

基于小波包理论研究地下断层对爆破振动传播的影响

贾皓琦¹, 黄永辉², 张智宇¹

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 昆明理工大学 电力工程学院, 昆明 650093)

摘要: 为了研究云南某金属地下矿山断层对爆破振动波传播的影响, 选用含有断层区域 3736 北部中段区域、无断层区域 3736 南部中段区域布置测点。以云南某金属地下矿山真实采集爆破振动数据为研究对象, 基于小波包变换、HHT 算法、STFT 算法开展爆破振动波衰减规律的研究。结果表明: 云南某地下金属矿山振动波经过断层前瞬时能量幅值达到 10×10^{-4} dB, 经过断层后瞬时能量幅值达到 1.5×10^{-4} dB, 瞬时能量幅值衰减 85%; 断层在一定程度上会扰乱振动波能量分布情况, 延缓振动能量迅速上升; 振动波经过断层后低频能量衰减 60%, 高频能量衰减 71%, 总体能量功率衰减 77%, 无断层区域高频能量衰减 18%, 低频能量衰减 17%, 总体能量功率衰减 15%; 爆破振动波经过断层后, 过滤大量高频能量, 能量总体分布呈现向低频域方向发展的趋势。

关键词: 爆破振动; 地下断层; 振动主频; 小波包变换

中图分类号: TD853

文献标志码: A

文章编号: 1671-4172(2024)02-0035-10

Influence of underground fault on blasting vibration propagation based on Wavelet Packet Theory

JIA Haoqi¹, HUANG Yonghui², ZHANG Zhiyu¹

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

2. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: To investigating the influence of faulting on blast vibration wave propagation in an underground metal mine in Yunnan, the measuring points are arranged in the north and middle part of 3736 and the south and middle part of 3736, respectively. Using as a research object the actual blast vibration data collected from an underground metal mine in Yunnan, based on the wavelet packet transform, the HHT algorithm, and the STFT algorithm, the attenuation law of the blast vibration wave is investigated. The results show that the instantaneous energy amplitude of the vibration wave of a subsurface metal mine in Yunnan reaches 10×10^{-4} dB before the fault and 1.5×10^{-4} dB after the fault, and the instantaneous amplitude of the energy attenuates by as much as 85%. This fault will perturb the energy distribution of the vibration wave to some degree and retard the rapid rise of the vibration energy. After the vibration wave passes through the fault, the low-frequency energy attenuates by 60%, the high frequency energy by 71%, the total energy power by 77%, the high frequency energy by 18%, the low frequency energy by 17%, and the overall energy power by 15%. Once the blast vibration wave has passed through the defect, a large amount of high-frequency energy is filtered out, and the overall energy distribution exhibits a trend toward the low-frequency domain.

Key words: blasting vibration; underground fault; main frequency of vibration; wavelet packet transform

收稿日期: 2023-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52064025)、(52164009); 云南省重大科技项目(202202AG050014)

第一作者: 贾皓琦(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为爆破振动信号处理。

通信作者: 张智宇(1973—), 男, 硕士, 博士生导师, 研究方面为工程爆破及岩石破碎。

在地下矿山中, 不同区域存在各不相同的断层, 这些断层会对爆破振动波传播产生严重影响^[1-3], 同时在井下爆破作业中, 不可避免地会产生地震波、冲击波和飞石等因素, 这些因素会对矿山地下构筑物的承载能力和稳定性造成不利影响。所以需要科学方法来判断出爆破振动是否达到安全标准, 以

便及时采取必要措施予以控制。比如张声辉等^[4]通过 EMD 算法对爆破振动信号进行信号主成分提取,提高信号的时频特征,以准确评价构筑物的爆破振动。汪平等^[5]通过 HHT 分析了小间距巷道爆破时,相邻的巷道爆炸洞壁处振动能量大部分集中于 40 Hz。何理等^[6]对挖掘巷道上方的边坡进行了爆破振动监测,并进行了小波分析,结果表明随着距离的增加,能量逐渐消失,呈现出先急速后平缓的变化趋势。刘小乐等^[7]通过 HHT 算法、边际谱、瞬时能量谱对爆破振动信号进行分析,发现爆破振动信号频率主要集中在 0~200 Hz。国内大部分学者^[8-11]通过 EMD 算法、EEMD 算法、HHT 算法等对爆破振动信号进行能量研究,但是 EMD 算法存在明显的缺点,比如端点混叠效应、模态混叠效应等并不能很好的对爆破振动信号进行研究分析,而且在大部分的爆破振动监测中,只将振动幅值最大速度作为评判安全依据,忽视了爆破振动能量在频域上的分布情况。

为了解决上述 EMD 等算法会出现端点混叠效应以及不能很好地分析爆破振动能量在频域上的分布情况等问题,采用小波包变换算法解决这类问题。目前,大部分学者逐渐采用小波包变换、改进的小波包算法以及分形理论等方法对爆破振动信号的频率、能量分布特征进行研究。由最早的采用质点振动速度幅值单一因素,发展到结合振动信号的频率、能量等因素综合评价的方法,从而可以更加精准地评价爆破振动危害。

云南某地下矿山节理岩体裂隙发育异常,且受到断层影响,对爆破振动波的传播规律有着一定程度的影响。本文以云南某地下金属矿山为背景,对断层附近区域进行测振实验,借助小波包变换、HHT 算法、STFT 算法研究断层对爆破振动波传播的影响。

1 小波包变换

1.1 小波包变换原理

小波包变换分析就是将小波函数处于不同分解水平上窗口尺寸随分解水平而变化的情况下,进行信号时域局部分析。

$$\phi(t) \in L^2(R) \quad (1)$$

式中: $\Psi(t)$ 为一个基本小波函数或母小波函数,其傅里叶变换为 $\Psi(\omega)$; $L^2(R)$ 为能量有限的信号空域。

当 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足允许条件时可以得到:

$$C_{\psi} = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \mu \quad (2)$$

将 $\Psi(t)$ 滑移和伸展得以取得 1 组小波。对于接连不断的情形,小波为:

$$\phi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) (a, b \in R, a \neq 0) \quad (3)$$

式中: a 为尺寸因素; b 为伸展因素。对于失散情形,小波为:

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad (4)$$

由式(3)和(4)可以看出:在爆破振动领域处理振动信号用的最多的小波基为 db8,因此本文选用的小波基为 db8。

子频带能量分布:将被剖析信号拆分到第 n 层,假定与 $S_{n,j}$ 呼应的能效为 $E_{n,j}$,则有:

$$E_{n,j} = \int |S_{n,j}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^m |x_{j,k}|^2 \quad (5)$$

式中: $X_{j,k}$ 为重组信号 $S_{n,j}(t)$ 的散落点的波谱幅值; $j=0,1,2,\dots,2^n-1$; $k=0,1,2,\dots,m$; m 为信号的散落取样基数。

设被分析信号的总能量为 E_0 ,则有:

$$E_0 = \sum_{j=0}^{2^n-1} E_{n,j} \quad (6)$$

每个频谱的能量占被解析信号总能量的比率为:

$$\beta_j = \frac{E_{n,j}}{E_0} \times 100\% \quad (7)$$

由式(5)~(7)可获得信号经过小波包分解之后不同子频带内的能量情况,进而可发现爆破振动信号传播时能量变换的规律。

1.2 HHT 分析法

希尔伯特变换(HHT)是对非稳态爆破振动信号做时频分析的一种方法,突破了傅里叶变换分析方法的局限性。

$$x_i(t) = c_i(t) \quad (8)$$

$$Y_i(t) = \frac{1}{\pi} PV \int_R \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (9)$$

式中: PV 为柯西主分量; $x_i(t)$ 为爆破振动的分量; $c_i(t)$ 为振动信号的第一个分量。

将振幅 $H(\omega, t)$ 对时间 T 积分,得到 Hilbert 的边际谱 $h(\omega)$,如下所示:

$$h(\omega) = \int_{\omega}^T H(\omega, t) dt \quad (10)$$

式中: ω 为频率; $H(\omega, t)$ 为爆破振动信号的振幅。

Hilbert 的瞬时能量 $IE(t)$ 是将振幅 $H(\omega, t)$ 的平方对频率积分得到, 具体的表达式如下所示:

$$IE(t) = \int_{\omega} H^2(\omega, t) d\omega \quad (11)$$

2 爆破振动监测及分析

2.1 工程背景

云南某地下金属矿山位于香格里拉, 其岩体以块状石英二长斑岩、石英闪长玢岩为主, 岩石坚硬, 中等稳固, 围岩稳定性较好。但局部区域受多期次地质构造发育影响, 岩石破碎, 工程地质条件较差, 对生产影响较大。该区域的地层岩性呈现出块状岩类的特征, 岩石硬度主要表现为坚硬, 而局部破碎带则呈现出较为明显的发育趋势, 岩石的破碎程度也相对较高。位于 3 660~3 736 中段的 NW 断层, 其实际控制走向长超过 496 m, 延深也超过了 120 m。断层走向呈 NW 向、倾向于 NE、倾角 $61^{\circ} \sim 88^{\circ}$, 其构造形态以正断层为主, 局部发育逆冲断层及走滑

断裂带, 并伴有少量正花状或斜列式断层和平行于主压应力方向延伸的逆冲切槽。断层破碎带较紧密, 宽 0.2~3 m, 倾斜断距不明确, 充填物以围岩碎屑及围岩角砾为主, 黑色断层泥、石英、碳酸盐及泥质胶结。这些断层会严重阻碍爆破振动波传播, 造成测得的爆破振动数据不够精确, 从而导致爆破最大振动速度拟合出来的爆破安全最大药量有误差。

为了分析断层对爆破振动波传播的影响, 对含有断层区域的 N2S、N1N 巷道和无断层区域 S12S、S13N 巷道分别放置总共四台爆破振动测试仪, 此 2 次爆破区域皆为拉底爆破, 具体布置方位见图 1。含有断层区域的爆区 N2N 巷道炸药总药量为 4 500 kg, 最大单响装药量为 1 175 kg, 一号机放置在断层前, 二号机放置在断层后, 具体爆破振动监测成果见表 1。无断层区域的爆区 S12N 巷道炸药总药量为 2 295 kg, 最大单响装药量为 579.4 kg, 三号机放置于无断层区域前, 四号机放置于无断层区域后, 具体爆破振动监测成果见表 2。

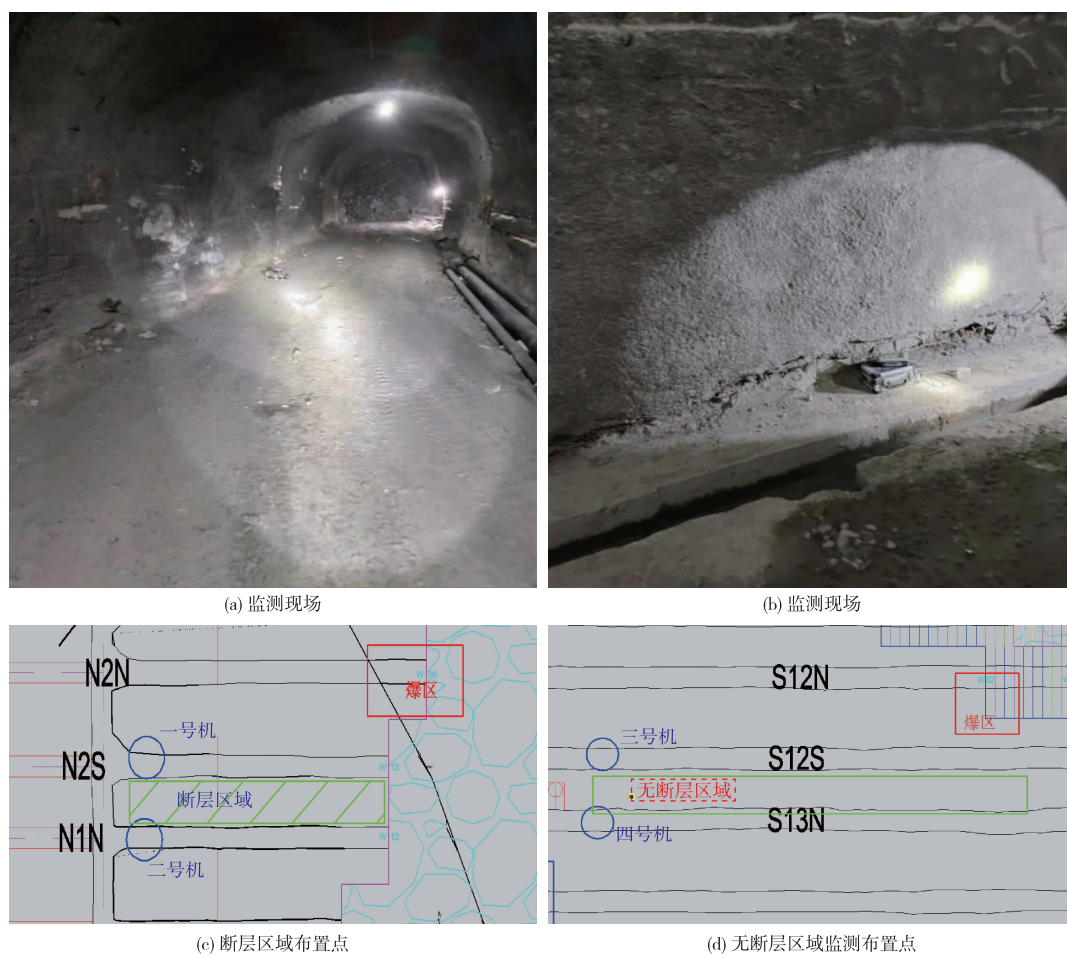


图 1 现场及测点图

Fig. 1 Site and measurement point map

表 1 断层区域爆破振动监测成果汇总表

Table 1 Summary of blasting vibration monitoring results in fault area

测点编号	距离/m	总药量/kg	最大单响装药量/kg	最大振动速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	主振频率/Hz	备注
1	50	4 500	1 175	7.768	41.88	水平径向
				11.484	44.69	水平切向
				5.584	55.94	垂直
2	100			4.524	21.39	水平径向
				8.050	81.63	水平切向
				4.003	66.12	垂直

表 2 无断层区域爆破振动监测成果汇总表

Table 2 Summary of blasting vibration monitoring results in fault-free area

测点编号	距离/m	总药量/kg	最大单响装药量/kg	最大振动速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	主振频率/Hz	备注
3	100	2 295	579.4	0.749	31.75	水平径向
				0.516	31.50	水平切向
				0.752	86.02	垂直
4	150			0.638	53.69	水平径向
				0.442	42.33	水平切向
				0.388	91.95	垂直

2.2 爆破振动波能量分析

由表 1、表 2 可知,断层区域 X 轴方向最大振动速度分别为 7.768、4.524 cm/s ,减少了 42%,无断层区域 X 轴方向最大振动速度分别为 0.749、0.638 cm/s ,减少了 15%,由此可推断出断层区域能大幅度减少振

动速度。

为了分析地下断层对爆破振动波传播的影响,选用含有断层区域的一号机、二号机和无断层区域的三号机、四号机作为研究对象进行分析,具体测振波形见图 2。

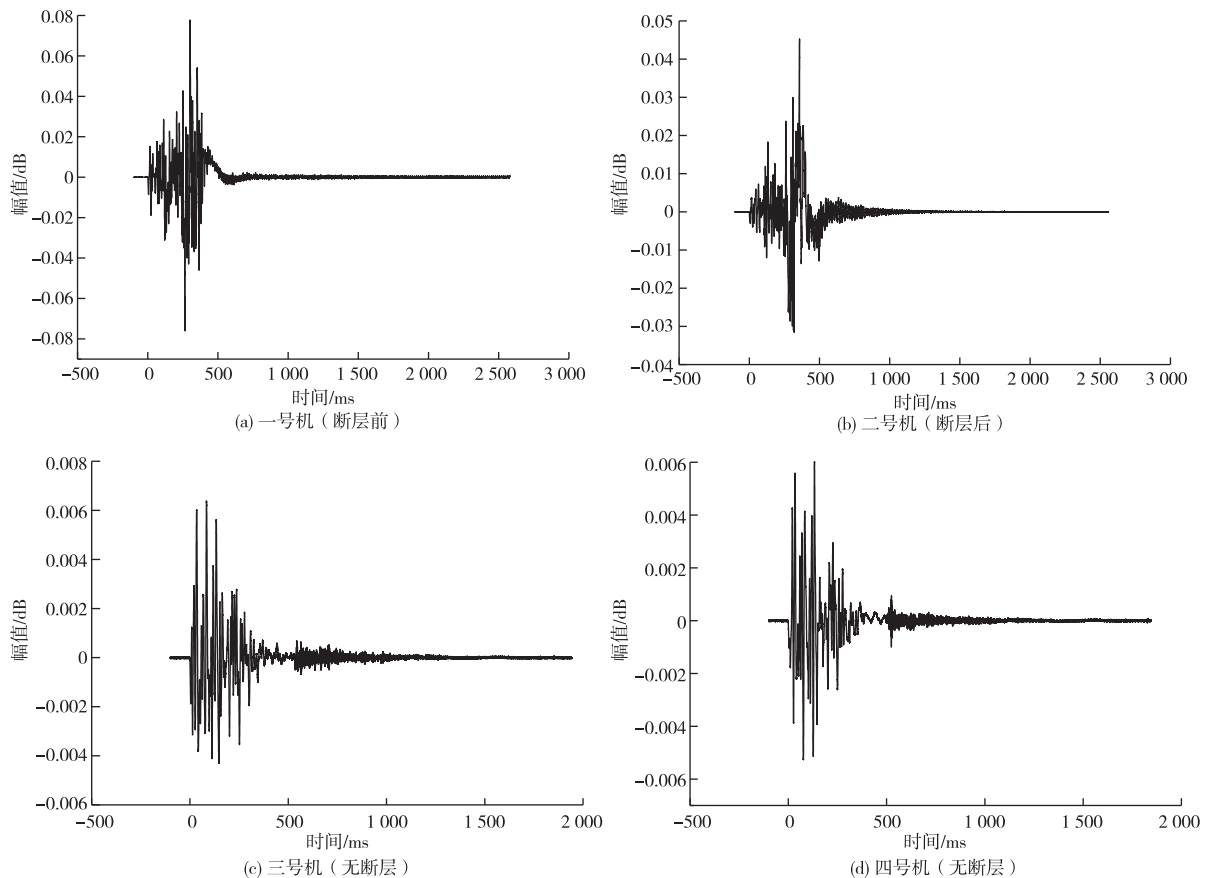


图 2 现场测点波形

Fig. 2 Waveform of on-site measurement points

由图2可知,四台爆破测振仪振动波形时间均在2 000 ms以内,其波形紧密程度不一。通过小波

算法对任意一个振动波形进行分解,得到10个模态分量IMF,具体情况见图3。

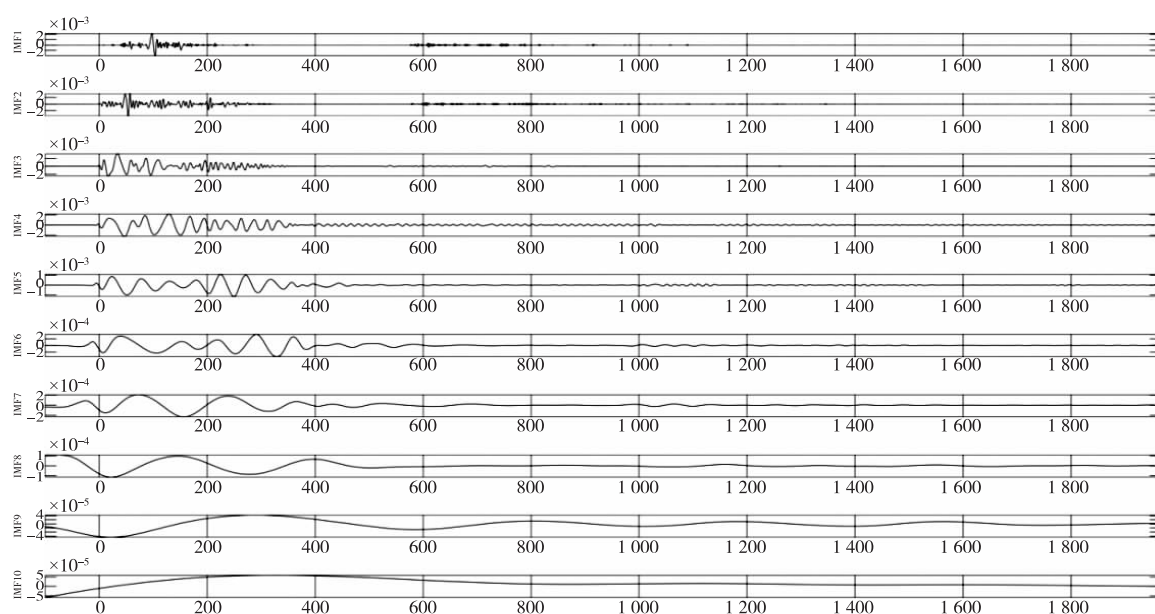


图3 IMF分量

Fig. 3 IMF component

由图3可知,这些模态分量IMF在局部频带区间上呈现出由高到低的有序排列,同时表现出高频、低幅值和波长短等特征,这些成分是原始信号在复杂环境监测条件下受到噪声干扰的重要组成部分,这充分证明小波变换算法能够有效地反映信号的局部性特征。

当爆破振动信号频率超出爆破振动测试仪的最小工作频率后,则可能引起信号失真。因此,当采用小波包对爆破振动信号进行分解时,其分解层数要

根据爆破振动测试仪的工作频带来确定^[15-16]。此次爆破振动测试仪工作频率为16 kHz,为了进一步分析爆破振动能量衰减的研究,本文运用小波包算法对爆破振动信号进行九层的小波分解,选用db8作为本次分析的小波基,根据Nyquist定理,其频率为8 kHz,小波为九层分解,就有512个小波包,则最低频带为0~15.62 Hz。根据小波包变换算法,分别把4个振动波形分解成8个频率段,每个频率段的能量占比具体情况见表3、表4。

表3 含有断层区域能量分布情况

Table 3 Energy distribution in areas with faults

频率段序号	频率段/Hz	一号机(断层前)/%	二号机(断层后)/%	变化幅度/%
1	0~15.62	12.72	17.80	+5.08
2	15.62~31.20	9.79	14.44	+4.65
3	31.2~46.87	16.06	8.00	-8.06
4	46.87~62.50	14.28	31.32	+17.04
5	62.50~78.12	12.64	12.79	+0.15
6	78.12~93.75	22.62	9.94	-12.68
7	93.75~109.37	6.90	4.23	-2.67
8	109.37~125.00	4.98	1.49	-3.49

由表3可知,在46.87~62.50 Hz频率段一、二号机能量占比分别为14.28%、31.32%。

二号机比一号机能量占比高出17.04%;在78.12~93.75 Hz频率段一、二号机能量占比为22.62%、9.94%。二号机比一号机能量占比低

12.98%;一号机在第5~6频率段所增加能量差最大,差为9.98%,6~8频率段能量迅速减少,二号机在第3~4频率段能量占比差最大,差为23.32%;在5~8频率段能量占比迅速减少;一、二号机在第4频率段能量差别最大,差为17.04%。

表4 无断层区域能量分布情况

Table 4 Energy distribution in fault-free area

频率段序号	频率段/Hz	三号机(无断层)/%	四号机(无断层)/%	变化幅度/%
1	0~15.62	8.06	7.69	-0.37
2	15.62~31.20	10.63	10.43	-0.20
3	31.20~46.87	14.55	17.68	+3.13
4	46.87~62.50	22.95	21.91	-1.04
5	62.50~78.12	19.16	20.34	+1.18
6	78.12~93.75	19.77	16.55	-3.32
7	93.75~109.37	3.77	4.52	+0.75
8	109.37~125.00	1.11	0.88	-0.23

由表4可知,三、四号机在46.87~62.50Hz频率段能量均迅速达到最大能量占比,分别为22.95%、21.91%,而后随着爆破振动主频增加能量占比逐渐减小;三、四号机均在第4频率段能量占比达到最大,而一、二号机分别在第6、4频率段能量占比达到最大;一、二号机能量占比变化幅度较三、四号机也不同。通过把4个爆破振动波形的每条子频带能量占比画成折线图,可以很明显看出不同爆心距的爆破振动波形能量运动趋势,具体见图4。

由图4可知,一号机能量占比在第1~5频率段

缓慢上升,在第六频率段能量占比达到最大;二号机能量占比在第1~5频率段不稳定,在第4频率段能量占比达到最大;三、四号机在达到最高能量占比前,其能量占比保持缓慢的速度增加,在第4频率段能量占比均达到最高,而后能量占比均迅速减小;三、四号机能量分布较为集中,而二号机能量集中在第3、4、5频率段,一号机能量分布较为均匀。

上述可知,爆破振动经过断层区域时,断层在一定程度扰乱振动能量分布,加快振动能量在短时间迅速上升并达到最大值。

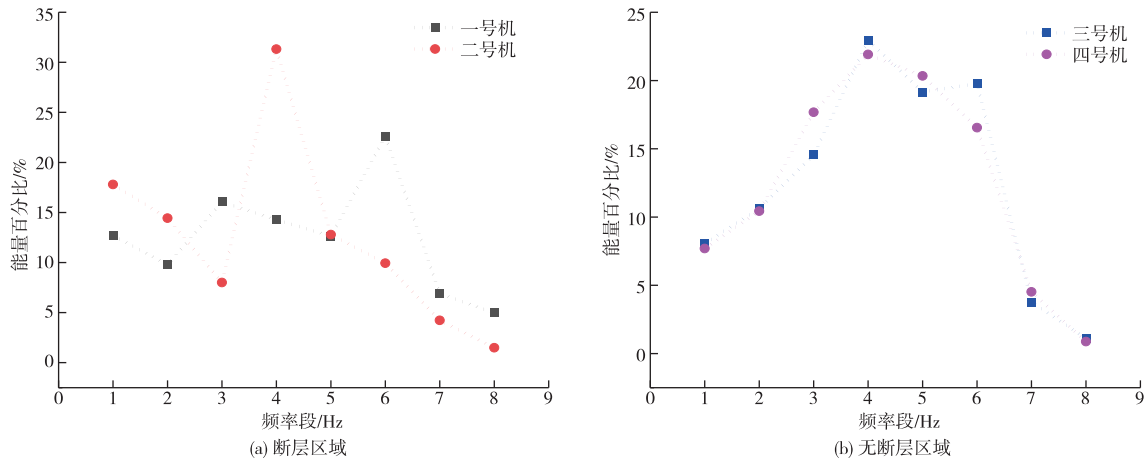


图4 能量运动趋势

Fig. 4 Trend of energy movement

2.3 爆破振动波频谱分析

HHT方法在信号处理和故障诊断中被广泛应用,该方法由小波包分解和希尔伯特-黄变换两部分组成。小波包分解可以将信号分解成多个子带,从而获取固有模态函数(IMF)。IMF是原始信号的本征模态,可以反映出信号的局部特征。希尔伯特-黄变换可以将IMF转换成瞬时频率和能量值,进一步分析其时变性和频域特征,具体见图5、6。

由图5边际谱可知,断层区域、无断层区域振动能量均分布在0~100 Hz。一号机瞬时能量幅值达到 10×10^{-4} dB,其整体能量分布在频域上相对较窄;二号机瞬时能量幅值达到 1.5×10^{-4} dB,其整体能量分布在频域上相对较宽;三号机瞬时能量幅值达到 15×10^{-4} dB;四号机瞬时能量幅值达到 2×10^{-4} dB以上。三、四号机整体能量在频域上分布较宽。

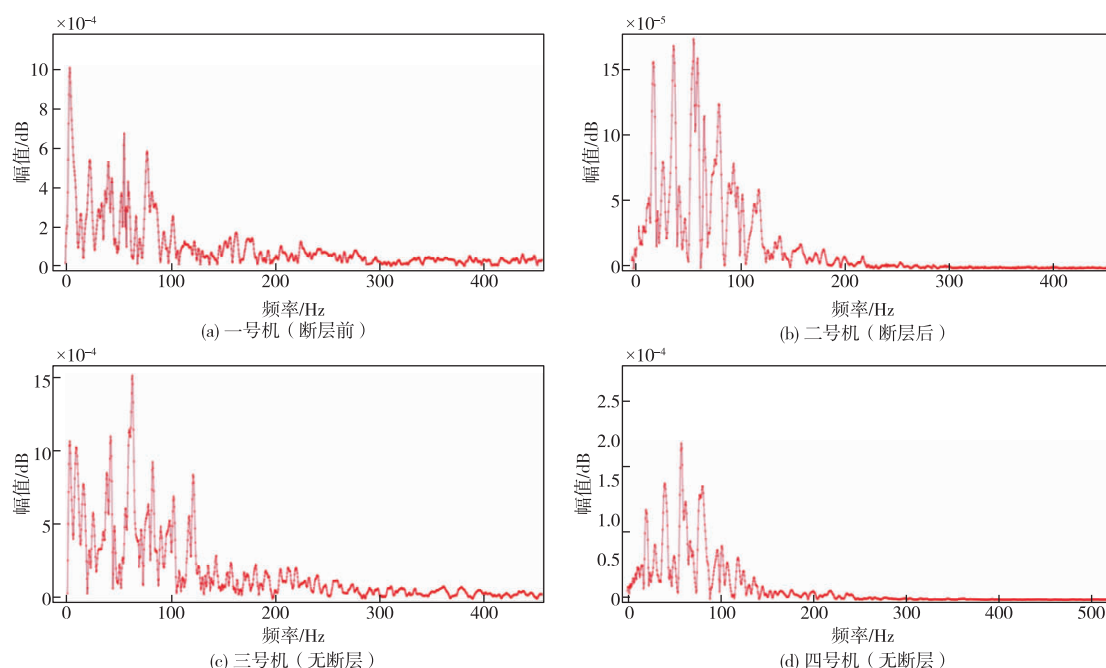


图5 边际谱

Fig. 5 Marginal spectrum

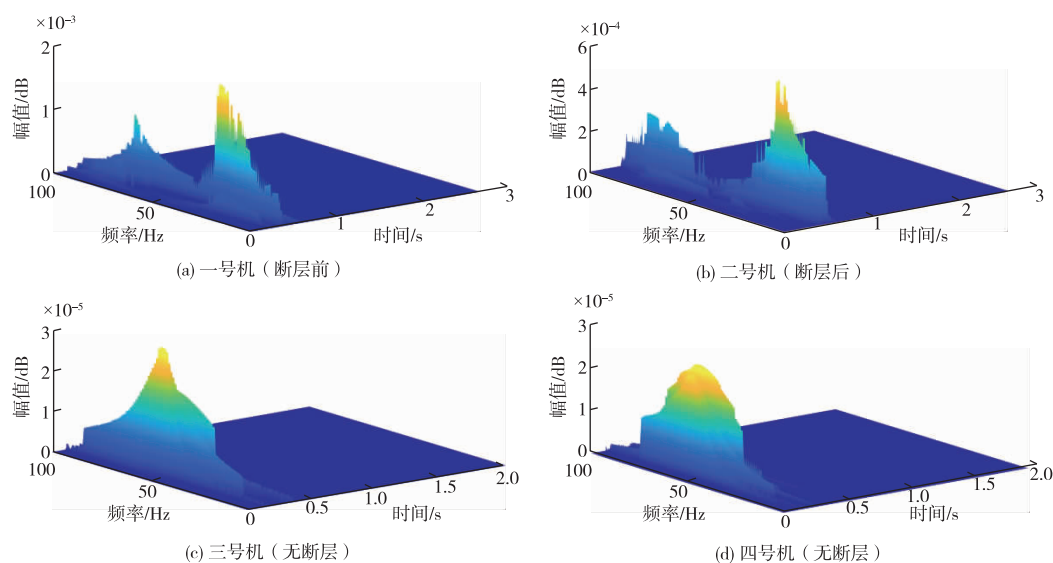


图6 能量三维图

Fig. 6 Energy three-dimensional diagram

由图 6(a)、(b)可知,爆破振动能量主要分布在 0~50 Hz,爆破振动波经过地下断层以后能量幅值大幅度降低,频域上分布较宽。爆破振动波高频能量没有经过地下断层前能量幅值为 2.3×10^{-6} dB,经过地下断层后能量幅值衰减到 6.5×10^{-7} dB,爆破振动波低频能量没有经过地下断层前能量幅值为 6.2×10^{-7} dB,经过地下断层以后能量衰减到 2.5×10^{-7} dB;振动波经过地下断层后,能量在低频域上分布更广,高频能量衰减 71%,低频能量衰减 60%。

这是由于爆破振动波经过断层间的填充物质、破碎带对振动波高频能量具有过滤作用,使振动波波长变长,波形拉宽,频域能量往低频发展。

由图 6(c)、(d)可知,爆破振动波高频能量没有经过无地下断层前能量幅值为 3.07×10^{-5} dB,经过无地下断层后能量幅值衰减到 2.49×10^{-5} dB,爆破振动波低频能量经过无地下断层前能量幅值为 1.03×10^{-5} dB,经过无地下断层以后能量衰减到 0.85×10^{-5} dB;爆破振动波经过无断层区域后,其

高频能量衰减 18%, 低频能量衰减 17%。

2.4 爆破振动波功率谱分析

短时傅里叶变换(STFT)就是时频分析方法之一,该方法把信号划分为时间域内的几个短时段,并在每一个短时段内对窗函数加窗,然后进行傅里叶变换以获得各个时刻的频率分量。STFT 算法比离散傅里叶变换及连续傅里叶变换有更高的时间分辨率及频率分辨率。为进一步研究爆破振动波能量衰减规律,采用 STFT 算法对含有断层区域的一、二号机和无断层区域的三、四号机分别进行运算,具体见图 7、图 8。

图 7 中的能量是指归一化的能量,其可以直观

看出振动信号瞬间形态特征,并且可以清晰看出爆破振波信号随着时间、频率特殊分布。由图 7(a)、(b)可知,最大能量功率出现在 0~0.3 s,一号机最大能量功率为 10.07 dB/Hz,二号机最大能量功率为 2.35 dB/Hz,爆破振动波在经过地下断层后其总体能量功率衰减 77%。由图 7(c)、(d)可知,四号机能量功率比三号机衰减 15%。对图 7(b)、(d)进行对比,看出含有断层区域爆破振动功率较无断层区域爆破振动功率减小速度更快。

为了使振动波形中的能量功率趋势表现得更清晰,使用数据处理软件绘制出功率趋势图,具体见图 8。

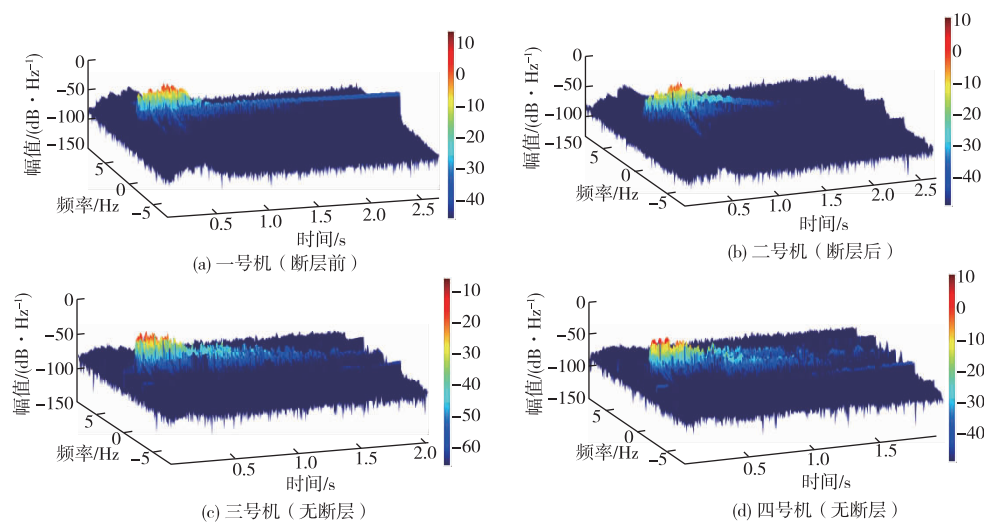


图 7 功率谱密度三维图

Fig. 7 Three dimensional diagram of power spectral density

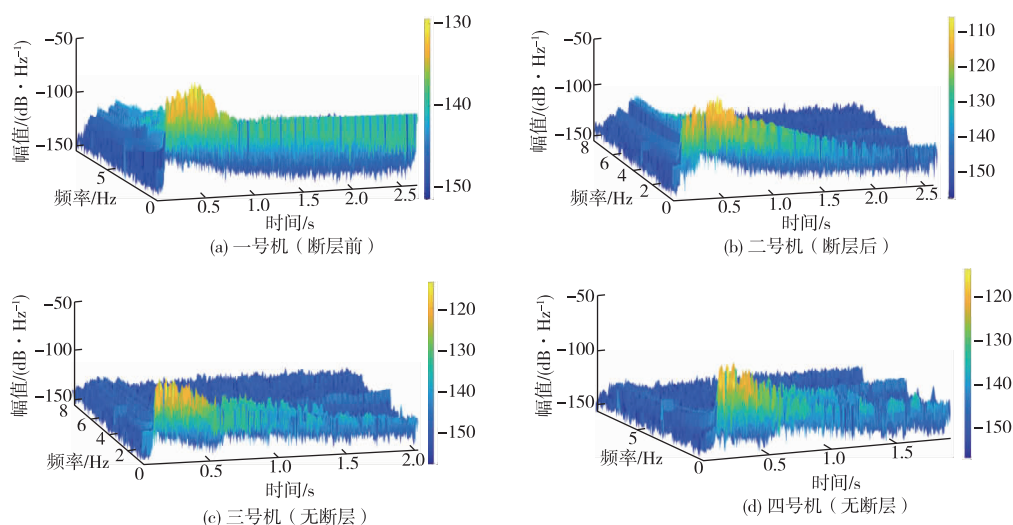


图 8 功率趋势图

Fig. 8 Power trend chart

由图 8(a)、(b)可知爆破振动波在经过地下断层前后的能量功率运动趋势,从图 8(a)可以看出,爆破振动经过断层前能量随着时间的流逝保持平稳状态逐渐减小,从图 8(b)可以看出,爆破振动波在经过地下断层后能量衰减十分明显并且衰减速度迅速增大,清楚看到断层对爆破振动传播的影响;由图 8(c)、(d)可知,爆破振动波随着时间增加,其功率迅速减小,并且三、四号机衰减速度几乎相同;对图 8(b)、(d)进行对比,可以看出断层区域能够加速爆破振动功率衰减速度。

上述可知,断层能够很大程度上减少爆破振动波的能量,并且过滤高频能量作用效果十分明显,断层也能够影响爆破振动能量分布规律,使振动能量低、高频域分布较均匀转变为低频域分布较宽且逐渐向低频域发展的趋势。

3 结论

1) 振动波经过断层前瞬时能量幅值达到 10×10^{-4} dB,经过断层后瞬时能量幅值达到 1.5×10^{-4} dB,瞬时能量幅值衰减 85%;断层扰乱振动波能量分布情况,加快振动能量在短时间内迅速上升。

2) 断层对爆破振动波的能量衰减律作用十分明显,爆破振动波经过断层后低频能量衰减 60%,高频能量衰减 71%,总体能量功率衰减 77%;无断层区域高频能量衰减 18%,低频能量衰减 17%,总体能量功率衰减 15%。

3) 断层可以阻碍大量高频振动能量,振动波经过断层前边际谱波峰较少,频带较窄,但经过断层后边际谱波峰增加,频带变宽,出现多个子频带。可见,爆破振动波经过断层后能量幅值降低,但在低频能量占比反而增加。

参 考 文 献

- [1] 石义虎,邓德志,廖兵,等. 基于 HHT 研究断层岩溶对爆破地震波传播的影响[J]. 爆破,2023,40(2):199-209.
SHI Yihu, DENG Dezhi, LIAO Bing, et al. Influence of fault and karst on propagation of blasting seismic wave based on HHT method[J]. Blasting, 2023, 40(2): 199-209.
- [2] 李祥龙,赵泽虎,王建国,等. 基于 EMD-HHT 和小波理论的地下浅孔爆破振动规律研究[J]. 有色金属工程,2021,11(12):100-108.
LI Xianglong, ZHAO Zehu, WANG Jianguo, et al. Research on vibration law of underground shallow hole blasting based on EMD-HHT and Wavelet Theory [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(12): 100-108.
- [3] 张智宇,张智,黄永辉,等. 基于 HHT 频谱分析研究断层对爆破地震波传播的影响[J]. 有色金属(矿山部分),2021,73(4):138-144.
ZHANG Zhiyu, ZHANG Zhi, HUANG Yonghui, et al. Analysis on the influence of fault on the propagation of blasting seismic wave based on HHT spectrum analysis[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2021, 73(4): 138-144.
- [4] 张声辉,高文学,刘江超,等. 基于 EMD 分解的爆破振动信号主成分提取与分析[J]. 工程爆破,2022,28(6):8-14.
ZHANG Shenghui, GAO Wenxue, LIU Jiangchao, et al. Extraction and analysis of principal components of blasting vibration signal based on EMD decomposition[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(6): 8-14.
- [5] 汪平,孟海利. 基于 HHT 方法对紧邻既有巷道爆破振动信号的分析[J]. 工程爆破,2018,24(6):70-74.
WANG Ping, MENG Haili. Analysis of adjacent existing tunnel blasting vibration signal based on HHT method[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(6): 70-74.
- [6] 何理,钟东望,李鹏,等. 下穿巷道爆破荷载激励下边坡振动预测及能量分析[J]. 爆炸与冲击,2020,40(7):108-117.
HE Li, ZHONG Dongwang, LI Peng, et al. Vibration prediction and energy analysis of slope under blasting load in underpass tunnel[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(7): 108-117.
- [7] 刘小乐,袁海平,郑鑫,等. 基于 HHT 的爆破振动信号时频能量分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2019,42(6):779-784.
LIU Xiaole, YUAN Haiping, ZHENG Xin, et al. Time-frequency and energy analysis of blasting vibration signal based on HHT method [J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2019, 42(6): 779-784.
- [8] 冀楷欣,张世平. 基于 HHT 方法的露天矿山爆破振动信号分析[J]. 煤矿安全,2016,47(3):140-143.
JI Kaixin, ZHANG Shiping. Analysis of open-pit blasting vibration signal based on HHT method[J]. Safety in Coal Mine, 2016, 47(3): 140-143.
- [9] 关晓磊,颜景龙. 爆破振动信号的 HHT 时频能量谱分析[J]. 爆炸与冲击,2012,32(5):535-541.
GUAN Xiaolei, YAN Jinglong. The HHT time-frequency power spectrum analysis of the blasting vibration signal[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(5): 535-541.
- [10] 唐旭,邹飞,方正峰. 基于希尔伯特-黄变换的远区爆破振动信号能量演化及分布规律[J]. 科学技术与工程,2016,16(30):47-51,91.
TANG Xu, ZOU Fei, FANG Zhengfeng. Based on HHT energy evolution and distribution of blasting vibration signals in far-zone[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(30): 47-51, 91.
- [11] 顾清华,高松,李萍丰,等. 基于 NSGA-II 算法的某矿采场爆破参数优化[J]. 有色金属(矿山部分),2023,75(6):51-65.
GU Qinghua, GAO Song, LI Pingfeng, et al. Study on optimization of blasting parameters in a mine stope based on NSGA-II [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75(6): 51-65.

- [12] 陈吉辉,仇文革,赵旭伟,等.基于小波包技术地铁隧道分区爆破振动特性研究[J].振动与冲击,2022,41(6):222-228,255.
CHEN Jihui, QIU Wenge, ZHAO Xuwei, et al. Vibration characteristics analysis of the metro tunnel subarea blasting based on wavelet packet technique[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(6): 222-228, 255.
- [13] 周建敏,汪旭光,龚敏,等.缓冲孔对爆破振动信号幅频特性影响研究[J].振动与冲击,2020,39(1):240-244,280.
ZHOU Jianmin, WANG Xuguang, GONG Min, et al. Effects of buffer hole on amplitude-frequency features of blast vibration signals[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(1): 240-244, 280.
- [14] 陈啸林,彭磊.爆破参数对预裂爆破裂纹扩展规律研究[J].有色金属(矿山部分),2023,75(4):97-106.
CHEN Xiaolin, PENG Lei. Influence of blasting parameters on the crack propagation law of pre-splitting blasting [J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2023, 75(4): 97-106.
- [15] 蒋复量,周科平,邓红卫,等.基于小波理论的井下深孔爆破振动信号辨识与能量衰减规律分析[J].煤炭学报,2011,36(增刊2):396-400.
JIANG Fuliang, ZHOU Keping, DENG Hongwei, et al. The underground mine's deep-hole blasting vibration signals' identification and energy attenuation law's analysis based on wavelet theory [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(Suppl. 2): 396-400.
- [16] 刘敦文,栗闯,龚运高.一种基于爆破振动信号小波分析的爆破危害评判新方法[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(4):1574-1577.
LIU Dunwen, SU Chuang, GONG Yungao. New method for blasting hazards evaluation based on wavelet analysis of blasting vibration signals [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2010, 41(4): 1574-1577.

(上接第34页)

- ZHENG Bokun, YAO Wei, HUANG Tenglong, et al. Transport performance of modified full tailings filling slurry based on loop test [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(2): 520-529
- [2] 邵亚平,郭利杰,陈寅,等.基于环管试验确定粗骨料膏体充填料浆管道输送参数[J].有色金属(矿山部分),2018,70(4):20-23.
SHAO Yaping, GUO Lijie, CHEN Yin, et al. Determination of pipeline transportation parameters of coarse aggregate paste filling slurry based on ring pipe test [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2018, 70(4): 20-23.
- [3] 杨志强,陈得信,高谦,等.金川矿山混合充填料浆环管试验系统与管输特性研究[J].有色金属工程,2017,7(1):64-70.
YANG Zhiqiang, CHEN Dexin, GAO Qian, et al. Study on the test system and pipeline transmission characteristics of the mixed filling slurry loop in Jinchuan Mine [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2017, 7(1): 64-70.
- [4] 刘晓辉,王国立,赵占斌,等.结构流充填料浆环管试验及其阻力特性研究[J].中国钼业,2016,40(5):20-23.
LIU Xiaohui, WANG Guoli, ZHAO Zhanbin, et al. Research on the test and resistance characteristics of structured flow filled slurry loop [J]. China Molybdenum Industry, 2016, 40(5): 20-23.
- [5] 丁红霞,吴国平,苗润田.钾盐矿尾矿充填技术研究[J].化工矿物与加工,2016,45(6):44-46,50.
DING Hongxia, WU Guoping, MIAO Runtian. Research on tailings filling technology of potash mine [J]. Chemical Minerals and Processing, 2016, 45(6): 44-46, 50.
- [6] 杨晓炳,闫泽鹏,尹升华,等.基于环管试验的粗骨料膏体管输阻力模型及优化[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(5):181-191.
YANG Xiaobing, YAN Zepeng, YIN Shenghua, et al. Coarse aggregate paste pipeline transportation resistance model and optimization based on loop test [J]. Journal of Hunan University(Natural Science Edition), 2022, 49(5): 181-191.
- [7] 钟明旭,方臣,曾建红.某铝土矿尾矿管道输送试验研究[J].矿冶工程,2021,41(4):38-40,43.
ZHONG Mingxu, FANG Chen, ZENG Jianhong. Experimental study on pipeline transportation of bauxite tailings [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(4): 38-40, 43.
- [8] 王洪江,王小林,寇云鹏,等.全尾砂高浓度胶结充填的环管试验[J].工程科学学报,2021,43(2):215-222.
WANG Hongjiang, WANG Xiaolin, KOU Yunpeng, et al. Ring pipe test of full tailings high concentration cemented filling [J]. Journal of Engineering Science, 2021, 43(2): 215-222.
- [9] 刘振,李明,常宝孟,等.三山岛金矿高浓度充填料浆流动特性及管道阻力研究[J].矿业研究与开发,2022,42(3):125-129.
LIU Zhen, LI Ming, CHANG Baomeng, et al. Study on the flow characteristics and pipeline resistance of high concentration filling slurry in Sanshandao gold mine [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(3): 125-129.
- [10] 任建平,焦华喆.全尾砂半工业环管输送试验与数值模拟研究[J].矿业研究与开发,2020,40(12):23-27.
REN Jianping, JIAO Huazhe. Experimental and numerical simulation study on semi-industrial loop transportation of full tailings [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(12): 23-27.