

8-25-2019

## Channel wave advanced detection method based on Kirchhoff migration and its application

ZHAO Yunpei

*Jizhong Energy Xingtai Mining Group Co., Ltd., Xingtai 054000, China*

WANG Wei

*Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China, wang\_wei@lreis.ac.cn*

HOU Xianhua

*MNR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China*

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

---

### Recommended Citation

ZHAO Yunpei, WANG Wei, HOU Xianhua, et al. (2019) "Channel wave advanced detection method based on Kirchhoff migration and its application," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 47: Iss. 4, Article 29.

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.028

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol47/iss4/29>

This Coal Geophysical Exploration, Mine Geophysical Exploration is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact [380940179@qq.com](mailto:380940179@qq.com).

文章编号: 1001-1986(2019)04-0186-07

# 基于克希霍夫偏移的槽波超前探测方法及应用

赵云佩<sup>1</sup>, 王伟<sup>2</sup>, 侯献华<sup>3</sup>

(1. 冀中能源邢台矿业集团有限责任公司, 河北 邢台 054000;

2. 中科院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

3. 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037)

**摘要:** 为查明邢台矿区葛泉矿 1199 工作面掘进巷前方地质构造, 采用井下槽波地震进行超前探测, 用线性拉东变换提取来自巷道前方的反射波, 在时间域内进行速度分析获得围岩参数信息, 通过克希霍夫偏移对巷道前方地质异常体成像。结果显示, 掘进巷前方距离 G12 检波点 205 m 与 237 m 存在异常, 分别对应采空巷道与 SF4 断层; 通过速度分析提取速度参数, 初步判断 SF4 含水。钻探验证结果表明, 克希霍夫偏移方法能对掘进巷前方断层异常体进行成像。

**关键词:** 槽波; 频散分析; 超前探测; 克希霍夫偏移方法; 邢台矿区葛泉矿

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.028



## Channel wave advanced detection method based on Kirchhoff migration and its application

ZHAO Yunpei<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, HOU Xianhua<sup>3</sup>

(1. Jizhong Energy Xingtai Mining Group Co., Ltd., Xingtai 054000, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China; 3. MNR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

**Abstract:** In order to detect the geological structures in the front of the working face 1199 in Gequan mine of Xingtai mining area, underground channel wave seismic exploration was used to conduct advanced detection, linear Radon transform was used to extract the reflection wave from the front of the roadway, parameter information of the surrounding rocks were obtained through velocity analysis in time domain, The abnormal geological bodies in the front of the roadway were imaged through Kirchhoff migration. The results indicated that there existed anomalies at 205 m and 237 m away from the geophone point G12 in the front of the excavating roadway, corresponding to the mined-out roadway and the fault SF4 respectively; The velocity parameters were extracted through velocity analysis, it was judged preliminarily that SF4 was water-bearing. The drilling verification results showed that Kirchhoff migration method can image the faults in front of the roadway.

**Keywords:** channel wave; dispersion analysis; advanced detection; Kirchhoff migration; Gequan mine of Xingtai mining area

煤矿巷道掘进过程中, 要求掘前必须探明前方异常, 钻探方法探测的成本较高, 若采用槽波法进行超前预报, 在异常区利用少量钻探进行验证, 不仅提高工作效率, 还可以降低成本。槽波是沿着煤

层传播的一种导波, 因上下围岩地震波速度高于煤层内地震波速度<sup>[1-5]</sup>, 煤层内地震波向上下围岩辐射传播时, 超过临界角, 地震波发生全反射, 并且部分频率的全反射波在煤层内发生相长干涉现象, 并

收稿日期: 2019-01-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0602802); 国家自然科学基金项目(41790443, 41641040); 河北省重点研发计划海洋资源开发利用与社会事业专项项目(18275408D)

**Foundation item:** National Key R&D Program of China(2017YFC0602802); National Natural Science Foundation of China(41790443, 41641040); Development and Utilization of Marine Resources and Special Projects for Social Undertakings Under Key R&D Programs in Hebei Province (18275408D)

第一作者简介: 赵云佩, 1965 年生, 男, 河北武安人, 硕士, 高级工程师, 从事矿井采掘技术研究与管理工作。E-mail: 752071261@qq.com

通信作者: 王伟, 1972 年生, 男, 河北涿州人, 副研究员, 研究生导师, 博士, 从事地球物理工作。E-mail: wang\_wei@lreis.ac.cn

引用格式: 赵云佩, 王伟, 侯献华. 基于克希霍夫偏移的槽波超前探测方法及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 186-192.

ZHAO Yunpei, WANG Wei, HOU Xianhua. Channel wave advanced detection method based on Kirchhoff migration and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 186-192.

向前传播, 具有频散特征<sup>[6-11]</sup>。

20 世纪 70 年代, 德国与英国合作, 首先提出将矿井槽波探测技术应用到隧道超前探测工作中, 并取得了一定的成果<sup>[12-14]</sup>。瑞士的 Amberg 公司随后利用地震反射波探测原理, 研制开发了第一套完整的超前预报系统 TSP(Tunnel Seismic Prediction), 目前该系统升级为 TSP-303, 因该仪器由铁路系统首先引进并推广, 在铁路隧道预报中得到广泛应用<sup>[15]</sup>。

国内煤炭井下槽波超前探测工作源于铁路隧道地震波法超前预报技术。而我国的铁路隧道地震波法超前预报工作开展较晚, 在经历学习、理解、创新过程后, 铁路隧道地震波法超前预报技术与仪器取得重要进展<sup>[16]</sup>。基于直达波走时曲线和反射波走时曲线成反八字型、且相位延伸线交点位于构造面的位置, 曾昭璜<sup>[17]</sup>在高信噪比数据前提下提出负视速度法, 该方法在围岩速度差异小, 直观有效。中国科学院及相关高校在借鉴医学上的 CT 成像技术<sup>[18]</sup>、VSP 测井技术<sup>[19]</sup>、多波多分量技术<sup>[20]</sup>等多种地球物理技术的基础上, 开发了相应的隧道与矿井地震超前预报系统, 并在超前预报中取得实用效果。

随着槽波地震探测仪器硬件与处理解释软件技术的发展, 超前探测的距离、分辨率和精度不断提高<sup>[21-24]</sup>, 其探测仪器向智能化、抗干扰能力强方向发展<sup>[25]</sup>。

探测掘进巷道前方断层构造要素是解决煤矿安全生产的重要地质问题。超前探测不仅要查明断层位置, 也要查明断层含水性。本文利用克希霍夫积分偏移成像获得迎头前方断层位置; 通过速度分析获得围岩与煤层速度信息, 为掘进生产提供断层构造详细的地球物理参数, 并应用在邢台矿区葛泉矿 1199 工作面的井下槽波地震勘探中。

## 1 方法原理

### 1.1 超前预报工作原理

在靠近掌子面(迎头)位置布置多个震源, 一般在震源孔中放入一定量的炸药, 炸药爆炸时会激发地震波并向四周传播, 在远离迎头位置布置检波器接收地震波。地震波在向四周扩散传播过程中, 检波器首先接收的是向后传播的直达 P 波, 其次是向前方传播的波遇到反射界面回传到接收点的反射波, 在反射界面同时产生转换波。下面结合模型说明提取反射波与成像原理(图 1)。

### 1.2 模型

图 1 中有 2 个岩性界面, 岩石纵波、横波、密

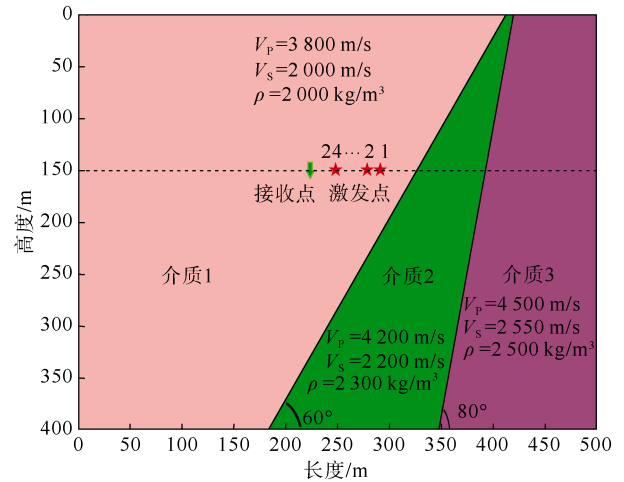


图 1 地震波法超前预报剖面模型图

Fig.1 Model of advanced prediction of seismic wave

度参数如图中所示。模型由 3 种不同岩性组成, 其弹性波参数分别为: 介质 1,  $V_p=3800\text{ m/s}$ ,  $V_s=2000\text{ m/s}$ ,  $\rho=2000\text{ kg/m}^3$ ; 介质 2,  $V_p=4200\text{ m/s}$ ,  $V_s=2200\text{ m/s}$ ,  $\rho=2300\text{ kg/m}^3$ ; 介质 3,  $V_p=4500\text{ m/s}$ ,  $V_s=2550\text{ m/s}$ ,  $\rho=2500\text{ kg/m}^3$ , 介质 1 与介质 2 界面倾角  $60^\circ$ , 介质 2 与介质 3 界面倾角为  $80^\circ$ , 网格剖分  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ , 模型大小  $500\text{ m}\times 400\text{ m}$ , 采用高阶交错网格有限差分数值模拟。共接收点道集波场如图 2 所示: 反射 P1 为模型中第 1 个倾角  $60^\circ$  界面产生的反射 P 波, 反射 S1 为模型中第 1 个倾角  $60^\circ$  界面产生的转换 S 波; 反射 P2 为模型中第 2 个倾角  $80^\circ$  界面产生的反射 P 波, 反射 S2 为模型中第 2 个倾角  $80^\circ$  界面产生的转换 S 波。利用线性拉东变换提取来自掘进巷道前方的反射波, 对反射波进行常速度扫描分析, 其原理是给定一个常速度, 计算巷道正前方网格剖分点上的反射波旅行时, 并将地震道对应振幅值放置在以接收点、激发点、网格点构成的椭圆上, 按照这一原则对给定的区间速度进行扫描计算。当速度接近介质速度时, 反射点对应的旅行时位于地震记录反射同相轴上, 其振幅值最大, 从而得到该网格点对应的均方根速度; 在时间域内实现速度扫描获得均方根速度: 以最大偏移距双程反射时间为截距, 以速度倒数为斜率, 沿直线方向将各道相应振幅求和, 并将求和振幅值放置在速度-时间域平面内, 当搜索的直线路径与反射同相轴一致时, 该速度-双程时间对应的求和振幅值最大, 从而获得双程旅行时对应的均方根速度(探测距离在 150 m 内及断层面与巷道轴线夹角在  $60^\circ\sim 90^\circ$  时反射同相轴为直线); 通过拾取速度谱获得巷道前方煤层及煤层异常体的 P、S 波速度; 最后利用克希霍夫积分偏移获得巷道前方异常体成像信息。

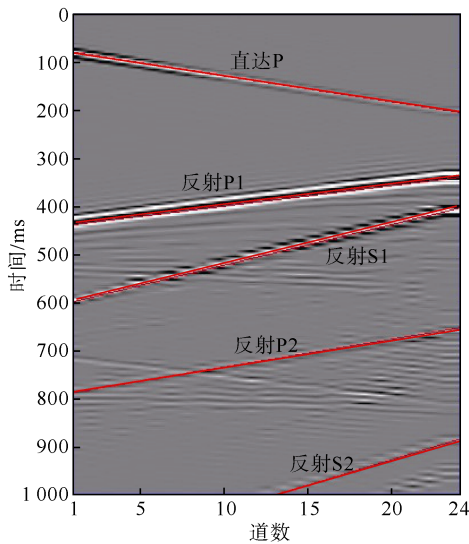


图 2 模型共接收点道集记录

Fig.2 Gather record of common receiver point of the model

### 1.3 克希霍夫积分偏移

将掘进前方任意一点  $O$  看成反射点,以接收点  $R_i$ 、激发点  $R_j$  为焦点,以接收点  $R_i$ 、激发点  $R_j$  到反射点距离和为等长  $r$  形成椭圆(图 3)。假设给定的速度模型与实际速度一致时,将相对应旅行时振幅分布在椭圆上,当考虑反射波角度、传播距离、相位因素时,对振幅进行倾角校正、距离校正、相位校正,将校正后的振幅分布在椭圆上,这种将振幅校正并按照椭圆分布归位方法即为克希霍夫积分偏移。对所有数据按照上述原则将相应的振幅校正后沿着各自的椭圆分布,在反射点处将形成相长干涉,振幅同相叠加达最大值,在非反射点不发生相长干涉,振幅值非同相叠加。对所有点进行上述振幅校正,并沿椭圆分布,获得前方成像结果,任意一点振幅归位求和数学表达式如式(1)。

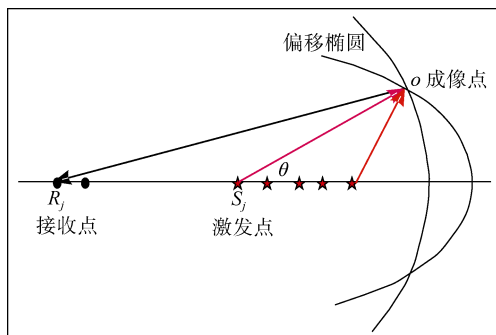


图 3 克希霍夫偏移

Fig.3 Kirchhoff migration

$$A_{out} = \int_{j=1}^{N_s} \int_{i=1}^{N_r} \frac{\cos \theta_{ij}}{r_{ij}} \frac{\partial A_{R_i S_j}}{\partial t} \quad (1)$$

式中  $A_{out}$  表示输出点的求和振幅值,  $N_s$  表示激发点数,  $N_r$  接收点数,  $\theta$  表示反射角,  $r$  表示地震波传播距离,  $A_{R_i S_j}$  表示输入点振幅值。

模型数据克希霍夫偏移结果如图 4 所示,岩层分界面与成像反射弧相切。

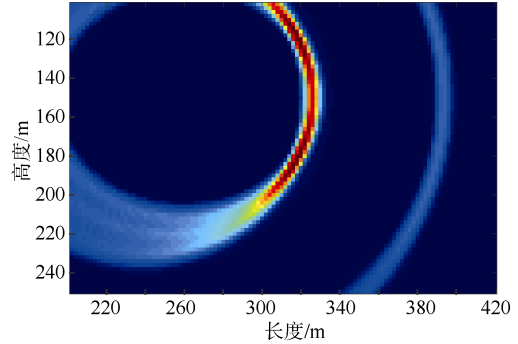


图 4 模型数据偏移结果

Fig.4 Data migration result of the model

## 2 工程实例

### 2.1 地质概况

葛泉矿 1199 工区属于邯邢煤田,位于太行山隆起带与华北沉降区的过渡地带。据已知钻孔揭露,区内由老至新发育奥陶系、石炭系、二叠系及第四系地层。井田范围内地表全被新生界第四系松散沉积层覆盖,第四系与下伏地层呈不整合接触。

井田内主要含煤地层为石炭系、二叠系地层,即二叠系下统山西组( $P_1s$ )、石炭-二叠系太原组( $C_2-P_1$ )和石炭系上统本溪组( $C_2b$ ),总共含煤 13~14 层,其中可采及局部可采煤层 6 层。

井田范围内断层走向以 NNE—NE 最为发育,多为高角度正断层。根据井田三维地震及钻探资料共解释断层 53 条,其中落差大于 30 m 的断层 8 条,占 13.5%;落差在 10~30 m 的断层 12 条,占 23.1%;落差在 5~10 m 的断层 14 条,占 26.9%;落差小于 5 m 的断层有 19 条,占 36.5%。

### 2.2 观测系统

断层探测观测系统平面图如图 5 所示,试验共设计 4 个激发点,左右帮均分布 2 个激发点,间距 20 m,药量为 100 g,炮孔深 2 m;检波点间距 5 m,布设 12 个检波器,最小炮检距 50 m 和 70 m。

地震勘探数据处理采用 TSP-SK 地震数据处理软件,处理主要步骤:定义观测系统、初至拾取、炮时基校正、能量均衡、扩散补偿、带通滤波、反 Q 滤波、反射波提取、波场分离、速度分析、偏移成像、岩石参数与反射信息提取。

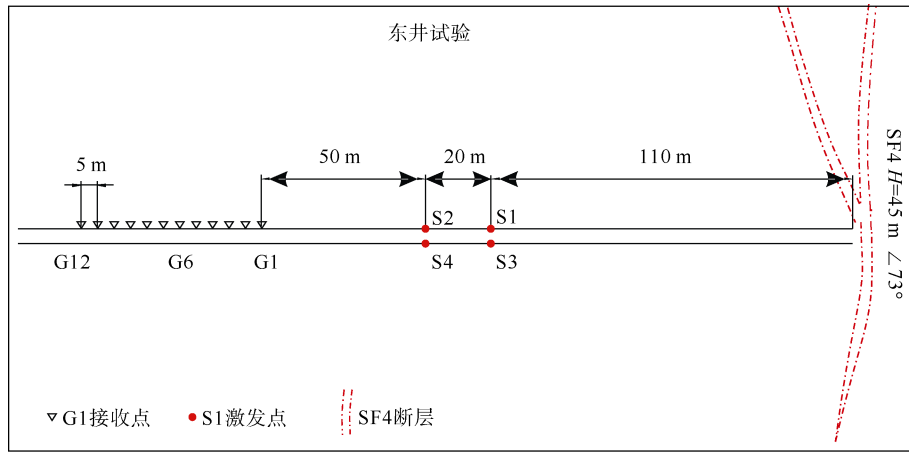


图 5 葛泉矿东井观测系统图

Fig.5 The observation system of the eastern shaft of Gequan mine

2.3 数据处理与结果

在葛泉矿区进行的井下超前探测施工条件较好，从原始共接收点地震记录看，围岩直达 P 波速度约 4 500 m/s，煤层直达 P 波速度约 2 750 m/s，围岩直达 S 波速度约 2 350 m/s，煤层直达 S 波速度约为 1 650 m/s、直达槽波波速约为 900 m/s，各组直达波同相轴连续性较好、初至呈线性分布、各道能量一致性好(图 6)，从总体上看地震数据可靠、质量较好。

用线性拉东变换方法提取前方反射波，见图 7，在小偏移距及反射面与巷道轴向夹角大于 60°条件下，反射波时距曲线为线性同相轴分布。按照时间域速度分析方法获得速度谱并计算相应层速度，如图 8 所示。图 8a 为 P 波速度谱，图 8b 为 S 波速度谱，图 8c 为拾取的均方根速度换算的层速度。图 8b、图 8c 中坐标起止点 0 m 坐标位置为图 5 中 G12

检波点位置。

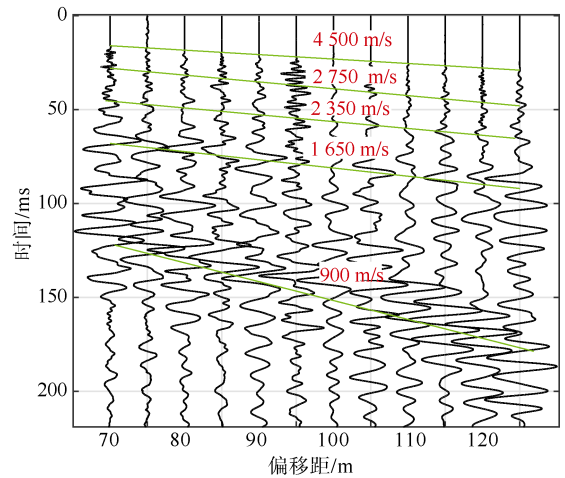
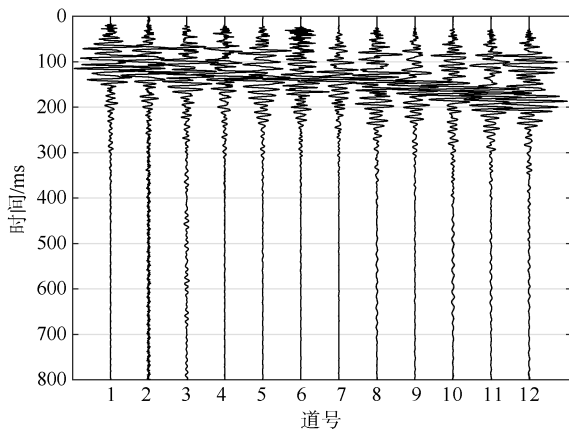
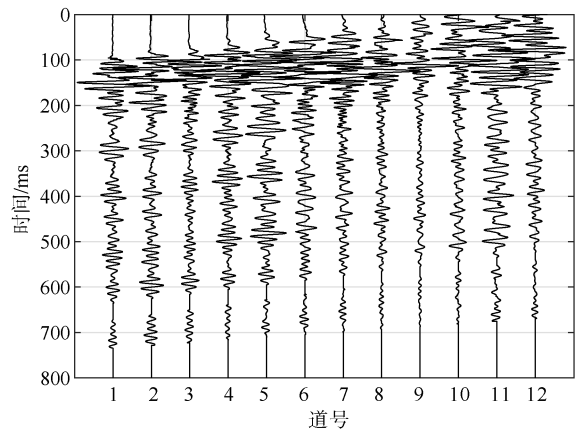


图 6 S1 炮 x 分量记录与直达波速度分析

Fig.6 x component record of shot S1 and velocity analysis of direct wave



(a) 炮集记录



(b) 反射波

图 7 炮集数据与反射波提取

Fig.7 Shot gather data and extraction of reflection wave



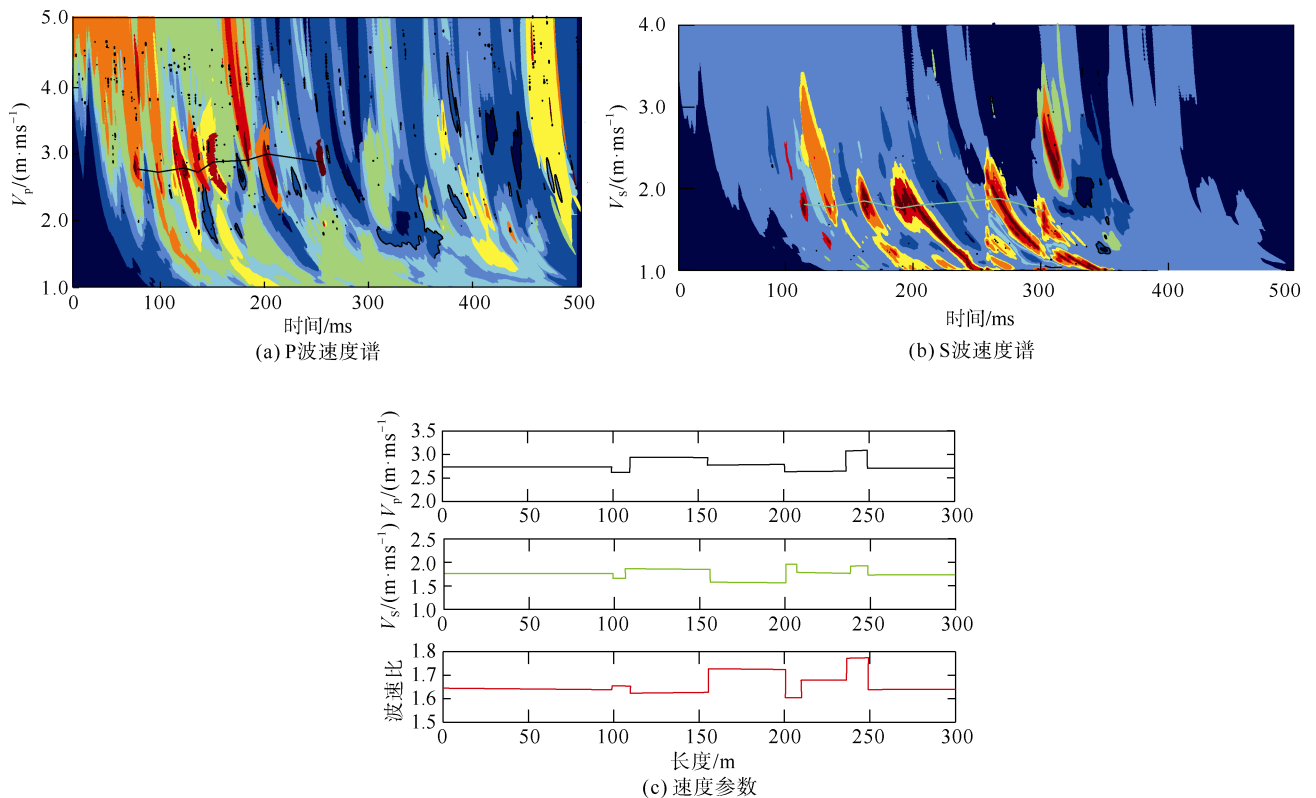


图 8 速度谱与速度参数

Fig.8 Velocity spectrum and velocity parameters

图 9a 为葛泉矿东井试验偏移成像结果图,本次试验探测目标为掘进巷道前方 SF4 断层。在偏移结果中显示了探测范围内煤层各处的地震波振幅大小,正相位振幅越大、对应区域颜色越偏红色,表示附近存在地质构造正异常体(如断层)的几率越大;反之负相位振幅越大、对应区域颜色越偏深蓝色,表示附近存在地质构造负异常体(如巷道)的几率越大。克希霍夫偏移成像法处理结果显示,探测范围内有多个正负振幅组成的反射弧,分别对应于不同的反射波组。

### 2.4 综合解释

根据波速变化与成像结果(地震波法)超前地质预报对前方异常体识别具有如下规律<sup>[26]</sup>:**a.** 反射振幅高低与界面反射系数或前后围岩波阻抗大小正相关;**b.** 正反射系数表示波速增加、岩性刚性变强,负反射系数表示波速降低,岩性刚性变弱;**c.** 波速比或者泊松比突然增大,表示围岩流体存在;**d.** 相同围岩内纵波波速下降,表示围岩节理发育或孔隙度增加。

钻探验证孔揭露断层 F4 位置。钻孔位于巷道迎头位置。钻探 1 孔方位角 315°,倾角-18°,孔深 89.5 m,未见断层;钻探 2 孔方位角 335°,倾

角-18°,孔深 76.1 m,见断层;钻探 3 孔方位角 22°,倾角-18°,孔深 81.5 m,见断层。图 9 中坐标 205 m(参考点 0 m 为 G12 检波点)附近为巷道反射,显示为负反射与实际巷道反射一致,在 237 m 附近为断层,显示正强反射,与钻探揭示断层位置一致。237 m 附近断层走向垂直于巷道,与 SF4 断层一致。断层反射处纵横波波速增大,同时波速比增加,表明 SF4 含水。

### 3 结 论

**a.** 井下超前探测数据采集受观测空间的限制,排列短、观测系统不规则,且对地质目标体成像精度要求高。克希霍夫偏移成像方法不仅适用于非规则采集的数据体,而且能够对前方异常体准确成像。

**b.** 通过速度分析提取 P、S 波速度及波速比,为识别异常体及判断异常体性质提供了一种有效手段。

**c.** 本次超前探测解释只利用了巷道前方反射波信息,而井下全空间波场成像与分析可提高井下槽波超前预报,解决煤矿更多地质问题。该技术是进一步研究方向。

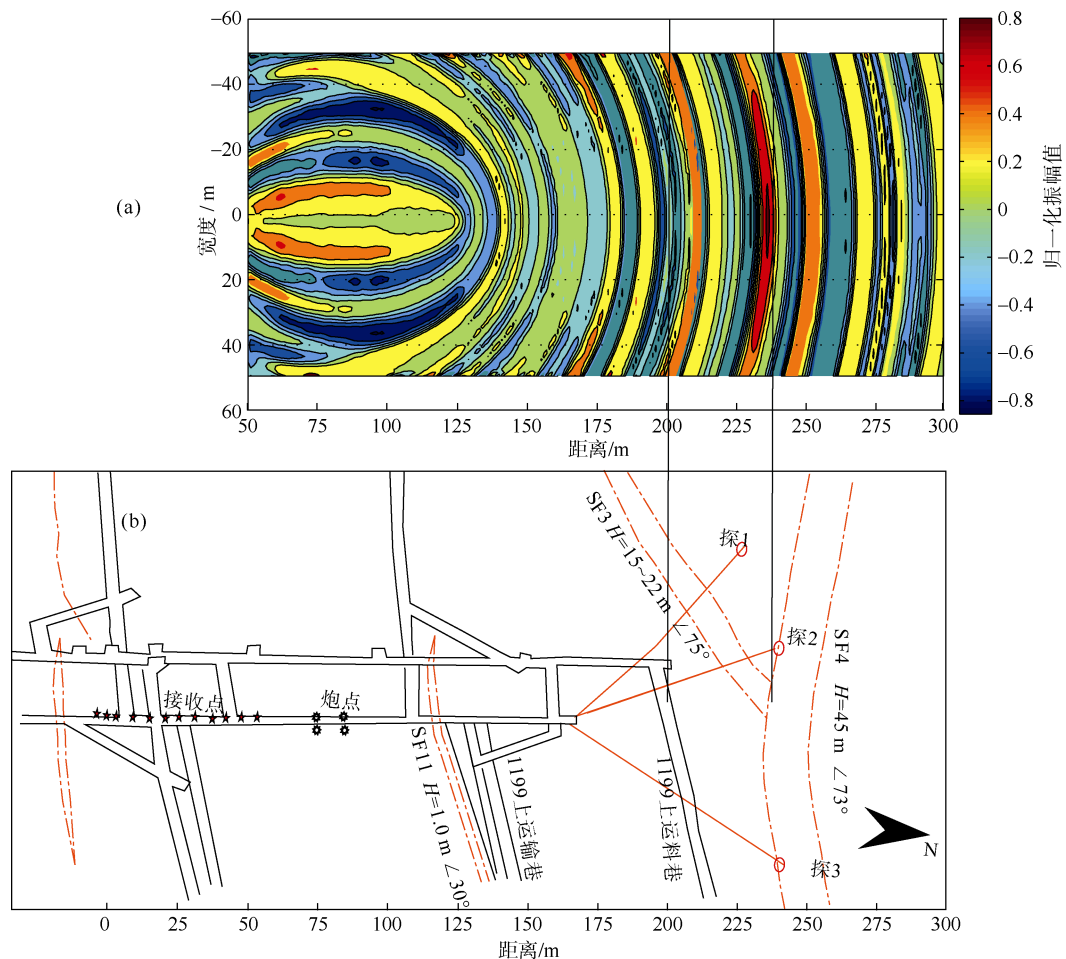


图9 葛泉矿东井试验综合解释成果图:(a) 偏移结果;(b) 工区图(黑色线为断层和巷道异常位置)

Fig.9 The comprehensive interpretation results of the test in the eastern shaft of Gequan mine

## 参考文献

- [1] 刘天放, 潘东明, 李德春, 等. 槽波地震勘探[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
- [2] EVISON F F. A coal seam as a guide for seismic energy[J]. Nature, 1955, 176(4495): 1224-1225.
- [3] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative seismology: Theory and methods[M]. San Francisco: W H Freeman and Company, 1980.
- [4] BUCHANAN D J. The propagation of attenuated SH channel waves[J]. Geophysical Prospecting, 1978, 26(1): 16-28.
- [5] BUCHANAN D J, JACKSON P J, DAVIS R. Attenuation and anisotropy of channel waves in coal seams[J]. Geophysics, 1983, 48(2): 133-147.
- [6] DRESEN L, FREYSTATTER S. Model seismic investigations on the use of Rayleigh channel waves for the in-mine seismic detection of discontinuities[C]//Proceedings of Coal Seam Discontinuities Symposium. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: 1976.
- [7] DRESEN L, FREYSTATTER S. Rayleigh channel waves for the in-seam seismic detection of discontinuities[J]. Journal of Geophysics, 1976, 42: 111-129.
- [8] DRESEN L, FREYSTATTER S. The influence of oblique-dipping discontinuities on the use of Rayleigh channel waves for the in-seam seismic reflection method[J]. Geophysical Prospecting, 1978, 26: 1-15.
- [9] DRESSEN L, KERNER C, KUHNBACH B. The influence of an asymmetry in the sequence of rock/coal/rock on the propagation of Rayleigh seam waves[J]. Geophysical Prospecting, 1985, 33: 519-539.
- [10] EWING W M, JARDETZKY W S. Elastic waves in layered media[M]. New York: McGraw-Hill, 1957.
- [11] FRANSSSENS G R, LAGASSES P E, MASON I M. Study of the leaking channel modes of in-seam exploration seismology by means of synthetic seismograms[J]. Geophysics, 1985, 50(3): 414-424.
- [12] 杨思通, 程久龙. 煤巷小构造 Rayleigh 型槽波超前探测数值模拟[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 655-662.  
YANG Sitong, CHENG Jiulong. The method of small structure prediction ahead with Rayleigh channel wave in coal roadway and seismic wave field numerical simulation[J]. Journal of Geophysics, 2012, 55(2): 655-662.
- [13] 程久龙, 李飞, 彭苏萍, 等. 矿井巷道地球物理方法超前探测研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1742-1750.  
CHENG Jiulong, LI Fei, PENG Suping, et al. Research progress

- and development direction on advanced detection in mine roadway working face using geophysical methods[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1742-1750.
- [14] 程建远, 江浩, 姬广忠, 等. 基于节点式地震仪的煤矿井下槽波地震勘探技术[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2): 25-28.  
CHENG Jianyuan, JIANG Hao, JI Guangzhong, et al. Channel wave seismic exploration technology based on node digital seismograph in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 25-28.
- [15] 殷瑞华, 徐义贤. TSP-203 在鹰嘴岩隧道超前地质预报中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(3): 112-116.  
YIN Ruihua, XU Yixian. The application of TSP-203 to the advanced geological prediction of the Yingzuiyan tunnel[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(3): 112-116.
- [16] 张夏阳. 煤矿巷道前方中小型断层地震波特征及应用研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- [17] 曾昭磺. 隧道地震反射法超前预报[J]. 地球物理学报, 1994, 37(2): 268-271.  
ZENG Shaohuang. Prediction ahead of the tunnel face by the seismic reflection methods[J]. Acta Geophysica Sinica, 1994, 37(2): 268-271.
- [18] DU L Z, ZHANG X P, NIU J J, et al. The seismic CT method in measuring rock bodies[J]. Applied Geophysics, 2006, 3(3): 192-195.
- [19] 查欣洁, 王伟, 高星. 拟 VSP 与克希霍夫偏移法在隧道超前预报中的应用[J]. 物探与化探, 2016, 40(1): 214-219.  
ZHA Xinjie, WANG Wei, GAO Xing. The application of pseudo VSP method and Kirchhoff migration to the tunnel advanced geological prediction[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(1): 214-219.
- [20] 梁庆华, 宋劲. 矿井多波多分量地震勘探超前探测原理与实验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(5): 1392-1398.  
LIANG Qinghua, SONG Jin. Advanced detection theory and experimental research of multi-wave and multi-component seismic exploration in mine[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(5): 1392-1398.
- [21] WANG E L, HAN L G, WANG D L. Multi-azimuth three-component surface seismic modeling for viscoelastic cracked monoclinic media[J]. Applied Geophysics, 2007, 4(1): 16-24.
- [22] ZHAO Y, LI P F, TIAN S. Prevention and treatment technologies of railway tunnel water inrush and mud gushing in China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5(6): 468-477.
- [23] 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.
- [24] 乐勇, 王伟, 申青春, 等. 槽波地震勘探技术在工作面小构造探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(4): 74-77.  
LE Yong, WANG Wei, SHEN Qingchun, et al. Application of ISS in detection of small structures in working face[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(4): 74-77.
- [25] ZHAO Y B, CHEN S G, TAN X R, et al. New technologies for high-risk tunnel construction in Guiyang Guangzhou high-speed railway[J]. Journal of Modern Transportation, 2013, 21(4): 258-265.
- [26] 叶英. 隧道地质预报手册[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.

(责任编辑 聂爱兰)