

随掘震电联合超前探测技术在断层探测中的应用

张 涛¹, 郭立全², 高 川¹

¹安徽皖北煤电集团有限责任公司, 安徽 宿州

²安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年12月12日; 录用日期: 2026年1月9日; 发布日期: 2026年1月16日

摘要

随着煤矿开采向深部延伸, 隐伏断层、破碎带及异常含水体等不良地质体成为制约巷道安全高效掘进的重要因素。本研究针对传统单一方法在断层识别中分辨率不足、多解性强的问题, 采用随掘震电联合探测技术, 对巷道前方的断层构建进行精准识别。现场试验表明, 该技术在钱营孜矿瓦斯鉴定巷道成功超前50 m识别落差2.5 m断层。随掘震电联合超前探测技术为巷道智能掘进提供了可靠的地质保障。

关键词

随掘, 超前探测, 断层

Application of Combined Seismic and Electrical Advanced Detection Technology during Tunneling in Fault Detection

Tao Zhang¹, Liquan Guo², Chuan Gao¹

¹Anhui Wanbei Coal and Electricity Group Co., Ltd., Suzhou Anhui

²School of Geoscience and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: December 12, 2025; accepted: January 9, 2026; published: January 16, 2026

Abstract

As coal mining progresses deeper, adverse geological bodies such as concealed faults, fracture zones, and abnormal water-bearing bodies have become important factors restricting the safe and efficient tunneling of roadways. To address the problems of insufficient resolution and strong non-uniqueness of traditional single methods in fault identification, this study uses the seismic-electric

combined detection technology while tunneling to accurately identify the fault structure in front of the roadway. Field tests show that this technology successfully identified a fault with a throw of 2.5 m 50 m ahead in the gas identification roadway of Qianyingzi Mine. The seismic-electric combined advanced detection technology while tunneling provides reliable geological support for the intelligent tunneling of roadways.

Keywords

While Driving Digging, Advanced Detection, Fault

Copyright © 2026 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

煤矿巷道掘进过程中，隐伏断层、破碎带及异常含水体是诱发突水、冒顶、瓦斯异常涌出等重大灾害的主要地质因素[1]-[3]。传统地震超前探测受限于人工震源能量弱、观测系统稀疏，对断层识别能力有限[4] [5]；单一电法探测则受全空间效应与电阻率多解性影响，难以准确刻画断层界面[6] [7]。

随掘地震技术利用掘进机破岩振动作为震源，利用侧帮布设炮检观测系统接收震波信号，实现了“边掘边探”。近年已在隧道及煤矿巷道取得初步应用，PETRONIO 等率先研究随掘振动信号进行有效波提取的可能性[8]；张平松团队在随掘地震超前探测技术应用研究方面开展了大量的研究[9]；但对断层界面的刻画仍停留在“有无”定性阶段，缺乏对断层落差、倾角、导水性的定量描述[10]。

随掘电法技术利用布设在后方侧帮上的发射电极，建立巷道前方的电场，同时利用接收电极采集巷道前方的岩层电性信号，通过数据处理与成像，连续地探测前方地质情况[11] [12]，可以有效对巷道前方的含水异常进行超前预报。近年来随掘电法研究主要以理论模拟为主，KAUS 等开展了隧道聚焦电流超前探测研究[13]；李术才等开展多同性源阵列电阻率法物理模拟研究[14]；赵栓峰等开展井下盾构随掘电法的超前探测正演响应分析[15]，但在工程应用方面缺乏一定的研究。

由于单一探测技术存在精度不足、多解性等问题制约了其在断层探测中的应用。为此，本文提出一种随掘震电联合超前探测技术，增强对前方断层的探测准确率，并在现场开展试验验证，研究成果可为煤矿透明掘进提供新的技术支撑，对提高我国深部煤炭资源安全开采水平具有重要意义。

2. 方法原理

随掘震电联合探测技术采用布设在巷道侧帮上的震电一体化传感器，同步采集盾构破岩振动信号和感应电场信号，通过对地震、电法有效数据提取，进而进行超前成像，实现对巷道前方超前预报。图 1 为随掘震电联合探测示意图。

2.1. 互相关计算公式

由于采集到的实测地震数据是连续随机信号，无法直接使用，实际处理时常采用互相关法进行单炮地震记录的提取[16]，其表达式可表示为：

$$C_{12}(A, B, t) = \int_0^T G(B, \tau) \cdot G(A, \tau - t) d\tau \quad (1)$$

式中， $C_{12}(A, B, t)$ 接收点 A 与 B 之间的互相关函数， $G(B, \tau)$ 表示接收点 B 记录的地震波场， $G(A, \tau - t)$

表示接收点 A 记录的波场, t 为滞后时间; T 为记录总时长。

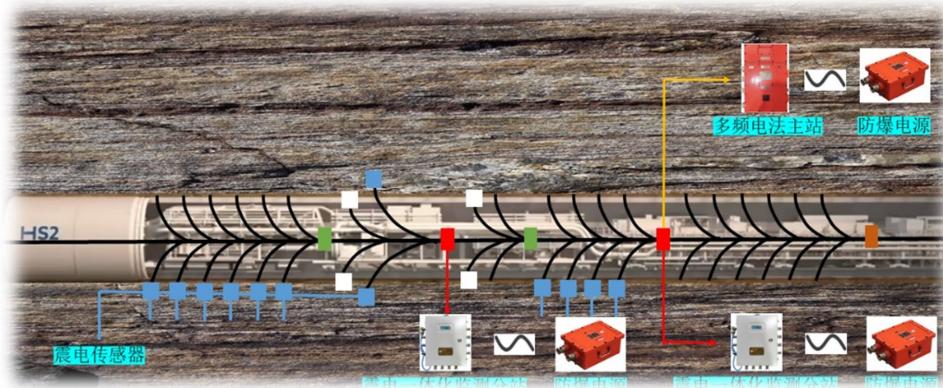


Figure 1. Schematic diagram of combined seismic and electrical exploration during excavation
图 1. 随掘震电联合探测示意图

2.2. 叠前偏移成像

经过脉冲化处理的地震数据可以进行后续的偏移成像, 如叠前绕射偏移成像, 其中绕射偏移理论是基于均匀速度模型, 以炮点 $S(x, z)$ 和检波点 $R(x, z)$ 作为焦点, 反射点 $P(x, z)$ 位于椭圆边界上, 对于任意一对炮检对, 通过射线追踪出路径和旅行时间, 然后叠加求取公共椭球共切面即反射异常体界面位置[17]。

$$\frac{X_p^2}{L_p^2 - 4Z_s^2} + \frac{Z_p^2}{L_p^2} = \frac{1}{4} \quad (2)$$

其中, X_p 、 Z_p ——反射点坐标; L_p ——射线路径长度, Z_s ——震源距坐标原点的长度。

式(2)是以炮点和接收点为焦点, 反射点为半径的椭圆面上, 其运动轨迹如图 2 所示。

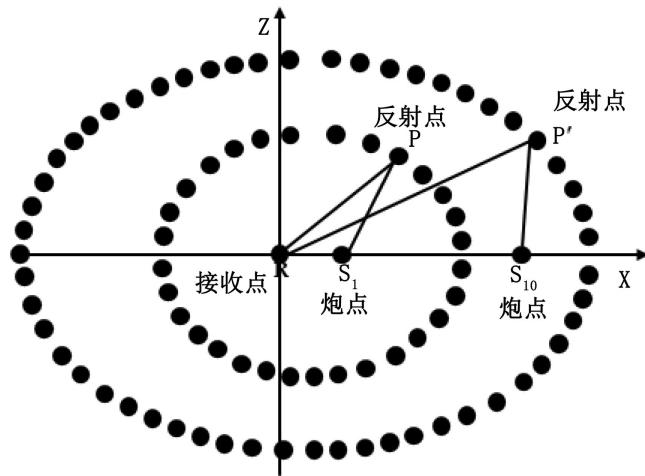


Figure 2. Two-dimensional ellipsoidal diffraction migration [17]
图 2. 二维椭球绕射偏移[17]

2.3. 随掘地震数据处理流程

随掘地震数据处理包含掘进时段数据选取、虚拟炮集提取、去噪、成像等 4 部分, 具体流程见图 3。

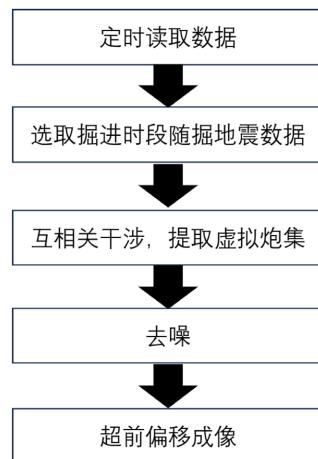


Figure 3. Seismic data processing workflow during drilling
图 3. 随掘地震数据处理流程

3. 现场试验

3.1. 巷道地质概况

钱营孜煤矿II北一采区瓦斯鉴定巷位于北一采区东部，范围内北侧邻近45勘探线，南至北一采区轨道上山，巷道设计长度2200 m。掘进区段巷道位于3₂煤层下方施工，岩性主要为二叠系泥岩、粉砂岩、细砂岩，预计施工巷道与上方3₂煤层间距24~50 m范围。掘进巷道煤岩层总体上为一走向近南北向，倾向东倾斜的单斜构造，断层较发育，构造复杂程度简单。掘进区段内发育2条断层，受断层影响，岩层产状变化大，断层附近岩层破碎，裂隙较发育。圆形断面(直径4.88 m)，锚网支护(地质复杂段加锚索)。

3.2. 观测系统布设

在掘进期间不间断接收的信号有：滚刀破岩的震源信号，岩体中前方地震反射波，巷道顶底板层位反射波。振动传感器布置如下(图4)：

- (1) 滚刀破岩震源信号：三分量振动传感器(1只)，布置在刀盘后侧电机主轴附近；
- (2) 岩体反射地震信号：单分量振动传感器(16只)，布置在帮部孔中，呈线性排列；
- (3) 机体辅助信号：左右撑靴布置三分量传感器(2只)。

在巷道线性布置16个发射接收电极，1个无究远WN参考电极，1个WB公共发射电极，采用多频电场发射和接收方式。传感器布置如下：

- (1) 整体观测线性，自迎头向后布置；
- (2) 巷道帮部岩体测点16个，点间距4 m，每个测点采用震电一体化传感器；
- (3) 电法WN参考点1个，WB发射电极1个。

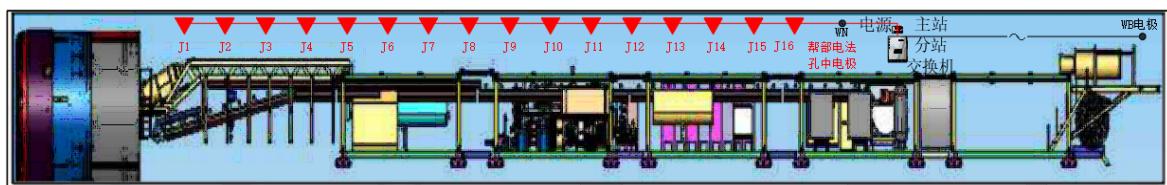


Figure 4. Schematic diagram of on-site construction layout
图 4. 现场施工布置示意图

3.3. 数据采集

自系统安装在 2024 年 6 月 17 日完成后进入系统运行和数据采集阶段。数据采集模式为持续监测采集方式, 与盾构掘进同步, 不影响盾构掘进。采集的数据有(图 5):

- (1) 接收测点布置里程坐标、测站配置;
- (2) 每班次盾构掘进循环信息(时间、里程)及盾构工况;
- (3) 连续采集盾构刀盘附近振动信号;
- (4) 连续采集帮部岩体中振动信号;
- (5) 帮部岩体中多频电法信号。

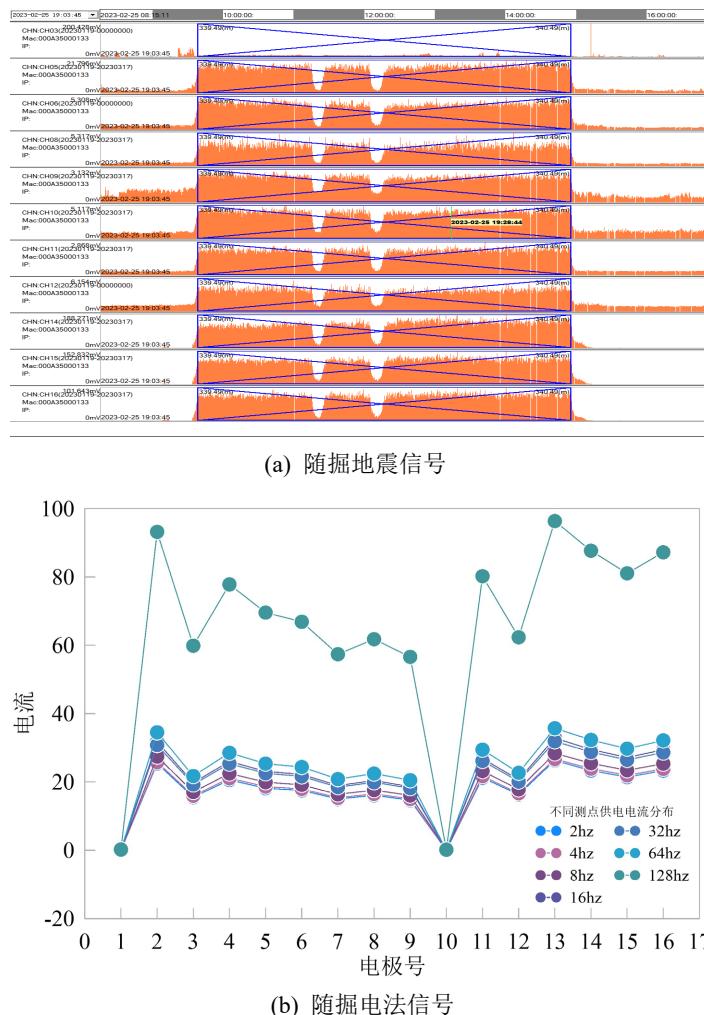


Figure 5. Measured seismic signals and multi-frequency electrical signals during excavation on a particular day
图 5. 某日实测随掘地震信号与多频电法信号

3.4. 数据处理与结果分析

根据 2024 年 8 月 1 日随掘地震偏移结果, 在迎头前方 48.8 m 形成偏移高能量区, 编号为 1#异常区, 随后在至 2024 年 8 月 9 日的随掘地震偏移结果平面图中, 异常区范围一直稳定分布在里程 264~278.6 m 段。如图 6 所示。

根据随掘电法探测成果，迎头前往探测范围整体视电阻率较高，无低于 $30 \Omega \cdot m$ 的相对低阻区，随掘电法未解释富水性异常区。如图 7 所示。

根据巷道掘进实际揭露结果，2024 年 8 月 9 日，巷道实际存在里程 271.6 m 揭露断层 FW-1 ($111^\circ \angle 70^\circ H = 2.5 m$)。

异常实际揭露位置与预报位置吻合。

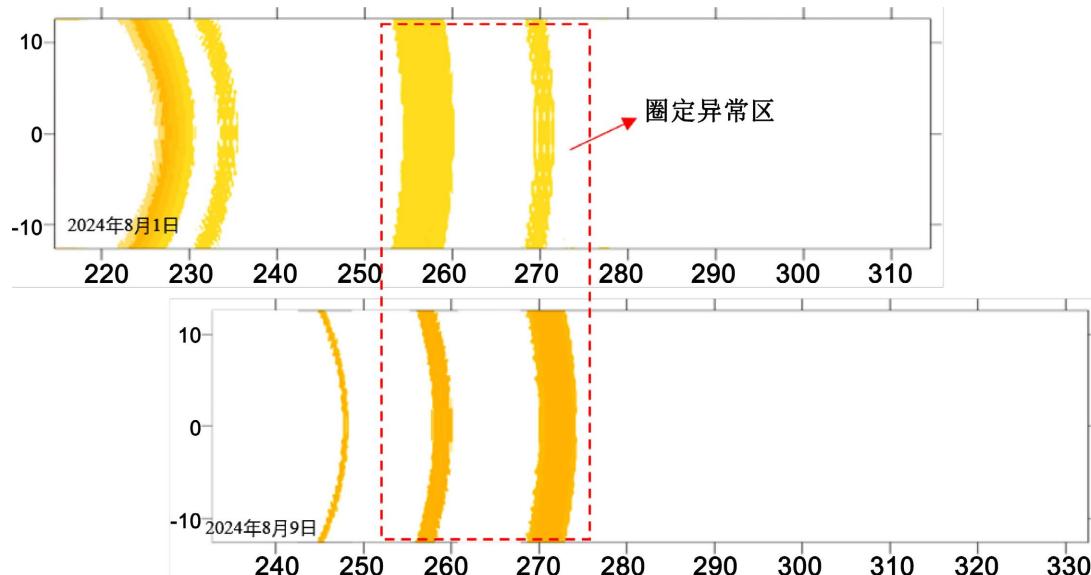


Figure 6. Plan view of seismic offset results during excavation from August 1st to August 9th, 2024
图 6. 2024 年 8 月 1 日至 8 月 9 日随掘地震偏移结果平面图

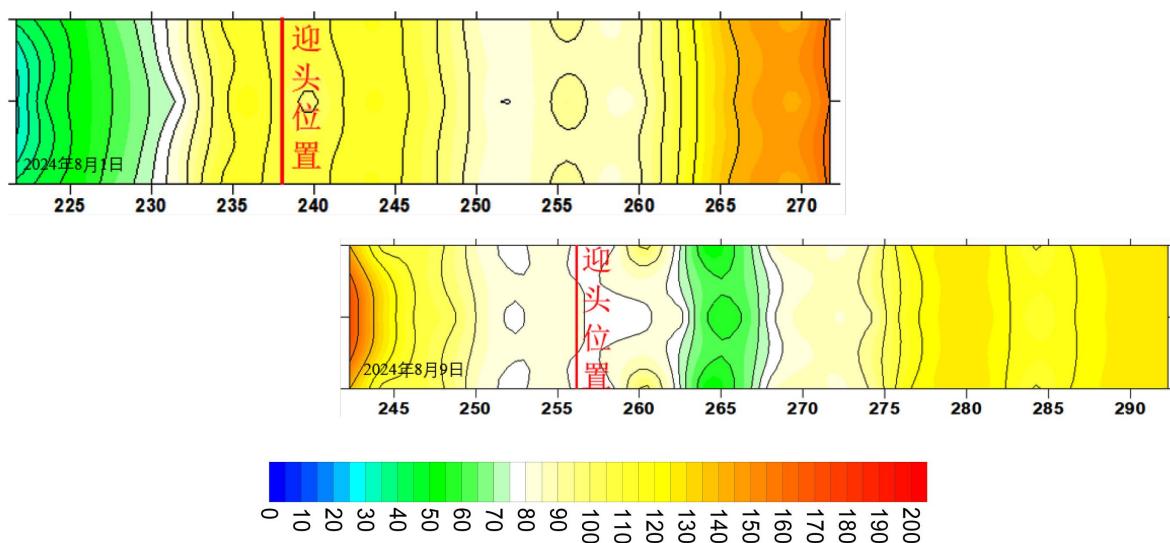


Figure 7. Results of the electrical resistivity survey conducted during excavation from August 1st to August 9th, 2024
图 7. 2024 年 8 月 1 日至 8 月 9 日随掘电法探测成果图

4. 结论

探测结果表明，在巷道掘进期间，采用连续随掘震电超前探测技术可以准确对巷道前方存在的断层

及含水构造进行精准预报，为盾构安全掘进提供重要支撑。

参考文献

- [1] 许献磊, 朱小松, 李涛涛, 等. 矿井钻孔雷达定向探测技术研究[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(1): 14-23.
- [2] 宁小亮. 2013-2018年全国煤矿事故规律分析及对策研究[J]. 工矿自动化, 2020, 46(7): 34-41.
- [3] 彭苏萍, 许献磊. 煤矿隐蔽致灾地质因素探测技术现状与趋势[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2025, 45(5): 78-86.
- [4] 王晓康, 路拓. 地震超前探测技术在老窑采空区探测中的模拟与应用[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(3): 67-71+82.
- [5] 范创, 常永峰, 罗鹏. 地震反射(槽)波在煤矿掘进巷道超前探测中的应用[J]. 山东煤炭科技, 2019(2): 169-171.
- [6] 韩德品, 李丹, 程久龙, 等. 超前探测灾害性含导水地质构造的直流电法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 635-639.
- [7] 胡荣杰, 刘盛东, 童世杰, 等. 孔巷联合并行电法超前探测技术研究[J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(6): 68-71.
- [8] Petronio, L. and Poletto, F. (2002) Seismic-While-Drilling by Using Tunnel Boring Machine Noise. *Geophysics*, **67**, 1798-1809.
- [9] 周继生, 邱实, 贺世芳, 等. 矿井岩巷TBM随掘地震超前探测技术在张集矿应用研究[J]. 煤炭技术, 2025, 44(11): 57-60.
- [10] 朱昌淮, 胡雄武, 周继生, 等. 煤矿巷道TBM随掘震电监测系统开发与试验[J]. 科技和产业, 2025, 25(16): 47-55.
- [11] 史良伟, 吴荣新, 缪长军, 等. 巷道前方地质异常八点电源电法随掘探测响应[J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(9): 61-68.
- [12] 汪勇辰. 巷道掘进震电数据综合处理与异常判识研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽理工大学, 2025.
- [13] Kaus, A. and Boenng, W. (2008) BEAM-Geoelectrical Ahead Monitoring for TBM-Drives. *Geomechanics and Tunneling*, **1**, 442-449.
- [14] 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.
- [15] 赵栓峰, 拜云瑞, 黄涛, 等. 基于移动阵列电极的盾构超前探测正演响应分析[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(1): 214-220.
- [16] 戚婷婷, 李磊, 陈浩. 基于瞬时相位的微地震干涉定位方法研究[J]. 地球物理学报, 2022, 65(5): 1753-1768.
- [17] 郭立全. 矿井巷道震波超前探测系统研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽理工大学, 2008.