



断层倾角对声发射信号传播规律影响的试验研究

贾宝新 李宝 周琳力 陈浩

引用本文：

贾宝新, 李宝, 周琳力, 等. 断层倾角对声发射信号传播规律影响的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 23–38.
JIA Baoxin, LI Bao, ZHOU Linli. Experimental study on influence of fault dip angle on acoustic emission signal propagation[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 23–38.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-0245>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

声发射信号研究进展及其在煤温感知领域应用前景

Research progress of acoustic emission signal and its application prospect in coal temperature sensing field
煤炭科学技术. 2022, 50(11): 84–92 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/160a528d-e01c-4a35-b577-b362b67ebf7b>

煤升温过程中声发射信号变化及产生机制研究

Change pattern of acoustic emission signal and generation mechanism during coal heating and combustion process
煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 84–91 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1851>

不同高径比煤样巴西劈裂声发射特征及能量演化机制研究

Study on acoustic emission characteristics and energy evolution of Brazilian splitting tests of coal samples with different height-diameter ratio
煤炭科学技术. 2024, 52(10): 63–77 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1288>

冲击倾向性煤不同损伤程度声发射分形特征研究

Fractal characteristics of acoustic emission in different damage degrees of impact coal
煤炭科学技术. 2021, 49(9): 38–46 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b137ebb9-3dda-4059-b421-ee1fc0746db3>

单向卸载条件下组合煤岩力学特性及声发射演化规律

Mechanical properties and acoustic emission evolution of coal–rock combination under unidirectional unloading condition
煤炭科学技术. 2023, 51(11): 71–83 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-2040>

不同加载速率下煤岩声发射与红外辐射特征研究

Study on coal and rock acoustic emission and infrared radiation characteristics under different loading rates
煤炭科学技术. 2021, 49(7): 79–84 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ea7aa91e-b245-4bb9-b864-e9d98b13f723>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



贾宝新,李宝,周琳力,等.断层倾角对声发射信号传播规律影响的试验研究[J].煤炭科学技术,2025,53(5):23-38.
JIA Baoxin, LI Bao, ZHOU Linli, et al. Experimental study on influence of fault dip angle on acoustic emission signal propagation[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 23-38.

移动扫码阅读

断层倾角对声发射信号传播规律影响的试验研究

贾宝新^{1,2},李宝¹,周琳力¹,陈浩¹

(1. 辽宁工程技术大学 土木工程学院,辽宁阜新 123000;2. 辽宁省矿山沉陷灾害防治重点实验室,辽宁阜新 123000)

摘要:因存在断层和岩层间层理面等不连续界面,天然岩体并非均匀连续介质,声发射信号经过断层和层理面时传播规律必然会发生改变,因此研究断层中声发射信号的传播规律成为岩石力学的重点课题之一。基于惠更斯原理对含断层的非均匀介质条件下的波面方程进行推导,并通过室内相似模拟模型试验制作45°、60°、75°以及其他类型断层试件,结合超声波测速仪和DS5-16B全信息声发射信号分析仪对跨断层的声发射信号进行监测和记录,采用非线性拟合和Matlab软件数值计算的方式,研究不同倾角的断层、层理面数量对声发射信号传播速度以及信号特征的影响。结果表明:声发射信号的传播速度随着断层倾角的增大逐渐增加,传播速度与断层倾角呈正相关,断层倾角越大信号传播速度越快,信号穿过断层后传播速度会发生衰减,断层倾角越大速度衰减比例越小,层理面会使传播速度发生衰减,单个层理面对速度的影响较小,2个层理面对速度的影响较大;断层会使信号的最大幅值减小,主频率降低,频率区间向低频方向移动,断层倾角越大,最大幅值、主频率、频率区间越大。1个层理面对信号的影响较小,与无层理面的信号时频特征基本相同,2个层理面对信号的影响较大,会使信号的最大幅值、主频、频率区间有较大幅度的减小;断层的存在会导致声发射信号的瞬时能量发生巨大衰减,倾角越小衰减越为严重。研究成果可为射线理论下波速模型的建立提供理论依据。

关键词:断层倾角;声发射信号;层理面;传播速度;能量

中图分类号:TD313 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2025)05-0023-16

Experimental study on influence of fault dip angle on acoustic emission signal propagation

JIA Baoxin^{1,2}, LI Bao¹, ZHOU Linli¹, CHEN Hao¹

(1. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Liaoning Key Laboratory of Mine Subsidence Disaster Prevention and Control, Fuxin 123000, China)

Abstract: Natural rock mass is not a uniform continuum due to discontinuous interfaces such as faults and bedding planes between rock layers, and the propagation law of acoustic emission signals will inevitably change when they pass through faults and bedding planes. Therefore, studying the propagation law of acoustic emission signals in faults has become one of the key topics in rock mechanics. Based on the Huygens principle, the wave front equation under the condition of heterogeneous media containing faults was derived, and 45°, 60°, 75° and other types of fault specimens were made through laboratory similar simulation model tests. The acoustic emission signals across faults were monitored and recorded by combining ultrasonic tachymeter and DS5-16B full-information acoustic emission signal analyzer. Nonlinear fitting and numerical calculation of Matlab software are used to study the influence of faults and the number of bedding planes of different inclination angles on the propagation speed and signal characteristics of acoustic emission signals. The results show that the propagation speed of acoustic emission signals increases gradually with the increase of fault dip angle, and the propagation speed is posit-

收稿日期:2024-02-27 策划编辑:朱恩光 责任编辑:刘雅清 DOI: 10.12438/cst.2024-0245

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51774173);辽宁省“兴辽英才计划”资助项目(XLYC2007163);辽宁省“百千万人才工程”资助项目(201921023)

作者简介:贾宝新(1978—),男,辽宁抚顺人,教授,博士生导师,博士。E-mail: jbx_811010@126.com

通讯作者:李宝(1998—),男,山东菏泽人,硕士研究生。E-mail: libao20211998@163.com

ively correlated with fault dip angle. The larger the fault dip angle is, the faster the signal propagation speed will be, and the propagation speed will attenuate after the signal passes through the fault, and the larger the fault dip angle is, the smaller the proportion of velocity attenuation will be. The propagation velocity is attenuated by the bedding plane, and the single bedding plane has little influence on the velocity, while the two bedding planes have great influence on the velocity. The fault will make the maximum value of the signal decrease, the main frequency decrease, and the frequency interval move to the low frequency direction. The larger the fault inclination, the larger the maximum value, the main frequency and the frequency interval. One layer has little influence on the signal, which is basically the same as the time-frequency characteristics of the signal without stratification, while the two layers have a greater influence on the signal, which will greatly reduce the maximum value, main frequency and frequency interval of the signal. The existence of fault will cause the instantaneous energy of acoustic emission signal to decrease greatly, and the smaller the inclination angle, the more serious the attenuation is. The research results can provide theoretical basis for the establishment of wave velocity model under the ray theory.

Key words: fault dip angle; acoustic emission signal; bedding plane; speed of propagation; energy

0 引言

断层作为矿山开采过程中常见的地质构造，并非均匀连续介质，相对于在均匀介质条件下，断层、层理面的存在会使应力波的传播规律发生变化，会加剧应力波能量的衰减^[1]。因此研究应力波在断层、层理面上的传播特征，对于冲击地压震源准确定位，矿山安全生产和防灾减灾工作都有着重大意义^[2]。

微震监测技术是利用煤岩破裂产生的微震信号，来研究煤岩结构和稳定性的一种实时、动态、连续的地球物理监测方法^[3]，被广泛应用于矿山开采、地下隧道监测、边坡防治等领域^[4-7]。准确的震源定位可以获得岩体破裂的空间位置，是微震监测的核心问题之一。微震和声发射都是岩体内部裂隙演化过程中释放的应力波，除了在频率、发生尺度上有所区别，在产生机理上没有本质的区别，可以把声发射看作小尺度的微震事件。相对于现场的微震监测，实验室声发射试验可以重复进行、更容易控制试验条件、造价低廉，可以直观地、定性定量地验证试验结果^[8]。因此，室内声发射试验研究的成果可以为煤矿微震现场监测提供理论支撑。通常利用小尺度的声发射定位研究微震震源定位机制^[9-10]。以往震源定位波速模型的选取，基于单一波速模型适用于各向同性的均匀介质，对于现场复杂地质结构中含有断层、层理、裂隙、节理等多种结构面共存的地质构造，信号在岩石内部传播过程中会发生反射、透射，其传播规律会产生明显的变化，如继续采用单一波速模型必然会使震源定位结果产生偏差。

结构面倾角会改变应力波的传播规律。毕贵权等^[1]对裂隙试件进行超声波试验，发现裂隙倾角基本不会对波速产生影响，但会影响波幅，裂隙角度在波传播垂直方向上的投影越大波幅就越大。石玉成等^[11]采用二维动态有限元分析的方法研究了断层倾

角、断层断距等对地震波的影响，结果表明发生地震时，断层倾角越大产生的震害越严重。刘际飞等^[12]对各种走向角度的层状岩体试件进行测速试验，研究表明有节理面试件的波速相对于均匀岩体试件有不同程度的衰减，当波在岩石中的传播方向与节理夹角越大，速度衰减程度越小。因此，不同倾角的结构面对应力波的衰减作用也不同。软弱夹层会影响应力波的传播。范留明等^[13]通过对软弱夹层的透射模型进行分析发现岩体中夹层的隔震效应主要依靠上下两个界面的反射作用，其隔震效果取决于层与周围掩体波阻比 Z_2/Z_1 ，夹层厚度对其的影响不大。田振农等^[14]研究了岩体中软弱夹层对爆炸波传播规律的影响，发现有无软弱夹层对爆炸波的振动速度峰值影响较大，软弱夹层到震源的距离对爆炸波的衰减影响很大，而夹层厚度对其的影响较小。研究表明夹层厚度对应力波的影响较小。节理面会导致应力波的传播规律改变。CHA 等^[15]研究了节理面间的距离、应力波强度、节理面是否闭合对应力波传播规律的影响。MIRANDA 等^[16]通过对干砂浆充填节理试件进行超声波测速试验，研究了节理面形状和节理面数量对信号传播速度的影响。宋博学等^[17]借助计算模拟研究地震纵波在多个平行节理面中的传播规律，发现穿过的节理面越多，在特定频率的幅值会有先增大后减小的现象，节理面会使透射波发生延迟。所以，节理面的间距、节理面数量都会对应力波的传播规律产生影响。岩性的不同对应力波的传播也会产生影响。MCCANN 等^[18]通过对砂岩和石灰岩的 P 波、S 波波速和衰减特征的研究，得出其对声波的衰减吸收原理。姜福兴等^[19]发现了距离震源较远的传感器先接收到微震信号这一异常现象，在相同的介质中，微震信号通过直达方式传播，而在不同介质的交界处，微震信号将在介质交界面的入射点形成新的波源点，以该点为初始位置，然后

再按照直达方式传播。研究发现岩石性质的不同以及不同岩石间的交界面都会使信号传播规律发生改变。

综上所述,当前众多学者的研究局限于信号在单一介质或单一结构面的岩体中的传播规律,对于现场复杂地质结构中含有断层和层理面共存的研究还不够充分,需要更深入一步的研究。笔者运用理论推导与室内试验相结合的方式,通过超声波测速试验、声发射监测试验,明确震动波跨断层传播的传播速度变化规律以及监测信号特征差异,为射线理论下波速模型的建立提供理论依据,提高微震监测技术中震源定位的精度。

1 断层声发射监测试验

1.1 工程概况

试验以平顶山矿区的锅底山正断层为研究对象。F₁ 锅底山正断层以十一矿为起点,穿过五矿和六矿,三矿和七矿中间到平顶山市里,向东延伸到八矿南部,为平顶山煤田西侧最大的断层之一。断层呈西北向东南之势,和李口向斜大致平行。断层面朝西南方向延伸,东北盘向上抬升,西南盘下降,落差约为100~200 m,断层倾角为30°~70°,大多为50°~60°,为大角度正断层。F₁₋₁ 和 F₁₋₂ 正断层的位置在锅底山正断层下盘,井田西部46°与47线中间,F₁₋₁ 断层走向为320°,倾向为230°,F₁₋₂ 断层走向为310°,倾向220°。两断层倾角为50°~70°,落差为25~40 m,延伸约为600 m,为高角度分叉正断层。矿井地质剖面如图1所示。

1.2 试验模型的建立

为了方便研究,将选取的断层实例基于相似模

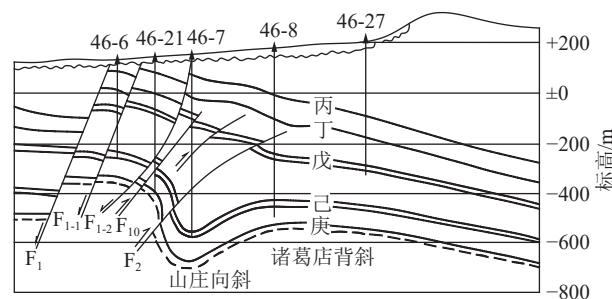


图1 矿井地质剖面

Fig.1 Mine geological profile map

拟准则^[20]简化为含断层的顶底板煤岩组合问题。制作尺寸为300 mm×300 mm×300 mm的立方体试件,共分5组。第1组为没有断层的空白对照试件,岩性模拟细砂岩;第2组为单一岩性断层试件,岩性模拟细砂岩,按倾角分为45°、60°、75°三种类型;第3组为上下盘岩性不同的断层试件,有2种类型,分为细砂岩-煤层断层试件和煤层-泥岩断层试件,倾角设置为60°,命名为第3组1和第3组2;第4组为2层岩性断层试件,有2种类型,分别为下盘上层模拟细砂岩下层模拟煤层和下盘上层模拟煤层下层模拟泥岩的断层试件,上层厚100 mm下层厚200 mm,落差为100 mm,倾角设置为60°,命名为第4组1和第4组2;第5组为3层岩性试件下盘上层60 mm中层120 mm底层120 mm分别模拟细砂岩、煤、泥岩层,落差为60 mm,倾角设置为60°。试验原料使用石英砂、石膏、石灰、水,试件制作方式采用分层浇筑,在断层面处充分铺洒云母片形成贯穿整个试件的断层。参考团队已有的试验资料成果^[21]和试配试验结果,最终确定各个试件的材料配比及力学参数见表1。三维模型如图2所示,实物模型如图3所示。

表1 试件的材料配比及力学参数

Table 1 Material ratio and mechanical parameters of the specimen

试件分组	岩层位置	岩层	质量/kg				抗压强度/ 10 ⁻² MPa	抗拉强度/ 10 ⁻² MPa	视密度/ (g·cm ⁻³)
			m(石英砂)	m(石膏)	m(石灰)	m(水)			
第1、2组	一层	细砂岩	34.526	5.754	5.754	5.115	25.20	2.80	1.5
第1组1	上盘	细砂岩	24.744	4.124	4.124	3.666	25.20	2.80	1.5
	下盘	煤层	27.493	3.849	1.650	3.666	3.17	0.42	1.5
第3组2	上盘	煤层	27.493	3.849	1.650	3.666	3.17	0.42	1.5
	下盘	泥岩	26.394	1.979	4.619	3.666	6.89	0.97	1.5
第4组1	上层	细砂岩	20.925	3.488	3.488	3.100	25.20	2.80	1.5
	下层	煤层	23.250	3.255	1.395	3.100	3.17	0.42	1.5
第4组2	上层	煤层	23.250	3.255	1.395	3.100	3.17	0.42	1.5
	下层	泥岩	22.320	1.674	3.906	3.100	6.89	0.97	1.5
第5组	上层	细砂岩	12.555	2.093	2.093	1.860	25.20	2.80	1.5
	中层	煤层	20.925	2.930	1.256	2.790	3.17	0.42	1.5
	底层	泥岩	13.392	1.004	2.344	1.860	6.89	0.97	1.5

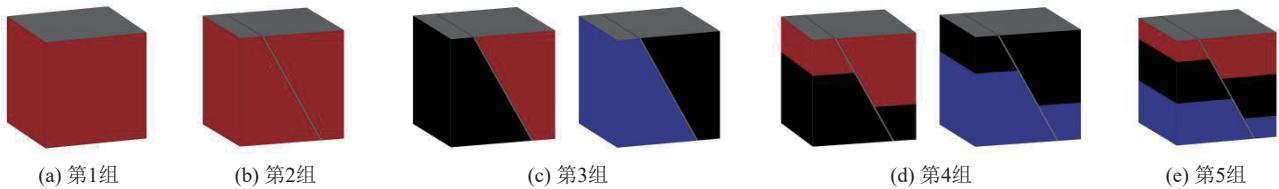


图 2 三维模型
Fig.2 3D model diagram



图 3 实物模型
Fig.3 Physical model diagram

1.3 试验设备与传感器的布置

声发射监测试验使用北京软岛 DS5-16B 全信息声发射信号分析仪,主要包括声发射监测仪、放大器、传感器,如图 4 所示。设备采样率为 3 MHz, 前置放大器增益为 40 dB, 门槛值为 100 mV, 通道输入阻抗为 50Ω , 共 16 个通道,采用 USB3.0 接口。



图 4 声发射监测试验
Fig.4 Acoustic emission monitoring test

人工震源选取在右侧表面的几何中心,发震方式采用小钢球进行摆锤发震。将传感器使用热熔胶粘贴在试件的左侧,在第 1、2 组试件左侧的几何中

心放置 1 个传感器 T1; 在第 3、4 组试件的左侧放置 2 个传感器 T2、T3, T2 在上方, T3 在下方; 在第 5 组试件左侧放置 3 个传感器 T4、T5、T6, 从上往下依次是 T4、T5、T6。以试件正面左下角顶点为原点,水平向右为 X 轴,垂直于正面指向背面为 Y 轴,垂直于底面向上为 Z 轴建立三维直角坐标系,传感器 T1~T6 均布设在试件左侧表面的竖直中轴线上,只是 Z 轴坐标不同。传感器和震源坐标见表 2, 具体位置如图 5 传感器三维坐标所示。

表 2 传感器与震源坐标

Table 2 Sensor and source coordinates

位置编号	坐标
人工震源	(300, 150, 150)
T1	(0, 150, 150)
T2	(0, 150, 250)
T3	(0, 150, 100)
T4	(0, 150, 270)
T5	(0, 150, 180)
T6	(0, 150, 60)

2 超声波测速试验

2.1 试验设备与方法

试验采集的数据实时存储在超声波测速仪的主机上,后期可以通过 U 盘进行拷贝转储,通过配套的 Windows 计算机分析处理软件进行后续分析处理。测速试验采用超声波测速仪,主要包括 HC-F800 超声波测速仪、平面换能器、信号电缆,如图 6 所示。设备采用双通道设计,发射脉宽为 $0.1 \sim 100.0 \mu\text{s}$, 发射电压可选择 125、250、500、1 000 V, 声时精度为 $0.10 \mu\text{s}$,采样长度为 1 024 点,采样周期为 $0.10 \sim 2.00 \mu\text{s}$,触发电路为内触发方式,存储卡大小为 2 G, 显示器为 8 寸彩色液晶屏显示($1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$)。

第 1、2、3 组试件测速时将 2 只换能器分别放到测量点一(0, 150, 150)(300, 150, 150)上进行测试;第 4 组试件有 2 层岩层,在每个岩层和错层的中心设置测量点进行测速,从上往下依次为测量点 1、测

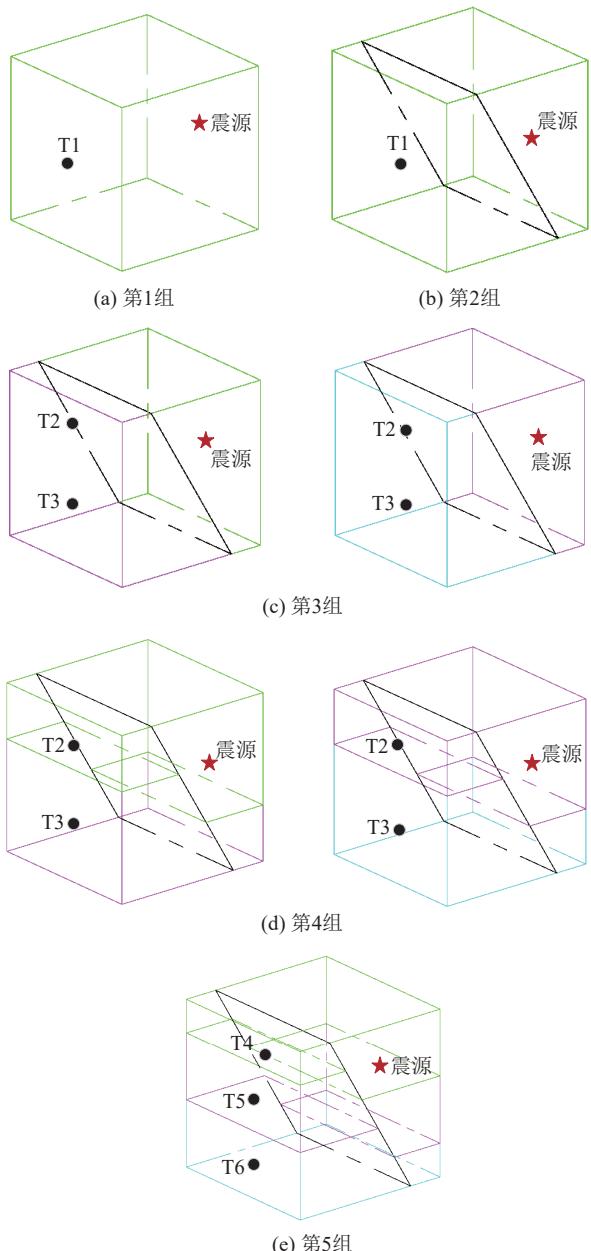


图 5 传感器三维坐标
Fig.5 3D coordinate map of sensors

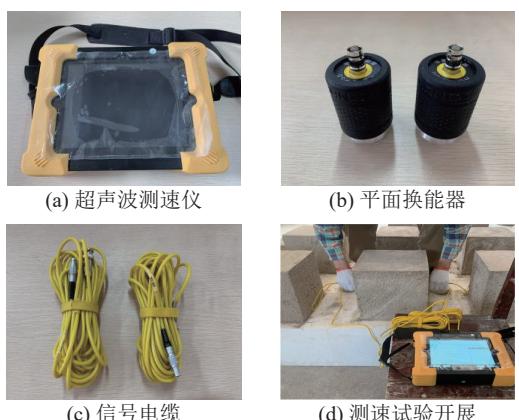


图 6 超声波测速试验
Fig.6 Ultrasonic speed measurement test

量点 2、测量点 3, 测量点 1 为(0, 150, 250)(300, 150, 250), 测量点 2 为(0, 150, 150)(300, 150, 150), 测量点 3 为(0, 150, 50)(300, 150, 50); 第 5 组试件有 3 层岩层, 在每个岩层和错层的中心设置测量点进行测速, 从上往下依次为测量点 1、测量点 2、测量点 3、测量点 4、测量点 5, 测量点 1 为(0, 150, 270)(300, 150, 270), 测点 2 为(0, 150, 210)(300, 150, 210), 测点 3 为(0, 150, 150)(300, 150, 150), 测点 4 为(0, 150, 90)(300, 150, 90), 测点 5 为(0, 150, 30)(300, 150, 30)。测量点 3 维坐标如图 7 所示。将凡士林作为耦合剂充分的涂抹在换能器上, 使换能器与试件充分接触减小误差。每个测点进行 3 次测速, 分别为速度一、速度二、速度三, 然后取平均值。

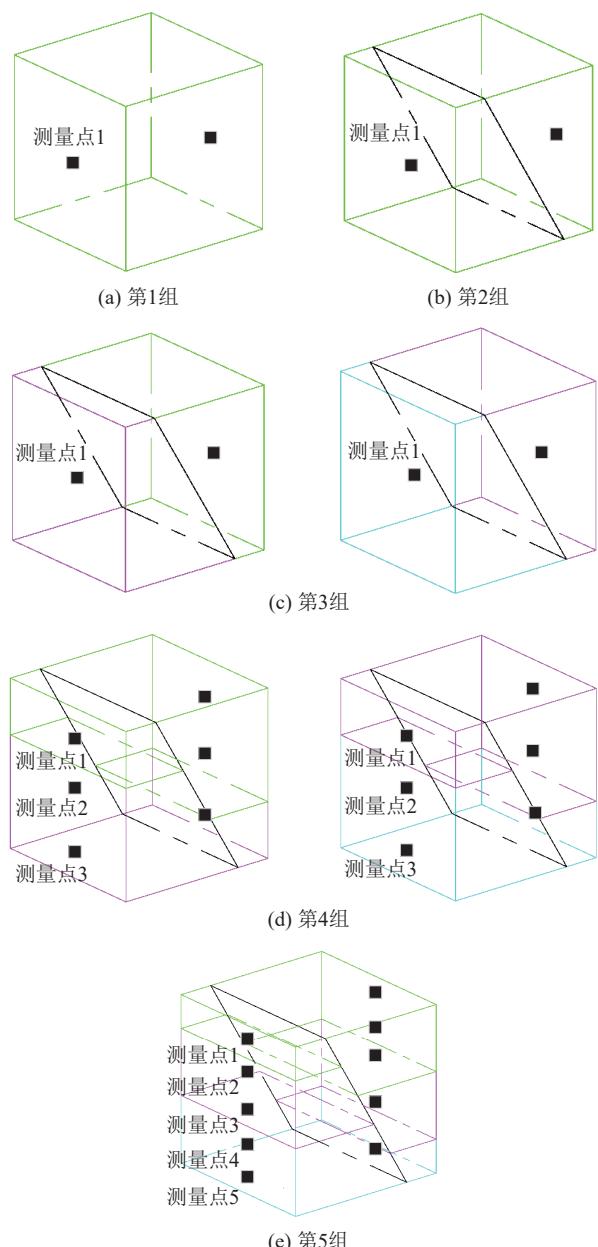


图 7 测量点三维坐标
Fig.7 3D coordinate map of measurement points

2.2 试验结果

由表3可知经过断层后信号传播速度发生衰减,

倾角大小对其有显著影响。且岩层分层数量以及层理面对传播速度都具有影响。

表3 传播速度

Table 3 Propagation speed table

试件分组	测量点	速度一/(km·s ⁻¹)	速度二/(km·s ⁻¹)	速度三/(km·s ⁻¹)	平均速度/(km·s ⁻¹)
第1组(无断层)	测点1	1.538	1.546	1.562	1.549
第2组(45°断层)	测点1	1.232	1.304	1.313	1.283
第2组(60°断层)	测点1	1.373	1.327	1.336	1.345
第2组(75°断层)	测点1	1.425	1.418	1.442	1.428
第3组1	测点1	1.370	1.321	1.313	1.335
第3组2	测点1	1.304	1.190	1.237	1.244
	测点1	1.319	1.266	1.351	1.312
第4组1	测点2	1.240	1.255	1.232	1.242
	测点3	1.174	1.176	1.195	1.182
	测点1	1.215	1.056	1.313	1.195
第4组2	测点2	1.053	1.058	1.058	1.056
	测点3	0.839	0.829	0.748	0.805
	测点1	1.253	1.250	1.285	1.263
	测点2	1.147	1.156	1.313	1.205
第5组	测点3	1.156	1.188	1.147	1.164
	测点4	1.015	1.079	0.939	1.011
	测点5	0.797	0.805	0.734	0.779
细砂岩	测点1	1.538	1.546	1.562	1.549
煤	测点1	1.285	1.373	1.386	1.348
泥岩	测点1	0.995	1.045	1.026	1.022

3 断层中声发射信号传播特性分析

3.1 断层倾角对传播速度的影响

笔者研究的模型是多层次状介质断层,并非均匀连续介质,其中存在断层面、层理面,为了便于分析,假如断层带内的填充物质为均匀连续介质并且本构关系均为线弹性。因为断层带弹性模量较小、密度较小、强度较低,力学性质和断层两侧岩性均有较大差异,所以断层带的波速小于两侧岩石的波速。根据惠更斯原理,应力波是通过介质中各个质点共同作用实现传播的,在波面上的每一个点都可以看成一个新的“波源”,每个子波的波面在此互相叠加共同作用形成新的波面^[22]。基于以上理论分析,对声发射信号在断层中传播的形式进行推导。

当应力波穿过两侧具有相同岩性中间夹杂一个厚度为L的断层时,断层的存在会对传播起到较强的阻碍作用^[23]。波穿过断层需要经过2个结构面,波面的作用情况如图8所示。

由于波在介质A1中的传播速度 v_1 与在介质A2中的传播速度 v_2 不同,因此波的传播规律发生变化,

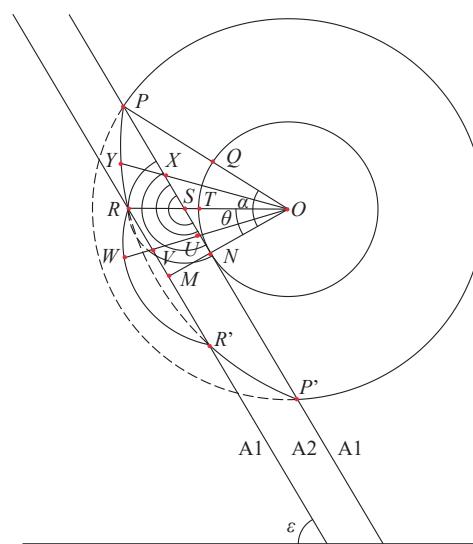


图8 断层波面示意

Fig.8 Schematic diagram of fault wave surface

基于此对波穿过断层后的波面方程进行推导。 O 点为波源位置， N 点为波传播到质介质 A1 与 A2 的交界位置， N 点、 S 点为位于 A1 与 A2 介质界面上的波源。随后波继续向外扩张，当传播至 P 点时，此时将 OP 与 ON 之间的夹角称为波面角 α 。设 P 点到 O 点的距离为 R_0 ， O 点到达介质交界面 N 点的距离 ON 为 r ， N 点与 P 点之间的介质界面上还存在一个点 S ， ON 与 OS 的夹角称为入射角 θ 。

波面从点 Q 传播至点 P 的用时 t_1 为

$$t_1 = \frac{R_0 - r}{v_1} = \frac{r}{v_1} \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) \quad (1)$$

此刻在介质界面上的新波源点 N 已经向外扩张到点 M ，点 N 与点 M 之间的距离 l_{MN} 为

$$l_{MN} = v_2 t_1 = \frac{v_2}{v_1} \left(\frac{r}{\cos \alpha} - r \right) \quad (2)$$

当波面传播到点 P 时，以新的子波波源 S 发出的子波在 A2 中的传播用时 t_2 为

$$t_2 = \frac{R_0}{v_1} - \frac{l_{OS}}{v_1} = \frac{r}{v_1} \left(\frac{1}{\cos \alpha} - \frac{1}{\cos \theta} \right) \quad (3)$$

式中： θ 为入射角， $(^{\circ})$ 。

点 R 为此刻子波波源点 S 向外扩散出的子波波面上离波源 O 最远的点， OR 与 OM 的夹角为入射角 θ 。点 R 为以点 S 为子波波源发出的子波距离介质交界面最远的点。波从点 S 出发在 A2 中的传播距离为

$$l_{RS} = v_2 t_2 = \frac{v_2}{v_1} \left(\frac{r}{\cos \alpha} - \frac{r}{\cos \theta} \right) \quad (4)$$

从介质界面上点 S 为子波波源的子波传播到另一侧介质交界面时， $l_{RS} = \frac{l_{MN}}{\cos \theta} = \frac{L}{\cos \theta}$ ，根据式(4)可得

$$\cos \theta = \frac{L + \frac{v_2}{v_1} r}{\frac{v_2}{v_1} r} \cos \alpha \quad (5)$$

式中： L 为断层厚度，m。

根据上式可以得出， $\cos \theta$ 与 $\cos \alpha$ 的数值大小呈正比例关系，即波面经过第 1 个介质交界面时的入射角 θ 越小，对应传播到 P 点时的波面半径 OP 越小。由于波面越小，波面上的点具有的能量越大，所以穿过断层后的能量自然也越大。假设波源 O 发出的波面到达 $N(Q)$ 点时为初始时刻，之后某一时刻由第 1 个介质界面上入射角为 θ 的子波波源点 S 发出的与入射角方向相同的子波传播至第 2 个介质交界面时为考察时刻，此时波源点 O 发出的波面传播至点 P ，波面角为 α 。从初始时刻到考察时刻波的传播用

时 t_3 为

$$t_3 = \frac{l_{PQ}}{v_1} = \frac{r}{v_1 \cos \alpha} \quad (6)$$

当以小于 θ 的角作为入射角研究考察时刻时， $\beta < \theta$ ，即为弧 NT 之间的点，波在第 1 个介质交界面之前的传播时间 t_4 为

$$t_4 = \frac{r}{v_1 \cos \beta} \quad (7)$$

式中： β 为小于 θ 的入射角， $(^{\circ})$ 。

当点 S 为子波波源发出的子波传播到第 2 个介质交界面上点 R 时，以 NS 之间的点 U 为子波波源发出的子波已经穿过第 2 个介质面，到达断层另一端，波在断层中的传播时间 t_5 为

$$t_5 = \frac{l_{UV}}{v_2} = \frac{L}{v_2 \cos \beta} \quad (8)$$

在第 2 个介质界面上的点 V 作为新的子波波源的波面在介质 A1 中传播的距离为

$$l_{WV} = v_1(t_3 - t_4 - t_5) = \frac{r}{\cos \alpha} - \frac{r}{\cos \beta} - \frac{v_1 L}{v_2 \cos \beta} \quad (9)$$

以点 O 为坐标原点，平行于断层向上为 X 轴，垂直指向断层为 Y 轴建立坐标系， $\beta < \theta$ 时，其波面上的点的坐标方程为

$$\begin{cases} y = \left(L - \frac{v_1 r}{v_2} \right) \tan \beta + \frac{r \sin \beta}{\cos \alpha} \\ x = L \left(1 - \frac{v_1}{v_2} \right) + \frac{r \cos \beta}{\cos \alpha} \end{cases} \quad (10)$$

当以大于 θ 的角作为入射角研究考察时刻时， $\varphi > \theta$ ，即为弧 TQ 之间的点，在第 1 个介质交界面之前的传播时间 t_6 为

$$t_6 = \frac{r}{v_1 \cos \varphi} \quad (11)$$

式中： φ 为大于 θ 的入射角， $(^{\circ})$ 。

当以 S 为子波波源的波面传播到另一侧介质交界面上的 R 点时，以 SP 之间的点 X 为新的子波波源发出的子波还没有传播到第 2 个介质交界面上，波在断层中的传播距离为

$$l_{YX} = v_2(t_3 - t_6) = \frac{v_2 r}{v_1} \left(\frac{1}{\cos \alpha} - \frac{1}{\cos \varphi} \right) \quad (12)$$

此时的波面参数方程为

$$\begin{cases} y = r \tan \varphi + \frac{v_2 r}{v_1} \left(\frac{\sin \varphi}{\cos \alpha} - \tan \varphi \right) \\ x = r + \frac{v_2 r}{v_1} \left(\frac{\cos \varphi}{\cos \alpha} - 1 \right) \end{cases} \quad (13)$$

根据波面方程及图 8 分析可得，入射角 θ 越小，相同时间内波传播的距离越远。进行测速试验时两

换能器在同一水平线上,所以信号沿水平直线传播,断层倾角发生变化,入射角随之而来也会改变。断层倾角 ε 越大,入射角 θ 就越小,相同时内信号传播的距离越远。

当以小于 θ 的角作为入射角时,信号在试件中的传播距离为 l_{ow} ,以 θ 为入射角时的传播距离为 l_{or} ,以大于 θ 的角作为入射角时的传播距离为 l_{oy} ,入射角 θ 与传播距离的具体曲线如图9所示。

由表4和图10图11分析可知,信号经过45°断层后平均传播速度为1.283 km/s,较没经过断层的波速1.549 km/s相比,传播速度衰减0.266 km/s,衰减比例为17.17%;经过60°断层后平均传播速度为1.345 km/s,衰减比例为13.17%;经过75°断层后平均传播速度为1.428 km/s,衰减比例为7.81%。通过以上数据可以发现,信号经过断层后传播速度减小,信号的传播速度随着倾角的增大逐渐增加,传播速度与断层倾角呈正相关,倾角越大速度衰减比例越小。这是由于断层倾角的改变实则是信号入射角的改变,

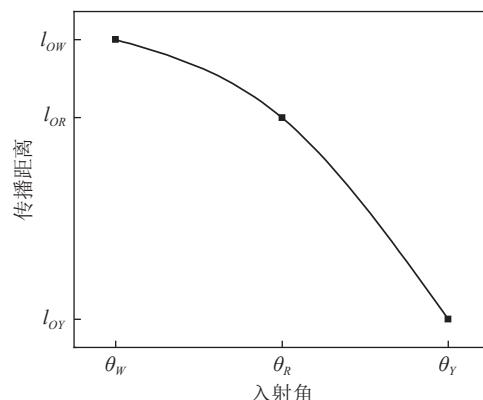


图9 入射角与传播距离的关系

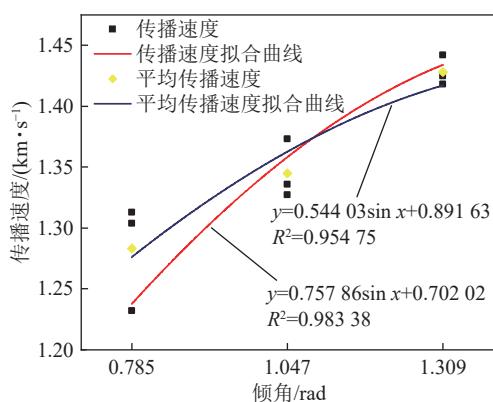
Fig.9 Relationship between incident angle and propagation distance

倾角越大信号入射角就越小,信号在断层带中的传播路径就越短,所以信号在两换能器之间的路径传播时,所用传播时长减小,表现为信号的传播速度增大,试验结果与上述波面方程推导的结论一致,说明结论正确。

表4 传播速度衰减
Table 4 Propagation speed attenuation table

试件分组	速度一/ (km·s ⁻¹)	速度一衰减		速度二/ (km·s ⁻¹)	速度二衰减		速度三/ (km·s ⁻¹)	速度三衰减		平均速度/ (km·s ⁻¹)	平均速度衰减	
		衰减量/ (km·s ⁻¹)	比例/%		衰减量/ (km·s ⁻¹)	比例/%		衰减量/ (km·s ⁻¹)	比例/%		衰减量/ (km·s ⁻¹)	比例/%
第2组(45°断层)	1.232	0.306	19.90	1.304	0.242	15.65	1.313	0.249	15.94	1.283	0.266	17.17
第2组(60°断层)	1.373	0.165	10.73	1.327	0.219	14.17	1.336	0.226	14.47	1.345	0.204	13.17
第2组(75°断层)	1.425	0.113	7.35	1.418	0.128	8.28	1.442	0.120	7.68	1.428	0.121	7.81

为了进一步研究传播速度和断层倾角之间的关系,由表4数据分析,运用非线性拟合的方法进行函数拟合,拟合度 R^2 约等于1,拟合效果良好,结果如图10所示。



注:横坐标采用弧度制, $45^\circ = \frac{\pi}{4} = 0.785$, $60^\circ = \frac{\pi}{3} = 1.047$, $75^\circ = \frac{5\pi}{12} = 1.309$, 下同。

图10 传播速度拟合曲线

Fig.10 Propagation speed fitting curves

对试验数据进行非线性分析,得到传播速度和断层倾角的关系如下:

$$v = 0.757 86 \sin \varepsilon + 0.702 02$$

式中: v 为传播速度, km/s; ε 为断层倾角, rad。

平均传播速度和断层倾角的关系如下:

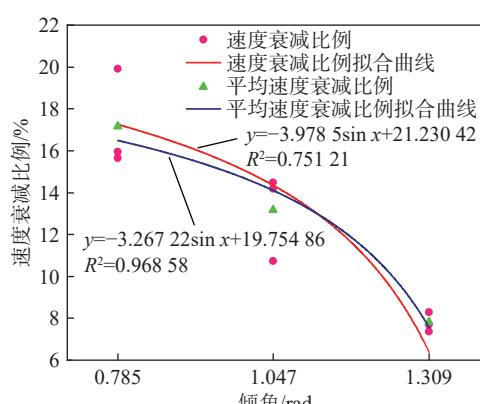


图11 速度衰减拟合曲线

Fig.11 Velocity attenuation fitting curves

$$\bar{v} = 0.54403 \sin \varepsilon + 0.89163$$

可以发现随着断层倾角的增大,传播速度也随之增大,传播速度和断层倾角呈正相关。

针对速度衰减比例与断层倾角的关系,通过非线性拟合的方式进行计算,拟合效果良好,结果如图11所示。

速度衰减比例与断层倾角的关系为

$$\lambda = -3.9785 \tan \varepsilon + 21.23042$$

式中: λ 为速度衰减比例, %。

平均速度衰减比例与断层倾角的关系为

$$\bar{\lambda} = -3.26722 \tan \varepsilon + 19.75486$$

通过分析可得,断层倾角越大,速度衰减比例越小。

3.2 层理面对传播速度的影响

第4组试件有2个岩层,2个岩层之间自然胶结形成一个层理面,共有2种类型第4组1和第4组2,见表5和表6。由表5分析可知,测点1断层两侧岩

性均为砂岩,所测的传播速度为1.312 km/s,相较于无层理面的传播速度1.345 km/s,速度衰减量为0.033 km/s,衰减比例为2.45%;测点2断层两侧岩性为煤和砂岩,所测的传播速度为1.242 km/s,速度衰减量为0.093 km/s,衰减比例为6.97%;测点3断层两侧的岩性均为煤,所测的传播速度为1.182 km/s,速度衰减量为0.069 km/s,衰减比例为5.52%。由表6分析可知,测点1断层两侧岩性均为煤,所测的传播速度为1.195 km/s,速度衰减量为0.056 km/s,衰减比例为4.48%;测点2断层两侧岩性为泥岩和煤,所测的传播速度为1.056 km/s,速度衰减量为0.188 km/s,衰减比例为15.11%;测点3断层两侧岩性均为泥岩,所测的传播速度为0.805 km/s,速度衰减量为0.082 km/s,衰减比例为9.24%。基于以上分析发现层理面也会对传播速度产生影响,层理面的存在会使断层试件每个测量点的传播速度发生不同程度的衰减。

表5 第4组1试件传播速度

Table 5 The fourth group 1 specimen propagation velocity table

断层两侧岩性	无层理面速度/(km·s ⁻¹)	测量点	1个层理面速度/(km·s ⁻¹)	速度衰减量/(km·s ⁻¹)	衰减比例/%
砂-砂	1.345	测点1	1.312	0.033	2.45
煤-砂	1.335	测点2	1.242	0.093	6.97
煤-煤	1.251	测点3	1.182	0.069	5.52

表6 第4组2试件传播速度

Table 6 The fourth group 2 specimen propagation velocity table

断层两侧岩性	无层理面速度/(km·s ⁻¹)	测量点	1个层理面速度/(km·s ⁻¹)	速度衰减量/(km·s ⁻¹)	衰减比例/%
煤-煤	1.251	测点1	1.195	0.056	4.48
泥-煤	1.244	测点2	1.056	0.188	15.11
泥-泥	0.887	测点3	0.805	0.082	9.24

第5组试件有3层岩层,岩层之间共2个层理面。由表7分析可知,测点1断层两侧岩性均为砂岩,所测的传播速度为1.263 km/s,相较于无层理面的传播速度1.345 km/s,速度衰减量为0.082 km/s,衰减比例为6.10%,可以看出与只有1个层理面的试件速度衰减比例2.45%相比,衰减比例有所提升;测点2断层两侧岩性为煤和砂岩,所测的传播速度为1.205 km/s,速度衰减量为0.130 km/s,衰减比例为9.74%;测点3断层两侧岩性均为煤,所测的传播速度为1.164 km/s,速度衰减量为0.087 km/s,衰减比例为6.95%;测点4断层两侧岩性为泥岩和煤,所测的传播速度为1.011 km/s,速度衰减量为0.233 km/s,衰

减比例为18.73%;测点5断层两侧岩性均为泥岩,所测的传播速度为0.779 km/s,速度衰减量为0.108 km/s,衰减比例为12.18%。基于以上分析发现,层理面会导致传播速度发生衰减,具体表现为随着层理面个数的增加传播速度衰减比例增大,1个层理面对速度的阻碍作用较弱速度衰减比例较小,2个层理面对速度的阻碍作用较强速度衰减比例较大。由惠更斯原理可得,信号的传播是由波源点发出一个个波面形成的,众多子波的波面在某一质点相互叠加引起质点振动,从而形成信号的传播。层理面导致传播速度衰减是由于信号在层理处发生反射、折射,导致信号一部分被吸收,而反射波会干扰子波原本的传播

表7 第5组试件传播速度
Table 7 The fifth group of specimen propagation velocity table

断层两侧岩性	无层理面速度/(km·s ⁻¹)	测量点	2个层理面速度/(km·s ⁻¹)	速度衰减量/(km·s ⁻¹)	衰减比例/%
砂-砂	1.345	测点1	1.263	0.082	6.10
煤-砂	1.335	测点2	1.205	0.130	9.74
煤-煤	1.251	测点3	1.164	0.087	6.95
泥-煤	1.244	测点4	1.011	0.233	18.73
泥-泥	0.887	测点5	0.779	0.108	12.18

状态,从而导致传播速度发生衰减。而2个层理面的衰减比例大于1个层理面,是由于随着层理面的增多,信号的反射、折射情况变得复杂,众多波面叠加在一起对质点振动影响较大,从而导致传播速度产生较大衰减。

4 断层中声发射信号特征分析

4.1 断层倾角对信号特征的影响

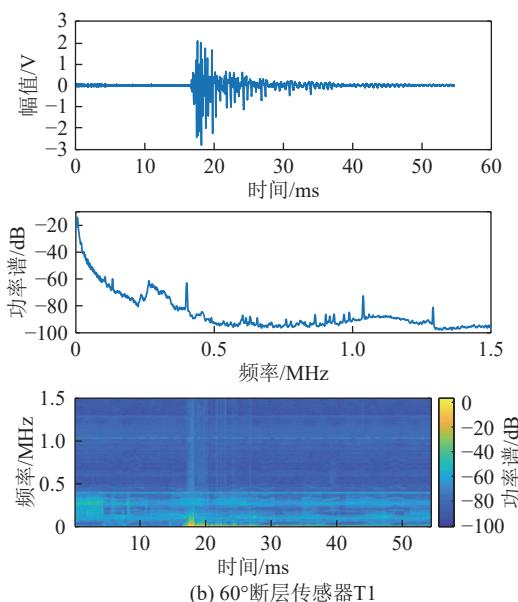
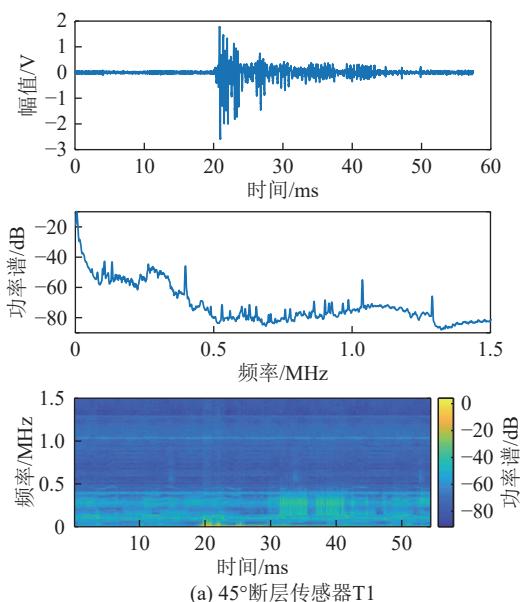
使用声发射软件将采集到的信号进行截取并导出,利用Matlab软件绘制信号的波形图、频域图、时频图,如图12所示。结合波形图、频域图、时频图对声发射信号的最大幅值、主频、频率区间进行提取,见表8和表9。

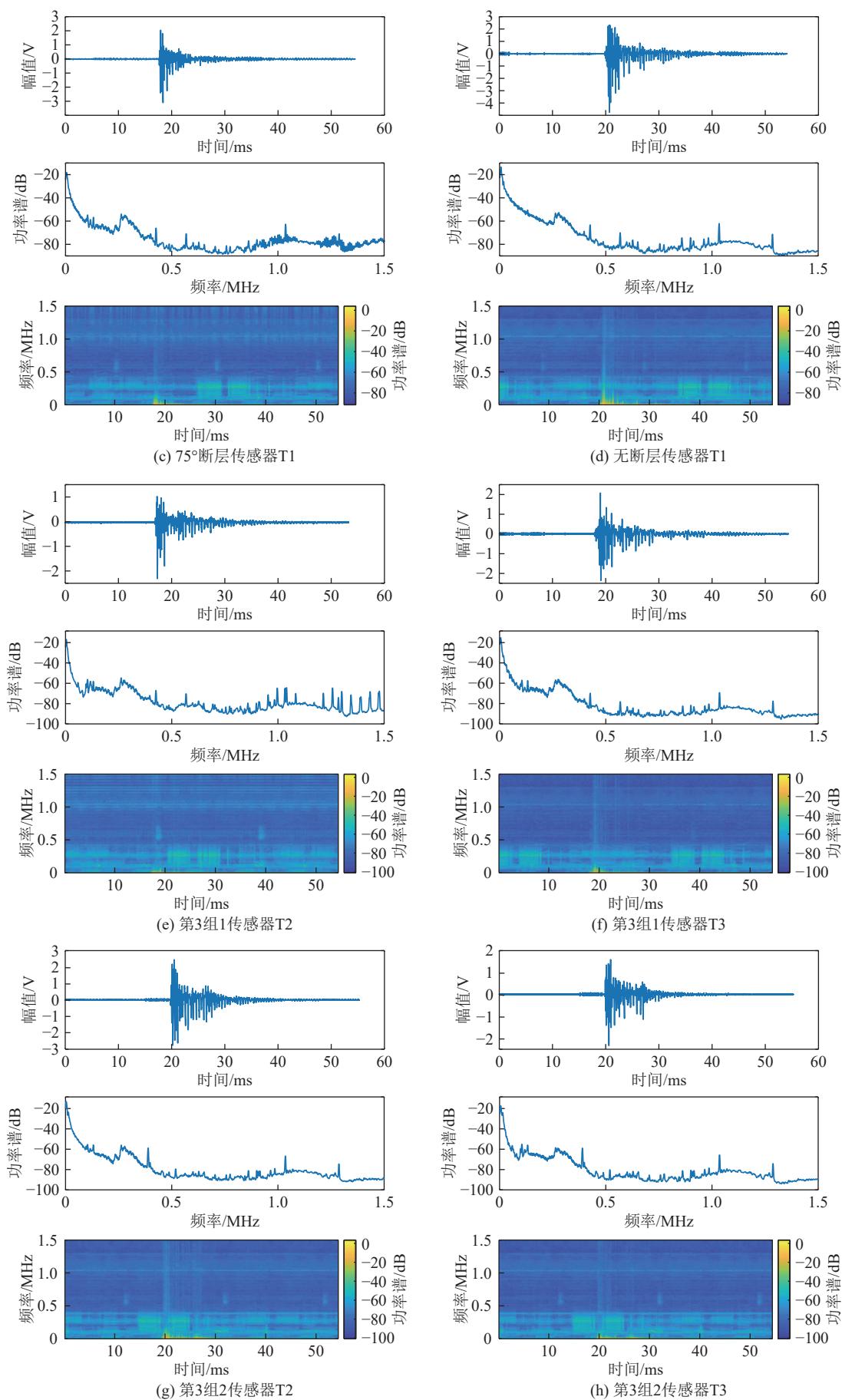
由表8分析可知,信号从右侧震源传出经过45°断层至左侧传感器时,最大幅值为2.5927V,主频率为3 599 Hz,信号能量主要集中在2 100~4 800 Hz。经过60°断层时,最大幅值为2.7880 V,主频率为4 131 Hz,信号能量主要集中在2 300~5 200 Hz。经过75°断层时,最大幅值为3.0907 V,主频率为4 956 Hz,信号能量主要集中在3 950~5 560 Hz。信

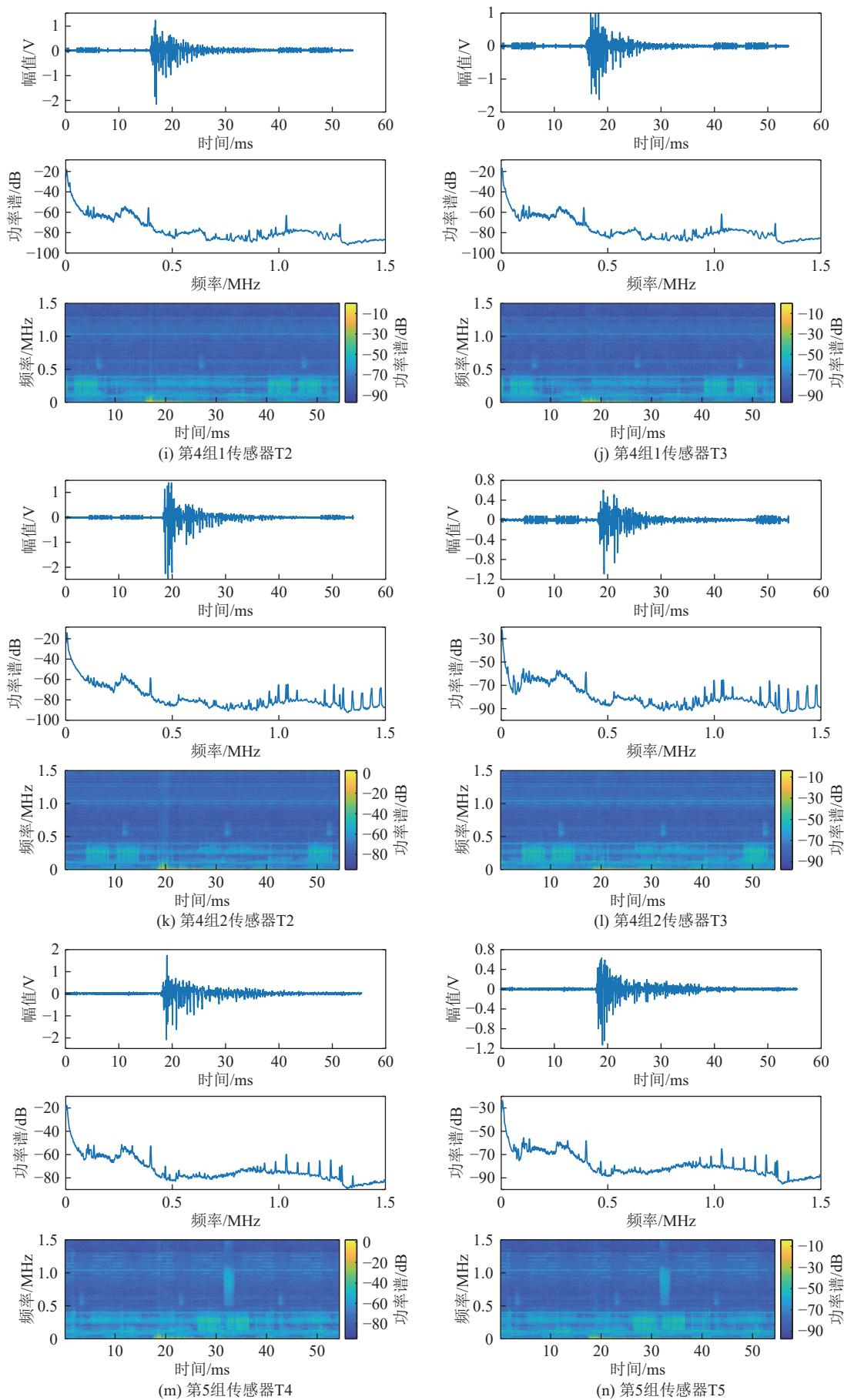
号从震源传出不经过断层至传感器时,最大幅值为4.7460 V,主频率为4 964 Hz,信号能量主要集中在3 700~5 700 Hz。通过以上分析可知,断层带处介质弹性模量小、强度低,断层会阻碍信号的传播,引起信号衰减,表现为最大幅值减小,主频率降低,频率区间向低频方向移动。断层会过滤掉信号的高频部分,说明声发射信号主要由低频和高频2种信号构成,低频部分衰减较慢,为信号传播提供了绝大部分能量,而高频部分衰减较快。不同倾角的断层对信号的影响具体表现为,随着倾角的增大最大幅值、主频、频率区间的数值逐渐增大,倾角越大信号的衰减越小,这是由于断层倾角越大,信号穿过断层时,在断层带的传播路径越短,因此信号的最大幅值、频率衰减越小。

4.2 层理面对信号特征的影响

第3组试件上下盘岩性不同,只有1个岩层无层理面;第4组试件有2个岩层,有1个层理面。第3组的试件1、2和第4组的试件1、2两两对应,可以得出层理面对声发射信号特征的影响规律。由表9分析可知,第3组试件1传感器T2的最大幅值为2.3095 V,T3的最大幅值为2.3583 V。第4组试







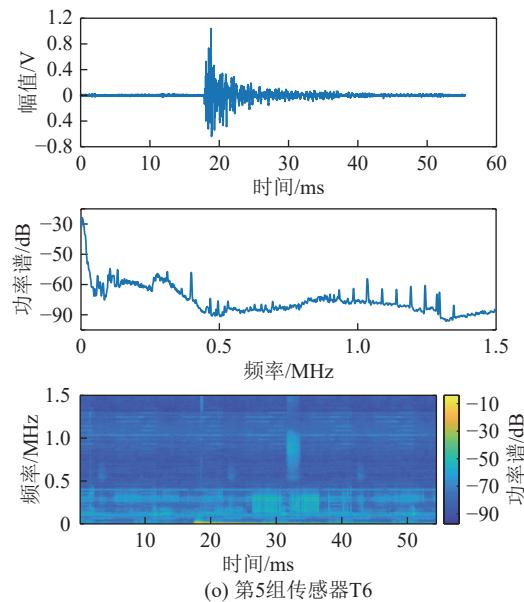


图 12 各传感器信号特征

Fig.12 Signal characteristic diagram of each sensor

件 1 传感器 T2 的最大幅值为 2.187 4 V, T3 的最大幅值为 1.621 0 V, 相较于第 3 组试件的最大幅值有小幅度的衰减。第 3 组试件 2 传感器 T2 的最大幅值为 2.758 7 V, T3 的最大幅值为 2.333 9 V。第 4 组

表 8 不同倾角断层传感器信号特征

Table 8 Signal characteristics of fault sensors with different dip angles

试件编号	最大幅值/V	主频/Hz	频率区间/Hz
45°断层	2.592 7	3 599	2 100 ~ 4 800
60°断层	2.788 0	4 131	2 300 ~ 5 200
75°断层	3.090 7	4 956	3 950 ~ 5 560
无断层	4.746 0	4 964	3 700 ~ 5 700

表 9 各传感器信号特征

Table 9 Signal characteristics of each sensor

试件编号	传感器编号	最大幅值/V	主频/Hz	频率区间/Hz
第3组1	T2	2.309 5	3 640	2 800 ~ 4 200
	T3	2.358 3	3 663	2 730 ~ 4 430
第3组2	T2	2.758 7	3 216	2 380 ~ 4 040
	T3	2.333 9	4 096	2 950 ~ 5 040
第4组1	T2	2.187 4	3 532	2 500 ~ 4 350
	T3	1.621 0	3 485	2 980 ~ 4 070
第4组2	T2	2.465 7	4 085	3 100 ~ 4 900
	T3	1.093 7	3 431	2 620 ~ 4 090
第5组	T4	2.099 5	3 127	2 050 ~ 3 910
	T5	1.127 9	3 036	2 100 ~ 3 860
	T6	1.040 0	2 971	1 990 ~ 3 560

试件 2 传感器 T2 的最大幅值为 2.465 7 V, T3 的最大幅值为 1.093 7 V, 相较于第 3 组试件的最大幅值有小幅度的衰减。针对主频率和频率区间进行分析可知, 第 3 组、第 4 组试件在主频和频率区间上并无较大差异, 也无规律性的变化。可以发现 1 个层理面对信号的阻碍作用较小, 与无层理面的信号频谱特征基本相同, 无法对信号的最大幅值、主频率、频率区间产生较大影响。原因是模型尺寸较小, 1 个层理面无法使信号发生巨大的改变。第 5 组试件有 3 个岩层, 共有 2 个层理面, 第 5 组试件的最大幅值、主频、频率区间相较于第 3 组有较大幅度的衰减。发现 2 个层理面对信号的阻碍作用较强, 会使信号产生较大幅度的衰减。这是由于 2 个层理会对信号频谱特征产生较大的影响, 声发射设备灵敏度较高可以清晰地显示出细微的差异。

4.3 断层倾角对信号能量的影响

通过 Matlab 软件绘制出传感器接收到的声发射信号瞬时能量图, 如图 13 所示, 来探究信号能量变化与断层倾角之间的关系。

由表 10 和图 13 可知, 经过断层后能量会产生较大的衰减。经过 45°断层后信号能量衰减最为严重, 衰减比例为 70.16%, 经过 60°断层后能量衰减比例为 65.49%, 经过 75°后信号能量衰减比例为 57.59%, 能量衰减曲线如图 14 所示。信号的传播过程实质上就是能量的传递过程, 岩体中一个质点振动带动周围质点振动从而实现能量的传递, 由于断层破碎带内介质弹性模量小、密度小、强度低、力学

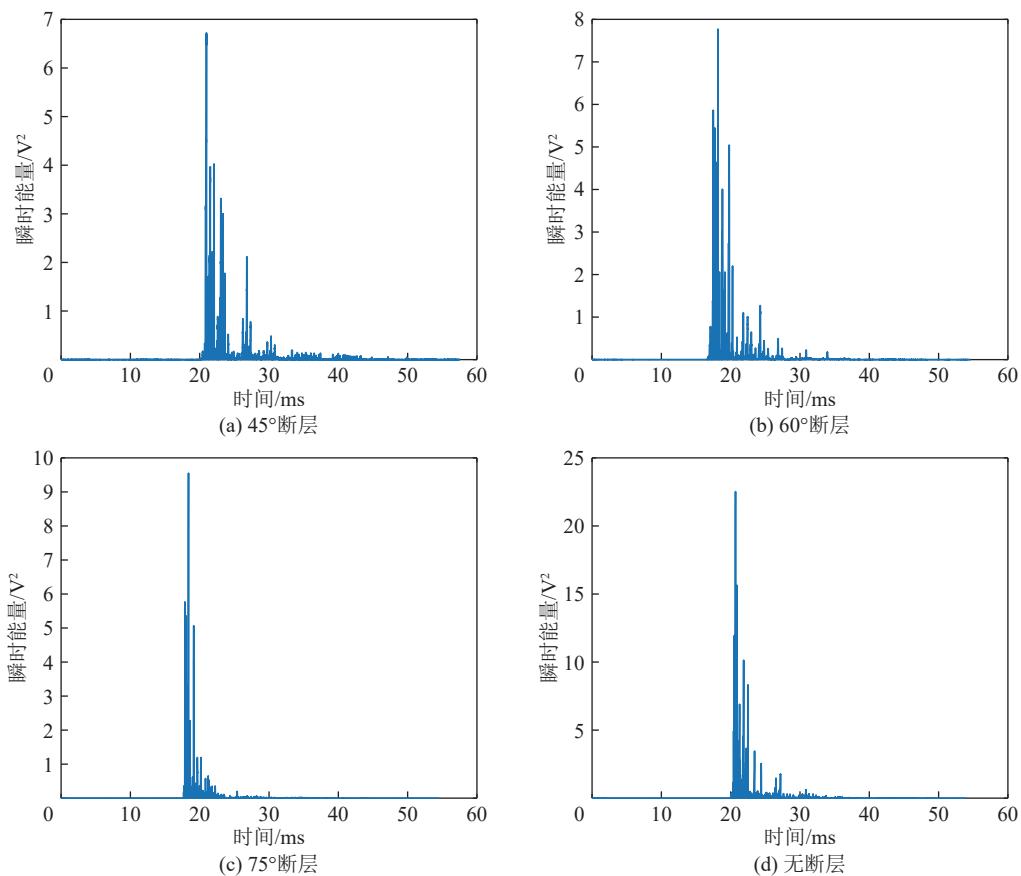


图 13 断层峰值能量图
Fig.13 Fault peak energy map

表 10 断层峰值能量
Table 10 Fault peak energy

断层倾角	峰值能量/V ²	能量衰减量/V ²	衰减比例/%
45°	6.722 09	15.802 41	70.16
60°	7.772 94	14.751 56	65.49
75°	9.552 43	12.972 07	57.59
无断层	22.524 50	—	—

性能与断层两侧岩体差异较大,断层破碎带内的介质就相当于一种软弱岩体,因此信号经过断层后能量会产生较大的衰减。根据以上分析可得,随着断层倾角的增加瞬时能量峰值也随之增大,二者基本呈线性关系,断层倾角越大能量衰减比例越小。这是由于断层倾角越大,信号入射角越小,对应时刻的波面半径越小,则波面上的点能量越大,所以穿过断层传播至传感器的能量也越大,从而使信号能量的衰减比例越小。

5 结 论

1)通过波面方程推导和试验验证,发现断层对声发射信号传播速度具有阻碍作用,会使传播速度发生衰减,倾角越大速度衰减比例越小,信号的传播速度随着倾角的增大逐渐增加,传播速度与断层倾角呈正相关。层理面也会使传播速度发生衰减,2个层理面对速度的衰减作用大于1个层理面对速度的衰减作用。

2)断层会过滤掉信号的高频部分,声发射信号经过断层后最大幅值减小,主频率降低,频率区间向低频方向移动,断层倾角越大,信号最大幅值、主频、

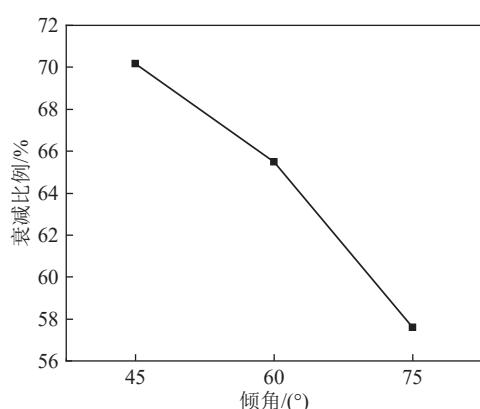


图 14 衰减比例与断层倾角的关系
Fig.14 Relationship between attenuation ratio and inclination angle

频率区间越大。

3)1个层理面对声发射信号频谱特征的影响较小,2个层理面会使信号的最大幅值、主频、频率区间发生较大幅度的衰减。

4)断层的存在会使声发射信号的瞬时能量发生巨大衰减,随着倾角的增大衰减比例随之减小,断层倾角越小衰减越为严重,倾角越大衰减较轻。

参考文献(References):

- [1] 毕贵权,李宁,李国玉.非贯通裂隙介质中波传播特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S1):3116–3123.
BI Guiquan, LI Ning, LI Guoyu. Experimental study on wave propagation characteristics in non-penetrating fractured media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3116–3123.
- [2] 谭云亮,谭涛,张修峰,等.正断层两盘动力灾害显现差异性及机制[J].煤炭科学技术,2023,51(1):214–223.
TAN Yunliang, TAN Tao, ZHANG Xiufeng, et al. Difference and mechanism of dynamic behaviors between two walls of normal fault[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 214–223.
- [3] 李楠.微震震源定位的关键因素作用机制及可靠性研究[D].徐州:中国矿业大学,2014
LI Nan. Research on mechanisms of key factors and reliability for microseismic source location[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014
- [4] 孙运江,左建平,李玉宝,等.邢东矿深部带压开采导水裂隙带微震监测及突水机制分析[J].岩土力学,2017,38(8):2335–2342.
SUN Yunjiang, ZUO Jianping, LI Yubao, et al. Micro-seismic monitoring on fractured zone and water inrush mechanism analysis of deep mining above aquifer in Xingdong coalmine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2335–2342.
- [5] 欧阳振华,孔令海,齐庆新,等.自震式微震监测技术及其在浅埋煤层动载矿压预测中的应用[J].煤炭学报,2018,43(S1):44–51.
OUYANG Zhenhua, KONG Linghai, QI Qingxin, et al. Self-seismic microseismic monitoring technology and its application in prediction of dynamic ground pressure in shallow coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S1): 44–51.
- [6] 杜立杰,王佳兴,洪开荣,等.TBM施工岩爆微震监测的准确率及适用性研究[J].土木工程学报,2020,53(S1):278–285.
DU Lijie, WANG Jiaxing, HONG Kairong, et al. Study on accuracy and applicability of monitoring rockburst microseisms in TBM construction[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1): 278–285.
- [7] 韩侃,陈贤丰,杨文斌,等.基于微震监测的川藏铁路某隧道岩爆预测研究[J].铁道工程学报,2020,37(11):90–95.
HAN Kan, CHEN Xianfeng, YANG Wenbin, et al. Research on the rock burst prediction of a tunnel in Sichuan-Tibet railway based on microseismic monitoring[J]. Journal of Railway Engineering
- Society, 2020, 37(11): 90–95.
- [8] 陈结,陈紫阳,蒲源源.基于频谱分析和卷积神经网络的岩石声发射信号定位研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(S2):3271–3281.
CHEN Jie, CHEN Ziyang, PU Yuanyuan. Research on rock acoustic emission signal location based on spectrum analysis and convolutional neural network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S2): 3271–3281.
- [9] MA J, WU S C, ZHANG X P, et al. Modeling acoustic emission in the Brazilian test using moment tensor inversion[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 123: 103567.
- [10] ZHAO Q, GLASER S D. Relocating acoustic emission in rocks with unknown velocity structure with machine learning[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(5): 2053–2061.
- [11] 石玉成,陈丙午.非发震断层的地震效应问题[J].西北地震学报,1994(1):12–20.
SHI Yucheng, CHEN Bingwu. Seismic effect of non-seismogenic faults[J]. China Earthquake Engineering Journal, 1994(1): 12–20.
- [12] 刘际飞,璩世杰.节理走向角度对爆炸应力波传播影响的试验研究[J].爆破,2014,31(2):57–61,66.
LIU Jifei, QU Shijie. Experimental study of influence of joint angle of strike on explosive stress wave propagation[J]. Blasting, 2014, 31(2): 57–61, 66.
- [13] 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,2005,24(14):2456–2462.
FAN Liuming, LI Ning. Transmission model of weak intercalation and its vibration isolation properties[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2456–2462.
- [14] 田振农,张乐文.岩体中软弱夹层影响爆炸波传播规律的数值分析[J].沈阳工业大学学报,2010,32(3):349–354.
TIAN Zhennong, ZHANG Lewen. Numerical analysis of blast wave propagation in rock mass containing weak interlayer[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2010, 32(3): 349–354.
- [15] CHA M S, CHO G C, SANTAMARINA J C. Long-wavelength P-wave and S-wave propagation in jointed rock masses[J]. Geophysics, 2009, 74(5): E205–E214.
- [16] MIRANDA L, CANTINI L, GUEDES J, et al. Applications of sonic tests to masonry elements: Influence of joints on the propagation velocity of elastic waves[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(6): 667–682.
- [17] 宋博学,俞缙,林从谋.穿越位移不连续结构面的随机地震波模拟[J].武汉理工大学学报,2010,32(9):145–148.
SONG Boxue, YU Jin, LIN Congmou. Simulation of stochastic seismic wave in displacement discontinuity joints[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(9): 145–148.
- [18] MCCANN C, SOTHCOTT J. Sonic to ultrasonic Q of sandstones and limestones: Laboratory measurements at in situ pressures[J]. Geophysics, 2009, 74(2): WA93–WA101.
- [19] 姜福兴,宋广东,孔令海,等.微地震波在煤矿岩层中的传播特征研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S1):2674–2679.

- JIANG Fuxing, SONG Guangdong, KONG Linghai, et al. Study on propagation characteristics of microseismic waves in coal mine strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 2674–2679.
- [20] 赵仕俊,赵锡奎,杨少春.地质构造物理模拟实验模型的相似分析[J].*西北地质*,2005,38(4):14–18.
- ZHAO Shijun, ZHAO Xikui, YANG Shaochun. Similar analysis of geological structure physical model [J]. *Northwestern Geology*, 2005, 38(4): 14–18.
- [21] 杨成方.深部大采高采场覆岩运动及应力演化规律研究 [D].阜新:辽宁工程技术大学,2020.
- YANG Chengfang. Study on overburden movement and stress evolution law in deep mining height face[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2020.
- [22] 贾宝新.矿震监测的理论与应用研究 [D].阜新:辽宁工程技术大学,2013.
- JIA Baoxin. Theory and application research of mine earthquake monitoring[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2013.
- [23] 贾宝新,陈浩,王坤,等.特殊地质结构层状岩体微震传播规律试验研究 [J].*岩土力学*,2023,44(1):54–66.
- JIA Baoxin, CHEN Hao, WANG Kun, et al. Experimental study of microseismic propagation of layered rock mass with special geological structure [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(1): 54–66.