doi: 10.11720/wtyht.2026.1439
解鹏, 吴雪菲, 殷世锋, 等. 基于改进绕射扫描偏移成像方法的随掘地震动态成像技术[J]. 物探与化探, 2026, 50(3): 561-566. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1439
Xie P, Wu X F, Yin S F, et al. Seismic-while-tunneling dynamic imaging based on an improved diffraction-scanning migration imaging method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(3): 561-566. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1439

基于改进绕射扫描偏移成像方法的随掘地震动态成像技术

解鹏[1], 吴雪菲[2], 殷世锋[1], 康宁[1], 关奇[2]
(1. 国能榆林能源有限责任公司 青龙寺煤矿分公司, 陕西 榆林 719408; 2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

摘 要: 针对随掘地震监测(SWM)易出现成像不稳、伪像偏多以及目标/背景对比度与定位精度不足的问题, 提出一种基于改进绕射扫描偏移的动态成像技术 (TA-DSMI)。该方法在绕射扫描偏移成像(DSMI)的成像核中引入真振幅权重, 构建由几何扩散补偿、入/散射角一致性、轻度频带/吸收补偿与稳健抑噪组成的物理可解释权重体系, 并与“预白化—滑窗叠加—兴趣区域(ROI)细扫—局部归一化”的端到端流程耦合, 在不显著增加计算负担的前提下实现分钟级刷新。结果表明, 与 DSMI 相比, TA-DSMI 的对比噪声比 (CNR) 提升约 3 dB, 异常体峰值定位误差降低约 1.5 m; 单次成图时间≤5 min。改进方法显著增强了随掘动态成像的物理一致性与判读可靠性, 为隐伏不连续体的实时超前识别与时空跟踪提供了可工程化的技术路径。

关键词: 随掘地震监测; 绕射扫描偏移 (DSMI); 真振幅权重; 动态成像
中图分类号: P631.4; P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)03-0561-06

0 引言

随掘地震监测(seismic-while-mining, SWM)以掘进机械—煤岩相互作用产生的连续振动为被动震源, 配合巷道多道观测与在线处理, 实现迎头前方隐伏不连续体的超前识别与动态跟踪[1-3]。近年来, 围绕“分钟级出图、百米量级超前”的工程需求, 以绕射扫描偏移成像(diffraction-scanning migration imaging, DSMI)为代表的快速成像思路在实践中得到广泛应用, 并与常规的面波抑制、时间对齐与能量成像等流程结合, 形成了较成熟的随掘动态监测框架[4-5]。

但在随掘的近场与非稳震源条件下, 现有流程普遍出现成像不稳、伪像偏多、目标/背景对比度与定位精度不足的问题[6-7]。为了在不显著增加计算负担的前提下提升成像可靠性与判读性, 本文在 DSMI 框架内引入真振幅权重与几何扩散校正(true-amplitude DSMA, TA-DSMI), 以物理可解释的带权叠加替代等权累加, 并配套“预白化与带限—滑窗叠加与汉宁加权—全域粗扫与 ROI(region of interest)细扫—归一化与中值滤波”的稳健流程, 实现对比度提升、伪像抑制与定位稳定, 同时保持分钟级刷新开销, 满足随掘实时超前探测的工程约束。

1 随掘地震监测原理

1.1 随掘地震监测

随掘地震监测 (SWM) 是在巷道掘进过程中, 将掘进机械与煤岩体相互作用所产生的连续振动视作被动震源, 通过巷道内规范化的多道观测与高速数据链, 实现在线采集—实时处理—动态成像的一体化技术[8-9], 其核心目标是在不干扰生产的前提下, 对迎头前方一定范围内的地质不连续体(断层、破碎带、冲刷带、陷落柱、煤厚突变等)进行超前识别与

收稿日期: 2025-12-30; **修回日期:** 2026-04-11
基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2024ZD1002105-3)
第一作者: 解鹏(1988-), 男, 陕西神木人, 工程师, 主要从事煤矿地测防治水等方面的研究工作。Email: 1210977422@qq.com

时空跟踪，为掘进安全与巷道布置提供依据。与传统爆破震源或专用主动震源不同，随掘方法依托作业本身的连续振动，具有安全、连续、低成本、可滚动更新等特点，但也面临噪声、介质等挑战，必须在观测几何、信号处理与成像算法上形成对策。

1.2 震源机理与波场特征

随掘进机截齿对煤岩体的切削可等效为多尺度、非平稳的力和力偶作用，激发以纵波和横波为主的体波，同时伴随巷道边界导波与面波（俗称“槽波”）等复杂波动。其一般频谱特征为：低频段含有较强的面波与机械本征频成分，中高频段（数十至数百赫兹）承载更多反射/绕射信息。在层状煤岩介质中，波场传播可近似满足各向同性弹性介质的标量波动方程：

$$\nabla^2 u(\boldsymbol{r},t)-\frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 u(\boldsymbol{r},t)}{\partial t^2}=\boldsymbol{s}(\boldsymbol{r},t), \tag{1}$$

式中：u 为位移；v 为有效传播速度；$\boldsymbol{s}$ 为震源项；$\boldsymbol{r}$ 为空间坐标向量；t 为时间。遇到速度/密度突变界面时产生反射与透射，反射系数可近似写为：

$$R=\frac{\rho_2 v_2-\rho_1 v_1}{\rho_2 v_2+\rho_1 v_1}, \tag{2}$$

式中：ρ 为介质密度；v 为波速。

界面几何突变、尖灭边界与小尺度异常还将产生绕射。在随掘环境下，许多隐伏构造更倾向以绕射而非镜面反射的形态出现在记录中，这为后续采用绕射敏感的成像策略提供了物理基础。

1.3 观测系统设计

随掘地震监测系统层面由“井下拾震器—矿用本安型分站—井下工业网络—地面主机/服务器”构成。拾震器与分站以矿用电缆连接，分站与地面以单模光纤接入工业环网，形成“采—传—算—显”的闭环。如图 1 所示，检波器间距 10 m，于正帮侧布设 24 个，每 3 个检波器布设 1 个监测分站。地面端承担实时显示、质量监控、预处理与成像发布等功能，关键指标包括覆盖导波与体波的有效频带、满足多道相干的采样率与时钟同步、分钟级出图所需的数据延迟与处理吞吐，以及井下本安/防爆等级的合规性。几何层面则遵循“多道、等间距、靠近围岩”的布设原则，使道间距与目标尺度及主频对应的半波长相匹配以抑制对称伪像；测线孔径与迎头位置应保证对目标深度的有效覆盖并便于滚动测线随掘进按步距整体前移，实现对迎头前方的持续超前探测。同时，几何变更需与时钟、增益和传感器状态的标定联动，确保不同阶段成像结果在幅度与相位上的可比性与可追溯性，从而在分辨率—稳定性—时效之间取得工程最优。



图 1 随掘地震监测系统部署示意

Fig. 1 Deployment schematic of the seismic-while-mining monitoring system

2 基于真振幅权重改进的绕射扫描偏移成像方法

2.1 绕射成像法基本思想

标准绕射扫描偏移（DSMI）以等权相干叠加获得能量成像，具有实现简单、计算快的工程优势。煤矿巷道前方的断层、冲刷带等非平面结构主要产生绕射波[10-11]。设成像域一点为 r，震源序号 i、接收道序号 j，DSMI 的能量叠加为：

$$I(\boldsymbol{r})=\sum_{i=1}^{K}\sum_{j=1}^{M}A_{ij}\left[t_{ij}(\boldsymbol{r})\right], \tag{3}$$

$$t_{ij}(\boldsymbol{r})=\frac{d_s(\boldsymbol{r})}{v(\boldsymbol{r})}+\frac{d_r(\boldsymbol{r})}{v(\boldsymbol{r})}, \tag{4}$$

式中：A_{ij} 为脉冲化后瞬时振幅；t_{ij} 为传播时间；d_s、d_r 分别为震源至点和点至接收器的距离。多源多道的相干叠加能增强真实反射能量，削弱随机噪声[12-16]。

2.2 传播时间场与速度模型

速度场采用分层等速初模（煤层/顶底板分层），由测井与揭露数据确定。每次刷新周期利用最新揭露结果对 $v(r)$ 进行小扰动更新，并采用快速扫掠法计算走时场，在保证精度的同时实现≤5 min 的计算效率。

2.3 叠加策略与数值实现

为保证绕射能量在多源—多道累加过程中的稳定性与可解释性，本研究从频谱整形、时间窗叠加、空间搜索与成像后处理这 4 个环节进行了稳健化设计。

考虑井巷近场记录普遍存在的低频面波与设备响应起伏, 首先对原始道集实施预白化以压平谱形、提升不同频段的相对权重, 随后结合现场主频对数据进行带限, 在保留有效绕射能量的同时抑制面波与高频随机噪声。同时, 为减轻固定窗截断产生的边缘振荡, 时间对齐后采用短时滑窗叠加并引入汉宁窗权重。滑窗长度依据主频选取为 5 个子波周期, 相邻窗口设置 50% 重叠以保障时序连续性。

以较大的网格步长对全域进行粗分辨率扫描, 快速定位能量热点与可疑异常带; 然后仅在这些兴趣区(ROI)内切换为细分辨率网格进行精扫与精确定位。叠加完成后, 针对不同网格点权重与样本数量差异导致的尺度漂移, 先进行局地归一化以统一动态范围, 再施以短窗口中值滤波以消除孤立尖峰与椒盐噪声, 同时尽可能保持绕射峰与构造边界的几何锐度。归一化保证了不同区域成像结果的可比性, 中值滤波则兼顾了边缘保持与平滑抑噪, 从而提升最终剖面的对比度与结构连续性。

绕射扫描叠加在数学上等价于沿走时曲线对多道记录的离散积分。若对原始波形直接叠加, 叠加核的有限窗宽与插值误差可能导致子波展宽, 并表现为频谱的轻度低通效应。为减弱上述影响, 在叠加前采用预白化与带限处理以锁定有效频带, 在叠加量选取上使用瞬时振幅/脉冲化表征以降低相位旋转对积分的敏感性, 并采用以主频周期为尺度的短时滑窗叠加与汉宁窗加权抑制窗截断振荡。上述措施使积分过程更接近对有限时窗内相干能量的稳健累积, 从而在保持有效频带稳定的前提下获得更高的相干增益与成像清晰度。

2.4　真振幅权重

在井巷近场、小孔径与非均质传播条件下等权叠加, 几何扩散导致远路径贡献被系统性低估, 入射角、散射角与观测方位差异被弱化, 镜面侧向能量与对称伪像被过度累积。为此, 在不改变 DSMI 总体框架与时效约束的前提下, 构建真振幅权重的带权叠加核(权重由几何扩散补偿、角度一致性、频带/吸收补偿与稳健抑噪 4 项构成), 以提高目标—背景对比度与空间定位精度, 形成改进的 True-Amplitude DSMI 算法(简称 TA-DSMI)。

对任一成像网格点, 带权成像的成像方程相应改写为:

$$I(\boldsymbol{r})=\sum_{i=1}^{K}\sum_{j=1}^{M}w_{ij}(\boldsymbol{r})A_{ij}\left[t_{ij}(\boldsymbol{r})\right], \tag{5}$$

式中: $A_{ij}(t)$为经去直流、带通与预白化后的瞬时振幅或脉冲化振幅; $w_{ij}(\boldsymbol{r})$为真振幅权重, 为避免尺度漂移, 对同一r的权重可作局地归一化, 即$\hat{w}_{ij}=w_{ij}/\sum w_{ij}$。

权重由几何扩散、角度一致性、频带/吸收补偿与稳健抑噪 4 项构成。

1)$G(d_s,d_r)$为几何扩散项。在本次井下随掘地震探测中近似采用 2.5D 扩散模型:

$$G(d_s,d_r)=\frac{1}{\sqrt{d_s d_r+\varepsilon}} \tag{6}$$

以补偿球/圆柱型几何扩散的振幅衰减; ε>0为近场稳定化常数, 取值与成像网格步长相关, 以抑制极近场的数值奇异。

2)$O(\theta_s,\theta_r,\Delta\phi)$为角度一致项, 用于刻画入散射几何与观测方位对绕射辐射的影响:

$$O=\cos^{p}\theta_s\cdot\cos^{p}\theta_r\cdot\exp\left(-\frac{\Delta\phi^2}{2\sigma_{\phi}^2}\right)。 \tag{7}$$

式中: θ_s、θ_r为成像点视角下的入射/散射角(相对于测线法线或期望界面法线), $\Delta\phi$为观测方位与期望辐射方位差; 指数p与容差σ_{ϕ}控制角域选择性。

3)$S(f_0,Q)$为频带及吸收补偿项。井下强吸收介质中高频能量随程衰减明显, 采用轻度吸收补偿以恢复有效带宽:

$$S=\exp\left[\frac{\pi f_0(d_s+d_r)}{Qv(\boldsymbol{r})}\right]\cdot H(f)。 \tag{8}$$

式中: f_0为主频(由现场频谱确定); Q为品质因子; $H(f)$为带限窗(如 40~450 Hz)。补偿幅度宜小, 以避免误放大非相干噪声。当数据已稳定带通时, 可视情况将该项简化为常数。

4)$\Pi(A_{ij})$为稳健抑噪项, 用于削弱孤立大振幅(如残余面波、坏道尖峰)对叠加结果的影响。引入基于稳健统计的幅值抑制因子, 以局部位绝对偏差 *MAD* 为阈值尺度。该项不改变相位结构, 仅对异常振幅进行温和限幅, 使带权叠加对异常道集更具鲁棒性。

叠加上述 4 项构成真振幅权重, 值为上述 4 项的积, 计算公式为:

$$w_{ij}(\boldsymbol{r})=G\cdot O\cdot S\cdot\Pi。 \tag{9}$$

基于此, 构建了本文研究所使用的基于改进绕射扫描偏移成像方法的随掘地震动态成像技术 TA-DSMI, 流程图见图 2。

3　工程试验

3.1　工程概况

青龙寺煤矿位于国家规划的“陕北侏罗纪煤田神府矿区新民开采区”中部, 行政区隶属榆林市府谷县老高川镇管辖神府。

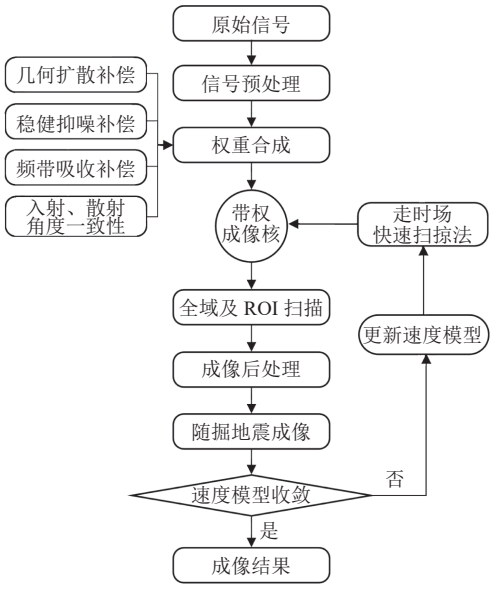


图 2　基于改进绕射扫描偏移成像方法的随掘地震动态成像技术流程

Fig. 2　Flowchart of SWM dynamic imaging based on improved DSMI

本次随掘地震智能监测范围为 5-20305 胶运顺槽，监测长度 1 000 m，随掘地震智能监测传感器沿 5-20305 胶运顺槽靠近工作面内侧帮布置。

该工作面掘进煤层为 5^{-2} 煤，掘进方位为 270°，地面标高为 1 119~1 248 m，煤层底板标高为 1 013~1 027 m。预计揭露岩石主要以泥岩与粉砂岩主。该岩层对地震波的吸收衰减较弱，有利于地震波的传播。井田内无实质性构造变动意义上的褶曲构造。5^{-2} 煤采掘过程中，通道揭露数个小型的冲刷构造，根据现场观测分析，井下冲刷构造范围较小，对掘进及回采影响有限。煤矿内没有火成岩活动，亦未发现断层。总体而言，地震波发育条件较好。

3.2　异常构造成像结果

利用随掘地震监测数据处理软件完成数据采集、分析、CT 反演处理，根据反演结果，结合 5-20305 胶运顺槽现有地质资料对探测区域进行解释。本次 5-20305 胶运顺槽随掘地震监测研究项目所有资料品质较高，监测效果良好，对勘探区域内的掘进工作面进行了超前实时、超前随掘随探，并对构造异常情况进行了解释，取得了较好的地质成果。

本次工程试验中共实时、超前监测 1 005 m，超前预报地质异常 2 处，揭露验证 2 处，准确率 100%，平均水平摆动 2.5 m。预报异常及揭露情况如表 1 所示。

表 1　预报异常及揭露情况

Table 1　Summary of anomaly predictions and exposure outcomes

预报构造异常编号	预报位置/m	超前预报距离/m	实际揭露位置/m	揭露情况	平面摆动距离/m
SJ-YC1	2 425	80	2 427	煤层变厚	2
SJ-YC2	3 145	89	3 148	煤层变厚	3

在掘进至 2 345 m 时，发现距离迎头 80 m(即掘进总里程 2 425 m)附近出现成像显示异常反射界面，命名为 SJ-YC1(图 3)，初步判断为冲刷带或煤层变化。2025 年 6 月 22 日，在掘进至 2 427 m 处开始揭露 SJ-YC1。实际揭露构造异常为煤层变厚，预测位置位于煤层开始变厚位置，水平摆动 2 m，实际揭露与预报的 SJ-YC1 异常基本一致。

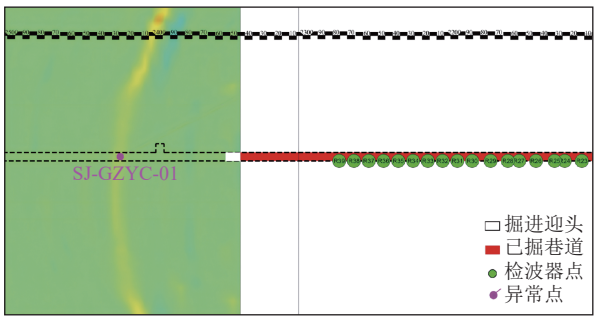


图 3　SJ-YC1 随掘地震数据成像模型

Fig. 3　SJ-YC1 seismic-while-mining (SWM) data imaging model

在掘进至 3 056 m 时，发现距离迎头 89 m(即掘进总里程 3 145 m)附近出现成像显示异常反射界面，命名为 SJ-YC2(图 4)，初步判断亦为冲刷带或煤层变化。随后，在掘进至 3 148 m 处开始揭露 SJ-YC2。实际揭露异常构造情况为煤层变薄，预测位置位于煤层开始变薄位置，水平摆动 3 m。实际揭露与预报的 SJ-YC2 异常基本一致。

3.3　成像效果评估

在同一速度模型与采集几何下，TA-DSMI 的 CNR 得到显著提高，反射同相轴连续性增强，对称伪像已明显消退，异常体峰值定位更集中、更稳定。以本矿井现场参数为例：主频约 180~220 Hz、煤层速度约 1.8 km/s，带权成像 CNR 较原方法提高了 3 dB，预报构造异常位置误差平均降低 1.5 m(表 2)。TA-DSMI 显著改善了动态剖面的时空连贯性与异常体边界的清晰度。

3.4　适用条件与参数选取

工程实践表明，本文方法面向随掘被动震源条

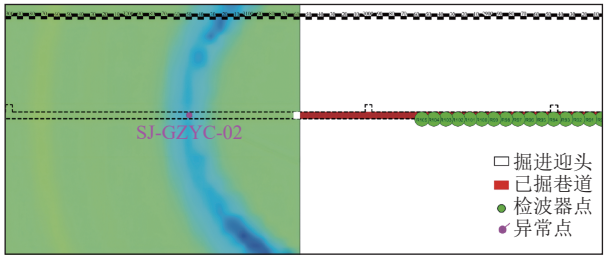


图 4　SJ-YC2 随掘地震数据成像模型

Fig. 4　SJ-YC2 seismic-while-mining (SWM) data imaging model

表 2　预报误差及 CNR 指标对比

Table 2　Prediction error and CNR index comparison

方法	预报平均误差/m	平均CNR/dB
DSMI	4	11
TA-DSMI	2.5	14

件下的近场动态成像, 适用于煤层厚度变化、断层、破碎带、冲刷带、尖灭边界等不连续体产生明显绕射响应的超前识别与跟踪。研究表明, 以主导波长 λ 为尺度约束时, 参数选取需满足: 道间距 $\Delta x \leqslant \lambda/2$、有效排列长度 $L \geqslant 3\lambda$、成像网格间距不大于 $\lambda/4$, 方可保证本方法扫描叠加的同相累积与成像聚焦的稳定性。此外, 当掌子面等效震源尺度与主导波长同量级或更大时, 扩展震源的空间平均效应可能削弱高频成分并导致成像模糊, 此时宜采用掌子面离散子震源/多源等效处理, 以减弱震源尺度对成像清晰度的不利影响。

4　结论

1)提出并建立了一种适用于随掘场景的真振幅权重改进的绕射扫描偏移方法——TA-DSMI。该方法在标准 DSMI 相干叠加核中显式引入几何扩散补偿、入/散射角一致性、轻度频带/吸收补偿与稳健抑噪 4 类物理可解释权重, 给出相应的参数取值与稳定化准则, 并与分层等速初模和小扰动速度更新、走时快速扫描计算无缝耦合, 整体复杂度保持分钟级出图要求, 满足随掘“连续—实时—滚动”成像约束。

2)对比 DSMI, TA-DSMI 在同一采集几何与速度条件下, 目标/背景 CNR 提升约 3 dB, 构造异常的水平定位误差平均降低约 1.5 m, 成像剖面时空连贯性与边界清晰度显著改善, 单次刷新周期稳定满足≤5 min, 有效超前探测距离达百米量级。

3)TA-DSMI 具备可移植的工程属性。在不同煤层—顶底板组合与多样噪声背景下保持鲁棒性, 便于在随掘生产中形成可复用的质量控制与成果准入标准。方法的效果仍依赖于合理的速度模型与适度的吸收补偿参数。

参考文献(References):

[1] 高文贵, 赵建盛, 郭威, 等. 随掘地震超前探测技术在构造异常体探查中的应用 [J]. 煤炭与化工, 2025, 48(9): 45−49, 57.
Gao W G, Zhao J S, Guo W, et al. The application of in-situ seismic advanced detection technology during excavation in the exploration of structural anomalies[J]. Coal and Chemical Industry, 2025, 48(9): 45−49, 57.

[2] 许慧聪, 来兴平, 单鹏飞, 等. 沟谷区浅埋煤层矿压显现时空特征辨识及预测方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(6): 1450−1465.
Xu H C, Lai X P, Shan P F, et al. Research on spatiotemporal characteristics perception and prediction methods of shallow buried coal seam mining pressure in valley areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(6): 1450−1465.

[3] 汪昆, 吴国忱, 贾宗锋, 等. 反射波时频域地震波形反演方法 [J]. 物探与化探, 2025, 49(5): 1155−1163.
Wang K, Wu G Z, Jia Z F, et al. Reflection waveform inversion in the time-frequency domain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(5): 1155−1163.

[4] 许慧聪, 来兴平, 单鹏飞, 等. 深部煤岩动力灾害多场耦合试验系统研制及应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(4): 926−939.
Xu H C, Lai X P, Shan P F, et al. Development and application of multi-field coupling test system for deep coal-rock dynamic disaster[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(4): 926−939.

[5] 张鸣, 于震, 张飞, 等. 随掘地震对巷道前方断层的探测应用研究 [J]. 智能城市, 2025, 11(5): 49−51.
Zhang M, Yu Z, Zhang F, et al. Study on application of digging earthquake in detecting faults in front of roadway[J]. Intelligent City, 2025, 11(5): 49−51.

[6] 郭杨. 随掘地震超前探测技术应用 [J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2025, 43(3): 124−127.
Guo Y. Application of seismic while drilling ahead[J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2025, 43(3): 124−127.

[7] 金丹. 随掘地震实时采集数据同步时差校正方法 [J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 190−196.
Jin D. A method for time difference correction for real-time seismic-while-mining data[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(3): 190−196.

[8] 王子伟. 基于复合干涉算法的智能随掘超前探测技术分析 [J]. 能源与环保, 2024, 46(12): 148−152, 159.
Wang Z W. Analysis of intelligent on-demand mining advanced detection technology based on composite interference algorithm[J]. China Energy and Environmental Protection, 2024, 46(12): 148−152, 159.

[9] 刁瑞, 葛大明, 孔庆丰, 等. 基于地震干涉的复杂构造局部成像 [J]. 物探与化探, 2025, 49(4): 869−877.
Diao R, Ge D M, Kong Q F, et al. Local imaging of complex structures based on seismic interferometry[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(4): 869−877.

[10] 刘培君, 黄建平, 李振春, 等. 一种基于反稳相的深度域绕射波分离成像方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(5): 967−973, 879.
Liu P J, Huang J P, Li Z C, et al. A diffraction imaging method in the depth domain driven by anti-stationary phase strategy[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(5): 967−973, 879.

[11] 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 G Z. Diffraction migration imaging of reflected in-seam waves and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(1): 121−124.

[12] 钟古, 张寒韬, 陈群, 等. 基于绕射扫描叠加偏移原理的三维成像系统在白茫雪山隧道超前预报中的应用 [J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2016, 12(5): 65−66.
Zhong G, Zhang H T, Chen Q, et al. Application of three-dimensional imaging system based on diffraction scanning superposition migration principle in advance prediction of Baimang Snow Mountain Tunnel[J]. GongluJiaoTongKeJi: Applied Technology Edition, 2016, 12(5): 65−66.

[13] 徐玉增, 卢海. 偏移绕射技术在探地雷达资料处理中的应用 [J]. 能源技术与管理, 2010, 35(5): 17−18.
Xu Y Z, Lu H. Application of migration diffraction technology in ground penetrating radar data processing[J]. Energy Technology and Management, 2010, 35(5): 17−18.

[14] 周鹏. 基于叠后地震资料方位振幅变化率差异的裂缝预测技术 [J/OL]. 物探与化探, 2026: 1−8[2026-02-03]. https://link.cnki.net/urlid/11.1906.P.20260116.0900.006.
Zhou P. Fracture prediction technology based on differences in azimuthal amplitude variation rate of post-stack seismic data [J/OL]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 1−8 [2026-02-03].https://link.cnki.net/urlid/11.1906.P.20260116.0900.006.

[15] 张家乐, 初月朗, 杨明, 等. TBM 施工中随掘地震动态超前探测技术与应用 [J]. 煤炭技术, 2025, 44(10): 123−128.
Zhang J L, Chu Y L, Yang M, et al. Technology and application of dynamic advanced detection of seismic-while-excavating in TBM construction[J]. Coal Technology, 2025, 44(10): 123−128.

[16] 杨晓东, 张建强, 耿利强, 等. 煤矿井下巷道的地震识别效果及分析 [J]. 物探与化探, 2025, 49(5): 1133−1140.
Yang X D, Zhang J Q, Geng L Q. Performance and analysis of seismic recognition in coal mine underground roadways[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(5): 1133−1140.

Seismic-while-tunneling dynamic imaging based on an improved diffraction-scanning migration imaging method

XIE Peng [1], WU Xue-Fei [2], YIN Shi-Feng [1], KANG Ning [1], GUAN Qi [2]

(1. *Qinglongsi Coal Mine Branch, Yunlin Energy Co., Ltd., CHN Energy Group, Yulin* 719408, *China*; 2. *CCTEG Xi'an Research Institute* (*Group*) *Co., Ltd., Xi'an* 710077, *China*)

Abstract: Seismic-while-tunneling (SWT) detection tends to encounter challenges including unstable imaging, excessive artifacts, limited target-background contrast, and poor positioning accuracy. To address these issues, this study proposed a dynamic imaging technology based on an improved diffraction-scanning migration imaging (DSMI) method: TA-DSMI. By introducing a true-amplitude weighting function into the DSMI imaging kernel, the TA-DSMI constructs a physically interpretable weighting system consisting of geometric spreading compensation, incident/scattering angle consistency, mild frequency band/absorption compensation, and robust noise suppression. The weighting system is then coupled with an end-to-end process that involves pre-whitening, sliding window stacking, fine-scale scanning of the region of interest (ROI), and local normalization. Consequently, the TA-DSMI achieves minute-level refreshing without significantly increasing the computational overhead. The results indicate that compared to the DSMI, the TA-DSMI improved the contrast-to-noise ratio (CNR) by about 3 dB and reduced the peak positioning error of anomalous bodies by about 1.5 m, with a single imaging time of ⩽5 min. Overall, the TA-DSMI significantly enhances the physical consistency and interpretation reliability of SWT dynamic imaging, providing an engineering-feasible technology pathway for real-time advanced identification and spatiotemporal tracking of concealed discontinuities.

Key words: seismic-while-tunneling (SWT) detection; diffraction-scanning migration imaging (DSMI); true-amplitude weighting; dynamic imaging

（本文编辑: 叶佩, 沈效群）