doi: 10.11720/wtyht.2026.1435
关奇, 包乾宗, 吴雪菲. 基于多算法联合去噪与波场分离的随掘地震动态成像方法[J]. 物探与化探, 2026, 50(3): 525-532. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1435
Guan Q, Bao Q Z, Wu X F. A dynamic imaging method for seismic-while-tunneling detection based on multi-algorithm joint denoising and wavefield separation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(3): 525-532. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1435

基于多算法联合去噪与波场分离的随掘地震动态成像方法

关奇[1,2], 包乾宗[1], 吴雪菲[2]
(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

摘 要: 随掘地震探测是缓解煤矿采掘接续紧张的关键技术, 通过实现巷道掘进过程中的"随掘随探", 能够有效提升掘进效率。但受掘进机震源随机性强、井下强噪背景干扰严重等因素制约, 数据去噪和有效波提取一直是技术难点。因此, 本文提出一种基于多算法联合去噪与波场分离的随掘地震动态成像探测方法。首先, 引入变分模态分解(VMD)对原始地震信号进行多尺度分解与模态筛选, 结合改进人工蜂群算法(IABC)优化的独立分量分析(ICA), 构建联合去噪模型, 深度压制复杂机械及电磁噪声。其次, 基于互相关原理将连续随机震动记录重构为虚拟脉冲震源记录, 并应用奇异值分解(SVD)技术剥离强能量直达波, 实现微弱反射有效波的精准提取。最后, 采用基于绕射扫描原理的偏移成像算法, 实现巷道侧帮及前方地质构造的精确刻画。通过弹性波三维有限差分算法构建了 300 m×100 m×200 m 的随掘地震超前探测模型, 验证了该方法在低信噪比环境下还原有效波场的能力。在郭家湾煤矿 51210 工作面的工程实践显示, 该方法成功圈定了巷道侧帮的隐伏断层, 解释结果与钻孔验证高度吻合。研究表明, 该技术有效解决了随掘探测信噪比低的难题, 为煤矿巷道隐蔽致灾因素的实时监测与智能化快速掘进提供了重要的技术保障。

关键词: 随掘地震; 变分模态分解; 独立分成分析; 波场分离; 超前探测
中图分类号: P631.4; P311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)03-0525-08

0 引言

我国煤炭资源的开采正向深部化、智能化发展, 采掘失调已成为制约煤矿高效生产的主要瓶颈之一[1-2]。巷道快速掘进是解决采掘接续紧张的关键, 但掘进工作面前方及侧帮隐伏的断层、陷落柱和水害等致灾地质因素严重威胁着掘进安全。传统的矿井物探方法通常要求在静态环境下施工, 存在探测距离短、易受金属干扰、需中断掘进作业等问题, 其探测能力难以适应巷道快速掘进条件下的安全保障需求[3-6]。

目前, 地震探测技术已经广泛应用于矿区地质构造的探测, 对断层[6-8]、陷落柱[9-12]和采空区[13-15]探测都进行了一定的研究。但传统的地震探测技术常使用爆炸物作为震源, 其不仅在作业时存在安全问题, 而且探测能力有限, 在探测时需停止掘进, 给智能化采掘作业带来诸多不便, 已难以满足现代煤矿智能化开采对随掘随探、实时预警的要求[16-17]。

随掘地震技术因具有实时、低成本和不影响掘进作业等优势, 成为解决矿井采掘失调问题的重要手段[18-19]。然而, 受掘进机震源信号随机性强、强噪背景干扰严重等因素制约, 其有效波提取与高精度成像一直是技术难点[19-20]。现有研究虽通过机器学

收稿日期: 2025-12-24; **修回日期:** 2026-03-13
基金项目: 国家自然科学基金项目(42074175); 国家重点研发计划项目(2018YFC0807804); 应急管理部重点科技计划"煤矿水害超前探测关键技术及装备研发"(2024EMST070701)
第一作者: 关奇(1991-), 陕西勉县人, 助理研究员, 硕士, 研究方向为煤矿井下地震勘探方法。Email: guanqi@cctegxian. com
通讯作者: 包乾宗(1972-), 甘肃庆阳人, 副教授, 硕士生导师, 博士, 现主要从事地震数据处理、全波形反演和高铁地震学等方面的研究工作。Email: qzbao@chd.edu.cn

习去噪[21-23] 及绕射偏移成像[24] 等方法取得了一定进展，但面对海量的随掘监测数据，如何高效剔除无效数据并提升复杂地质条件下的适用性，仍缺乏系统的解决方案和充足的工程实证。

针对上述随掘地震有效信号提取难、成像精度受限的问题，本文提出了一种基于多算法联合去噪与波场分离的随掘地震动态成像探测方法。首先，引入变分模态分解、改进人工蜂群算法与独立分量分析构建联合去噪模型，深度压制掘进机产生的复杂机械与电磁噪声。然后，基于互相关原理重构虚拟震源记录，并利用奇异值分解技术实现波场分离，精准提取有效反射信号。最后，在郭家湾煤矿开展了工程示范应用，验证了该方法在精准探测巷道侧帮隐蔽构造方面的有效性与实用性。

1　方法原理

1.1　随掘地震探测原理

如图 1 所示，随掘地震探测技术利用巷道掘进机截割煤岩体时产生的震动作为被动震源，通过现场布设的地震检波器进行信号采集，与传统脉冲震源不同，掘进机震源信号具有连续、随机、变频及变幅的复杂特征[17,25]。该技术的核心优势在于实现了“探掘一体化”，即在不暂停掘进生产、不使用炸药的前提下，通过实时采集与处理海量震动数据，对巷道迎头前方及侧帮的隐蔽致灾地质因素进行动态成像与超前预报，为煤矿智能快速掘进提供强有力的技术支撑。

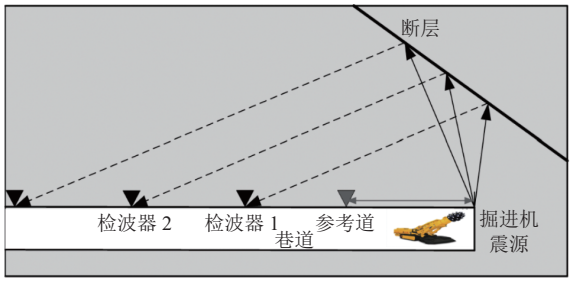


图 1　随掘地震探测示意

Fig. 1　While-drilling seismic

1.2　随掘地震数据处理

针对随掘地震信号强噪声、非平稳及波场耦合复杂的特点，本文构建了一套涵盖“深度去噪—波场提取—动态成像”的联合处理体系（图 2）。该方法首先通过变分模态分解（variational mode decomposition, VMD）与改进的人工蜂群（improved artificial bee colony, IABC) 的独立分量分析（inde-pendent component analysis, ICA）算法的级联，实现对掘进机背景噪声的深度剥离；随后利用互相关干涉技术将连续震动信号脉冲化，并辅以奇异值分解进一步纯化反射波场；最后，通过绕射扫描偏移算法实现地质异常体的空间定位。

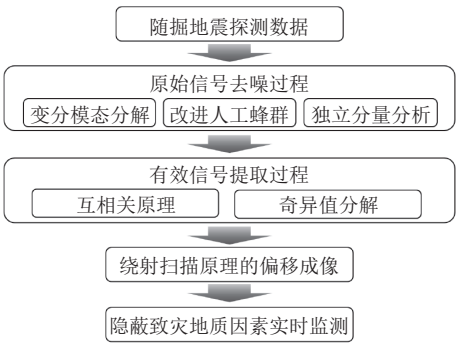


图 2　技术路线

Fig. 2　Technical approach

1.2.1　随掘地震去噪方法

随掘地震探测过程中噪声干扰严重，前方异常地质构造的有效反射信号被直达波、噪声等干扰能量淹没，从而随掘地震信号存在有效信号弱、噪声强的问题。本文首先利用 VMD 方法将地震道分解为不同的模态分量，选择包含有用信号较多的模态分量重构成虚拟地震数据，然后使用虚拟地震数据和实际地震数据进行独立分量分析，分离地震信号和噪声。

在 VMD 对地震信号进行粗提取阶段，其核心是寻找 K 个模态函数 $\mu_k(t)$ 及其中心频率 ω_k，使得各模态的估计带宽总和最小，目标函数为：

$$\min_{\{u_k\},\{\omega_k\}}\left\{\sum_{k=1}^{K}\left\|\partial_t\left[\left(\delta(t)+\frac{\mathrm{j}}{\pi t}\right)*u_k(t)\right]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_k t}\right\|_2^2\right\},\quad(1)$$

$$\sum_{k=1}^{K}u_k(t)=f(t),\quad(2)$$

式中：$\mu_k(t)$ 为分解后得到的 K 个模态分量；ω_k 为各模态分量的中心频率；$\delta(t)$ 为单位脉冲函数；$f(t)$ 为采集到的随掘地震数据。

对 VMD 重构后的随掘地震数据，采用 IABC-ICA 方法对重构后的随掘地震信号进行去噪。IABC-ICA 方法中 ABC 算法的改进在于优化跟随蜂和侦查蜂的搜索策略，以避免算法陷入局部最优，达到优化算法收敛性的目的。跟随蜂搜索策略和侦查蜂搜索策略公式为：

$$v_{ij}=x_{ij}+\phi_{ij}(x_{ij}-x_{kj})+\psi_{ij}(x_{\mathrm{best},j}-x_{ij}),\quad(3)$$

$$x'_{ij}=x_{\min,j}+\mathrm{rand}(0,1)(x_{\max,j}-x_{\min,j})+\psi_{ij}(x_{\mathrm{best},j}-x_{ij}),\quad(4)$$

式中：v_{ij} 为新蜜源位置；x_{ij} 为原蜜源位置；$x_{\mathrm{best},j}$ 为当

前全局最优蜜源位置; ϕ_{ij}为区间 [−1,1] 中的一个随机数; ψ_{ij}为区间 [0,1] 中的一个随机数; x'_{ij}为随机生成的新蜜源; $x_{\min,j}$, $x_{\max,j}$为搜索空间边界。

将上述 IABC 算法作为优化方法, 应用于 ICA 问题的求解, 以提高分离矩阵 $\boldsymbol{W}$ 的收敛精度。分离信号的求取以及分离信号 y 的最大负熵作为目标函数为:

$$y = \boldsymbol{W}x, \tag{5}$$

$$J(y) \approx [E\{G(y)\} - E\{G(v)\}]^2, \tag{6}$$

式中: y 为分离信号; $\boldsymbol{W}$ 为分离矩阵; x 为混合信号; $J(y)$为负熵值; $E\{\cdot\}$为数学期望; $G(\cdot)$为非二次函数, 用于捕捉非高斯特征。

利用 IABC 算法对分离矩阵 $\boldsymbol{W}$ 进行迭代寻优。在搜索过程中, 通过引入全局最优解的引导机制, 使代价函数快速收敛至最大适应度值。当满足最小精度误差后, 输出最优分离矩阵 $\boldsymbol{W}$ 并对其进行正交化处理, 最终实现了混合信号 x 中各独立分量的有效分离。

1.2.2　随掘地震有效信号提取方法

经过去噪处理的随掘地震记录仍难以直接获得有效信号进行地质解释, 需要采用提取方法将随掘地震记录作进一步处理, 增强随掘地震记录中有效信号的能量, 提高随掘地震信号中有效信号的占比。因此, 在去噪的基础上, 进一步采用互相关和波场分离处理, 对有效信号进行提取。

互相关用于描述两个信号在时间域的相关性, 将参考道信号 $x_0(n)$ 与检波器接收到的信号 $x_1(n)$ 作互相关, 互相关结果 r 为:

$$r = \int_{-\infty}^{+\infty} x_1(n)x_0(n+\tau)\mathrm{d}t。 \tag{7}$$

由于随掘震源的子波为弱周期信号与随机脉冲信号的叠加, 其自相关函数近似于脉冲信号。因此通过互相关可以将连续的随掘地震数据脉冲化为虚拟的单炮记录, 其虚拟炮点位于参考道所在的点上。在巷道掘进的多个阶段, 分别采集并互相关后, 就能得到多个虚拟单炮记录, 每个记录的炮点位置都在当时的掘进迎头处。

针对互相关记录中能量极强的直达波, 利用 SVD 技术将其剥离, 从而让被掩盖的反射波显露出来。令互相关后的地震记录为矩阵 $\boldsymbol{X}$, 对其进行奇异值分解:

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{U}\sum\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}, \tag{8}$$

式中: $\boldsymbol{U}$ 为左奇异向量矩阵, 表示空间特征; $\sum$为对角矩阵, 对角线元素 σ_k为奇异值; $\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}$ 为右奇异向量矩阵, 表示时间特征。

1.3　绕射扫描偏移成像方法

针对去噪后的地震数据, 本文采用绕射扫描机制的偏移成像技术对数据进行处理。以 Kirchhoff 积分理论为核心, 假设地下介质由无数离散的次级绕射源组成, 通过遍历成像区域的每一个网格点, 计算其对应的绕射波理论走时, 将多道地震数据的振幅在此路径上进行相干叠加, 进而重构出地下地质构造的空间形态。

假设地震波在围岩中以平均速度 v 传播, 任意成像点位置为 $P(x, y, z)$, 第 i 个虚拟震源位置为 $S(x, y, z)$, 第 j 个检波器位置为 $R(x, y, z)$, 则绕射波从虚拟震源传播至成像点, 再返回至检波器的总走时可表示为:

$$T_{ij}(P) = \frac{|P - S_i|}{v} + \frac{|P - R_j|}{v}。 \tag{9}$$

通过对成像空间进行逐点扫描, 沿绕射波走时轨迹对地震记录进行叠加, 计算成像点 P 处的成像值。其基本成像公式可表示为:

$$I(P) = \sum_{i=1}^{N_s}\sum_{j=1}^{N_r} w_{ij}(P)u_{ij}[T_{ij}(P)], \tag{10}$$

式中: $I(P)$ 为成像点 P 处的成像能量; N_s 为虚拟震源总数; N_r 为检波器道数; $u_{ij}(t)$表示第 i 个震源在 j 个检波器处的信号; $w_{ij}(P)$为加权函数。为补偿地震波在传播过程中的几何扩散效应, 并抑制远距道对成像结果的不利影响, 传播距离的权重函数为:

$$w_{ij}(P) = \frac{1}{(r_{si}r_{rj})^{\alpha}}, \tag{11}$$

式中: α为几何扩散指数; r_{si} 和 r_{rj} 分别为虚拟震源至成像点的传播距离和成像点至检波器的传播距离。

2　模拟实验

为验证本文提出的随掘地震记录去噪方法的有效性, 采用弹性波三维有限差分算法, 建立如图 3 所示的随掘地震超前探测模型, 模型大小为 300 m×100 m×200 m, 其中巷道长度为 150 m, 高度为 5 m, 煤层厚度为 5 m, 巷道迎头前方 50 m 处存在倾角为 60°的正断层, 断层落差为 10 m, 断层破碎带宽度为 5 m, 测线分别设在巷道底板、顶板、左侧帮和右侧帮, 长度为 150 m, 接收道共 150 道, 道间距为 1 m。模型各层介质的物性参数见表 1。

结合随掘震源信号的随机、连续、变幅和变频的特征, 采用振幅为 [−1, 1] 区间的连续随机反射序列与 200 Hz 雷克子波褶积得到的连续信号作为数值模拟的随掘地震震源, 如图 4 所示。

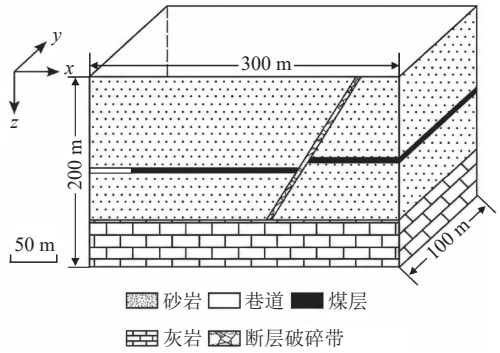


图 3　数值模拟模型

Fig. 3　Numerical simulation model

表 1　模型介质物性参数

Table 1　Physical property parameters of the model medium

地层	纵波速度/(m·s^{-1})	横波速度/(m·s^{-1})	密度/(kg·m^{-3})
砂岩	2 600	1 500	2 200
巷道	340	0	1.29
煤层	1900	1 100	1 400
灰岩	3 500	2 100	2 500
断层破碎带	1 400	900	1 100

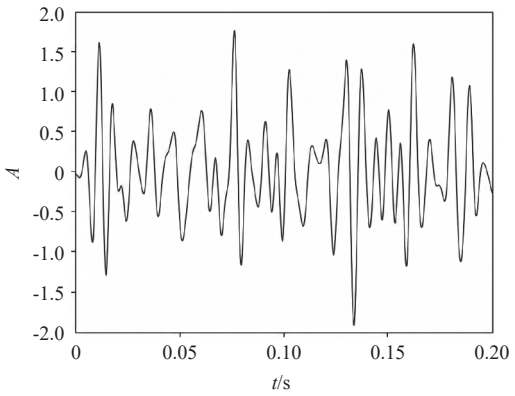


图 4　随掘地震震源

Fig. 4　Seismic source during excavation

以数值模拟随掘地震记录的 Z 分量记录为例，在其中加入随机噪声，采用本文提出的去噪方法处理后，使用距离震源最近处的地震道作为参考信号，与剩余地震数据作互相关，利用奇异值分解方法分离互相关记录中能量最强的直达横波，之后使用脉冲反褶积压缩子波长度。结果(图 5)显示：用本文方法处理的加噪随掘地震记录与炸药震源的地震记录相似，证明了随掘地震记录去噪和有效信号提取方法的有效性。

3　现场试验

3.1　工程概况

郭家湾煤矿位于陕西省榆林市府谷县，隶属于大昌汗乡，煤矿四周与地处内蒙古和陕西两省区的煤矿紧密相邻。本次探测区为郭家湾煤矿 51210 工作面(图 6)，位于中部回风大巷以南，井田边界东南角。巷道掘进煤层为 5^{-1} 煤层，5^{-1} 煤位于延安组第一段的中上部，煤层底板标高+1 066~+1 075 m，煤层厚度 2.15～2.69 m，平均厚度 2.44 m，厚度分布较稳定，总体趋势由设计巷道中部向东西两侧有增厚。

3.2　数据处理与分析

为确保郭家湾煤矿的安全开采，在 51210 工作面探巷行人侧帮布置了随掘地震监测系统，现场采用直线式布设，检波器间距固定为 10 m。井下布置情况及连接关系如图 7 所示，每掘进 30~60 m，将最后方的 3~6 个检波器滚动搬迁至最前方，确保参考道始终维持在合理的超前探测有效范围内，以实时连续跟踪监测掘进工作面前方可能存在的地质异常体。

51210 工作面随掘地震探测系统采集的原始数据记录如图 8a 所示，通过本文方法获取脉冲化剖面如图 8b 所示，IABC 算法对一段 10~20 s 的随掘数据进行处理和成像的时间远小于掘进机截割一排的时间。因此，计算效率完全能够满足掘进间歇期的“准实时”成像需求，且可以清晰辨识直达波初至及反射波，为后续层析成像提供了保障。

利用测量控制点对检波点坐标进行实时更新，并通过互相关走时定位技术动态标定掘进机震源的实时位置。在参考道滚动切换时，利用“重叠分段处理”与“已知巷道空间屏蔽作用的速度场修正” 确保成像结果的一致性。同时，通过计算等效炮集记录中的直达波信噪比进行筛选，有效避免了虚假构造解析。经过随掘地震系统的连续监测，巷道掘进至 609 m 时，如图 9 所示，第一处异常在掘进进尺 647 m 附近成像显示异常反射界面，命名为 SJ-YC1，距离当前迎头约 38 m。巷道掘进至 628 m 时，向南掘进 27 m，经钻探成果数据计算得出断层落差 H=4.2 m；巷道回撤至 558 m 时，向南掘进 39 m 揭露断层，落差 4 m；当巷道回撤至 476 m 时，向南掘进 47 m 揭露断层，落差 3.2 m。经过 3 处揭露断层信息得出断层走向为 NWW 向，落差向 SEE 方向逐渐减小(图 9 红线所示)。第二处异常在掘进进尺 718 m 附近成像显示异常反射界面，命名为 SJ-YC2，距离当前迎头约 109 m。

于 28#调车硐室向北侧施工 3 个常规钻孔进行断层探查，钻孔平面分布从左向右依次为 D25006、D25007、D25008，得出断层走向为 NWW 向(图 9 中紫色实线所示)，与随掘超前探测预报异常 SJ-

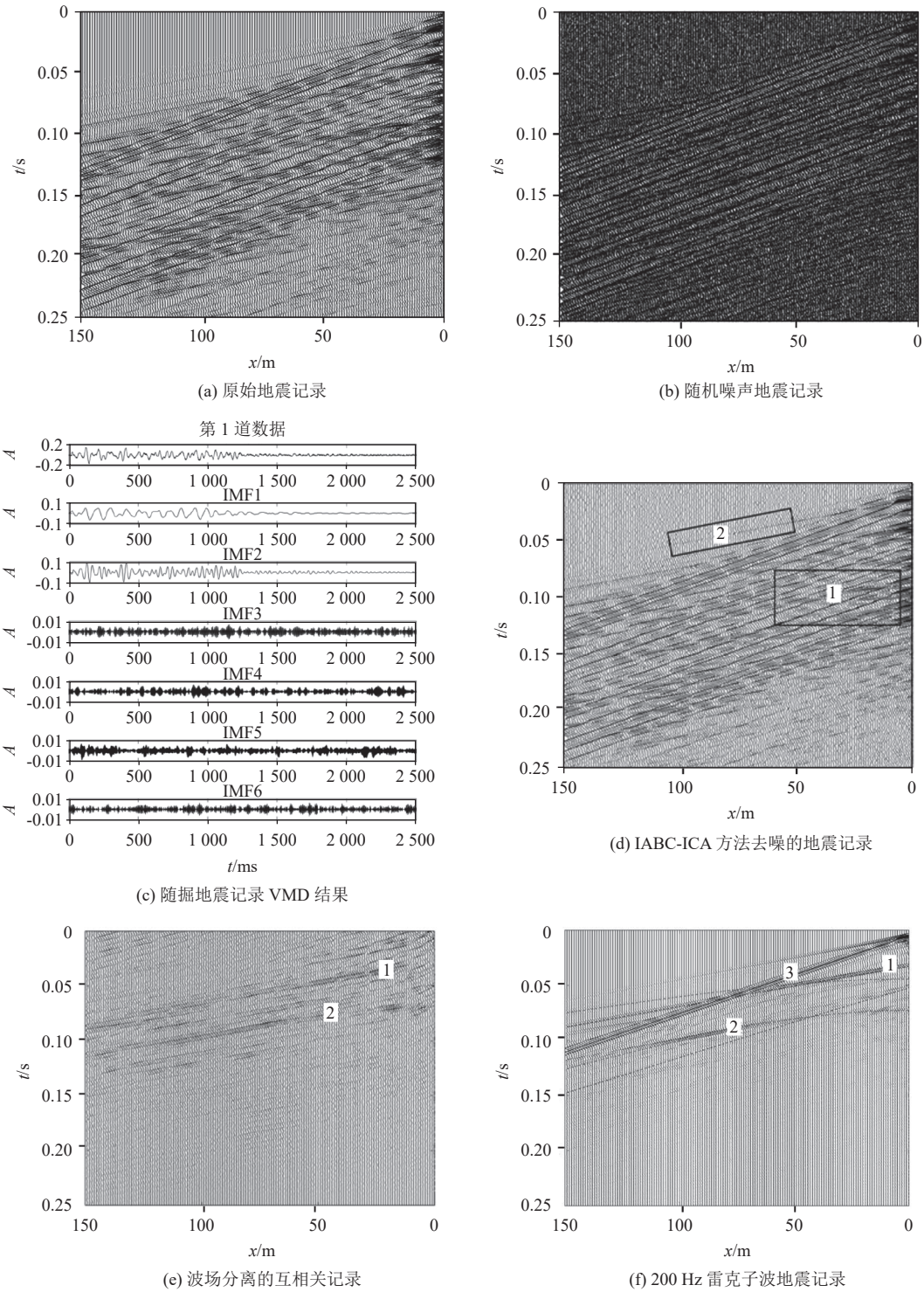


图 5　数值模拟地震记录处理结果

Fig. 5　Processing results of numerical simulation seismic records

YC1 位置也相吻合。结合 51210 胶运顺槽钻探及物探资料分析, 判断异常 SJ-YC2 为断层或破碎带, 根据成像显示, 该异常可能存在于侧帮位置。

通过引入 IABC 算法和优化算法提升了数据处理的精度, 采集数据之后, 每次成像的时间间隔小于 5 min, 实现了全流程数据的快速成图。成像反馈周期远短于掘进机更换截齿或常规停机检修时间, 证明了“随掘随传、分段处理”策略能够实现在不影响掘进进度的间歇期内完成地质解释, 具备一定的工程实用性。

4　结论

针对随掘地震源信号随机性强、强噪干扰严重

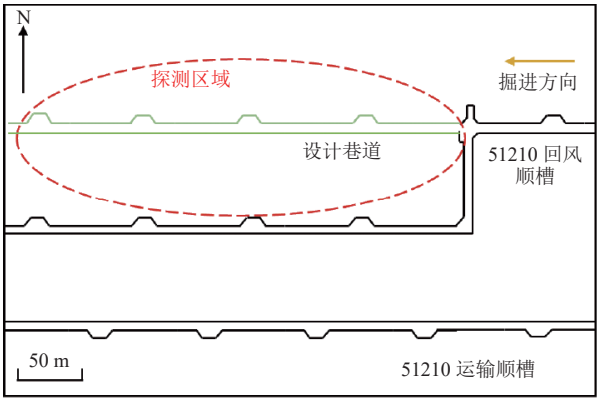


图 6　51210 工作面示意

Fig. 6　51210 working face diagram

的难题，提出了一种基于多算法联合的动态成像探测方法，并构建了含断层构造的数值模拟模型，对该方法的去噪与信号提取效果进行了验证。模拟结果表明，处理后的随掘地震记录能够有效还原清晰的反射波同相轴，验证了该方法在低信噪比环境下还原有效波场的能力以及算法的正确性。在陕西郭家湾煤矿 51210 工作面的井下探测实例验证了该方法的实用性，证明了该方法对井下隐蔽致灾地质因素具有较高的探测精度。

研究表明，随掘地震动态成像探测方法有效克服了传统物探需要中断掘进作业的弊端，实现了“探掘平行”作业模式。该技术能够为煤矿掘进工作面前方及侧帮隐蔽致灾地质因素的实时监测与精细预报提供有力技术支撑，进而有效保障巷道智能化安全快速掘进。

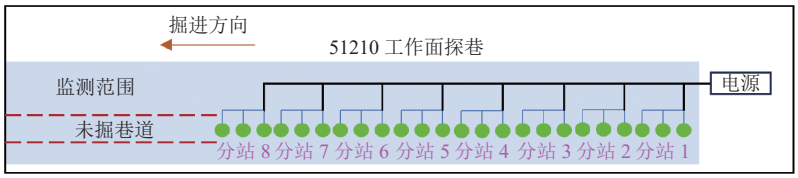
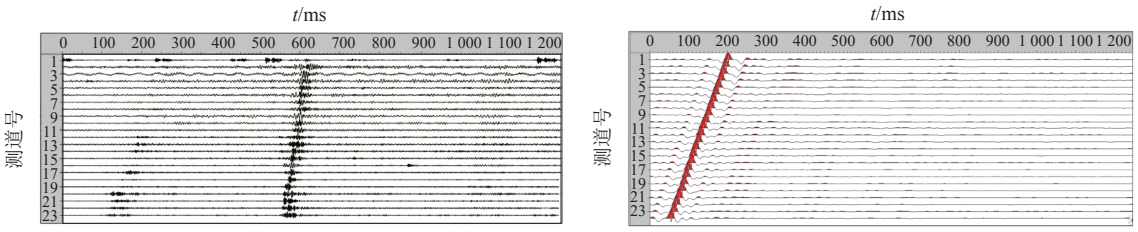


图 7　巷道随掘超前监测系统井下布置情况

Fig. 7　Underground layout of the advance monitoring system for tunneling



(a) 随掘地震原始记录　　(b) 随掘地震的脉冲化剖面

图 8　随掘地震记录处理

Fig. 8　Processing of real-time seismic records during drilling

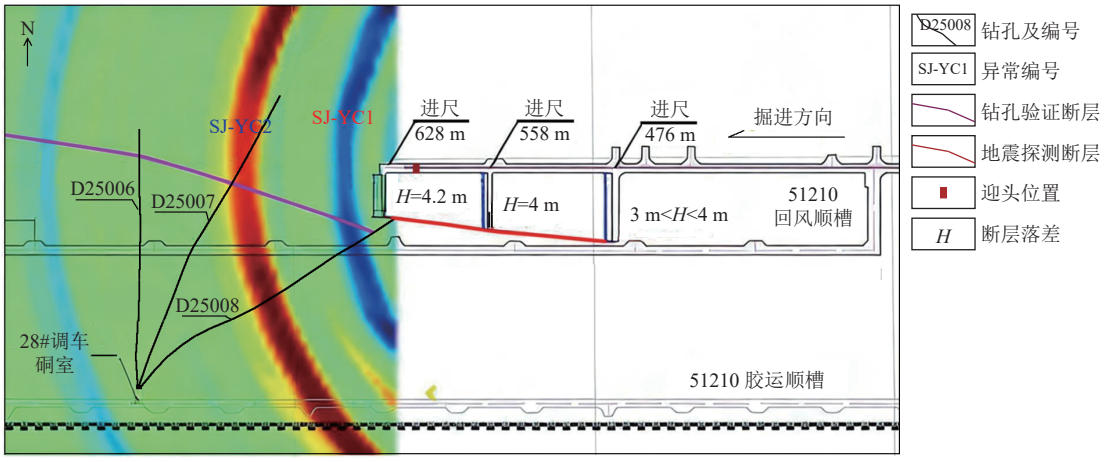


图 9　随掘超前探测成像结果

Fig. 9　Imaging results of advanced detection during excavation

参考文献(References):

[1] 王国法, 杜毅博. 智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 1−10.
Wang G F, Du Y B. Development direction of intelligent coalmine and intelligent mining technology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 1−10.

[2] 刘送永, 徐保龙, 秦立学, 等. 煤矿巷道掘进长距离快速超前钻探工艺策略及配套机具研究 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 229−239.
Liu S Y, Xu B L, Qin L X, et al. Study on long-dis-tance fast advance drilling technology strategy and supportingequipment in coal mine roadway tunneling[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 229−239.

[3] 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 J L, Li F, Peng S P, et al. Research progress and prospect of geophysical advance detection method in mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1742−1750.

[4] 袁亮, 张平松. 煤矿透明地质模型动态重构的关键技术与路径思考 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 1−14.
Yuan L, Zhang P S. Key technologies and path thinking of dynamic reconstruction of transparent geological model in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 1−14.

[5] 程建远, 王保利, 范涛, 等. 煤矿地质透明化典型应用场景及关键技术 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 1−12.
Cheng J Y, Wang B L, Fan T, et al. Typical application scenarios and key technologies of transparent geology in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 1−12.

[6] 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. Physical simulation of Love-type channel wave and its response to faults[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(12): 116−122.

[7] Li L, Huang Y, Qi X. Recognition of small faults in coal fields based on multi-scale seismic curvature attributes fusion[J]. Heliyon, 2023, 9(11).

[8] Zhang J, Xiao W, Li C, et al. Advanced detection for faults in front of coal mine roadways using seismic scattered waves[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 10: 1095297.

[9] 李劲松, 左杰海, 封云杰, 等. 三维地震勘探在赵庄煤矿陷落柱探查中的应用 [J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2015, 20(5): 15−18.
Li J S, Zuo J H, Feng Y J, et al. Application of 3D seismic exploration in detection of collapse column in Zhaozhuang Coal Mine[J]. Journal of Mining And Strata Control Engineering, 2015, 20(5): 15−18.

[10] 王季, 李刚, 吴国庆, 等. 采煤工作面地质异常体透射槽波探测技术 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 159−163.
Wang J, Li G, Wu G Q, et al. Transmission channel wave detection technology for geological anomalous body in coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 159−163.

[11] Dong Q, Cheng J, Li F, et al. Fine detection of water-bearing collapse column based on information fusion of seismic exploration and TEM[J]. Journal of Applied Geophysics, 2022, 206: 104806.

[12] Wu Y, Zhu G, Wang W. Precise prediction of the collapse column based on channel wave spectral disparity characteristics and velocity tomography imaging[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2022, 19(3): 326−335.

[13] 张昭, 殷全增. 不同年限采空区下地震勘探效果实例研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(6): 237−242.
Zhang Z, Yin Q Z. Case study on seismic exploration effect under goaf with different years[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(6): 237−242.

[14] 王季. 反射槽波探测采空巷道的实验与方法 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1879−1885.
Wang J. Experiment and method of reflected channel wave detection in goaf roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1879−1885.

[15] 王强, 田野, 刘欢, 等. 综合物探方法在煤矿采空区探测中的应用 [J]. 物探与化探, 2022, 46(2): 531−536.
Wang Q, Tian Y, Liu H, et al. Application of integrated geophysical methods in coal mine goaf detection[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(2): 531−536.

[16] 赵会波, 覃思, 陈超, 等. 随掘地震地质构造精细监测在山西王坡煤矿的应用 [J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(6): 137−144.
Zhao H B, Qin S, Chen C, et al. Application of fine monitoring of geological structure by seismic while tunneling in Wangpo Coal Mine, Shanxi[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(6): 137−144.

[17] 程建远, 覃思, 陆斌, 等. 煤矿井下随采地震探测技术发展综述 [J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 1−9.
Cheng J Y, Qin S, Lu B, et al. Review on development of seismic while mining detection technology in coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3): 1−9.

[18] 李圣林. 基于随掘地震信号的煤巷超前探测全波形反演方法研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
Li S L. Research on full waveform inversion method of coal roadway advance detection based on seismic while tunneling signal[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022.

[19] 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.
Wang B L, Cheng J Y, Jin D, et al. Study on source characteristics and detection performance of seismic while tunneling in coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(1): 10−19.

[20] 徐帅, 姬广忠, 高亚宽, 等. 随掘地震含断层模型三维数值模拟与波场分析 [J]. 煤矿安全, 2025, 56(6): 155−164.
Xu S, Ji G Z, Gao Y K, et al. Three-dimensional numerical simulation and wave field analysis of seismic while tunneling model containing faults[J]. Safety in Coal Mine, 2025, 56(6): 155−164.

[21] 程久龙, 程鹏, 李亚豪. 基于 IABC-ICA 的随掘地震去噪方法 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 413−422.
Cheng J L, Cheng P, Li Y H. Seismic while tunneling denoising method based on IABC-ICA[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 413−422.

[22] 计子琦, 张学强, 张海江, 等. 基于 VMD 的随掘地震超前探测信号谱白化方法研究 [J]. CT 理论与应用研究, 2021, 30(2): 148−160.

Ji Z Q, Zhang X Q, Zhang H J, et al. Research on spectral whitening method of seismic while tunneling advance detection signal based on VMD[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2021, 30(2): 148−160.

[23] 杨志刚, 马世忠, 田欢. 基于改进人工蜂群算法与随掘超前探测的地震去噪技术研究 [J]. 能源与环保, 2024, 46(11): 81-87.
Yang Z G, Ma S Z, Tian H. Research on seismic denoising technology based on improved artificial bee colony algorithm and seismic while tunneling advance detection[J]. China Energy and Environmental Protection, 2024, 46(11): 81−87.

[24] 王季, 覃思, 陆斌, 等. 基于掘进机随掘震源的巷道侧前方断层成像技术 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 232−237.
Wang J, Qin S, Lu B, et al. Imaging technology of fault in front of roadway side based on roadheader seismic source[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 232−237.

[25] Lu X, Wang J, Wang W, et al. Tunnel seismic detection for tunnel boring machine by joint active and passive source method and imaging advanced prediction[J]. Lithosphere, 2024, 2024(4): 170.

A dynamic imaging method for seismic-while-tunneling detection based on multi-algorithm joint denoising and wavefield separation

GUAN Qi[1, 2], BAO Qian-Zong[1], WU Xue-Fei[2]

(1. *School of Geological Engineering and Geomatics*, *Chang'an University*, *Xi'an* 710054, *China*; 2. *CCTEG Xi'an Research Institute* (*Group*) *Co.*, *Ltd.*, *Xi'an* 710077, *China*)

Abstract: Seismic-while-tunneling (SWT) detection, serving as a pivotal technology for mitigating the imbalance between mining and roadway tunneling in coal mines, enhances the tunneling efficiency by simultaneous seismic detection and roadway tunneling. However, due to constraints such as highly random seismic sources generated by tunnel boring machines and severe interference from strong underground background noise, data denoising and extraction of effective waves have remained as technical challenges. Hence, this study proposes a dynamic imaging method for SWT detection based on multi-algorithm joint denoising and wavefield separation. First, variational mode decomposition is introduced for the multi-scale decomposition and mode selection of raw seismic signals. In combination with the independent component analysis optimized by an improved artificial bee colony algorithm, a joint denoising model is constructed to deeply suppress complex mechanical and electromagnetic noise. Second, based on the cross-correlation principle, continuous random vibration records are reconstructed into virtual pulse source records, and strong direct waves are removed using singular value decomposition, thereby enabling the precise extraction of weak effective reflected waves. Third, the fine-scale characterization of geological structures along the sidewalls and ahead of the roadway is achieved using a diffraction-scanning migration imaging algorithm. By constructing a SWT advance detection model with dimensions of 300 m × 100 m × 200 m using a three-dimensional finite-difference algorithm for elastic waves, this study verified the capability of the proposed method to reconstruct effective wavefields in environments with low signal-to-noise ratios (SNRs). In the field application at mining face 51210 of the Guojiawan coal mine, the proposed method successfully delineated concealed faults along the roadway sidewall, with the interpretation results highly consistent with borehole verification data. Therefore, the proposed method effectively overcomes the challenge of low SNRs in SWT detection, providing robust technical support for the real-time monitoring of hidden disaster-causing factors and intelligent rapid excavation of roadways in coal mines.

Key words: seismic-while-tunneling (SWT); variational mode decomposition; independent component analysis; wavefield separation; advance detection

(本文编辑: 叶佩, 沈效群)