



推荐阅读:

[我国煤矿冲击地压发展 70 年:理论与技术体系的建立与思考](#)

[我国大采高综采技术及围岩控制研究现状](#)

[保水采煤研究 30 年回顾与展望](#)

[煤矿“短充长采”科学开采模式研究](#)

[西部煤炭绿色开发地质保障技术研究现状与发展趋势](#)

[基于保水采煤的煤炭开采带与泉带错位规划问题](#)

[煤矿冲击地压灾害防控技术研究现状及展望](#)

[基于负煤柱巷道布置的煤矿冲击地压防治技术研究](#)

[软弱厚煤层沿顶掘进并沿底回采技术研究](#)

[松散煤岩组合体不均匀破坏试验研究](#)

[采场空间结构模型及相关动力灾害控制研究](#)

[坚硬顶板型冲击地压发生机理及监测预警研究](#)

[基于动静载叠加原理的冲击矿压灾害防治技术研究](#)

[大空间采场远场关键层破断形式及其对矿压显现的影响](#)

[岩层移动理论与力学模型及其展望](#)

[我国水体下保水采煤技术研究进展](#)

[层影响下岩体采动灾变响应研究现状与展望](#)

[特大断面冲击地压巷道破坏机理及控制技术研究](#)

[动压影响下的软岩巷道加固治理技术研究](#)

[弱胶结富水顶板巷道围岩控制技术研究](#)



移动扫码阅读

黄超慧,陶祥忠.含断层煤层反射槽波数值模拟及响应特征研究[J].煤炭科学技术,2020,48(8):210-215. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.08.026

HUANG Chaohui,TAO Xiangzhong.Study on numerical simulation and response characteristics of reflecting in-seam wave in coal seams with faults[J].Coal Science and Technology,2020,48(8):210-215. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.08.026

## 含断层煤层反射槽波数值模拟及响应特征研究

黄超慧<sup>1,2</sup>,陶祥忠<sup>2</sup>

(1.中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221116;2.平顶山天安煤业股份有限公司 四矿,河南 平顶山 467093)

**摘 要:**槽波勘探是煤矿井下勘探的重要手段,其借助槽波在煤层中传播具有能量强,传播距离远等优点,实现采煤工作面断层或其他地质异常体的探测。透射槽波勘探研究较为成熟,已在煤矿生产中得到广泛应用。近年来,反射槽波逐渐得到关注,利用反射槽波预测断层落差是今后槽波勘探的研究方向,其理论依据研究并不充分。为了明确反射槽波能量特征与断层落差间的关系,建立 6 个不同落差的断层模型(断层落差分别为煤层厚度的 1/8、1/4、1/2、3/4、1 倍、2 倍),设计反射槽波勘探观测系统,基于高阶交错网格有限差分算法进行数值模拟,通过提取 6 个不同模型的反射槽波振幅信息,分析反射槽波能量随偏移距以及断层落差的变化特征,并分析带通滤波对反射槽波能量分布的影响。分析结果表明:断层落差小于 1 倍煤厚,随着落差增加,反射槽波能量逐渐增加;断层落差继续增加,反射槽波能量逐渐降低;断层落差不同,其对应的反射槽波能量随偏移距的变化趋势一致,但断层落差大于 3/4 煤厚时,远近偏移距反射能量出现显著差异;100~150 Hz 和 150~200 Hz 带通滤波分别对断层落差小于 1/2 煤厚和大于 3/4 倍煤厚的反射槽波能量影响显著。因此,基于反射槽波能量分布特征进行断层落差探测,理论依据充足,具有实际应用价值。

**关键词:**反射槽波勘探;反射槽波能量特征;三维数值模拟;断层落差

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)08-0211-06

### Study on numerical simulation and response characteristics of reflecting in-seam wave in coal seams with faults

HUANG Chaohui<sup>1,2</sup>,TAO Xiangzhong<sup>2</sup>

(1.State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining,China University of Mining Technology,Xuzhou 221116, China;

2.No.4 Coal Mine,Pingdingshan Tian'an Coal Industry Co., Ltd.,Pingdingshan 467093 China)

**Abstract:**ISS (in-seam seismic) exploration is a significant method for underground coal mine exploration. It has the advantages of strong energy and long transmission distance through the transmission of waves in coal seams to detect the fault or other geologic anomalies. Research on transmitted ISS exploration is relatively mature, and it has been widely used in underground coal mine production. In recent years, reflected ISS exploration is getting more and more attention. Detection of fault drop by reflected ISS exploration is the future research direction, and its theoretical basis is not sufficient. In order to clarify the relationship between in-seam wave reflected energy and fault drop, six fault models with different fault drop are established. In those models, fault drop varies from 1/8 times coal thickness to 2 times coal thickness. Observation system is designed for those models and numerical simulation is performed by high order staggered grid finite difference algorithm. By extracting the reflection wave amplitude information of six different models, the reflection wave energy with offset and fault drop change characteristics were analyzed and the effect of band-pass filtering on the energy distribution of the reflected in-seam wave were analyzed too. The analysis results indicate that: while fault drop is less than one time of the coal seam thickness, the reflection amplitude gradually increases with the increase of fault drop. When fault drop is larger than coal seam thickness, reflection amplitude decreases with increase of fault drop. In the situation of various fault drops, the trend of amplitude versus offset is consistent, but

收稿日期:2020-03-11;责任编辑:杨正凯

作者简介:黄超慧(1977—),男,河南襄城人,博士研究生,高级工程师。

通讯作者:陶祥忠(1982—),男,河南商丘人,工程师。E-mail:540885486@qq.com

when fault drop is larger than 3/4 times of the coal seam thickness, the reflected energy of the near and far offset is significantly different. The 100~150 Hz and 150~200 Hz band-pass filters have significant effects on the energy of reflection in-seam waves with a fault drop less than 1/2 coal thickness and greater than 3/4 coal thickness, respectively. Therefore, the detection of fault drop based on the energy distribution characteristics of the reflected in-seam wave has sufficient theoretical basis and practical application value.

**Key words:**reflected ISS exploration; reflected in-seam wave energy distribution;three dimensional numerical simulation; fault drop

0 引 言

煤炭资源在我国能源结构中占据着主体地位<sup>[1]</sup>。煤矿采掘过程中遇到断层等地质异常体,会使开采成本提高 10%~20%,甚至引发事故,约 80% 事故与断层有关<sup>[2]</sup>。因此,在工作面回采之前查明断层显得尤为重要。

槽波地震勘探具有震源激发频率高(一般100~1 000 Hz),接收点和激发点均接近探测目标体,接收的地震记录信号频率高、能量强、信噪比高等优点,能够实现透射波、绕射波、散射波、折射波、转换波和反射波等多类型波的高分辨率成像<sup>[3-5]</sup>。1955 年 Evison<sup>[6]</sup>在一篇短论文中首先报道了他在新西兰一个煤矿里激发与接收到了煤层波,认为它是由煤层制导的洛夫波,并预言该导波可能在采矿业中得到应用。我国从 80 年代初期开始研究槽波。1983 年,中国矿业大学在微机上开发了可独立运行的 MISS 槽波处理软件。1994 年刘天放等编写的《槽波地震勘探》<sup>[7]</sup>,总结了槽波特征,为国内槽波勘探提供了理论基础。槽波勘探技术主要分为透射槽波勘探和反射槽波勘探 2 种。透射槽波勘探技术较为成熟,主要采用透射法实现工作面内部构造探测。反射槽波勘探不仅能探测工作面内部构造,还可实现巷道迎头前方的地质构造,适用范围较广,逐渐受到关注。I M Mason 等<sup>[8]</sup>在英国某煤矿开展了反射槽波探测断层的试验,基于延迟求和方法实现断层成像。Y Hu 等<sup>[9]</sup>将逆时偏移技术引入反射槽波,利用模型数据对反射槽波成像进行了尝试。沈鸿雁<sup>[10]</sup>提出了 RTS(Reflected-Wave Tunnel Seismic Prediction)反射波法隧道井巷地震超前预报技术。张平松等<sup>[11]</sup>提出了矿井震波超前探测技术 MSP(Mine Seismic Prediction)。王季<sup>[12]</sup>提出了基于绕射波偏移算法的反射槽波空巷道探测技术。文献[13,14]分别研究了反射槽波的绕射偏移成像方法,并进行了实际资料测试。李江华等<sup>[15]</sup>采用振幅包络计算和共中心点叠加偏移技术,优化了数据精细化处理流程。姬广忠等<sup>[16]</sup>进行了 Love 型槽波的模拟并分析了频散特征。金丹等<sup>[17]</sup>设计了频率域极化滤波器,提高了对噪声的压制。此外,部分学者

开展了槽波数值模拟以及物理模拟方面的研究工作,为槽波勘探理论研究奠定了基础<sup>[18-20]</sup>。然而,含断层煤层的反射槽波响应机理研究并不充分,以至反射槽波勘探中出现的一些问题目前仍得不到合理解释,比如不同偏移距的反射槽波振幅存在差异。

针对以上问题,笔者基于高阶交错网格有限差分算法,建立 6 种断层落差的三维地质模型,进行三分量反射槽波波场数值模拟,通过提取 X 分量和 Y 分量反射槽波进行能量合成,开展反射槽波响应特征研究,为反射槽波探测断层提供理论依据、对现场勘探具有指导意义。

1 模型参数及观测系统

为了研究不同性质的断层对槽波反射的影响,设计了断层落差分别为 1/8、1/4、1/2、3/4、1、2 倍煤厚的 6 个三维正演模型,断层倾角为 45°。模型参数见表 1,观测系统布置如图 1 所示。

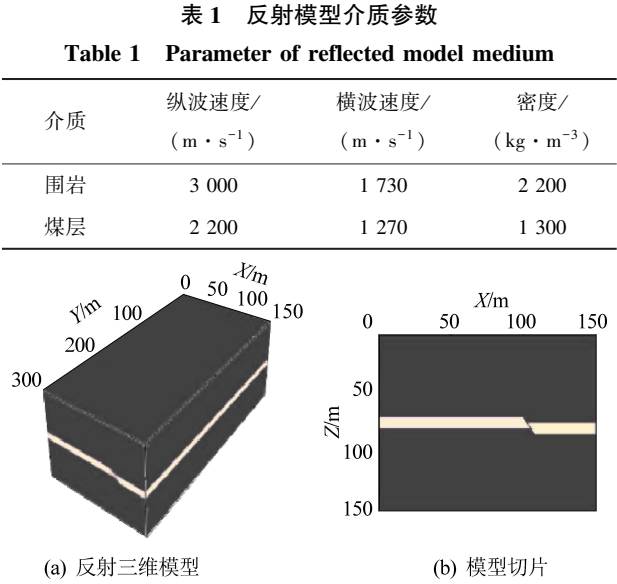


图 1 含断层煤层模型  
Fig.1 Schematic coal model including fault

模型在 X、Y、Z 三个方向长度分别为 300、150、150 m。煤层厚度为 10 m,位置在 Z 方向上的 70~80 m 处,X-Y 方向网格 0.3 m,X-Z、Y-Z 方向网格上 0.4 m。震源采用 200 Hz 的单峰子波,模拟运算采用弹性波震源模拟,边界加入 pml 吸收边界,去除边界反射干扰。震源位置在(5,5,75)。检波器在(0,

5,75)到(300,5,75),每道间距为3 m。断层位于距离检波器90 m处。

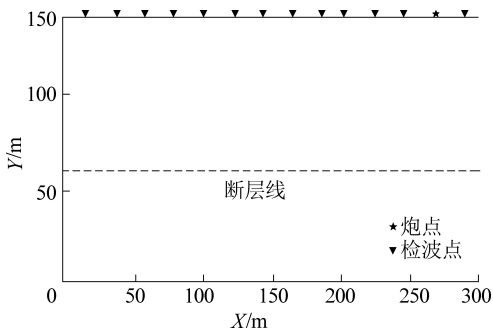


图2 观测系统剖面图

Fig.2 System profile of observation system

## 2 槽波类型模拟分析

对模拟出的1倍煤厚数据进行频散曲线提取,用相同模型参数进行理论频散曲线提取,对比分析得出模拟数据中槽波是否存在,以及类型,Love型槽波理论模型参数见表2。

表2 Love型槽波理论模型参数

Table 2 Parameters of Love-type channel wave theoretical model

地层序号	横波速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	厚度/ m
1	1 730	2.2	70
2	1 270	1.3	10
3	1 730	2.2	70

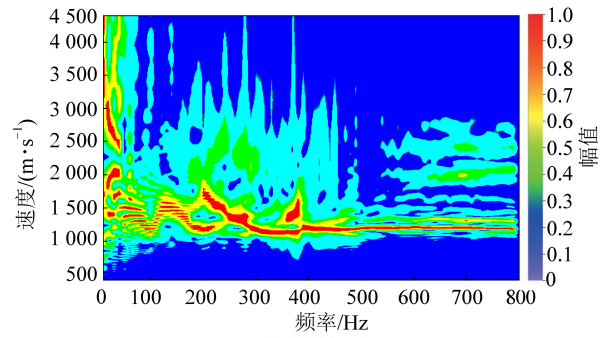
在图3中,以地震记录的第55道波为例,对1倍煤厚断距的断层反射模型进行频散分析,频散曲线有0、1、2、3阶,说明该地震记录中有槽波存在。0阶槽波的能量主要集中在50~130 Hz,速度为1 100~1 700 m/s,1阶槽波的能量主要集中在130~250 Hz,速度为1 100~1 700 m/s,从理论的模型中分析得出,0阶槽波的能量集中在50~160 Hz,速度为1 200~1 300 m/s,1阶槽波能量主要集中在200~300 Hz,速度为1 170~1 300 m/s。通过对比三维模拟数据和理论模型的Love型槽波频散曲线可知,该槽波是Love型槽波。

## 3 不同落差的断层反射波最大振幅值对比

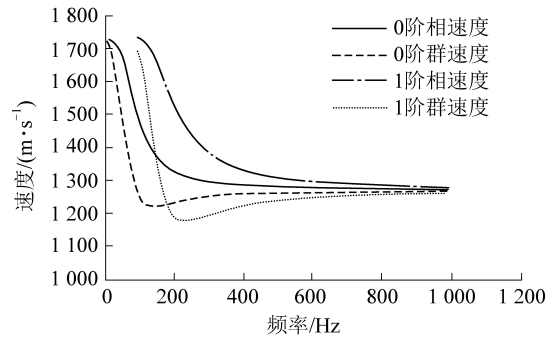
### 3.1 地震记录分析

笔者采用Matlab作为应用工具,分别对X、Y分量进行切除直达波,并截取反射波时窗分别提取振幅最大值,根据槽波能量几何扩散因子 $r^{-\frac{1}{2}}$ (其中 $r$ 为传播距离)对不同偏移距槽波能量进行补偿,取断层落差1倍煤厚的X分量和Y分量原始地震记

录,如图4所示。



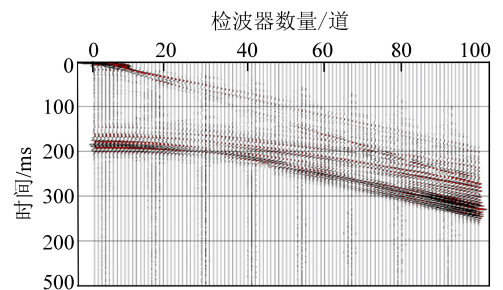
(a) 数值模拟结果



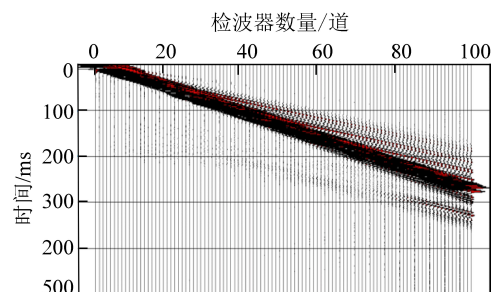
(b) 理论频散

图3 模拟数据与理论频散曲线对比

Fig.3 Comparison between simulated data and theoretical dispersion curve



(a) 1倍煤厚落差断层X分量



(b) 1倍煤厚落差断层Y分量

图4 1倍煤厚落差断层X、Y分量原始地震记录

Fig.4 X-component and Y-component original seismic records of 1 times coal thickness drop fault

在图4中,对断层1倍煤厚X、Y分量原始地震记录分析,同相轴1为直达纵波,速度约为3 000 m/s,能量较低。同相轴2为直达横波,速度约为1 750 m/s。同相轴3为直达槽波,其速度分布于1 100 m/s左右,同



相轴4速度约为3 000 m/s是反射纵波,能量和直达纵波相比较低。同相轴5速度约为1 750 m/s是反射横波。同相轴6速度约为1 100 m/s反射槽波。 $X$ 分量反射槽波的能量是明显大于反射纵波和反射横波,直达波在近炮点能量较强,强于反射槽波, $Y$ 分量反射槽波很弱,直达槽波很强。

### 3.2 不同落差断层提取反射能量分析

使用  $E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$  ( $E$  为合成槽波能量,  $E_x$  和  $E_y$  分别为  $X$  和  $Y$  分量槽波能量) 对  $X$  分量和  $Y$  分量能量进行合成(图5), 其中横坐标为槽波的入射角大小, 纵坐标为合成能量大小, 用振幅表示, 无量纲。

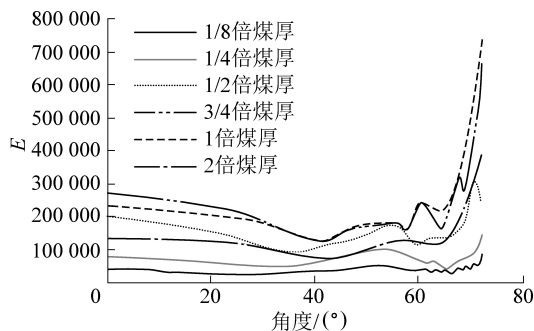
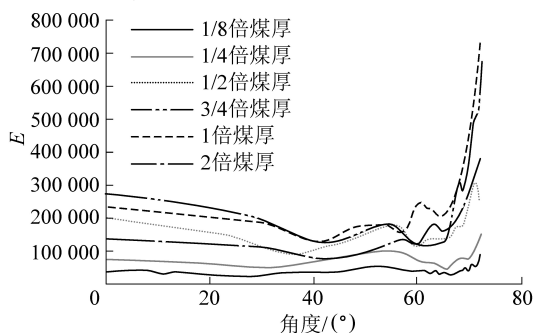
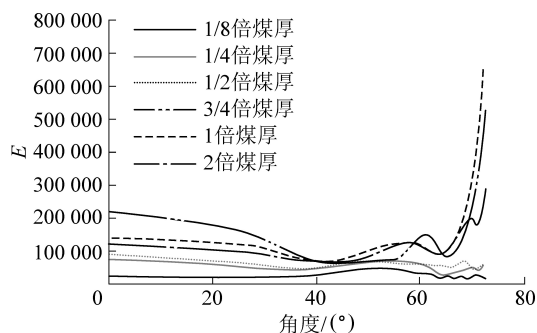


图5 合成反射槽波的能量随着偏移角度的变化  
Fig.5 Variation of the energy of the synthetic reflected channel wave with the deviation angle

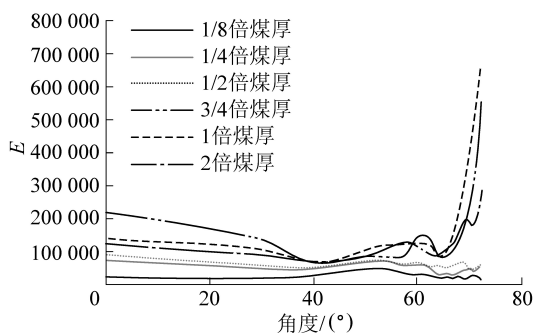
根据图5可知,不同落差断层  $X$ - $Y$  分量合成槽



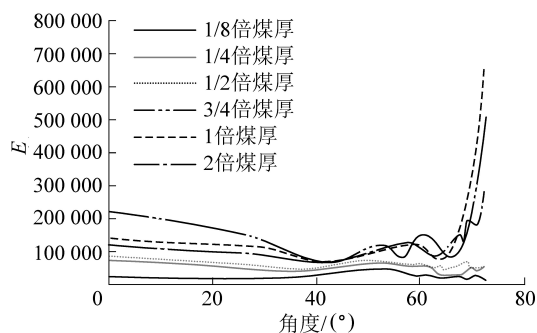
(a) 未滤波



(b) 频带宽度100~150 Hz



(c) 频带宽度150~200 Hz



(d) 频带宽度200~250 Hz

图6 不同频宽滤波的不同落差断层的合成反射槽波能量变化

Fig.6 Variation of energy of synthetic reflected channel wave with different drop faults filtered by different bandwidths

波反射能量在1/8倍煤厚到1倍煤厚是逐渐增加的,在1倍煤厚到2倍煤厚降低了30%左右。不同落差的断层反射波能量曲线形态基本一致,在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 由大变小,在 $40^\circ$ 以后逐渐变大。反射槽波在入射角 $75^\circ$ 时能量达到最大。断层落差分别为1/8倍、1/4倍和1/2倍煤厚时,炮点位置和最大角度的反射槽波的能量差距较小,断层落差为3/4倍煤厚比1/2倍煤厚的反射槽波能量大25%。依据该特征,可以进行断层性质的区分。

### 4 不同落差断层三维数值模拟数据滤波之后能量对比分析

在实际的槽波处理中,滤波是很关键的一个步骤,在三维数值模拟中,使用网格建立地层、断层,会使正演模拟也会产生一部分信号干扰。而且当经过断层反射时,槽波的能量会发生变化。

为了增强部分反射槽波提高数据的信噪比,本节对截取的反射槽波采用100~150 Hz、150~200 Hz、200~250 Hz的频带宽度分别进行滤波,再提取不同频带滤波后的反射槽波能量进行  $X$ - $Y$  分量合成,对每道最大值进行对比分析,观察反射槽波的能量变化,总结滤波对反射槽波的影响(图6)。

从图6分析可知,当滤波频带宽度为100~150 Hz时,在入射角 $0^{\circ}$ ~ $60^{\circ}$ ,反射槽波能量比滤波之前减弱20%左右,其中1、1/2倍煤厚落差断层变化较其他落差断层的较大,在入射角 $60^{\circ}$ 以后,反射槽波的曲线变得平滑。其槽波能量减弱45%左右,其中小于1/2倍煤厚的断层反射槽波能量在大偏移距减弱程度较大。当滤波频带宽度为150~200 Hz时,入射角在 $0^{\circ}$ ~ $40^{\circ}$ 时反射槽波的能量降低较为明显,特别是3/4倍煤厚和2倍煤厚,下降的幅度比其他落差断层的幅度大15%左右。在入射角为 $40^{\circ}$ ~ $70^{\circ}$ ,反射槽波能量有小幅度的增强,大偏移角度 $70^{\circ}$ 以后两者的能量差异变大。当滤波频带宽度为200~250 Hz时,在入射角 $0^{\circ}$ ~ $60^{\circ}$ 之间槽波能量基本没有变化,入射角 $60^{\circ}$ 以后反射槽波能量上升到和未滤波的能量一致。但是3/4倍煤厚的断层的能量最低的拐点往小角度移动。

## 5 结 论

1) 反射槽波能量随着偏移距变化而变化,基本呈现先减小后增加的趋势,尤其在断层落差大于3/4倍煤厚时,大偏移距反射槽波能量明显强于近偏移距反射槽波。

2) 反射槽波的能量受断层落差影响显著。断层落差小于1倍煤厚时,反射槽波的能量随着落差增加逐渐增加;断层落差继续增加到2倍煤厚时,反射槽波能量呈现下降趋势。

3) 反射槽波能量对带通滤波的频带宽度范围较为敏感。100~150 Hz的带通滤波明显降低了断层落差小于1/2煤厚的反射槽波能量,150~200 Hz的带通滤波,明显降低了断层落差大于3/4煤厚的反射槽波能量。

## 参考文献(References):

- [1] 卢鉴章,刘见中.煤矿灾害防治技术现状与发展[J].煤炭科学技术,2006,34(5):1-5.  
LU Jianzhang, LIU Jianzhong. Present situation and development of coal mine disaster prevention and control technology [J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(5): 1-5.
- [2] 吴波,黄健良,王硕.矿井突水原因及几种地球物理预测方法分析[J].科技信息,2009(24):81-83.  
WU Bo, HUANG Jianliang, WANG Suo. Causes of mine water inrush and analysis of several geophysical prediction methods [J]. Science and Technology Information, 2009(24): 81-83.
- [3] 裴正林.井间地震层析成像的现状与进展[J].地球物理学进展,2001,16(3):91-97.  
PEI Zhenglin. The present situation and development of cross well seismic tomography [J]. Progress in Geophysics, 2001, 16(3):

91-97.

- [4] 张幼振.煤矿巷道底鼓机械化治理技术应用研究[J].煤炭科学技术,2018,46(1):93-98.  
ZHANG Youzhen. Applied study on mechanized control technology of floor heave in mine roadway [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 93-98.
- [5] 赵朋朋.Rayleigh型槽波垂直分量探测的应用研究[J].煤炭科学技术,2019,47(7):215-220.  
ZHAO Pengpeng. Research and application of vertical component detection of Rayleigh wave [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 215-220.
- [6] EVISON F F. A coal seam as a guide for seismic energy [J]. Nature, 1955, 176: 1224-1225.
- [7] 刘天放,潘冬明,李德春,等.槽波地震勘探[M].徐州:中国矿业出版社,1994.
- [8] MASON I M, BUCHANAN D J, BOOER A K. Channel wave mapping of coal seam in the United Kingdom [J]. Geophysics, 1980, 45(6): 1131-1143.
- [9] HU Y, MCMECHAN G A. Imaging mining hazards within coalbeds using prestack wave equation migration of in-seam seismic survey data: A feasibility study with synthetic data [J]. Journal of Applied Geophysics, 2007, 63(1): 24-34.
- [10] 沈鸿雁.反射波法隧道井巷地震超前预报研究[D].西安:长安大学,2006.  
SHEN Yanhong. Study on seismic prediction of tunnel shaft by reflection wave method [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [11] 张平松,刘盛东,吴健生.隧道及井巷工程超前探测模拟及其偏移技术研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(7):2847-2851.  
ZHANG Pingsong, LIU Shengdong, WU Jiansheng. Study on detecting simulation ahead of tunnel and laneway and its migration technique [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 2847-2851.
- [12] 王季.反射槽波探测采空巷道的实验与方法[J].煤炭学报,2015,40(8):1879-1885.  
WANG Ji. Experiment and method of void roadway detection using reflected in-seam wave [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1879-1885.
- [13] 姬广忠.反射槽波绕射偏移成像及应用[J].煤田地质与勘探,2017,45(1):121-124.  
JI Guangzhong. Diffraction migration imaging of reflected in-seam waves and its application [J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(1): 121-124.
- [14] 王一.矿井反射槽波包络叠加成像方法及其应用[J].煤田地质与勘探,2017,45(5):152-154.  
WANG Yi. Method and application of reflected in-seam wave enveloped superposition imaging in coal mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(5): 152-154.
- [15] 李江华,廉玉广,窦文武,等.槽波地震反射法探测地质构造应用研究[J].煤炭科学技术,2019,47(12):201-206.  
LI Jianghua, LIAN Yuguang, DOU Wenwu, et al. Application research of groove wave seismic reflection method to detect geological structure [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47

- (12):201-206.
- [16] 姬广忠,程建远,朱培民.煤层 Love 型槽波数值模拟及其频散特征分析[J].煤炭科学技术,2011,39(6):106-109.  
JI Guangzhong, CHENG Jianyuan, ZHU Peimin. Numerical simulation of Love groove wave in coal seam and analysis of its dispersion characteristics[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(6):106-109.
- [17] 金 丹,王保利,豆旭谦,等.频率域极化滤波在槽波信号处理中的应用[J].煤炭学报,2018,43(5):234-240.  
JIN Dan, WANG Baoli, DOU Xuqian, *et al.* Application of frequency domain polarization filtering in slot wave signal processing [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5):234-240.
- [18] 杨思通.矿井巷道地震超前探测三维全波场数值模拟与探测方法研究[D].青岛:山东科技大学,2011.
- [19] 姬广忠,程建远,朱培民,等.煤矿井下槽波三维数值模拟及频散分析[J].地球物理学报,2012,55(2):645-654.  
JI Guangzhong, CHENG Jianyuan, ZHU Peimin, *et al.* Three dimensional numerical simulation and dispersion analysis of channel wave in coal mine[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2):645-654.
- [20] 皮娇龙,滕吉文,刘有山.地震槽波的数学-物理模拟初探[J].地球物理学报,2018,61(6):2481-2493.  
PI Jiaolong, TENG Jiwen, LIU Youshan. Mathematics of seismic trough wave-physical simulation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(6):2481-2493.