doi: 10.11720/wtyht.2026.1364
白志军, 屈少波, 梁红波, 等. 煤矿巷道迎头地质构造槽波超前探测技术研究及应用[J]. 物探与化探, 2026, 50(3): 598-606. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1364
Bai Z J, Qu S B, Liang H B, et al. Research and application of seam wave-based advanced detection technology for geological structures right ahead of mining face during roadway tunneling in coal mines[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(3): 598-606. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1364

煤矿巷道迎头地质构造槽波超前探测技术研究及应用

白志军[1], 屈少波[2,3], 梁红波[4], 李德春[4]
(1. 华阳新材料科技集团有限公司, 山西 阳泉 045000; 2. 山西宁武榆树坡煤业有限公司, 山西 忻州 034000; 3. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221000; 4. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221000)

摘 要: 针对巷道掘进过程中工作面迎头地质构造的超前探测难题, 探讨了槽波地震勘探技术在巷道超前探测中的可行性。从槽波超前探测理论基础及数据处理方法出发, 以高阶交错网格有限差分算法模拟为基础, 通过包络叠加法、绕射偏移法、椭圆画弧偏移法 3 种成像方法对比了断层探测精度。研究表明: 当断层倾角较大时, 包络叠加结果不能代表真实断层位置, 必须通过偏移校正实现断层空间位置归位; 此外, 成像速度的准确性对成像结果影响大, 在同一速度误差的情况下, 绕射偏移法在确定断层巷道揭露位置方面表现更优, 而椭圆画弧法在确定断层走向方面效果更佳。实际应用表明: 在槽波资料品质较好的地区, 3 种成像方法均可实现断层超前探测; 在资料品质较差地区, 建议采用包络叠加配合偏移校正方法进行断层成像。本研究为槽波超前探测提供了重要的技术参考和方法指导, 表明槽波超前探测技术可以为巷道掘进方案调整以及地质灾害预防提供可靠依据。

关键词: 超前探测; 槽波地震勘探; 包络叠加; 绕射偏移成像; 椭圆画弧偏移成像
中图分类号: P631; TD163 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)03-0598-09

0 引言

据统计, 我国 80% 以上的煤与瓦斯突出事故和 60% 以上的突水事故均与掘进前方未查明的隐蔽构造直接相关。因此, 在煤矿巷道掘进过程中, 迫切需要开展超前探测工作, 以探明工作面前方隐伏的小断层、陷落柱、富水区、采空区等地质异常体, 为“探—掘—护—锚”工序提供近实时的地质信息, 降低设备损毁、巷道报废的风险, 避免突水、瓦斯突出和冒顶等重大灾害, 保障矿井安全高效开采。巷道超前探测技术可以分为钻探和地球物理两大类。钻探方法能够直接获取岩心, 对巷道前方灾害能够准确定位, 并对其含水性进行评价, 但是该方法施工费用高、且仅基于“一孔之见”进行整个空间地质情况推测, 存在不确定性风险。国内外学者围绕巷道超前探测地球物理技术开展了大量的研究工作, 形成了地震、电磁、探地雷达等多种超前探测技术。电法类超前探测技术主要包括矿井瞬变电磁、直流电阻率法, 该类方法适合富水区探测, 且受金属设备干扰大[1-3]。探地雷达分辨率高, 但是探测深度浅, 易受金属和潮湿环境的干扰[4]。地震超前探测技术主要是隧道、井巷反射地震超前探测(tunnel and well-lane reflected-wave seismic prediction ahead, TRSP), 利用掌子面后方的检波器阵列记录巷道前方断层、岩性界面的纵波(P 波)、横波(S 波)反射信号进行构造成像, 具有探测距离远(100~200 m)的优点。除此之外, 近年来发展的随钻探测技术是一种广义的地震超前探测技术, 其不需要激发震源信号, 而是将掘进设备破岩过程的振动信号作为震源, 通过互相关干涉成像实现构造探测。在地震超前探测中, 煤层中体波能量衰减快, 反射资料往往信噪比低、对小尺度异常识别困难[5]。如果利用煤层中能量强、传播距离远的槽波进行巷道超前探测, 可能比体波更有效。

收稿日期: 2025-09-30; **修回日期:** 2026-04-16
基金项目: 国家自然科学基金项目(41604082, 42174165)
第一作者: 白志军(1974-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事煤矿采掘技术及安全方面的研究工作。Email: 289339982@qq.com

近年来, 国内外学者在槽波的传播机理、资料处理及推广应用方面开展了大量研究。在传播机理方面, 推导建立了典型地层的槽波频散方程, 通过理论计算开展围岩横波速度、密度、煤层厚度对槽波频散特征影响分析[6-14]; 基于三维地质模型, 通过波场模拟开展断层断距、倾角、陷落柱以及各向异性、粘弹性对槽波传播特性的研究[15-20]; 在实际资料处理方面, 主要开展了广义 S 变换、极化滤波等槽波资料处理方法的研究[21-27], 提高实际资料槽波品质; 在层析成像方法方面, 主要涌现了速度、能量衰减、质心频率等层析成像技术[28-33], 并在反射槽波勘探中研究了克希霍夫偏移、动校叠加成像技术, 实现工作内断层构造成像[34-39]。

本文基于反射槽波理论, 开展了槽波去噪、速度分析、叠加及成像等处理方法研究, 建立了槽波超前探测处理技术方案, 分析了技术方案的可行性及影响因素, 并进行了方法测试和工程应用, 表明槽波超前探测切实可行, 具有推广应用前景。

1　槽波超前探测的基本原理

煤层与地质异常体的密度以及地震波传播速度存在明显差异, 两者界面是一个良好的反射界面。与地震波类似, 槽波沿煤层传播的过程中, 遇到地质异常体也会产生反射槽波。槽波超前探测与反射槽波勘探类似, 区别在于探测目标体位于巷道掘进前方, 而非位于工作面内部。

槽波超前探测原理如图 1 所示。巷道两侧或工作面前方存在 3 个不同方位的断层 F_1、F_2、F_3, 其中 F_1、F_3 与巷道斜交, F_2 与巷道垂直; 炮点与检波点布置在同一个巷道内; 为了探明巷道两侧及前方不同方位的地质异常体, 在巷道两侧分别布置 1 条平行测线进行探测成像。图 1 还给出了根据观测系统及运动学特征得到的 2 条测线、3 种断层的槽波反射波射线路径。从射线路径上看, 有效反射段(图中红色填充部分)因断层走向与巷道夹角的不同而变化, 夹角越大有效反射段越小。据此推断, 槽波超前勘探与常规槽波反射勘探相比, 难度更大。

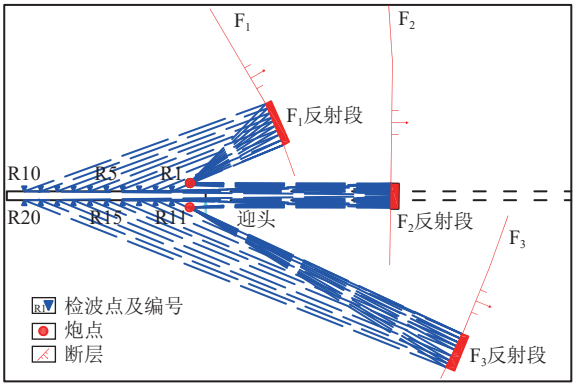


图 1　槽波超前断层探测示意

Fig. 1　Trough wave advanced fault detection schematic

2　槽波超前探测数据处理方法

2.1　数据处理方法概述

图 2 为槽波超前探测处理技术的常规流程, 主要包括预处理、频散分析、速度分析及叠加偏移等步骤。首先, 全局浏览原始资料, 对废道进行剔除, 保障参与成像记录的可靠性; 再进行频谱分析, 并基于分析结果设置带通滤波器进行随机噪声压制, 提高资料的信噪比; 采用 FK 变换、阵列信号处理、多道滤波或时频分析等算法, 对去噪后的单炮记录进行频散分析, 提取槽波的埃里相频率信息以及速度初值。然后, 利用频率信息设置带通滤波器, 实现槽波埃里相响应提取; 借鉴 2D 地震勘探 CMP 道集速度分析方法, 对槽波记录进行速度扫描, 基于速度谱能量极大值确定速度信息。最后, 通过叠加与偏移算法实现地质异常体空间成像。

上述处理环节中, 槽波信号增强与叠加偏移成

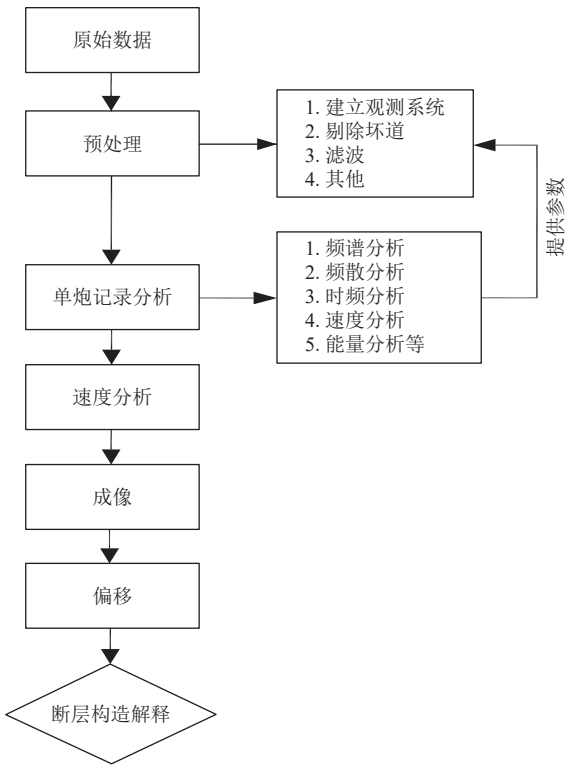


图 2　槽波巷道超前探测数据处理流程

Fig. 2　Data processing workflow for trough wave advanced tunnel detection

像是较为关键的两个环节。

2.2　成像方法

巷道的槽波超前探测是槽波反射勘探方法的一种拓展，当断层走向与巷道斜交的夹角很小时，类似于槽波反射法探测；当断层走向与巷道斜交，夹角很大时则为超前探测。由于超前探测通常应用在巷道掘进过程中，巷道内空间狭小，测线布设长度受限，使得槽波超前探测有效数据采集的难度增加，同时大角度的断层反射波数据处理难度也很大，因此对构造异常体的准确成像尤为关键。

2.2.1　包络叠加法

与体波相比，经过频散分析及带通滤波后的槽波记录，其频散特征仍然存在，导致直接对槽波记录进行同相叠加的效果不佳。为了提高槽波记录的叠加效果，提出了利用包络叠加方法对槽波记录进行叠加成像。首先通过希尔伯特变换构建解析信号：

$$c(t) = x(t) + \mathrm{i}\hat{x}(t),$$

式中：$x(t)$为原始信号；$\hat{x}(t)$为其复数道。$x(t)$的包络信号为：$E(t) = \sqrt{x(t)^2 + \hat{x}(t)^2}$，对地震记录进行包络计算，然后动校正叠加，即可获得叠加剖面。

根据射线理论，偏移前后同相轴空间位置如图 3 所示。其中，线段 AB 代表叠加同相轴，其与观测界面夹角为 β，线段 CD 代表偏移后的同相轴，其与观测界面夹角为 α；偏移前后同相轴夹角满足 $\sin\alpha = \tan\beta$。由此可以看出，在反射同相轴与巷道的夹角较小时可以不进行偏移处理；当角度比较大时（超过 30°时），需要利用该公式进行偏移校正。

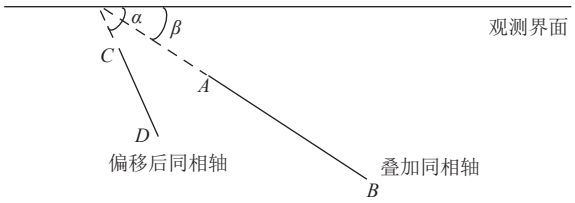


图 3　偏移前后同相轴空间位置关系示意

Fig. 3　Spatial position relationship of seismic events before and after migration

2.2.2　绕射偏移法

与地面地震勘探类似，当断层等地质异常体与测线存在夹角时，通过叠加处理并不能实现异常体的真实归位，这时需要通过偏移算法对地质异常体进行成像。绕射偏移处理是使反射波产生自动偏移且准确归位到其在空间中真实位置上的一种方法。

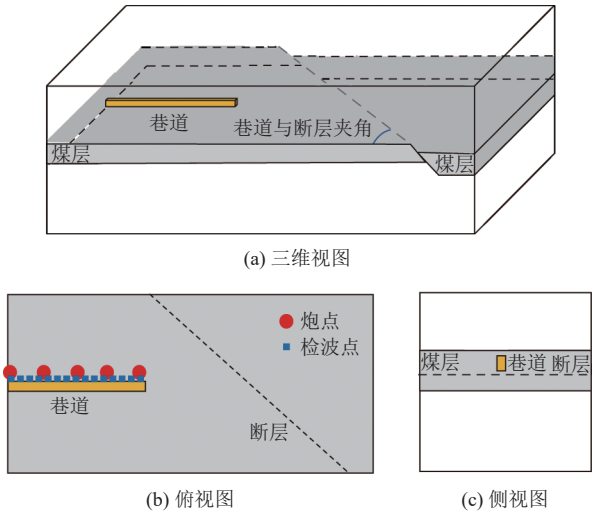
2.2.3　椭圆画弧法

椭圆画弧方法偏移是先在单炮记录上拾取出反射波同相轴，通过时深转换后再建立椭圆方程画出椭圆，绘制多个椭圆相交位置或者相切处即为断层。

3　模型测试

3.1　数值模拟方法

建立如图 4 所示的煤巷三维地层模型，模型的长、宽、高分别为 300 m、150 m、150 m。槽波探测的炮点和检波点布设在工作面同一侧的巷道侧帮，共设计 5 个炮点（红色圆点）和 26 个检波点（蓝色方点），炮点间距为 25 m，检波点间距为 4 m。设巷道与断层夹角分别为 0°、30°、90°，断层落差均为 1/2 倍煤层厚，模型参数如表 1 所示。基于弹性波方程，采用有限差分算法进行槽波超前探测数值模拟，横向网格剖分大小为 0.3 m，纵向网格剖分大小为 0.4 m，震源为 200 Hz 的雷克子波。



(a) 三维视图

(b) 俯视图　　(c) 侧视图

图 4　地层模型示意

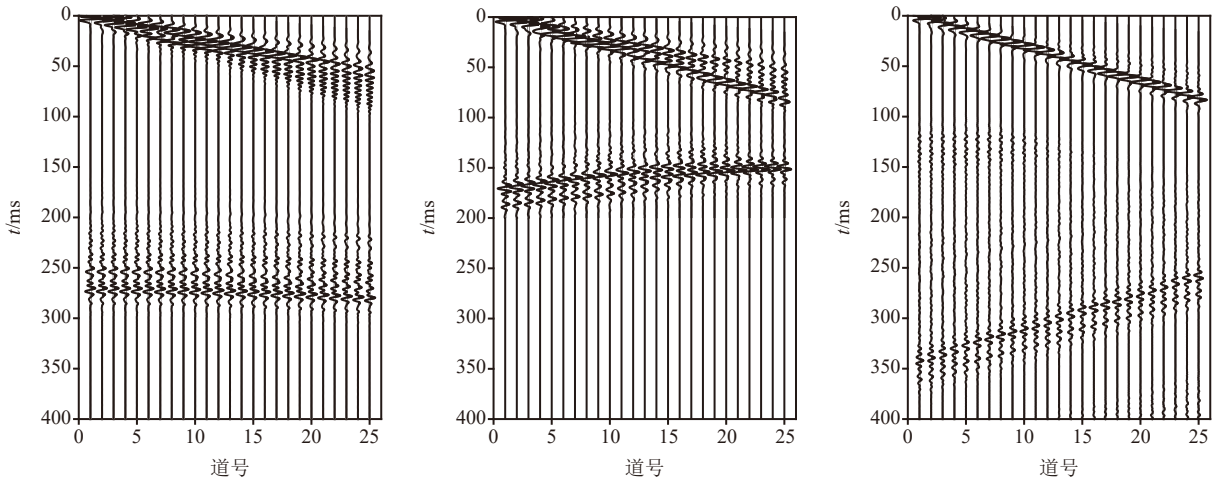
Fig. 4　Schematic of formation model

表 1　三维模型介质参数

Table 1　3D model medium parameter table

介质	v_P/(m·s^{-1})	v_S/(m·s^{-1})	密度/(kg·m^{-3})	厚度/m
围岩	3 600	2 078	2 290	70
煤层	2 200	1 270	1 300	10
巷道	340	0.01	1.3	70

图 5 展示了模拟记录的直达波和断层反射波。从模拟资料可以看出：槽波超前探测中的断层反射波波形清晰，随着断层与巷道夹角逐渐增加，地震记录表现为反射波同相轴倾角逐渐增加。分析其主要原因，应为断层与巷道夹角的增加使得反射波到达接收测线各检波器之间的时差增加，从而导致了同相轴倾斜角度增加。该模拟结果为槽波超前探测有效记录识别及处理提供了理论依据。



(a) 断层与巷道夹角0°　(b) 断层与巷道夹角30°　(c) 断层与巷道夹角90°

图 5　不同夹角断层的 *Y* 分量地震记录

Fig. 5　*Y*-component seismic records of faults with different angles

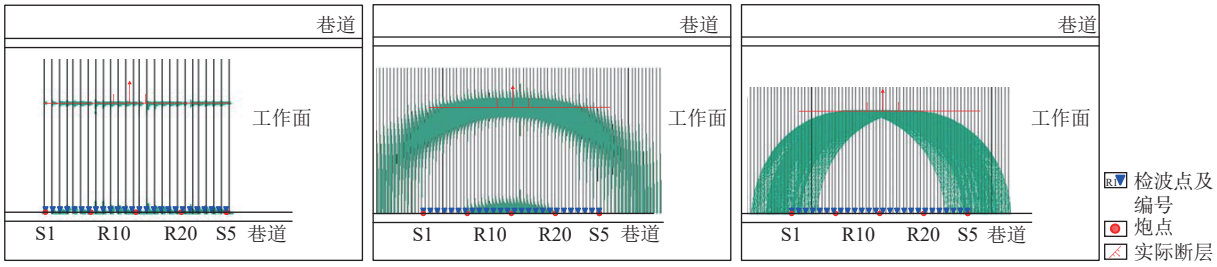
3.2　不同夹角的断层模型成像测试

基于图 5 的模拟资料, 分别采用包络叠加、绕射偏移以及椭圆叠加 3 种方法进行成像测试, 分析成像方法的适应性。

1)当断层与巷道夹角为 0°时, 3 种方法对断层均能实现真实成像(图 6)。包络叠加法对正演数据经过时深转换, 断层反射波成像结果呈水平状, 与真实断层位置吻合度高, 后期不需要开展偏移处理。绕射偏移法成像结果, 其同相轴能量最强的位置与断层位置一致, 但是该方法存在明显的画弧现象, 降低了断层成像的解释精度。椭圆画弧法的成像结果基于所有椭圆的切线位置可以解释断层位置, 但该方法与绕射偏移法结果相似, 存在严重的画弧现象。

2)当断层和巷道夹角为 30°时, 包络叠加法成像结果的同相轴位置与断层位置存在微小偏差, 充分表明倾斜断层必须经过偏移才能实现断层位置的空间归位(图 7a)。绕射偏移法基于成像结果圈定的断层位置与真实位置一致(图 7b), 同时成像剖面的画弧现象较图 6b 明显减弱。椭圆画弧法基于椭圆共切线确定的断层位置也与真实位置一致(图 7c)。图 7 表明, 当断层与巷道斜交时, 需要经过偏移才能实现断层位置真实成像。

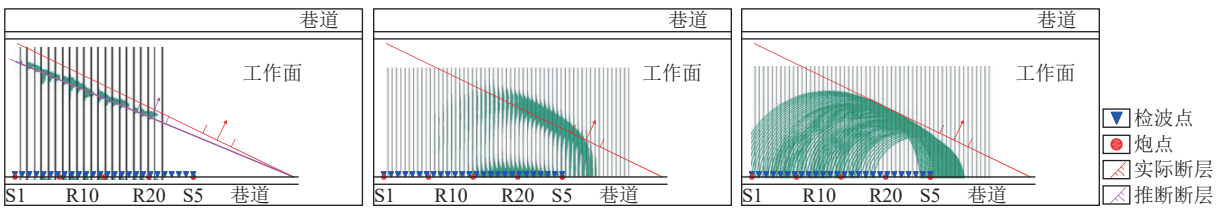
3)当断层走向与巷道垂直(夹角为 90°)时, 3 种方向成像结果如图 8 所示。包络成像叠加结果与巷



(a) 包络叠加成像结果　(b) 绕射偏移成像结果　(c) 椭圆画弧成像结果

图 6　断层与巷道平行时的 3 种成像方法处理效果对比

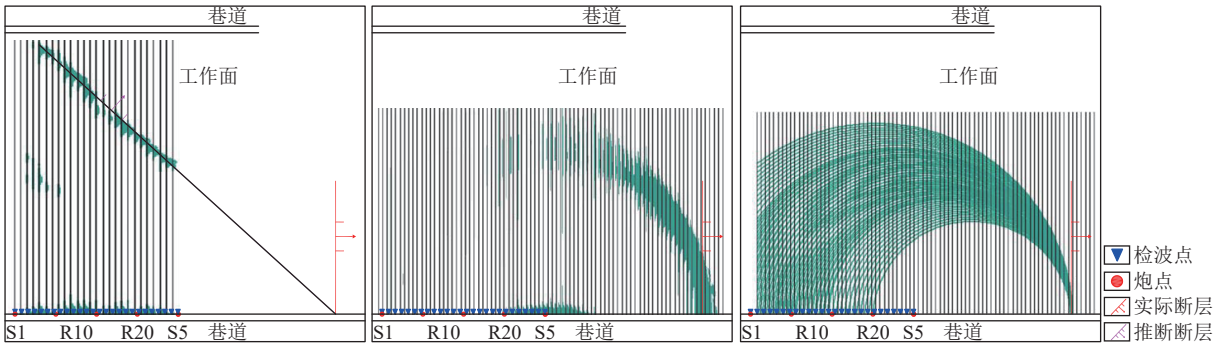
Fig. 6　Comparison of processing effects of three imaging directions when the fault is parallel to the roadway



(a) 包络叠加成像结果　(b) 绕射偏移成像结果　(c) 椭圆画弧成像结果

图 7　断层与巷道夹角 30°时的 3 种成像方法处理效果对比

Fig. 7　Comparison of processing effects of three imaging directions at the angle of fault and roadway 30°



(a) 包络叠加成像结果　(b) 绕射偏移成像结果　(c) 椭圆画弧成像结果

图 8　断层与巷道垂直时的 3 种成像方法处理效果对比

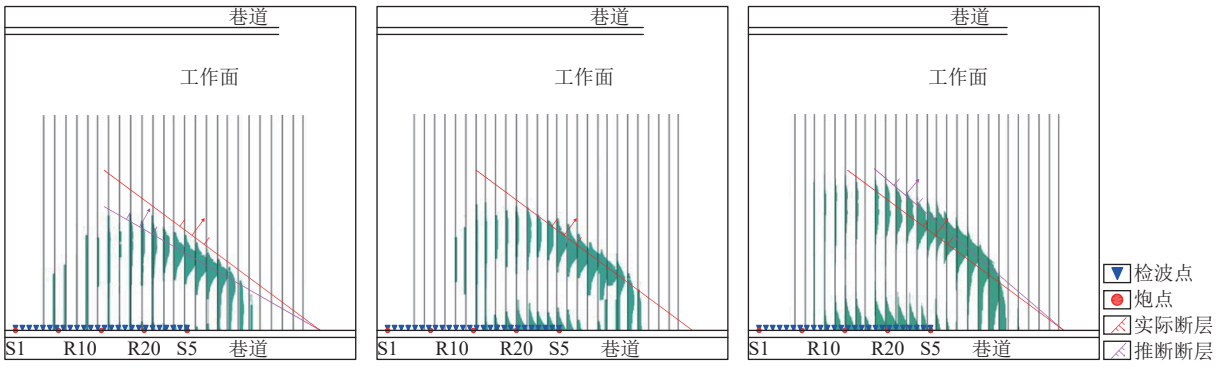
Fig. 8　Comparison of processing effects of three imaging directions when fault is perpendicular to roadway

道呈 45°夹角，与断层真实位置存在较大偏差。而根据绕射偏移法与椭圆画弧法的偏移结果，确定的断层位置均垂直于巷道，与真实位置一致；但是这两种方法对断层的延伸范围成像能力有限。该模型分析表明，当断层与巷道夹角较大时，包络叠加成像结果不能实现断层位置的准确探测，开展偏移算法是必不可少的。

3.3　速度模型对成像效果影响分析

槽波速度是包络叠加、绕射偏移和椭圆画弧以及时深转换等处理中的关键参数。为了研究速度对成像结果的影响，选取断层与巷道夹角为 30°的模型进行分析，该模型中，断层与巷道的交叉位置在迎头前方 100 m 处。取 250~300 Hz 频段的槽波，经过速度分析，该频段槽波的准确速度为 1 150 m/s，分别选取 950、1 150 和 1 350 m/s 三种速度，利用绕射叠加算法对槽波超前探测记录进行成像，结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出，若槽波速度存在误差，会导致成像结果与断层真实位置不吻合。当速度存在误差时，成像结果的断层走向与真实值差异较大，无法忽略；而基于该成像结果所揭露的断层位置是不准确的。因此，准确的槽波速度是实现槽波超前探测精确成像的关键。



(a) v=950 m/s　(b) v=1 150 m/s　(c) v=1 350 m/s

图 9　基于不同速度的绕射偏移成像结果对比

Fig. 9　Comparison of diffraction shift imaging results at different speeds

表 2 给出了速度误差影响成像结果的量化分析。结果表明，绕射偏移法在确定巷道揭露位置方面表现更优，椭圆画弧法在确定断层走向方面更优。

表 2　不同速度成像误差

Table 2　Image error at different speeds

误差分类	成像方法	v/(m·s^{-1})		
		950	1 150	1 350
断层走向误差/(°)	包络叠加	−12.4	−1.6	20
	绕射偏移	−6.9	2	5.2
	椭圆画弧	−8.4	0	1.3
断层揭露位置误差/m	包络叠加	19.4	0.2	27.9
	绕射偏移	20	0.2	14
	椭圆画弧	21.3	6.1	28.8

4　应用实例

4.1　工区概况

某煤矿工作面北侧巷道已掘进，穿越巷道的断层情况已基本查明，工作面内有一条断距为 9 m 的

大断层 (图 10)。为了保障巷道掘进安全, 在工作面顺运巷内开展槽波超前探测。本次探测共设计 8 炮, 炮点间距 12 m。在距离巷道掘进迎头约 10 m 处开始布置检波点, 共有 14 个接收点, 道间距也为 12 m。

4.2　数据成像

首先, 基于地层模型参数开展槽波频散曲线理论计算, 获得槽波埃利相频率为 150 Hz。通过参数测试, 选择频带范围 120~350 Hz 进行带通滤波。经过处理后的部分槽波地震记录如图 11 所示, 从单炮记录中可以看到清晰的直达波和反射槽波, 且随着炮点与巷道迎头距离越大, 反射波到达时间越长。根据反射槽波同相轴倾角, 结合图 4 理论模拟记录, 可以推测断层与巷道并不平行, 而是与巷道斜交。此外, 反射槽波同相轴倾角较大, 推测断层夹角介于 30°~90°之间。

对槽波记录进行速度分析, 提取其速度约为 980 m/s。利用 3 种处理方法对其进行成像, 结果如图 12 所示。处理结果表明绕射偏移和椭圆画弧偏移成像与实际断层揭露位置一致, 然而包络叠加的成像结果与真实断层位置存在偏差。该结果充分表明, 对大倾角断层不进行偏移归位, 就无法实现断层真实位置成像, 而偏移后的断层位置与真实揭露断层位置一致; 同时也表明, 槽波超前探测能够获得清晰的反射槽波, 巷道掘进前方断层成像准确可靠。

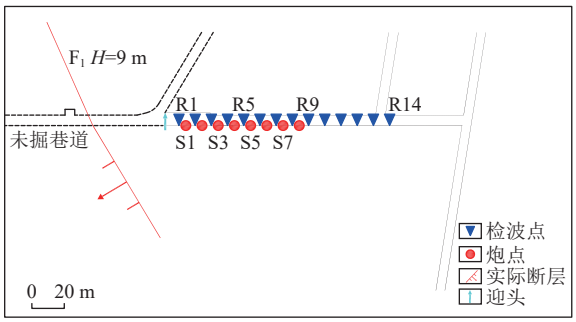
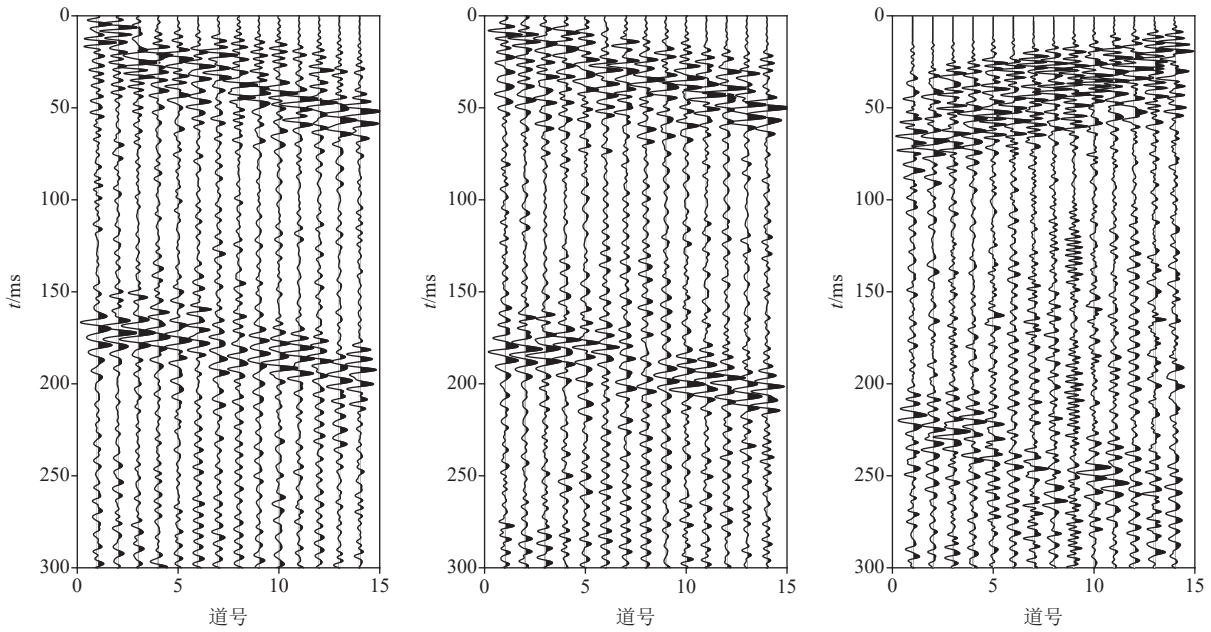


图 10　槽波超前探测观测系统示意

Fig. 10　Schematic diagram of trough wave advanced exploration and observation system in a working face



(a) 第1炮单炮记录　(b) 第3炮单炮记录　(c) 第8炮单炮记录

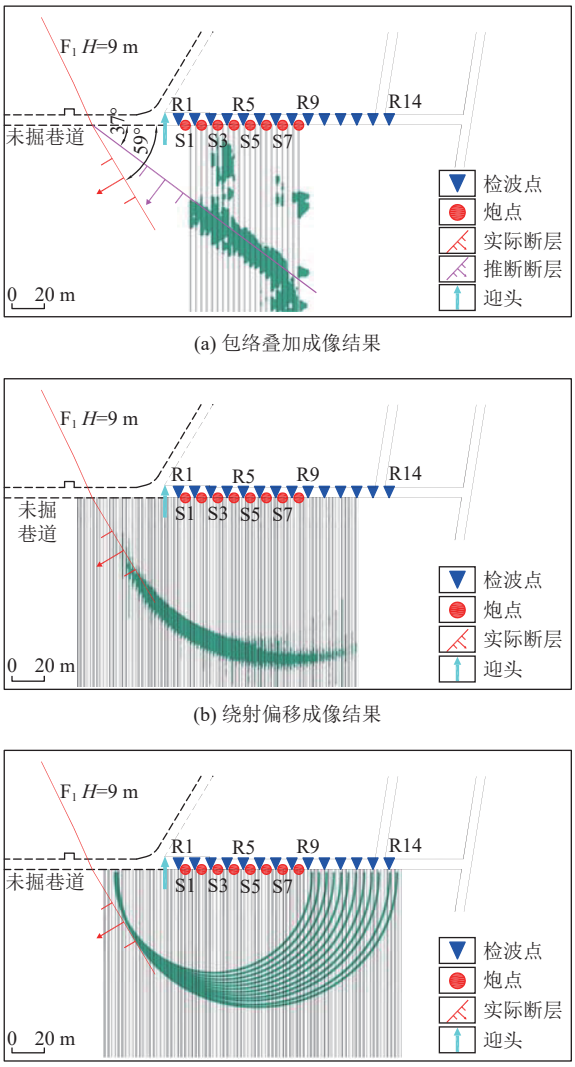
图 11　槽波超前探测典型单炮记录

Fig. 11　Typical single shot record of slot wave advance probe

5　结论

1)包络叠加法对资料品质要求低且成像稳定性高, 但在大角度断层成像时, 需结合校正公式对成像结果进行校正。绕射偏移法和椭圆画弧法成像精度高, 对资料品质要求高, 但在断层两端顶点存在画弧现象; 绕射偏移法在确定断层揭露位置方面更优, 而椭圆画弧法对断层走向的刻画更准确。建议在资料品质较好区域优先采用绕射偏移或椭圆画弧法进行断层成像, 当数据质量较差时, 推荐采用包络叠加结合偏移校正公式进行断层解释。

2)槽波速度是影响槽波成像精度的关键参数, 速度误差会导致断层走向和揭露位置的误差, 需通过频散分析及速度分析精确提取槽波速度, 从而提高成像精度。



(a) 包络叠加成像结果

(b) 绕射偏移成像结果

(c) 椭圆叠加成像结果

图 12　三种偏移成像方法结果对比

Fig. 12　Comparison results of three different imaging methods

3)槽波超前探测是一类特殊的槽波反射勘探，数值模拟表明，在巷道一侧布设测线，可以实现巷道掘进前方断层反射波的有效采集，反射槽波能量强、波形清晰。模拟资料和实际资料应用表明，3 种成像方法均能可靠探测巷道前方断层，偏移后的成像结果与揭露位置一致，因此，超前探测成像是一种切实可行的超前探测技术。

参考文献(References)：

[1] 程久龙，陈丁，薛国强，等. 矿井瞬变电磁法超前探测合成孔径成像研究 [J]. 地球物理学报，2016，59(2)：731−738.
Cheng J L, Chen D, Xue G Q, et al. Synthetic aperture imaging in advanced detection of roadway using the mine transient electromagnetic method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(2): 731−738.

[2] 李术才，聂利超，刘斌，等. 多同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.
Li S C, Nie L C, Liu B, et al. Advanced detection and physical model test based on multi-electrode sources array resistivity method in tunnel[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(4): 1434−1446.

[3] Deng X K, Liu J X, Liu H F, et al. 3D finite element numerical simulation of advanced detection in roadway for DC focus method[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(7): 2187−2193.

[4] 崔凡，王然，陈存强，等. 滇东复杂地质条件探地雷达与井下地震综合超前预测小构造 [J]. 煤炭科学技术，2023，51(S1)：222−230.
Cui F, Wang R, Chen C Q, et al. Integrated advanced prediction of small structures by ground penetrating radar and downhole seismic with complex geological conditions in East Yunnan[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 222−230.

[5] 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 S T, Cheng J L. The method of small structure prediction ahead with Rayleigh channel wave in coal roadway and seismic wave field numerical simulation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2): 655−662.

[6] 姬广忠，魏久传，杨思通，等. HTI 煤层介质槽波波场与频散特征初步研究 [J]. 地球物理学报，2019，62(2)：789−801.
Ji G Z, Wei J C, Yang S T, et al. Preliminary study on wave field and dispersion characteristics of channel waves in HTI coal seam medium[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(2): 789−801.

[7] Ji G Z, Zhang P S, Guo L Q, et al. Characteristics of dispersion curves for Love channel waves in transversely isotropic media[J]. Applied Geophysics, 2020, 17(2): 243−252, 315-316.

[8] 乔勇虎，滕吉文，皮娇龙. 含小断层煤层 Rayleigh 型槽波波场和频散分析 [J]. 地球物理学报，2018，61(12)：4976−4987.
Qiao Y H, Teng J W, Pi J L. Rayleigh channel wave field and dispersion of coal seams with small faults[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(12): 4976−4987.

[9] 乔勇虎，滕吉文. 煤层厚度变化时地震槽波理论频散曲线计算方法及频散特征分析 [J]. 地球物理学报，2018，61(8)：3374−3384.
Qiao Y H, Teng J W. Calculation method for theoretical dispersion curves of seismic channel waves considering variation of coal-seam thickness and analysis of dispersion characteristics[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(8): 3374−3384.

[10] 姬广忠，吴荣新，张平松，等. 黏弹 TI 煤层介质 3 层模型 Love 槽波频散与衰减特征 [J]. 煤炭学报，2021，46(2)：566−577.
Ji G Z, Wu R X, Zhang P S, et al. Dispersion and attenuation characteristics of Love channel waves in the three-layer model of viscoelastic TI coal seam media[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 566−577.

[11] 杨小慧，李德春，于鹏飞. 煤层中瑞利型槽波的频散特性 [J]. 物探与化探，2010，34(6)：750−752.
Yang X H, Li D C, Yu P F. Analysis of Rayleigh channel wave dispersion in coal seam[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(6): 750−752.

[12] 杨小慧，李德春，于鹏飞. 煤层中瑞利型导波的能量分布 [J]. 煤田地质与勘探，2011，39(4)：64−66.

Yang X H, Li D C, Yu P F. Amplitude-depth distribution of Rayleigh channel wave[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(4): 64−66.

[13] Yang X H, Cao S Y, Li D C, et al. Analysis of quality factors for Rayleigh channel waves[J]. Applied Geophysics, 2014, 11(1): 107−114, 118.

[14] 何达喜, 朱培民, 申随水, 等. 煤层物性参数对瑞雷型槽波频散曲线“交叉”现象的影响 [J]. 煤矿安全, 2020, 51(12): 69−74.
He D X, Zhu P M, Shen S S, et al. Influence of physical parameters of coal seam on “cross” phenomenon of Rayleigh in-seam wave dispersion curve[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(12): 69−74.

[15] 田瀚. HTI 煤岩介质的槽波属性响应特征研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.
Tian H. Study on trough wave property response characteristics of HTI coal rock medium[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2023.

[16] 韩建光, 谷丙洛, 王硕, 等. 煤层反射槽波三维正演模拟 [J]. 地质学报, 2024, 98(7): 2258−2268.
Han J G, Gu B L, Wang S, et al. Study on 3D forward modeling of reflected in-seam wave in coal seam[J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(7): 2258−2268.

[17] Yang S T, Wei J C, Cheng J L, et al. Numerical simulations of full-wave fi elds and analysis of channel wave characteristics in 3-D coal mine roadway models[J]. Applied Geophysics, 2016, 13(4): 621−630, 737.

[18] 何帝秀, 姬广忠, 焦文杰, 等. 黏弹介质槽波超前探测数值模拟与波场分析 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(10): 144−155.
He D X, Ji G Z, Jiao W J, et al. Numerical simulations and wavefield analysis of in-seam wave advance detection in viscoelastic media[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(10): 144−155.

[19] 王盼, 程建远, 刘强, 等. Love 型槽波三维地震物理模拟试验研究 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 3182−3190.
Wang P, Cheng J Y, Liu Q, et al. 3D seismic physical simulation experiment of Love in-seam waves[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(8): 3182−3190.

[20] 刘强, 胡继武, 王盼, 等. Love 型槽波物理模拟及对断层的响应研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(12): 116−122.
Liu Q, Hu J W, Wang P, et al. Analogue modeling of Love-type channel waves and their response to faults[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(12): 116−122.

[21] 吴涛, 杨思通, 魏久传, 等. 改进离散 S 变换算法及其在槽波信号提取中的应用研究 [J]. 煤炭工程, 2022, 54(1): 142−147.
Wu T, Yang S T, Wei J C, et al. An improved discrete S-transform algorithm and its application in channel wave signal extraction[J]. Coal Engineering, 2022, 54(1): 142−147.

[22] 王季. 基于 EMD 算法的煤层透射槽波信号提纯 [J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(2): 53−55, 60.
Wang J. Purification of coal seam transmission in-seam seismic signals based on EMD algorithm[J]. Coal Geology of China, 2012, 24(2): 53−55, 60.

[23] 王季. 基于 F-K 变换的煤层透射槽波信号提取 [J]. 煤矿安全, 2011, 42(7): 62−64.
Wang J. Extraction of transmission groove wave signal in coal seam based on F-K transform[J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(7): 62−64.

[24] 马广兴, 段李宏, 高俊, 等. 基于广义 S 变换的槽波高精度滤波与多频速度成像研究 [J]. 地球物理学进展, 2023, 38(6): 2514−2524.
Ma G X, Duan L H, Gao J, et al. Research on channel wave high-precision filtering and multi-frequency velocity imaging based on generalized S transform[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(6): 2514−2524.

[25] 冯磊, 董郑, 周明奂, 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 L, Dong Z, Zhou M H, et al. Love channel wave extraction based on polarization filter in time-frequency domain[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(3): 103−108.

[26] 孙喆, 江微娜. 基于小波分解重构方法提取煤层反射槽波信号 [J]. 煤炭技术, 2019, 38(12): 55−57.
Sun Z, Jiang W N. Based on wavelet decomposition and reconstruction method in extraction of in-seam reflection signal[J]. Coal Technology, 2019, 38(12): 55−57.

[27] 陈波, 朱国维, 武延辉, 等. 基于广义 S 变换的透射槽波埃里相识别 [J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1303−1310.
Chen B, Zhu G W, Wu Y H, et al. Research on identifying the airy phase of transmitted channel waves based on generalized S-transform[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1303−1310.

[28] 丛森, 程建远, 王保利, 等. 基于槽波波速层析成像的爆破卸压效果评价方法 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(S2): 426−433.
Cong S, Cheng J Y, Wang B L, et al. Testing method on the effect of blasting releasing pressure based on in-seam wave velocity tomography[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S2): 426−433.

[29] 王保利, 金丹, 张唤兰, 等. 煤层中断层的透射槽波定量响应特征 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 2985−2991.
Wang B L, Jin D, Zhang H L, et al. Quantitative response characteristics of transmitted in-seam channel wave in coal seam with faults[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 2985−2991.

[30] 苏晓云. 透射槽波在开滦矿区煤层厚度变化探查中的应用 [J]. 中国矿业, 2019, 28(S2): 322−325, 330.
Su X Y. Application of transmitted channel wave in exploration of coal seam thickness variation in Kailuan mining area[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(S2): 322−325, 330.

[31] 张鑫, 韩建光, 牛云飞, 等. 透射槽波技术在煤田勘探中的应用研究 [J]. 地质论评, 2024, 70(4): 1587−1594.
Zhang X, Han J G, Niu Y F, et al. Study on the application of transmission in-seam wave technology in coal field exploration[J]. Geological Review, 2024, 70(4): 1587−1594.

[32] 闫晓萌. 透射槽波方法在中厚煤层隐伏小断层探测中的应用 [J]. 山东煤炭科技, 2022, 40(10): 174−176, 182.
Yan X M. Application of transmitted groove wave method in the detection of concealed small faults in medium-thick coal seam[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2022, 40(10): 174−176, 182.

[33] 田瀚, 吴荣新, 胡泽安, 等. 透射槽波相邻道质心频率的层析成像

方法 [J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(11): 187−194.
Tian H, Wu R X, Hu Z A, et al. Tomography method for adjacent channel frequency shift of transmitted in-Seam waves[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(11): 187−194.

[34] 吴国庆. 反射槽波探测法在煤层褶曲与断层识别中的研究与应用 [J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(9): 154−165.
Wu G Q. Research and application of the seismic exploration technique using reflected in-seam waves in identifying folds and faults in coal seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(9): 154−165.

[35] 杨睿, 王保利, 金丹, 等. 基于反射透射槽波联合的采煤工作面断层断距定量探测方法研究 [J/OL]. 煤炭学报, 2025 [2025-04-08]. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.KT25.0082.
Yang R, Wang B L, Jin D, et al. Research on the quantitative detection method of fault distance in coal mining face based on the combination of reflection and transmission channel wave[J/OL]. Journal of China Coal Society, 2025(2025-04-08). https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.KT25.0082.

[36] 胡泽安, 曹凌锴, 刘钦节, 等. 天然源槽波勘探的可行性研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(3): 123−130.
Hu Z A, Cao L K, Liu Q J, et al. Feasibility study of nature source in-Seam exploration[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(3): 123−130.

[37] 冯耀强. 槽波反射与透射联合探测煤层构造研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2023.
Feng Y Q. Study on joint detection for coal seam structure by reflection and transmission ISS[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2023.

[38] 王季, 叶红星, 张广忠, 等. 煤矿反射槽波探测技术研究评述 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 292−300.
Wang J, Ye H X, Zhang G Z, et al. A review on research of reflected in-seam wave detection technology in coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(2): 292−300.

[39] 吕绍林, 何继善, 李舟波. 非接触式瓦斯突出预测方法 [J]. 物探与化探, 2000, 24(1): 23−27.
Lyu S L, He J S, Li Z B. Non contract prediction methods for coal and gas outbrusts[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2000, 24(1): 23−27.

Research and application of seam wave-based advanced detection technology for geological structures right ahead of mining face during roadway tunneling in coal mines

BAI Zhi-Jun[1], QU Shao-Bo[2, 3], LIANG Hong-Bo[4], LI De-Chun[4]

(1. *Huayang New Materials Technology Co., Ltd., Yangquan* 045000, *China*; 2. *Shanxi Ningwu Yushupo Coal Industry Co., Ltd., Xinzhou* 034000, *China*; 3. *School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou* 221000, *China*;; 4. *School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou* 221000, *China*)

Abstract: To address the challenges faced by the advanced detection of geological structures right ahead of the mining face during roadway tunneling, this study investigated the feasibility of in-seam seismic exploration technology. Based on theoretical foundation and data processing methods of seam wave-based advanced detection, as well as simulations using the high-order staggered-grid finite-difference algorithm, this study compared the fault detection accuracy of three imaging methods: envelope stacking, diffraction migration, and elliptical arc migration. The results indicate that for faults with high dip angles, the envelope stacking method fails to represent the true fault locations, necessitating migration correction for accurate spatial positioning. Additionally, the accuracy of the imaging velocity significantly affects the imaging results. In the case of an identical velocity error, the diffraction migration method outperforms in revealing fault locations during roadway tunneling, while the elliptical arc migration method exhibits superior performance in determining fault strikes. The practical application demonstrates that in areas with high-quality seam wave data, all three imaging methods can effectively detect faults in advance. For areas with low-quality seam wave data, the combination of envelope stacking and migration correction is recommended for fault imaging. This study provides a significant technical reference and methodological guidance for seam wave-based advanced detection, indicating that the proposed method can provide a reliable basis for the adjustment of roadway tunneling plans, as well as the prevention and control of geological hazards.

Key words: advanced detection; in-seam seismic exploration; envelope stacking; diffraction migration imaging; elliptical arc migration imaging

(本文编辑: 叶佩, 沈效群)