高边坡爆破振动信号降噪方法及时频特征研究①

任李林[1], 黄宇[2], 曹庆彬[1], 何理[2], 齐刚宪[1], 赵永明[2], 蔡路军[2], 钟冬望[2], 李琳娜[2]
(1.中铁广州工程局集团市政环保工程有限公司, 陕西 西安 712000; 2.武汉科技大学 湖北省智能爆破工程技术研究中心, 湖北 武汉 430065)

摘 要: 针对高边坡爆破开挖过程中爆破振动信号易受噪声干扰、有效特征难以准确提取的问题,提出一种基于自适应噪声完备经验模态分解(CEEMDAN)与小波阈值联合的降噪方法,结合均值判比法、样本熵、相关系数对爆破振动信号进行预处理。通过仿真信号和实际爆破振动信号对所提方法进行验证。仿真结果表明,所提方法信噪比(SNR)达到 27.80 dB,均方根误差(RMSE)为 0.209 1,降噪性能优于其他 4 种方法。工程应用结果表明,该降噪方法能够有效抑制高频噪声,提高爆破振动信号时频分析的分辨率与稳定性。进一步分析发现,爆破振动信号主频主要集中于 10~60 Hz,能量集中分布于 16~125 Hz;滚石触地信号主频主要位于 40~720 Hz,频谱结构更为复杂,能量主要分布于 62~1 000 Hz。

关键词: 高边坡; 爆破振动; 爆破信号; 振动信号; CEEMDAN; 小波降噪; 信号降噪; 时频特征
中图分类号: TD235 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.004
文章编号: 0253-6099(2026)04-0027-09

Noise Reduction Method and Time-Frequency Characteristics of Blasting Vibration Signals for High Slopes

REN Lilin[1], HUANG Yu[2], CAO Qingbin[1], HE Li[2], QI Gangxian[1], ZHAO Yongming[2], CAI Lujun[2], ZHONG Dongwang[2], LI Linna[2]
(1.*China Railway Guangzhou Engineering Bureau Group Municipal & Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Xi'an* 712000, *Shaanxi*, *China*; 2.*Hubei Intelligent Blasting Engineering Technology Research Center*, *Wuhan University of Science and Technology*, *Wuhan* 430065, *Hubei* , *China*)

Abstract: When drilling and blasting are adopted for excavation of high slopes, blasting-induced vibration signals are susceptible to noise interference and their effective features are difficult to extract accurately, a noise reduction method based on complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) combined with wavelet threshold is proposed. Blasting vibration signals are reprocessed based on mean ratio (MR), sample entropy, and correlation coefficient. The proposed method is verified by simulated and field measured blasting vibration signals. The simulation results show that the signal-to-noise ratio (SNR) of the proposed method reaches 27.80 dB and the root-mean-square error (RMSE) is 0.209 1, presenting a superior noise-reduction performance compared to the other four methods. Engineering application results indicate that this proposed method can effectively suppress high-frequency noise and improve the resolution and stability of time-frequency analysis for blasting vibration signals. Further analysis reveals that the dominant frequency of blasting vibration signals is mainly within the range of 10-60 Hz with energy concentrated within 16-125 Hz; the dominant frequency of rockfall impact signals is mostly in the range of 40-720 Hz with more complex spectral structures, and its energy is mainly distributed in 62-1 000 Hz.

Key words: high slope; blasting-induced vibration signal; blasting signal; vibration signal; CEEMDAN; wavelet noise reduction; signal noise reduction; time-frequency characteristics

爆破作为一种高效的岩石开挖技术,广泛应用于高陡边坡开挖等工程中[1]。爆破过程中会产生爆破振动,易对周围环境及施工人员安全造成不利影响,因此开展爆破振动信号的深入研究具有重要工程意

① **收稿日期**: 2026-03-21
基金项目: 国家自然科学基金(52274136,51904210);湖北省自然科学基金(2024AFB766)
作者简介: 任李林(1996—),男,四川射洪人,高级工程师,从事爆破工程技术方面的研究。E-mail:1243954907@qq.com
通信作者: 黄宇(2002—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,从事智能爆破系统集成与控制研究。E-mail:3028944205@qq.com

义[2]。在实际爆破振动信号采集过程中,受监测环境影响,监测到的爆破信号通常受到如噪声、基线漂移等干扰,因此,需要对采集的振动信号进行去噪处理[3-4]。

针对爆破振动信号噪声干扰问题,已有研究主要采用经验模态分解(EMD)及其改进算法开展降噪处理。EMD将非平稳爆破振动信号自适应分解为多个本征模态函数(IMF)分量,实现噪声与有效信号的分离,但易产生模态混叠和端点效应,影响信号分解精度[5]。为进一步提高降噪性能,部分学者[6-7]将EMD类方法与小波阈值相结合,然而,上述方法尽管在缓解模态混叠和提高降噪性能方面取得了一定成效,但仍存在IMF分量识别准确性不足、有效信号与噪声分量难以准确区分,以及信号重构过程中部分有效信息易丢失等问题,难以兼顾噪声抑制能力与有效信号保留效果。

为此本文引入自适应噪声完备经验模态分解(CEEMDAN)与小波阈值联合降噪方法,结合相关系数、样本熵及均值判比法(MR)对IMF分量进行综合筛选,以提高爆破振动信号的降噪性能和特征保留能力。在此基础上,为满足高边坡爆破监测中复杂振动信号识别的需求,进一步开展爆破振动信号与滚石触地振动信号的识别研究,将所提出的方法应用于爆破振动信号与滚石触地振动信号的处理,对两类振动信号的时频特征进行对比研究。

1 CEEMDAN-小波阈值降噪流程

CEEMDAN-小波阈值降噪流程首先是基于经验模态分解方法(EMD),分解原始信号后,加入含有辅助噪声的模态分量,得到一阶模态分量,然后采用CEEMDAN进行整体平均计算,得到最终的一阶模态分量,并对残差部分重复上述操作。这有效地解决了噪声从高频到低频的传递问题[8]。

CEEMDAN-小波阈值降噪流程如图1所示。

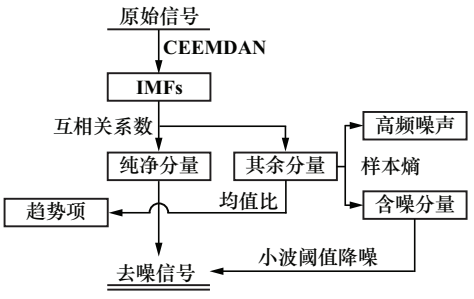


图1 降噪流程图

Fig. 1 Flowchart of noise reduction process

1) 基于CEEMDAN对振动信号进行模态分解,得到原始信号的模态分量IMFs。

2) 计算模态分量IMFs与原始信号的相关系数[9],保留相关系数高的模态分量,其计算公式如下:

$$r_i=\frac{\sum(c_i-\bar{c}_i)(v-\bar{v})}{\sqrt{\sum(c_i-\bar{c}_i)^2\sum(v-\bar{v})^2}} \tag{1}$$

式中:v为信号振速;c_i为第i个模态分量的振速;r_i为第i个模态分量对应的相关系数;$\bar{c}_i$和$\bar{v}$分别为模态分量和原始信号振速的平均值。

3) 使用均值判比法(MR)[10]确定趋势项分量。该方法能够对不同频段的信号进行有效尺度变换,在处理非线性、非平稳信号时具有较强的适应能力,其计算公式如下:

$$\begin{cases}E(v)=\dfrac{\sum_{k=1}^{L}v(t_k)}{L}\\ E(c_i)=\dfrac{\sum_{k=1}^{L}c_i(t_k)}{L},\quad i=1,2,\cdots,l\\ \xi_i=\dfrac{E(c_i)}{E(v)}\\ S=\sum_{i=1}^{l}\xi_i\end{cases} \tag{2}$$

式中:t_k为第k个采样点的时刻;L为信号长度;l为分解的模态数;$E(v)$为原始信号振速的均值;$E(c_i)$为第i个IMF分量的振速均值;ξ_i为第i个模态分量的均值比;S为累计均值比,通常设置阈值为0.95,当S<0.95时,继续累加,当达到阈值时停止计算。

4) 使用样本熵方法区分高频噪声与含噪分量,当时间序列越复杂、含有噪声分量越多时,样本熵越大。设置样本熵阈值p,样本熵超过阈值p的分量认定为噪声部分,低于阈值的分量划分为含噪分量。对于由N个数据组成的时间序列$\boldsymbol{X}=\{x(1),x(2),x(3),\cdots,x(N)\}$,样本熵的计算公式[11]如下:

$$\begin{cases}B_m(r)=\dfrac{1}{N-m}\sum_{i=1}^{N-m}B_{i,m}(r)\\ B_{m+1}(r)=\dfrac{1}{N-m}\sum_{i=1}^{N-m}B_{i,m+1}(r)\\ d[\boldsymbol{X}_m(i),\boldsymbol{X}_m(j)]=\max\limits_{k=0,1,\cdots,m-1}|x(i+k)-x(j+k)|\\ \mathrm{SE}(m,r,N)=-\ln\left(\dfrac{B_{m+1}(r)}{B_m(r)}\right)\end{cases} \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{X}_m$为一组m维的向量;d为$\boldsymbol{X}_m(i)$,$\boldsymbol{X}_m(j)$的距离;B_i为$d[\boldsymbol{X}_m(i),\boldsymbol{X}_m(j)]<r$中$j$的数量;$r$为给定容

差,本文选取 $m=1$,$r=0.2\sigma$[12];SE 为样本熵。

5) 对步骤 4)中筛选出的含噪分量进行小波阈值降噪[13-14],得到重构分量。最终,与步骤 2)中筛选出的相关系数高的分量叠加,得到去噪后的信号。

2　仿真信号分析

2.1　建立仿真信号

为验证所提出的降噪方法的有效性,构建仿真信号进行测试。基于 Python 构建采样频率为 4 000 Hz,采样长度为 8 000 的仿真信号 $x(t)$。考虑到高边坡爆破振动信号频率主要分布在 10~40 Hz[15],使用频率为 30 Hz 的低频振动信号 $x_1(t)$ 作为仿真信号的主要成分。由于爆破振动信号的非平稳性,在仿真信号中引入 0~60 Hz 的调幅、调频信号 $x_2(t)$。同时引入功率为 0.2 的高斯白噪声 $x_3(t)$ 模拟现场测量时普遍存在的噪声。在实际爆破振动测量中,通常包含多种类型的趋势项,使用复合趋势项 $R(t)$ 进行模拟[16]。构建的仿真信号的表达式与波形分别见式(4)和图 2。

$$\begin{cases} x(t)=x_1(t)+x_2(t)+x_3(t)+R(t) \\ x_1(t)=20\sin(60\pi t) \\ x_2(t)=2\sin(20\pi t)\cdot\sin(40\pi t) \\ R(t)=3\mathrm{e}^{-t}+0.01t^3+0.02t^2-1.5t+1 \end{cases} \tag{4}$$

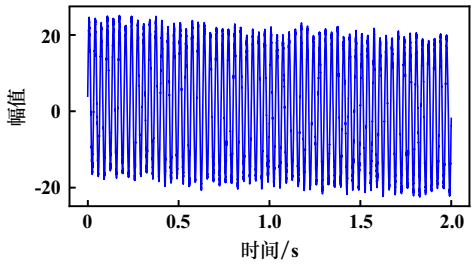


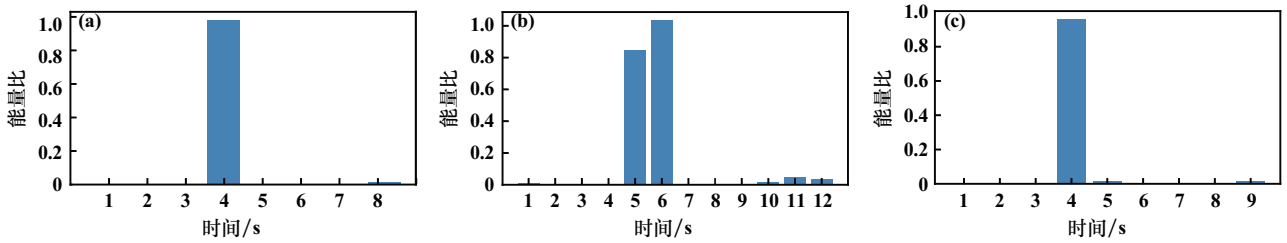
图 2　合成仿真信号

Fig. 2　Simulated signal

2.2　爆破振动信号仿真

使用 EMD、EEMD、CEEMDAN 将仿真信号进行分解,EMD 分解得到 8 个 IMF 分量;EEMD 分解得到 12 个 IMF 分量;CEEMDAN 分解得到 9 个 IMF 分量。分解得到的模态分量的能量占比结果如图 3 所示。采用 EEMD 得到的高频 IMF 分量能量占比相对较高,且主要分量优势不明显,而采用 EMD 和 CEEMDAN 得到的 IMF 分量有效改善了模态混叠和虚假模态现象。EMD 得到的分量 IMF4 能量占比达到 96.23%,CEEMDAN 得到的分量 IMF4 能量占比达到 98.49%,CEEMDAN 具有明显优势。

CEEMDAN 分解得到的 IMF 分量如图 4 所示,分别计算各 IMF 分量与仿真信号的相关系数,结果见表 1。



(a) EMD; (b) EEMD; (c) CEEMDAN

图 3　各模态能量占比

Fig. 3　Energy proportion of each mode

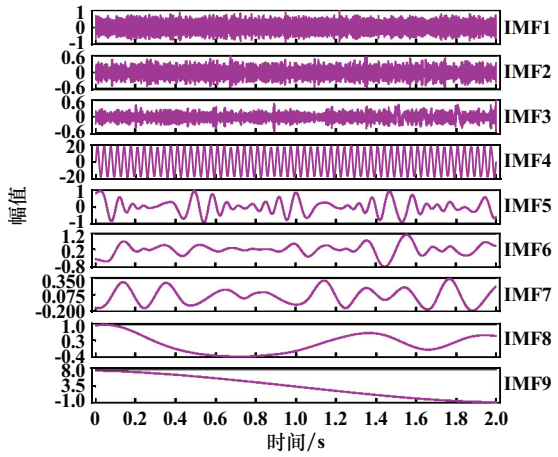


图 4　CEEMDAN 分解结果图

Fig. 4　CEEMDAN decomposition results

表 1　IMF 分量与仿真信号的相关系数

Table 1　Cross-correlation coefficients between IMF components and simulated signals

IMF 分量	相关系数
IMF1	0.023 5
IMF2	0.013 7
IMF3	0.237 4
IMF4	0.992 9
IMF5	0.026 2
IMF6	0.023 4
IMF7	0.018 1
IMF8	0.054 2
IMF9	0.107 0

结合图 4 和表 1 可知,分量 IMF1~IMF2 的相关系数较小,频率较高而幅值较低,初步判断为高频噪声。

分量 IMF3 的相关系数为 0.237 4,但其波形出现多峰值多频带的特征,需要进一步判定。分量 IMF4 的相关系数达到了 0.992 9,表明其为仿真信号的主要成分。分量 IMF5~IMF9 的相关系数较小,且频率较低,初步判断为趋势项。

为进一步确定信号中的高频噪声、含噪分量和趋势项,分别计算分量 IMF1~IMF9 样本熵,使用 MR 方法对分解模态进行趋势项分析。

CEEMDAN 得到的 IMF 分量的均值比计算结果如表 2 所示。CEEMDAN 得到的分量中,分量 IMF5~IMF9 为趋势项分量,在重构信号时应剔除。

表 2 均值比计算结果

Table 2 Calculation results of mean ratios

IMF 分量	均值比 ξ
IMF1	0.006 0
IMF2	0.007 0
IMF3	0.013 0
IMF4	0.982 6

计算分量的样本熵,结果如表 3 所示。分量 IMF1~IMF2 的样本熵远大于其他分量,将其归类于高频噪声分量。分量 IMF3 的样本熵为 0.570 4,相对小于分量 IMF1~IMF2 的样本熵,将其划分为含噪分量。

表 3 样本熵计算结果

Table 3 Calculation results of sample entropy

IMF 分量	样本熵
IMF1	1.346 4
IMF2	1.282 5
IMF3	0.570 4
IMF4	0.120 5
IMF5	0.043 6
IMF6	0.019 4
IMF7	0.004 2
IMF8	0.004 2
IMF9	0.000 7

由分析可得,分量 IMF1~IMF2 为高频噪声分量,分量 IMF3 为含噪分量,分量 IMF4 为信号主体,分量 IMF5~IMF9 为趋势项。信号重构过程将分量 IMF1~IMF2 与分量 IMF5~IMF9 剔除,对分量 IMF3 使用小波阈值降噪,将降噪后的信号与分量 IMF4 进行叠加得到降噪后的信号,降噪后的信号如图 5 所示。图 5 展示了剔除趋势项分量后的仿真信号与重构信号的波形,明显看出,相较于仿真信号,重构信号几乎消除了高频噪声和趋势项的影响,降噪效果显著。

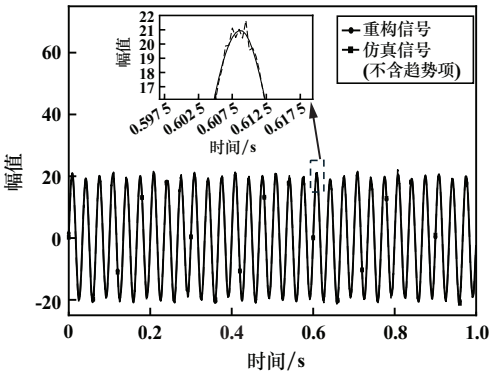


图 5 仿真信号降噪结果

Fig. 5 Denoising results of simulated signal

为体现 CEEMDAN-小波阈值法的优势,以均方根误差(RMSE)和信噪比(SNR)为降噪效果量化指标,分别对比 5 种预处理方法降噪效果,结果如表 4 所示。相较于其他 4 种方法,CEEMDAN-小波阈值降噪法重构信号的信噪比最高,均方根误差最低,表明该方法在信号预处理方面具有优势。

表 4 不同预处理方法评价指标对比

Table 4 Comparison of evaluation metrics for different reprocessing methods

预处理方法	SNR/dB	RMSE
EMD	24.57	0.289 5
EMD-小波阈值法	25.63	0.249 1
EEMD	25.82	0.253 3
CEEMDAN	25.84	0.224 9
CEEMDAN-小波阈值法	27.80	0.209 1

3 实测信号处理与分析

3.1 工程概况

某隧道施工,两侧岸坡陡峻,坡度达 30°~60°,地形高程 540~570 m,相对高差 20~30 m,地形起伏大,施工条件复杂。为保证施工安全和周边建筑物的稳定性,综合采取台阶深孔爆破与浅孔爆破相结合的方式,并辅以预留岩墙机械开挖,边坡采用预裂爆破技术。

现场采集两组边坡预裂爆破所产生的爆破振动信号,爆破现场测点如图 6 所示。

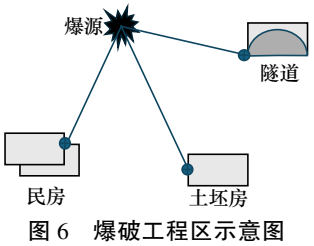


图 6 爆破工程区示意图

Fig. 6 Schematic of blasting engineering area

边坡炮孔采用垂直孔形式,两组爆破施工的起爆网路设计相同,第 2 组数码电子雷管逐孔起爆网路如图 7 所示,爆破具体参数如表 5 所示。

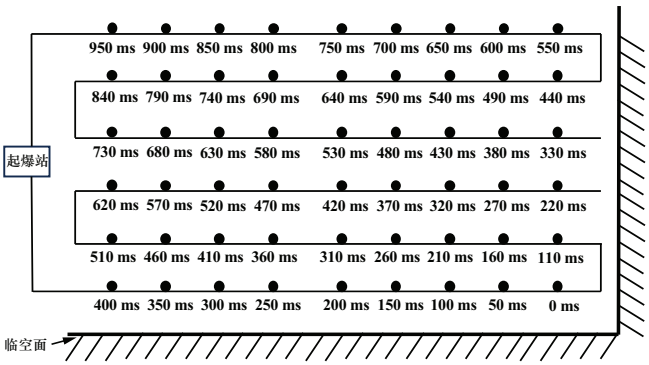


图 7　第 2 组爆破施工起爆网路

Fig. 7　Initiation network of the second blasting construction group

表 5　爆破参数设计

Table 5　Design of blasting parameters

组别	总药量/kg	单段最大药量/kg	单孔药量 Q/kg	孔径/m
第 1 组	852	24	14~24	0.09
第 2 组	1 420	28	24~28	0.09

组别	孔深/m	孔距/m	排距/m	孔数/个	台阶高度 H/m
第 1 组	8	3	3	63	5.5
第 2 组	9	3	3	54	8.0

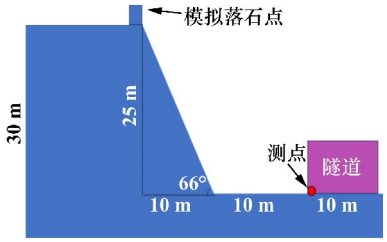
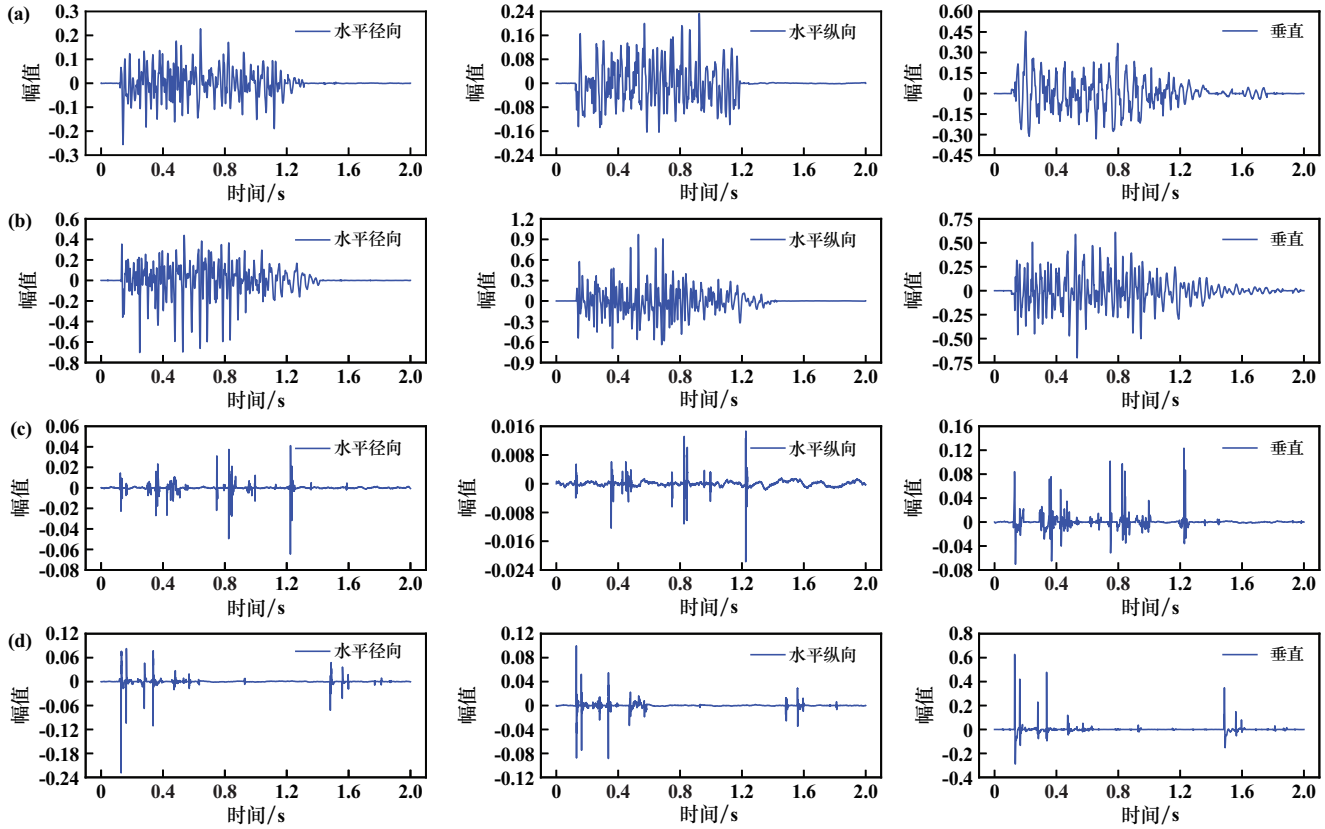


图 8　滚石实验示意图

Fig. 8　Schematic of rockfall experiment

为获取滚石触地过程的振动信号特征,设计了模拟滚石冲击实验,并于爆破作业完成后实施。该实验在实际爆破作业区的右侧边缘布设,如图 8 所示,该区域具备代表性的地质结构,且远离居民区。进行 6 组实验,通过人工控制滚石从一定高度自然释放,与地面发生自然碰撞,模拟高边坡开挖爆破工作中岩块滚落过程中的触地事件。使用测振仪记录振动信号,选取两组具有代表性的振动数据作为高边坡开挖爆破滚石触地的样本,用于与爆破振动信号进行时频特征的对比分析。各类振动信号如图 9 所示,其中图 9(c)、(d)分别为 50、100 kg 滚石自然从边坡落下产生的振动信号。



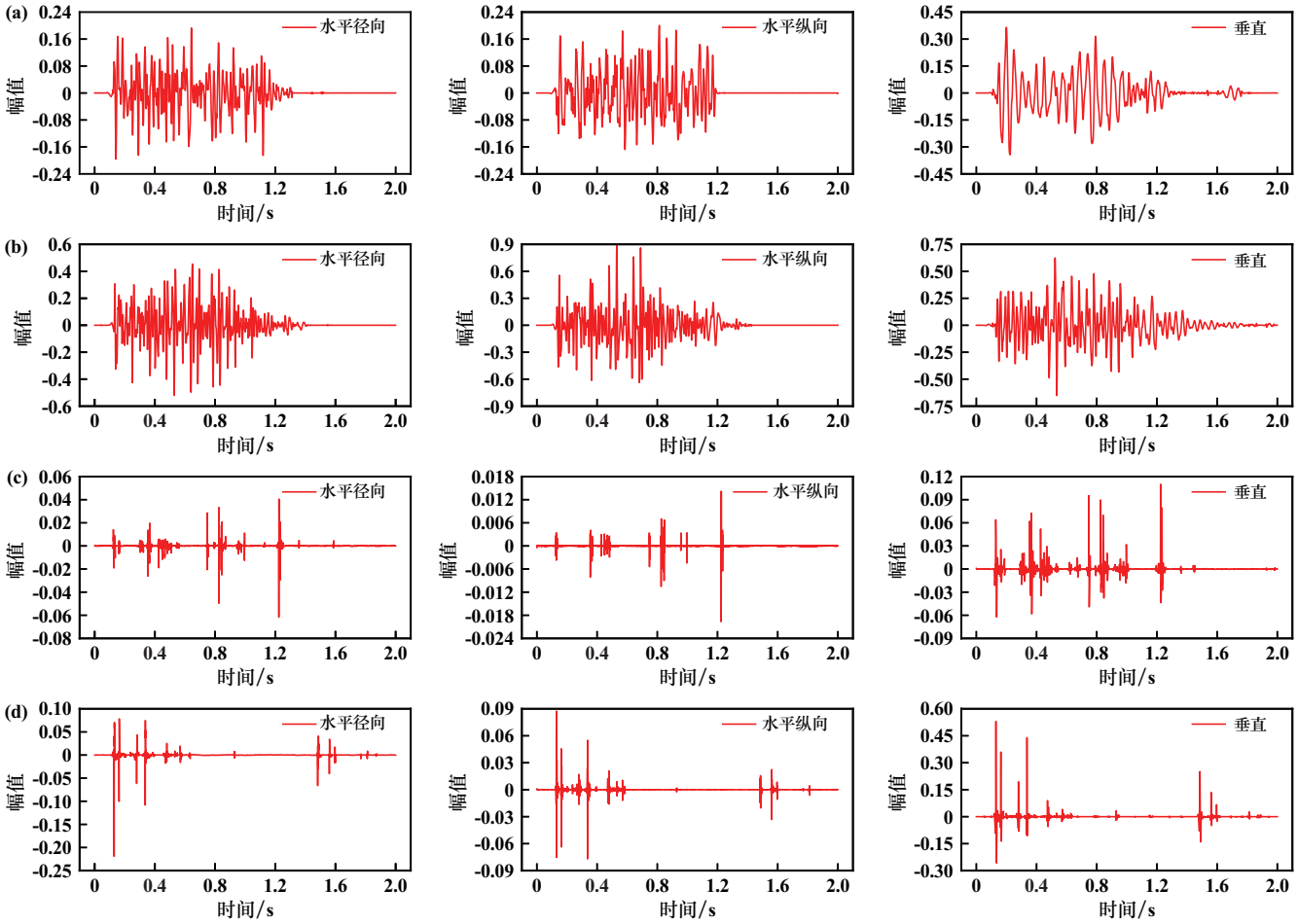
(a) 第 1 组爆破振动信号;(b) 第 2 组爆破振动信号;(c) 第 1 组滚石触地振动信号;(d) 第 2 组滚石触地振动信号

图 9　振动信号速度(单位:cm/s)

Fig. 9　Velocities of vibration signals

针对 2 种振动信号,使用本文构建的方法对实测信号进行处理,结果如图 10 所示。经过预处理的爆破振动信号和滚石触地振动信号整体形态恢复正常,波形沿基线中心近似对称分布,滚石触地振动信号去趋势项效果更为明显。预处理后的信号得到了更为准确的峰值振速。信号经过预处理后,在保持局部波形特征和去除趋势性干扰的基础上,消除了原始信号中的高频噪声干扰成分,为后续的时频分析奠定了基础。

由图 10 可见,同组爆破振动信号的三向分量振幅较为接近;而滚石触地振动信号中,垂向分量振幅显著高于水平径向与纵向。第 1 组爆破振动信号的最大振速峰值分别为 0.196 1、0.200 4、0.365 4 cm/s,第 2 组爆破振动信号的最大振速峰值分别为0.519 6、0.891 9、0.652 1 cm/s,第 1 组滚石触地振动信号的最大振速峰值分别为 0.061 6、0.019 6、0.110 0 cm/s,第 2 组分别为 0.219 2、0.087 3、0.530 0 cm/s。



(a) 第 1 组爆破振动信号;(b) 第 2 组爆破振动信号;(c) 第 1 组滚石触地振动信号;(d) 第 2 组滚石触地振动信号

图 10 处理后的爆破振动信号速度(单位:cm/s)

Fig. 10 Velocities of processed vibration signals

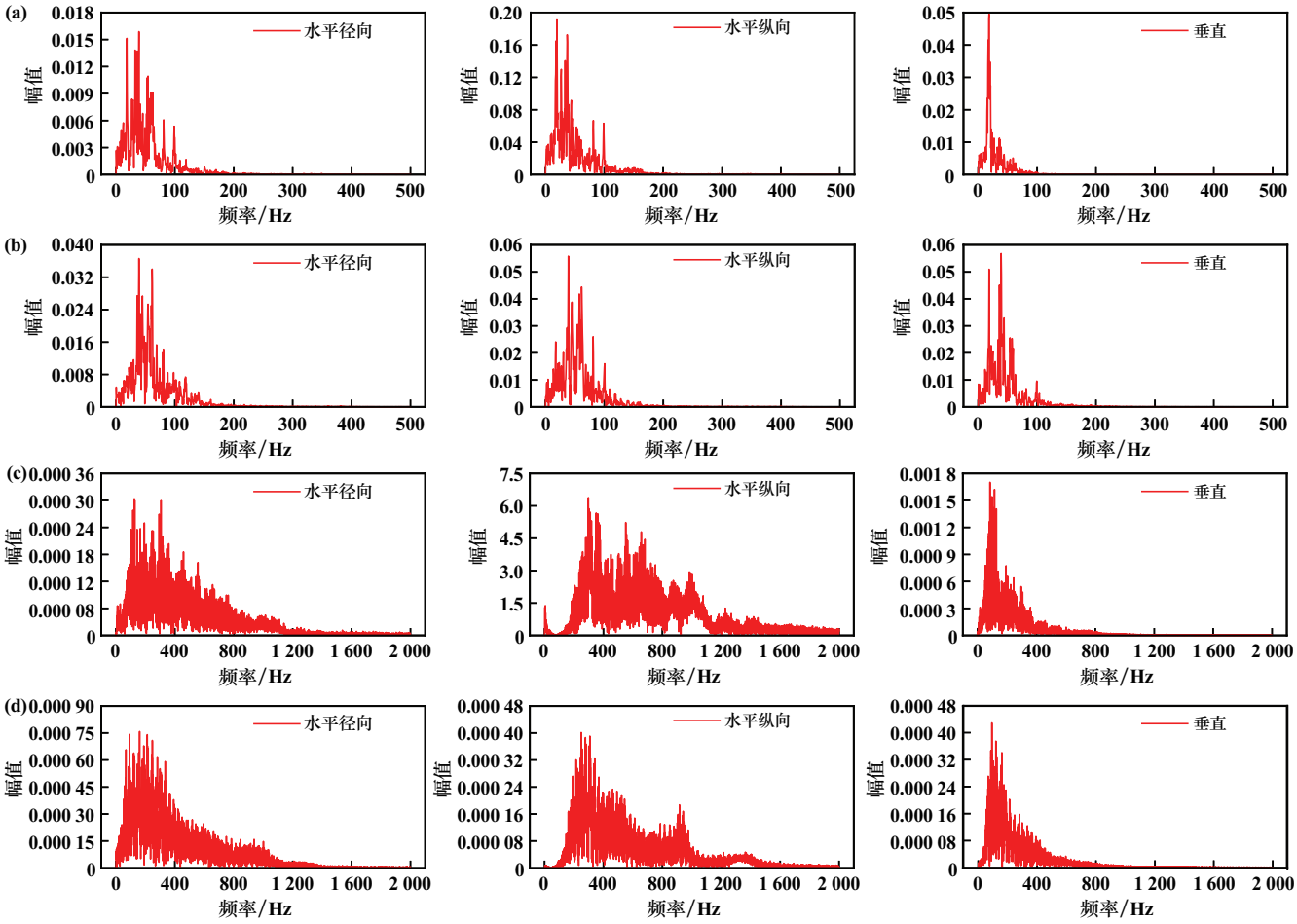
3.2 振动信号时频分析

为提升爆破振动监测的精度,减小滚石信号干扰,本文对爆破振动信号与滚石触地振动信号在时频域特征及能量频带分布方面进行了系统对比分析。

FFT 频谱图如图 11 所示。从图 11 可知,爆破振动信号的频带宽度普遍小于滚石触地振动信号,主频分布也相对集中。爆破振动信号主频主要集中在 10~60 Hz 范围内,第 1 组主频分别为 39.00、19.50、18.50 Hz,第 2 组均为 39.00 Hz。相比之下,滚石触地振动信号频谱更为复杂,缺乏明显主频聚集,频率成分波动大,变化无规律。第 1 组滚石主频分别为 127.98、297.81、84.17 Hz,第 2 组滚石主频分别为 160.93、249.08、93.03 Hz。

由于滚石触地振动信号垂向振速比水平向振速更大,以 4 组垂直振动信号为例,进行 HHT 分析。图 12 和图 13 分别是 Hilbert 谱和边际谱。从图 12 可以看出,2 种信号均具有明显的非平稳性特征。在时间维度上,爆破振动信号振幅较高,部分呈现出较长的持续时间,0~1.5 s 内,信号于 0~120 Hz 保持持续的能量分布;观察滚石触地振动信号的 Hilbert 谱,滚石撞击

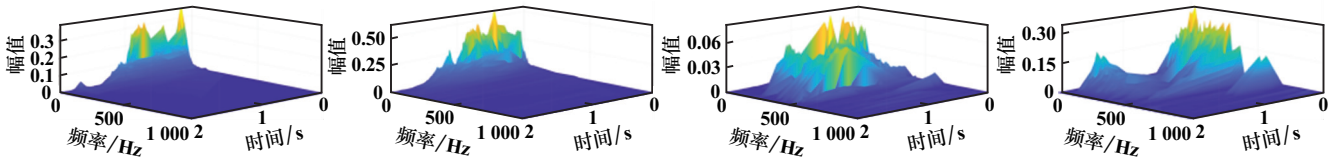
地面时,滚石触地振动信号频率分布在 40~720 Hz,信号能量在极短时间内急剧释放,形成高频脉冲,这是由于冲击作用的瞬时性,能量无法持续供给,能量迅速耗散,难以形成持续的振动信号。



(a) 第 1 组爆破振动信号;(b) 第 2 组爆破振动信号;(c) 第 1 组滚石触地振动信号;(d) 第 2 组滚石触地振动信号

图 11　FFT 频谱图

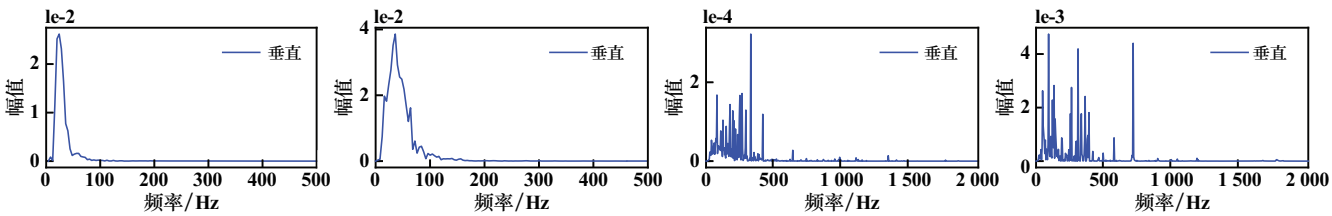
Fig. 11　FFT spectra



(a) 第 1 组爆破振动信号;(b) 第 2 组爆破振动信号;(c) 第 1 组滚石触地振动信号;(d) 第 2 组滚石触地振动信号

图 12　Hilbert 谱

Fig. 12　Hilbert spectra



(a) 第 1 组爆破振动信号;(b) 第 2 组爆破振动信号;(c) 第 1 组滚石触地振动信号;(d) 第 2 组滚石触地振动信号

图 13　边际谱

Fig. 13　Marginal spectra

由图 13 可知,爆破振动信号的边际能量主要集中在低频段,峰值幅度较高且峰值数量较少;滚石触地振动信号能量较低,频率分布广泛,具有多个中高频能量峰值。

采用小波包分析研究振动信号的能量分布特征,分解的层数视具体信号及采用的爆破振动记录仪的工作频率而定。根据采样定理,信号采样频率设为 4 000 Hz,则其奈奎斯特频率为 2 000 Hz。采用 db8 小波基将信号进行 9 层分解,得到 10 个频带 0~4 Hz、4~8 Hz、8~16 Hz、16~31 Hz、31~62 Hz、62~125 Hz、125~250 Hz、250~500 Hz、500~1 000 Hz、1 000~2 000 Hz 的分解系数,将不同频带的分解系数重构,计算出各频段的能量比,将得到的结果分别求取平均值,计算结果如图 14 所示。

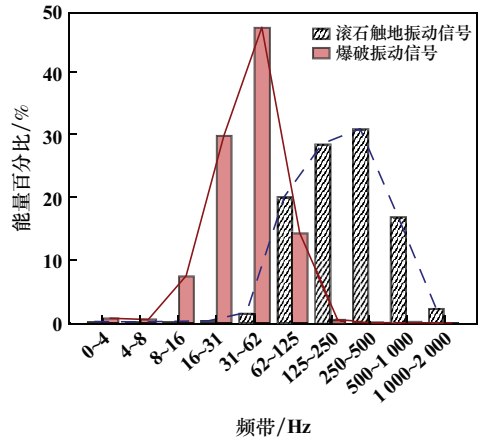


图 14 振动信号各频带能量占比

Fig. 14 Energy proportion of each frequency band of vibration signals

滚石触地振动信号的频带能量分布较为分散,主要集中在 62~1 000 Hz 范围内,平均累计能量占比达到 95.81%;而爆破振动信号的频带能量相对集中,主要分布在 16~125 Hz,平均累计能量占比高达90.79%。这表明,预裂爆破产生的振动信号能量主要集中在中低频段,滚石触地过程所产生的振动信号能量主要集中在中高频段。两类信号主要在 62~125 Hz 频段存在一定的能量分布重叠,但整体频率特性存在明显差异。

4 结论

1) 基于相关系数、样本熵和 MR 方法构建的 IMF 分量识别方法能够准确区分噪声分量、含噪分量和趋势项分量,并结合 CEEMDAN-小波阈值法完成信号重构。在仿真信号和实测振动信号的去噪过程中,该方法能够有效抑制基线漂移和噪声毛刺现象。

2) 对去噪后的 2 种振动信号进行波形和频谱图对比,可以发现爆破振动信号频谱更为集中,主频为 10~60 Hz,滚石触地振动信号频谱分布较为分散,主频为 40~720 Hz。滚石触地在发生碰撞的瞬间产生高幅冲击,随后快速衰减为背景噪声水平。

3) 基于 HHT 和小波包能谱分析,爆破振动信号与滚石振动信号在能量分布上存在明显差异。爆破振动信号 16~125 Hz 频带能量占比达 90.79%,滚石触地振动信号 62~1 000 Hz 频带能量占比达 95.81%。两类振动信号主要在 62~125 Hz 频带能量分布存在一定重叠。

参考文献(References):

[1] 刘一伟,刘岗,宋亚东,等. 既有铁路高边坡扩堑开挖精细控制爆破技术研究[J]. 工程爆破, 2024,30(6):56-61.
Liu Yiwei, Liu Gang, Song Yadong, et al. Controlled blasting technology for high slope excavation in existing railway expansion[J]. Engineering Blasting, 2024,30(6):56-61.

[2] 孙鹏昌. 城区单薄山体岩石高边坡爆破振动高程效应研究[J]. 工程爆破, 2024,30(3):152-159.
Sun Pengchang. Altitude effect of blasting vibration on high rock slope belonging to thin mountain in urban area[J]. Engineering Blasting, 2024,30(3):152-159.

[3] 申宇宙,张云鹏,马海越. 基于 ITD - *K*-means - 小波包法的爆破振动信号降噪研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):44-50.
Shen Yuzhou, Zhang Yunpeng, Ma Haiyue. Noise reduction of blasting vibration signal based on ITD - *K*-means - wavelet packet method[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):44-50.

[4] 黄港,郑禄林,王英乐,等. 基于 ICEEMDAN-盲源分离联合的微震信号降噪方法研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):24-29.
Huang Gang, Zheng Lulin, Wang Yingle, et al. Research on microseismic signal denoising based on ICEEMDAN and blind source separation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(3):24-29.

[5] 吴礼军,徐文彬. 邻近高陡边坡采矿爆破振动规律及边坡稳定性分析[J]. 工程爆破, 2022,28(4):113-119.
Wu Lijun, Xu Wenbin. Analysis of blasting vibration law and slope stability in mining near high and steep slope[J]. Engineering Blasting, 2022,28(4):113-119.

[6] 梁阿全,高双玲,郑嘉祺,等. 基于 EEMD 和小波阈值方法的爆破数据预处理[J]. 地震地磁观测与研究, 2024,45(3):55-62.
Liang Aquan, Gao Shuangling, Zheng Jiaqi, et al. Study on blasting data processing based on EEMD and wavelet threshold method[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2024, 45(3):55-62.

[7] 闫鹏,张云鹏,周倩倩,等. 基于改进 EMD 的爆破振动信号降噪方法研究[J]. 振动与冲击, 2025,44(1):212-220.
Yan Peng, Zhang Yunpeng, Zhou Qianqian, et al. A denoising method for blasting vibration signals based on improved EMD[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025,44(1):212-220.

[8] 孙苗,吴立,杨钧凯. 基于 CEEMDAN-INHT 的地下洞室爆破振动

时频分析应用研究[J]. 爆破, 2024,41(1):14-20.
Sun Miao, Wu Li, Yang Junkai. Application of time-frequency analysis of blasting vibration of underground cavern based on CEEMDAN-INHT[J]. Blasting, 2024,41(1):14-20.

[9] 宋青波,柏皓博,王海龙,等. 基于 CEEMDAN-交叉小波变换的爆破延时识别[J]. 工程爆破, 2023,29(2):10-16.
Song Qingbo, Bai Haobo, Wang Hailong, et al. Recognition of blasting delay time based on CEEMDAN-cross wavelet transform[J]. Engineering Blasting, 2023,29(2):10-16.

[10] 李晨,梁书锋,刘传鹏,等. 基于改进的集合经验模态分解的爆破振动信号趋势项消除方法[J]. 北京理工大学学报, 2021,41(6):636-641.
Li Chen, Liang Shufeng, Liu Chuanpeng, et al. Trend removing method of blasting vibration signals based on MEEMD[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021,41(6):636-641.

[11] 曲春刚,朱胜翔,冯正兴. CEEMDAN-SE-WT 降噪方法在航空发动机燃油流量信号中的应用[J]. 科学技术与工程, 2024,24(15):6525-6533.
Qu Chungang, Zhu Shengxiang, Feng Zhengxing. Application of denoising method on aviation engine fuel flow signal based on CEEMDAN-SE-WT[J]. Science Technology and Engineering, 2024,24(15):6525-6533.

[12] 刘嘉辉,秦仙蓉,王玉龙,等. 基于双树复小波变换与样本熵的自适应降噪法[J]. 振动、测试与诊断, 2022,42(2):285-291.
Liu Jiahui, Qin Xianrong, Wang Yulong, et al. Adaptive denoising of monitoring signal based on dual-tree complex wavelet transform and sample entropy[J]. Vibration, Testing and Diagnosis, 2022,42(2):285-291.

[13] 郭航伸,郭连军,杨巍,等. 改进的局部均值分解法在爆破振动去噪中的应用[J]. 工程爆破, 2021,27(6):32-38.
Guo Hangshen, Guo Lianjun, Yang Wei, et al. Application of improved local mean decomposition in blasting vibration denoising[J]. Engineering Blasting, 2021,27(6):32-38.

[14] 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]. 爆破, 2022,39(3):41-47.
Fei Honglu, Shan Jie. Application of CEEMDAN and wavelet threshold method in blasting vibration signal processing[J]. Blasting, 2022,39(03):41-47.

[15] 李祥龙,余林,黄原明,等. 基于 VMD-HHT 的井下预裂爆破振动效应分析[J]. 黄金科学技术, 2024,32(3):501-510.
Li Xianglong, Yu Lin, Huang Yuanming, et al. Vibration effect analysis of downhole pre-splitting blasting based on VMD-HHT[J]. Gold Science and Technology, 2024,32(3):501-510.

[16] 刘志龙,张祚富,盖俊鹏,等. 基于改进 RLMD 的爆破振动信号去趋势方法[J]. 爆破器材, 2025,54(3):48-56.
Liu Zhilong, Zhang Zuofu, Gai Junpeng, et al. Detrending method of blasting vibration signals based on improved RLMD[J]. Explosive Materials, 2025,54(3):48-56.

引用本文:任李林,黄宇,曹庆彬,等. 高边坡爆破振动信号降噪方法及时频特征研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):27-35.
Ren Lilin, Huang Yu, Cao Qingbin, et al. Noise reduction method and time-frequency characteristics of blasting vibration signals for high slopes[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):27-35.

(上接第 26 页)

[24] 冯豪天,陈俊智,任春芳,等. 数值试验中胶结结构面参数标定方法的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022,18(6):1824-1833.
Feng Haotian, Chen Junzhi, Ren Chunfang, et al. Numerical experiments of cementation structure surface parameter calibration method research[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2022,19(6):1824-1833.

[25] Zhou T, Zhu J B, Ju Y, et al. Volumetric fracturing behavior of 3D printed artificial rocks containing single and double 3D internal flaws under static uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019,205:190-204.

[26] Luo P K, Li D Y, Zhou A H, et al. Influence of bedding plane on the tensile properties and crack propagation of soft and hard laminated rock-like under Brazilian test[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023,127:104087.

[27] 汤双臣,冯鹏,赵家琛. 含交叉裂隙岩石试样单轴力学特性与破坏机理[J]. 地下空间与工程学报, 2021,17(5):1376-1383.
Tang Shuangchen, Feng Peng, Zhao Jiachen. Uniaxial mechanical properties and failure mechanism of rock specimens containing cross fissures[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021,17(5):1376-1383.

[28] 张国凯,李海波,夏祥,等. 岩石单轴压缩下能量与损伤演化规律研究[J]. 岩土力学, 2015,36(增刊 1):94-100.
Zhang Guokai, Li Haibo, Xia Xiang, et al. Research on energy and damage evolution of rock under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(增刊 1):94-100.

[29] 谢和平,鞠杨,黎立云,等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008,27(9):1729-1740.
Xie Heping, Ju Yang, Li Liyun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(9):1729-1740.

[30] Itasca Consulting Group Inc. PFC 6.0 documentation, user's guide[M]. Minneapolis, MN, USA, 2019.

引用本文:何昌耀,陈俊智,任春芳. 不同角度交叉裂纹岩石劈裂力学性能的颗粒流模拟[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):16-26.
He Changyao, Chen Junzhi, Ren Chunfang. Particle flow simulation of splitting mechanical properties of rock with cross-cracks at different angles[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):16-26.