

# 槽波反射法在断层探测中的应用研究

焦 阳,卫金善,李梓毓,窦文武

(山西晋城无烟煤矿业集团有限责任公司 技术研究院,山西 晋城 048006)

**摘 要:**断层构造是影响矿井采掘衔接和安全生产的重要因素之一,为了提前查明断层的赋存特征,避免回采和掘进过程中无计划揭露断层构造带来的人员伤亡和财产损失,选择赵庄二矿 2301 工作面为试验现场,展开槽波地震反射法勘探,通过探采结果对比,研究了该方法对断层构造精确探查的有效性。研究表明:以探测区域 870 m/s 的槽波速度进行分析和计算,槽波反射法探测出采面内存在一走向为南西向,延伸长度约 207 m 的反射界面,震相十分清晰,推断为断层构造,经过巷道掘进和工作面回采揭露,有效验证了该断层的存在,且走向近乎一致,位置偏差不大于 10 m,因此,槽波地震反射法勘探对断层构造的探测效果良好,能够有效指导矿井的安全生产。

**关键词:**地震勘探;槽波反射法;断层;回采工作面

中图分类号:TD166 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2017)11-0187-05

## Study on channel wave reflection method applied to detection of fault

JIAO Yang, WEI Jinshan, LI Ziyu, DOU Wenwu

(Technology Research Institute, Shanxi Jincheng Anthracite Mining Group Corporation Limited, Jincheng 048006, China)

**Abstract:** The fault tectonic is one of the important factors affected to the mine mining and heading connection and the mine safety production. In order to ascertain deposition features of fault and avoid personnel casualty and property loss occurred from fault tectonic exposed without any preparation during the mining and heading process, No. 2301 coal mining face in Zhaozhuang No. 2 Mine was selected as the experiment site and explorations with the channel wave seismic reflection method were conducted. With the comparison between of exploration and mining results, the paper had a study on the efficiency of method to curate exploration of fault tectonic. The study results showed that an analysis and calculation were conducted with channel wave velocity of 870 m/s in detection area, a reflecting interface with a south-west strike and a extend length about 207 m existed in coal mining face were detected with the channel wave reflection method. The seismic phase was very clear and a fault tectonic was inferred. The exposed mine roadway heading and the coal face mining effectively verified the fault existed, the strike was nearly the same and location error was not over 10 m. Therefore, the exploration with the channel wave seismic reflection method could have a good detection effect to the fault tectonic and could effectively guide the mine safety production.

**Key words:** seismic exploration; channel wave reflection method; fault; mining coal face

## 0 引 言

华北型煤田成煤时期较多,地质条件复杂,煤层中赋存着不同规模的地质构造,特别是断层构造,严重影响着采掘布置和安全生产,如果采掘过程中无计划揭露断层构造,将会发生冒顶、突水、瓦斯突出等灾难事故,严重威胁着矿工的生命安全,也会造成

巨大的经济损失<sup>[1-5]</sup>。因此,断层构造的准确探查和预测、预报,对采煤矿井的安全生产至关重要。

目前,矿井地质构造勘探的主要手段包括地面三维地震勘探、井下无线电波透视和井下钻探。地面三维地震勘探受施工条件约束,地面地形高差大,反演成果存在偏差、准确率不高,且施工周期长、成本较高<sup>[6]</sup>;井下无线电波透视发展相对成熟,但传

收稿日期:2107-07-18;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.11.031

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05061)

作者简介:焦 阳(1988—),男,山西晋城人,硕士。Tel:15835628202, E-mail: jy19880103@126.com

引用格式: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.

播距离有限,探测纵向分辨率较差,抗电干扰能力弱,对断层的反应不明显,且无法利用单条巷道进行反射法勘探<sup>[7]</sup>;井下钻探只能依据物探成果开展定向探测,若无固定靶区,则费时费力,且成本过高<sup>[8]</sup>。

槽波地震勘探作为一种新型的可应用于井下的高精度探测方法,具有探测距离大(透射法探测距离为煤厚的300倍,反射法探测距离为煤厚的150倍)、震源信号强(采用放炮进行地震波激发)、抗电干扰能力强、精度高、波形特征较易识别(艾里相频率高、能量强)、异常对比性强且探测结果直观等特点,正在广泛展开推广和应用,是矿井地质构造探测中备受关注、最有前景的地球物理勘探方法之一<sup>[9-12]</sup>。目前,槽波地震透射法勘探技术相对成熟<sup>[13-14]</sup>,但反射法勘探正在研究当中,特别是对断层构造精确探查的适应性还暂无定论,因此,本次研究对煤矿的安全生产意义重大。

## 1 槽波反射法探测原理

当在煤层中激发一个震动时,便会产生地震波,包括P波和S波,S波又包括SH波和SV波。这些地震波向四周扩散,传播。由于在煤层中波速明显低于顶板和底板的波速,当震源产生的地震波传播到煤层顶板和底板界面时将会被全部反射和折射回煤层内部,相互混响、叠加形成槽波,如图1所示。当煤层的连续性发生变化时,槽波特征会随之改变,槽波地震勘探便是据此原理完成地质构造的精细化探查<sup>[15-16]</sup>。

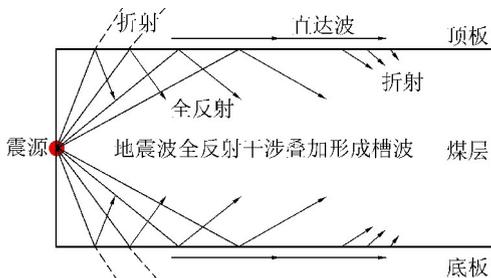


图1 槽波形成示意

Fig. 1 Sketch map of seam seismic wave

槽波地震勘探分为透射法、反射法和透射/反射联合法探测。槽波反射法探测是将炮点与数据采集站布置在同一巷道内,所有钻孔应顺煤层处于中间位置,当震源激发的槽波沿煤层向远处传播过程中遇到异常界面时,将改变地震波的传播方向,产生反射槽波信号,利用布置在侧帮的检波器就可以接收

到这些反射槽波信号,通过识别和分析,追踪埃里的相同相轴,便能查明断层、岩墙等地质构造的所在位置和延展长度<sup>[17-18]</sup>,如图2所示。

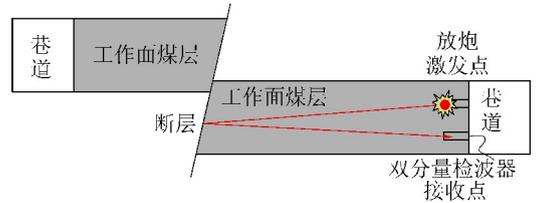


图2 煤层勘探中槽波反射法探测原理示意

Fig. 2 Sketch map of theory of reflection method of seam seismic exploration

槽波地震反射法勘探只适用于槽波赋存特性好或较好的煤层(主要包括:煤层的导槽性好、槽波埃里相频率较高和槽波埃里相群速度低),但是槽波反射法勘探的影响因素众多(主要包括:槽波反射信号信噪比低、频散导致分辨率低、反射系数、反射面不平、反射体产状、断层落差、断层面倾角、大断层阻挡、多条断层叠加、探测盲区、空气声波干扰、煤层褶曲、检波器二次谐振等),特别是在断层探测中,如果断层走向与观测系统轴线的角度过大,将会影响反射槽波的有效接收,如果探测区域浅部存在落差大于煤层厚度断层,将会对深部的断层信息进行阻挡,所以,观测系统的合理布置和反射槽波的数据处理至关重要<sup>[19-20]</sup>。

## 2 2301工作面概况及观测系统布置

槽波反射法探测以晋城煤业集团赵庄二矿2301工作面为试验现场。2301工作面设计走向长度827 m,开切眼宽156 m,主采3号煤,煤厚约4.4 m,稳定可采,目前,23011巷已掘进到位,23012巷有还未开始掘进,地面三维地震勘探结果显示,工作面内发育有3条断层,即:JDF87断距0~2 m,倾角为45°~50°;JDF88断距为0~2 m,倾角为50°~55°;JDF22断距为0~10 m,倾角为70°,可能穿过23012设计巷道,贯穿位置距开切眼195 m,为精确查明工作面内的断层赋存情况,判断23012巷揭露构造的大体位置,特在已掘的23011巷向采面展开槽波反射法勘探。

本次槽波反射法勘探采用德国DMT公司的Summit II Ex防爆槽波地震仪,探测测线长度为350 m(绿色方框标注范围),布置20道双分量检波器(23011巷),检波器间距15 m,布置48个炮孔,炮间距7.5 m,单孔药量为200 g,炮检距为3.75 m,从

开切眼至终采线逐炮激发接收数据。

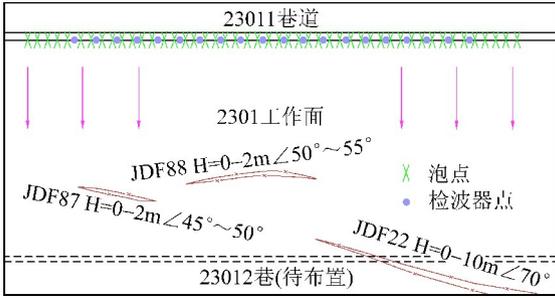


图3 2301工作面槽波反射观测系统布置

Fig. 3 Layout of observing system of reflection method of seam seismic exploration in No. 2301 working face

### 3 2301工作面槽波数据处理分析

在槽波反射法勘探中,震源激发后形成的槽波呈环状扩散,由于检波器与激发点位于巷道同侧,一部分槽波直接沿煤壁表面最先到达接收点,形成直达槽波,另一部分槽波遇到异常界面后产生反射,形成反射槽波,且传播路径远大于直达槽波,故滞后到达接收点。

由图4可以看出,320~440 ms存在反射槽波,其震相清晰,振幅大,衰减慢,表现出槽波高频和低速的特点,而反射槽波的形成也间接说明了探测区域内异常界面的存在。

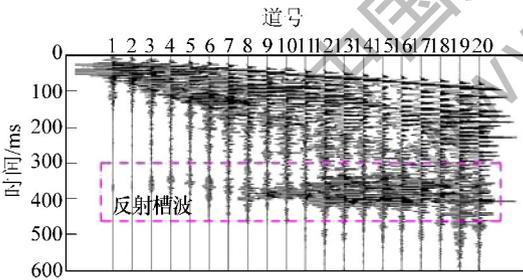


图4 第1炮共炮点道集原始记录

Fig. 4 Source record of common-shot gather of the first shot

本次数据处理软件使用美国的SPW专业地震处理系统,主要处理流程包括:

- 1) 数据录入:将本次采集到的48个单炮记录输入SPW软件。
- 2) 观测系统加载:依据炮点和检波器位置建立反射法勘探观测系统,并加载至SPW软件。
- 3) 延时校正——静校正:本次放炮采用的是1段雷管,存在0~15 ms的延时误差,需进行校正。
- 4) AGC增益和滤波:经过主频分析可知,本次探测的槽波频率集中在100~150 Hz,通过调用

220 ms的AGC窗口进行增益,再利用Bandpass滤波器对原始数据进行批处理,可以有效凸显反射槽波,由图5可以看出,320~440 ms的反射槽波信号得到了加强,而在210~280 ms存在另一层反射槽波。

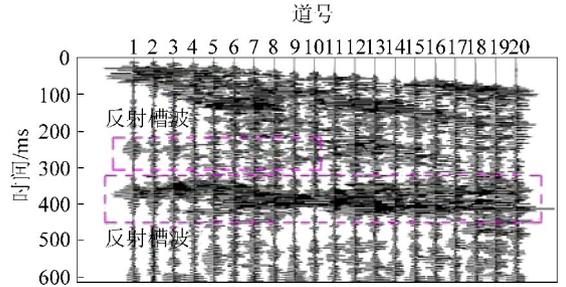


图5 处理后第1炮共炮点道集

Fig. 5 Record common-shot gather of the first shot after processing

5) 速度分析——动校正:借此可以消除单个检波器中的反射时差,把不同的炮检距还原至0,而通过直达槽波到达时间和偏移距的对应关系可计算得出本次探测区域的槽波速度约870 m/s。

6) 包络计算:利用希尔伯特变换,将高频埃里相变为低频包络,强化相间地震道的相干性。

7) CPM包络叠加:把经过包络的共反射点道集进行叠加,提高信噪比,突出反射震相。

8) 时深转换和相移偏移:结合槽波速度及相关偏移算法纠正反射震相位置,最终得到准确的反演成果,如图6所示。

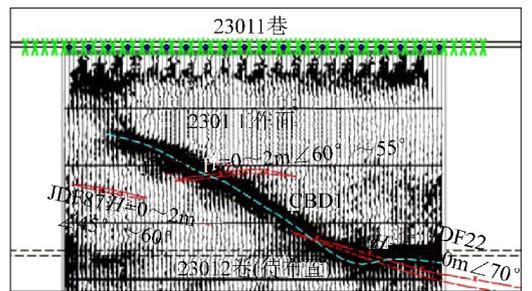


图6 2301工作面槽波反演成果

Fig. 6 Inversion results in No.2301 working face

但是,由于槽波的频散特性,使得反射槽波不是集中在一条同相轴上,而是分布在一定宽度的时间域内,因此,按照“取中原则”勾画出异常位置(图6中青色虚线所示),命名为CBF1,结合现场探测条件及工作面的地质资料分析,推测为一延伸采面约207 m的南西向断层,与23012巷交叉位置距开切眼215 m。

## 4 2301工作面探采结果对比

为验证槽波反射法预测 CBF1 断层的准确性,在 23012 巷掘进过程中分别在距开切眼 368 m 和 279 m 位置施工 1、2 号验证孔,其中,1 号孔揭露断层位置(图 7 中粉色圆点)距 23012 巷 79 m,而推测的 CBF1 断层距。

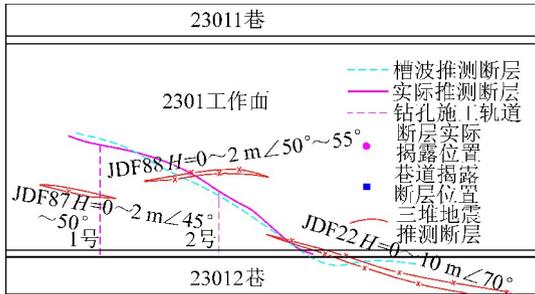


图 7 2301 工作面断层探采结果对比

Fig. 7 Comparison of fault about detecting and exposing in No. 2301 working face

23012 巷 86 m,位置偏差-7 m,2 号孔揭露断层位置(图 7 中粉色圆点)距 23012 巷 46 m,而推测的 CBF1 断层距 23012 巷为 43 m,位置偏差+3 m,另外,23012 巷实际揭露断层位置(图 7 中蓝色方块)为距开切眼 207 m,与推测的 CBF1 断层位置(距开切眼 215 m 处)偏差-8 m,与三维地震推测的 JDF22 断层位置(距开切眼 195 m)偏差+12 m,如图 7 所示。

另外,2301 工作面实际回采揭露的断层(图 7 中粉色实线)情况与槽波反射法探测 CBF1 断层(图 7 中青色虚线)的赋存特征近乎吻合,位置偏差不超过 10 m,走向均为南西向,实际延伸长度(213 m)比槽波预测 CBF1 断层的延伸长度(207 m)偏差+6 m,但三维地震推测 JDF22 断层的延伸长度仅为 45 m,且 JDF87 和 JDF88 断层的走向和延伸长度与实际情况不符,偏差较大。

因此,通过 2301 工作面断层的实际探采成果对比,成功证明了井下槽波地震反射法探测断层的可行性和准确性,相比于地面三维地震勘探,有效纠正了对 JDF87 和 JDF88 断层的误判,弥补了 JDF22 断层延伸长度不足等问题,对矿方而言,有效避免了无计划揭露构造的危险,保证了工作面的安全回采,带来了巨大的经济效益和社会效益。

## 5 结 论

1) 研究槽波反射法勘探发现,探测区域的槽波速度约 870 m/s,槽波主频区间为 100~150 Hz,可为

矿井内邻近采面的槽波地震探测解析提供理论的基础参数。

2) 研究槽波反射法勘探发现,一条延伸长度约 207 m 的南西向断层,与断层实际位置和赋存特征近乎吻合,偏差不大于 10 m,探测效果良好,同时有效纠正了地面三维地震勘探结果的误差,是一种探测断层构造的行之有效的地球物理勘探方法,对保障矿井安全生产意义重大。

3) 由于槽波本身的频散特性,且信噪比不高,增大了槽波速度准确计算的难度,难免存在解释成果的位置偏差,另外,观测系统轴线与探测断层走向夹角对解析成果准确性的影响应作为今后槽波反射法探测断层的一个研究重点。

## 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 卫金善,张晋武.综合勘探方法在成庄矿井地质构造探测中的应用[J].中国煤田地质,2002,14(4):19-21.  
WEI Jinchuan, ZHANG Jinwu. Application of comprehensive prospecting method on search of geological structure in Chengzhuang Mine[J]. Coal Geology of China, 2002, 14(4): 19-21.
- [3] 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):76-82.  
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): 76-82.
- [4] 房立华,吴建平,吕作勇.华北地区基于噪声的瑞利面波群速度层析成像[J].地球物理学报,2009,52(3):663-671.  
FANG Lihua, WU Jianping, LYU Zuoyong. Rayleigh wave group velocity tomography from ambient seismic noise in North China[J]. Chinese J Geophysic, 2009, 52(3): 663-671.
- [5] 何正勤,叶太兰,丁志峰.华北东北部的面波相速度层析成像研究[J].地球物理学报,2009,52(5):1233-1242.  
HE Zhengqin, YE Tailan, DING Zhifeng. Surface wave tomography for the phase velocity in the northeastern part of North China[J]. Chinese J Geophysics, 2009, 52(5): 1233-1242.
- [6] 孙希杰,王静.复杂地表深部采区三维地震勘探技术[J].中国煤炭,2016,42(4):35-38.  
SUN Xijie, WANG Jing. 3D seismic exploration technology in deep mining area under complicated ground surface[J]. China Coal, 2016, 42(4): 35-38.
- [7] 汤友谊,陈江峰,彭立世.无线电波坑道透视构造煤的研究[J].煤炭学报,2002,30(7):254-258.  
TANG Youyi, CHEN Jiangfeng, PENG Lishi. Study of tectonic coal by radio-wave pit perspective[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 30(7): 254-258.

- [8] 许 峰,杨茂林.定向钻探技术在神东矿区防治水中的应用[J].矿业安全与环保,2017,44(1):70-73.  
XU Feng, YANG Maolin. Application of Directional Drilling Technology in Water Control in Shendong Coal Mining Area [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2017, 44(1): 70-73.
- [9] 黄国娇,白超英.二维复杂层状介质中地震多波走时联合反演成像[J].地球物理学报,2010,53(12):2972-2987.  
HUANG Guojiao, BAI Chaoying. Simultaneous inversion with multiple traveltimes within 2-D complex layered media [J]. Chinese J Geophysics, 2010, 53(12): 2972-2987.
- [10] 刘玉忠.采区槽波探测的适应性分类[J].煤田地质与勘探,1997,25(4):54-57.  
LIU Yuzhong. The adaptability classification of in seam wave surveying in mining districts [J]. Coal Geology & Exploration, 1997, 25(4): 54-57.
- [11] 杨元海.槽波速度谱相对透射系数图法[J].煤田地质与勘探,1993,21(4):53-56.  
YANG Yuanhai. The method for relative transmittance map of seam-wave velocity spectrum [J]. Coal Geology & Exploration, 1993, 21(4): 53-56.
- [12] 杨 真,冯 涛,WANG S G. 0.9m 薄煤层 SH 型槽波频散特征及波形模型[J].地球物理学报,2010,53(2):442-449.  
YANG Zhen, FENG Tao, WANG S G. Dispersion characteristics and wave shape mode of SH channel wave in a 0.9 m-thin coal seam [J]. Chinese J Geophysics, 2010, 53(2): 442-449.
- [13] 张碧星,鲁来玉.用频率-波数法分析瑞利波频散曲线[J].工程地球物理学报,2005,2(4):245-255.  
ZHANG Bixing, LU Laiyu. Investigation on dispersion curves of Rayleigh wave by frequency-wave number analysis method [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2(4): 245-255.
- [14] 潘冬明,胡明顺,崔若飞,等.基于拉东变换的瑞雷面波频散分析与应用[J].地球物理学报,2010,53(11):2760-2766.  
PAN Dongming, HU Mingshun, CUI Roufei, *et al.* Dispersion analysis of Rayleigh surface waves and application based on Radon transform [J]. Chinese J Geophysics, 2010, 53(11): 2760-2766.
- [15] 程久龙. Love 型槽波理论地震图的计算[J].山东矿业学院学报,1994,13(4):349-353.  
CHENG Jiulong. Calculation of theoretical seismic grams of Love channel waves [J]. Journal of Shandong Mining Institute, 1994, 13(4): 349-353.
- [16] 潘冬明,刘天放.拉夫型槽波的有限差分合成[J].中国煤田地质,1990,2(2):54-59.  
PAN Dongming, LIU Tianfang. Love channel wave finite difference synthesis [J]. Coal Geology of China, 1990, 2(2): 54-59.
- [17] 杨文强.槽波地震勘探的数学模型研究[J].地质与勘探,2001,37(3):58-60.  
YANG Wenqiang. Modeling research of channel wave seismic exploration [J]. Geology and Prospecting, 2001, 37(3): 58-60.
- [18] 刘天放,程久龙,潘冬明,等.槽波的吸收衰减[J].煤炭学报,1993,18(5):83-86.  
LIU Tianfang, CHENG Jiulong, PAN Dongming, *et al.* Channel wave attenuation by medium absorption [J]. Journal of China Coal Society, 1993, 18(5): 83-86.
- [19] 崔 岩,王彦飞,杨长春.带先验知识的波阻抗反演正则化方法研究[J].地球物理学报,2009,52(8):2135-2141.  
CUI Yan, WANG Yanfei, YANG Changchun. Regularizing method with a priori knowledge for seismic impedance inversion [J]. Chinese J Geophysics, 2009, 52(8): 2135-2141.
- [20] 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[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 J Geophysics, 2012, 55(3): 1054-1062.