

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.031

基于 EMD-SVD 与脊线特征的盲炮智能识别方法*

张建华, 罗干, 黄刚, 姜苏宸, 张博洋, 梁伟韬

(武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070)

摘要: 盲炮是矿山爆破作业中的重大安全隐患,其精准、快速识别对保障矿山安全生产至关重要。针对矿山复杂环境振动信号信噪比低、盲炮特征微弱且易被噪声淹没的难题,提出一种先基于经验模态分解-奇异值降噪(EMD-SVD)提取信号特征,后运用小波脊线分时间段分析识别盲炮的矿山振动信号特征提取与识别方法,用于盲炮智能监测。依托渭南某金属矿山爆破工程实例,能够有效识别盲炮事件,克服了传统方法在强噪声背景下识别精度不足的问题。实际矿山振动信号分析结果表明:该方法具有抗噪能力强、特征提取精准、识别可靠性高的优势,为矿山盲炮的实时、智能监测提供了一种新的有效技术途径。

关键词: 爆破振动信号; 盲炮智能监测; 经验模态分解; 奇异值分解; 小波脊线

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)03-0305-10

Intelligent Identification Method for Misfires based on EMD-SVD and Ridge Features

ZHANG Jian-hua, LUO Gan, HUANG Gang, JIANG Su-chen, ZHANG Bo-yang, LIANG Wei-tao

(School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University
of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Misfire incidents present substantial safety risks in mine blasting operations, making their precise and timely detection critical for operational safety. To address the challenges of low signal-to-noise ratios in complex mine vibration signals and subtle misfires often obscured by noise, this study develops a vibration signal processing method. The approach combines Empirical Mode Decomposition-singular Value Denoising (EMD-SVD) for primary feature extraction with time-segmented wavelet ridge analysis for misfire identification. Applied to a blasting operation case study at a Weinan metal mine, this method successfully identifies misfire events while overcoming the inadequate recognition accuracy of traditional methods in high-noise environments. Field vibration signal analysis confirms the method's exceptional noise immunity, accurate feature identification, and reliable detection performance, establishing a novel technical solution for real-time intelligent misfire monitoring in mining operations.

Key words: blasting vibration signals; intelligent misfire monitoring; empirical mode decomposition; singular value denoising; wavelet ridge

收稿日期 (Date of reception): 2025-11-19

网络首发日期 (Published online): 2026-09-15

作者简介: 张建华 (1963-), 男, 陕西省渭南人, 博士、教授、博导, 从事采矿、爆破、安全等方面的教学与研究工作, (E-mail) zjhwut@sina.com。

通信作者: 黄刚 (1986-), 男, 湖北省黄冈人, 副教授、博士、硕导, 从事采矿、爆破、安全等方面的教学与研究工作, (E-mail) huanggang2016@whut.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (No. 52109165)

About the author: ZHANG Jian-hua (1963-), male, born in Weinan city, Shaanxi province, Ph. D, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in on mining, blasting, and safety in both teaching and academic work, (E-mail) zjhwut@sina.com.

Corresponding author: HUANG Gang (1986-), male, born in Huanggang city, Hubei province, Ph. D, associate professor, master's supervisor, mainly engaged in mining, blasting, and safety in both teaching and academic work, (E-mail) huanggang2016@whut.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (52109165)

爆破振动信号分析是矿业、岩土等工程领域用以研究爆破地震效应的有效手段。在爆破振动信号的现场采集过程中,由于爆破区域地形地质条件的复杂、监测仪器的误差、振动传播介质的反射以及磁场的干扰等原因,采集的原始爆破振动信号常常会掺杂大量的噪声,从而导致信号失真,对爆破振动信号的进一步分析产生一定的负面作用。因此,进行爆破振动信号识别与降噪处理十分必要^[1]。特别是采矿工程中的冲击地压、盲炮事件和水力压裂等灾害监测方面,应用日益广泛。然而,复杂的矿山现场环境导致其爆破振动监测数据,环境导致其爆破振动监测数据,尤其是盲炮信号,常包含显著的复合非周期性背景干扰,这有别于常规机械振动,使得依赖传统时域或频域分析的有效降噪难以实现^[2]。李洪超等针对爆破振动信号受环境噪声干扰严重的问题^[3,4],提出一种基于周期变异海鸥优化算法(seagull optimization algorithm, SOA)逐次变分模态分解(successive variational modal decomposition, SVMD)参数的降噪方法。以及一种结合人工原生动物优化器(artificial optimizer, APO)算法、变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)和小波阈值的去噪方法,闫鹏等针对经验模态分解(EMD)算法存在端点效应和降噪效果不佳的问题^[5],依据延拓-分解-聚类-降噪-重构思想,提出了改进 EMD 的爆破振动信号降噪方法。叶海旺等为从监测信号中获得真实的隧道爆破振动信号^[6],引入一种基于变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)及能量熵的隧道爆破振动信号降噪方法。马荣增等提出了一种基于鱼鹰优化算法(OOA)优化变分模态分解(VMD)的信号分解算法^[7]。贾皓琦等提出了基于自适应 WOA-VMD-MPE 爆破振动信号降噪方法^[8]。张文涛等构建了 ICEEMDAN 算法联合改进小波阈值法的消噪方法^[9]。孙冰等提出了 FSWT 与 FDM 耦合的爆破振动信号 FSWT-FDM 分解方法^[10]。

现有的各种降噪方法在处理矿山复杂干扰背景下的振动信号时,均存在一定的局限性,核心挑战在于如何有效分离非平稳、非线性有效信号与复杂背景噪声,同时保留关键信号特征。基于上述分析以及众多降噪与识别方法,本文聚焦矿山爆破振动信号中盲炮特征的辨识需求,针对现有方法在强噪环境下微弱特征提取的不足,提出一种经验模态分解-奇异值降噪(EMD-SVD)与小波脊线分析的创新框架:EMD-SVD 降噪层:通过互补噪声注入与自适应 SVD 阈值筛选,精准分离有效 IMF 分量与复杂噪

声;小波脊线特征提取层:对降噪信号进行高分辨率时频分析,提取能量聚集轨迹与瞬时频率演化特征;盲炮智能识别:通过追踪小波脊线形态差异,建立正常爆破与盲炮的定量区分准则。实例验证表明,该方法可显著提升特征信噪比,为盲炮智能监测提供可靠依据。

1 EMD-SVD 联合降噪

图 1 为陕西省某矿山实测典型微差爆破振动信号速度-时程曲线。其主振频率为 23.8 Hz,最大振速为 1.0428 cm/s,采样频率 10 kHz,采样时间长度为 2.1 s,具有爆破振动信号随机和非线性的典型特征。对此信号进行 EMD-SVD 联合降噪以实现爆破特征时刻的精准提取。

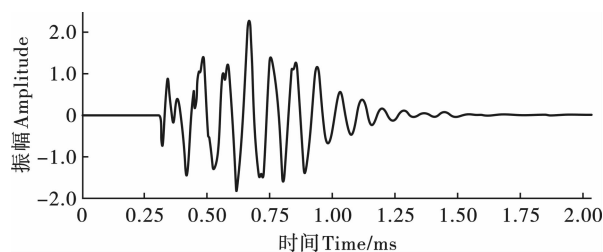


图 1 爆破振动信号

Fig. 1 Blasting vibration signal

1.1 EMD 降噪

EMD 是一种自适应的分解方法,广泛应用于分析非线性、非平稳信号。其实质是将复杂信号分解为有限个相互独立的本征模态函数(IMF)分量,这些 IMF 分量具有差异不大的极限值和过零点,并且每两个相邻的过零点之间存在一个极值点,其上下包络线关于时间轴局部对称^[11]。将图 1 中爆破振动信号进行 EMD 分解,得到 8 个 IMF 分量和一个周期趋于无穷的残差。图 2 为图 1 原始信号及其 EMD 分解得到的 IMF 分量。可以看出:EMD 分解具有二进滤波特征,在依次排列的 IMF 分量中,前面几个是高频分量,通常随机噪声包含其中。

为了确定信号的关键分量,采用互相关性指标来客观评价 IMF 分量与原信号的相关度,通过选取关键分量筛选出明显噪音。表 1 为图 1 中爆破振动信号 EMD 分解得到的除残差分量外 8 个 IMF 分量与原信号的互相关系数。

从表 1 可知,IMF₃ 和 IMF₄ 分量与原信号的互相关系数远大于其余高阶和低阶 IMF 分量的互相关系数,可确定为信号的关键分量。IMF₁ 与 IMF₂ 也有一定的相关性,因此,这里选择这几阶分量作为重组 IMF 分量,将其合成得到爆破振动特征信号如

图 3。可以看出:关键 IMF 分量重构的信号幅值显著减小,但多段别雷管微差爆破振动波形态清晰出现。去噪后的爆破振动信号相对光滑,且局部奇异性更易辨识。

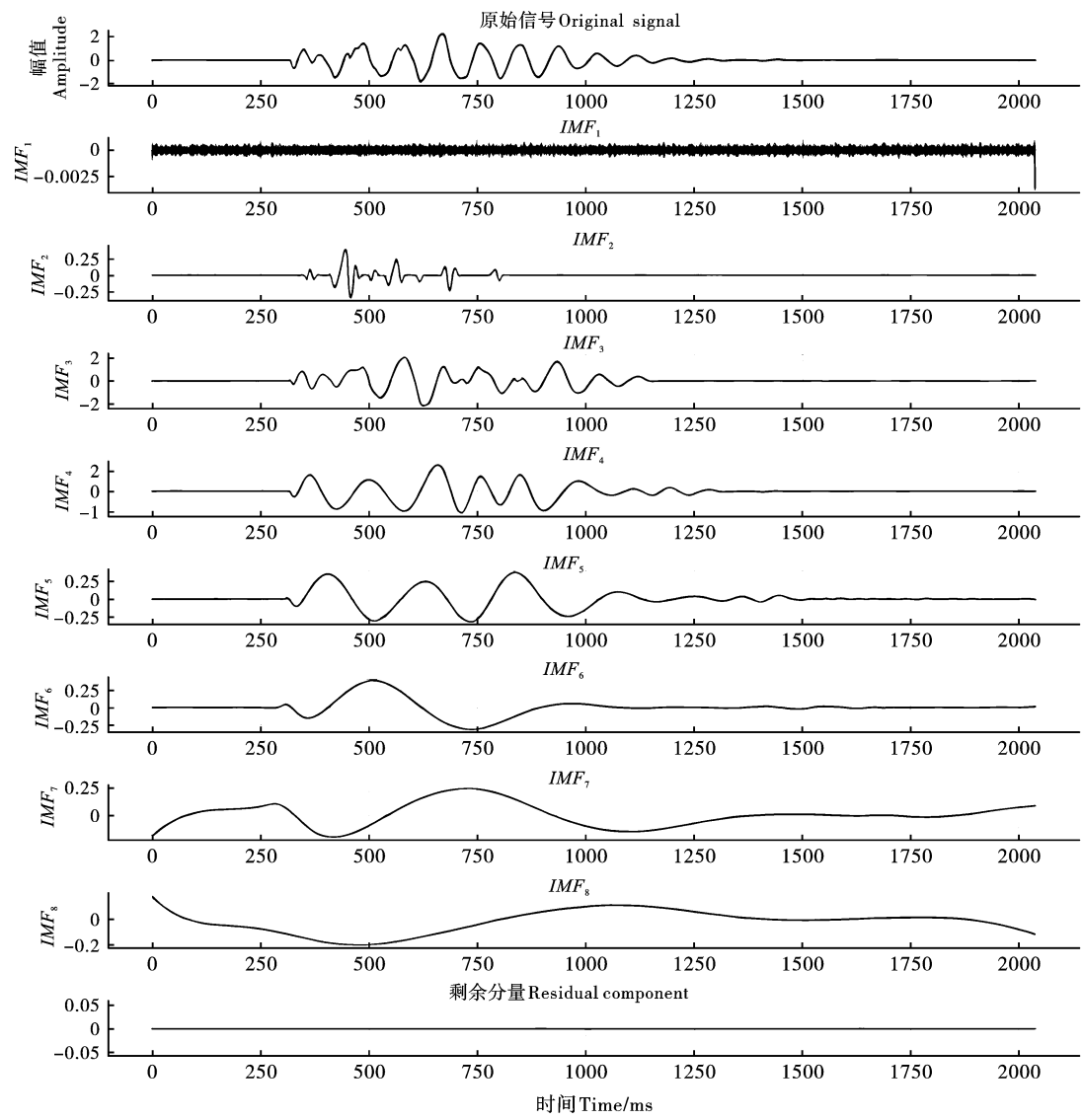


图 2 EMD 分解结果

Fig. 2 EMD decomposition results

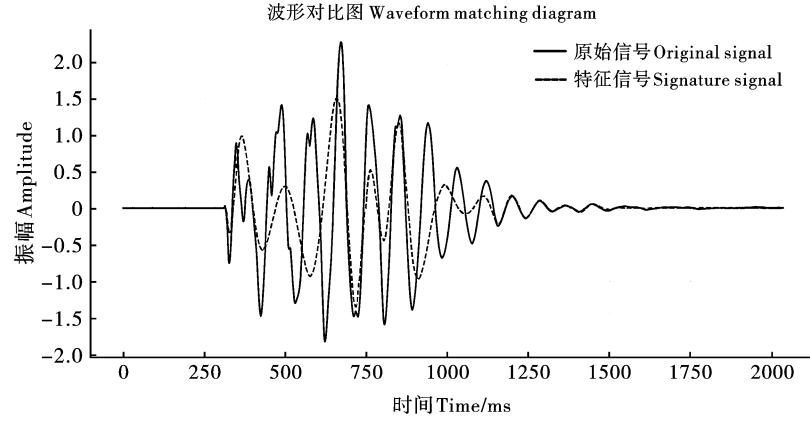


图 3 波形对比图

Fig. 3 Waveform matching diagram

表 1 各 IMF 分量与原信号的互相关性

Table 1 Cross-correlation between each IMF component and the original signal

IMF	1	2	3	4	5	6	7	8
相关性系数 Correlation coefficient	0.5018	0.3935	0.8427	0.7514	0.0289	0.0561	0.0099	0.0125

1.2 SVD 降噪

奇异值分解(SVD)是一种矩阵分解技术,根据其分解理论,将微震波形一维时间序列进行重构,可获得 $m \times n$ 阶矩阵 P 。 P 矩阵可表示为

$$P = [IMF_1, IMF_2, \dots, IMF_m]^T \quad (1)$$

式中: IMF_1 可表示为 $\{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}\}$, 其中 n 为测量的波形数据真实 IMF 分量的个数。对矩阵 P 进行奇异值分解,可得到 $m \times m$ 、 $n \times n$ 和 $m \times n$ 阶对角矩阵 U 、 V^T 和 S ,三者之间的关系可表述为

$$P = USV^T = \sum_{i=1}^k \sigma_i u_i v_i^T \quad (2)$$

式中: $U \in R^{m \times n}$ 、 $V^T \in R^{n \times n}$ 分别表示左、右奇异矩阵;矩阵 P 的秩为 $k [k \leq \min(m, n)]$,一般地, m

远小于 n ; 对角矩阵 $S = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k)$, 对角线元素 $\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k\}$ 为矩阵 P 的奇异值,其中 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_k > 0$; u_i 、 v_i 分别为方阵 PP^T 和 P^TP 的第 i 个特征向量。

本文选择 $IMF_1 \sim IMF_4$ 分量构建特征矩阵 $P [Z, T, S, \dots]$, 利用 C-C 法以及通过多次试验对可知, 当时间延迟 $z=8$ 时自相关系数为最小值。进而由 Takens 定理可以计算出嵌入维数 $m=10$, 即可构建出进行 SVD 将要分解的 Hankel 矩阵。对 Hankel 矩阵进行 SVD 分解, 由信号个数的奇偶性确立分解阶数后, 选取前 50 个奇异值进行画图, 并计算奇异值序列的能量, 如图 4 所示。

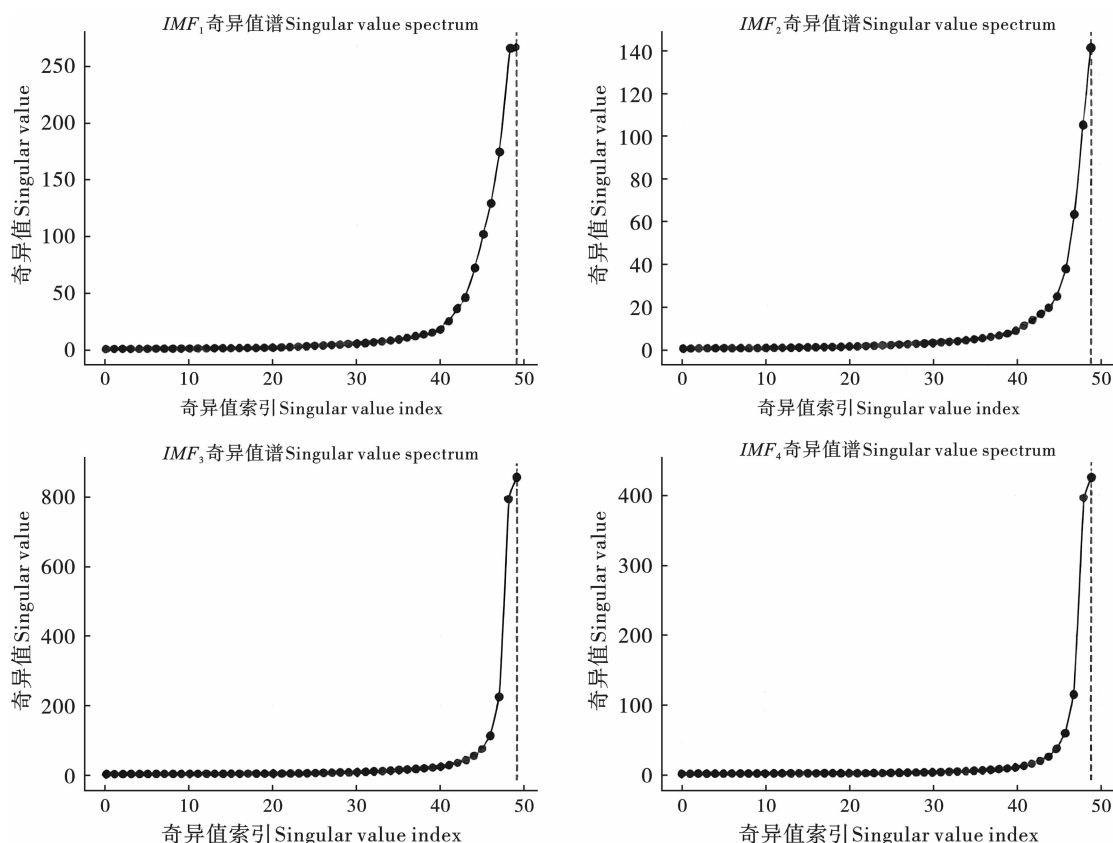


图 4 关键 IMF 分量奇异值谱

Fig. 4 Singular value spectrum

从图 4 中可以看出, 最后的 5 个奇异值能量占比曲线较陡, 而越往前奇异值的能量占比曲线逐渐平缓。根据奇异值能量百分比的含义可以判断, 当奇异值序号为 42 ~ 46 时, 相邻奇异值能量差异较

大, 因此将这 5 个奇异值参与信号的重构, 即重构阶数 $k=5$, 其余奇异值全部取为零。

1.3 降噪效果

为了验证本文 EMD-SVD 联合降噪方法的有效

性,更直观地表述降噪前后的差异,本文另采用了 EMD、EWT-SVD 方法对原振动信号进行降噪对照处理。其中,EWT-SVD 是对传统方法 EWT 的改进,是对原始信号进行自适应分解来获取信号的局部特征,并且能够通过选择具有较高奇异值或较明显振荡模态的成分来减少噪声的影响。通过对以上三种方法进行对比,可以更好地了解它们在不同情况下的表现和效果。本文利用信噪比 SNR、均方根误差 RMSE 两个指标对降噪效果进行评价。信噪比高且均方根误差小,则信号既能较好地保留原始信号特性,又能达到良好的降噪效果。如表 2 所示结果可知经 EMD-SVD 方法降噪后的振动信号在信噪比和均方根误差两个指标上的降噪效果明显高于其他两种,有效排除了噪音的影响,为之后提取信号特征的准确性提供了保障,信号的信噪比 SNR 和均方根误差 RMSE 可表述为

$$SNR = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_{n=1}^N S_n^2}{\sum_{n=1}^N (S_n - \bar{S}_n)^2} \right\} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (S_n - \bar{S}_n)^2}{N}} \quad (4)$$

式中: S 和 $\bar{S}_n$ 分别为进行降噪处理前、后的微震信号; N 为信号的采样点数。

表 2 三种降噪方法降噪效果对比
Table 2 A comparison of the noise reduction effects of three denoising methods

降噪方法 Denoising method	SNR (dB)	RMSE
EMD	20.1215	0.0458
EWT-SVD	23.2638	0.0237
EMD-SVD	27.8934	0.0176

2 小波脊线特征提取

用连续小波变换对信号进行时频分析,可以得到信号在各个时间和尺度下的小波系数,小波系数包含了信号在时-频域二维空间内的重要信息。信号小波变换系数模的平方反映了信号在时间-尺度平面的能量密度分布,信号的能量主要集中在时间-尺度平面中小波脊线周围。利用小波系数作信号的时间-尺度图,可以清楚地看到一些小波系数模极大值聚集成一条脊的现象,类似于地形图中山脊的特征,这些小波系数模极大值连接而成的曲线称之为

小波脊线。而限制在小波脊线上的小波系数值反映了信号的能量聚集情况,称这些小波系数值为小波骨架。利用脊线上的信息可以还原出信号最重要的成分,实现对信号的滤波和重构^[12],分析爆炸是否发生。

任意渐进信号, $f(t)$ 均可表示为如下形式

$$f(t) = A(t) \cos \varphi(t) \quad (5)$$

但是,这样的形式并不唯一。为了获取唯一性,需要引入解析信号的形式

$$z(t) = f(t) + iH[f(t)] = A(t)e^{i\varphi(t)} \quad (6)$$

式中, $Hf(t)$ 为 $f(t)$ 的 Hilbert 变换。定义为

$$Hf(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\tau)}{\tau - t} d\tau \quad (7)$$

根据定义, $z(t)$ 完全由它的实部, $f(t)$ 决定,且当频率为负数时它的傅里叶变换 $Z(\omega)$ 为零。由此我们给出瞬时频率的定义

$$W(t) = \varphi'(t) \quad (8)$$

对于单组分信号,根据平稳相位理论, $z(t)$ 的 Morlet 复小波变换可以表示为

$$Wz(a, b) = A(b)e^{i\varphi(b)} \bar{\Psi}[a\varphi'(b)] + o\left(\frac{|A'|}{|A|}, \frac{|\varphi\varphi''|}{|\varphi'|^2}\right) \quad (9)$$

式中: $o\left(\frac{|A'|}{|A|}, \frac{|\varphi\varphi''|}{|\varphi'|^2}\right)$ 为高阶无穷小量; φ_b 为

小波变换的相位; $\bar{\Psi}[a\varphi'(b)]$ 为小波基傅里叶变换的共轭。对于函数 $\bar{\Psi}(\omega)$, 在中心频率 $\omega = 0$ 处,小波变换的模值 $|Wz(a, b)|$ 达到极大,这些模极大值所在的点连成的曲线就叫做脊线,满足

$$a = a_r(b) = \frac{\omega_0}{\varphi'(b)} \quad (10)$$

式中: $\bar{\Psi}[a\varphi'_j(b)] = \bar{\Psi}(\omega) = C$, 是一个常数; φ_b 即为信号的瞬时频率。因此,在脊线位置的尺度 a 与瞬时频率存在着反比例关系。

对于多分量信号,将其表示为单一分量的叠加

$$f(t) = \sum_{j=1}^M A_j(t) \cos \varphi_j(t) \quad (11)$$

同样地,它的解析信号的形式为

$$z(t) = f(t) + iHf(t) = \sum_{j=1}^M A_j(t) e^{i\varphi_j(t)} \quad (12)$$

根据线性系统的叠加性, $z(t)$ 对应的 Morlet 复小波变换可表示为

$$WZ(a, b) = \sum_{j=1}^M A_j(b) e^{i\varphi_j(b)} \bar{\Psi}[a\varphi'_j(b)] + o\left(\frac{|A'_j|}{|A_j|}, \frac{|\varphi_j\varphi'_j|}{|\varphi'_j|^2}\right) \quad (13)$$

同样地,多分量信号的小波变换的形式是信号各分量信号小波变换的叠加,因此在信号每个分量的脊线上,有

$$a = a_j(b) = \frac{\omega_0}{\varphi_j'(b)} \quad (j = 1, \dots, M) \quad (14)$$

因此,对多分量信号的多脊线提取可以将信号分解到每个分量,而对于模态系统来说,每条脊线就对应于系统的每一阶模态。对经 EMD-SVD 降噪后的信号进行脊线分析,按爆破设计的延期时间分时间段提取各个分段特征,得到如图 5 各段脊线,每段脊线对应的各段时间内的主频变化趋势,曲线的最高点可近似认为是各个炮孔起爆的具体时刻,用与设计起爆时刻对比分辨孔间是否起爆。

3 模拟盲炮监测

3.1 工程概况

以渭南某露天矿山现场实测爆破振动信号为例,验证 EMD-SVD 与脊线特征盲炮识别方法在实际工程中的可靠性和适应性。在距爆源水平 200 m

的区域布置测点。爆破过程中采用数码电子逐孔起爆,孔间毫秒延时为 25 ~ 42 ms,排间毫秒延时为 65 ms,炮孔孔深 13.5 m、孔径 140 mm、孔间距 8.0 m、排距 6.0 m,炸药埋深为 7.5 m,填塞长度为 6 m。测试过程中选择 Blast 爆破测振仪,信号采样频率设定 10 000 Hz,时间为 2.1 s。测量得到的原始三轴分量波形如图 6 所示。

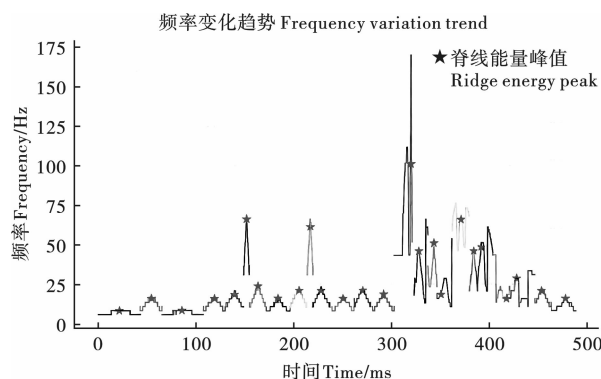


图 5 频率变化趋势

Fig. 5 Frequency variation trend

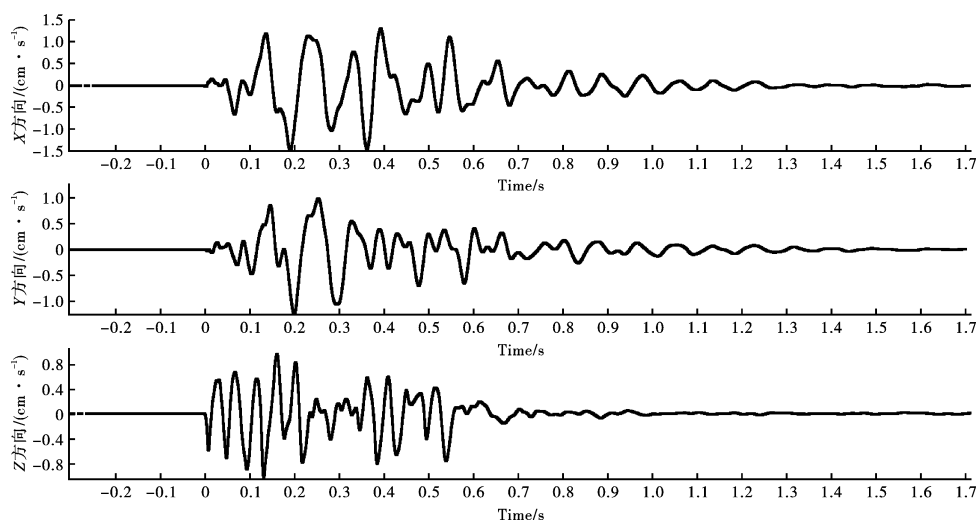


图 6 三轴波形图

Fig. 6 Triaxial waveform

3.2 模拟盲炮并识别

采用三台加速度传感器同步采集原始振动信号,对于多通道的原始信号 $x(t)$,一般取 Z 方向进行分析。多传感器同步采集旨在提高数据可靠性,后续通过对比三台传感器的分析结果(若两台以上一致则判定数据有效),确保实验重复性。对于给定的延期时间与爆区布孔网路图如图 7 所示,在起爆网路中预设两个炮孔不装药以模拟现场盲炮。

由于理论设计跟现场实验有差别,监测点一般距离炮孔 200 m 以上,从炮孔起爆产生地震波传播

到监测点存在一定的时间间隔,这就导致了实际收集到的数据无法跟设计的起爆网路图一一对应,分析盲炮难度增加,为了严谨考虑这一时间差的影响,分析降噪后的振动信号处理如下:

(1)原始信号 $x(t)$ 经过 EMD-SVD 联合降噪后得到降噪信号 $x'(t)$,进行希尔伯特变换,得到其解析信号的包络线 $env(t)$; (2)计算 $env(t)$ 的均值 μ 、标准差 σ ,采用 3σ 准则设定阈值 $T = \mu + 3\sigma$; (3)选取 $env(t)$ 首次超过 T 的时间点作为初始爆点,雷管实际起爆时刻为 290 ms,如图 8 所示。

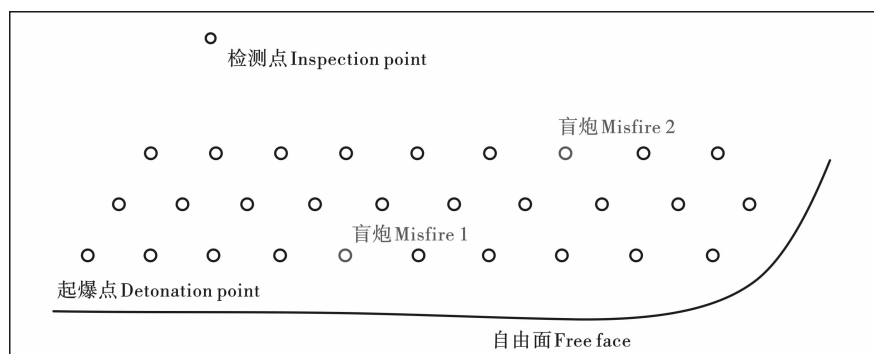


图7 起爆网路图

Fig. 7 Blasting network diagram

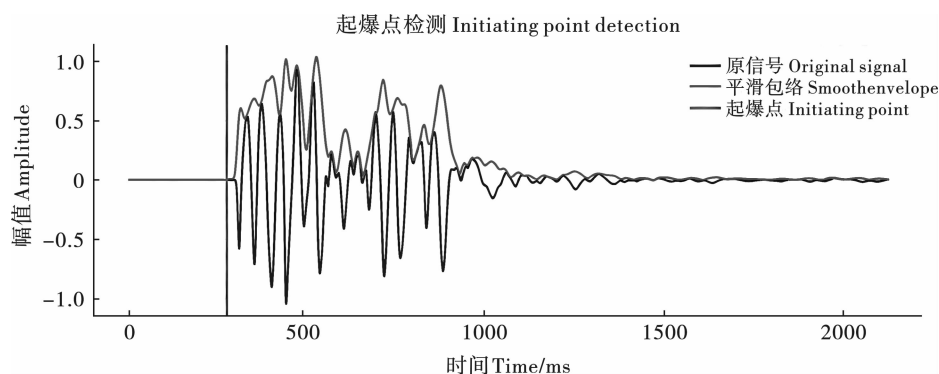


图8 实际起爆点时刻检测

Fig. 8 Initiating point detection

将 290 ms 设置为 0 时刻,结合设计延期时间 0, 42, 65, 107, 130, 149, 155, 172, 197, 214, 220, 237, 239, 262, 279, 281, 303, 321, 323, 337, 346, 362, 379, 388, 404, 421, 446, 463, 488。

依次类推,就可以得到实际炮孔起爆的时间段,

具体分析每个时间段内的时频能量和脊线,其中时间段 11 (即 510 ~ 527 ms) 的分析结果如图 9 所示。

从上述小波脊线分析结果中提取多维度特征(平均陡峭度、平均连续性、平均频率稳定性、总能量),反映盲炮信号与正常信号的特性差异如图 10 所示。

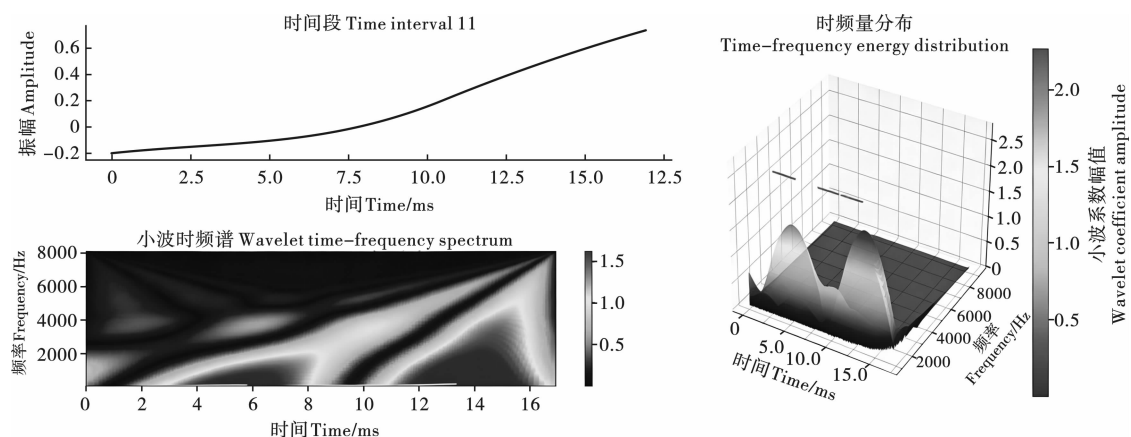


图9 时频能量与脊线

Fig. 9 Time-frequency energy ridge

(1) 平均陡峭度: 计算脊线幅值随时间变化的斜率绝对值的均值

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{dy_i}{dt} \right| \quad (15)$$

式中: y_i 为第 i 点的脊线幅值; N 为脊线点数。

(2) 平均连续性: 统计脊线连续段的长度, 计算其均值

$$C = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M L_j \quad (16)$$

式中: M 为连续段数量; L_j 为第 j 个连续段的长度。

(3) 平均频率稳定性: 计算脊线频率随时间变化的方差的均值

$$F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{var}^*(f_i) \quad (17)$$

式中: f_i 为第 i 点的脊线频率。

(4) 总能量: 计算脊线对应的 CWT 系数的平方和

$$E = \sum_{i=1}^N |W(t_i, f_i)|^2 \quad (18)$$

式中, $W(t_i, f_i)$ 为第 i 点的 CWT 系数。

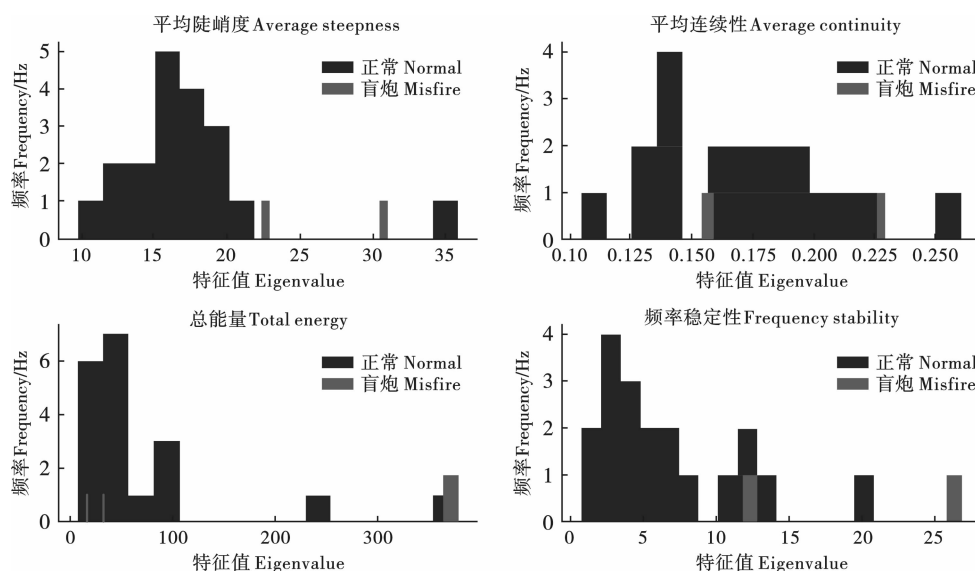


图 10 盲炮特性差异

Fig. 10 Characteristic differences of misfires

将所述关键特征输入隔离森林-局部离群因子(IF-LOF)组合模型, 采用隔离森林(IF)对特征进行异常检测, 得到异常得分 A (范围 $0 \sim 1$, 得分越高越异常); 采用局部离群因子(LOF)对特征进行离群度计算, 得到离群得分 B (得分 > 1 表示离群); 计算综合得分 $S = a \times A + b \times B$ ($a + b = 1$, a, b 为权重, 通过大量实测爆破

振动信号训练确定); 若综合得分 $S \geq$ 设定值, 则识别为盲炮; 否则为正常炮。计算各个时间段的综合得分来表示每个炮孔的起爆情况, 如图 11 可知时间段 7 (即 $445 \sim 462$ ms) 与时间段 26 (即 $711 \sim 736$ ms) 有盲炮发生, 识别结果会呈现出具体的时间段与系统计算出的概率情况以供参考与进一步的确认。

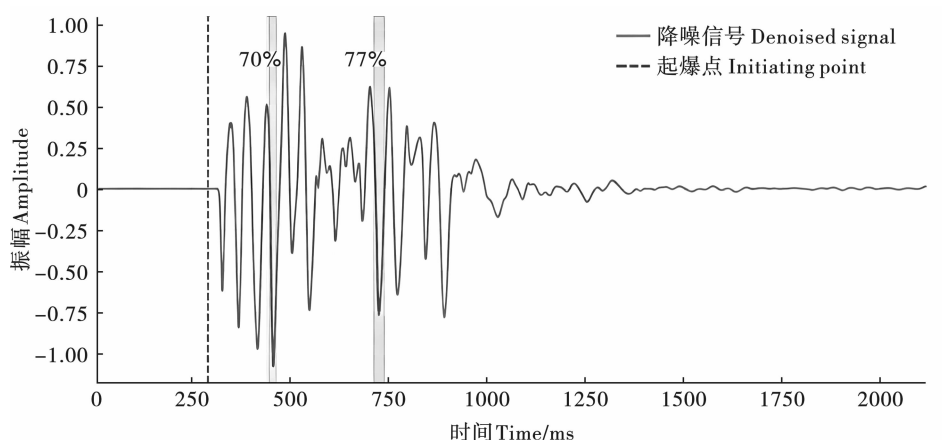


图 11 盲炮识别结果

Fig. 11 Misfire identification results

4 结论

针对矿山复杂环境振动信号信噪比低、盲炮特征微弱且易被噪声淹没的难题,本文提出一种基于经验模态分解-奇异值降噪与小波脊线分时间段分析的矿山振动信号特征提取与识别方法,用于盲炮智能监测。主要结论如下:

(1)通过优化 EMD-SVD 降噪预处理原始振动信号。利用 EMD 将非平稳、非线性的原始振动信号自适应地分解为一系列 IMF。然后,对每个 IMF 分量应用 SVD 分解,并根据信号特性自适应地选择保留哪些奇异值进行重构,显著抑制了背景噪声,同时最大程度地保留了蕴含盲炮特征的有效信号成分。通过对 EMD 分量进行 SVD 分解的优化步骤较传统 EMD 分解与 EWT-SVD 分解提高了原始信号的信噪比。

(2)结合包络线+自适应阈值检测初始爆点并确定起爆时间段。对降噪后的信号进行希尔伯特变换,提取信号的瞬时幅度包络。在该包络线上,应用自适应阈值算法,自动、准确地识别出爆破事件的初始起爆点,精准捕捉爆破信号特征,聚焦于包含核心爆破特征的关键时段,排除无关时段的干扰,提高了分析效率和准确性。

(3)采用连续小波变换脊线特征提取平均陡峭度、平均连续性、平均频率稳定性、总能量等多维度特征。通过这些从脊线提取的时频联合特征,能更敏感、更全面地捕捉特定时间段内正常爆破与盲炮在能量释放动态、频率变化模式上的细微差异。

(4)最终通过隔离森林-局部离群因子(IF-LOF)组合模型实现盲炮的精准识别。组合模型(IF-LOF)综合了两种算法的优势,既能捕捉全局稀疏的盲炮样本(IF),也能识别在正常爆破样本簇附近但特征模式明显偏离的盲炮(LOF)。通过训练大量实测爆破振动信号提高两种算法的精度,计算两者的异常分数并融合决策规则,显著提高了对盲炮这种稀有且模式多样的异常事件的检测精度和鲁棒性,降低了单一模型的误报率和漏报率,实现了盲炮的精准、可靠识别。

参考文献(References)

- [1] 田 婕,张云鹏,闫 鹏,等. 基于 CEEMD 的露天深孔爆破振动信号降噪平滑模型[J]. 爆破,2024,41(2): 143-150,159.
- [1] TIAN Jie,ZHANG Yun-peng,YAN Peng,et al. A denoising-smoothing model for open-pit deep-hole blast vibration signals based on CEEMD[J]. Blasting,2024,41(2): 143-150,159. (in Chinese)
- [2] 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): 10-16,24.
- [2] SONG Qing-bo,BAI Hao-bo,WANG Hai-long,et al. Identification of blasting delay time based on CEEMDAN-cross wavelet transform[J]. Engineering Blasting,2023,29(2):10-16,24. (in Chinese)
- [3] 李洪超,沈成行,石玉莲,等. 基于周期变异 SOA-SVMD 爆破振动信号降噪研究[J]. 振动与冲击,2025,44(21):172-181.
- [3] LI Hong-chao,SHEN Cheng-hang,SHI Yu-lian,et al. Research on blast vibration signal denoising based on periodic variation SOA-SVMD[J]. Journal of Vibration and Shock,2025,44(21):172-181. (in Chinese)
- [4] 李洪超,张 继,石玉莲,等. 基于 APO-VMD 联合小波阈值的爆破振动信号去噪方法研究[J]. 振动与冲击,2025,44(15):249-258.
- [4] LI Hong-chao,ZHANG Ji,SHI Yu-lian,et al. Denoising method for blast vibration signal based on APO-VMD combined with wavelet threshold[J]. Journal of Vibration and Shock,2025,44(15):249-258. (in Chinese)
- [5] 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.
- [5] YAN Peng,ZHANG Yun-peng,ZHOU Qian-qian,et al. Research on denoising method for blast vibration signal based on improved EMD[J]. Journal of Vibration and Shock,2025,44(1):212-220. (in Chinese)
- [6] 叶海旺,钟 航,周汉红,等. 基于 VMD 及能量熵的隧道爆破振动信号降噪方法[J]. 金属矿山,2024(11): 111-117.
- [6] YE Hai-wang,ZHONG Hang,Zhou Han-hong,et al. A denoising method for tunnel blasting vibration signals based on VMD and energy entropy[J]. Metal Mine,2024(11): 111-117. (in Chinese)
- [7] 马荣增,杜泽辉,李 文,等. 基于 OOA-VMD 的隧道爆破振动信号降噪方法[J]. 爆破,2025,42(1):175-182.
- [7] MA Rong-zeng,DU Ze-hui,LI Wen,et al. Denoising method for tunnel blasting vibration signal based on OOA-VMD[J]. Blasting,2025,42(1):175-182 (in Chinese)
- [8] 贾皓琦,黄永辉,张智宇. 基于 WOA-VMD-MPE 算法的矿山爆破振动信号降噪研究及应用[J]. 有色金属工程,2023,13(12):151-162.
- [8] JIA Hao-qi,HUANG Yong-hui,ZHANG Zhi-yu. Research and application of mine blast vibration signal denoising based on WOA-VMD-MPE algorithm[J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,13(12):151-162. (in Chinese)

- [9] 张文涛,汪海波,高朋飞,等. 基于 ICEEMDAN-改进小波阈值法的爆破振动信号降噪分析[J]. 工程爆破, 2025,31(2):157-168.
- [9] ZHANG Wen-tao, WANG Hai-bo, GAO Peng-fei, et al. Denoising analysis of blast vibration signal based on ICEEMDAN-improved wavelet threshold method[J]. Engineering Blasting, 2025, 31(2):157-168. (in Chinese)
- [10] 孙冰,宋良灵,曾晟,等. 基于 FSWT-FDM 的露天矿爆破振动信号分解方法[J]. 金属矿山, 2025(7):106-113.
- [10] SUN Bing, SONG Liang-ling, ZENG Sheng, et al. A decomposition method for open-pit mining blasting vibration signals based on FSWT-FDM[J]. Metal Mine, 2025(7):106-113. (in Chinese)
- [11] 朱权洁,隋龙琨,陈学习,等. 基于 EMD-SVD 的矿山微震信号降噪方法及其应用[J]. 安全与环境工程, 2024,31(3):110-119.
- [11] ZHU Quan-jie, SUI Long-kun, CHEN Xue-xi, et al. Denoising method of mine microseismic signal based on EMD-SVD and its application[J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(3):110-119. (in Chinese)
- [12] 潘加松. 小波脊线提取方法研究及其应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [12] PAN Jia-song. Research on wavelet ridge extraction method and its application[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)

(上接第 256 页)

- [4] 厉美杰,杜军,王洪强,等. 爆破振动对露天矿山永久边坡稳定性的影响分析[J]. 爆破, 2023,40(1):170-176.
- [4] LI Mei-jie, DU Jun, WANG Hong-qiang, et al. Analysis of the influence of blasting vibration on the stability of permanent slopes in open-pit mines[J]. Blasting, 2023, 40(1):170-176. (in Chinese)
- [5] 刘鑫. 精确延时台阶爆破控制破碎块度研究[J]. 采矿技术, 2024,24(4):178-187
- [5] LIU Xin. Research on controlling fragmentation size in bench blasting with precise delay[J]. Mining Technology, 2024, 24(4):178-187. (in Chinese)
- [6] 刘翔宇,龚敏,吴昊骏,等. 自由面变化条件下隧道电子雷管爆破参数确定方法[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(10):153-165.
- [6] LIU Xiang-yu, GONG Min, WU Hao-jun, et al. Determination method of tunnel electronic detonator blasting parameters under changing free surface conditions[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(10):153-165. (in Chinese)
- [7] 北方工业大学. 一种岩石井巷深孔分层掏槽爆破方法: 中国, 202110940593. X[P]. 2023-05-12.
- [7] North China University of Technology. A deep-hole layered cut blasting method for rock shafts and roadways: China, 202110940593. X[P]. 2023-05-12. (in Chinese)
- [8] 冷振东. 岩石爆破中爆炸能量的释放与传输机制[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [8] LENG Zhen-dong. Release and transmission mechanism of explosive energy in rock blasting[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese)
- [9] 康宏垚,孔艳婷,胡宇,等. 楔形掏槽分段延时爆破技术研究[J]. 中国矿业, 2024,33(S2):330-335.
- [9] KANG Hong-yao, KONG Yan-ting, HU Yu, et al. Study on wedge cut blasting technology with segmented delay[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(S2):330-335. (in Chinese)

(上接第 281 页)

- [14] 魏晓安,何卫东,王泽山. 一种低爆速炸药的研制[J]. 爆破器材, 2006(2):5-7.
- [14] WEI Xiao-an, HE Wei-dong, WANG Ze-shan. Synthesis of a new low detonation velocity explosive[J]. Explosive Materials, 2006(2):5-7. (in Chinese)
- [15] 蒋继平,柴俭,张杰,等. 工程爆破系统风险管理体系建设探讨[J]. 爆破, 2025,42(3):165-174.
- [15] JIANG Ji-ping, CHAI Jian, ZHANG Jie, et al. Discussion of development of risk management system for engineering blasting system[J]. Blasting, 2025, 42(3):165-174. (in Chinese)
- [16] 王爱华. 基于 AHP-多级模糊综合评估方法的工程爆破事故分析与防范对策研究[J]. 爆破, 2026,43(1):235-245.
- [16] WANG Ai-hua. Research on engineering blasting accident analysis and preventive countermeasures based on AHP-multilevel fuzzy comprehensive assessment methods[J]. Blasting, 2026, 43(1):235-245. (in Chinese)
- [17] 中国爆破行业协会. 中国爆破行业中长期科学与技术发展规划(2026—2035 年)[R]. 北京: 中国爆破行业协会, 2025.
- [17] China Blasting Industry Association. Medium and Long-term Science and Technology Development Plan for China Blasting Industry (2026—2035) [R]. Beijing: China Blasting Industry Association, 2025. (in Chinese)