

综合物探探测体系在煤矿采空区积水水害超前防治中的应用分析

张 杨 张明浪

陕西省煤层气开发利用有限公司 陕西 榆林 719000

摘 要: 煤矿采空区积水水害隐蔽性、突发性强,单一物探技术存在精度不足、多解性突出等问题,无法满足精细化防治需求。本文依托采空区积水赋存规律与物探技术原理,搭建多技术融合综合物探探测体系,阐述其在积水探查、风险预警、靶向治理及动态监测中的应用。结合工程实践验证应用成效,剖析现场存在的技术短板,提出针对性优化措施,为煤矿采空区积水水害超前防控提供可靠技术支撑。

关键词: 综合物探探测体系;煤矿采空区;积水水害;超前防治;应用

引言: 采空区积水是煤矿开采过程中最主要的水害隐患之一,采动形成的裂隙与构造通道易导通积水,引发突水事故,严重威胁矿井生产安全。传统防治手段探查范围有限、针对性较差,防控效率偏低。为提升水害超前防治水平,本文整合三维地震、瞬变电磁等多种物探技术,构建分级探测体系,探究其工程应用价值,解决复杂地质条件下积水探测难题,推动煤矿水害防治工作向精准化、高效化发展。

1 煤矿采空区积水特征与综合物探探测体系适配原理

1.1 煤矿采空区积水类型及水害致灾机理

(1) 采空区静态积水与动态补给积水的分布规律。静态积水为顶板垮落带与裂隙带内残留水,呈孤立或半孤立分布,水量稳定但局部压力集中;动态补给积水受上覆含水层、构造或地表水补给,水量动态变化,导水通道贯通性强,赋存受地层结构、采厚及采空区连通性控制。(2) 导水通道与裂隙发育对水害突发的影响。采动裂隙带、断层破碎带及陷落柱为主要导水通道,受采动应力扰动后渗透性骤增,导通静态积水和动态水源诱发突水。裂隙发育程度随采空区范围和顶板岩性变化,突水水害多与高水压、低阻通道快速贯通相关。(3) 超前防治的核心探测需求。须准确查明积水体位置、边界、赋水程度及导水通道展布,并验证防治水工程效果,要求探测技术具备高分辨率、大深度、多维度信息获取能力,以满足矿井安全开采的动态监测需求。

1.2 主流综合物探技术探测原理及应用适配性

(1) 三维地震探测技术:通过人工激发地震波,利用地层波阻抗差异进行构造及采空区边界识别,适用于宏观圈定采空区范围,但对小规模积水体识别灵敏度受

限。(2) 瞬变电磁探测技术:基于感应电磁场衰减规律,对低阻积水体响应敏感,可精准识别富水异常区,适用于垂向分层探测和深度定位。(3) 直流电法探测技术:通过测量地电场分布,根据电阻率差异判定积水范围和富水性,成本低、施工简单,但受地形和接地条件影响较大。(4) 地质雷达探测技术:利用高频电磁波反射探测浅部目标,分辨率高,适用于浅埋采空区精细探查,但探测深度有限(一般小于50m)^[1]。

1.3 多技术融合综合物探探测体系构建逻辑

(1) 单一物探技术存在多解性、深度分辨率不足或抗干扰能力差等缺陷,如三维地震对积水不敏感、瞬变电磁对构造边界识别弱。多技术融合可互补验证,降低解释不确定性,是提升探测可靠性的关键路径。(2) 构建“宏观圈定—精细探查—精准定位”一体化体系:三维地震初步确定采空区范围,瞬变电磁与直流电法联合探查富水异常体,地质雷达精细验证浅部异常,形成分级推进的工作流程。(3) 该探测体系与超前防治需求高度适配,通过空间互补、精度分级和数据互验机制,实现风险分区、钻探靶区优选及防治效果动态评估,为矿井水害主动防控提供技术支撑。

2 综合物探探测体系在煤矿采空区积水水害超前防治中的核心应用

2.1 采空区积水前期全域探查应用

(1) 井上下联合物探布设,实现采掘工作面全域覆盖。采用地面三维地震与瞬变电磁普查、井下直流电法与地质雷达精细加密探测的立体模式,地面布设接收点与激发源覆盖待采区及影响范围,井下沿两条顺槽布设环形交叉测线,测点间距按目标设定,形成网格化、多

方位探测网络,确保对工作面内部及外围可能连通水体的全面覆盖。(2)多技术耦合识别隐伏采空区及未知积水区分布。三维地震利用波阻抗差异和反射波组突变圈定采空区边界及垮落形态,瞬变电磁低阻异常锁定疑似积水富集区,直流电法通过视电阻率断面验证异常梯度,地质雷达高分辨率复核浅部小型异常,多数据交叉约束与综合解译,有效识别未记录老窑、越界私采形成的隐蔽采空区及其积水范围,显著降低单一方法的多解性和漏判率^[2]。(3)积水层位、富水性强弱及补给通道的精准探测与数据提取。利用瞬变电磁垂向视电阻率断面划分积水赋存层位及顶板含水层分布,结合直流电法测深数据定量反演富水性相对分级,通过地震属性分析(相干体、曲率、方差体)提取裂隙带和补给通道空间展布,形成含空间坐标、埋深、电阻率值、异常等级等要素的结构化数据集,为后续评价与治理提供基础数据支撑。

2.2 积水水害风险精准预判与分级预警应用

(1)基于物探探测数据的积水水量、水压参数反演分析。利用瞬变电磁和直流电法联合反演获得的三维电阻率分布体,结合已知钻孔取芯标定建立电阻率-含水率-孔隙度经验量化模型,估算积水区静态储水量;根据积水体标高与隔水层厚度及承压水头高度关系推算底板或顶板承受水压大小,为风险定量评估提供关键参数输入。(2)结合地质条件构建采空区积水水害风险分级评价体系。将物探解译的积水范围、水量估算值、水压推算值、顶底板隔水层有效厚度、导水断裂及裂隙发育密度等指标纳入多因素综合评价矩阵,采用层次分析与熵权法组合赋权,科学划定高、中、低三级风险等级空间分布,实现以物探数据为核心驱动、地质条件为约束的风险量化分区。(3)高风险积水区域超前预警模型的落地应用。基于矿井历史突水案例库和当前物探反演关键参数,建立涵盖电阻率阈值、水量变化速率、水压临界值等多指标预警判别准则,当探测区域内综合指标达到预警触发条件时,模型自动输出分级预警信号并定位危险区域,指导矿井提前实施停产撤人、强化支护、加密观测或超前疏放等针对性响应措施^[3]。

2.3 水害超前治理方案靶向指导应用

(1)依据物探探测成果优化探放水钻孔布置、施工参数。根据三维积水体的空间形态、中心坐标及边界趋势,科学确定钻孔方位角、倾角及终孔层位深度,指导钻探从低风险区间高风险区渐进式逼近施工,同时依据物探显示的积水边界优化钻孔终孔间距,在保证疏放效果的前提下最大限度减少无效进尺,提高疏放水效率与

经济效益。(2)针对积水通道、导水裂隙制定靶向注浆封堵治理方案。精确提取地震相干属性与曲率属性识别的裂隙密集带和断裂破碎带位置,配合瞬变电磁低阻通道异常锁定重点注浆靶区,结合裂隙产状、宽度及延伸规模,针对性设计注浆压力分级、浆液配比及钻孔布设参数,实现封堵工程布置与地质异常体的空间精准对应,确保治理效果。(3)差异化制定高、中、低风险区超前防治施工工艺。高风险区采用超前钻探与高压注浆加固隔水层、同时布置多组大孔径疏放孔联合降压的综合治理体系;中风险区以常规疏放孔疏水为主、物探实时跟踪效果为辅;低风险区则以物探定期复查、留设合理防水煤柱并加强日常观测为主,实现防治资源投入与风险等级合理匹配。

2.4 采掘过程动态监测与实时防控应用

(1)工作面采掘推进中积水动态变化的持续物探监测。在工作面两巷预先埋设固定电极和接收线圈装置,采用井巷瞬变电磁和并行直流电法技术按设定频次实时采集数据,通过对比不同推进距离下视电阻率变化曲线与断面图像,动态判断积水体边界是否外扩、是否与相邻水体或含水层发生水力联系,实现采动影响区水情变化的连续跟踪。(2)隐蔽积水异常区域动态识别与隐患实时排查。利用多期重复观测数据差值分析与电阻率时移成像技术,识别因采动压力导致隔水层破裂、裂隙新生扩展而引发的新生积水异常体,及时捕捉原始探测成果中未标注的隐蔽隐患点,做到动态隐患排查全覆盖、无遗漏,有效防范滞后突水风险^[4]。(3)基于动态探测数据的防治方案实时优化调整。将实时监测数据与前期静态探测成果叠合分析,动态修正积水区空间分布模型,据此灵活调整疏放水钻孔的开启顺序与放水时长、注浆封堵的最佳时机和加固范围。当动态数据显示异常区域急剧扩大或电阻率持续快速下降时,可及时补充加密钻孔或调整注浆方案,形成“探测-评价-治理-再探测”闭环动态防控机制,为采掘作业全过程安全推进提供可靠技术保障。

3 工程应用效果、问题与优化对策

3.1 工程应用案例与防控效果分析

(1)典型矿井工程概况与综合物探探测实施方案布设。选取华北某整合矿井为例,主采煤层埋深350~600m,采空区分布复杂且存在越界开采历史。方案采用地面三维地震控制面积5.2km²,配合地面瞬变电磁普查圈定低阻异常区;井下沿回采工作面两巷布设瞬变电磁与直流电法测线,间距10m,重点异常段加密至5m,并辅以地质雷达对浅部异常进行验证,形成“地面普查

一井下详查—异常精查”三级探测架构。(2)探测精准度、积水隐患排查覆盖率应用效果验证。经后期钻探验证,综合物探解释的12处积水异常中11处与实际出水位置吻合,探测准确率达91.7%;对采掘影响范围内的已知采空区及疑似隐蔽采空区实现了全覆盖排查,隐患识别较单一瞬变电磁方法提高约35%。三维地震圈定的采空区边界误差小于15m,瞬变电磁定深误差控制在8%以内,满足现场防治水工程精度需求。(3)水害事故防控成效、施工成本与工期优化效益分析。应用该体系后,矿井连续两年未发生采空区透水事故;探放水钻孔工程量较传统“广撒网”布孔方式减少42%,钻探工期缩短约28天;注浆材料用量因靶向封堵节约约31%,累计降低防治水综合成本约370万元,实现了安全效益与经济效益的协同提升。

3.2 现场应用中存在的关键问题

(1)复杂地质条件下物探数据干扰、识别精度不足问题。采区地表存在高压线、铁轨等强电磁干扰源,井下巷道金属支架、锚网及采掘机械产生显著电磁噪声,导致瞬变电磁晚期信号畸变,浅层数据失真;煤层顶板灰岩与砂岩互层导致地震波阻抗差异微弱,小断层及隐伏陷落柱识别困难,定位误差增大。(2)多技术数据融合处理不规范、成果衔接度不足问题。目前各类物探数据由不同技术人员独立处理解释,反演参数选择和异常判定标准不统一,导致三维地震边界与电法异常体在空间位置上存在偏差;不同方法成果图件比例尺、坐标体系不一致,数据融合主要依赖经验定性叠加,缺乏定量化联合约束反演流程。(3)探测与防治施工衔接不紧密、落地适配性不足问题。物探成果多以异常平面图形式提交,未形成可直接指导钻孔施工的三维靶区坐标和剖面参数,现场工程技术人员对物探成果理解偏差较大,导致钻孔轨迹与设计靶点偏离;注浆封堵方案对物探解释的裂隙通道细节利用不充分,封孔位置与异常中心匹配度有待提高。

3.3 综合物探探测体系应用优化对策

(1)优化物探观测系统,提升复杂水文地质条件探测精度。针对强干扰矿区,采用抗干扰能力更强的等值反磁通瞬变电磁和分布式三维电法,增加叠加次数和采

样密度;在地震采集中采用宽方位、小面元观测系统,结合井孔检波器提高深层信噪比;建立干扰源数据库,实施数据采集前的噪声预评估与采集参数优化。(2)搭建多源数据融合处理平台,标准化成果分析流程。开发集成三维地震、瞬变电磁、直流电法、地质雷达等多种方法数据的融合处理软件,统一坐标基准和网格尺度,引入联合约束反演算法,实现多参数同时反演与异常自动拾取;制定企业内部物探数据采集、处理、解释的标准化作业流程,明确各环节质量验收标准^[5]。(3)构建“探测-评价-治理-监测”闭环应用防控体系。将物探解释成果转换为可直接用于钻探设计的靶区坐标表和剖面图,建立物探-钻探信息即时互通机制;在现场推行动态反馈模式,钻探揭露情况及时修正物探解释模型,注浆施工参数根据监测数据动态调整;通过闭环迭代持续提升探测解释精度与治理效果,形成可复制推广的综合物探防治水技术标准体系。

结束语

本文构建的综合物探探测体系,有效弥补了单一探测技术的应用缺陷,可精准查明采空区积水分布与导水通道发育情况,实现水害风险分级防控与动态监测。该体系经工程应用验证,可有效规避水害事故,节约施工成本。同时针对现场应用问题提出优化对策,完善探测防控闭环体系,可为同类矿井采空区积水治理提供参考,助力煤矿安全生产稳定推进。

参考文献

- [1] 王浩,李刚,张超.多方法综合物探技术在煤矿采空积水区超前探测中的应用[J].煤矿安全,2024,55(06):189-195.
- [2] 刘金涛,王善勋,杨文锋.复杂地质条件下煤矿采空区积水综合物探探测技术优化[J].中国矿业,2025,34(10):156-162.
- [3] 张鹏,孙英峰.煤矿采空区积水灾害综合物探超前预警体系构建[J].煤炭科学技术,2023,51(09):212-218.
- [4] 康健,赵磊.瞬变电磁与大地电磁法融合探测采空积水技术研究[J].工矿自动化,2022,48(11):102-107.
- [5] 吴建峰.综合物探技术在煤矿隐蔽采空积水水害超前治理中的应用[J].煤炭技术,2026,45(03):78-82.