文章编号:1674-2869(2024)02-0225-06

基于能量衰减的微震源距离反演研究

李 贲,李志国*,李国书,宋金凤,成荣彬,钱 陈
武汉工程大学资源与安全工程学院,湖北 武汉 430074

摘 要:为利用微震信号能量衰减规律实现震源距离反演,借助颗粒流原理构建花岗岩微震动传播仿真模型,采用经验模态分解处理信号,使用幂函数拟合微震信号能量衰减趋势,构建震源距离反演数学模型,数值计算结果表明:在黏结模型不变的条件下,将模型长度控制在280 m以内可实现距离精准反演。通过室内声发射试验对该工作进行验证,结果表明:颗粒流仿真相对室内试验能量衰减系数误差率为0.2%,距离反演结果误差率均在0.5%以内,证明颗粒流仿真模型能较准确地模拟微震信号在花岗岩中的能量衰减规律,可实现距离精准反演。

关键词:震源定位;颗粒流仿真;能量衰减;距离反演
中图分类号:TD324;P315.3 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202207025

Microseismic source distance inversion based on energy attenuation

LI Ben, *LI Zhiguo**, *LI Guoshu*, *SONG Jinfeng*, *CHENG Rongbin*, *QIAN Chen*
School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: To achieve source distance inversion using the energy decay law of micro-seism signals, a granite micro-seism propagation simulation model was constructed based on the granular flow principle. And an inverse mathematical model of seismic distance was constructed by fitting the energy decay trend of the empirical modal decomposition processed micro-seism signals using power functions. The numerical calculation results show that the accurate inversion of the distance can be achieved by controlling the model length within 280 m under the condition that the bonding model remains unchanged. The results of acoustic emission tests in laboratory show that the error rate of energy attenuation coefficients of particle flow simulation is 0.2% compared with that of indoor test, and the error rates of distance inversion results are within 0.5%. It is proved that the particle flow simulation model can accurately simulate the energy attenuation law of microseismic signal in granite, and can realize accurate distance inversion.

Keywords: source location; particle flow simulation; energy attenuation; distance inversion

随着矿产资源的采掘逐渐走向深部,岩爆事故与日俱增[1-3],矿山冲击地压、采空区垮落、巷道片帮冒顶等环境与安全事故层出不穷[4-6]。有效监测判断事故隐患是保证深部岩土工程安全的重要前提。基于地球物理学发展起来的微震监测技术可以有效记录微震现象的时空特征[7-8],近年来,已经广泛应用于矿山安全、水电地下工程监测。

如何使震源定位更精确、快速,是学者研究微震监测的基础问题之一。目前,研究人员主要通过拾取P波初至时间来进行反演定位[9]。王辉等[10]基于单纯形-最短路径射线追踪法建立了微震震源混合定位算法,为复杂地区微震监测提供

收稿日期:2022-07-17
基金项目:湖北省教育厅科学研究计划项目(B2015326);武汉工程大学第十三届研究生教育创新基金(CX2021480)
作者简介:李 贲,硕士研究生。Email:1152455968@qq.com
***通信作者**:李志国,博士,副教授。Email:215289385@qq.com
引文格式:李贲,李志国,李国书,等. 基于能量衰减的微震源距离反演研究[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(2):225-230.

了理论和数据支撑；贾宝新等[11]基于高密度台阵和粒子群算法提出了新的微震源定位方法，为中小尺度微震的研究提供了参考；Li等[12]通过研究传感器阵列的空间布局与放置方向，提出了传感器网络优化原则，使定位精度得到一定程度的提高。这些定位方法均要预先设定一个波速模型，而实际矿山中的岩体波速难以真实测量，因此基于预先建立波速模型下的定位方法具有一定局限性，导致定位误差较大。

董陇军等[13]提出了3种无需预先建立波速模型的震源定位方法，节约了预先测速的成本，避免了测速区与实际微震区的波速差异导致的定位误差，但是震源位置和波速耦合在一起反演时，对以微震震源位置为主要目的的反演是不利的[14]。

高明仕等[15]的研究结果表明，微震信号的能量沿传播距离呈乘幂关系衰减。为使微震信号能量衰减规律在震源定位上得到有效应用，笔者采用颗粒流程序[16-18]建立微震信号在花岗岩中传播的仿真模型，采用经验模态分解（empirical mode decomposition，EMD）处理信号，使用幂函数拟合、反函数变换建立震源距离-能量关系式进行震源反演，通过室内声发射试验考察反演精度，验证该数值计算模型的有效性，探究微震源定位新思路。

1 颗粒流数值模型构建

1.1 几何模型构建

建立尺寸为2.0 m×0.5 m的计算区域，花岗岩试样模型尺寸为1.8 m×0.3 m（如图1所示），颗粒半径取值为0.5 cm，试样密度设为2 900 kg/m^3。

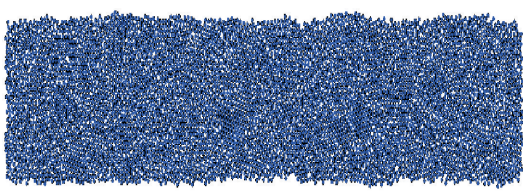

图1 花岗岩试样模型

Fig. 1 Model of granite sample

1.2 粘结模型选择及参数设定

模型构建所采用的粘结模型为平直节理模型。其原因为平直节理模型将圆形颗粒构造成多边形，可抑制接触破坏后颗粒的旋转，能够模拟出大压拉比[19]。根据张权等[20]得到的平直节理模型宏细观参数对应关系式[式(1)]，求解得到平直节理模型的细观参数如表1所示。

$$\begin{cases} E = 1.03E_c - 3.9k_n/k_s + 14.6 \\ v = 0.146\ln(k_n/k_s) + 0.075 \\ \sigma_f = 1.724C_1 + 80.1\mu_b + 0.97\sigma_c - 13 \\ \sigma_t = 0.692\sigma_c - 1.181\ln(k_n/k_s) + 1.405 \\ C_2 = 16.07 + 0.28C_1 - 15.54\mu_b \\ \varphi = \arcsin(1 - 40/(49.8 + 254\mu_b + 0.16C_1)) \end{cases} \quad (1)$$

其中，E、v、σ_f、σ_t、C_2、φ分别为岩石材料宏观力学参数弹性模量、泊松比、抗压强度、抗拉强度、黏聚力、摩擦角，E_c、k_n/k_s、μ_b、C_1、σ_c分别为颗粒流程序中平直节理模型的细观参数。

表1 平直节理模型细观参数计算结果

Tab. 1 Calculation results of fine view parameters of flat and straight nodal model

E_c / MPa	k_n/k_s	μ_b	C_1 / MPa	σ_c / MPa
88.90	5.30	0.26	88.70	18.60

1.3 震源与监测点的布置

以试样模型左下角为原点建立直角坐标系，如图2所示。设置震源位置为(0.00 m，0.15 m)，6个监测点位置为(0.28 m，0.15 m)、(0.56 m，0.15 m)、(0.84 m，0.15 m)、(1.12 m，0.15 m)、(1.40 m，0.15 m)、(1.68 m，0.15 m)。以实测振动波信号为震源模拟声发射，监测各测点波形。

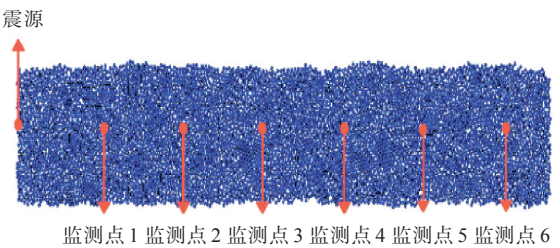

图2 震源与监测点布置图

Fig. 2 Location of hypocenter and monitoring points

2 仿真结果分析

2.1 原始信号处理

由于监测到的信号中存在反射波以及其他噪声信号，因此需要对原始信号进行分解、滤波、降噪。图3所示为监测点1原始信号，将其进行EMD[21]得到固有模态函数（intrinsic mode function，IMF）分量，如图4所示。

通过分析可知，IMF0为高频率的噪声信号，IMF6、IMF7为零漂现象所导致的信号。将监测点1原始信号分解后的IMF信号进行筛选重构，作为后续能量计算的依据，如图5所示。

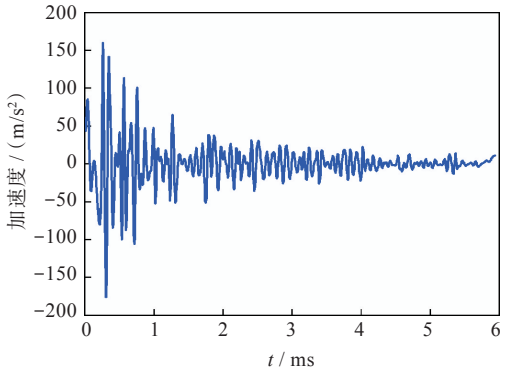

图3　模拟声发射监测结果

Fig. 3　Results of simulated acoustic emission monitoring

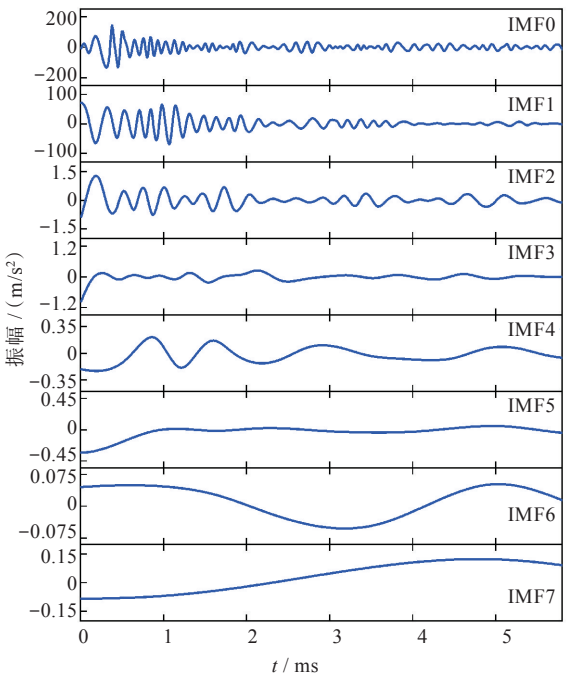

图4　测点1的IMF

Fig. 4　IMF of point 1

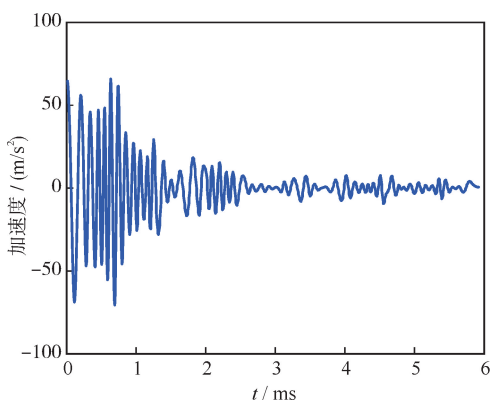

图5　原始信号处理结果

Fig. 5　Result of raw signal processing

2.2　能量计算

要精确计算出各个监测点的微震信号能量较为困难，通常采用某一波形参数来表征测点能量大小，如最大峰值振动速度、峰值振动速度平方、持续时间内各采样点振幅的平方和(E)等，一般认为微震波持续时间内各采样点振幅平方和表示能量更准确[21]。笔者采用一段时间内E的最大值E_{max}作为表征能量E_Z的值。E_{max}与E_Z相差一个比例系数，只能表征能量的大小，并不能代表真正的能量值，它的单位不能用国际单位的焦耳(J)表示，应该为m^2/s^4。E_Z的真实值应为：

$$E_Z = ZE_{max} \tag{2}$$

式中，Z=1 J·s⁴/m²。

根据式(2)对原始信号处理后得到的信号进行计算，在0~6 ms持续时间内各监测点的表征能量如图6所示。

2.3　能量衰减规律分析

从图6中可以看到，各测点的能量随时间的推移迅速衰减，并随着与震源距离的增加呈现递减趋势。通过能量计算，得到6个监测点的微震信号的表征能量值，如表2所示。有学者的研究表明幂函数、指数函数都能较好地描述能量随传播距离的增大而衰减的规律[22]，基于Levenberg-Marquardt最优算法，使用幂函数、指数函数将表2中的数据进行拟合，拟合结果如图7所示。通过对比，幂函数的拟合结果方差更小，验证了王进强等[22]所述的幂函数更适宜描述微震信号随传播距离的增大而呈现出前期衰减迅速，后期衰减缓慢的特性。

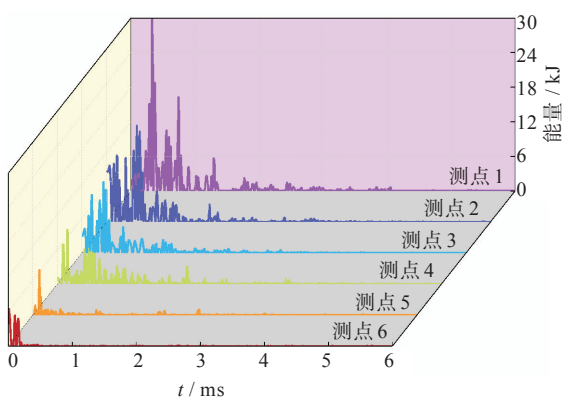

图6　不同监测点表征能量图

Fig. 6　Characterization energy map of different monitoring points

表2　各个监测点的表征能量值

Tab. 2　Characterization energy values for each monitoring point

距离 / m	0.28	0.56	0.84	1.12	1.40	1.68
表征能量 / kJ	29.80	17.58	11.03	9.30	8.51	6.92

为定量研究震源距离与表征能量之间的关系，通过幂函数拟合得到震源距离与表征能量的

关系式：

$$E_Z = E_0 x^{-\eta} \tag{3}$$

式(3)中：E_Z为表征能量；x为测点与震源之间的距离；η=0.824 5，为能量衰减系数，与岩石的宏观力学参数有关；E_0=10 461.104，与震源能量与衰减系数有关。由此，通过数值模拟及函数拟合，得到了微震信号能量在花岗岩中随传播距离的增大呈现出幂函数衰减的规律。

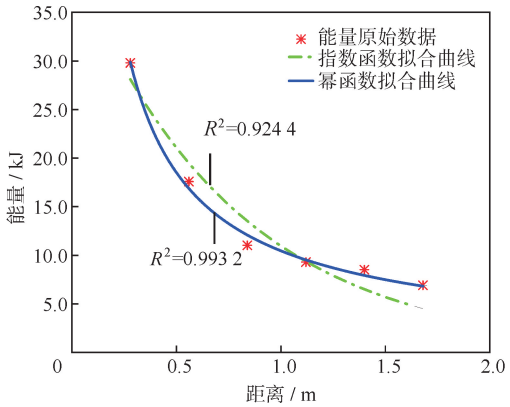

图7 能量-距离幂函数、指数函数拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of power function and exponential function of energy-distance

在实际工程应用中，一个区域内能量衰减系数η可通过一次爆破试验测得。而E_0的值会随震源能量发生改变，因此需要通过2个传感器所得能量进行计算。1号、2号传感器与震源的距离分别为x_1，x_2，2个传感器的间距为Δx，E_0的计算推导公式如下：

$$\begin{cases} E_{Z_1} = E_0 x_1^{-\eta} \\ E_{Z_2} = E_0 x_2^{-\eta} \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} E_{Z_1}^{\frac{1}{-\eta}} = E_0^{\frac{1}{-\eta}} x_1 \\ E_{Z_2}^{\frac{1}{-\eta}} = E_0^{\frac{1}{-\eta}} x_2 \end{cases} \tag{5}$$

$$E_{Z_2}^{\frac{1}{-\eta}} - E_{Z_1}^{\frac{1}{-\eta}} = E_0^{\frac{1}{-\eta}} (x_2 - x_1) \tag{6}$$

$$E_0 = \left(\frac{E_{Z_2}^{\frac{1}{-\eta}} - E_{Z_1}^{\frac{1}{-\eta}}}{\Delta x} \right)^{-\eta} \tag{7}$$

2.4 距离反演

在原模型上重新设置5个监测点，其坐标分别为(0.10 m,0.15 m)、(0.50 m,0.15 m)、(0.90 m,0.15 m)、(1.30 m,0.15 m)、(1.70 m,0.15 m)。给震源相同的初始振动波，使振动信号在模型中传播，并对这5个监测点的信号进行记录。通过将数值模拟记录的结果进行筛选重构，根据能量计算理论得出0~6 ms持续时间内各监测点的距离-能量，如表3所示。

表3 测点距离-能量

Tab. 3 Distance-energy of measuring points

距离 / m	0.10	0.50	0.90	1.30	1.70
能量 / kJ	69.758	18.571	11.439	8.453	6.733

通过求式(3)能量-距离关系式的反函数可以得到距离-能量关系式：

$$x = \sqrt[\eta]{\frac{E_0}{E_Z}} \tag{8}$$

式(8)中：E_0=10 461.104，η=0.824 5。

将表3中的能量值代入式(8)中，计算出各监测点与震源之间的距离，并与真实距离进行比较，采用相对误差来衡量计算误差。相对误差的计算公式为：

$$\delta = \frac{|L_c - L_r|}{L_r} \times 100\% \tag{9}$$

式(9)中：δ表示相对误差，L_c表示计算距离，L_r表示真实距离。所得结果如表4所示。

表4 计算结果与误差

Tab. 4 Calculation results and errors

测点	计算距离 / m	真实距离 / m	相对误差 / %
1	0.100 13	0.10	0.129
2	0.498 51	0.50	0.297
3	0.897 28	0.90	0.302
4	1.295 00	1.30	0.381
5	1.706 40	1.70	0.379

从表4的计算结果可以看到，各个测点的计算距离与实际距离的相对误差均在0.5%的范围之内，因此根据能量-距离关系式所推出的距离-能量关系在原模型上的不同监测点都具有很好的适用性。由式(3)可知，随着距离增加，能量不断衰减，能量变化对距离影响愈敏感，当距离增大到280 m以上，能量值会随之衰减到100 J以下，此时每0.5 J的能量计算误差就会造成0.6%的距离计算误差。而将原模型的能量计算精度控制在0.5 J以内是相当困难的，因此，在实际的工程应用中，需将原模型尺寸控制在280 m以内。

3 室内试验验证

3.1 试验过程

在实验室中，采用尺寸为0.60 m×0.15 m×0.15 m的花岗岩作为实验材料。首先使用石膏作为耦合剂，将1、4、5、6、7、8号传感器如图8所示分布在试

件的上表面，间距均为0.10 m，以试件左下角为原点建立空间直角坐标系，震源位置为（0.000 m，0.075 m，0.075 m）。通过断铅模拟震源，使用江苏东华测试技术公司制造的DH5922D动态信号测试分析系统对各个传感器接收到的信号进行记录。

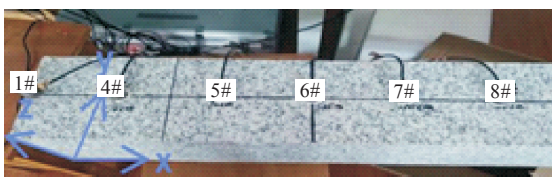

图8　室内试验岩样

Fig. 8　Rock sample for laboratory tests

3.2　试验结果与分析

将室内声发射试验6个监测点记录到的数据通过分解、滤波、降噪及能量计算，得到0~6 ms持续时间内各监测点的表征能量图，如图9所示。

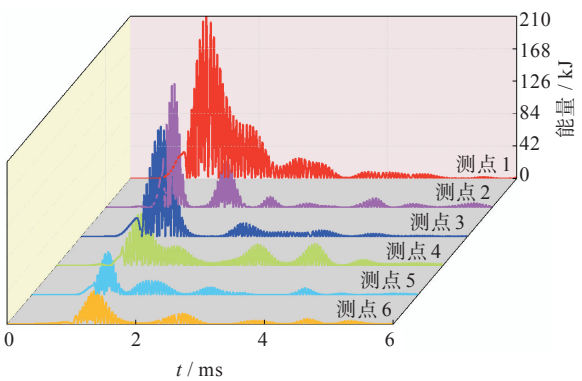

图9　室内试验不同监测点表征能量图

Fig. 9　Characterization energy diagram of different monitoring points in laboratory tests

记录各个监测点的能量如表5所示。将表5中测点1~测点6的能量-距离按照式（3）函数进行拟合，得到室内试验的能量-距离关系式：

$$E_Z = 43\,837.780x^{-0.822\,9} \tag{10}$$

据式（10）可知室内花岗岩岩样的能量衰减系数为0.822 9，与数值试验测得的能量衰减系数相对误差为0.20%，证明了在颗粒流程序中所建立的数值模型能较准确地模拟微震信号在花岗岩中的能量衰减规律。

表5　室内试验各测点能量值

Tab. 5　Energy values of measuring points in laboratory tests

测点	真实距离 / m	表征能量 / kJ
1	0.150	208.750
2	0.180	178.634
3	0.250	140.899
4	0.335	105.350
5	0.427	87.013
6	0.522	75.881

3.3　距离反演结果验证

为进一步探究距离反演方法的准确性，将震源位置改为（0.000 m，0.075 m，0.150 m），重复室内试验过程，计算得到5个监测点的能量，如表6所示。

将测点2和测点3的能量值代入式（7）计算得到E_0=39 561.838，η=0.822 9，再代入式（8）得到室内试验距离-能量关系式：

$$x = \sqrt[0.822\,9]{\frac{39\,561.838}{E_Z}} \tag{11}$$

将测点4、测点5和测点6的能量值分别代入式（11），得到各测点的反演距离分别为0.229、0.399、0.501 m，根据式（9）得到与真实距离的相对误差分别为0.17%、0.16%、0.12%，均在0.5%以内，证明该方法可以实现距离精准反演。

表6　室内试验各测点能量反演结果

Tab. 6　Energy inversion results for each measurement point in laboratory tests

测点	真实距离 / m	表征能量 / kJ
2	0.10	263.142
3	0.20	148.753
4	0.30	106.615
5	0.40	841.363
6	0.50	69.864

4　结　论

（1）应用平直节理模型构建花岗岩仿真模型模拟声发射试验，通过室内声发射试验与模拟声发射试验对比，计算得到能量衰减系数误差率为0.2%，证明该模型能有效模拟出微震信号在花岗岩中的衰减规律。

（2）采用EMD处理原始信号，使用幂函数拟合微震信号能量衰减趋势，构建震源距离反演数学模型，室内试验距离反演结果与真实距离误差均在0.5%以内，证明了基于能量衰减的微震源距离反演的可行性。

（3）所建立的花岗岩震动传播颗粒流仿真模型以及距离反演数学模型结构简单，计算方便，在一定距离范围内反演精度较高，可为震源定位提供一种新思路。

参考文献

[1] MENDECKI A J. Seismic monitoring in mines [M]. London: Chapman and Hall, 1997: 220-245.

[2] LASOCKI S, ORLECKA-SIKORA B. Seismic hazard assessment under complex source size distribution of mining-induced seismicity [J]. Tectonophysics, 2008, 456(1/2): 28-37.

[3] ABDUL-WAHED M K, AL HEIB M, SENFAUTE G. Mining induced seismicity: seismic measurement using multiplet approach and numerical modeling [J]. International Journal of Coal Geology, 2006, 66(1/2): 137-147.

[4] DRIAD-LEBEAU L, LAHAIE F, AL HEIB M, et al. Seismic and geotechnical investigations following a rockburst in a complex French mining district [J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 64(1/2): 66-78.

[5] 潘一山,赵扬锋,官福海,等.矿震监测定位系统的研究及应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):1002-1011.

[6] 崔峰,杨彦斌,来兴平,等.基于微震监测关键层破断诱发冲击地压的物理相似材料模拟实验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):803-814.

[7] 李金雨,雷文杰,赵洪宝,等.重复爆破采动下煤岩冲击破坏的微震响应特征[J].中国矿业大学学报,2019,48(5):966-974.

[8] YIN Q F, TAO P F, ZHENG S, et al. Downhole microseismic source location based on a multi-dimensional DIRECT algorithm for unconventional oil and gas reservoir exploration [J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 2019, 93(3): 718-730.

[9] 贾宝新,李峰.基于TFA-DC到时拾取的双震相微震震源定位方法[J].煤炭学报,2022,47(2):817-827.

[10] 王辉,梁苗,朱梦博.基于单纯形-最短路径射线追踪的微震震源混合定位算法[J].中国矿业,2020,29(10):110-115,121.

[11] 贾宝新,贾志波,赵培,等.基于高密度台阵的小尺度区域微震定位研究[J].岩土工程学报,2017,39(4):705-712.

[12] LI N, GE M C, WANG E Y, et al. The influence mechanism and optimization of the sensor network on the MS/AE source location [J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 2651214.

[13] 董陇军,李夕兵,唐礼忠,等.无需预先测速的微震震源定位的数学形式及震源参数确定[J].岩石力学与工程学报,2011,30(10):2057-2067.

[14] CHENG J L, SONG G D, SUN X Y, et al. Research developments and prospects on microseismic source location in mines [J]. Engineering, 2018, 4(5): 653-660.

[15] 高明仕,窦林名,张农,等.岩土介质中冲击震动波传播规律的微震试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(7):1365-1371.

[16] SONG Z Y, KONIETZKY H, HERBST M. Three-dimensional particle model based numerical simulation on multi-level compressive cyclic loading of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 225: 661-677.

[17] HÖHNER D, WIRTZ S, SCHERER V. Experimental and numerical investigation on the influence of particle shape and shape approximation on hopper discharge using the discrete element method [J]. Powder Technology, 2013, 235: 614-627.

[18] ANAND A, CURTIS J S, WASSGREN C R, et al. Predicting discharge dynamics of wet cohesive particles from a rectangular hopper using the discrete element method (DEM) [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(24): 5268-5275.

[19] 张楚楚,顾圣东,王小龙.基于PFC的岩土体模拟试样宏细观参数对应关系研究[J].路基工程,2020(6):47-53.

[20] 张权,饶秋华,沈晴晴,等.基于中心组合设计的颗粒流平直节理模型宏-细观参数相关性研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(3):779-789.

[21] XU S C, CHEN B R, JIN C Y. Prediction of hard brittle geological disasters in metal mine from microseismic monitoring [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 353/354/355/356: 2377-2380.

[22] 王进强,胡乃联,姜福兴,等.微地震震源地震波能量的计算方法[J].北京科技大学学报,2013,35(6):703-708.

本文编辑:苗 变