

煤巷掘进面反射波和面波综合超前探测方法

赵东奇

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年7月14日; 录用日期: 2025年8月19日; 发布日期: 2025年9月22日

摘要

基于矿井安全生产要求为保障煤矿掘进巷道的安全掘进, 需探查巷道前方是否存在陷落柱和断层等地质异常。煤矿掘进巷道超前探测常采用地震超前探技术, 但存在炸药审批困难、施工效率较低和易受干扰等问题。为此, 本文提出一种基于反射波和面波勘探的综合煤巷超前地质预报方法, 即在巷道掘进面同时进行瞬态面波法和浅层地震反射波法。两种方法相互补充, 可有效提升巷道地震超前探测的勘探精度和效率。为验证该方法的有效性, 在淮南矿区某掘进巷道进行了实测试验, 取得了较好的应用效果。实验结果表明, 该方法可以有效地预报巷道掘进前方五十米范围内断层和褶曲等小型地质构造异常。

关键词

煤矿巷道, 地震反射波, 多道瞬态面波, 超前地质预报, 综合探测

Integrated Seismic Prediction Method for Coal Roadway Excavation Faces Based on Reflected and Surface Waves

Dongqi Zhao

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Jul. 14th, 2025; accepted: Aug. 19th, 2025; published: Sep. 22nd, 2025

Abstract

In the context of coal mine safety production, ensuring the safe excavation of coal roadways necessitates the identification of geological anomalies such as collapse pillars and faults ahead of the excavation face. Traditional Mine Seismic Prediction techniques often face challenges, including difficulties in obtaining approval for explosives, low construction efficiency, and susceptibility to interference.

To overcome these limitations, this study proposes an integrated seismic prediction method that combines the techniques of reflected wave analysis and Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). Specifically, this approach entails the concurrent utilization of the Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) and the Shallow Seismic Reflection Wave (SSR) methods at the excavation face. By harnessing the complementary strengths of these two techniques, the proposed method significantly enhances the accuracy and efficiency of seismic advanced exploration in coal roadways. To validate the effectiveness of this method, a field experiment was conducted in a coal roadway under excavation in the Huainan mining area. The results demonstrated that this method can effectively predict small geological structural anomalies, such as faults and folds, within a range of 50 meters ahead of the excavation face. This paper provides a reliable and efficient method for advanced geological forecasting in coal roadways, thereby enhancing safety in coal mining.

Keywords

Coal Roadway, Seismic Reflection Waves, Multichannel Analysis of Surface Waves, Advanced Geological Forecasting, Comprehensive Detection

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地质构造可诱发掘进巷道灾害, 导致大量人员伤亡与经济损失[1]。鉴于巷道属于深部隐蔽性工程, 在工程勘探阶段要全面且精准地查明相关岩体特征以及可能存在的不良地质体的位置、规模和性质极为困难[2] [3]。故而, 上述地质问题均需依靠掘进过程中的超前预报予以解决。借助超前预测预报, 能够及时、全面地掌握掘进巷道前方的工程地质与水文地质状况, 进而合理规划掘进计划、修正施工方案, 并采取相应预防措施, 有效控制巷道地质灾害的发生, 提升掘进效率, 降低成本[4] [5]。依据矿井安全生产要求, 应遵循“有疑必探, 先探后掘”的原则[6]。为保障煤矿掘进巷道的安全掘进, 需采用巷道超前探测技术, 主要探查巷道前方是否存在陷落柱和断层等大型导水通道[7]。因此, 巷道掘进对地震超前探测技术的快速发展存在迫切需求。

当前, 巷道地震超前探测方法是较为常用的探测技术[8]。然而, 在巷道掘进前方异常探测的实际应用中, 该方法存在一定局限性, 具体表现为现场数据采集过程中施工效率较低[9]。以一般工程为例, 需设置 20 余个炮孔, 按照《爆破安全规程》需要耗时 10 小时以上, 严重制约掘进效率。锤击法则受限于信号能量弱。依据《爆破安全规程》, 两次放炮间隔需在 30 分钟以上, 目的是对通风、瓦斯、煤尘以及支护等情况进行检查。现场施工时严格遵循这些措施, 会致使现场放炮施工时间大幅延长, 对现场掘进作业造成严重影响。传统锤击法因矿区机电作业产生的噪音, 制约超前探测的精度[10] [11]。鉴于此, 本文提出一种基于反射波和面波勘探的综合煤巷超前地质预报方法。现场应用证实, 该方法能有效抑制环境干扰, 信噪比提高, 且增强小断层的识别能力。

2. 反射波和面波综合超前探测方法

2.1. 单点反射方法原理

浅层反射地震勘探, 是借助人工激发的地震波于岩土层传播过程中所产生的反射现象, 采集地震波

数据, 运用偏移成像技术获取探测空间的二维地震剖面, 通过对地震剖面进行解译, 以获取目的层位的赋存特征及其他地质条件[12] [13]。依据反射波原理, 单道观测系统存在相应的波路图(图 1), 其对应的时距曲线方程为:

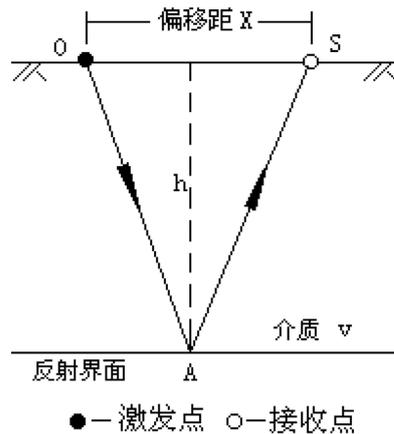


Figure 1. Shallow seismic reflection wave observation system
图 1. 浅层地震反射波观测系统

$$\Delta t = \frac{OA + AS}{V} = \frac{2\sqrt{h^2 + \left(\frac{x}{2}\right)^2}}{V} = \frac{\sqrt{4h^2 + x^2}}{V} \quad (1)$$

式中 Δt 为反射波旅行时, h 为反射点深度, x 为偏移距。根据反射波形和反射旅行时间, 基于“偏移成像”处理, 可求解探测目标体的距离, 从而进行地质解释。数据处理中的“偏移成像”功能指在给定速度等参数后将地震时间剖面转换成空间剖面一种数据处理技术, 它最大限度地将反射同相轴归位到空间反射点上, 有利于地震剖面的解释和应用。因本文采用较短排列的浅层反射波勘探, 对于巷道前方的地质异常较为敏感, 偏移成像处理方法选择较为成熟的绕射偏移成像法。

2.2. 瞬态面波勘探方法原理

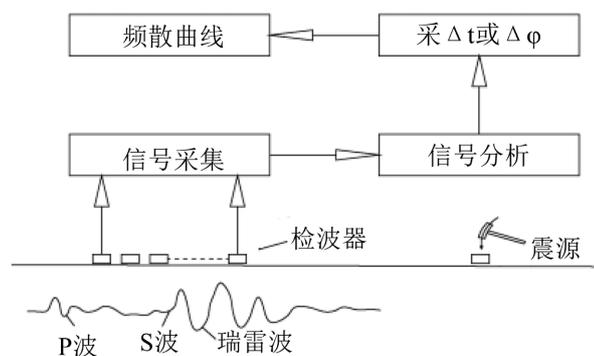


Figure 2. Schematic diagram of transient surface wave exploration
图 2. 瞬态面波勘探示意图

多道瞬态面波法是通过反演瑞雷波相速度来估算地表浅层中剪切波速的一种无损检测方法, 已被广泛应用于浅层工程地质探查等问题[14]-[16]。该方法具有分辨率高, 稳定性高, 检测速度快等优点。工程勘查中应用的面波技术为多道面波分析的方法(MASW), 该方法利用重锤敲击铁板激发产生震源, 沿地表

布设多道检波器排列对瑞雷波信号进行采集，将采集的数据转化为相速度-频率剖面，根据剖面极值点提取频散曲线，反演检波器排列下方地层的横波速度结构[17][18]，其原理和处理过程如图2所示。

在多道瞬态瑞雷面波探测中，频散效应即面波相速度随频率变化的物理现象，是瑞雷波与干涉波的核心特征。为有效提取频散信息，地球物理学者已发展出多类信号处理算法，如 $f-k$ 变换算法， $\tau-p$ 变换算法，相移法，高精度拉冬变换法等。根据求得面波的速度 v_R 和已知的频率 f 求出瑞雷面波的波长 λ_R 。由面波的传播理论可知，勘探深度与面波长 λ_R 成正比，即： $H = \beta\lambda_R$ ， β 为波长的探测深度转换系数。通常选取 $\beta = 0.5$ ，其勘探深度和速度之间的关系式可写成：

$$H = \beta\lambda_R = \frac{\lambda_R}{2} = \frac{v_R}{2f} \quad (2)$$

面波的频散特性与上下两层的纵横波速度，密度以及厚度有关，该物理特性为利用面波进行浅层地质勘探解释提供了可靠的理论依据。瞬态面波勘探每次激发产生的频率丰富，检波器接收的信号中包含各种频率成分，且大大提高了工作的效率，因此在近地表探测中得到了广泛的应用。同时，该方法的阵列长度对所获横向分辨率有着重要制约作用，缩短阵列长度有可能导致部分频散曲线测量精度的下降，但有利于提升横向分辨率。因此，本文采用小排列测线进行勘探。由小排列检波器接收瞬态面波的垂向分量，对共炮点面波数据进行频散谱分析，可求得实测信号的频散曲线，进而得到掘进前方地层的剪切波速度和勘探深度间的关系。

2.3. 煤巷反射波和面波综合超前地质勘探方法

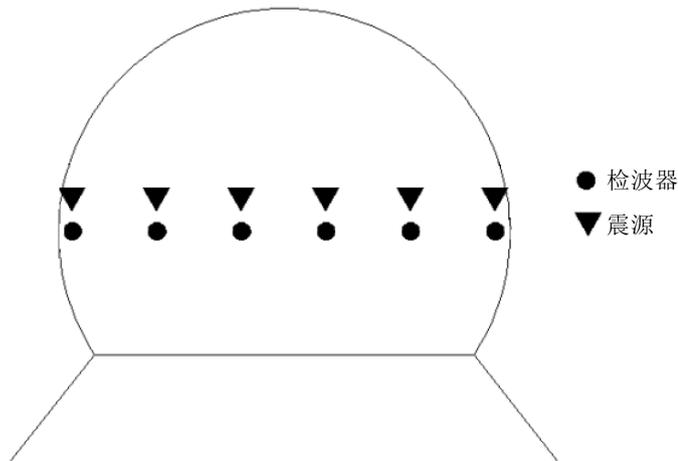


Figure 3. Principle of integrated exploration of coal roadway reflection waves and surface waves
图3. 煤巷反射波和面波综合勘探原理

为整合地震反射波法与瞬态面波法的优势，本研究提出一种基于反射波与面波勘探的综合煤巷超前地质预报方法。其原理如图3所示，为同时实现单点反射与面波勘探，在巷道迎头掌子面上等间距布置多个检波器，炮点设计与检波器呈水平平行状态。采用一发多收的观测系统，固定检波器位置，依次放炮，可获取多个共炮点道集。共炮点道集信号中同时涵盖反射波与瞬态面波，能够达成一次锤击多次利用的成效，提升了数据采集的效率与利用率。

瞬态面波法可以快速精准地得到超浅层(0~20米)的速度分布和地层变化，可以有效解决巷道掘进面的松动层影响，补充反射波地震勘探对于超浅层(0~20米)探测缺失以及反射波偏移速度的校正。同时，反射波地震勘探又弥补了面波勘探深度太浅的不足。两种方法相互补充，有效结合各自优点，显著提升

巷道地震超前探测的勘探精度和效率。

3. 实测实验

3.1. 勘探概况

实验场地选择安徽淮南矿区某底抽巷掘进巷道。该巷道的主要施工层位位于1煤底板 C_3^1 灰岩层内，部分斜巷穿3、1煤、 C_3^2 灰岩，巷道揭露的主要岩性为泥岩、细砂岩、3、1煤、 C_3^1 灰岩、 C_3^2 灰岩、煤线等。巷道跟 C_3^1 灰岩施工，采用井下定向顺层长钻孔与物探相结合的方法开展前探，查明 C_3^1 灰岩含水层水文地质特征，并对钻孔掩护区域内底板灰岩水进行疏水降压，掩护巷道掘进。根据矿井安全实验要求，应做到“认真负责，有疑必要提”，需在掘进时采用巷道超前探测，主要查明巷道前方是否存在陷落柱和断层等大的导水通道。根据实验要求，应采用物探与钻探相结合，来判断灰岩岩溶水突水威胁。

3.2. 实验观测系统设计及方案

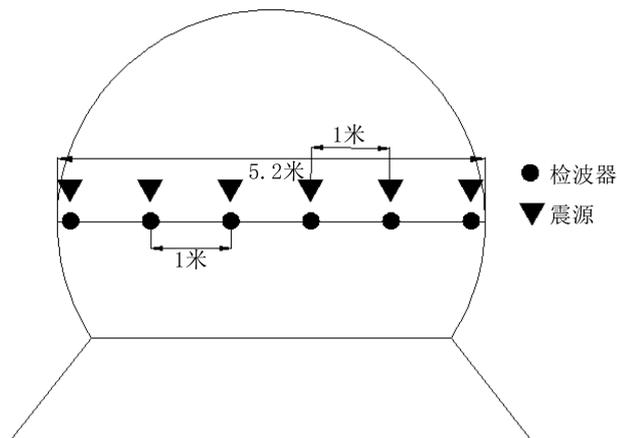


Figure 4. Tunnel seismic wave advance detection observation system
图4. 巷道地震波超前探测观测系统

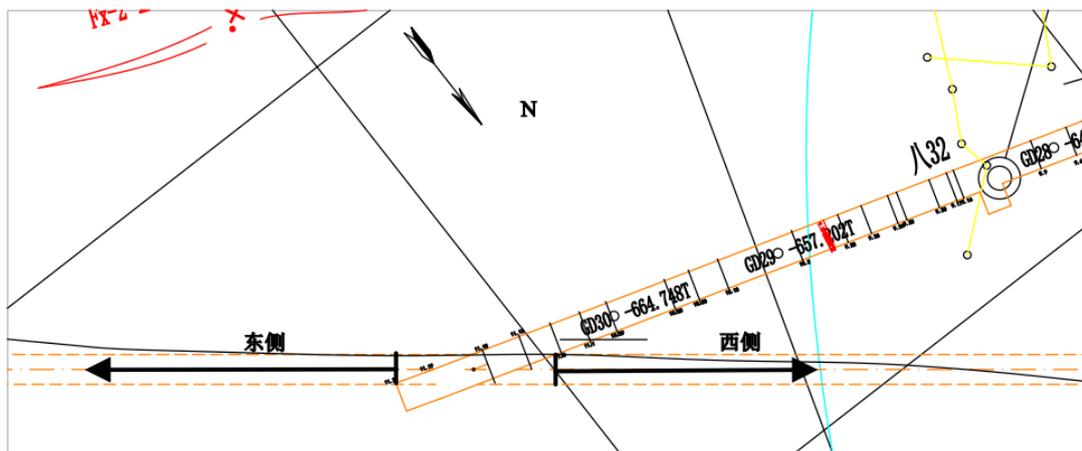


Figure 5. Construction location and detection direction of seismic wave advance detection
图5. 地震波超前探测施工地点与探测方向

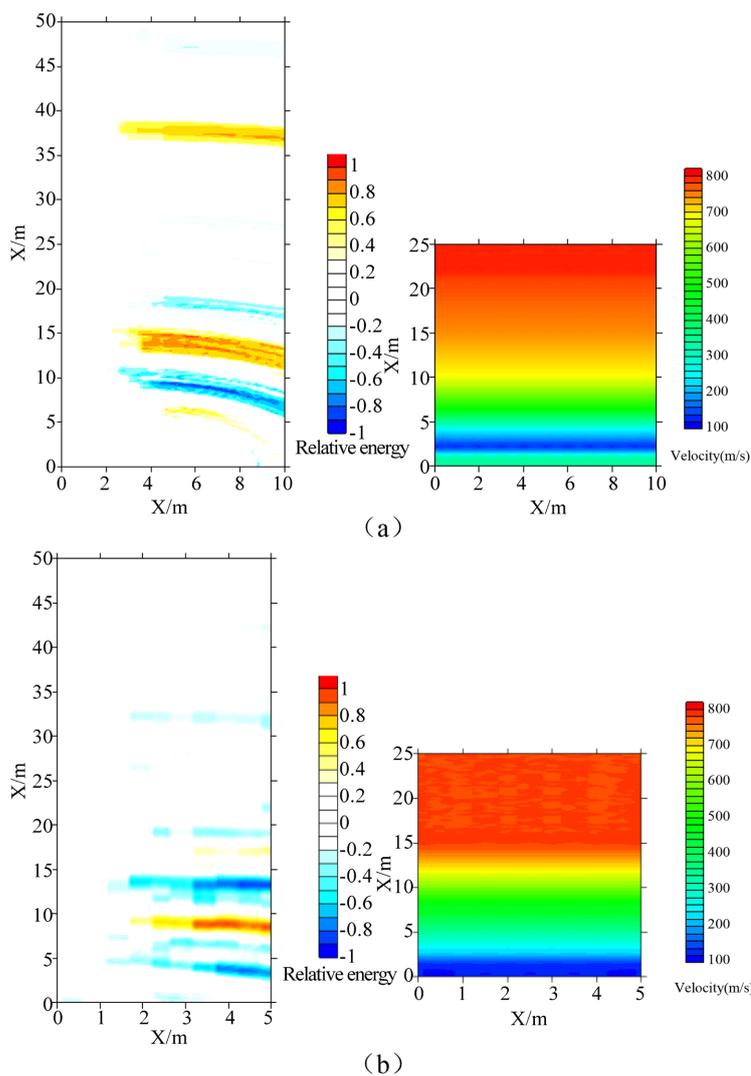
如图4，在宽为5米的巷道迎头掌子面上，布置间距为1米的4 Hz 主频动圈式检波器，共6个检波器。为兼顾单点反射和面波勘探，炮点设计在检波器排列平行位置，共6个锤击震源。采用一发多收的

观测系统, 检波器的位置不动, 逐一锤击激发。单次激发六道接收, 共得到 6 个共炮点道集。本次现场实测实验采用湖南奥成科技有限公司生产的 *PSW-I* 型智能面波仪, 该仪器灵敏度高、一致性好、抗干扰能力强, 可以用来较好地采集煤层地震波数据。

参照图 5, 本次实验沿着底抽巷布置水平面存在两个掘进面, 分别向左和向右掘进。我们把向左掘进的掌子面探测数据命名为东侧, 向右掘进的掌子面探测数据命名为西侧。实验共进行七次探测, 每次探测预报掘进前方 50 米范围内的地质异常。

3.3. 实验数据处理与分析

实测实验结果中东西两侧的结果呈现一致性, 本文以东侧实验结果为例进行说明。底抽巷东侧累计完成四次超前探测, 共解释 5 个地质异常点。地震波单点反射结果以叠前偏移成像图表示, 红色(暖色调)为正的振幅值, 蓝绿色(冷色调)为负的振幅值。面波勘探结果以速度分布图表示, 红色(暖色调)为高速度值, 蓝绿色(冷色调)为低速度值。其中, 绕射偏移的角度为前方 180 度, 偏移速度为 2.0 m/ms; 面波数据采用 F-K 法进行频散谱计算, 拾取 25 米深度范围内的速度信息。同一掌子面, 反射波和面波的处理结果具体如下:



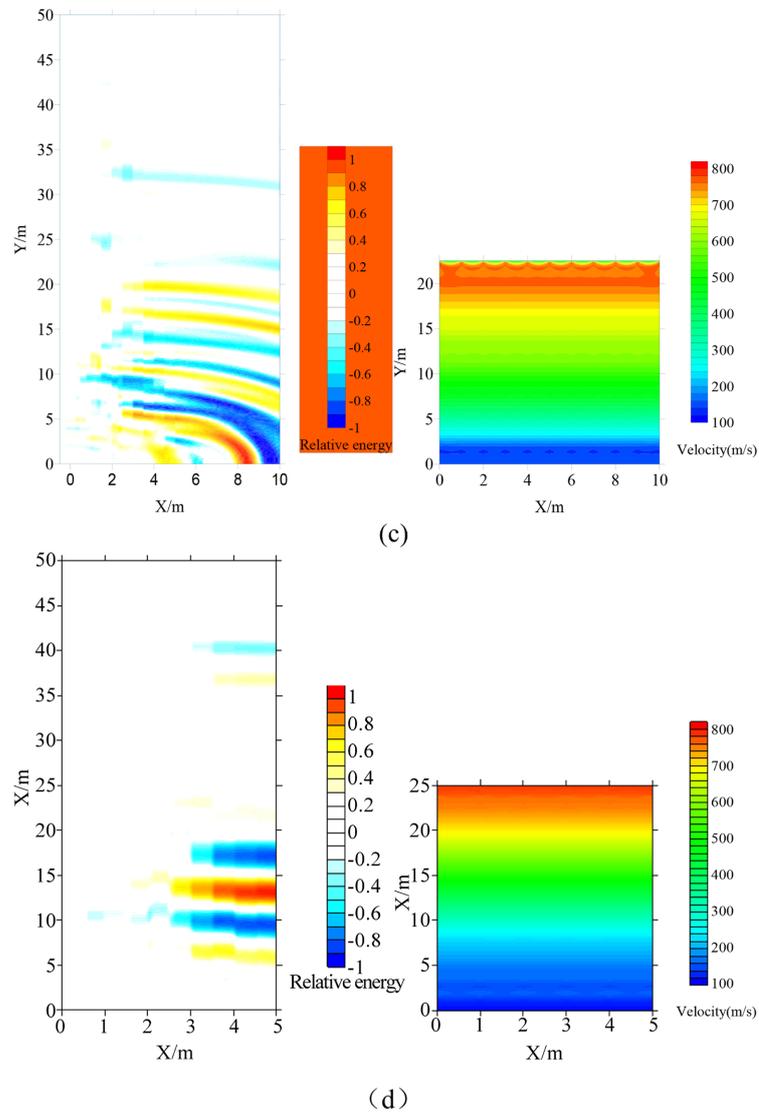


Figure 6. Results of comprehensive advance exploration test of coal roadway seismic data
图 6. 煤巷地震综合超前探实验结果

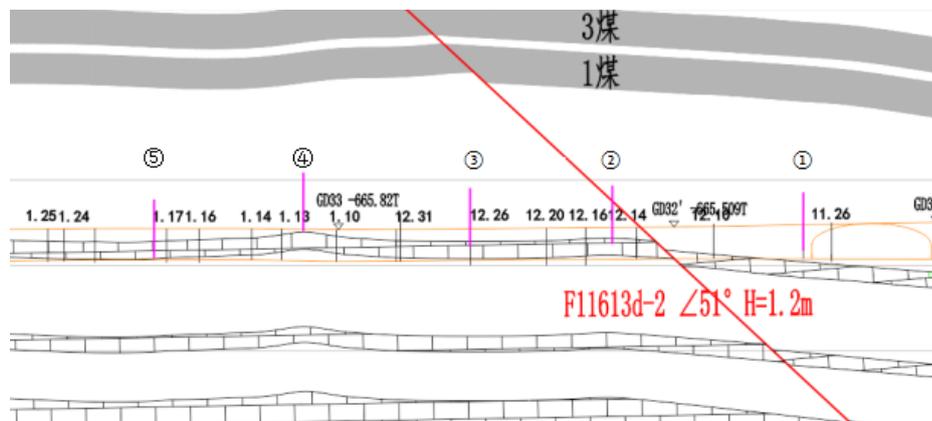


Figure 7. Seismic advance exploration results and excavation geological profile on the east side of the bottom extraction tunnel
图 7. 底抽巷东侧地震超前探结果及掘进地质剖面

结合对比两种地震勘探反演结果,面波相速度整体速度保持在 500 m/s 左右,反映巷道前方灰岩层位速度较慢。同时,在浅层 5 米以内,存在低速层,分析为巷道掘进过程中的松散层影响。图 6(a)中 38 米,图 6(b)中 20, 32 米处,图 6(c)中 31 米处,图 6(d)中 40 米处,存在地震反射界面,可能为地质异常边界面。

参照图 7,本次实验共进行 4 次探测,共揭示 5 个地质异常点。经巷道掘进实揭及钻探资料显示,2 号异常点为断层 F11613D-2 断层影响,断层影响范围为 10 米左右;4 号异常点为小型褶曲影响,影响范围为 12 米左右。根据实揭及钻探资料其中 4 处地质异常均在解释的范围内,取得较好的应用效果。基于巷道迎头的反射波及面波联合地震超前探测,可以有效地预报巷道掘进前方五十米范围内断层和褶曲等小型地质构造异常。

4. 结论

(1) 本文提出一种基于反射波和面波勘探的综合煤巷超前地质预报方法,即在巷道掘进面同时进行瞬态面波法和浅层地震反射波法。瞬态面波法可以快速精准地得到超浅层(0~20 米)的速度分布和地层变化,能够有效解决巷道掘进面的松动层影响,反射波地震勘探又弥补了面波勘探深度太浅的不足。两种方法相互补充,有效提升巷道地震超前探测的勘探精度和效率。

(2) 为验证该方法的有效性,在煤层巷道同时进行反射波和面波勘探的综合煤巷超前地质预报实验。实验共进行了 4 次探测,共揭示 5 个地质异常点。根据实揭及钻探资料其中 4 处地质异常均在解释的范围内,取得较好的应用效果。基于巷道迎头的反射波及面波联合地震超前探测,可以有效地预报巷道掘进前方五十米范围内断层和褶曲等小型地质构造异常。

参考文献

- [1] 刘盛东,余森林,王勃. 矿井巷道地震反射波超前探测波场处理方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 100-103.
- [2] 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.
- [3] 李术才,聂利超,刘斌,等. 多国性源阵列电阻率法隧道超前探测方法与物理模拟试验研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(4): 1434-1446.
- [4] 李术才,刘斌,孙怀风,等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090-1113.
- [5] 刘盛东,等. MSP 矿井地震波超前探测方法[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 345-350.
- [6] 王勃. 极化偏移成像方法在矿井掘进工作面超前探测中的应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 890-896.
- [7] 吕兆海,朱兴平. 破碎围岩条件下井巷工程综合超前地质预报实践[J]. 物探与化探, 2009, 33(2): 234-240.
- [8] 张平松,李圣林,邱实,等. 巷道快速智能掘进超前探测技术与发展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2158-2173.
- [9] 王梦倩,岳建华,刘斌,等. 反射波超前成像预报系统及其应用[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(3): 361-368.
- [10] 陆斌,程建远,胡继武,等. 采煤机震源有效信号提取及初步应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2202-2207.
- [11] 王保利,程建远,金丹,等. 煤矿井下随掘地震震源特征及探测性能研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(1): 10-19.
- [12] 仇恒永. 浅层 SH 反射波法和多道瞬态面波法进行联合工程勘察的讨论[J]. 物探与化探, 2008, 32(4): 451-454.
- [13] 刘国峰,刘语,孟小红,等. 被动源面波和体波成像在内蒙古浅覆盖区勘探应用[J]. 地球物理学报, 2021, 64(3): 937-948.
- [14] 孙渊,丘斌煌,王赞文. 瞬态面波法在公路软基勘查中的应用研究[J]. 西北地震学报, 2006, 28(1): 15-19.
- [15] 尹玉茹,黄光南,汤洪志,等. F-K 变换与主动源面波法在南昌市昌东地质调查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2023, 20(1): 1-7.
- [16] 周荣亮,刘彦华,徐睿知. 多道瞬态面波在 LNG 罐区地基勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(2): 162-

167.

- [17] 李巧灵, 张辉, 雷晓东, 等. 综合利用多道瞬态面波和微动探测分析斜坡内部结构[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 258-267.
- [18] Xia, J., Chen, C., Tian, G., Miller, R.D. and Ivanov, J. (2005) Resolution of High-Frequency Rayleigh-Wave Data. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **10**, 99-110. <https://doi.org/10.2113/jeege10.2.99>