

基于数值模拟的顶板围岩损伤过程 动力响应信号的能量分析

曹 野¹, 宋 波¹, 潘建仕¹, 汪宗文²

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 招金矿业股份有限公司, 山东 烟台 265400)

摘要: 通过室内相似模型试验, 模拟金属矿山巷道顶板从稳定状态到损伤发展直至顶板冒落的过程, 利用封装应变传感器的光纤光栅锚杆监测振动信号, 记录不同围压、不同冲击振动强度下裂隙顶板与完整顶板响应信号, 利用小波变换提取信号的频带能量分布特征。根据室内试验对光纤光栅用于顶板稳定性监测的研究成果, 利用径向基函数神经网络对监测时间序列进行预测, 并基于频带能量的观点, 利用 Matlab 建立不同损伤条件下的瞬态冲击信号评估系统, 并对一段连续信号进行分析。损伤顶板振动响应信号的频带能量受到裂隙开展的影响, 与完整顶板相比, 出现明显的频带尖点, 能量峰值从高频向低频移动。基于小波频带能量的围岩顶板稳定分析方法, 首先, 利用小波分解各频带能量分布特征, 并通过分解结果中应力波的能量衰减程度可判别出岩体中是否存在裂隙; 其次, 利用小波分解后各频带能量比和归一化能量比来确定损伤程度和裂隙开展状态, 为金属矿山巷道顶板稳定性监测提供了一种较为可靠的方法。

关键词: 采矿工程; 爆破效应; 光纤光栅; 围岩损伤; 小波分析; 模型试验

中图分类号: TD 76

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 1 - 3137 - 09

ENERGY ANALYSIS OF DYNAMIC RESPONSE SIGNALS DURING DAMAGE PROCESS OF ROOF SURROUNDING ROCK BASED ON NUMERICAL SIMULATION

CAO Ye¹, SONG Bo¹, PAN Jianshi¹, WANG Zongwen²

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Zhaojin Mining Industry Co., Ltd., Yantai, Shandong 265400, China)

Abstract: The similarity model experiment is carried out to simulate the whole process of damage development of roof of metal mine laneway falling from stability. Fiber Bragg grating sensors installed in bolt are used to record the response signal of complete roof and damage roof under different confining pressures and different vibration intensities, and wavelet transform is utilized to extract vibration response signal of the band energy distribution characteristics. Finally, according to the result of the indoor experiment, the monitoring time series is predicted using radial basis function(RBF); based on the view of energy band, the transient signal evaluation system under different damage conditions is established using software Matlab; and a serial of continuous signal are analyzed. The vibration response signal energy of damage roof is influenced by developed fracture. Compared with the complete roof, there is an obvious band cusp that the energy peak moves from high frequency to low frequency. Based on roof stability analysis method of wavelet frequency band energy, attenuation degree of wavelet decomposed frequency band energy is considered as the distinction that roof is stable or not. The frequency band

收稿日期: 2009 - 02 - 18; **修回日期:** 2009 - 03 - 06

作者简介: 曹 野(1988 -), 男, 2007 年毕业于西安科技大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事结构与防灾减灾方面的研究工作。E-mail: caoyekobe@sina.com

energy ratio and the normalized energy ratio are used to determine the degree of damage and fracture state, which provides a reliable method for stability monitoring of laneway roof in metal mine.

Key words: mining engineering; blasting effect; fiber Bragg grating(FBG); damage of surrounding rock; wavelet analysis; model experiment

1 引言

目前,随着国家能源开发的进行,金属矿山开采深度已经达到-1 000 m。在地下采矿空间区域内,由于复杂环境和爆破动荷载等作用,裂隙和变形往往会在围岩内部某些地方不断积累,并最终导致冒顶和片帮等围岩稳定问题,因此开展围岩顶板损伤诊断研究对于保证矿山安全生产具有重要意义。研究动荷载作用下的岩体响应,提出稳定性分析方法和控制手段是工程界迫切需要解决的问题,也一直是岩石动力学研究的主要内容之一^[1, 2]。根据结构损伤的动力识别理论,可以利用结构动态特性的改变来对结构进行整体性的检测和评估,以确定结构是否有损伤存在,进而判别损伤的程度和位置,以及结构目前的状况、使用功能和结构损伤的变化趋势^[3~5]。对于岩体损伤与爆破信号关系的研究,闫长斌^[6]利用声波测试技术,系统地研究了多次爆破作用下岩体损伤累积增长规律与岩体爆破累积损伤扩展模型;宋光明等^[7]通过对不同岩层地质条件下产生的爆破振动进行小波分析,探讨了岩体基本质量指标 BQ 和完整性系数与爆破振动时频分布之间的关系,认为传播介质特性对小波包各细节信号特征有较大影响。在小波分析及结构损伤监测方面,刁延松^[8]研究了损伤结构的检测信号小波节点能量的变化量,以此作为概率神经网络的输入向量来确定损伤位置,提出了基于小波节点能量和神经网络的海洋平台结构损伤监测方法。小波技术还被用于提取爆破振动信号不同频带的振动分量,以及各频带爆破振动分量的衰减规律与预测模型研究^[9]。

在光纤光栅应用于损伤监测方面, E. Denarie 等^[10]将光纤光栅传感器埋入混凝土,对混凝土断裂发展过程进行了测量;李悦等^[11]开发了光纤光栅锚杆,用于金属矿山围岩振动信号的监测;邓年春等^[12]将光纤光栅结构监测系统安装在几座桥梁的混凝土构件中,对其应变和车辆载重进行监测。

随着金属矿山开采深度的推进,针对围岩潮

湿、局部高温、粉尘等等诸多不利影响因素,开展金属矿山安全检测的关键技术研究对于保障矿山安全开采具有重要的意义。本文主要通过封装光纤光栅的锚杆监测模型试验中岩体的应变动力响应信号,并采用小波变换的方法分析不同围压、不同冲击振动强度下监测到的损伤顶板与完整顶板信号,进而利用动力响应信号的频带能量分布特征诊断围岩顶板损伤状态。

2 基于小波能量分析的爆破振动信号诊断基本原理

当一个含有丰富频率成份的信号作为输入对系统进行激励时,由于系统损伤对各频率成份的抑制和增强作用发生改变,通常它会明显地对某些频率成份起抑制作用,而对另外一些频率成份起增强作用。因此,其输出与正常系统输出相比,相同频带内信号的能量会有很大差别,可能使某些频带内信号能量减小,而使另外一些频带内信号能量增大。因此,在各频率成份信号的能量中,包含着丰富的损伤信息,某种或几种能量的改变代表了一种损伤情况。

小波变换对不同频率在时域上的取样步长是调节性的,即在低频时小波变换时间分辨率差,而频率分辨率高,在高频时小波变换的时间分辨率高,而频率分辨率低,这正符合低频信号变换缓慢而高频信号变换迅速的特点。这样,采用多尺度小波可以很方便地把原始信号划分为多个频带^[13, 14]。

原始信号 $f(t)$ 在 $L^2(\mathbf{R})$ 上的 2 - 范数定义为

$$\|f\| = \int_{\mathbf{R}} |f(t)|^2 dt \quad (1)$$

小波变换中,信号的 2 - 范数的平方等价于原始信号在时域上的能量。如果基本小波为 $\varphi(t)$, 则有

$$\int_{\mathbf{R}} da \int_{\mathbf{R}} db |W_{\varphi} f(a, b)|^2 = \|f\|_2^2 \quad (2)$$

所以小波变换的能量与原始信号的能量之间存在等价关系,这样用小波能量来表示原始信号中的能量分布是可靠的。

对于爆破振动这类能量有限信号, 其能量为 $E = \|f\| = \int_R |f(t)|^2 dt$ 。令信号 $f(t) \in U_0^0$, 则根据小波理论可得

$$U_0^0 = U_{-1}^0 + U_{-2}^1 = U_{-2}^0 + U_{-2}^1 + U_{-2}^2 + U_{-2}^3 = \dots = U_{-j}^0 + U_{-j}^1 + \dots + U_{-j}^{2^j-1} \quad (3)$$

将被分析离散信号分解到第 i 层, 设第 i 层分解信号 S_j 对应的能量为 E_j , 则有

$$E_j = \int_{-\infty}^{+\infty} |S_j(t)|^2 dt = \sum_{i=1}^n x_{i,j}^2 \quad (4)$$

式中: $x_{i,j}$ 为重构信号的离散点幅值。设被分析信号的总能量为 E_0 , 则有

$$E_0 = \sum_{j=0}^i E_j \quad (5)$$

各频率带能量所占比例为

$$C_j = \frac{E_j}{E_0} \times 100\% \quad (6)$$

这样可以得到信号经小波分解后不同频带的能量和能量百分比, 不但可以找出爆破前后测试信号的能量主要集中在哪个频段, 以及分解后各频段的能量分布, 而且可以发现爆破前后测试信号的能量变化规律, 从而反映出岩体爆破损伤的变化规律。

3 基于频带能量的动力响应信号分析

3.1 围岩顶板损伤诊断模型试验

本试验的工程背景为夏甸金矿实际掘进工程中的一般巷道。为了使试验工作既简化又具有代表性, 巷道取足够长、高、宽, 以满足二维模型试验的要求。

工程实际非常复杂, 矿区地处胶东西部低缓丘陵地带, 与其他金矿相比, 夏甸金矿地质情况较好, 岩石坚硬, 透水性小, 但是在开采现场以及一些巷道中, 破碎带比较多, 再加上机械振动的影响, 从而直接导致冒顶片帮事故的发生。现场具体情况如图 1 所示。

在模拟试验中, 进行了如下简化假设: (1) 模拟围岩为均匀、连续、各向同性的中等强度岩体, 不考虑节理、断层及地下水等不良地质因素影响; (2) 模拟锚杆的长度按几何相似确定, 锚杆截面一般是按变形刚度相似确定; (3) 锚杆模拟只考虑信号监测效果上的相似, 忽略其结构形式影响, 不考



图 1 现场巷道情况

Fig.1 On-site roadway

虑锚杆具体受力机制。

室内模型试验通过顶部千斤顶分级加载, 以模拟不同深度巷道围压, 采用不同高度锤击模拟井下的爆破冲击, 使用与现场一样的光纤光栅传感器监测振动信号, 如图 2 所示。

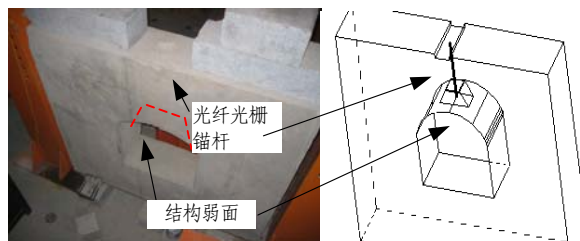


图 2 模型实物及光纤光栅锚杆布置图

Fig.2 Model photo and arrangement of FBG bolt

根据相似理论确定原型与模型材料的物理力学参数, 围岩的相似比尺主要包括: 长度相似比尺 $C_L = 5$, 容重相似比尺 $C_\gamma = 1$, 应力相似比尺 $C_\sigma = 5$, 弹性模量相似比尺 $C_{E_c} = 5$, 泊松比相似比尺 $C_\mu = 1$, 黏聚力相似比尺 $C_c = 5$, 内摩擦角相似比尺 $C_\phi = 1$, 边界面力相似比尺 $C_X = 5$, 位移相似比尺 $C_u = 5$ 。其中长度、应力相似比尺为控制物理量, 其余按量纲理论由控制物理量推出。考虑到试验所模拟的岩体材料要求为脆性材料, 根据本次试验的具体要求, 通过试验试配, 最终确定模型介质材料为水泥砂浆, 基本的配比为砂: 水泥 = 5 : 1。原型与模型材料物理力学参数如表 1 所示。

对于锚杆的模拟, 现有常用材料难以完全满足相似关系, 过小的锚杆直径不便于光纤光栅传感器的封装。考虑到本次试验重点是岩体破坏过程中封装在锚杆中光纤光栅传感器的信号特征, 而非

表 1 原型与模型材料物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of materials for prototype and model

材料类型	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	R_c / MPa	R_t / MPa	E_c / GPa	$\varphi / (^\circ)$	μ
模型	1 800	8	0.4	4	55	0.2
原型	2 500	40	2.0	20	55	0.2

锚杆在工作状态下的力学特点，故只通过令原型与模型具有等效抗拉刚度 E_a 的方法进行模拟，最终选取铜作为相似材料来模拟锚杆，其外径为 8 mm，壁厚 1 mm。

由于结构弱面材料的影响，巷道顶部区域受到拉应力冒顶时的监测信号，主要进行光纤光栅锚杆信号监测。在试验模型巷道顶板从稳定状态到裂隙发展到顶板掉落过程中，引入振动冲击信号，记录光纤光栅传感器试验信号特征。考虑完整状态和损伤状态 2 种工况。

3.2 分析信号的筛选

对于瞬态冲击信号，本文根据相似试验，选取不同损伤阶段的振动信号作为研究对象，其信号记录如图 3 所示。图中第一段振动波峰为完整顶板的监测信号，而第二、三段波峰为损伤发展过程中的振动信号。

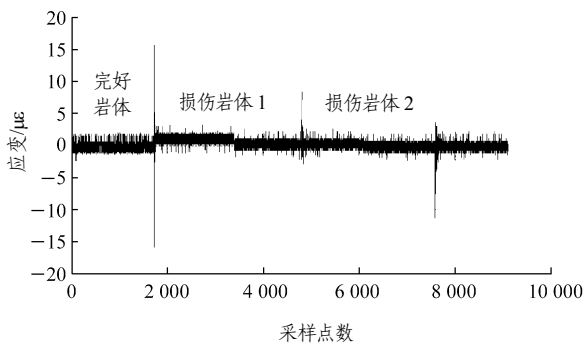


图 3 瞬态冲击信号

Fig.3 Transient shock signals

由于监测信号在较短的时间段内，其平均中心波长变化量较为稳定，因此选择整段信号进行小波分解并不科学，且占用过多的系统资源。故对于一段监测信号的时间序列，通过 Matlab 进行编程，自主寻找峰值信号，并取峰值点左右各 150 个数据进行小波分解，其筛选结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出，经过筛选后的信号如实反映

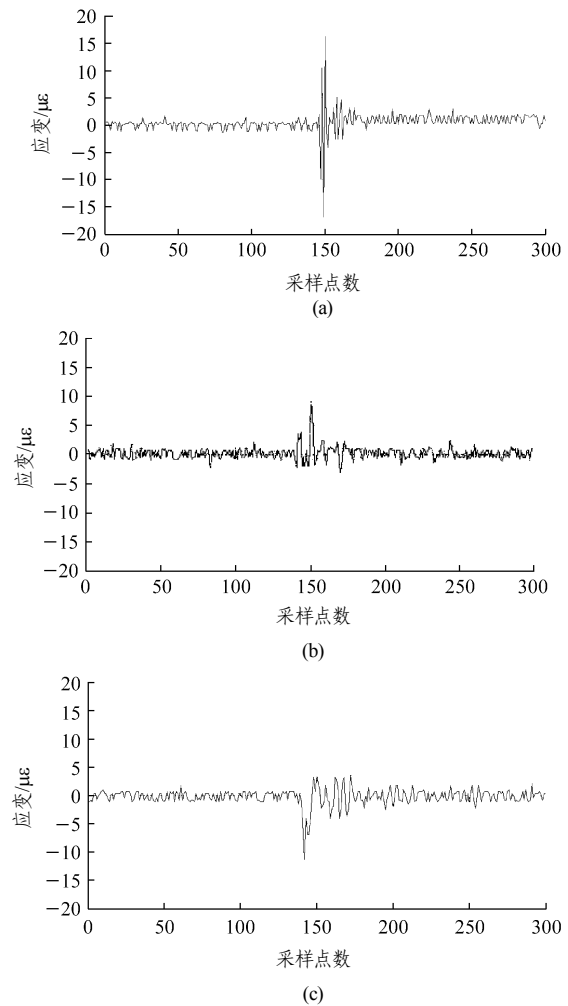


图 4 监测的峰值点信号

Fig.4 Monitored peak signals

了各峰值点的变化情况，并自动按峰值点出现的先后顺序进行了排列。

3.3 基于频带能量的损伤评估

本次爆破振动监测试验中，爆破振动信号的频率一般在 200 Hz 以下，而所采用仪器的采样频率设置为 1 000 Hz，根据香农采样定理可知，奈奎斯特 (Nyquist) 频率为 250 Hz。根据小波分解原理，可以将爆破振动信号进行尺度为 6 的小波分解^[15, 16]。这样原信号在整个频域被划分为 7 个子频带，其带宽分别为 0~7.812 5, 7.812 5~15.625 0, 15.625~31.25, 31.25~62.5, 62.5~125, 125~250 和 250~500 Hz(编号 1~7)。

损伤的发展使得裂隙对高频能量产生了一定的吸收作用，第一频带的能级呈现下降趋势；而另一方面，各能级的能量呈现出向低频带跃迁的过程。根据以上判据，该评判系统对 3 组经过筛选的信号进行尺度为 7 的小波分解，并对其能级进行评估。

其分解结果如图 5 所示, 图中的能量通过信号作小波变换后的分解系数获得, 并作无量纲化处理。

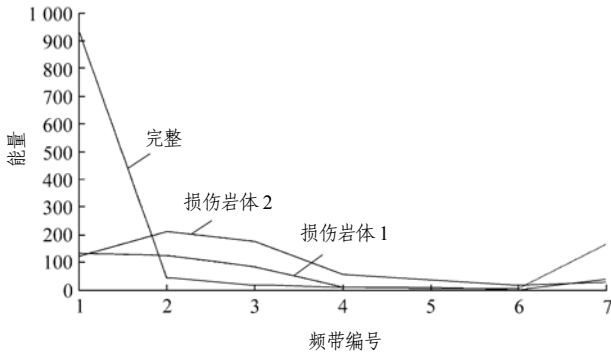


图 5 信号的小波分解

Fig.5 Signal wavelet decomposition

由图 5 可以看出, 完整顶板高频(频带 1)能量较高, 达到了 932; 随着损伤的发展, 其高频能量显著降低, 分别达到 133 和 122, 说明损伤层对振动冲击信号产生了滤波作用, 对高能级能量吸收显著。分解结果还显示出: 除高能级能量被吸收外, 整个波动的能量分布呈现出向低频带跃迁的过程, 这与建立的爆破振动损伤评估判据相一致。表 2 进一步给出了各频带能量的分布情况。

表 2 岩体中各频带能量分布

Table 2 Energy distribution of different frequency bands in rock masses %

岩体类型	频带 1	频带 2	频带 3	频带 4	频带 5	频带 6	频带 7
完整	78.928	3.712	1.514	0.860	0.485	0.483	14.017
损伤 1	32.775	31.028	20.872	2.842	2.519	0.487	9.476
损伤 2	18.825	32.426	27.116	8.901	5.136	3.066	4.529

表 2 中的数据反映出在完整顶板中, 高频能量占到总能量的 78.928%; 随着损伤的发展, 这一部分所占的比重逐渐降低, 分别只有 32.775%和 18.825%; 而中低频带的能量所占比重逐渐上升, 频带 2, 3 所占的能量分别达到 30%及 20%以上, 占到总能量的 50%以上, 与之前建立的损伤评判依据相一致。另外, 就损伤发展过程中的岩体 2, 3 来说, 其同样存在高能级能量被吸收, 且总能量向低能级跃迁的过程: 损伤岩体 3 监测数据较损伤岩体 2 频带 1 能量下降 14%, 而频带 2, 3 则分别上

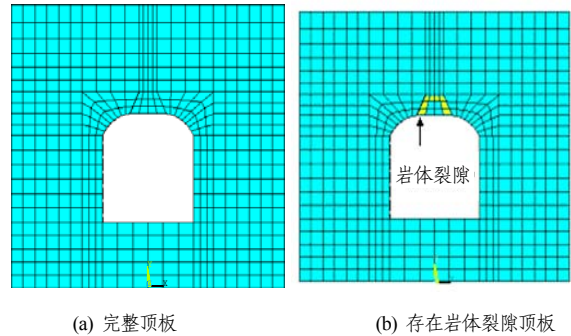
升 1%和 7%左右。

总之, 对比试验观察到的现象以及损伤识别的结果可以发现, 该系统对于冲击信号的损伤识别, 与试验中观察到的现象相一致, 说明整个损伤识别系统能够较准确地反映损伤实际发展的过程。

4 围岩顶板损伤冒落过程的数值模拟

4.1 数值模拟模型概况

室内试验不能有效模拟不同裂隙损伤程度以及精确控制裂隙的开展过程, 本文采用数值模拟对室内试验进行补充验证, 完善对顶板冒落过程的研究。计算模型的尺寸和试验对应, 为 1.3 m×1.5 m×0.3 m (高×长×厚); 巷道面和底面的垂直距离为 0.3 m, 巷道模拟的横截面尺寸为 0.5 m×0.5 m(长×高), 裂缝尺寸为 0.4 m×0.3 m(长×宽), 在厚度方向全部贯穿, 设定上下两个边界条件为反射边界, 左右和后面面为自由边界。本文所采用的模型主要是研究裂隙的存在与开展对爆破波的影响, 考虑存在结构弱面的顶板的破坏模式, 因而对顶板模型进行如图 6(a), (b)所示的网格划分。



(a) 完整顶板

(b) 存在岩体裂隙顶板

图 6 相似试验和数值计算模型及网格划分

Fig.6 Models for similar test and numerical calculation and meshes division

其中岩体裂隙的模拟是利用降低裂隙单元的弹性模量, 从而降低其强度的方法来实现的。文中裂隙的弹性模量设计为岩体弹性模量的 10%, 即 0.4 GPa。炸药单元采用 LS-DYNA 中自带的高性能炸药材料 MAT_HIGHEXPLOSIVEBURN 来模拟, 状态方程采用 JWL(Jones-Wilkens-Lee)状态方程, 起爆点在顶部中央位置。JWL 状态方程描述了炸药爆炸时的化学能情况, 一般表示为如下形式:

$$P = A \left(1 - \frac{w}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{wE}{V} \quad (7)$$

式中： V 为相对体积； E 为内能常数； A ， B ， R_1 ， R_2 ， w 均为特征参数，对于特定炸药而言为常数。模拟中采用的高能炸药材料参数如表 3 所示。

表 3 高能炸药材料参数

Table 3 Material parameters of high-energy explosive

密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	A/GPa	B	R_1	R_2 /GPa	W /GPa
1 310	5 500	241.400	0.182	4.200	0.900	4.192

4.2 数值模拟中应力波的小波分析

为了清楚地考察爆破振动过程中完整顶板模型与裂隙顶板模型所表现出的微观特征的不同，以炸药所在的对称面为基准，分别选取完整顶板模型和 2 种裂隙顶板模型中的 172，196，1546 单元，如图 7 所示，分别从以上单元的应力波时程曲线来进行分析，以期得到一些规律。

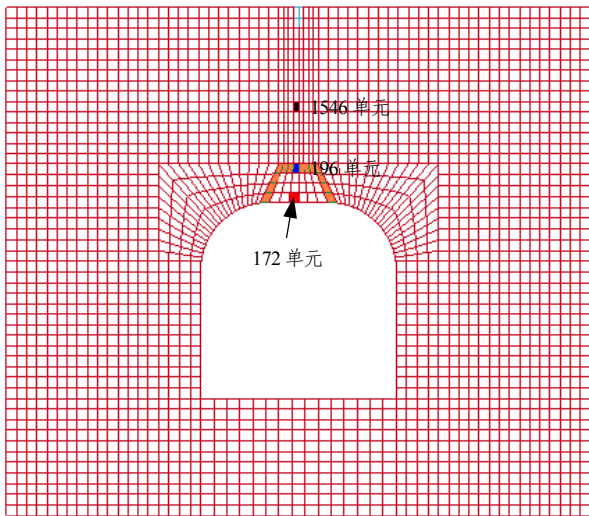


图 7 计算模型中的 172，196，1546 单元示意图

Fig.7 Sketch of units 172, 196 and 1546 of calculation model

(1) 应力时程分析

图 8 给出了完整顶板模型中 3 个单元的应力时程曲线。从图中可以看出，随着单元远离起爆点，应力波产生的时间、相位均有滞后，这与实际相符。从 3 条应力时程曲线可以看出其基本走势都是最大振动幅值出现之后，随着时间的推移，由于岩体材料的黏滞性，应力波衰减变小。1546 单元峰值出现最早，在 90 μs 左右，其大小约为 -0.1 MPa，在

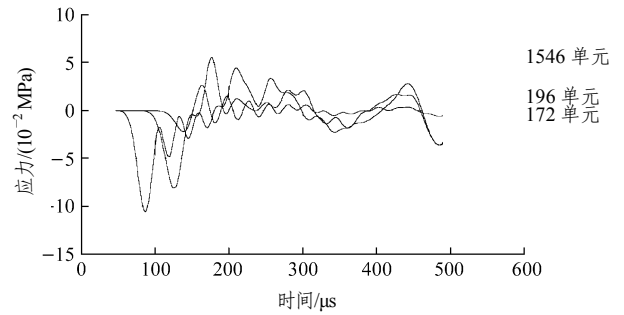


图 8 完整顶板模型单元应力时程曲线

Fig.8 Time-history curves of unit stresses in complete roof

210 μs 时出现 0.04 MPa 的波峰。

图 9 所示为裂隙顶板模型中 3 个单元的应力时程曲线。从图中可以看出，3 条应力时程曲线的基本走势呈振荡趋势，随着时间的推移，由于能量散耗，应力波衰减变小。1546 单元峰值出现最早，在 90 μs 左右，其大小为 -0.09 MPa，之后的波峰为 0.04 MPa，这与完整顶板模型相同。

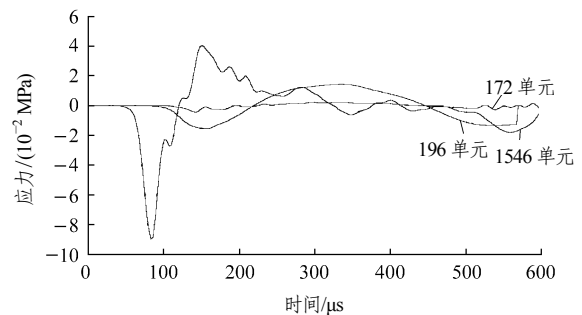


图 9 裂隙顶板内单元应力时程曲线

Fig.9 Time-history curves of unit stresses in fractured roof

对比完整顶板模型和裂隙顶板模型的应力时程曲线可以发现，二者明显存在以下几点不同：① 裂隙顶板模型中单元应力时程曲线明显比较平滑，特别是 172 单元的应力时程曲线，其幅值减小了 60%；② 对于 196 单元，在裂隙顶板模型中，它属于结构弱面，从图 8，9 中可以看出，其应力时程曲线频率和相位均与完整顶板模型有较大差别，在 580 μs 后应力直接突变为 0，这与之前在节 4.1 爆破振动波传播特征分析中所出现的情况相对应，表明结构弱面失效破坏。

(2) 不同裂隙开展程度下各频带能量分析

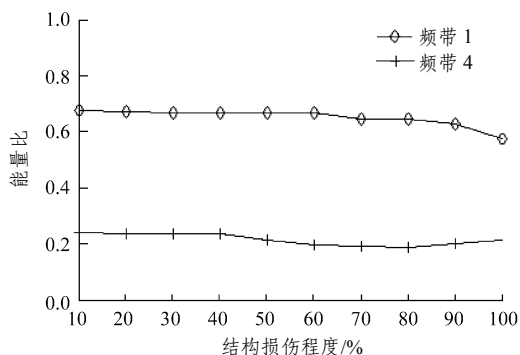
对于已确定发生损伤(裂隙开展)的裂隙顶板，令其分别发生程度为 10%，20%，30%，40%，50%，60%，70%，80%，90%，97.5% 的损伤(通过减小弹性模量来模拟裂隙发展)，分别提取这些裂隙顶板模

型中的172, 196和1546单元的应力进行小波分析, 并与完整顶板模型中对应单元的小波分析结果作比值, 也就是说取小波分解各频带能量比来分析:

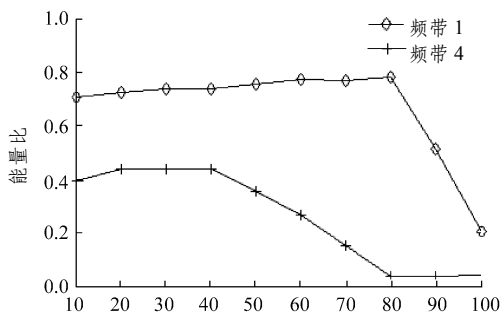
$$\beta_{si} = \frac{E_{si}^d}{E_{si}^u} \quad (8)$$

式中: E_{si}^u 为未损伤结构应力响应信号的 s 层小波分解第 i 个频带的能量, E_{si}^d 为损伤结构应力响应信号的 s 层小波分解第 i 个频带的能量, β_{si} 为应力响应信号的 s 层小波分解第 i 个频带的能量比。

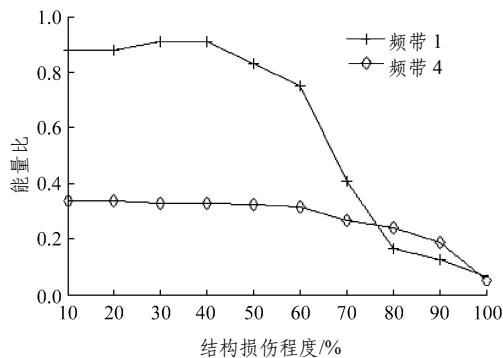
这里重点考虑频带能量比 β_{31} 和 β_{34} 。对于 1546 单元, 3 层分解后频带 1, 4 能量比 β_{31} 和 β_{34} 如图 10(a) 所示。由于这 2 点离结构弱面的位置较远, 随着顶板内损伤程度的增加, 其能量比变化不大, β_{31} 为



(a) 1546 单元



(b) 196 单元



(c) 172 单元

图 10 各单元频带 1, 4 能量比 β_{31} 和 β_{34}

Fig. 10 Energy ratios β_{31} and β_{34} corresponding to frequency bands 1 and 4 of different units

06~0.7, β_{34} 为 0.2~0.3, 这说明深部稳定岩体受裂隙开展影响小。

对于 196 单元, 3 层分解后频带 1, 4 能量比 β_{31} 和 β_{34} 如图 10(b) 所示。196 单元正好位于结构弱面内部, 也就是结构失效的地方, 裂隙开展过程对其影响很大。随着损伤程度的增加, 能量比变化较大: 结构损伤程度从 10% 发展到 80% 时, β_{31} 在 0.7 附近略有增加, 然后突然下降到 0.2; 结构损伤程度从 40% 发展到 80% 时, β_{34} 从 0.45 下降到 0.05, 这说明对于裂隙开展的那部分岩体单元, 其频带 4 的能量吸收过程很明显, 要高于频带 1。

对于单元 172, 3 层分解后频带 1, 4 能量比 β_{31} 和 β_{34} 如图 10(c) 所示。单元 172 正好位于巷道顶板底部, 从图中可以看出, 裂隙开展对其影响也很大。随着损伤程度的增加, 能量比变化较大: 结构损伤程度从 10% 发展到 40% 时, β_{31} 在 0.9 附近略有增加, 当裂隙开展到一定程度(结构损伤达到 80%) β_{31} 突然下降至 0.2 以下; 结构损伤程度从 10% 发展到 90% 时, β_{34} 从 0.35 下降到 0.15, 这说明对于裂隙开展的那部分岩体单元, 第一频带的能量所受到的影响明显, 要高于频带 4。

从以上 3 个单元的频带能量比 β_{31} 和 β_{34} 可以看出, 当围岩顶板内部产生裂隙时, 其总能量会大幅减小, 特别是频带能量比 β_{34} 会降到 50% 以下, 这说明裂隙的存在对爆破振动的高频部分能量影响最为明显。

为了比较不同单元之间的能量吸收程度, 取各频率带归一化能量比 γ 来分析:

$$\gamma_{si} = \frac{\beta_{si}}{\max(\beta_{si})} \quad (9)$$

对于频带 1 归一化能量比 γ_{31} , 3 个单元对比(见图 11)表明, 当结构损伤程度达到 50% 之后, 基于爆破振动信号小波分析的能量特征才表现出明显的有效性。对于频带 4 归一化能量比 γ_{34} , 3 个单元对比(见图 12)显示, 当结构损伤程度达到 40% 之后, 基于爆破振动信号小波分析的能量特征才表现出明显的有效性。

从图 11 及 12 的对比分析中可以看出, 可以通过爆破振动信号小波分析的能量特征来预警围岩顶板内部的损伤开裂过程和发展阶段, 当围岩裂隙强度降到 50% 以下的时候, 基于爆破振动信号小波分析的频带归一化能量比就可以有效识别这一过程。

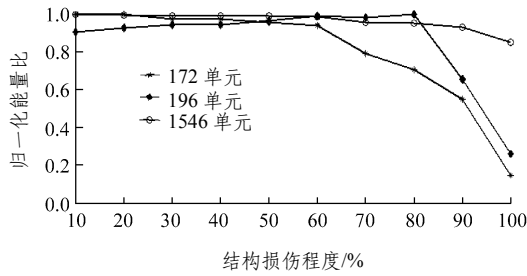


图 11 频带 1 归一化能量比 γ_{31} 对比

Fig.11 Comparison of normalized energy ratio γ_{31} of frequency band 1

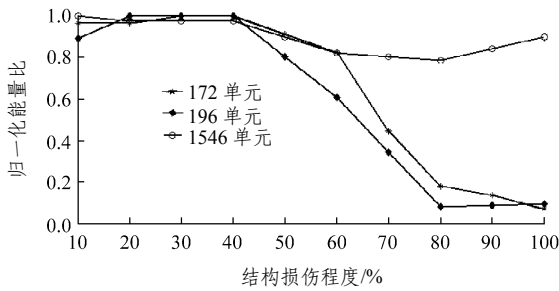


图 12 频带 4 归一化能量比 γ_{34} 对比

Fig.12 Comparison of normalized energy ratio γ_{34} of frequency band 4

5 结 论

本文通过室内相似模型试验，模拟了顶板从稳定状态到损伤发展直至顶板冒落过程，利用封装应变传感器的光纤光栅锚杆监测振动信号，通过对不同围压、不同冲击振动强度下损伤顶板与完整顶板应变动力响应信号特征分析，研究了利用小波变换提取振动响应信号的频带能量分布特征，主要结论如下：

(1) 通过室内试验发现，完整顶板振动响应信号的频带能量分布呈现相同趋势，围压对这种趋势的影响不大；损伤顶板振动响应信号的频带能量受到裂隙开展的影响，与完整顶板相比，出现了明显的频带尖点，能量峰值从高频向低频移动。

(2) 岩体裂隙的存在对于巷道顶板中爆破振动波的传播有较大影响，而通过对监测信号进行多层次的小波分解，并通过分解结果中应力波的能量衰减程度可判别出岩体中是否存在裂隙。

(3) 在顶板裂隙不同损伤程度的分析中发现，裂隙是否开展，可以通过小波分解各频率带能量比的变化特征作为判据，而各频带归一化能量比对损

伤程度更为敏感，更适合用来确定裂隙开展程度。损伤程度达到 50% 时，指标频带能量比和归一化能量比突变明显。但利用这 2 个指标时，需用到完整顶板(未损伤)的振动响应信号。

参考文献(References):

[1] 李海波, 蒋会军, 赵 坚, 等. 动荷载作用下岩体工程安全的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 887 - 1 891.(LI Haibo, JIANG Huijun, ZHAO Jian, et al. Some problems about safety analysis of rock engineering under dynamic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 887 - 1 891.(in Chinese))

[2] 闫长斌, 徐国元, 杨 飞. 爆破动荷载作用下围岩累积损伤效应声波测试研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 88 - 93.(YAN Changbin, XU Guoyuan, YANG Fei. Measurement of sound waves to study cumulative damage effect on surrounding rock under blasting load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 88 - 93.(in Chinese))

[3] 韩大建, 王文东. 基于振动的结构损伤识别方法的近期研究进展[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2003, 31(1): 91 - 96.(HAN Dajian, WANG Wendong. Overview of vibration-based damage identification methods[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science), 2003, 31(1): 91 - 96.(in Chinese))

[4] 刘 晖, 瞿伟廉, 袁润章. 基于应变能耗散率的结构损伤识别方法研究[J]. 工程力学, 2004, 21(5): 198 - 202.(LIU Hui, QU Weilian, YUAN Runzhang. A structural damage detection method based on modal strain energy dissipation ratio theory[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(5): 198 - 202.(in Chinese))

[5] 孙增寿, 韩建刚, 任伟新. 基于小波分析的结构损伤检测研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(2): 93 - 99.(SUN Zengshou, HAN Jiangan, REN Weixin. State-of-the-art research and development of wavelet analysis based structural damage detection[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(2): 93 - 99.(in Chinese))

[6] 闫长斌. 爆破作用下岩体累积损伤效应及其稳定性研究[博士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2006.(YAN Changbin. Study on cumulative damage effects and stability of rock mass under blasting loading[Ph. D. Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2006.(in Chinese))

[7] 宋光明, 曾新吾, 陈寿如, 等. 传播介质特性对爆破震动信号分

- 析中小波包时频特征的影响[J]. 工程爆破, 2003, 9(1): 64 - 68.
(SONG Guangming, ZENG Xinwu, CHEN Shouru, et al. Effect of propagation medium property on time-frequency characteristics of blasting vibration with wavelet packets analysis[J]. Engineering Blasting, 2003, 9(1): 64 - 68.(in Chinese))
- [8] 刁延松. 基于神经网络和小波分析的海洋平台结构损伤检测研究[博士学位论文][D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.(DIAO Yansong. Damage detection of offshore platform structures based on neural network and wavelet analysis[Ph. D. Thesis][D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006.(in Chinese))
- [9] 中国生. 基于小波变换爆破振动分析的应用基础研究[博士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2006.(ZHONG Guosheng. Applied fundamental research of blasting vibration analysis based on wavelet transform[Ph. D. Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2006.(in Chinese))
- [10] DENARIE E, SAOUMA V E, IOCCO A, et al. Concrete fracture process zone characterization with fiber optics[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(5): 494 - 502.
- [11] 李 悦, 宋 波, 单宏兰. 爆破作用下金属矿山围岩稳定监测点优化布置[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(5): 551 - 558.(LI Yue, SONG Bo, SHAN Honglan. Optimization of monitoring points of surrounding rock stability on blasting in underground metallic mine[J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science), 2007, 8(5): 551 - 558.(in Chinese))
- [12] 邓年春, 欧进萍, 周 智, 等. 光纤光栅在预应力钢绞线应力监测中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(10): 1 550 - 1 553.
(DENG Nianchun, OU Jinping, ZHOU Zhi, et al. Application of fiber Bragg grating sensor to monitor tensile stress in a seven-wire prestressed steel strand[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(10): 1 550 - 1 553.(in Chinese))
- [13] 娄建武, 龙 源, 徐全军, 等. 基于小波包技术的爆破地震波特征提取及预报[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(3): 261 - 267.(LOU Jianwu, LONG Yuan, XU Quanjun, et al. A study on the extraction and prediction of blasting seismic wave characteristics by wavelet packets technique[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(3): 261 - 267.(in Chinese))
- [14] SUN Z, CHANG C C. Damage detection of concrete structures using wavelet transform[C]// Proceedings of the 8th Conference on Vibration Theory and Application. Shanghai: [s.n.], 2003: 31 - 37.
- [15] 凌同华, 李夕兵. 爆破振动信号不同频带的能量分布规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004, 35(2): 310 - 315.(LING Tonghua, LI Xibing. Laws of energy distribution in different frequency bands for blast vibration signals[J]. Journal of Central South University (Natural Science), 2004, 35(2): 310 - 315.(in Chinese))
- [16] 程 康, 徐学勇. 爆破振动频率对振动效应影响的试验研究[J]. 爆破, 2003, 20(3): 79 - 81.(CHENG Kang, XU Xueyong. Experimental research on influence of blasting vibration frequency on its vibration effect[J]. Blasting, 2003, 20(3): 79 - 81.(in Chinese))