

高压物理学报

冲击荷载下岩体应力波振动信号频率特征分析

冯佳兴 袁利伟 彭纪 陈明辉 陈迪 起卓

Frequency Characterization of Stress Wave Vibration Signals in Rock Mass under Impact Loading

FENG Jiaxing, YUAN Liwei, PENG Ji, CHEN Minghui, CHEN Di, QI Zhuo

引用本文:

冯佳兴, 袁利伟, 彭纪, 等. 冲击荷载下岩体应力波振动信号频率特征分析[J]. 高压物理学报, 2025, 39(5):054202. DOI: 10.11858/gywlb.20240897

FENG Jiaxing, YUAN Liwei, PENG Ji, et al. Frequency Characterization of Stress Wave Vibration Signals in Rock Mass under Impact Loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(5):054202. DOI: 10.11858/gywlb.20240897

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240897>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冲击荷载对无烟煤微观孔隙影响的分形研究

Fractal Study on Influence of Impact Load on Microscopic Pore of Anthracite

高压物理学报. 2020, 34(5): 054203 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200528>

钢纤维混凝土板在冲击与爆炸荷载下的K&C模型

K&C Model of Steel Fiber Reinforced Concrete Plate under Impact and Blast Load

高压物理学报. 2020, 34(3): 034205 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190853>

冲击荷载作用下岩体拉-压损伤破坏的边坡抛掷爆破模拟

Numerical Simulation of Rock Tension-Compression Fracture Caused by Impact Load during Slope Casting Blast

高压物理学报. 2019, 33(1): 014102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180535>

三轴压缩下裂隙岩体破坏模式及能量演化研究

Study on Failure Mode and Energy Evolution of Fractured Rock Body under Triaxial Compression

高压物理学报. 2024, 38(5): 054203 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240722>

深部岩石爆破裂纹扩展与不耦合装药系数的关系

Relation between Crack Propagation and Decoupling Charging Coefficient in Deep Rock Blasting

高压物理学报. 2023, 37(5): 054203 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230649>

岩体可爆性的模糊决策理论及炸药单耗预测

Fuzzy Decision Theory of Rock Mass Explodability and Prediction of Explosive Unit Consumption

高压物理学报. 2023, 37(6): 065303 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230700>

冲击荷载下岩体应力波振动信号频率特征分析

冯佳兴¹, 袁利伟², 彭纪³, 陈明辉², 陈迪², 起卓²

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

2. 昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 云南 昆明 650093;

3. 保山职业学院, 云南 保山 678000)

摘要: 岩体在外部荷载冲击作用下会产生不同频率的信号。首先, 通过自制探头的光纤监测系统监测现场岩体受到瞬时冲击荷载前后的应力波信号, 并采用鲁棒性局部均值分解 (robust local mean decomposition, RLMD) 方法, 结合快速傅里叶变换对实验得到的监测信号进行时频分析; 然后, 通过 LS-DYNA 软件模拟冲击荷载施加于岩体并产生应力波的过程, 并将模拟应力波频率与实验监测应力波频率进行对比; 最后, 分析了弹性模量和密度发生改变时模拟应力波频率的变化。结果表明: 在现场施加冲击荷载后, 现场监测所得信号经过频谱分解会出现频率为 1 500~2 300 Hz 的多个极大振幅特征信号, 与模拟应力波时频分析中获得的 2 203 Hz 的主频率信号基本符合; 模拟应力波频率与一维平面应力波推导的频率呈相反的变化趋势。

关键词: 时频分析; 特征频率; 冲击荷载; 振动信号; 光纤传感技术

中图分类号: O381; O521.2; TD235

文献标志码: A

矿山发生巷道冒顶和岩爆矿震等灾害, 以及灾前内部裂隙在地应力作用下发生扩张和破碎等行为, 都会对现场施工和安全生产造成一定的影响。为了对上述灾害和行为进行预测和预防, 需要对岩体内部信号进行监测。岩体在不同的力学行为下会产生不同强度和频率的应力波^[1-4], 通过监测对应的应力弹性波、分析监测数据、进行现场破坏定位等手段来获取其与岩体力学行为或物理性质之间的对应关系, 将有助于更好地预测现场岩体可能产生的灾害, 做到对灾害的有效预防和监管, 确保生产工作的安全进行。

目前, 对岩体在不同外力作用和应力状态下所产生信号的监测和分析工作已经取得了一定的进展。研究人员通过开展现场岩体与岩石试件的信号监测及分析工作, 希望将岩石力学相关参数与材料的监测频率结合起来, 建立一种可以运用应力波信号变化分析岩石和岩体本身力学特性及对应的力学行为(断裂破碎等)的系统方法。朱权洁等^[5]选取爆破振动信号和岩石破裂的微振信号分别进行小波分解, 对不同能量的信号带进行频谱分析, 发现爆破振动信号与岩石破裂信号在频率分布上存在明显不同。郝建等^[6]通过室内实验研究了岩体地质力学参数与钻进振动信号之间的关系, 并且通过对比特征信号的不同初步判断所钻进的岩石种类。Ma 等^[7]研究了隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)循环荷载作用下岩石力学的剪切行为, 提出用相对损伤系数 D_r 和相对抗剪强度比 R_r 作为评价岩石节理正常振动损伤程度的指标, 并分析了切割作用下岩石振动的主频率和频带。Kumar 等^[8]通过研究凿岩过程中声频的声压级别特性, 建立了岩石极限抗拉压强度、岩石密度与几个主频率之间的数学关系式, 实现了对岩石物理参数的预判。张艳博等^[9]探究了不同加载速率下岩石受压破裂过程中次声信号主

* 收稿日期: 2024-09-28; 修回日期: 2024-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(52364020)

作者简介: 冯佳兴(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事安全监测研究. E-mail: 821866927@qq.com

通信作者: 袁利伟(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事安全科学理论技术、矿山安全技术、灾害风险管控与预警预报研究. E-mail: 86593592@qq.com

频带的变化特征,并根据次声能量提出了一种大理石受压失稳判据。刘刚等^[10]开展了牙轮钻头破岩室内实验,通过采集几种不同的岩体振动信号,获取了钻头在不同岩体中的信号特征,明确了钻进地层与信号变化之间的关系。王盟等^[11]针对结构损伤的非线性流程每一阶的瞬时频率进行小波变换,提出了通过频率突变点识别损伤的方法。朱振飞等^[12]研究了岩桥裂纹与归一化主频带之间的关系,发现了裂纹尺度与主频率幅值点的相关性。

基于上述思路,本研究首先尝试对现场岩体受冲击所产生的应力波信号进行监测;然后建立与现场冲击实验相符的数值计算模型,将计算所得应力波与现场监测应力波进行对比,探究冲击荷载应力波所处频段;最后通过数值模拟分析岩石的杨氏模量、密度以及冲击杆速度 3 个关键量与频率之间的关系,探究通过频率监测初步判断现场岩体岩性的可能性。

1 现场监测实验

本研究的重点是监测现场冲击荷载下岩体产生的振动信号以及对信号进行时频分析,从而获得频谱特征。为此,采用自制光纤振动设备对现场开展监测实验,监测机械冲击钻对岩体施加冲击荷载前后现场不同活动的振动信号。

1.1 监测设备

采用自制监测探头及一套光纤振动监测设备开展实验。该监测设备包括一套振动信号采集仪和一套光电转换仪,采样率为 8 192 Hz。振动信号采集依据的主要原理为迈克尔逊干涉,即激光器发射激光后进行分光,2 条光路经过光纤与监测探头相连;分光到达物体表面后产生干涉和衍射,当物体表面发生形变或机械振动时,干涉条纹也会发生变化。这种光信号的变化通过光电转换仪转变为电压信号的变化,将电压信号收集并存储于电脑上,通过电脑端软件完成对电信号的分析及解算,从而形成振动监测数据。监测末端的探头主要由法拉第旋转镜构成,使用这种结构件的目的是将分光路线更好地反射回来,从而得到最佳干涉效果。探头内部的结构和设备连接方法如图 1 所示。

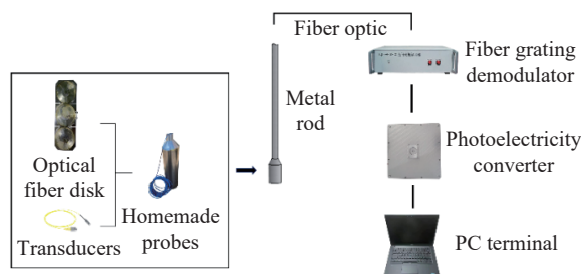


图 1 监测设备探头内部以及监测系统

Fig. 1 Monitoring equipment probe and the monitoring system

1.2 工程背景与现场监测实验方案

为了监测所需信号,在云南某采石场开展实验,该采石场生产的石材以建材常用的灰岩为主,现场实验方案和钻孔布置如图 2 所示。在采石场边坡平台区域设置 4 个非等距钻孔,由左至右 4 个钻孔的深度分别为 2、3、6 和 6 m,后续钻孔与第 1 个钻孔的距离分别为 5、10、30 m,钻孔的孔径为 120 mm。这样的测点布置意在探明设备监测信号的有效监测范围以及在哪个钻孔中可以获得更清晰有效的数据。将探头放入 4 个钻孔中,然后对现场完整地地表岩体施加冲击力,在距离破碎位置最近的钻孔中获得了较清晰的信号,随后监测该钻孔一段时间内的所有信号,记录后准备进一步处理。现场实验情况如图 3 所示。

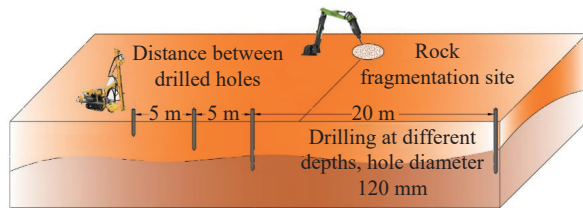


图 2 实验方法和测点布置

Fig. 2 Experimental method and layout of measurement points

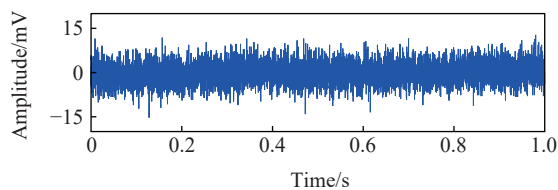


图 3 现场实验照片

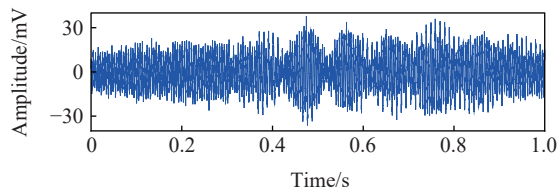
Fig. 3 Photos of field experiment

1.3 振动信号监测

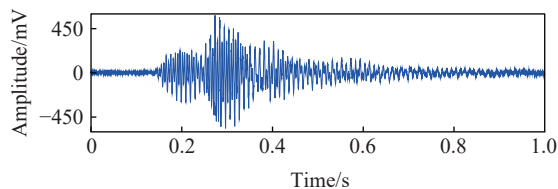
监测开始时,首先需要对外部环境的干扰信号进行监测记录,一段时间后,在图 2 所示位置开始施加冲击荷载,并对振动信号进行现场记录,获得一组清晰有效的原始监测时域信号数据,得到的噪声信号和施加荷载后的监测信号分别如图 4 和图 5 所示。



(a) White noise signal



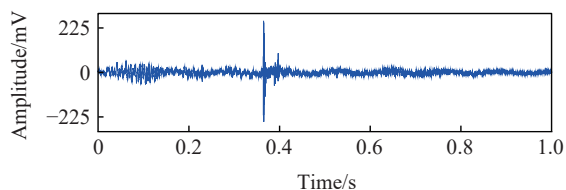
(b) Vocal signal



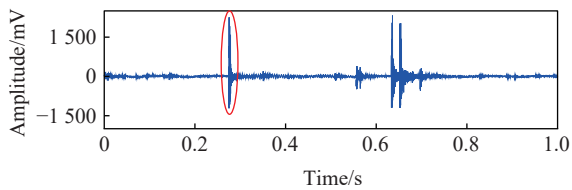
(c) Machine noise signal

图 4 噪声信号

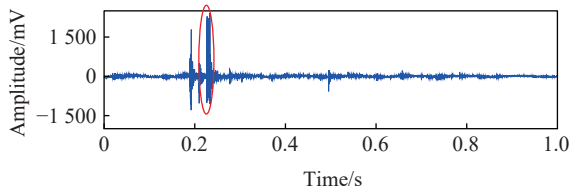
Fig. 4 Noise signals



(a) Payload signal 1



(b) Payload signal 2



(c) Payload signal 3

图 5 施加载荷后的监测信号

Fig. 5 Monitoring signals after loading

从图 4 和图 5 可以看出,现场噪声信号和干扰信号与冲击荷载产生的信号在形态上完全不同。白噪声信号中,最大电压幅值仅为 15 mV(图 4(a));人声信号的最大电压幅值可达 30 mV(图 4(b)),并且其形态呈现声音信号的规律性特征;机器开动的噪音信号(图 4(c))在启动时幅值达到 450 mV,然后逐渐衰

减。同时 2 种噪声信号相比冲击施加信号更加稀疏,而图 5 中的冲击荷载信号则存续时间较短且振幅大幅增加(高达 1 000 mV),施加荷载后的最大振幅达到了噪声信号的 50 倍,并且存续时间远短于 0.1 s,之后出现几个幅值明显衰减但存续时间仍然较短的信号(如图 5(b) 中红圈所示),表明从时域信号已经可以初步观察到几种信号之间的差异。

为了进一步观察不同信号的频域特征,需要对信号进行时频变换。目前,针对时域信号的分解主要采用傅里叶变换方法。该方法是通过将信号函数分解为不同频率的基本三角函数信号的线性组合,得到时域信号的频域分布^[13-14]。本研究拟采用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)改进方法,同时采用鲁棒性局部均值分解(robust local mean decomposition, RLMD)方法将信号分解为不同频域范围的模态信号,以方便对某一频域范围内的特征信号进行提取。该方法在局部区间内进行多项式拟合,提取局部特征并最终分解为多个局部模态函数,是局部均值分解(local mean decomposition, LMD)方法的改进版本。RLMD 分解方法的具体实现过程^[15-17]如下。

(1) 获取原始信号 $x(t)$ 中所有局部振幅极值点,用 t_n 表示其中的所有极值点, $x(t_n)$ 表示对应的信号振幅极值。

(2) 计算 2 个相邻振幅极值的局部平均值 $\hat{m}_k$ 和局部振幅 $\hat{a}_k$, 表示为

$$\begin{cases} \hat{m}_k = \frac{x(t_n) + x(t_{n+1})}{2} \\ \hat{a}_k = \frac{|x(t_n) - x(t_{n+1})|}{2} \end{cases} \quad (1)$$

然后用该直线的局部平均值 $\hat{m}_k$ 代替 2 个极值点之间的变化信号,连接这些信号并采用统计学中的移动平均法将固定步长 k 内的局部平均值平滑处理为曲线,获得最初的局部均值函数 $m_{11}(t)$, 对局部振幅 a_k 采用同种方法生成最初包络函数 $a_{11}(t)$, 过程如图 6 所示。

(3) 用原始信号 $x(t)$ 减去初始局部均值函数 $m_{11}(t)$, 得到均零信号 $h_{11}(t)$

$$h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t) \quad (2)$$

(4) 用 $h_{11}(t)$ 除以 $a_{11}(t)$, 得到调频信号 $s_{11}(t)$

$$s_{11}(t) = \frac{h_{11}(t)}{a_{11}(t)} \quad (3)$$

判断 $s_{11}(t)$ 是否为纯调频信号,即 $a_{11}(t)$ 是否等于 1, 否则继续循环重复步骤 (1)~步骤 (4) n 次,直到 n 步之后,包络函数 $a_{1n}(t) = 1$, 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_{1n}(t) = 1 \quad (4)$$

此时总纯调频信号 $s_1(t) = s_{1n}(t)$, 总包络信号 $a_1(t)$ 为步骤 (1)~步骤 (4) 所有包络信号 $a_{1n}(t)$ 的累乘。

(5) 当式 (4) 成立时,提取纯调频信号 $s_1(t)$ 和总的包络信号 $a_1(t)$, 构成模态函数 $F_1(t)$

$$F_1(t) = a_1(t)s_1(t) \quad (5)$$

(6) 用原始信号 $x(t)$ 减去 $F_1(t)$, 得到剩余分量 $c_1(t) = x(t) - F_1(t)$ 。然后,循环上述步骤,直到剩余分量 c_p 为一个常数。信号 $x(t)$ 可分解为 k 个模态信号函数的总和以及一个单调函数 $c_p(t)$, 即

$$x(t) = \sum_{k=1}^p F_k(t) + c_p(t) \quad (6)$$

同时,为了解决 LMD 方法的端点效应和模态混叠问题,采用 RLMD 方法对其进行优化,具体包

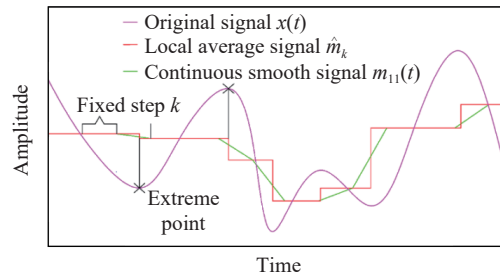


图 6 RLMD 部分流程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the RLMD process

括: 在边界条件中添加信号左右对称点判定以消除分解方法的端点效应的影响, 根据统计理论最优固定移动距离减少包络估计的误差, 为了使获得的信号带分量具有实际物理意义而改进筛选停止准则。本研究采用 MATLAB 代码对原始信号进行分解, 并在分解后提取主频率(即分解后振幅最大)所在的模态函数信号进行频域变换, 得到的噪声信号主信号带和施加荷载后监测到的信号带分别如图 7、图 8 所示, 所有信号频率与图 4、图 5 的时域信号相对应。

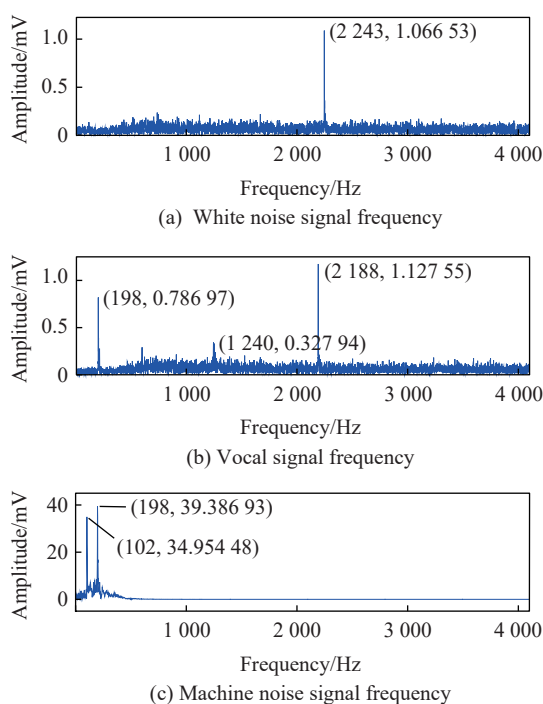


图 7 噪声信号频率

Fig. 7 Noise signals frequency

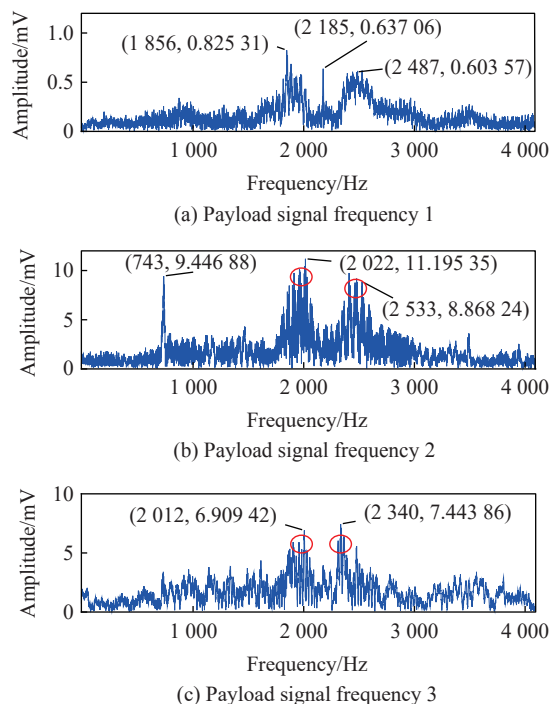


图 8 施加载荷后的监测信号频率

Fig. 8 Monitoring signals frequency after loading

从图 7 和图 8 可以直观地看出, 背景白噪音分解后, 仅在 2 243 Hz 出现最大振幅, 此时现场无其他的明显行为, 推测为设备本身连接后的电磁噪声信号; 人声信号则出现了 198 和 1 240 Hz 2 个特征信号; 对机械开动的噪声信号进行分解后, 发现在 102 和 198 Hz 出现 2 个主要信号, 呈几何倍数关系, 推测为机械工作产生的谐波。而冲击信号分解后分别在 1 800~2 000 Hz 以及 2 000~2 500 Hz 出现多个极大振幅信号, 其中一组还出现了 743 Hz 的峰值频率, 并且所有的冲击振动信号都产生了“双峰”现象, 该现象的产生一般是由于信号分解中出现了 2 个主频信号, 可能是探测到了 2 种不同类型的波(P 波和 S 波), 也可能是由于被监测岩体本身并非均匀介质, 导致信号在其中发生了干涉和衍射, 从而使监测的干涉波或衍射波的频率发生了变化。提取几组冲击信号的特征频率并进行对比, 发现几类信号频率带也有明显的区别, 进一步表明现场监测噪声信号与冲击信号存在明显的不同。

2 现场冲击应力波数值模拟

为了进一步验证实验所得的信号监测结果, 推断现场监测到的信号是否确实为应力波信号, 参考文献 [18-19] 中的数值模拟方法, 模拟现场岩体在受到外力荷载冲击作用下, 岩体表面单位岩石的水平方向应力快速变化而产生的应力波, 探究模拟应力波的频率与现场监测信号频率的相似性。采用 LS-DYNA 进行应力分析, 在解决动力冲击问题方面, LS-DYNA 模块中的显式算法比采用隐性算法求解具有更好的功能性。

2.1 数值模拟建模

通过施加速度的弹体冲击岩体板模拟现场的实际工况,岩体板的底部和四周设定约束;为了简化计算,假设该模型中岩体板完整均匀,内部不存在节理裂隙面,因此,力和位移等在内部均匀传递,而岩体模型的整体尺寸远大于冲击弹体,可以忽略弹体模型尺寸效应,据此建立网格模型,如图 9 所示。设定模型尺寸:冲击杆为边长 0.03 m、长 1 m 的立方柱体,岩层为边长 2 m、厚 0.2 m 的立方柱体。

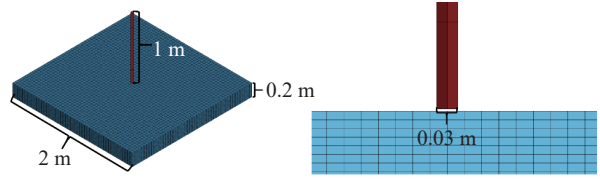


图 9 数值模拟建模

Fig. 9 Modeling of numerical simulation

采用 LS-DYNA 模拟时,选择基本单位为 kg、m、s,其他均为上述基本单位的导出单位;本研究中的岩体选择 RHT 模型,该模型在解决岩石爆破工程和混凝土靶板侵蚀等问题时均表现出较好的效果,可以很好地反映材料在受冲击等动力作用下的振动特性。

在 RHT 模型中,采用 Mie-Grüneisen 状态方程,该方程可以准确地描述材料在高温、高压、高应变率条件下的动态行为。根据文献 [20-21] 的研究,材料在受到冲击过程中的孔隙度满足

$$\alpha(t) = \max \left\{ 1, \min \left\{ \alpha_0, \min_{s \leq t} \left[1 + (\alpha_0 - 1) \left(\frac{p_{\text{comp}} - p(s)}{p_{\text{comp}} - p_{\text{el}}} \right)^N \right] \right\} \right\} \quad (7)$$

式中: α 为材料的孔隙度; α_0 为材料的初始孔隙度; $p(s)$ 为计算过程中任一时刻的压力; p_{comp} 为压实压力; p_{el} 为初始孔隙挤压压力; N 为材料孔隙度指数,用以描述材料孔隙度随压力变化的速率。

物质密度和能量随压力状态变化的方程为

$$p(\rho, e) = \frac{1}{\alpha} \begin{cases} (B_0 + B_1 \eta) \alpha \rho e + A_1 \eta + A_2 \eta^2 + A_3 \eta^3 & \eta > 0 \\ B_0 \alpha \rho e + T_1 \eta + T_2 \eta^2 & \eta \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: e 为内能; ρ 为孔隙密度; A_1 、 A_2 、 A_3 为 Hugoniot 能量方程的系数; B_0 、 B_1 、 T_1 、 T_2 为能量方程的参数; η 表示材料受冲击后表现为压缩状态还是膨胀状态,当 $\eta > 0$ 时,为压缩状态。

$$\eta(\rho) = \frac{\alpha \rho}{\alpha_0 \rho_0} - 1 \quad (9)$$

模型的弹塑性屈服面模型方程表示为

$$\sigma_y(p^*, s, \dot{\epsilon}_p, \epsilon_p^*) = f_c \sigma_y^*(p^*, F_r(\dot{\epsilon}_p, p^*), \epsilon_p^*) R_3(\theta, p^*) \quad (10)$$

式中: s 为偏应力张量, $\dot{\epsilon}_p$ 为塑性应变率, ϵ_p^* 为有效塑性应变, R_3 为剪切和拉伸子午线折减函数, F_r 为应变率依赖函数, p^* 为归一化压力, f_c 为抗压强度, σ_y^* 为静态屈服面子午线等效应力函数。

通过式 (7)~式 (10) 可以计算本次模拟岩体表面单位岩石在发生振动冲击后一段时间内应力和应变的变化。对 RHT 模型所涉及的参数进行标定,文献 [22] 的研究指出:材料密度 ρ_0 、初始孔隙度 α_0 、剪切模量 G 、单轴压缩模量等可以通过简单的岩石力学实验进行测定,其余部分参数则需要采用分离式霍普金森压杆实验进行参数标定。然而,有些参数只能提供一种近似的经验估计值,且实验测定现场岩石的岩性与参考值基本相同。因此,在允许一定误差存在的情况下,岩石的弹性模量和密度采用采石场的工程报告值,其余采用文献 [22] 中的参考值,整体参数如表 1 所示。表 1 中: A 、 n 为失效面参数, B 、 Q_0 为 Lode 角系数, n_t 、 A_t 为残余强度面参数, g_c^* 为压缩屈服面参数, g_t^* 为拉伸屈服面参数, β_c 、 β_t 分别为压缩应变率和拉伸应变率依赖指数, γ 为 Grüneisen 系数, D_1 和 D_2 为损伤参数, f_t^* 、 f_s^* 为相对抗拉强度和相对剪切强度, $\dot{\epsilon}_t^*$ 、 $\dot{\epsilon}_c^*$ 分别为拉伸断裂和压缩断裂时的应变率, $\dot{\epsilon}_0^*$ 、 $\dot{\epsilon}_0^*$ 分别为参考压缩应变率和参考拉伸应变率, ϵ_p^m 为最小损伤残余应变, ξ 为剪切模量折减系数。冲击钻杆的材料模型设定为标准弹性材料结构钢,由于不对其进行分析,依照结构钢参数的取值,其密度为 7 850 kg/m³,杨氏模量为 200 GPa,泊松比为 0.25。

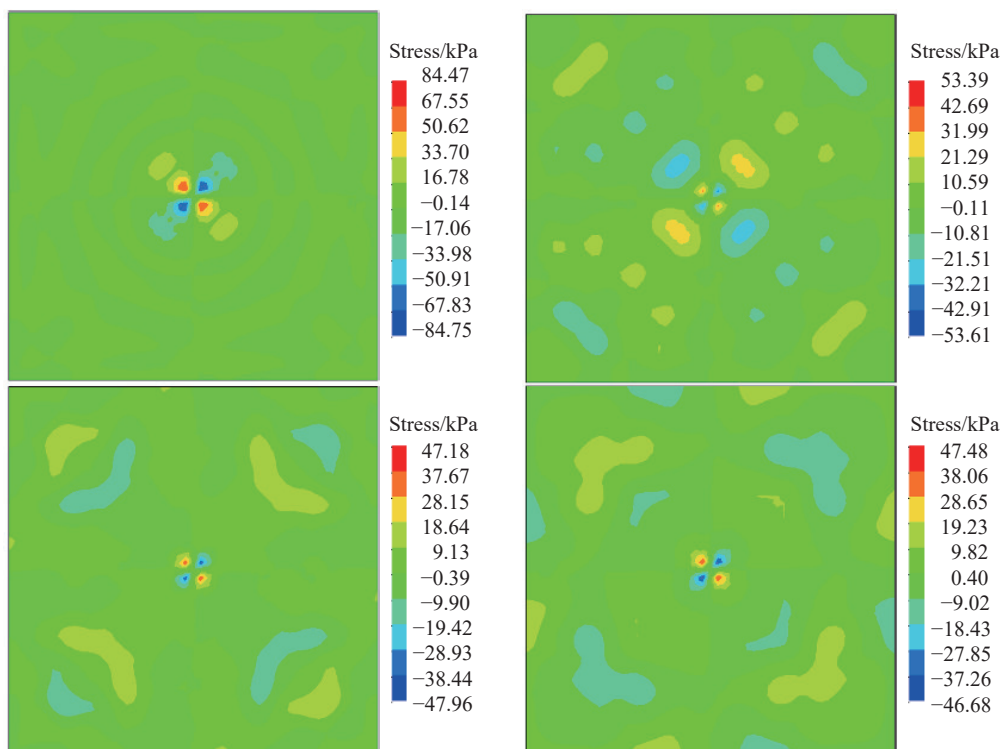
表 1 岩体的 RHT 模型参数^[22]
Table 1 Parameters of RHT model of rock^[22]

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	G/GPa	A	n	B	Q_0	n_f	A_f	g_c^*
2 660	15.4	1.65	0.56	0.010 5	0.68	0.62	1.59	0.78
g_i^*	B_0	B_1	T_1/GPa	T_2/GPa	N	β_c	β_t	γ
0.7	0.9	0.9	45.4	0	4	0.032	0.025	0
D_1	D_2	A_1/GPa	A_2/GPa	A_3/GPa	f_t^*	f_s^*	α_0	p_{el}/MPa
0.037	1	45.4	40.9	4.2	0.1	0.18	1.078	16
$p_{\text{comp}}/\text{GPa}$	$\dot{\epsilon}^t/\text{ms}^{-1}$	$\dot{\epsilon}^c/\text{ms}^{-1}$	$\dot{\epsilon}_0^c/\text{ms}^{-1}$	$\dot{\epsilon}_0^t/\text{ms}^{-1}$	ϵ_p^m	ξ	f_c/MPa	
0.6	3×10^{22}	3×10^{22}	3×10^{-8}	3×10^{-9}	0.01	0.44	48	

2.2 模拟结果分析

设定冲击钻杆的速度为 1 m/s,通过数值模拟计算结构在受到冲击后 1 s 内表面应力的变化,得到 z 方向和 xy 平面的应力云图如图 10 所示。从图 10 可以看出: xy 平面的应力云图表现出了明显的应力波传递波纹。

观察表面应力云图可以发现:在 0.004 s 冲击瞬间, xy 平面开始产生应力,并从冲击点逐渐以波状向外扩散;之后,该应力波返回,在表面形成干涉波和衍射波,并逐渐形成几个应力波峰与波谷的叠加区,这 2 个区域关于表面呈对称分布。在对表面应力波建立观测坐标系的过程中,根据观测坐标系为波所作用的质点自身,还是对空间中所有质点进行观测,将观测坐标系分为 Lagrange 坐标和 Euler 坐标,本研究采用 Lagrange 坐标方法,即选择表面网格中的应力波幅值变化明显的一固定点,导出其应力变化数据,并对应力波信号进行频谱分析。



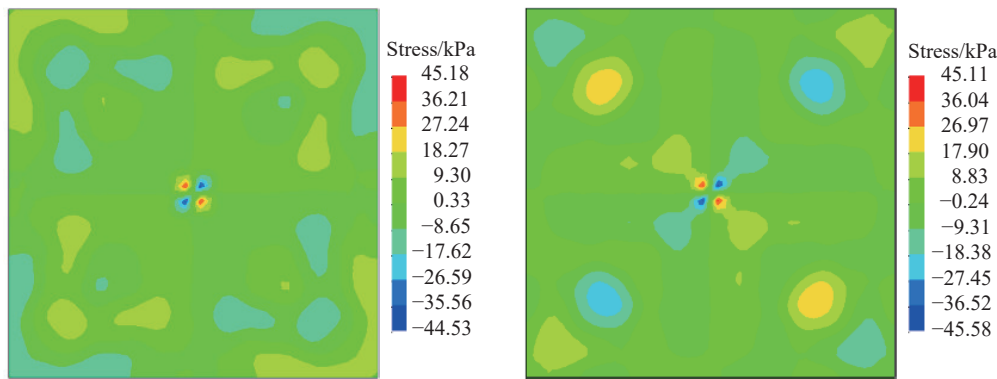


图 10 数值模拟得到的应力变化云图

Fig. 10 Stress variation nephograms obtained from numerical simulation

2.3 频谱分析和讨论

数值模拟得到的应力波曲线及频谱分析结果如图 11 所示。观察发现, 表面应力波数据信号和监测得到的冲击信号在形态上十分相似, 即冲击瞬间有一个高振幅短时信号, 随后迅速衰减, 然后出现数个干涉波或衍射波信号。对 1 s 内的信号进行频域分析, 发现在 2 203 Hz 左右出现特征振动信号频率, 与现场监测实验得到的信号频率段 1 800~2 000 Hz、2 000~2 500 Hz 基本符合。同时, 由于 LS-DYNA 模型的计算方程参数选取了经验值, 因此, 采用该方程对现场信号进行模拟时存在一定的误差, 造成两者的频率并不完全相等。分析 xy 面的应力波频率模拟结果, 发现模拟结果中并不仅存在单一峰值, 存在 2 203 和 2 651 Hz 2 个峰值, 如图 11(b) 所示。这是由于数值模拟的平面波在模型边界发生了干涉等现象, 因此, 推断前述监测结果中的双峰频率也是各种波在表面产生的干涉所致。总体来说, 两者频率基本相同, 且产生了紧随其后的“二次波”, 验证了本研究监测到的表面应力波的变化, 同时表明, 施加冲击荷载后, 确实在表面产生了中高频应力波。

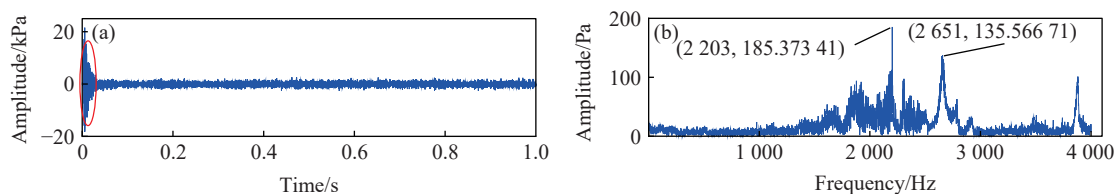


图 11 数值模拟得到的应力波及其频谱分析

Fig. 11 Numerical stress wave and spectral analysis

为了更直观地描述不同信号之间的差异, 将所有信号的均方根 (root mean square, RMS) 频率、1 800~2 500 Hz 信号能量占总信号能量之比以及所有信号的脉冲因子等信号特征列于表 2。其中, RMS 频率表示一段信号的平均主频带位置, 1 800~2 500 Hz 信号能量占总信号能量之比表示冲击频域

表 2 信号特征比较

Table 2 Comparison of signal characteristics

Signal	RMS frequency/Hz	1 800~2 500 Hz energy percentage/%	Shock factor
Analog signal	2 473.01	33.39	55.91
Shock signal 1	2 190.45	31.76	107.03
Shock signal 2	2 262.70	26.53	125.57
Noise signal	2 239.34	16.87	9.92
Human voice signal	1 979.62	12.97	7.17
Mechanical signal	1 080.73	3.63	19.24

附近信号能量与信号总能量的比值, 脉冲因子则表征该信号是否为冲击信号。

从表 2 可以看出: 模拟信号和冲击信号 1、2 以及噪声信号的平均主频带在 2 000 Hz 以上; 而人声信号和机械信号的主频带较低, 这是因为人声信号和机械信号的主要频率为 2 000 Hz 以下的低频, 由此导致主频带降低。冲击信号附近频带能量占比均达到 25% 以上, 与其他信号的 16.87%、12.97% 以及 3.63% 差异较大。所有冲击信号的脉冲因子均达到 50 以上。可以看出, 不同信号在信号特征方面存在较大的差异。

为了进一步探究冲击信号频率变化的影响因素, 结合应力波理论展开分析, 空间中的应力波波速可以表示为

$$c = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (11)$$

可以看出, 应力波的波速只与弹性模量 E 、材料密度 ρ_0 和泊松比 ν 三者相关。根据波长与波速的关系 ($c = \lambda f$, 其中 λ 为波长, f 为应力波频率) 可以推断, 波长一定时, 随着弹性模量增加, 应力波频率增加, 而密度增大时, 频率减小。为了验证上述推断, 将模拟数据中冲击钻杆的弹性模量和密度分别取原数据的 0.6、0.8、1.2 和 1.4 倍, 而其余物理量保持不变, 计算得到物理参数成倍数改变后的模拟应力波频率分布, 如图 12 所示。这与上述推测呈相反趋势, 即频率随着弹性模量的增大而减小, 随密度的增大而增大。由此猜测, 当这 2 个量发生改变时, 波长的改变速率高于波速的改变速率, 导致频率变化呈相反的趋势。导致该趋势产生的内因以及该猜测的理论分析还需要进一步开展研究。

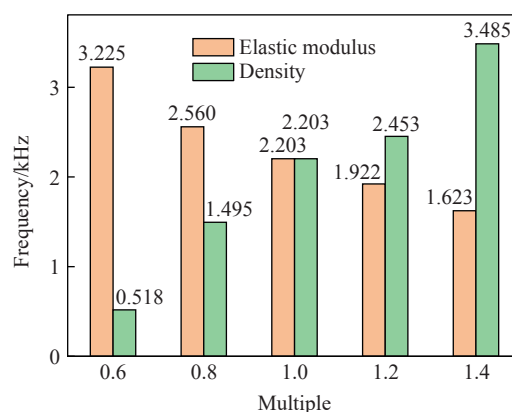


图 12 模拟应力波频率与改变物理参数的关系

Fig. 12 Relationship of numerical stress wave frequency versus changing physical parameters

3 结 论

通过建立现场监测方案, 探测了岩体在短时间内受冲击荷载作用下的振动信号, 并通过数值模拟验证了实验监测分析结果, 得到以下主要结论。

- (1) 通过冲击实验监测到了确定的冲击信号, 冲击信号与噪声信号在时域形态上存在明显的区别。
- (2) 通过特征模态信号提取和信号频谱分析, 发现冲击信号的频率明显区别于噪声信号, 并且冲击信号表现为较高的频带分布, 而噪声信号的主要频率相对较低; 冲击信号存在双峰现象, 推测是波的干涉和衍射等行为产生的二次波所致, 而噪声信号则表现为单一峰值。
- (3) 通过模拟应力波的产生分析其频率特性, 并与监测得到的信号频率进行对比, 发现其频率也处在 1 800~2 500 Hz 范围内。将所有信号主频带、频带能量以及脉冲因子进行对比, 也可以进一步区分不同信号。参照一维平面应力波理论分析峰值频率变化的原因, 通过等比例改变弹性模量和密度的值, 计算冲击荷载应力波与两者之间的关系, 发现主频带频率的增大与材料弹性模量和密度均成反比, 与应力弹性波波速的推导呈相反的趋势, 为此, 后续还需要开展更深入的研究。

参考文献:

- [1] 王世鸣, 白云帆, 王嘉琪, 等. 应力波斜入射下砂岩层裂破坏的试验研究 [J]. 振动与冲击, 2024, 43(14): 201-210.
WANG S M, BAI Y F, WANG J Q, et al. Experimental study on the spalling failure of sandstone under the oblique incidence of stress waves [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(14): 201-210.

- [2] 宁建国, 李壮, 王俊, 等. 动态拉应力波作用下锚固体力学响应试验研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(4): 731–740.
NING J G, LI Z, WANG J, et al. Experimental study on mechanical response of anchored body under dynamic tensile stress wave [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(4): 731–740.
- [3] 刘啸, 华心祝, 黄志国, 等. 应力波作用下含大型结构面岩体垮塌动力失稳机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 2003–2014.
LIU X, HUA X Z, HUANG Z G, et al. Dynamic collapse mechanisms of rock mass with large structural planes under stress waves [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10): 2003–2014.
- [4] 伍武星, 宫凤强, 高明忠, 等. 冲击扰动下断面形状对深部隧洞岩爆的影响研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(9): 2257–2272.
WU W X, GONG F Q, GAO M Z, et al. Study on the influence of cross-section shape on rockburst of deep tunnels under impact disturbance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(9): 2257–2272.
- [5] 朱权洁, 姜福兴, 于正兴, 等. 爆破震动与岩石破裂微震信号能量分布特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 723–730.
ZHU Q J, JIANG F X, YU Z X, et al. Study on energy distribution characters about blasting vibration and rock fracture microseismic signal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 723–730.
- [6] 郝建, 刘河清, 刘建康, 等. 基于振动信号的岩石单轴抗压强度钻进预测实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(6): 1406–1424.
HAO J, LIU H Q, LIU J K, et al. Experimental study of rock uniaxial compressive strength prediction with drilling based on vibration signals [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(6): 1406–1424.
- [7] MA B L, ZHANG K, XIAO F Y, et al. Experimental and numerical studies on the shear mechanical behavior of rock joints under normal vibration loads [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 165: 105892.
- [8] KUMAR C V, VARDHAN H, MURTHY C S N, et al. Estimating rock properties using sound signal dominant frequencies during diamond core drilling operations [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(4): 850–859.
- [9] 张艳博, 王博, 梁鹏, 等. 大理岩单轴压缩破坏次声波特征的加载速率效应研究 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(Suppl 2): 821–831.
ZHANG Y B, WANG B, LIANG P, et al. Loading rate effects on infrasound characterization of uniaxial compression damage in marble [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(Suppl 2): 821–831.
- [10] 刘刚, 张家林, 刘闯, 等. 钻头钻进不同介质时的振动信号特征识别研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(8): 71–78, 104.
LIU G, ZHANG J L, LIU C, et al. An identification method of vibration signal features when bit drills different mediums [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(8): 71–78, 104.
- [11] 王盟, 翁顺, 余兴胜, 等. 基于时变模态振型小波变换的结构损伤识别方法 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(16): 10–19.
WANG M, WENG S, YU X S, et al. Structural damage identification based on time-varying modal mode shape of wavelet transformation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(16): 10–19.
- [12] 朱振飞, 陈国庆, 肖宏跃, 等. 基于声发射多参量分析的岩桥裂纹扩展研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(4): 909–918.
ZHU Z F, CHEN G Q, XIAO H Y, et al. Study on crack propagation of rock bridge based on multi parameters analysis of acoustic emission [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(4): 909–918.
- [13] 付荣, 傅荣华, 付安生. 基于快速傅里叶变换的地震波加速度构成及其幅频特性研究 [J]. 地震学报, 2014, 36(3): 417–424.
FU R, FU R H, FU A S. Composition and amplitude-frequency characteristics of ground motion acceleration based on fast Fourier transform analysis [J]. Acta Seismologica Sinica, 2014, 36(3): 417–424.
- [14] 徐杨杨, 孙建国, 商耀达. 一种利用 Nyström 离散与 FFT 快速褶积的散射地震波并行计算方法 [J]. 地球物理学报, 2021, 64(8): 2877–2887.
XU Y Y, SUN J G, SHANG Y D. A parallel computation method for scattered seismic waves using Nyström discretization and FFT fast convolution [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(8): 2877–2887.
- [15] 颜少廷, 周玉国, 任艳波, 等. 基于 RLMD 和 Kmeans++ 的轴承故障诊断方法 [J]. 机械传动, 2021, 45(2): 163–170.
YAN S T, ZHOU Y G, REN Y B, et al. Bearing fault diagnosis method based on RLMD and Kmeans++ [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(2): 163–170.
- [16] 张亢. 局部均值分解方法及其在旋转机械故障诊断中的应用研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
ZHANG K. Research on local mean decomposition method and its application to rotating machinery fault diagnosis [D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [17] SMITH J S. The local mean decomposition and its application to EEG perception data [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2005, 2(5): 443–454.

- [18] 郑菲. 次声波源产生的机理及有限元模拟 [D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
ZHENG F. The mechanism of infrasound source and finite element simulation [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [19] 赵久彬, 刘元雪, 柏准, 等. 土体中岩石破坏次声波的三维多测点振速矢量直线汇聚声源定位方法 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(14): 144–152.
ZHAO J B, LIU Y X, BAI Z, et al. Sound source location method with three-dimensional multi-point measurement and particle velocity-vector linear convergence approach for infrasound generated by rock failure in soil [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(14): 144–152.
- [20] RIEDEL W, KAWAI N, KONDO K. Numerical assessment for impact strength measurements in concrete materials [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 36(2): 283–293.
- [21] 李洪超. 岩石 RHT 模型理论及主要参数确定方法研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2016.
LI H C. The study of the rock RHT model and to determine the values of main parameters [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2016.
- [22] 李洪超, 刘殿书, 赵磊, 等. 大理岩 RHT 模型参数确定研究 [J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(8): 801–806.
LI H C, LIU D S, ZHAO L, et al. Study on parameters determination of marble RHT model [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(8): 801–806.

Frequency Characterization of Stress Wave Vibration Signals in Rock Mass under Impact Loading

FENG Jiaying¹, YUAN Liwei², PENG Ji³, CHEN Minghui², CHEN Di², QI Zhuo²

(1. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650093, Yunnan, China;

2. School of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650093, Yunnan, China;

3. BaoShan Vocational College, Baoshan 678000, Yunnan, China)

Abstract: Rock body will generate signals with different frequencies under the impact of external loads. This paper monitors the stress wave signals before and after the rock body is subjected to transient impact loads through the fiber-optic monitoring system with homemade probes, and conducts time-frequency analysis of the experimental monitoring signals using the robust local mean decomposition (RLMD) method combined with the fast Fourier transform (FFT). After that, LS-DYNA software is used to simulate the impact load applied to the rock body and generate the stress wave, and the frequency of the stress wave is verified against the frequency of the experimentally monitored stress wave. Finally, the relationship between the simulated stress wave frequency change under the change of elastic modulus and density is analyzed. Results show that the signals monitored in the field will appear as multiple signals with great amplitude after spectral decomposition of 1 500–2 300 Hz after the impact is applied in the field, which is consistent with the simulation result of the time-frequency analysis of the stress wave in the main frequency signal of 2 203 Hz, and the opposite trend to the frequency change indicated by the one-dimensional planar stress wave derivation, which will be the next step of the research issue.

Keywords: time-frequency analysis; eigenfrequency; shock loading; vibration signals; fiber-optic sensing technology