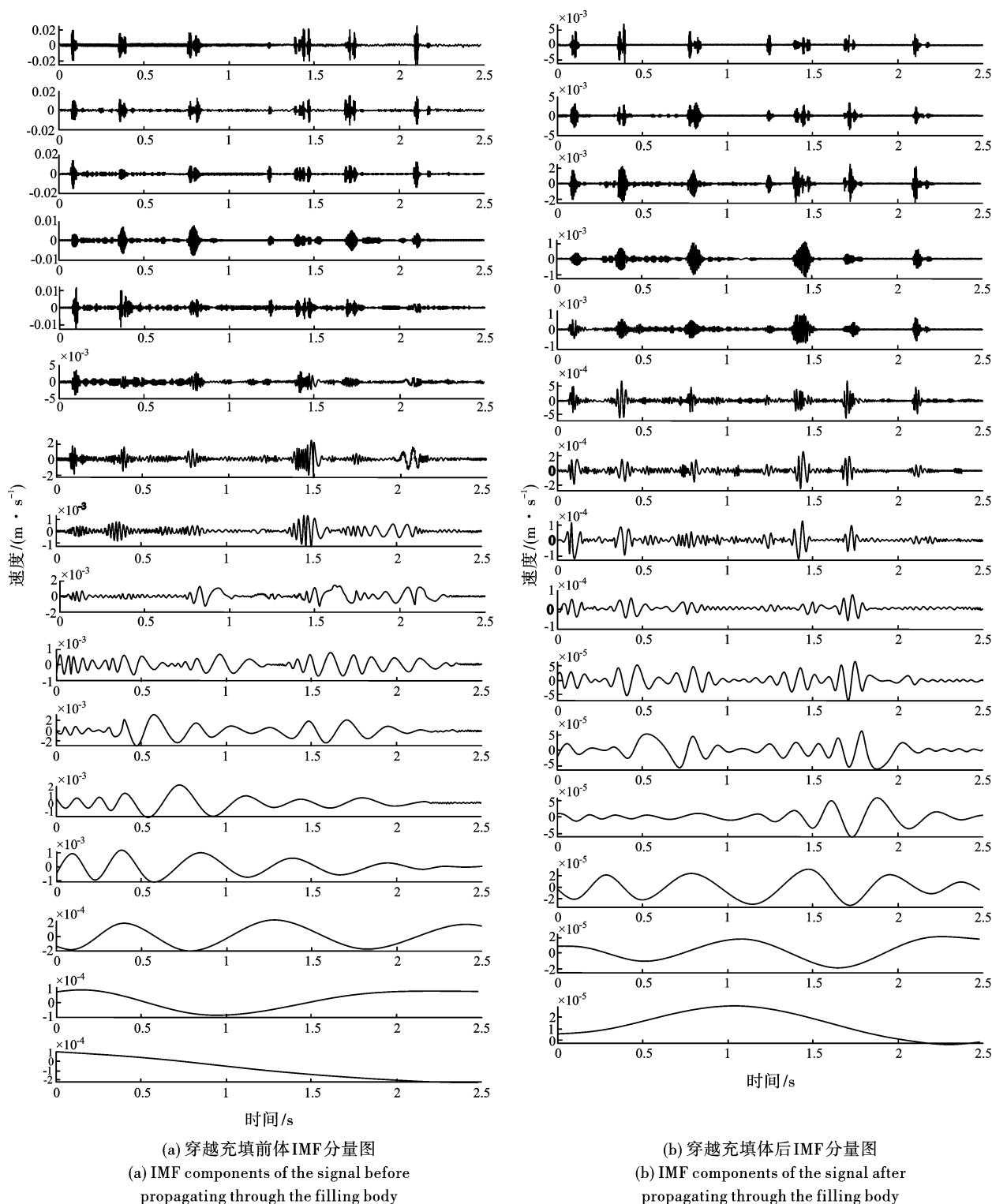


图 4 爆破地震波振动信号 EMD 分解结果图

Fig. 4 EMD decomposition of blasting vibration signal

从穿越充填体前爆破振动信号瞬时能量图中(图 7)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,穿越充填体前后的波形信号起伏变化都在 0.10 ~ 2.20 s 的区域内,且爆破延期间隔时间为在 0.2 ~ 0.4 s 区域内,表明单段装药爆破产生的爆轰

高压气体在裂隙和炮孔可维持在 0.2 ~ 0.4 s 区域内,均大于 60 ms,这十分有利于破碎岩石。

穿越充填体前的爆破振动信号达到瞬时能量最高点处时间为 1.50 s 左右,此处最大的瞬时能量约为 2.4×10^{-3} 。穿越充填体后瞬时能量达到最大值的时间在 0.40 s 左右,此处最大的瞬时能量约为 0.9×10^{-4} 。

将两组信息, 进行比对得出, 穿越充填体前的最大瞬时

能量是穿越充填体后最大瞬时能量的 27 倍左右。

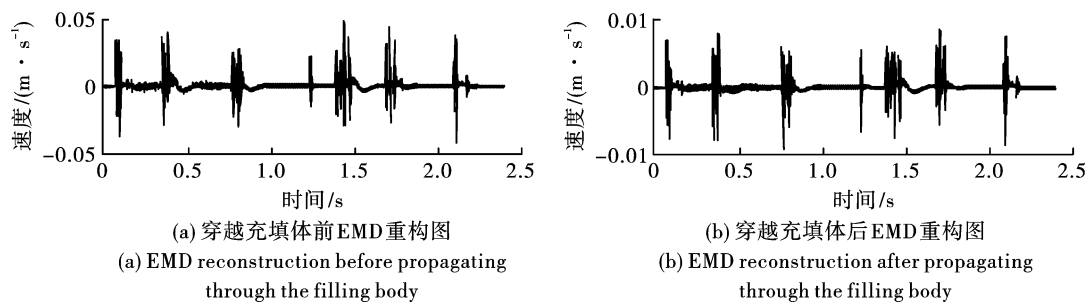


图 5 EMD 重构信号图

Fig. 5 EMD reconstruction of signals

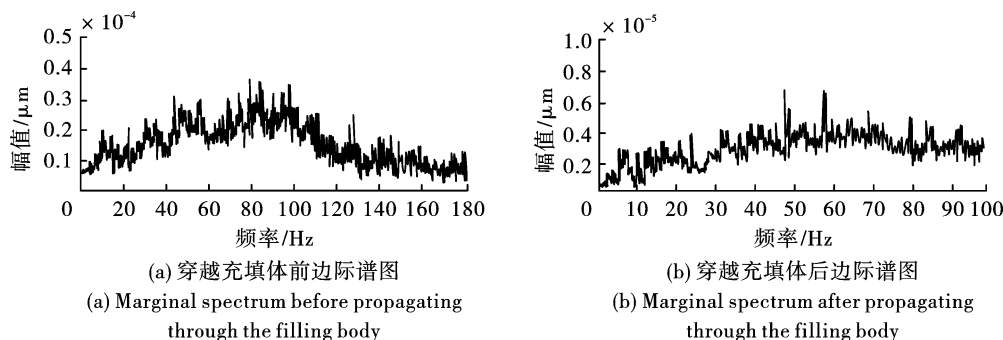


图 6 边际谱图

Fig. 6 Marginal spectra

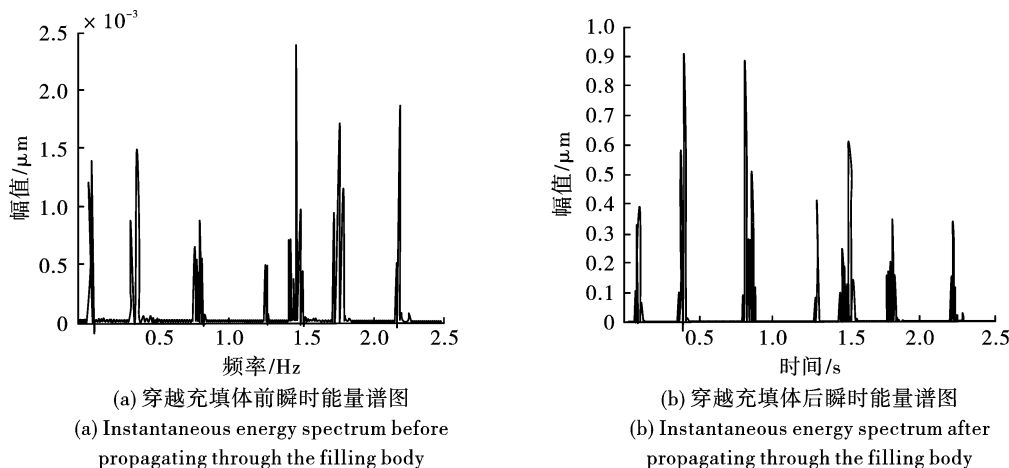


图 7 瞬时能量图

Fig. 7 Instantaneous energy spectra

4 穿越充填体爆破振动数值模拟分析

4.1 炸药模型

基于数值模拟中有限元法, 采用 LS-DYNA, 模拟炸药能量对岩体的变形影响和起爆后冲击波在围岩中的传播形式, 尤其针对充填体中的质点在爆破冲击波作用下的振速规律。本次模拟采用的高能燃烧模型是根据药包内各点距爆源点的距离和爆速来计算起爆时间。

$$P_s = Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + CV^{-(\omega+1)}$$

式中: $V = v/v_0 = \rho_0/\sigma$ 为相对比容, 即现时比容 v 与初始比容 v_0 之比, $A, B, C, R_1, R_2, \omega$ 为材料参数, 根据所用炸药取参。

4.2 矿体和充填体力学模型

为便于计算, 保证模拟结果的唯一性, 将矿体和围岩简化为弹塑性体, 用双线性随动硬化模型计算, 并采用 Mohr-Coulomb 屈服准则。

4.3 材料参数的选取

在本文中所选用的是乳化炸药,根据 4.1 节所

述,其详细材料参数见表 2。表 3 和表 4 记录了矿体和充填体的物理力学参数。

表 2 炸药参数

Table 2 Explosive parameters

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	D/cm	$P_c - j/\text{Mbar}$	A/Mbar	B/Mbar	R_1	R_2	ω	E/Mbar	V_0
1.5	0.36	0.034	2.144	0.182E-2	4.2	0.9	0.15	4.192E-2	0

表 3 矿体力学参数

Table 3 Mechanical parameters of the ore body

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/GPa	ν	ET/GPa	屈服强度/GPa
3	17.1	0.26	0	0.03

表 4 充填体力学参数

Table 4 Mechanical parameters of the filling body

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/GPa	ν	ET/GPa	屈服强度/GPa
2	0.8	0.18	0	0.005

4.4 数值模型的建立与边界条件

构建了尺寸为 $28 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ 的数值网格模型。该模型可视为四周存在岩体,模型的边界条件受模型外岩体影响,但由于模型尺寸相对于爆破应力波传播距离较大,应力波对边界处质点的状态影响较小,可忽略不计,因此立方体模型六个面的边界条件设为位移约束。

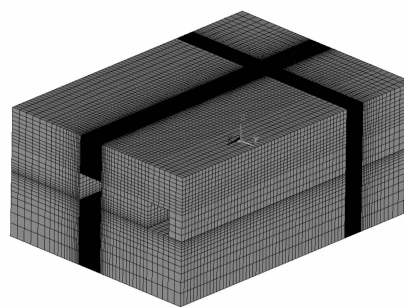
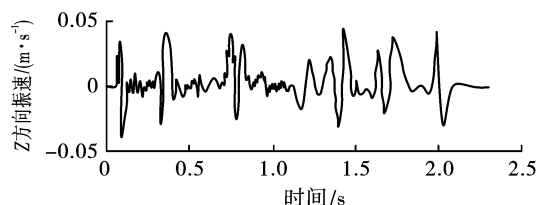


图 8 网格划分图

Fig. 8 Numerical model and meshing diagram

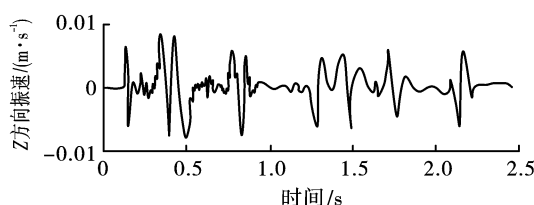
4.5 结果分析

将 4.4 节所述模型导入软件并根据 4.3 节所述参数进行赋值并求解。根据现场装药参数和测点布置情况,选取现场和号测点中模型对应的位置作为分析测点,分别对应 A 和 B 测点。两个测点在垂直 (Z 轴) 方向上的爆破振动速度变化如图 9 所示。



(a) A 点 Z 方向振动波形图

(a) Vibration waveform of point A in Z direction



(b) B 点 Z 方向振动波形图

(b) Vibration waveform of point B in Z direction

图 9 监测点 Z 方向振动波形图

Fig. 9 Vibration waveforms in Z direction at the monitoring points

根据数值模拟结果可知,A 和 B 测点处的 Z 方向爆破振动质点峰值速度为 4.8 cm/s 和 0.8 cm/s ,与矿山实测的爆破振速相接近,说明该数值模拟能够一定程度上解释爆破结果,分析复杂充填体对爆破地震波传播的影响。

图 10 是监测点的有效应力曲线示意图,该图反应了岩体的应力变化特性。图 10 显示了 A 和 B 点的最大有效应力。从图 10 可以看出,记录单元 A 和 B 点的最大有效应力为 35 MPa 和 30 MPa ,爆破地震波的传播经过充填体后,监测点最大有效应力下降 14%。

此外,两监测点的最大有效应力均小于采场的

岩体最大动态抗拉强度 40 MPa ^[18],表明 A 和 B 监测点采场区域在爆破振动的影响下较为稳定。

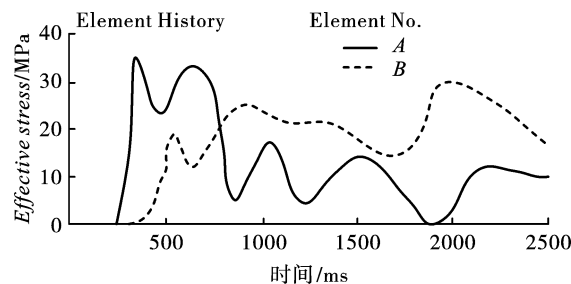


图 10 监测点最大有效应力示意图

Fig. 10 Maximum effective stresses at the monitoring points

5 结论

利用 HHT 信号分析技术,对穿越复杂充填体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充填体前后的变化规律。采用数值模拟手段分析了爆破地震波穿越充填体前后岩体的最大主应力变化,并得到相应结论:

(1)穿越充填体前和穿越充填体后的爆破振动主频分别为 60~80 Hz 和 50~60 Hz,表明该充填体对爆破地震波具有过滤高频的作用且往低频方向发展,且穿越充填体后高频频带 60~80 Hz 积累的能量范围比穿越充填体前衰减了 7 倍,能量分布更加扩散。

(2)穿越充填体前后的波形信号起伏变化都在 0.10~2.20 s 的区域内,穿越充填体前的最大瞬时能量是穿越充填体后的 27 倍左右,说明爆破地震波穿越充填体后峰值能量得到大幅度衰减。穿越充填体前后的波形信号起伏变化都在 0.10~2.20 s 的区域内,且爆破延期间隔时间为在 0.2~0.4 s 区域内,表明单段装药爆破产生的爆轰高压气体在裂隙和炮孔可维持在 0.2~0.4 s 区域内,均大于 60 ms,这十分有利于破碎岩石。

(3)根据数值模拟结果,爆破地震波的传播经过充填体后,使得监测点处的最大有效应力下降了 14%左右,且监测点位最大有效应力均小于采场的最大动态抗拉强度 40 MPa,说明监测点采场区域在爆破振动的影响下较为稳定。

参考文献 (References)

- [1] 付晓强,俞 缙,刘纪峰,等. 隧道爆破振动信号畸变校正与混沌多重分形特征研究[J]. 振动与冲击, 2022,41(6):76-85.
- [1] FU Xiao-qiang, YU Jin, LIU Ji-feng, et al. Study on distortion correction and chaotic multifractal characteristics of tunnel blasting vibration signal[J]. Vibration and Shock, 2022,41(6):76-85. (in Chinese)
- [2] 费鸿禄,山 杰. CEEMDAN-小波阈值法在爆破振动信号处理中的应用[J/OL]. 爆破:1-11. [2022-05-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.tj.20220421.1338.010.html>.
- [2] FEI Hong-lu, SHAN Jie. Application of ceemdan wavelet threshold method in blasting vibration signal processing [J/OL]. Blasting: 1-11. [2022-05-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.tj.20220421.1338.010.html>. (in Chinese)
- [3] 黄鹏睿,吴贤振,程 杰,等. 露天采石场爆破对邻近民房影响的 HHT 分析[J]. 化工矿物与加工, 2020, 49(6):39-42,46.
- [3] HUANG Peng-rui, WU Xian-zhen, CHENG Jie, et al. HHT analysis of the impact of open-pit quarry blasting on adjacent houses[J]. Chemical Minerals and Processing, 2020,49(6):39-42,46. (in Chinese)
- [4] 文 兴,赵 亮,郭晓强. 爆破振动在充填体中的传播规律研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):32-35.
- [4] WEN Xing, ZHAO Liang, GUO Xiao-qiang. Study on propagation law of blasting vibration in backfill[J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2021,41(5):32-35. (in Chinese)
- [5] 袁本胜,史晓鹏,郭利杰,等. 安庆铜矿充填体内破坏区和非破坏区地震波衰减规律研究[J]. 中国矿业, 2014,23(S2):309-312.
- [5] YUAN Ben-sheng, SHI Xiao-peng, GUO Li-jie, et al. Study on the attenuation law of seismic waves in the destructive and non-destructive areas of the filling body in Anqing Copper Mine[J]. China Mining, 2014,23(S2):309-312. (in Chinese)
- [6] 刘宏颖. 深孔爆破冲击充填体损伤研究[J]. 采矿技术, 2021,21(4):33-37.
- [6] LIU Hong-ying. Study on the damage of filling body caused by deep hole blasting[J]. Mining Technology, 2021,21(4):33-37. (in Chinese)
- [7] 周俊汝,卢文波,张 乐,等. 爆破地震波传播过程的振动频率衰减规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014,33(11):2171-2178.
- [7] ZHOU Jun-ru, LU Wen-bo, ZHANG Le, et al. Study on vibration frequency attenuation law of blasting seismic wave propagation process[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014,33(11):2171-2178. (in Chinese)
- [8] 曹光磊. 爆破振动作用下巷道围岩变形规律研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2013.
- [8] CAO Guang-lei. Study on deformation law of roadway surrounding rock under blasting vibration[D]. Huainan: Anhui University of technology, 2013.
- [9] 曹光磊,赵光明,刘 勇. 深井巷道掘进爆破震动对围岩影响的数值模拟[J]. 煤矿安全, 2013,44(5):52-55.
- [9] CAO Guang-lei, ZHAO Guang-ming, LIU Yong. Numerical simulation of the influence of blasting vibration on surrounding rock in deep roadway excavation[J]. Coal Mine Safety, 2013,44(5):52-55. (in Chinese)
- [10] 田 凯. 城市地铁隧道控制爆破技术研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2016.
- [10] TIAN Kai. Research on controlled blasting technology of urban subway tunnel[D]. Guiyang: Guizhou University, 2016. (in Chinese)
- [11] 李 强,李文明,韩晓亮,等. 基于 HHT 法的出矿巷道

- 爆破振动衰减规律研究[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(2): 44-47.
- [11] LI Qiang, LI Wen-ming, HAN Xiao-liang, et al. Study on vibration attenuation law of blasting in ore drawing roadway based on HHT method[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(2): 44-47. (in Chinese)
- [12] 宋文峰, 张 琪, 李跃中, 等. 基于 HHT 爆破地震波穿越岩体层面衰减规律研究[J]. 爆破, 2015, 32(4): 153-157.
- [12] SONG Wen-feng, ZHANG Qi, LI Yue-zhong, et al. Study on attenuation law of blasting seismic wave passing through rock layer based on HHT[J]. Blasting, 2015, 32(4): 153-157. (in Chinese)
- [13] 魏新江, 谢 超, 丁玉琴. 基于平均频率和 HHT 变换的隧道爆破震动信号研究[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(7): 13-18.
- [13] WEI Xin-jiang, XIE Chao, DING Yu-qin. Research on vibration signal of tunnel blasting based on average frequency and HHT transform[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(7): 13-18. (in Chinese)
- [14] 张其虎, 张 希, 孙进辉, 等. 基于 EMD-HHT 的地下浅孔爆破振动规律研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(3): 48-55.
- [14] ZHANG Qi-hu, ZHANG Xi, SUN Jin-hui, et al. Research on vibration law of shallow underground blasting based on EMD-HHT[J]. Nonferrous Metals (Mine), 2021, 73(3): 48-55. (in Chinese)
- [15] 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.
- [15] CAO Xiao-li, GAO Wen-xue, LV Hong-tao, et al. Hilbert-huang transform analysis and application of blasting vibration signal[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(S2): 107-113. (in Chinese)
- [16] 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.
- [16] HU Gang, FEI Hong-lu, BAO Shi-jie, et al. Journal of underground space and engineering, 2020, 16(1): 249-259. (in Chinese)
- [17] 杨智广, 费鸿禄, 胡 刚. 隧道掘进爆破振动对围岩影响的 HHT 分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(9): 121-127.
- [17] YANG Zhi-guang, FEI Hong-lu, HU Gang. HHT analysis of the influence of blasting vibration on surrounding rock in tunneling[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(9): 121-127. (in Chinese)
- [18] 殷锦训, 王维, 游喻豪, 等. 湖北三鑫金铜矿扇形中深孔爆破参数优化数值模拟研究[J]. 爆破, 2022, 39(2): 85-93.
- [18] Yin Jin-xun, WANG Wei, YOU Yu-hao, et al. Numerical simulation study on parameter optimization of fan-shaped medium deep hole blasting in Hubei Sanxin gold copper mine[J]. Blasting, 2022, 39(2): 85-93. (in Chinese)

英文编辑: 李立峰

(上接第 55 页)

- [14] WANG S, DUAN W, WANG Q. The bursting of a toroidal bubble at a free surface[J]. Ocean Engineering, 2015, 109: 611-622.
- [15] 安丰江, 施惠基, 刘 琼, 等. 水下爆炸近场压力特性及其与结构的流固耦合作用[J]. 兵工学报, 2015, 36(S1): 13-24.
- [15] AN Fen-jiang, SHI Hui-ji, LIU Qiong, et al. The near-field pressure characteristics of underwater explosion and its fluid-structure interaction with structure[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(S1): 13-24. (in Chinese)
- [16] 刘靖晗, 唐 廷, 韦灼彬, 等. 刚性柱附近浅水爆炸荷载特性研究[J]. 高压物理学报, 2019, 33(5): 166-173.
- [16] LIU Jing-han, TANG Ting, WEI Zhuo-bin, et al. Research on shallow water explosion load characteristics near rigid column[J]. Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(5): 166-173. (in Chinese)
- [17] CUI P, ZHANG A, WANG S. Small-charge underwater explosion bubble experiments under various boundary conditions[J]. Physics of Fluids, 2016, 28(11): 117103. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4967700>.
- [18] 张阿漫, 王 超, 王诗平, 等. 气泡与自由液面相互作用的实验研究[J]. 物理学报, 2012, 61(8): 300-312.
- [18] ZHANG A-man, WANG Chao, WANG Shi-Ping, et al. Experimental study of interaction between bubble and free surface[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(8): 300-312. (in Chinese)
- [19] 那立民, 古 滨, 孙 波, 等. 近水面爆炸气泡—自由面动态耦合演化特征研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(1): 185-193.
- [19] NA Li-min, GU Bin, SUN Bo, et al. Research on dynamic evolving characteristic of underwater explosion bubble coupling with free surface under shallow water[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2021, 42(1): 185-193. (in Chinese)

英文编辑: 柯 波