

倾斜煤层工作面地质异常无线电波透视探测 数据处理方法研究

徐 伟^{1*}, 吴荣新^{1,2}

¹安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

²深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年6月30日; 录用日期: 2025年7月30日; 发布日期: 2025年8月8日

摘 要

在倾斜煤层工作面无线电波探测的吸收系数反演过程中, 初始场强值的设定方式对地质异常体识别精度存在重要影响。为实现精细探测煤层工作面地质异常区, 本研究对比分析初始场强值定参处理与不定参处理的效果差异, 通过数值模拟构建典型地质模型, 并结合顾北矿13521工作面实际案例进行验证。研究以130 dB为典型初始场强值进行定参后进行接收场强值吸收反演成像。数值模拟与实际工程验证结果表明: 未定参处理吸收系数反演成像易产生假异常区, 导致实际异常区与正常煤层吸收系数数值区分度低; 采用定参处理后, 异常区吸收系数值显著高于正常煤层, 可精准界定异常边界, 解释结果与实际地质模型构造和实际工作面回采验证均较为吻合。该技术有效克服传统方法缺陷, 为煤层地质异常区精细探测提供可靠方案, 对倾斜煤层工作面的安全高效生产提供了地质保障依据。

关键词

无线电波透视, 吸收系数, 煤层工作面, 数值模拟, 反演成像

Study on Data Processing Method of Radio Wave Perspective Detection of Geological Anomalies in Inclined Coal Seam Working Face

Wei Xu^{1*}, Rongxin Wu^{1,2}

¹School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

²State Key Laboratory for Safe Mining of Deep Coal Resources and Environment Protection, Huainan Anhui

Received: Jun. 30th, 2025; accepted: Jul. 30th, 2025; published: Aug. 8th, 2025

*第一作者。

文章引用: 徐伟, 吴荣新. 倾斜煤层工作面地质异常无线电波透视探测数据处理方法研究[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(8): 1137-1146. DOI: 10.12677/ag.2025.158106

Abstract

In the process of inversion for the absorption coefficient of radio wave detection in inclined coal seam working faces, the method of setting the initial field strength significantly affects the accuracy of identifying geological anomalies. To achieve precise detection of geological anomaly zones in coal seam working faces, this study compares the effects of parameterized and non-parameterized processing of initial field strength values. Through numerical simulation, a typical geological model is constructed, and the results are validated using the actual case of the 13521 working face at Gu Bei Mine. The study uses 130 dB as the typical initial field strength value for parameterized processing and then performs receiver field strength value absorption inversion imaging. Numerical simulations and practical engineering validation show that non-parameterized processing of the absorption coefficient inversion imaging can easily produce false anomaly zones, leading to low differentiation between actual anomaly zones and normal coal seam absorption coefficient values. After parameterized processing, the absorption coefficient values of anomaly zones are significantly higher than those of normal coal seams, allowing for precise boundary definition of anomalies. The interpretation results are consistent with the actual geological model construction and the validation of the actual working face mining. This technology effectively overcomes the shortcomings of traditional methods, providing a reliable solution for the precise detection of geological anomaly zones in coal seams, and offering a geological basis for the safe and efficient production of inclined coal seam working faces.

Keywords

Radio Wave Perspective, Absorption Coefficient, Coal Seam Working Face, Numerical Simulation, Inversion Imaging

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

在煤炭开采过程中, 采煤工作面常发育断层、薄煤区等地质异常区域, 这些异常体不仅制约煤炭资源采出率, 降低开采经济效益, 更对矿井安全生产及人员生命安全构成潜在威胁。精准识别工作面地质异常体, 已成为实现煤炭智能化高效开采的关键前提[1]-[5]。矿山地球物理探测技术凭借其低成本、高效率的优势, 在地质勘探领域得到广泛应用。其中, 无线电波透视技术因设备便携、非侵入式探测及高分辨率成像等特性, 成为当前国内外煤矿工作面地质构造精细探测的主流技术手段[6]-[11]。

在无线电波透视资料解释中, 核心参数为实测场强值与煤岩层电磁波能量吸收系数。当前无线电波透视探测数据处理过程中, 通常仅依托接收巷道内接收机获取的实测场强数据, 初始场强值及电磁波吸收系数多基于该实测数据通过回归计算确定。然而, 受限于无线电波透视场强在工作面的数据源检距差异较小, 且受地质异常体及各类干扰因素影响, 正常煤层段透视场强值变化幅度显著收窄, 未呈现典型的“中间高两侧低”曲线形态特征[12], 在无线电波透视数据处理中, 通过实测场强值回归分析获取的初始场强值常呈现低值甚至负值特征, 致使层析成像技术效果显著弱化, 地质异常区识别与定位难度大幅增加。鉴于当前无线电波透视法获取的初始场强值多介于 110 至 155 dB 区间, 基于工作面发射点周边场强实测数据统计分析表明, 130 dB 的初始场强值可作为电磁波吸收系数反演成像的典型特征参数[13]。

在倾斜煤层工作面中, 受周边地质环境条件的制约, 无线电波探测不同点位的初始场强值呈现差异性变化, 致使吸收系数反演成像结果难以直观精准地厘定地质异常区边界。基于此, 本文通过开展数值模拟研究与工程实例分析, 对倾斜煤层工作面地质异常体的无线电波透视探测问题进行了系统性研究, 实现对地质异常区域的精准圈定。

2. 煤层无线电波坑道探测基本原理

无线电波透视法基本原理

电磁波在地下岩层中传播时, 由于各种岩、矿石电性的不同, 它们对电磁波能量吸收不同, 低阻岩层对电磁波具有较强的吸收作用, 当波前进方向遇到断裂构造所出现的界面时, 电磁波将在界面上产生反射和折射作用, 从而造成能量的损耗。因此, 在矿井下, 电磁波穿过煤层途中遇到断层、陷落柱或其它构造时, 波能量被吸收或完全被屏蔽, 则在接收巷道收到微弱信号或收不到透射信号, 形成所谓的透视异常。研究采区煤层、各种构造及地质体对电磁波的影响所造成的各种无线电波透视异常, 从而进行地质推断和解释[14]。

在各向同性、均匀介质中传播的过程中, 在距离发射源点径向距离为 r 的位置, 对应的场强值 E 可表示为[15]:

$$E = E_0 \frac{e^{-\beta r}}{r} \sin \theta \quad (1)$$

式中 E 为传播介质内距发射点径向距离 r 处的实测场强值, μV ; E_0 为电磁波发射端初始场强, μV ; β 为传播介质的吸收系数, dB/m ; r 为发射点距接收点之间的距离, m ; $\sin \theta$ 为方向性因子, θ 为发射天线轴与观测点方向之间的夹角。

在实际工作面现场进行电磁波探测时, θ 可近似取 90° , 场强值计算公式相应简化为:

$$E = E_0 \frac{e^{-\beta r}}{r} \quad (2)$$

从式(2)能够看出, 实测场强值 E 的大小会根据 r 和 β 的变化而改变。

3. 三维数值模拟实验

3.1. 建立煤层工作面模型

鉴于煤层倾角大多不超过 30° , 其对无线电波透视场强数值未产生显著作用, 因此构建水平煤层的三维地电模型[16]。建立水平煤层工作面模型, 设置宽度为 200 m , 走向长度为 700 m , 煤厚为 3 m , 煤层, 顶底板电性参数如表 1 所示。发射点间距 80 m , 每个发射点设置 17 个接收点, 接收点间距 10 m 。建立水平正常煤层工作面(图 1), 含斜向断层水平煤层工作面(图 2), 含薄煤区水平煤层工作面(图 3)。工作频率选择 0.158 MHz , 分别在 1 巷和 2 巷进行发射。设定 1 巷为风巷; 2 巷道为机巷。

3.2. 水平正常煤层模拟

本研究建立水平原生煤层地质模型(图 1), 依托数值模拟计算与井下实测数据, 采用 Matlab (Matrix Laboratory)软件对模拟结果实施数据处理。通过将随机噪声与背景场强值叠加运算, 绘制水平煤层总场强分布曲线(图 4)。分析结果显示, 总场强值分布区间为 $35.2\sim 42.3\text{ dB}$ 。对两巷接收的场强数据进行吸收系数反演成像(图 5(a)), 结果显示煤层工作面存在吸收系数高值区域, 范围为 $0.042\sim 0.048\text{ a}/(\text{dB}\cdot\text{m}^{-1})$, 而周边煤层区域吸收系数值为 $0.012\sim 0.024\text{ a}/(\text{dB}\cdot\text{m}^{-1})$, 产生与实际地质情况不符的假异常区域。采用定参数

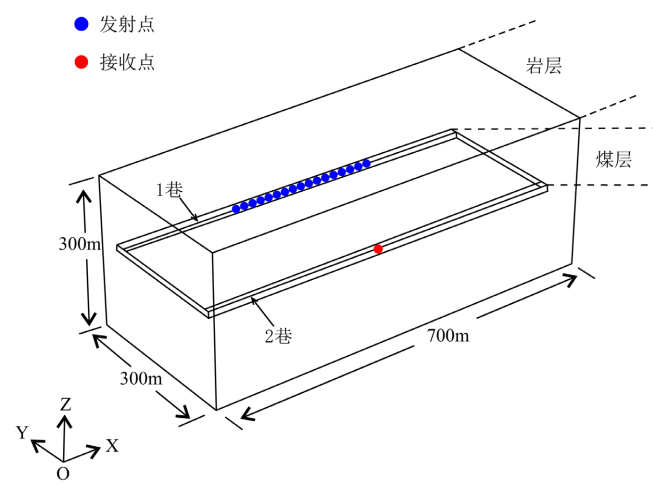


Figure 1. Normal coal seam working face model with horizontal
图 1. 水平正常煤层工作面模型

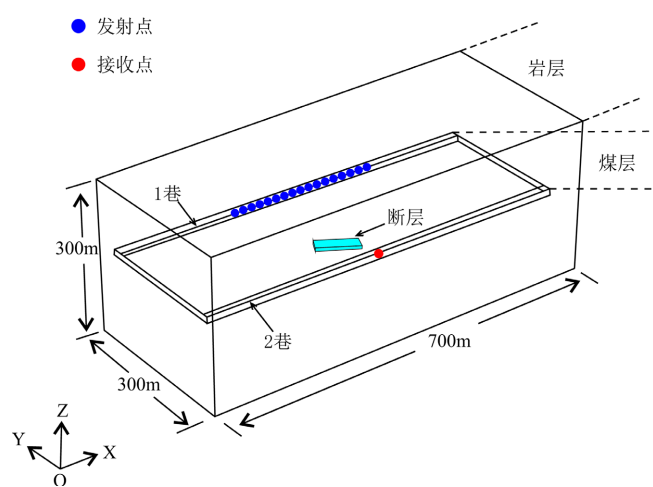


Figure 2. Model of faulted horizontal coal seam working faces
图 2. 含断层水平煤层工作面模型

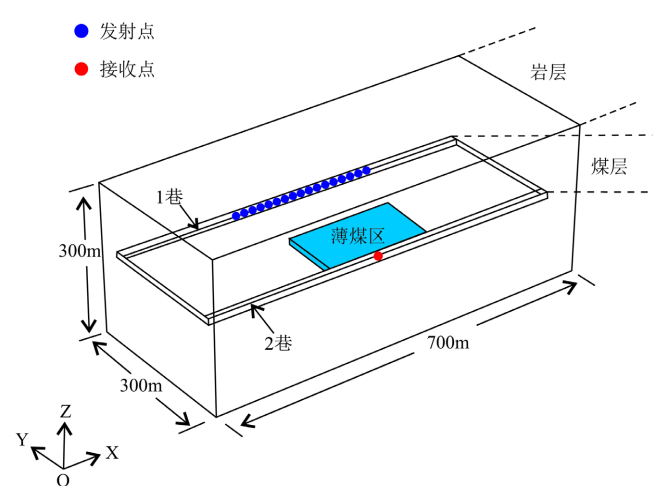


Figure 3. Model of horizontal coal seam working face in thin coal area
图 3. 含薄煤区水平煤层工作面模型

Table 1. Model media parameters table
表 1. 模型介质参数表

介质	相对介电常数 $\epsilon_r / (\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	电阻率 $\rho / (\Omega \cdot \text{m})$	相对磁导率 $\mu_r / (\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$
煤层	3	2000	1
顶底板	15	50	1
断层	15	50	1
薄煤区	3	2000	1

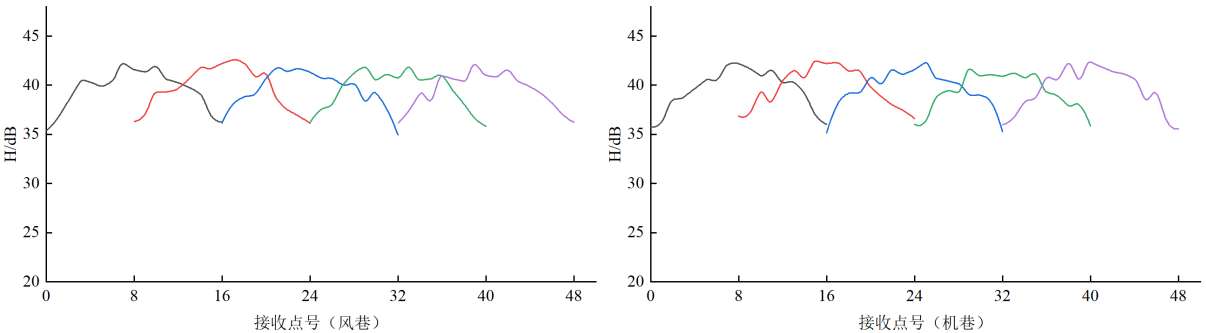


Figure 4. Total field strength curve of normal coal seam
图 4. 正常煤层总场强值曲线图

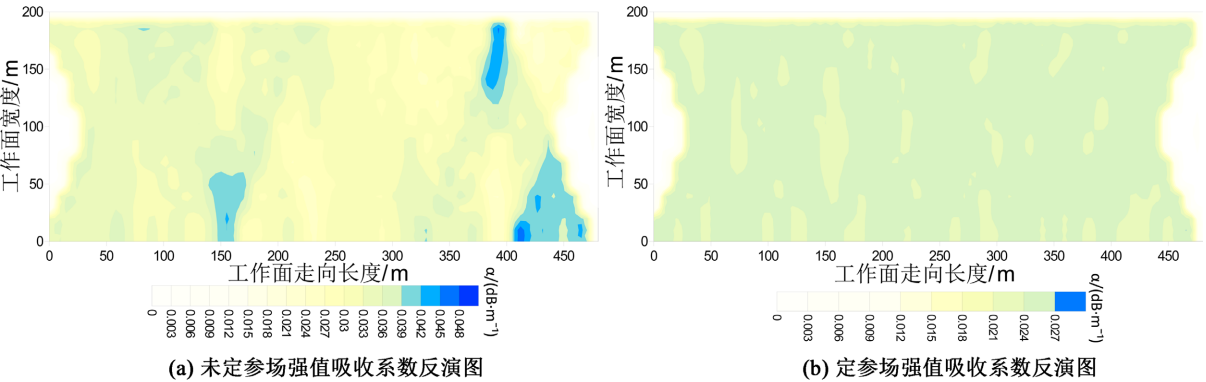


Figure 5. Inversion map of total field strength value and absorption coefficient of horizontal coal seam
图 5. 水平煤层总场强值吸收系数反演图

据处理方法进行吸收系数反演成像(见图 5(b)), 结果显示煤层吸收系数稳定在 $0.012 \sim 0.024 \alpha/(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$, 未发现异常区域。对比分析表明, 该方法可准确反映煤层真实赋存状态, 有效识别无异常区域。研究结果表明, 在原生煤层模拟工况下, 通过定参处理实施吸收系数反演成像, 能够有效揭示地质构造特征, 与实际地质模型构造具有良好的吻合度, 验证了该方法在地质无线电波探测中对煤层异常区域识别的有效性。

3.3. 含断层水平煤层模拟

建立含断层煤层模型(图 2), 结合实际地质情况加噪处理, 得到了总场强曲线图(图 6)。对于风巷接收场强值一侧含断层区场强值普遍降低 $11 \sim 15 \text{ dB}$, 信噪比高, 具有明显的异常响应特征。机巷接收场强值一侧含断层区场强值普遍降低 $8 \sim 15 \text{ dB}$, 场强值普遍在 $30 \sim 42 \text{ dB}$ 之间, 信噪比高, 具有明显的异常响应特征。将两侧巷道接收场强值反演成像(图 7(a)), 可发现靠风巷道一侧和靠机巷道一侧附近煤层吸收系

数值仍较周围偏大, 在 $0.1 \sim 0.12 \alpha/(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$, 而含断层附近煤层吸收系数值接近都在 $0.02 \sim 0.05 \alpha/(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$, 与实际地质情况不一致。通过定参后接收场强值吸收系数反演成像处理(图 7(b))。通过对比分析, 定参处理后接收场强值吸收系数反演成像圈定的异常区范围吸收系数值为 $0.034 \sim 0.036 \alpha/(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$, 而周围煤层吸收系数值在 $0.01 \sim 0.026 \alpha/(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$ 。说明数值模拟断层情况下, 通过定参处理后接收场强值吸收系数反演可有效降低不同点位初始场强值变化导致的吸收系数反演成像形成附近假异常区影响并可有效圈定断层异常区范围。

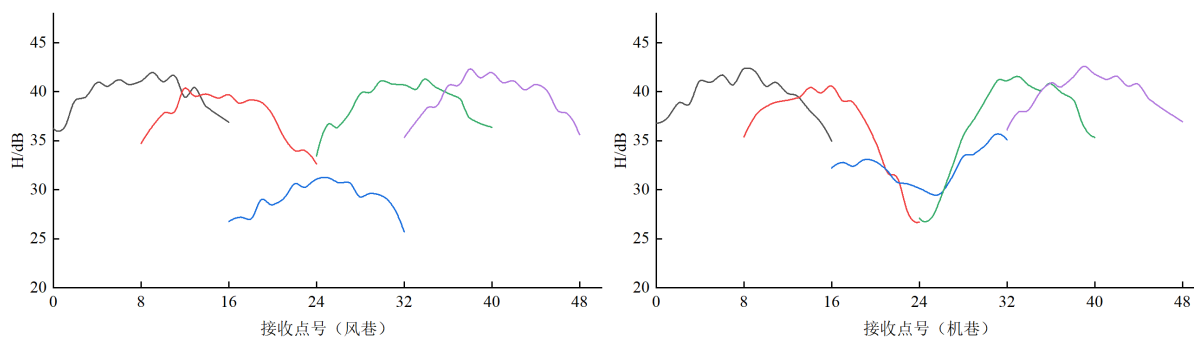


Figure 6. Total field strength curve of faulted coal seam

图 6. 含断层煤层总场强值曲线图

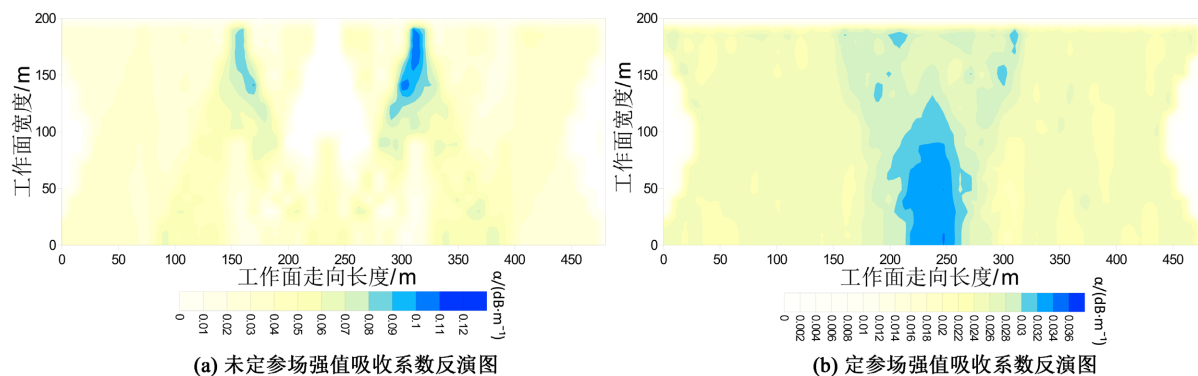


Figure 7. The inversion diagram of total field strength value and absorption coefficient with fault is shown

图 7. 含断层总场强值吸收系数反演图

3.4. 含薄煤区水平煤层模拟

为研究薄煤区对地质无线电波探测的影响, 本研究构建含薄煤区的煤层地质模型(图 3), 基于已有的数值模拟方法与噪声叠加技术, 得到总场强曲线图(图 8)。研究数据表明, 在机巷发射风巷接收时, 总场强波动范围为 $30.2 \sim 42 \text{ dB}$, 具备较高信噪比; 而风巷发射机巷接收时, 总场强范围处于 $32 \sim 41 \text{ dB}$, 同样具备较高信噪比。进一步分析发现, 薄煤区对无线电波传播产生较为明显影响, 致使两侧巷道接收场强平均降低 $5 \sim 8 \text{ dB}$, 形成明显的异常响应特征。通过对两侧巷道接收的场强数据进行吸收系数反演成像(图 9(a)), 结果显示靠近巷道区域出现吸收系数高值区, 其值在 $(0.04 \sim 0.048 \alpha/(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}))$, 该结果与实际地质情况存在偏差, 形成假异常区域; 而实际薄煤区的吸收系数值为 $0.02 \sim 0.036 \alpha/(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$ 。采用定参处理技术对接收场强数据进行吸收系数反演成像(图 9(b)), 实际薄煤区吸收系数值为 $0.028 \sim 0.032 \alpha/(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$, 正常煤层区则为 $0.014 \sim 0.022 \alpha/(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$, 薄煤区与正常煤层的吸收系数值差异显著, 可有效识别薄煤异常区域。对比分析表明, 基于定参处理的吸收系数反演成像方法, 能够更精准地定位与圈定薄煤区范围, 显

著提升了地质无线电波探测对薄煤异常体的识别精度与可靠性。

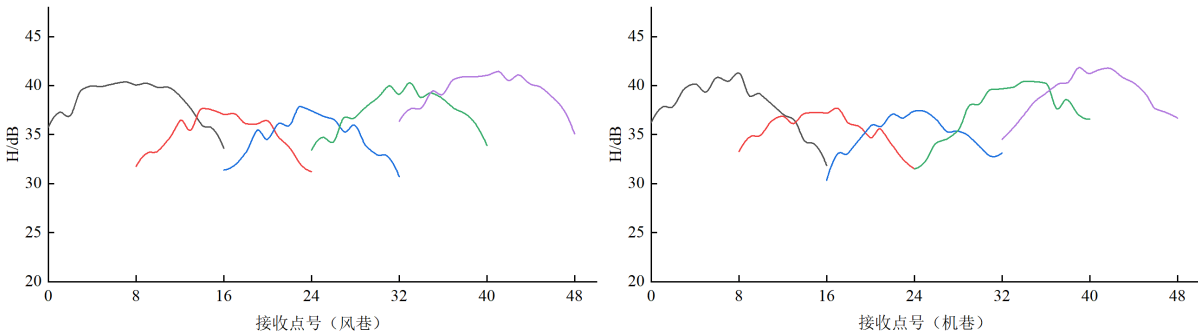


Figure 8. Curve of total field strength value in thin coal area
图 8. 含薄煤区煤层总场强值曲线图

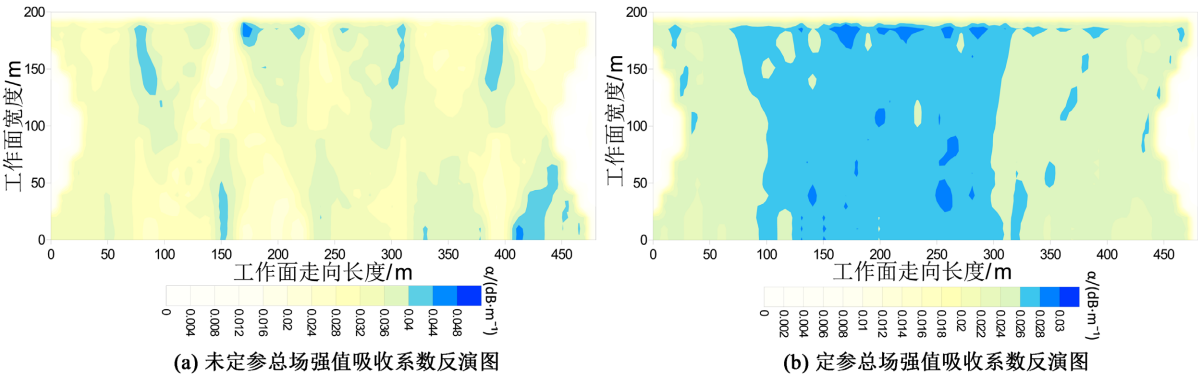


Figure 9. The inversion map of total field strength value absorption coefficient in thin coal area is shown
图 9. 含薄煤区总场强值吸收系数反演图

4. 工程应用案例

4.1. 工作面概况及数据采集

顾北矿 13521 工作面标高-465~-599.5 m, 工作面走向长 1628 m, 倾斜长 210.5 m, 工作面内 1 煤层总厚度平均 7.6 m, 1 煤层为黑色粒状, 粉末状为主。13521 工作面总体构造形态为一单斜构造, 煤层走向近南北, 平均倾角 4°, 工作面回风巷及胶带机巷揭露断层落差 h 大于 1 m 的有 4 条: F1 ($h = 8.6$ m)、F2 ($h = 9.2$ m)、F3 ($h = 1.1$ m)、F4 ($h = 1.7$ m), 工作面平面图如图 10 所示。



Figure 10. 13521 plan view of the working face
图 10. 13521 工作面平面图

本次探测采用定点法探测, 工作频率选用 0.158 MHz。在回风巷和胶带机巷分别布置发射点, 对每个发射点接收 15 个实测场强值。发射点间距平均为 50 m, 接收点间距 10 m。发射点布置如图所示(图 11)。上为回风巷, 下为胶带机巷。从切眼为 165 号点。探测走向长 1650 m。

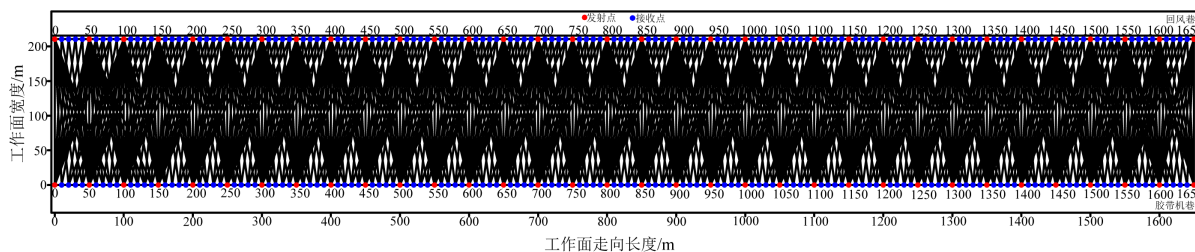


Figure 11. Observation system

图 11. 观测系统

在对数据进行处理时, 采用的是 ECT (Emission Computed Tomography) 无线电波透视处理软件系统。具体流程为: 首先针对采集所得数据, 完成测点坐标的输入与参数的定制工作, 以此绘制出场强曲线图; 接着利用 SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) 迭代反演技术处理实测场强值, 并定制相应参数, 进而得到吸收系数反演成像图。

4.2. 探测结果及对比分析

图 12(a), 图 12(b) 是分别是回风巷接收的实测场强曲线图及胶带机巷道接收的实测场强曲线图。

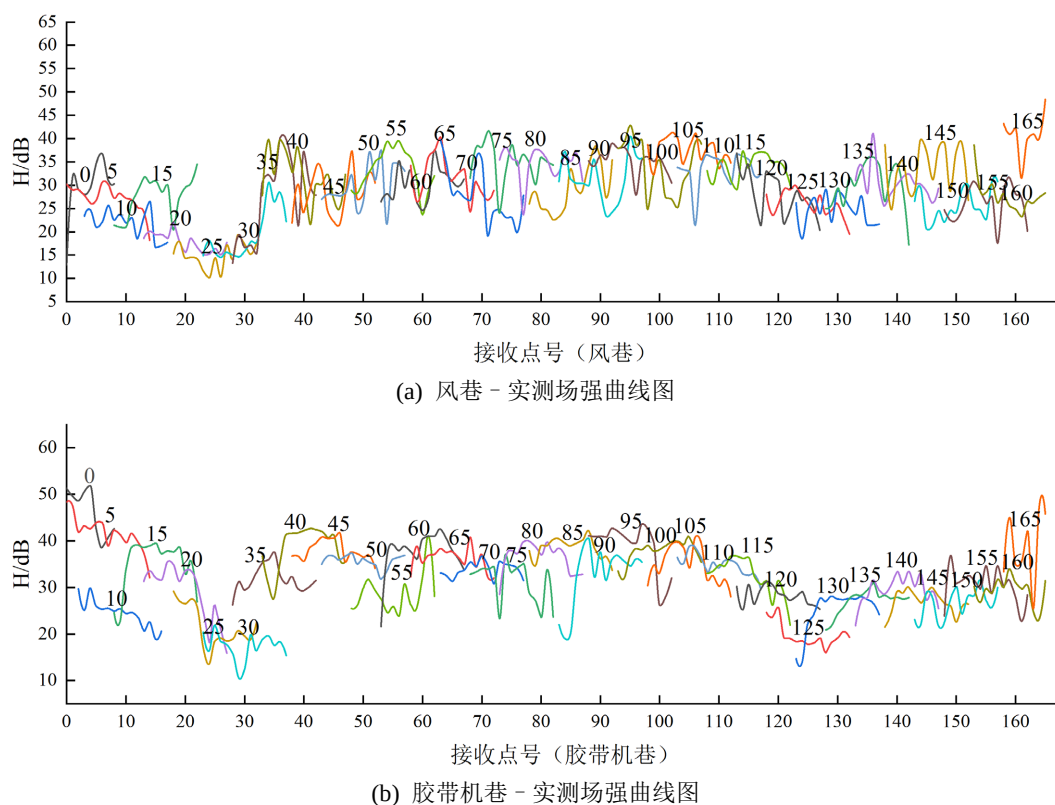


Figure 12. Field strength curve

图 12. 实测场强曲线图

由图 12 可见, 回风巷场强值最大值处于 25~49 dB 区间, 最小值为 10~120 dB, 胶带机巷场强值最大值处于 25~51 dB 区间, 最小值为 11~20 dB。两巷道均展现出相对良好的穿透性。实测数据表明, 背景测试值较低, 与最高场强值相比存在较大变化范围, 说明本段采集数据信噪比高, 数据具有可靠性。180~300

m 段处, 在该范围内两侧巷道接收场强值均较低, 接收场强值普遍低于 25 dB。与周围接收场强值相比具有较为明显的差异性。在 1200~1340 m, 1450~1510 m 段靠近胶带机巷道一侧。在该范围内两侧巷道接收场强值均较低, 接收场强值普遍低于 30 dB, 具有良好的信噪比。

选用两侧实测接收场强值未定参初始场强值吸收系数反演成像和两侧实测接收场强值定参初始场强值吸收系数反演成像进行对比分析(图 13)。

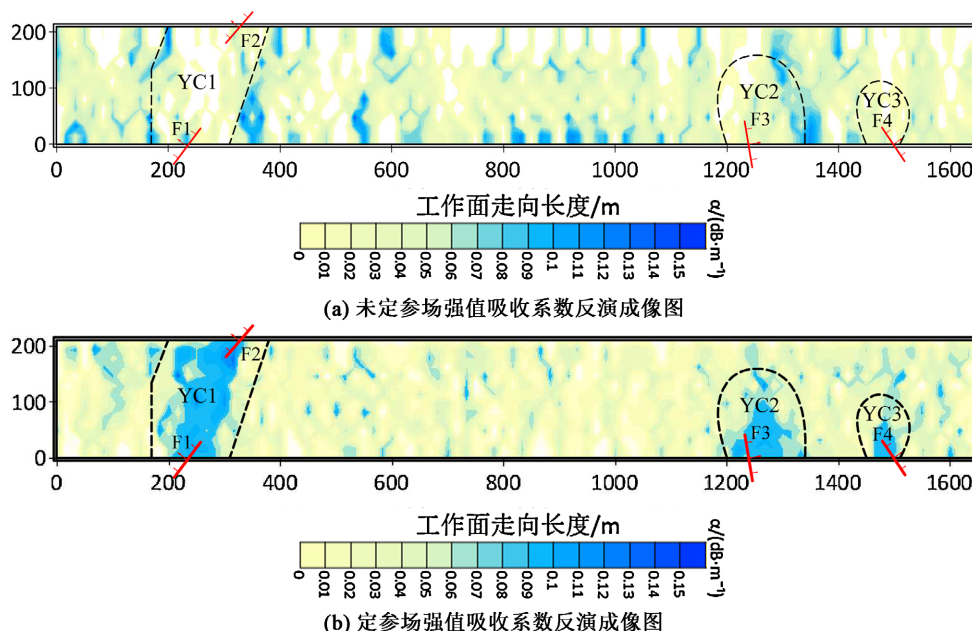


Figure 13. Absorption coefficient inversion image

图 13. 吸收系数反演成像图

在 0~1650 m 区段(如图 13(a)所示), 基于实际揭露的地质构造数据来圈定异常区域。经研究发现, 正常煤层段的电磁波吸收系数数值大多处于 $0.01\sim 0.09 \alpha/(\text{dB}\cdot\text{m}^{-1})$ 这一区间范围内, 受到断层、薄煤区等地质异常情况影响的区域, 其吸收系数数值处于 $0.01\sim 0.1 \alpha/(\text{dB}\cdot\text{m}^{-1})$ 。由于该数值与正常煤层吸收系数的重叠程度较高, 使得无线电波透视解释在精准识别断层位置以及薄煤区边界方面存在较大困难。与之相比, 图 13(b)展示的定参初始场强值吸收系数反演结果显示出不同情况。正常煤层段的吸收系数数值为 $0.021\sim 0.03 \alpha/(\text{dB}\cdot\text{m}^{-1})$, 异常区域的吸收系数数值则显著上升至 $0.036\sim 0.041 \alpha/(\text{dB}\cdot\text{m}^{-1})$, 高吸收系数的分布与实际地质异常区域呈现出高度的契合状态。特别是在 YC1、YC2 异常区, 在两侧接收场强值未定参初始场强值吸收系数反演成像结果中, 难以有效区分异常边界(见图 13(a))。而采用定参初始场强值吸收系数反演成像结果, 能够较为有效地反映出主要异常区的范围, 其解释结果与实际回采验证资料具有较高的吻合度(见图 13(b)), 由此验证了该方法在这种工况下具备有效性。

5. 结论

1) 数值模拟结果表明: 未定参初始场强值吸收系数反演成像, 煤层工作面中产生假异常区, 实际异常区与正常煤层吸收系数数值差异不明显, 难以有效区分异常区域。以 130 dB 定参处理时, 吸收系数反演成像可清晰界定异常边界, 异常区吸收系数值显著高于正常煤层。该方法为煤层工作面异常区探测提供有效技术支撑。

2) 顾北矿 13521 工作面实测表明: 定参处理后吸收系数反演成像, 在 YC1、YC2 异常区其吸收系

数值明显高于周围煤层, 有效地圈定了异常区范围, 与回采揭露地质构造较为吻合; 未定参处理存在假异常区, 无法有效区分异常区与正常煤层。研究结果对倾斜煤层工作面的安全高效生产提供了地质保障依据。

基金项目

煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心(安徽理工大学)开放基金项目(EC2022010)。

参考文献

- [1] 顾焕琪, 吴荣新, 沈国庆等. 回采工作面断层构造无线电波反射测量方法研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(2): 125-131.
- [2] 袁亮, 张平松. 煤炭精准开采地质保障技术的发展现状及展望[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2277-2284.
- [3] 吴立新, 汪云甲, 丁恩杰, 朱旺喜, 张瑞新, 张申, 王植. 三论数字矿山——借力物联网保障矿山安全与智能采矿[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 357-365.
- [4] 闫国才. 工作面复杂构造坑透及反射槽波透明化探测研究[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(1): 51-58.
- [5] 袁亮, 张平. 煤炭精准开采透明地质条件的重构与思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2346-2356.
- [6] 吴荣新, 庞瑶, 胡泽安. 采煤工作面无线电波探测技术研究进展[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(5): 2196-2204.
- [7] 张平松, 李洁. 我国煤矿井下钻孔物探技术发展与分析[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(4): 1885-1897.
- [8] 杨增林, 杜平. 多种物探方法在煤矿回采工作面防治中的应用[J]. 中国矿业, 2023, 32(S1): 355-360.
- [9] Ji, G., Zhang, P., Guo, L., Yang, S. and Ding, R. (2020) Characteristics of Dispersion Curves for Love Channel Waves in Transversely Isotropic Media. *Applied Geophysics*, 17, 243-252. <https://doi.org/10.1007/s11770-019-0798-6>
- [10] 肖玉林, 吴荣新, 张平松, 等. 无线电波透视场强增量法在煤层工作面坑透探测中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(5): 36-40.
- [11] 祝凌甫, 孙林. 综合矿井物探在煤矿探放水中的应用研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(S2): 192-196.
- [12] 吴荣新, 肖玉林, 张世阔, 等. 工作面煤厚及宽度对坑透综合曲线图的影响[J]. 建井技术, 2015, 36(6): 21-24.
- [13] 肖玉林, 吴荣新, 严家平, 等. 工作面坑透场强传播规律及有效透视宽度研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 712-718.
- [14] 苏园鹏, 吴荣新, 张平松, 等. 158KHz 工作频率在煤层工作面坑透探测中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(10): 48-51.
- [15] 郭昌放, 武祥, 杨真, 等. 多源信息融合约束下的工作面电磁波CT探测智能反演方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3623-3635.
- [16] 吴荣新, 李响, 肖玉林. 综采工作面煤厚变化电磁波透视探测响应[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 283-291.