



移动扫码阅读

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. doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.12.029

LI Jianghua, LIAN Yuguang, DOU Wenwu, et al. Study on detection of channel wave reflection method applied to geologic structure[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(12): 201-206. doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.12.029

槽波地震反射法探测地质构造应用研究

李江华^{1,2,3,4}, 廉玉广^{1,2,4}, 窦文武⁴, 焦阳⁴, 李梓毓⁴

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司安全分院, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013;

3. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 4. 山西晋煤集团技术研究院有限责任公司, 山西 晋城 048006)

摘要:晋城北部矿区地质条件复杂,为清除地质构造对矿井生产造成安全隐患,实现地质构造灾害预测预报,采用岩石声波测试系统对该矿区3号煤层及顶底板岩石的波速进行测试。基于槽波地震反射法探测原理,采用振幅包络计算和共中心点叠加偏移技术,优化了数据处理流程,并将其应用于3号煤层地质构造探测中,提出了槽波地震精细化探测的建议。研究结果表明,3号煤层波速较小,与顶底板岩石的物性参数差异明显,为槽波地震探测提供了良好的物理基础;该区槽波速度1 000~1 200 m/s,可选取50~300 Hz的频带范围对反射槽波数据进行滤波,提高信噪比;晋城北部矿区3号煤层适宜采用槽波地震反射法探测地质构造,但同相轴反射界面可能为断层或陷落柱边界,需结合其它方法进行综合精确解释。

关键词:地质构造;槽波地震;波速测试;包络计算

中图分类号:P631

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)12-0201-06

Study on detection of channel wave reflection method applied to geologic structure

LI Jianghua^{1,2,3,4}, LIAN Yuguang^{1,2,4}, DOU Wenwu⁴, JIAO Yang⁴, LI Ziyu⁴

(1. Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and

Clean Utilization, Beijing 100013, China; 3. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and

Technology - Beijing, Beijing 100083, China; 4. Jincheng Anthracite Mining Group Technology Research Institute Co., Ltd., Jincheng 048006, China)

Abstract: The geological conditions are very complex in the north diggings of Jincheng. In order to eliminate the potential hazardous effect from geologic structure on mining safety and help to establish a forecasting mechanism for disasters resulting from geological structure, the wave velocities in No.3 coal seam as well as roof and floor rock are tested using rock acoustic test system. Based on detecting techniques of channel wave reflection method, we employed envelope computation and CMP stacking technology to optimize data treatment procedures. After having applied this methodology to investigate the geologic structure in No.3 coal seam, the idea and future development of refined channel wave detection method was proposed. This work found that the wave velocity of No.3 coal seam is relatively lower with physical property parameters from No.3 coal seam noticeably different from those from roof and floor rock, which provides favorable physical conditions for channel wave detection. The velocity of channel wave is 1 000~1 200 m/s in this area. Bands with frequency falling in 50~300 Hz are suitable for smoothing the reflection data of channel wave and enhancing the signal-to-noise ratio. Although channel wave reflection method is a good option for the detection of geologic structure in No.3 coal seam in the north mining areas of Jincheng, the fact that the reflecting interface of seismic event may happen to be fault or collapse column boundary, makes necessary combining other methods for more comprehensive and accurate illustration

Key words: geologic structure; channel wave seismic; wave velocity testing; envelope computation

0 引言

近年来,随着计算机技术与地球物理科技的不

断发展,地球物理勘探技术成为矿井地质构造探测中非常有效的方法^[1]。地球物理勘探主要是通过地球物理场对地质体的物理性质差异所产生的异常

收稿日期:2019-09-05;责任编辑:曾康生

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045001-004);国家自然科学基金资助项目(51804162);煤炭科学研究总院基础研究基金资助项目(2017JC07);天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项资助项目(2018-TD-MS005)

作者简介:李江华(1987—),男,山西闻喜人,助理研究员,博士。E-mail: Jianghua_lee@163.com

进行探测,地质构造和地质体结构特点决定了物探手段的适应性和有效性。断层面与陷落柱边界对地震波具有良好的反射性,并且遇到地质构造时地震波能量发生损失,为地震探测提供了良好的物理前提^[2-3]。

由于不同地震法均有各自的优缺点,而井下物探更具有探测距离的优势,因此井下地质构造槽波地震勘探逐渐受到国内外学者和工程技术人员的高度重视,是最有发展前景的一种物探方法^[4]。1955 年,Evison 在新西兰煤层中激发并采集到了槽波^[5];我国自 20 世纪 70 年代末从西德引进槽波地震仪以来,国内学者对槽波地震勘探进行了一些研究^[6];80 年代,一些科研单位开始进行现场试验,同时也进行物理模型、数值模拟研究及矿井地震仪的研制^[7-8];21 世纪初随着煤炭“黄金期”的到来,槽波探测技术得到了进一步的推广应用,近几年的研究呈上升趋势,理论和技术水平都取得了一定的进展^[9-10]。冯磊等^[11]根据不同类型槽波振动极化特征,提出基于 S 变换的时频域自适应协方差矩阵极化滤波方法;王季^[12]利用二维傅里叶变换将地震信号转换到 F-K 域并对其进行滤波,以消弱噪声和其他波场成分;廉洁等^[13]得出 1 900 m/s 和 1 300 m/s 的槽波速度等值线可用于判断义马矿区 3、5 m 厚的煤层,槽波地震 CT 叠加剖面图中的强反射震相可预测断层位置;王伟等^[14-15]确定义马矿区厚度变化 2~5 m 的煤层中槽波 Airy 频率相为 125 Hz;任亚平^[16]开展了陕北矿区超大型工作面内断层的槽波地震探测技术研究,采用全排列接收,最大限度地获得了槽波信息;李刚等^[17]通过现场实践,认为槽波探测可解决传统坑透方法透距不足的问题。

晋城北部矿区地质构造复杂,笔者通过研究槽波地震反射法勘探技术,并应用于晋城北部矿区 3 号煤层工作面内的地质构造探测中,采集了高质量的槽波信息,采用优化的槽波数据处理流程进行了数据处理与解释,结合其他方法推断了异常的性质和范围,实现了工作面地质构造灾害的预测预报,为工作面安全开采提供了重要依据。

1 晋城北部矿区地质概况

晋城北部与长治南部接壤的矿区井田位于山西省沁水煤田东南缘,太行山复式背斜南段西翼,晋东南山字型构造脊柱部位的南端。区内地层总体为一走向北北东,倾向北西西的单斜构造,由一系列北北东向和近南北向开阔、宽缓的背斜及向斜组成。该区域矿区主采二叠系山西组下部的 3 号煤层,厚度

平均 5.6 m,赋存稳定,煤厚变异较小,煤层结构较简单。但地质构造复杂,已探明的断层和陷落柱数量又多又大,其中赵庄矿仅在近 10 km²采掘范围内发现断层 386 条,对该矿 3 号煤层安全高效开采带来了极大的隐患,3 号煤层顶底板岩性特征如图 1 所示。

岩层厚度/m 最小~最大 平均	柱状图	标志层	岩性
0.60~23.56 5.55		K	细粒砂岩 中粒砂岩
0~13.60 3.39			砂质泥岩
0.35~6.61 5.60		3号煤	煤层
1.65~14.81 8.79			泥岩 砂质泥岩
1.1~1.88 1.32		K ₇	细粒砂岩 中粒砂岩

图 1 3 号煤层顶底板岩性特征

Fig.1 Roof and floor characteristic of No.3 coal seam

2 槽波地震勘探原理

2.1 3 号煤顶底板岩石声波测试

岩石声波波速测试采用 HS-YS4A 型岩石声波测试系统,由微控制主机、信号采集装置及多分量压电换能器等模块组成,具有多通道、宽频带、高灵敏度等优点。岩样取自晋城北区赵庄二号井,加工制作成 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的标准岩石试件,试件上下端面涂抹黄油,将换能器紧帖两端面,形成对穿状,进行纵波波速测试。采样字节为 4 kB,采样间隔为 0.1 μs 。岩石声波波速测试示意如图 2 所示。

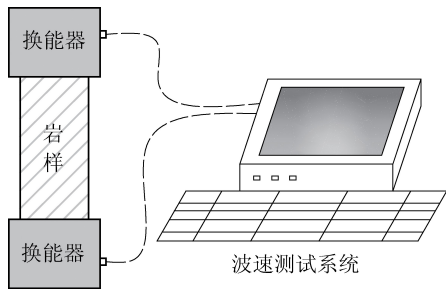


图 2 岩石波速测试示意

Fig.2 Schematic diagram of rock wave velocity testing

岩石试件高度与脉冲信号初至时间的比值,即为波速^[18],则有

$$v=l/(t-t_0) \quad (1)$$

式中: v 为波速, m/s ; l 为岩石试件长度, m ; t 为试件测试时的声波脉冲信号初至时间, s ; t_0 为换能器间声波脉冲信号初至时间, s 。

3 号煤层及顶底板岩石的纵波波速测试结果见表 1, 由此看出, 3 煤波速平均为 $2\,080\text{ m/s}$, 砂岩波速平均为 $3\,713\text{ m/s}$, 泥岩波速平均为 $4\,331\text{ m/s}$ 。煤层的波速低, 泥岩的波速相对较高。

表 1 岩石波速测试结果

Table 1 Test results of rock wave velocity			
岩性	波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	岩性	波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
粗砂岩	$3\,400.68 \sim 4\,157.12$	煤	$2\,052.31 \sim 2\,115.72$
	$3\,728.97$		$2\,080.15$
中砂岩	$4\,038.44 \sim 4\,166.67$	泥质砂岩	$3\,286.51 \sim 3\,717.84$
	$4\,098.53$		$3\,505.04$
细砂岩	$3\,073.93 \sim 3\,510.76$	泥岩	$4\,054.20 \sim 4\,687.89$
	$3\,314.30$		$4\,331.31$

2.2 槽波地震法探测理论

通过对 3 号煤及顶底板岩石波速测试可知, 煤层与顶底板岩层的物性参数差异明显。地震波在煤系沉积岩地层中传播, 将形成以煤层为中心的低速“槽”, 由于受顶底板岩层界面的限制, 煤层中激发的部分地震波场发生多次全反射, 煤层对地震能量起到有效的制导作用, 不向围岩辐射, 在煤槽中相互叠加、相长干涉, 形成槽波^[19]。

槽波具有频散特征, 波速随频率的变化而变化。槽波地震反射法探测主要根据反射槽波的有无、强弱及其他的有关运动学、动力学特征, 判断探测区范围内的地质异常。当断层落差接近或大于煤层厚度, 煤层波导完全或几乎全部被阻断, 将接受到反射槽波; 断层落差较小时, 部分煤层波导被阻断, 仅部分能量产生反射, 形成较弱的反射槽波; 当断层落差更小或不存在时, 将无反射槽波。反射法探测时地质异常可从单炮记录中根据槽波信号的走时绘制异常界面, 也可通过 CMP 道集叠加形成结果图, 根据同相轴确定地质异常界面^[20]。

槽波地震反射法探测时, 将激发震源 (通常采用乳化炸药) 和反射槽波信号采集装置检波器布置在同一条巷道中, 工作面未圈成时也可对其内部地质构造进行探测, 为工作面的合理布置提供依据。反射法探测布置如图 3 所示。

2.3 探测数据处理方法与结果解释

反射槽波数据处理方法和地面地震法有许多类似的地方, 一般流程为 Sgy 地震数据导入、观测系统

加载、槽波数据分析、Butterworth 滤波处理、包络计算、槽波速度分析、CMP 叠加及时深转换/相偏移等。通过对数据后处理参数进行试验与择优选取, 形成精细化的槽波地震反射法探测数据处理流程如图 4 所示。

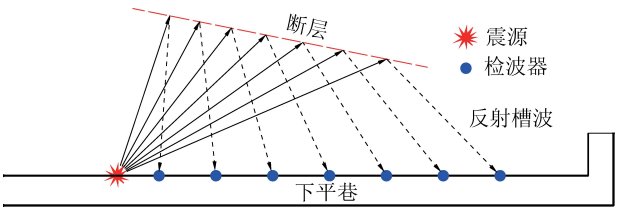


图 3 反射法探测布置示意

Fig.3 Schematic diagram of reflection method exploration

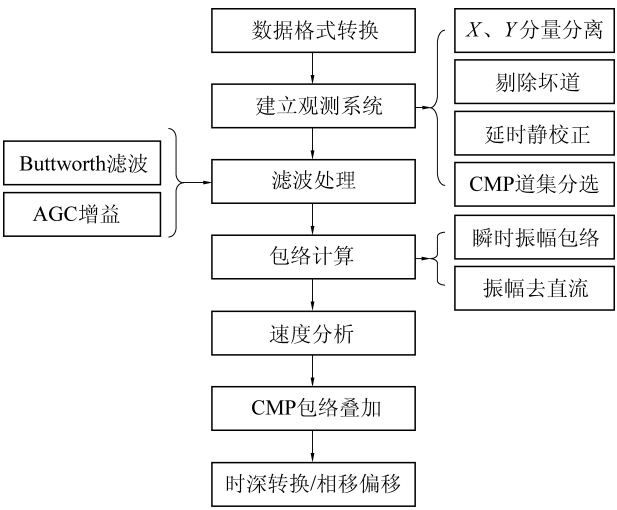


图 4 反射法探测数据处理流程

Fig.4 Data treatment scheme of reflection method exploration

3 地质构造槽波地震法应用实例与建议

3.1 晋城北部矿区地质构造探测

3.1.1 案例 1

赵庄二号井某工作面走向长度 827 m , 倾斜宽度 160 m , 开采 3 号煤层, 平均厚度为 4.4 m , 为稳定可采煤层。地面三维地震探测该工作面西侧存在一条走向长 769 m , 落差 $0 \sim 15\text{ m}$, 倾角为 65° 的大断层, 为进一步精细化查明该断层的赋存特征, 指导相邻采面的布置, 在该工作面的上平巷对西侧进行槽波地震反射法勘探 (图 5)。

槽波反射法勘探的测线长度为 750 m , 共布置 48 道双分量检波器, 检波器间距 15 m ; 共布置 100 个炮孔, 炮间距 7.5 m 。采用乳化炸药爆炸震源, 单孔药量为 200 g , 从切眼至终采线依次放炮接收数据。

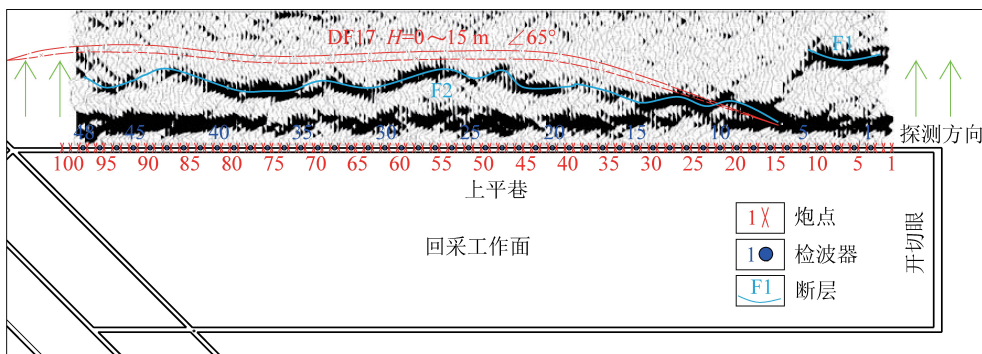


图5 观测系统布置及探测结果

Fig.5 Observing system layout and detection result

经过原始数据的分析与处理,本次槽波反射法探测的CMP间距为3.75 m, Butterworth滤波的频带范围为50~300 Hz, AGC窗口为200 ms, 槽波速度为1 000~1 200 m/s时,槽波Airy震相同相轴清晰。滤波后第42炮前20道槽波记录如图6所示,由此看出1~14道反射槽波信息较好,信噪比高,存在地质异常界面。

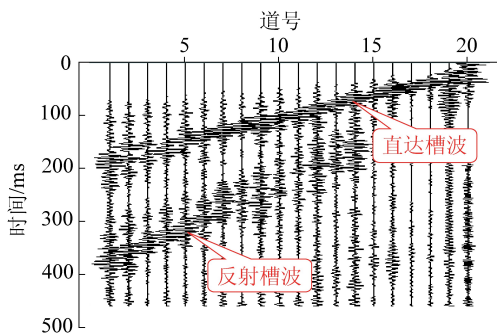


图6 槽波单炮记录

Fig.6 Single shot record of channel wave

选取波速为1 000 m/s的地震波进行相位偏移叠加,反射槽波结果如图5所示,靠近上平巷一侧的同相轴波列由直达槽波产生,向外为探测的断层反射界面。共探测出F1和F2两条有效断层,其中F2断层走向与三维地震探测DF17基本一致,反射界面呈波浪曲线状,但更靠近23011巷,探测精度提高0~30 m。结合23011巷打钻验证情况,成功探明了该断层的存在,且走向一致。

3.1.2 案例2

大平煤业某工作面走向长度为1 665 m,倾斜长度为192 m,开采3号煤层,平均厚度为6.19 m,煤层倾角平均10°,为稳定可采煤层。煤厚变异较小,煤层结构较简单,含1至2层夹矸,厚度0.10~0.20 m。煤层直接顶和直接底均为泥岩。三维地震探测工作面内部存在1条落差0~10 m,倾角为70°的

DF37断层。为进一步查明该断层的准确与可靠性,在工作面下平巷采用槽波反射法对断层进行探测。

反射法探测长度为690 m,自下平巷开口395 m处布置第1个炮点,炮间距15 m,共布置47炮(图7中X表示);距第1炮7.5 m处布置检波器,道间距为15 m,共布置46个检波孔(图7中●表示)。采用案例1中相同的方法和参数对槽波数据进行处理,20—47炮范围内的探测结果如图7所示。根据反射法同相轴探测结果,以振幅能量强的位置为界面,推断解释1条走向与DF37断层前半段一致的CF37断层,但走向长度仅为120 m,DF37断层不存在,相比三维地震圈定的位置和范围更精细,表明槽波地震勘探分辨率高。

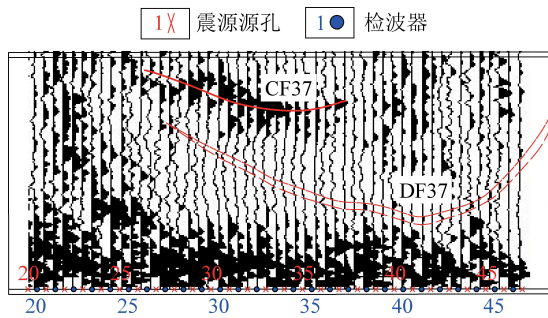


图7 案例2探测结果

Fig.7 Detection result of case 2

3.1.3 案例3

霍尔辛赫煤业某工作面位于一水平三盘区,走向长660 m,倾斜长220 m,开采3煤,煤层厚度为5.0~5.6 m,平均5.3 m,煤层倾角为3°~9°,为稳定可采煤层。3煤伪顶为泥岩,直接顶为粉砂岩,直接底为泥岩。根据坑透勘探结果,终采线附近存在地质异常区,为进一步明确地质异常的性质及位置和范围,采用槽波地震反射法在工作面下平巷对终采线附近360 m范围内地质构造进行探测。

设计探测长度为360 m,距终采线15 m布置第

1道,道间距为10 m,共计36个检波孔(图8中●表示);距第3道5 m位置布置第1炮,炮间距为10 m,共计30个炮孔(图8中X表示)。探测结果如图8所示,反射槽波同相轴明显,但相对断层反射界面的同相轴更为分散,综合坑透和槽波地震勘探结果,推断同相轴连线为陷落柱边界,反射界面由陷落柱周边破碎带引起。通过现场钻孔验证,进一步确定该异常界面不为断层,而为陷落柱,表明槽波地震反射法可对陷落柱边界进行有效的探测。

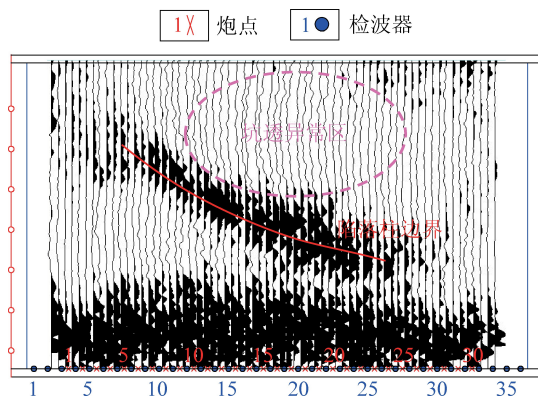


图8 案例3探测结果

Fig.8 Detection result of case 3

3.2 地质构造槽波地震探测建议

晋城北部矿区3号煤层厚度0.35~6.61m,煤层中赋存1~2层薄层夹矸,煤层与顶底板的物理力学性质差异明显。通过以上3个矿井的槽波地震反射法探测案例分析,均采集到质量较好的原始槽波数据,经滤波处理后进一步提高了信噪比。通过优化后的反射槽波数据精细化处理流程,获得清晰的地质构造同相轴反射界面。基于槽波Airy震相同相轴特征,结合地面三维地震探测结果,赵庄二号井和大平煤业的槽波地震探测结果推断解释为断层。而霍尔辛赫煤业的探测结果中槽波Airy震相同相轴更为分散,槽波频散更强,结合坑透结果,推断为陷落柱边界,并且均获得验证。探测结果表明,晋城北部矿区3号煤层发育有良好的槽波,适宜采用槽波地震反射勘探方法探测地质构造。但探测结果同相轴可能为断层或陷落柱界面,表明单一槽波地震勘探法难以断定具体的地质构造性质,需结合地质条件及其他勘探手段进行综合分析和解释。条件允许时,可同时采用透射和反射的联合布置方式对地质构造进行探测,根据透射和反射结果对地质异常进行综合推断解释,提高准确性和可靠性。

4 结 论

1) 晋城北部矿井3号煤层纵波波速约2 080

m/s,砂岩波速约3 713 m/s,泥岩波速约4 331 m/s。煤层与顶底板岩层的物性参数差异明显,为槽波地震探测提供了良好的物理基础。

2) 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。晋城北部3号煤层槽波地震反射法探测时槽波发育,可选取50~300 Hz的频带范围进行滤波,用于提高信噪比,槽波速度为1 000~1 200 m/s。

3) 晋城北部矿区3号煤层适宜采用槽波地震勘探方法探测地质构造,但槽波地震反射法探测地质构造时,地震波同相轴可能为断层或陷落柱边界,需结合其他方法进行精确解释。

参考文献(References):

- [1] 贾建称,陈健,柴宏有,等.矿井构造研究现状与发展趋势[J].煤炭科学技术,2008,36(10):72-77.
JIA Jiancheng, CHEN Jian, CHAI Hongyou, et al. Research status and development tendency of mine coalfield tectonics [J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(10): 72-77.
- [2] 李飞,张智,曹志勇,等.陷落柱地震波场特征分析[J].地球物理学进展,2009,24(3):886-892.
LI Fei, ZHANG Zhi, CAO Zhiyong, et al. Analysis on seismic features of subsided column [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(3): 886-892.
- [3] 李江华,廉玉广,焦阳,等.综合物探技术在工作面导水构造探测中的应用[J].煤矿安全,2018,49(3):129-132.
LI Jianghua, LIAN Yuguang, JIAO Yang, et al. Application of comprehensive geophysical exploration technique in exploration of water conductive structures in working face [J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(3): 129-132.
- [4] 焦阳,卫金善,李梓毓,等.槽波反射法在断层探测中的应用研究[J].煤炭科学技术,2017,45(11):187-191.
JIAO Yang, WEI Jinshan, LI Ziyu, et al. Study on channel wave reflection method applied to detection of fault [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 187-191.
- [5] EVISON F F. A coal seam as a guide for seismic energy [J]. Nature, 1955, 176(5): 1224-1225.
- [6] 刘盛东,张平松.地下工程震波探测技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2008.
- [7] 李天元.槽波及其频散特性[J].煤田地质与勘探,1988,16(3):58-65.
LI Tianyuan. Channel wave and its frequency dispersion features [J]. Coal Geology & Exploration, 1988, 16(3): 58-65.
- [8] 宋玉平,金奎勋,陈德行.槽波地震勘探震源和检波器的优化布置[J].煤田地质与勘探,1994,22(4):49-50.
SONG Yuping, JIN Kuili, CHEN Dexing. Optimized layout of hypocenter and detector in channel wave exploration [J]. Coal Geology & Exploration, 1994, 22(4): 49-50.
- [9] 程建远,李浙龙,张广忠,等.煤矿井下地震勘探技术应用现状与发展展望[J].勘探地球物理进展,2009,32(2):96-111.
CHENG Jianyuan, LI Xilong, ZHANG Guangzhong, et al. Current

- status and outlook of seismic exploration applied underground in coal mine [J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2009, 32(2): 96–111.
- [10] 吕华新, 崔伟雄, 伏正清, 等. 采煤工作面槽波相对透射系数层析成像技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(3): 147–150.
LYU Huaxin, CUI Weixiong, FU Zhengqing, *et al.* Tomography technique of relative transmission coefficient of in-seam wave in coal mining face[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(3): 147–150.
- [11] 冯磊, 董郑, 周明免, 等. 基于时频域极化滤波的勒夫型槽波提取[J]. *煤田地质与勘探*, 2016, 44(3): 103–108.
FENG Lei, DONG Zheng, ZHOU Minghuan, *et al.* Love channel wave extraction based on polarization filter in time-frequency domain [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2016, 44(3): 103–108.
- [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] 廉洁, 李松营, 王伟, 等. 槽波地震勘探技术在义马矿区的应用[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(12): 162–165.
LIAN Jie, LI Songying, WANG Wei, *et al.* Channel wave seismic exploration technology applied to Yima Mining Area [J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(12): 162–165.
- [14] 王伟, 高星, 李松营, 等. 槽波层析成像方法在煤田勘探中的应用: 以河南义马矿区为例[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(3): 1054–1062.
WANG Wei, GAO Xing, LI Songying, *et al.* Channel wave tomography method and its application in coal mine exploration: an example from Henan Yima Mining Area [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(3): 1054–1062.
- [15] 李松营, 廉洁, 滕吉文, 等. 基于槽波透射法的采煤工作面煤厚解释技术[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(3): 719–725.
LI Songying, LIAN Jie, TENG Jiwen, *et al.* Interpretation technology of coal seam thickness in mining face by ISS transmission method [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(3): 719–725.
- [16] 任亚平. 槽波地震勘探在煤矿大型工作面的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2015, 43(3): 102–104.
REN Yaping. Application of ISS in supper large coal face [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2015, 43(3): 102–104.
- [17] 李刚. 透射槽波在煤矿陷落柱探测中的应用[J]. *煤矿开采*, 2016, 21(3): 39–42.
LI Gang. Application of transmission channel wave exploration of collapse column in coal mine [J]. *Coal Mining Technology*, 2016, 21(3): 39–42.
- [18] 刘向君, 刘洪, 徐晓雷, 等. 低孔低渗砂岩加载条件下的声波传播特性实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(3): 560–567.
LIU Xiangjun, LIU Hong, XU Xiaolei, *et al.* Experimental research on acoustic wave propagation characteristic of low porosity and permeability sandstone under loading conditions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(3): 560–567.
- [19] 刘天放, 潘冬明, 李德春, 等. 槽波地震勘探[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
- [20] 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 seam Love type channel-wave and analysis on dispersion features [J]. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(6): 106–109.