

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.022

## 上向分层充填采矿法采场爆破振动传播特征研究\*

尹东升<sup>1</sup>, 杨玉民<sup>2</sup>, 肖泽宇<sup>1</sup>, 吕国鹏<sup>2</sup>, 郑旭<sup>1</sup>

(1. 大冶有色金属有限责任公司, 大冶 435100; 2. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 明晰复杂巷道结构下地下采场爆破振动传播特征对于爆破安全施工具有重要意义。以铜绿山铜铁矿深部开采爆破工程为背景, 通过现场爆破试验对比分析上分层与本分层凿岩巷道监测点所获取的峰值振动速度、振动主频以及爆破能量特征。为获取更丰富有效的振动结果, 结合铜绿山铜铁矿生产进度补充开展了五次现场爆破监测试验, 并在本分层凿岩巷道以及上分层凿岩巷道的不同位置进行布点, 采用萨道夫斯基公式分析地下采场爆破在上分层与本分层凿岩巷道的爆破振动传播特征, 为工程现场爆破安全设计提供依据。主要结论: 在爆心距相近的条件下, 相较于低频信号, 高频信号更容易受巷道结构影响而发生衰减, 应力波在岩体介质传播的过程中高频信号也更容易出现衰减。上分层凿岩巷道获取的各段别最大瞬时能量与本分层凿岩巷道相近, 但是上分层凿岩巷道获取的爆破累积能量明显大于本分层凿岩巷道, 这是由于上分层凿岩巷道的各段别瞬时能量持续时间要大于本分层凿岩巷道。相较于上分层凿岩巷道的三轴爆破峰值振速, 本分层凿岩巷道的三轴爆破峰值振速及其衰减速率整体上更小。

**关键词:** 巷道结构; 现场监测; HHT; 能量分析; 振动传播

**中图分类号:** TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)01-0203-10

## Investigation of Blasting Vibration Propagation Characteristics in Stopes Using Upward Horizontal Cut and Fill Mining Method

YIN Dong-sheng<sup>1</sup>, YANG Yu-min<sup>2</sup>, XIAO Ze-yu<sup>1</sup>, LYU Guo-peng<sup>2</sup>, ZHENG Xu<sup>1</sup>

(1. Daye Nonferrous Metals Co., Ltd., Daye 435100, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Understanding blast vibration propagation mechanisms in underground stopes with complex roadway configurations is crucial for ensuring safe blasting operations. This study presents a comparative analysis of blast-induced vibration characteristics in the deep mining operations at the Tonglushan Copper-Iron Mine. Through systematic field blasting tests, the vibration velocity, dominant frequency, and blasting energy were measured at monitoring points in the upper-level and current-level drilling roadways. To enhance the reliability and completeness of vibration data, five supplementary field blasting tests were systematically conducted in coordination with the operational schedule of Tonglushan Copper-Iron Mine's production activities. Vibration monitoring stations were strategically established at multiple positions within both the current-level and upper-level drilling roadways to capture comprehensive blast-induced dynamic responses. The study employed the Sadovsky formula to systematically characterize blast vibra-

收稿日期 (Date of reception): 2025-08-01

网络首发日期 (Published online): 2025-10-23

作者简介: 尹东升(1990-), 男, 湖北人, 硕士、高级工程师, 主要从事地下建筑、工程爆破方面研究, (E-mail) 515369112@qq.com。

通信作者: 杨玉民(1997-), 男, 江西人, 博士研究生, 主要从事地下建筑、工程爆破方面研究, (E-mail) ym.yang@cug.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41972286)

**About the author:** YIN Dong-sheng(1990-), male, born in Hubei province, master degree, senior engineer, mainly engaged in research on underground construction and engineering blasting, (E-mail) 515369112@qq.com.

**Corresponding author:** YANG Yu-min(1997-), male, born in Jiangxi province, doctoral candidate, mainly engaged in research on underground construction and engineering blasting, (E-mail) ym.yang@cug.edu.cn.

**Fund Programs:** Project supported by National Natural Science Foundation of China(41972286)

tion propagation patterns in both upper-level and current-level drilling roadways of the underground stope. This analytical approach established critical relationships for vibration attenuation that directly informed the engineering design of safe blasting parameters for site operations. Key findings reveal that, at comparable blast-center distances, high-frequency components exhibit significantly greater attenuation than low-frequency signals when interacting with roadway structures and dissipate more energy during stress wave propagation through rock mass matrices. Furthermore, the segmental maximum instantaneous energy measurements show comparable values between the upper-level drilling roadway. However, the upper-level drilling roadway exhibits significantly higher cumulative blasting energy than the current-level drilling roadway, attributed to longer instantaneous energy durations in each segment. Additionally, the upper-level drilling roadway shows consistently lower triaxial peak vibration velocities and lower attenuation rates than the upper-level roadway.

**Key words:** roadway structure; field monitoring; HHT; energy analysis; vibration propagation

上向分层充填采矿法作为深部矿体开采的主流方法之一,其核心特点是自下而上分层开采,并利用充填体支撑采空区。随着开采深度增加,采场结构由单一巷道演变为多分层空区与充填体交替的复合介质<sup>[1]</sup>。在爆破开采过程,受巷道结构与爆源空间位置的影响,上分层凿岩巷道与本分层凿岩巷道的爆破振动信号可能呈现截然不同的特征<sup>[2]</sup>。因此,明晰复杂巷道结构下地下采场爆破振动传播特征对于爆破安全施工具有重要意义。

针对地下采矿爆破振动特征,许多学者从理论分析<sup>[3,4]</sup>、现场试验以及数值分析等多手段展开了大量研究<sup>[5-8]</sup>,并取得了系列成果。朱建波等以石拉乌素煤矿为例<sup>[9]</sup>,结合室内及室外试验推导了矿震影响下的应力波衰减理论模型,并应用于矿震风险评价。薛田喜等以焦家金矿为背景<sup>[10]</sup>,通过现场爆破试验以及萨道夫斯基公式比较了介质、充填体以及充填体厚度对于爆破振动特征的影响。贾志伟等结合希尔伯特-黄变换和数值模拟方法系统分析了地下矿爆破充填体两侧的能量分布特征<sup>[11]</sup>,发现爆破能量在穿越充填体后可衰减7倍左右,有效应力可下降14%左右。乔国栋等结合理论方法以及数值模拟推导了巷道围岩爆破振动预测模型<sup>[12]</sup>,发现巷道墙角以及拱墙均为危险区域,应当重点加强监测。唐灵明等采集了岩溶区矿山爆破的监测数据<sup>[13]</sup>,利用FFT以及回归分析手段对比研究了塌陷区与非塌陷区的振动频率衰减特征,讨论了岩土参数、爆心距以及装药量对于爆破频率的影响。赵尔丞等通过有限元三维数值模型计算得到了矿区安全顶住的最危险位置<sup>[14]</sup>,进而通过二维模型分析不同爆破参数条件下安全顶住的稳定性。

以大冶有色铜绿山铜铁矿深部开采爆破工程为背景,结合勘探资料及爆破设计方案开展现场爆破试验,通过在上分层凿岩巷道与本分层凿岩巷道布置爆破振动测试仪器获取爆破振动结果,对比分析上分层凿岩巷道与本分层凿岩巷道监测点所获取的

峰值振动速度、振动主频以及爆破能量特征。进一步开展铜绿山铜铁矿深部开采爆破监测试验,统计上分层凿岩巷道与本分层凿岩巷道的爆破峰值振速结果,基于萨道夫斯基公式分析地下采场爆破在上分层凿岩巷道与本分层凿岩巷道的爆破振动传播特征,为工程现场爆破安全设计提供依据。

## 1 铜绿山铜铁矿深部开采爆破现场试验

### 1.1 工程概况

铜绿山铜铁矿床南起喻家山,北止大冶湖,东起熊家湾,西止柯锡太,面积约3.5 km<sup>2</sup>,区内现已发现13个铜铁矿体。矿床是多种金属矿床,以铜、铁、金属为主,伴生金、银、钴、钼、镓、铟等稀有贵金属。矿体总体分布在南北长2100 m,东西宽600 m范围内,面积约0.7535 km<sup>2</sup>。受北北东、北东东向两组构造控制,排列成两个带。其中北北东向矿体沿北22°东方向延伸,南起28线,北止59线,长约2100 m,水平投影宽约300~350 m;北东东向矿体沿北68°东方向延伸,区内矿体规模小,分布零星,互不连续。露天采坑与部分地下矿体空间位置关系如图1所示。

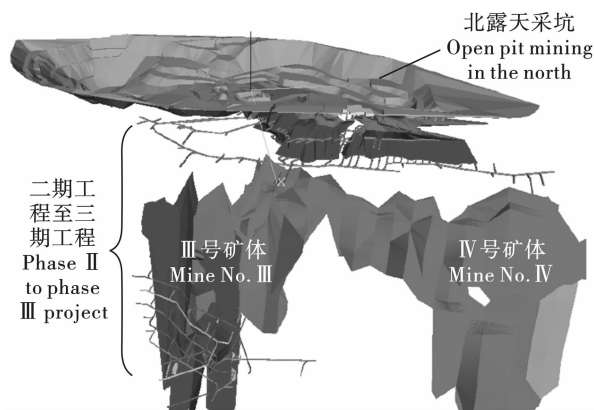


图1 露天采坑与部分地下矿体空间位置关系  
Fig. 1 The spatial relationship between the open-pit and some underground ore bodies

## 1.2 试验技术方案

铜绿山铜铁矿区主要采用上向分层充填采矿法以及中深孔采矿爆破技术,其中爆破炮孔包括扇形孔与平行孔两种布孔形式。通过现场勘探资料及爆破设计方案,结合铜绿山铜铁矿的生产进度,在-485北沿四分层9402-5采场进行爆破试验,试验场地及试验位置如图1所示,爆破试验位于采场

侧崩区域,采用扇形中深孔进行爆破。排间距为1.5 m,炮孔直径为64 mm。此次爆破共有30个炮孔,分为3排起爆,每排10个炮孔,孔间延时时间为200 ms,排间延时时间为200 ms以及250 ms。炮孔深度为2.7~9.2 m,单孔装药量为8.8~26.2 kg,各炮孔的具体参数可见表1,炮孔布置如图2所示。

表1 爆破试验炮孔参数

Table 1 Blasthole parameters for blasting test

炮孔编号 Blasthole number	起爆时间 Explosive time/ms	与上一炮孔延时时间间隔 Delay interval from the previous blasthole/ms	孔深 Hole depth/m	角度 Angle/°	装药长度 Charged length/m	装药量 Charge amount/g	孔口距 Distance to hole collar/m	孔底距 Distance to hole bottom/m
1	0	0	8.6	84.8	4.4	14.2	0.3	1.5
2	0	0	8.5	86.7	7.5	24.2	0.3	1.5
3	200	200	8.8	76.4	6.5	20.9	0.3	1.5
4	200	0	8.7	78.2	4.7	15.2	0.3	1.5
5	400	200	9.2	68.1	8.2	26.2	0.3	1.3
6	400	0	9.1	69.9	7.2	23.0	0.3	1.5
7	600	200	5.9	58.3	3.7	11.9	0.5	1.3
8	600	0	6.0	60.2	5.0	16.1	0.3	1.3
9	800	200	3.8	45.0	2.8	9.0	0.5	1.3
10	800	0	3.7	46.7	2.7	8.8	0.5	1.3
11	1000	200	8.6	84.8	4.4	14.2	0.3	1.5
12	1000	0	8.5	86.7	7.5	24.2	0.3	1.5
13	1200	200	8.8	76.4	6.5	20.9	0.3	1.5
14	1200	0	8.7	78.2	4.7	15.2	0.3	1.5
15	1400	200	9.2	68.1	8.2	26.2	0.3	1.3
16	1400	0	9.1	69.9	7.2	23.0	0.3	1.5
17	1600	200	5.9	58.3	3.7	11.9	0.5	1.3
18	1600	0	6.0	60.2	5.0	16.1	0.3	1.3
19	1800	200	3.8	45.0	2.8	9.0	0.5	1.3
20	1800	0	3.7	46.7	2.7	8.8	0.5	1.3
21	2050	250	8.6	84.8	4.4	14.2	0.3	1.5
22	2050	0	8.5	86.7	7.5	24.2	0.3	1.5
23	2250	200	8.8	76.4	6.5	20.9	0.3	1.5
24	2250	0	8.7	78.2	4.7	15.2	0.3	1.5
25	2450	200	9.2	68.1	8.2	26.2	0.3	1.3
26	2450	0	9.1	69.9	7.2	23.0	0.3	1.5
27	2650	200	5.9	58.3	3.7	11.9	0.5	1.3
28	2650	0	6.0	60.2	5.0	16.1	0.3	1.3
29	2850	200	3.8	45.0	2.8	9.0	0.5	1.3
30	2850	0	3.7	46.7	2.7	8.8	0.5	1.3

## 1.3 测点布置

在现场进行监测时,按照预设的爆破监测方案,井下相对应位置找到合适的平台,传感器的布置规

范性,是保证爆破振动监测真实性和科学的关键,因此在传感器的安装中一定要保证爆破接触面和地面基岩尽可能地贴合和固定。同时为保护传感器免遭

落石冲砸,测试时,用仪器盒作适当遮挡。根据铜绿山铜铁矿现场爆破试验的监测原则以及巷道环境,选择在本分层凿岩巷道以及上分层凿岩巷道共布置三台 TC-4850,依次编号为#1~3,其中监测点#1位于本分层凿岩巷道内,#1与爆源的水平距离为

30 m,垂直距离为 6 m,监测点#2、#3位于上分层凿岩巷道内,#2、#3与爆源的水平距离分别为 30 m及 52 m,垂直距离均为 9 m。#1、#2、#3与爆源的直线距离依次为 30.594 m、31.321 m及 52.773 m。监测点位选取示意如图 3 所示。

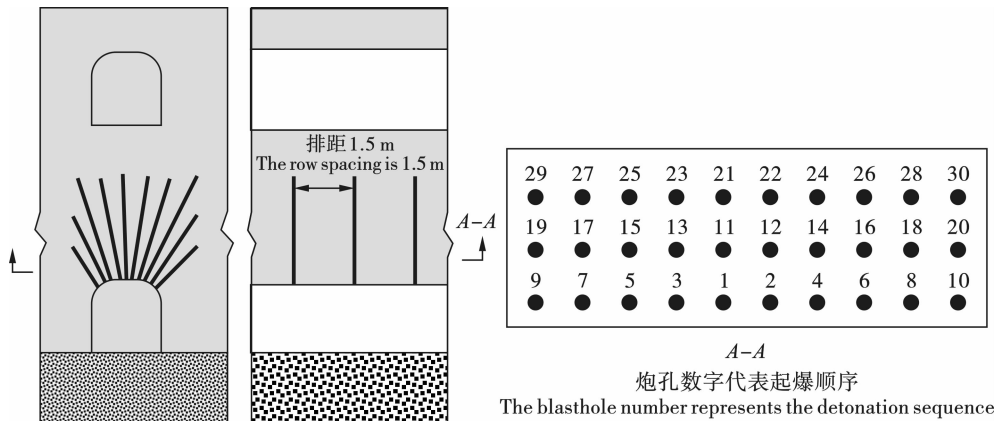


图 2 爆破试验炮孔布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of blasthole layout

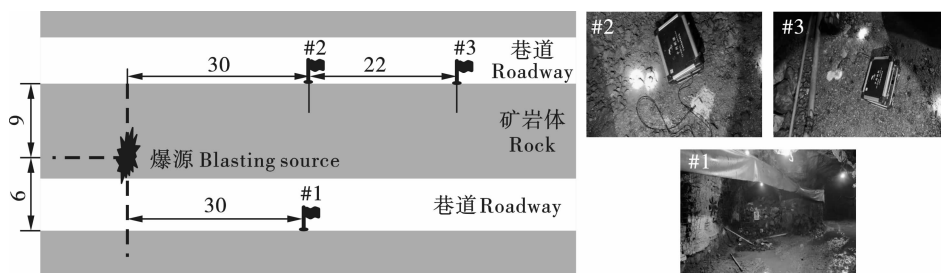


图 3 爆破试验监测点位选取示意图(单位:m)

Fig. 3 Schematic diagram for selecting monitoring points in blasting test(unit:m)

## 2 试验结果分析

### 2.1 爆破振动特征

统计各监测点所得爆破振动结果,同时对爆破振动波形进行适当的滤波处理,可得到各监测点的三向爆破振动波形如图 4 所示。

在本实验中,所采用的孔间延时时间为 200 ms,第一、二排的排间延时时间为 200 ms,第二、三排的排间延时时间为 250 ms。从图 4 所展示的各监测点位爆破振动波形上看,井下不同监测点获取的爆破振动波形特征存在一定的区别,其中爆心距较小的监测点#1和#2所获取的爆破振动波形分段特征非常明显,从波形上可有效地区分出各炮孔的起爆时间,而爆心距较大的监测点#3所获取的爆破振动波形分段特征相对不清晰,各炮孔的爆破波形存在较为明显的叠加现象,特别是 X 方向和 Z 方向。此外,从各个炮孔爆破所产生的爆破振动波形上看,相

较于监测点#2,监测点#1所获取的爆破振动波形持续时间要更短,这一现象在 X 和 Y 方向上较为明显。

对各监测点的爆破振动信号进行 FFT 变换,得到各监测点三轴爆破振动信号频谱图,如图 5 所示。各监测点三轴爆破振动信号主要频率成分存在明显区别,其中位于本分层凿岩巷道的监测点#1的频率成分主要集中在 8~105 Hz 范围内,X、Y、Z 三向主频分别为 50.013 Hz、59.753 Hz、79.758 Hz。相较于#1,位于上分层凿岩巷道的监测点#2的频率成分更加丰富,集中在 4~230 Hz 范围内,说明#1接收到的爆破波形受到了巷道结构影响而明显衰减,特别是高频信号,而监测点#2受到巷道结构的影响较小,监测点#2的 X、Y、Z 三向主频分别为 45.012 Hz、99.763 Hz、180.311 Hz。监测点#3的频率成分主要集中在 9~65 Hz 范围内,X、Y、Z 三向主频分别为 15.004 Hz、55.014 Hz、15.004 Hz,相较于点#1和#2,#3的频率组成成分相对单一,说明应力波在岩体介质传播的过程中高频信号更容易出现衰减。

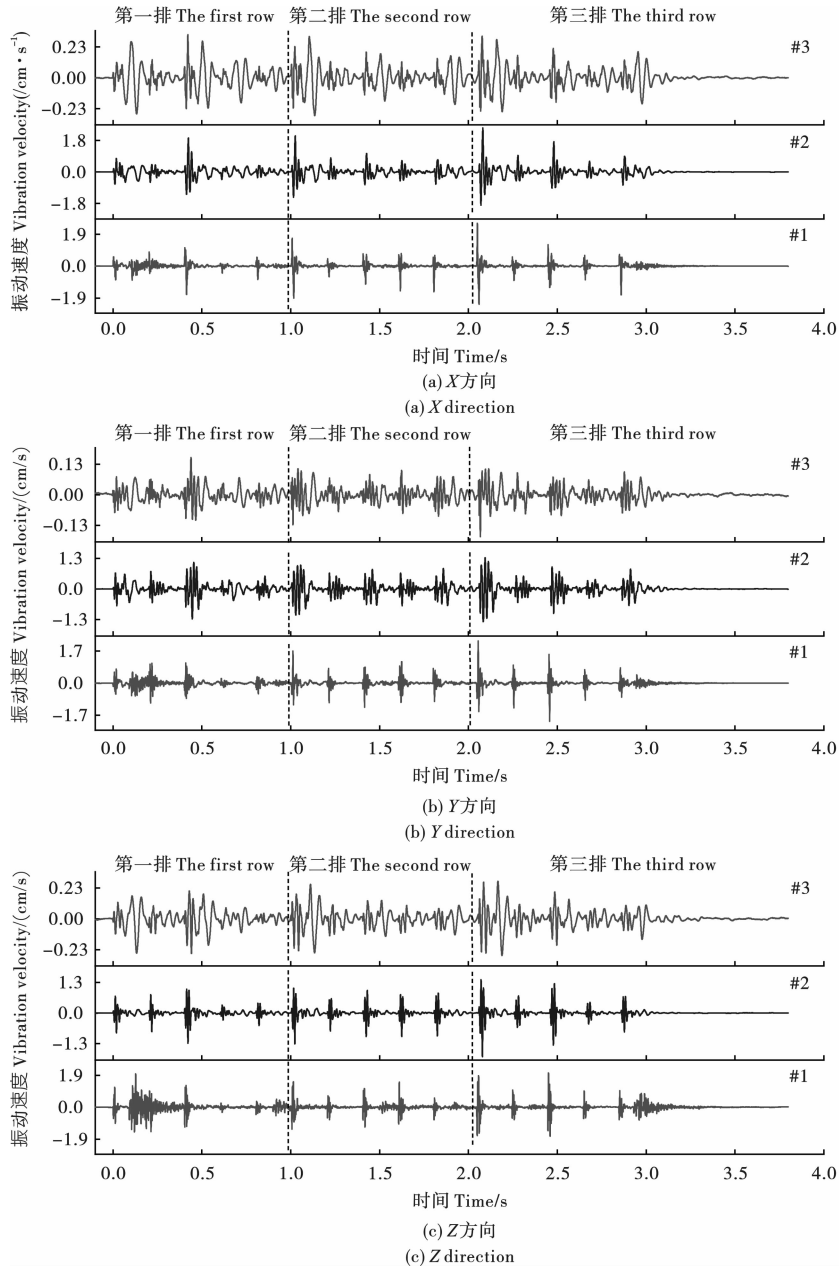


图 4 不同监测点三轴爆破振动波形

Fig. 4 Three-axis blasting vibration waveform at different monitoring points

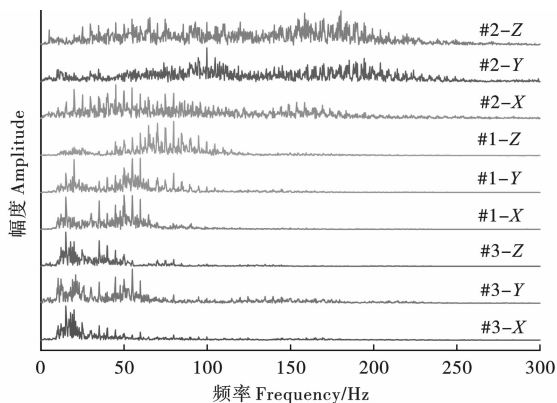


图 5 各监测点三轴爆破振动信号频谱图

Fig. 5 Three-axis spectrum diagram at each monitoring point

进一步地,根据波形分段情况以及炮孔起爆时间,提取各段别炮孔起爆时各监测点所获取的三向爆破峰值振速,如图 6 所示。受爆心距影响,监测点 #1 和 #2 的峰值振速整体上较为接近,而监测点 #3 的峰值振速最小。计算各点的平均峰值振速,其中 #1 的 X、Y、Z 三轴平均峰值振速分别为 1.221 cm/s、1.134 cm/s、1.195 cm/s, #2 的 X、Y、Z 三轴平均峰值振速分别为 1.036 cm/s、0.807 cm/s、1.043 cm/s, #3 的 X、Y、Z 三轴平均峰值振速分别为 0.187 cm/s、0.094 cm/s、0.153 cm/s,表现为 #1 > #2 > #3 的大小关系,并均以 X 方向为主振方向。

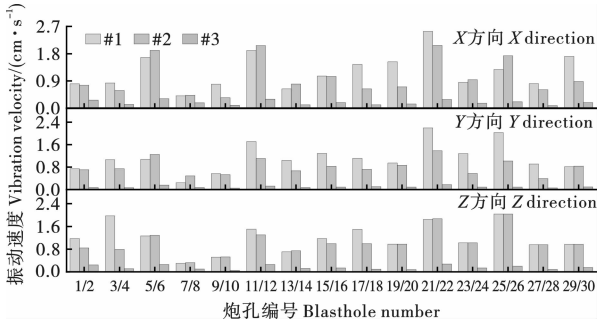


图6 各监测点三轴爆破峰值振速

Fig. 6 Three-axis PPV at each monitoring point

2.2 爆破能量特征

希尔伯特-黄变换(简称HHT)作为一种常用的

自适应时频分析方法,被广泛应用于爆破信号的能量特征研究中。Hilbert 瞬时能量  $IE(t)$  和累积能量  $E(t)$  可分别由式(1)和(2)计算得到,其表现了信号能量随时间的变化特征。

$$IE(t) = \int_0^\omega H^2(\omega, t) d\omega \quad (1)$$

$$E(t) = \int_0^t IE(\tau) d\tau \quad (2)$$

式中: $H(\omega, t)$  为 Hilbert 边际谱,主要用于表示原始信号不同成分频率在全局上累加的幅值或能量。对不同监测点的三轴爆破振动信号进行希尔伯特-黄变换,得到各监测点不同方向爆破振动信号的时间-瞬时能量、时间-累积能量关系曲线,如图7所示。

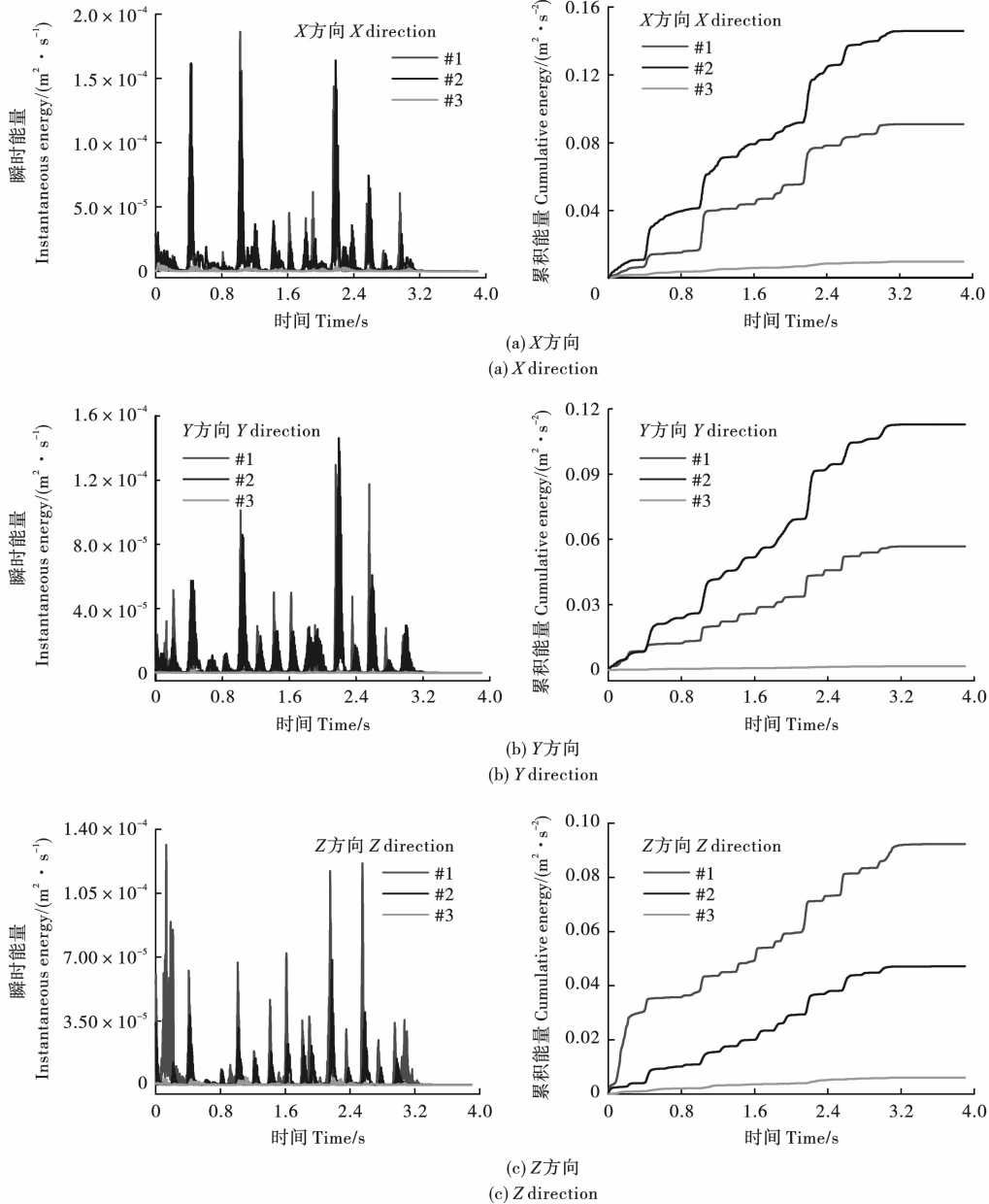


图7 爆破振动信号的时间-瞬时能量、时间-累积能量关系曲线

Fig. 7 Relationship curves of time-instantaneous energy and time-cumulative energy for blasting vibration signals

分析图 7 可知,从时间-瞬时能量曲线上看,各监测点所获取的三轴爆破振动信号瞬时能量主要集中在 0~3.2 s,因此各监测点所获取的三轴爆破振动信号累积能量在 3.2 s 后趋于稳定,其中监测点#3 的瞬时能量峰值与累积能量均最小,这是由于监测点#3 的爆心距最大,传播至该点的爆破能量已经在介质路径上产生了较大程度的衰减,监测点#3 的 X、Y、Z 三轴爆破瞬时能量峰值分别为  $6.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $1.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $4.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$ ,三轴爆破累积能量分别为  $0.010 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $1.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $6.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。在 Z 方向,监测点#1 在 Z 方向各炮孔瞬时能量峰值均明显大于监测点#2,因此监测点#1 在 Z 方向的累积能量也远大于监测点#2,其中监测点#1 和#2 的瞬时能量峰值分别为  $1.32 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $6.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$ ,累积能量分别为  $0.092 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $0.047 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ,监测点#1 的累积能量是#2 的 1.957 倍。在 X 方向和 Y 方向,监测点#1 与#2 呈现出了不一样的能量特征,监测点#1 与#2 在 X 方向和 Y 方向各炮孔瞬时能量峰值较为接近,但是累积能量两者相差较大,其中监测点#1 与#2 在 X 方向的累积能量分别为  $0.091 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $0.146 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ,监测点#1 与#2 在 X 方向的累积能量分别为  $0.057 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $0.113 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ,这是由于监测点#1 位于本分层凿岩巷道内,其接收到的爆破信号受到了巷道地形影响而明显受到了衰减,而监测点#2 位

于上分层凿岩巷道内,其接收到的爆破信号由爆源爆破产生并由岩体介质进行传播,在传播路径中受到巷道地形的影响较小。

### 3 地下深部开采爆破振动传播规律

炸药起爆产生瞬时爆压作用于炮孔壁上,从而引发岩体爆破振动,爆破振动以爆破激发应力波的形式在围岩中传播。随着应力波的传播,围岩质点从稳态进入动态振荡。在振荡持续过程中,围岩质点振速、应力及位移随时间发生连续性变化,最终回到稳定状态。因此,明晰地下深部采场爆破振动传播特征对于地下采场安全稳定具有重要意义。2 节分析可知,爆源与巷道的空间位置关系对于爆破振动传播特征存在显著影响,针对某一采场爆破,上分层凿岩巷道与本分层凿岩巷道表现出了不一样的爆破振动和能量特征,因此,为了有效分析地下深部采场的爆破振动传播特征,应综合考虑振动方向、巷道结构的综合影响。

为了获取更加丰富且有效的爆破数据,通过现场勘探资料及爆破设计方案,结合铜绿山铜铁矿的生产进度,补充开展了五次现场爆破监测试验,并在本分层凿岩巷道以及上分层凿岩巷道的不同位置进行布点。统计五次爆破试验中各监测点获取的爆破振动结果,如图 8 所示,其中同段别的炮孔装药量集中在 8.5~56.7 kg 范围内。

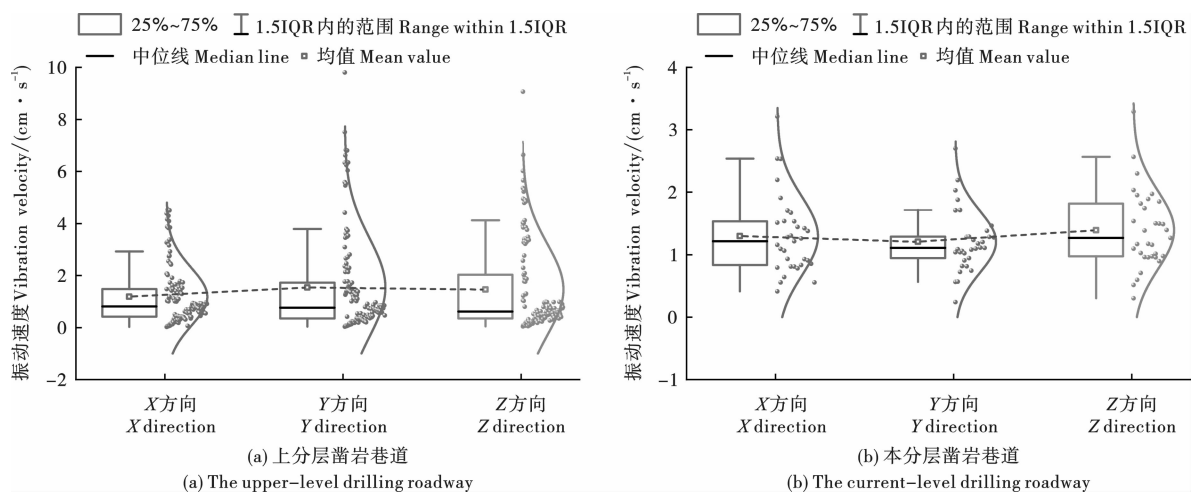


图 8 五次爆破试验中各监测点的爆破峰值振速统计

Fig. 8 Statistics of PPV at each monitoring point in five blasting tests

由图 8 分析可知,针对某一采场爆破,上分层凿岩巷道与本分层凿岩巷道表现出了不一样的爆破振动和能量特征。从各监测点所获取的爆破峰值振速结果上看,位于上分层凿岩巷道的监测点所获取的爆破振动峰值整体要大于同一水平的监测点所获取

的爆破振动峰值,这是由于在上分层凿岩巷道的监测点中,存在数个监测点所布置的位置与爆源的距离相对较小。其中,在位于爆源上一水平巷道的监测点中,X、Y、Z 三轴爆破峰值振速分别集中在 0~4.531 cm/s、0~9.805 cm/s、0~9.063 cm/s,分别计

算  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三轴爆破平均峰值振速,其中  $Y$  方向最大,说明在上分层凿岩巷道的监测点所得结果中, $Y$  方向为爆破主导方向。在本分层凿岩巷道的监测点中, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三轴爆破峰值振速分别集中在  $0 \sim 3.214$  cm/s、 $0 \sim 2.700$  cm/s、 $0 \sim 3.293$  cm/s,分别计算  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三轴爆破平均峰值振速,其中  $Z$  方向最大,说明在本分层凿岩巷道的监测点所得结果中, $Z$  方向为爆破主导方向。

进一步地,为了明晰本分层凿岩巷道及上分层

凿岩巷道的三轴爆破振速衰减特征,利用萨道夫斯基公式(式 3)对不同方向的爆破振动速度进行拟合,如图 9 和 10 所示,进一步明晰爆破振动与爆心距之间的关系

$$PPV = k \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (3)$$

式中: $k$ 、 $\alpha$  为两个与岩体性质相关的系数; $Q$  为最大单段药量; $R$  为爆心距。

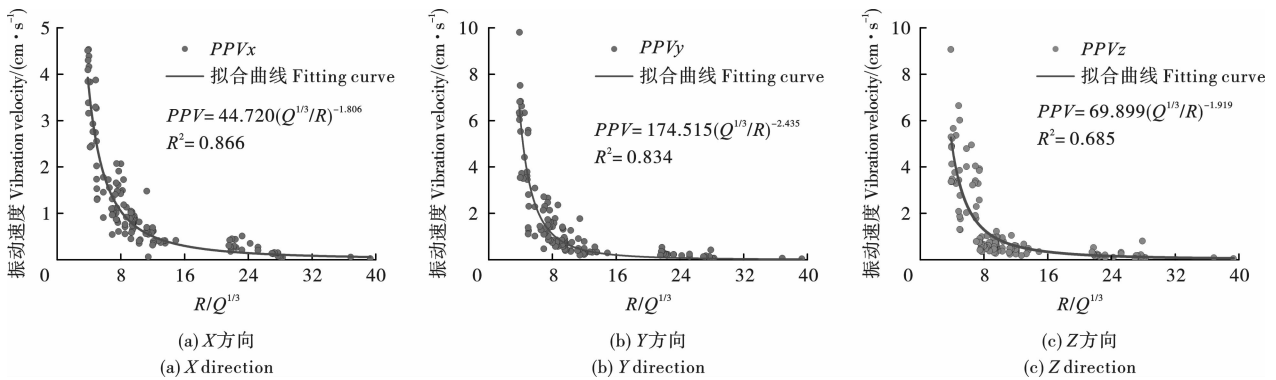


图 9 上分层凿岩巷道的监测点振速拟合结果

Fig. 9 Vibration velocity fitting results of monitoring points in the upper-level drilling roadway

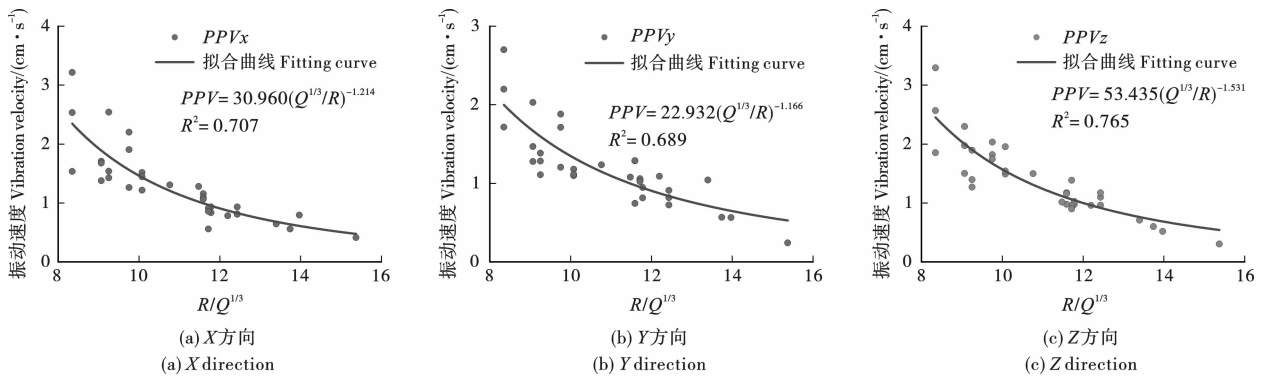


图 10 本分层凿岩巷道的监测点振速拟合结果

Fig. 10 The vibration velocity fitting results of the monitoring points in the current-level drilling roadway

图 9 反应了采场爆破条件下上分层凿岩巷道的三轴爆破振速衰减特征,从图中的相关系数  $R^2$  分析可知,在爆源上一水平巷道的监测点所得爆破峰值振速结果中, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三轴方向爆破峰值振速的拟合结果分别为 0.866、0.834 及 0.685,拟合效果较好。根据图 9 中的  $k$ 、 $\alpha$  值, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三轴方向爆破峰值振速的  $k$  值分别为 44.720、174.515、69.899,这说明了上分层凿岩巷道的爆破峰值振速表现为  $Y$  方向  $>$   $Z$  方向  $>$   $X$  方向的大小关系,而  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三轴方向爆破峰值振速的  $\alpha$  值分别为 1.806、2.435、1.919,这说明了上分层凿岩巷道的爆破峰值振速衰减速率大小关系为  $Y$  方向  $>$   $Z$  方向  $>$   $X$  方向。

图 10 反应了采场爆破条件下本分层凿岩巷道的三轴爆破振速衰减特征,从图中的相关系数  $R^2$  分析可知,在本分层凿岩巷道的监测点所得爆破峰值振速结果中, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三轴方向爆破峰值振速的拟合结果分别为 0.707、0.689 及 0.765,拟合效果较好。根据图 10 中的  $k$ 、 $\alpha$  值, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三轴方向爆破峰值振速的  $k$  值分别为 30.960、22.932、53.435,这说明了本分层凿岩巷道的爆破峰值振速表现为  $Z$  方向  $>$   $X$  方向  $>$   $Y$  方向的大小关系,而  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三轴方向爆破峰值振速的  $\alpha$  值分别为 1.214、2.144、1.531,这说明了本分层凿岩巷道的爆破峰值振速衰减速率大小关系为  $Z$  方向  $>$   $X$  方向  $>$   $Y$  方向。对比本分层凿

岩巷道及上分层凿岩巷道的三轴爆破峰值振速  $k$ 、 $\alpha$  值可知,相较于上分层凿岩巷道的三轴爆破峰值振速,本分层凿岩巷道的三轴爆破峰值振速及其衰减速率整体上更小。

## 4 结论

以大冶有色铜绿山铜铁矿深部开采爆破工程为背景,对比分析上分层凿岩巷道与本分层凿岩巷道监测点所获取的峰值振动速度、振动主频以及爆破能量特征,基于萨道夫斯基公式分析地下采场爆破在上分层凿岩巷道与本分层凿岩巷道的爆破振动传播规律。主要结论如下:

(1)在爆心距相近的条件下,本分层凿岩巷道中#1 的频率成分主要集中在 8~105 Hz 范围内,上分层凿岩巷道中#2 的频率成分主要集中在 4~230 Hz 范围内,相较于低频信号,高频信号更容易受巷道结构影响而发生衰减。上分层凿岩巷道中#3 的频率成分主要集中在 9~65 Hz 范围内,应力波在岩体介质传播的过程中高频信号更容易出现衰减。

(2)在爆心距相近的条件下,上分层凿岩巷道获取的各段别最大瞬时能量与本分层凿岩巷道相近,但是上分层凿岩巷道获取的爆破累积能量明显大于本分层凿岩巷道,这是由于上分层凿岩巷道的各段别瞬时能量持续时间要大于本分层凿岩巷道。

(3)相较于上分层凿岩巷道的三轴爆破峰值振速,本分层凿岩巷道的三轴爆破峰值振速及其衰减速率整体上更小。

### 参考文献 (References)

- [1] 安龙,韩琳,王智,等. 阶段采场“品”字形无井切槽爆破机理研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024,45(11):1612-1620,1628.
- [1] AN Long, HAN Lin, WANG Zhi, et al. Research on blasting mechanism of “pin”-shaped slotting without raise in sublevel stope [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2024, 45(11): 1612-1620, 1628. (in Chinese)
- [2] 常庆粮,高乐,范建国,等. 深井厚煤层多分层充填体-围岩协同承载机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2025,42(3):510-520.
- [2] CHANG Qing-liang, GAO Le, FANG Jian-guo, et al. Collaboration load-bearing mechanism between the filling body and the surrounding rock in multi-layer mining of thick coal seams in deep mines [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2025, 42(3): 510-520. (in Chinese)
- [3] 姜立春,李英浩,钟起鹏. 爆破垂直应力波扰动下含软弱夹层石灰岩矿柱动力响应机制[J/OL]. 工程科学与技术:1-15. [2025-08-26]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.tb.20250616.1757.005>.
- [3] JIANG Li-chun, LI Ying-hao, ZHONG Qi-peng. Dynamic response mechanisms of limestone pillars with weak interlayers under vertical stress wave disturbance of blasting [J/OL]. Advanced Engineering Sciences; 1-15. [2025-08-26]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.tb.20250616.1757.005>. (in Chinese)
- [4] 陈璐,余茜,罗容,等. 柱式采空区矿柱失稳诱导边坡滑塌机制研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024,6(5):148-163.
- [4] CHEN Lu, YU Qian, LUO Rong, et al. Study on slope failure mechanism induced by pillar instability above room and pillar goaf [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(5): 148-163. (in Chinese)
- [5] 尤元元,杨仁树,左进京,等. 基于相似模型和 PBM-FEM-DEM 耦合算法的大结构采场爆破参数优化[J]. 中国矿业大学学报, 2025,54(4):796-810.
- [5] YOU Yuan-yuan, YANG Ren-shu, ZUO Jin-jing, et al. Optimization of blasting parameters in large structure mining sites based on similarity models and PBM-FEM-DEM coupling algorithm [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(4): 796-810. (in Chinese)
- [6] 蒙贤忠,夏宇馨,周传波,等. 土-岩地层水平孔爆破诱发振动传播特征及预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2025,44(3):737-751.
- [6] MENG Xian-zhong, XIA Yu-qing, ZHOU Chuan-bo, et al. The propagation characteristics and prediction of vibration induced by horizontal-hole blasting in soil-rock strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(3): 737-751. (in Chinese)
- [7] 侯俊旭,杨天鸿,赵永,等. 基于微震监测及岩体损伤模型的露天-地下联合开采岩移过程数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024,43(S1):3243-3256.
- [7] HOU Jun-xu, YANG Tian-hong, ZHAO Yong, et al. Numerical simulation of rock moving process of combined open-pit and underground mining based on microseismic monitoring and rock mass damage model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(S1): 3243-3256. (in Chinese)
- [8] 常聚才,齐潮,殷志强,等. 爆破扰动高应力巷道围岩力学响应特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2024,52(6):1-13.
- [8] CHANG Ju-cai, QI Chao, YIN Zhi-qiang, et al. Study on the dynamic response characteristics of surrounding rock in high stress tunnel under blasting disturbance [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 1-13. (in Chi-

- nese)
- [9] 朱建波,郑福润,谢和平,等. 煤矿矿震应力波传播衰减理论模型及应用研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2025,7(2):22-35.
- [9] ZHU Jian-bo,ZHENG Fu-run,XIE He-ping,et al. A theoretical model of stress wave propagation attenuation in mining-induced seismicity and field application[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(2):22-35. (in Chinese)
- [10] 薛田喜,徐鸿鹏,张旭飞,等. 进路式采矿爆破振动波在充填体内的传播规律研究[J]. 矿业研究与开发,2023,43(7):42-49.
- [10] XUE Tian-xi,XU Hong-peng,ZHANG Xu-fei,et al. Study on propagation law of blasting vibration waves in filling body during drift mining[J]. Mining Research and Development,2023,43(7):42-49. (in Chinese)
- [11] 贾志伟,帅金山,胡 勇. 复杂充填体对爆破地震波传播特性影响研究[J]. 爆破,2022,39(3):172-180.
- [11] JIA Zhi-wei,SHUAI Jin-shan,HU Yong. Study on influence of complex filling body on blasting seismic wave propagation characteristics [J]. Blasting, 2022, 39(3): 172-180. (in Chinese)
- [12] 乔国栋,刘泽功,高 魁,等. 爆破震动作用下高地应力巷道动力响应特征与稳定性研究[J]. 振动工程学报,2024,37(3):414-422.
- [12] QIAO Guo-dong,LIU Ze-gong,GAO Kui,et al. Characteristics and stability of dynamic response of a high in-situ stress roadway under blasting vibration[J]. Journal of Vibration Engineering,2024,37(3):414-422. (in Chinese)
- [13] 唐灵明,黄 翔,李红明,等. 采矿爆破振动主频率在岩溶区衰减规律现场试验研究[J]. 中国岩溶,2024,43(2):454-462.
- [13] TANG Ling-ming,HUANG Xiang,LI Hong-ming,et al. Field experiment on the attenuation rule of main frequency for mining blasting vibration in the karst area [J]. Carsologica Sinica,2024,43(2):454-462. (in Chinese)
- [14] 赵尔丞,魏昭君,沈彦丞,等. 爆破振动对龙首矿露天转地下安全顶柱稳定性影响研究[J]. 爆破,2024,41(2):75-85,126.
- [14] ZHAO Er-cheng,WEI Zhao-jun,SHEN Yan-cheng,et al. Study on effect of blasting vibration on stability of safety roof pillar for open-pit to underground transition in Longshou mine [J]. Blasting, 2024, 41(2): 75-85, 126. (in Chinese)

(上接第 57 页)

- [10] 刘连生,夏胜明,曾 鹏,等. 基于工程地质分区的某钨矿爆破参数优化[J]. 工程爆破,2024,30(4):42-50.
- [10] LIU Lian-sheng,XIA Sheng-ming,ZENG Peng,et al. Optimization of blasting parameters based on engineering geological zoning in a tungsten mine [J]. Engineering Blasting,2024,30(4):42-50. (in Chinese)
- [11] LI Xu-dong,LIU Ke-wei,YANG Jia-cai,et al. Effects of in-situ stress on rock cracking in presplit blasting[J]. Computers and Geotechnics,2024,Volume 168:106124, ISSN 0266-352X.
- [12] HUO Xiao-feng,YU Zhi,QIU Xian-yang,et al. Investigation of water-coupling presplit blasting considering the role of stress wave parameters[J]. Engineering Fracture Mechanics,2025,Volume 321:111067.
- [13] YANG Li-yun,CHEN Si-yu,YANG Ai-yun,et al. Numerical and experimental study of the presplit blasting failure characteristics under compressive stress[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, Volume 149:106873.
- [14] 杨志龙,钟冬望,白文良,等. 复杂岩性隧道超前切割爆破方法研究[J]. 爆破,2024,41(2):23-31.
- [14] YANG Zhi-long,ZHONG Dong-wang,BAI Wen-liang,et al. Research on advanced cutting blasting method for tunnels in complex lithology[J]. Blasting,2024,41(2): 23-31. (in Chinese)
- [15] 杨忠武. 浅埋隧道爆破周边预裂缝减振法减振效果探究[J]. 采矿技术,2019,19(2):135-137,141.
- [15] YANG Zhong-wu. Investigation on the vibration reduction effect of perimeter pre-splitting crack method for blasting vibration control in shallow-buried tunnels [J]. Mining Technology,2019,19(2):135-137,141. (in Chinese)
- [16] 吴 波,王汪洋,徐世祥,等. 聚能预裂爆破技术在林家岙隧道中的应用[J]. 工程爆破,2020,26(3):55-62.
- [16] WU Bo,WANG Wang-yang,XU Shi-xiang,et al. Application of shaped charge presplitting blasting technology in Linjia' ao Tunnel [J]. Engineering Blasting, 2020, 26(3):55-62. (in Chinese)
- [17] 范留明,李 宁. 软弱夹层的透射模型及其隔震特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005(14):2456-2462.
- [17] FAN Liu-ming,LI Ning. Study on the transmission model and seismic isolation characteristics of weak interlayers [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005(14):2456-2462. (in Chinese)