

瞬变电磁法在煤矿深部隐伏断层探测中的应用

郑宝莲

内蒙古煤炭科学研究院有限责任公司 内蒙古 呼和浩特 010010

摘 要: 隐伏断层极易破坏煤层完整性, 诱发顶板失稳、围岩变形、突水等安全隐患, 是制约深部矿井安全高效生产的主要地质因素。本文系统分析深部隐伏断层的发育特征与探测难点, 从探测设备参数优化、测线布设工艺、干扰抑制技术以及数据处理与反演解释等方面开展系统性研究, 完整梳理适配深部矿井的瞬变电磁探测技术应用体系。

关键词: 瞬变电磁法; 煤矿深部; 隐伏断层探测; 应用

引言

长期以来, 煤矿构造探测多依赖钻探、巷道观测、传统电法与地震勘探等常规方式。这类技术在浅部地层探测中具备一定实用性, 但面对深部高围压、强干扰、地层物性差异微弱的复杂环境, 普遍存在探测深度不足、信号失真严重、构造识别精度低等短板, 无法满足深部矿井超前精细探测的生产需求。瞬变电磁法作为一种高效的无源电磁探测技术, 对破碎带、裂隙发育区等低阻异常体具备极高的识别敏感度, 且适配井下狭小空间作业, 抗环境适配性强, 十分契合深部隐伏断层的探测需求。

1 煤矿深部隐伏断层特征及探测难点

1.1 煤矿深部隐伏断层发育特征与分类

①在构造形态上, 煤矿深部隐伏断层普遍具备延伸跨度大、产状多变的特点。受深部高地应力环境影响, 断层断面多呈现弯曲起伏的形态, 走向和倾角不会保持固定数值, 在纵向和横向上均存在不同程度的变化。断层内部结构松散, 围岩裂隙发育密集, 断层带内部多填充泥质、碎屑类松散物质, 胶结性极差, 整体稳定性远低于完整岩层。同时, 深部地层压实作用更强, 隐伏断层的裂隙多处于闭合或半闭合状态, 构造异常特征十分微弱, 隐蔽性进一步提升。②从赋存状态来看, 深部隐伏断层常以多层、交错、密集的形式发育, 单一工作面内往往存在多条规模不一的隐伏断层, 各构造相互切割、叠加, 形成复杂的构造网络, 极大提升了构造识别的难度^[1]。部分断层落差较小, 常规地质勘探手段难以捕捉其构造差异, 却会直接破坏煤层连续性, 影响采掘布局, 甚至诱发顶板失稳、矿压异常等安全问题。③结合煤矿地质勘探通用划分标准, 可依据断层落差、发育规模和构造影响范围对深部隐伏断层进行分类。按照落

差大小可分为小型、中型与大型隐伏断层, 小型断层落差数值偏低, 对整体煤层构造格局影响有限, 但分布最为零散广泛。中型断层会局部破坏煤层完整结构, 直接制约工作面的开采设计。大型深部隐伏断层整体延伸距离长, 切割地层范围广, 是控制矿区局部地质格局的核心构造。

1.2 深部开采地质环境特点

①随着开采埋深不断增加, 上覆岩层的自重荷载持续增大, 地层内部积累的原始应力水平显著提升。深部岩体长期处于高压束缚状态, 岩体内部的微观裂隙被持续挤压压实, 原本松散的岩层结构趋于致密。这种高围压状态会彻底改变岩层的物理力学与电性属性, 让不同岩层、断层破碎带之间的物性差异被大幅削弱。浅部地层中较为明显的地质构造异常信号, 在深部高压环境下会被掩盖弱化。②深部地层结构的复杂性也是开采与探测面临的主要难题。经过漫长的地质演化与多期构造运动叠加, 深部岩层的沉积序列杂乱无序, 岩层交替变化频繁且无固定规律。煤层顶底板岩层岩性组合多样, 软硬岩层相互交错, 地层厚度分布不均匀。各类小型褶皱、次生裂隙密集发育, 岩层整体性和完整性被严重破坏。这种杂乱的地层结构会造成探测信号传播路径紊乱, 信号在不同岩层中发生多次折射、散射, 导致原始探测数据出现畸变失真的情况。③深部井下探测存在大量干扰因素, 进一步降低了探测精度。井下巷道内部存在金属支护设备、轨道、管线以及各类机电设备, 这类金属构件会产生强烈的电磁干扰, 直接扰乱瞬变电磁探测的电磁场信号。复杂的井下空间结构也会限制探测设备的布设方式, 导致探测覆盖范围存在盲区, 难以完整、精准的探明深部隐伏断层的实际分布情况。

1.3 隐伏断层传统探测方法及局限性

①地质钻探是最为基础的勘探手段, 依靠钻孔取芯

直观判断地层结构与构造分布。但该方式属于点状探测模式,仅能反映钻孔点位处的地质情况,无法连续探测地层内部构造。深部矿区钻探施工难度大、成本偏高,钻探间距难以密集布设,大范围探测会出现大量探测空白区域。很多落差较小、延伸跨度有限的隐伏断层,极易落在钻孔间隙中,出现漏判误判的情况,无法精准刻画断层的整体形态和空间展布特征。②巷道地质观测与素描依托井下采掘工作面现场勘查完成构造识别,仅能针对已经揭露的巷道围岩进行判断^[2]。对于未开挖区域的深部隐伏断层,该方法完全不具备超前探测能力,只能被动识别已暴露的地质构造,无法提前预判前方构造风险,难以实现超前防灾避险的勘探目标。③传统浅层地震勘探依托岩层波阻抗差异识别地质构造,在浅部完整地层中探测稳定性较好。但深部地层构造破碎、岩层杂乱,应力环境复杂,地震波传播过程中会出现严重的散射和衰减现象。有效探测信号大幅减弱,杂波干扰严重,最终成像分辨率大幅降低,难以精准区分小型隐伏断层与岩层裂隙带来的异常响应。

2 煤矿深部隐伏断层探测技术应用

2.1 探测设备与参数优化设置

①设备硬件选型需要贴合深部探测的核心需求,摒弃传统地面勘探的通用设备配置。发射与接收线圈会根据井下巷道空间尺寸进行规格适配,兼顾探测深度与现场施工的便捷性,避免线圈尺寸过大导致布设受限,或是尺寸过小导致探测信号穿透能力不足。设备主机具备信号滤波与实时预处理功能,可初步屏蔽井下机电设备、金属构件带来的电磁杂波干扰,从硬件层面提升原始数据的纯净度,减少后期数据处理的误差累积。②参数设置是决定深部隐伏断层探测精度的核心环节,固定的参数模式无法适配多变的深部地层条件,需要结合深部地层物性特征进行动态优化^[3]。发射电压的调节需要兼顾探测深度与信号稳定性,电压过低会导致电磁信号穿透深度不足,无法覆盖深部开采层位,电压过高则容易引发信号饱和,弱化断层破碎带的细微电性异常差异。③发射频率的优化调整同样关键,低频参数能够提升信号穿透深度,适配深部地层探测需求,但频率过低会降低探测分辨率,难以识别小型隐伏断层。高频参数分辨率更高,却会大幅削弱信号穿透能力。实际探测工作中需要平衡二者关系,通过反复调试匹配最优频率参数。

2.2 井下测线布置与探测施工工艺

①在测线规划阶段,工作人员需要提前梳理巷道实际走向与工作面推进方向,以采掘前方待探测区域为核心布设主测线。主测线整体保持平行于巷道掘进方向,

保证探测范围可以完整覆盖煤层开采轮廓边界。为弥补单一方向测线的数据局限性,还会配套布设交叉斜向测线,形成网格化的探测布局^[4]。这种布设方式可以有效弥补单一测线的数据缺陷,减少构造倾斜、地层错动带来的探测死角,让数据采集更加全面。测线间距不会统一设定固定数值,会根据深部构造复杂程度灵活调整,构造发育相对简单的区域适度放宽间距,构造密集复杂的区域加密测点,以此提升小型隐伏断层的捕捉能力。②井下探测施工工艺有着严格的标准化流程,施工前需要完成现场前期准备工作。提前清理测线周边的杂物,移开近距离金属支护构件和机电设备,最大程度削弱人工设备带来的电磁干扰。同时校准探测设备状态,检查线圈连接稳定性,保证设备处于正常工作状态,规避施工过程中的设备故障问题。③正式施工采集数据时,操作人员需要保持线圈摆放姿态统一,维持固定的高度和角度,避免姿态偏差造成的数据波动。测点采集过程保持静止作业模式,待数据波形稳定后再完成记录,杜绝边走边测带来的信号失真问题。整套施工过程坚持分段采集、逐段核验的作业模式,每完成一段测线的数据采集后,及时核对数据完整性和稳定性,对波动较大的测点进行重复补测。标准化的施工工艺能够有效规避人为操作误差和环境干扰误差,保障深部复杂环境下隐伏断层探测数据的真实性与有效性,为后续数据解译和构造判定提供可靠的数据支撑。

2.3 深部复杂环境干扰抑制方法

①现场前置防控属于成本最低且效果直观的抑制手段,核心是主动隔绝金属类强干扰源。探测作业开展前会清理测点周边近距离金属构件,临时移走轨道管路电气支架等导电物体。无法移动的永久金属支护结构需要调整线圈布设距离,拉大设备与干扰载体的空间间隔,降低涡流信号对有效二次场的覆盖作用。井下运行中的机电设备会产生持续交变电磁场,探测时段统一关停周边闲置器械,减少动态电磁杂波持续输入原始信号^[4]。井下积水与潮湿岩壁会改变表层岩层导电能力,测点位置避开大面积积水区域,降低表层低阻介质形成的虚假异常。②数据采集阶段依靠设备自身功能实现实时降噪。探测主机内置多阶自适应滤波模块,能够自动区分深部地层产生的有效衰减信号与周期稳定的工业杂波。线圈组合方式也会根据干扰强度做出调整,采用分离式收发布局弱化线圈自身耦合噪声,同步稳定线圈摆放高度与倾角,消除人为晃动带来的随机波动噪声。采样时序会做出针对性调整,拉长晚延时采样区间,避开浅层干扰信号集中分布时段,保留深部地层反馈的微弱构造

信息。③原始数据采集完成后需要开展系统性数字降噪处理,通过分层剥离算法区分不同来源的干扰信号。针对恒定金属干扰产生的平稳噪声,采用基线校正手段统一抹平数据整体偏移量。对于无规律随机杂波,选用平滑滤波方式保留地层缓慢变化的电性特征,同时保留断层破碎带局部突变信号。表层低阻介质带来的浅层干扰会借助分层反演手段单独剥离,还原深部岩层真实电阻率分布。

2.4 数据预处理、反演解释流程

①数据预处理是全分析工作的基础环节,首要任务完成原始观测数据的规整核验。工作人员先逐条核对各测点完整波形记录,剔除采集过程中设备晃动、瞬时电磁冲击造成的失真曲线。随后开展基线校正操作,消除井下金属构件持续涡流带来的整体数据偏移,统一所有测点的数值基准^[5]。校正完成后对波形开展多层平滑降噪,处理过程严格把控平滑幅度。②预处理阶段还要完成地形与巷道空间校正工作,深部巷道高低起伏,线圈布设高度存在小幅差别,空间位置差异会改变电磁信号传播路径。通过空间坐标匹配修正点位偏差,抵消巷道形态带来的信号畸变。最后按照测线顺序整合标准化数据文件,划分不同延时区间对应的探测深度分层数据,为后续反演计算提供规整可用的基础数据集。③预处理完成的数据会进入反演计算环节^[5]。反演以完整岩层电阻率作为基础模型,结合深部地层压实、岩性交替的客观条件构建初始地层模型。计算过程采用分层迭代求解模式,不断调整模型内部电阻率数值,缩小模拟曲线与实测曲线的差值。④得到电阻率剖面后进入构造综合解释环节。解释工作先划分完整岩层、含水破碎带两类基础电性分区,区分浅层干扰形成的假异常与深部构造真

实低阻响应。结合深部地层应力分布与构造发育基本规律,锁定断面内连续延伸的低阻条带。再依据低阻区域的延展长度、倾角、埋深判断隐伏断层的空间发育形态,区分小型次生裂隙与规模断层带来的异常信号。整套流程层层递进,逐步剥离各类干扰带来的虚假信息,提升深部隐伏断层空间位置与规模判定的可靠程度。

结语

总之,整体研究充分体现了瞬变电磁法在深部煤矿构造探测中的技术优势与应用价值,能够有效弥补传统勘探技术的不足,为矿井采掘设计优化、地质灾害超前预警、深部资源安全开发提供有力支撑。同时研究也发现,极端复杂构造区域的微弱异常识别、高精度定量解释等方面仍存在提升空间。未来可结合智能滤波算法与三维精细反演技术,进一步优化探测解释精度,推动煤矿深部地质探测技术向精细化、智能化方向持续发展。

参考文献

- [1] 吴牧阳,徐正玉,付能翼,等.无人机航空瞬变电磁法在煤田采空区探测中的应用[J].科学技术与工程,2026,26(11):4524-4532.
- [2] 张嘉琪.瞬变电磁与三维地震在煤矿隐伏断层探测中的应用[J].西部探矿工程,2025,37(1):75-77+81.
- [3] 高小伟.煤矿隐伏地质异常体地孔瞬变电磁法三分量探测技术[J].煤炭科学技术,2025,53(1):237-245.
- [4] 贾晓辉.瞬变电磁法在煤矿侏罗系老空水探测中的应用[J].能源与节能,2025,(7):77-79.
- [5] 吕奎元.孔中瞬变电磁法在煤矿水害探测中的应用研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025,(12):079-082.