

煤矿地质灾害勘查中物探方法的应用

刘 峰

山西省煤炭地质水文勘查研究院有限公司 山西 太原 030006

摘 要：本文围绕煤矿典型地质灾害的隐患特征与勘查核心需求展开梳理，系统阐释电法、地震、电磁三类主流物探技术的核心探测原理，明确不同技术在顶板灾害、水害、构造及采空区塌陷灾害勘查中的差异化应用场景与技术优势。同时从方法适配选型、野外数据质量管控、异常精准解释三个维度，提出煤矿物探勘查全流程的应用要点与技术优化路径，可为复杂地质条件下的煤矿隐蔽灾害精准识别、风险超前研判提供完整的技术体系支撑，助力煤矿地质灾害防控能力提升。

关键词：煤矿；地质灾害；地质勘查；物探方法；应用

引言：我国煤矿开采深度持续向深部延伸，井下地质条件的复杂程度显著提升，顶板破碎、突水、采空区塌陷等各类隐蔽地质灾害的发生概率持续攀升，传统钻探勘查手段已难以满足大范围、高效率的超前探测需求。物探技术凭借非侵入式、覆盖范围广、探测效率高的技术特性，已成为当前煤矿地质灾害勘查的核心技术手段。本文系统梳理煤矿高发地质灾害的勘查核心需求，拆解主流物探技术的原理与应用场景，明确全流程勘查作业的质量管控要点，为煤矿现场物探勘查作业提供标准化的专业技术参考。

1 煤矿常见地质灾害及勘查核心需求

煤矿地质灾害的发生均与地下不良地质体、地质构造及水文异常密切相关，不同类型地质灾害的隐患特征不同，对应的勘查侧重点与技术需求也存在明显差异。煤矿生产过程中高发的地质灾害主要包含顶板灾害、水害、瓦斯灾害、断层滑移及采空区塌陷灾害几大类。顶板灾害多由顶板岩层破碎、层理发育、软弱夹层富集导致，勘查核心是识别顶板岩层结构完整性、破碎带分布范围及岩层厚度变化特征。水害主要源于地下含水层、导水断层、隐伏陷落柱及采空区积水，勘查需精准定位富水异常区、导水通道及积水空洞的空间分布。瓦斯灾害多集中在地质构造复杂、岩层密封性强的区域，构造破碎带、褶皱变异带易形成瓦斯富集区，勘查重点为识别局部构造异常、岩层裂隙发育带。断层滑移与采空区塌陷灾害，主要受隐伏断层、废弃采空区、地层空洞影响，勘查需精准判定断层产状、延展范围及地下空洞、松散破碎区域的分布特征。整体而言，煤矿地质灾害勘查的核心需求，是实现地下隐蔽地质异常体、不良地质结构、水文异常区域的精准识别、定量判定与空间定位，为灾害风险研判提供完整、连续的地下地质

数据^[1]。

2 煤矿地质灾害勘查常用物探方法及原理

2.1 电法勘探技术

电法勘探是煤矿地质灾害勘查领域应用成熟的基础物探技术，核心探测逻辑依托地下不同岩土体、地质异常体的固有电阻率差异实现精准识别。正常完整的煤岩层结构致密、孔隙率低，电阻率数值长期处于相对稳定的区间，而受构造改造形成的破碎岩层、赋存流体的含水区域、未充填的空洞裂隙带、瓦斯富集区域的电阻率参数会发生显著规律性变异。其中，含水破碎带、导水构造区域的岩土体孔隙被导电介质填充，整体导电性明显增强，电阻率数值显著降低；干燥无充填的采空区、瓦斯富集空洞区域内部介质导电性大幅减弱，电阻率数值显著升高。作业过程中通过在地面或井下指定测线布设高密度电极阵列，向地下输入幅值稳定的可控电流，同步采集全测线范围内的地下电场分布数据，经过标准化数据处理与二维反演分析，可精准获取不同深度的地下地层电阻率剖面，直观识别对应的低阻、高阻异常区域，以此判定富水带、破碎带、空洞等灾害隐患的空间分布情况。该技术原理体系成熟、现场作业设备轻便易携，是当前煤矿浅层水害、顶板破碎隐患勘查的核心基础物探技术^[2]。

2.2 地震勘探技术

地震勘探是煤矿深部大范围地质灾害勘查的核心物探技术，以固体介质中的弹性波传播理论为核心原理。作业过程中通过人工可控震源激发产生地震弹性波，弹性波在地下介质中传播时，遇到不同岩性分界面、地质构造界面、岩层破碎带及未充填空洞界面时，会规律性

发生反射、折射与散射现象。利用高精度专业检波器全时段采集反射、折射地震波信号,结合波速、振幅、相位等核心参数的变化特征,可定量反演地下地层结构、构造形态及岩体完整程度。完整煤岩层的地震波传播速度稳定、波形规整连续,而断层、褶皱核部、岩层破碎带、采空空洞区域会出现波速突变、振幅衰减、波形畸变等典型异常特征。依托地震波数据的异常响应规律,可精准判定断层产状、岩层破碎范围、采空区空间形态,主要适配于煤矿大中型构造类、采空塌陷类地质灾害的勘查工作。

2.3 电磁勘探技术

电磁勘探以地下介质的电磁感应差异为探测依据,其中瞬变电磁法是煤矿勘查应用最广泛的核心技术。通过发射线圈向地下发射脉冲电磁场,脉冲电磁场在地下介质中产生感应涡流,感应涡流会产生二次感应电磁场,利用接收线圈采集二次场的衰减规律与强度特征。地下富水破碎带、导水断层等低阻介质会延长电磁场衰减时间、增强二次场强度;干燥致密岩层、高阻空洞区域电磁场衰减速度更快、二次场强度较弱。通过分析电磁响应数据的差异,可精准识别地下低阻异常体,高效探测隐伏导水构造、含水层、积水采空区等水害隐患,具备探测深度大、对低阻异常体敏感度高的特点。

3 不同物探方法在煤矿地质灾害勘查中的具体应用

3.1 电法勘探在顶板及水害隐患勘查中的应用

电法勘探是煤矿井下地质灾害勘查中应用最为广泛的物探技术之一,核心应用场景覆盖煤矿顶板岩层完整性检测、浅层富水隐患识别与小型构造破碎带精准勘查。在顶板灾害专项勘查中,作业人员通过在井下巷道顶板指定间距布设观测电极,构建全覆盖的电阻率观测阵列,连续采集顶板不同深度岩层的电阻率分布数据,若探测结果中出现局部电阻率高低交替突变、大范围电阻率数值紊乱的特征,即可判定对应深度的顶板岩层存在裂隙发育、岩体破碎、软弱夹层分布等不良地质体,可精准圈定顶板不稳定区域的平面范围与赋存深度,提前预判顶板垮落、片帮等动力灾害的发生风险,为后续顶板补强支护提供量化数据支撑。在水害隐患勘查中,该技术可针对采掘工作面浅层隐伏含水裂隙、巷道周边隐伏富水破碎带开展定向探测,快速定位浅层积水异常区域的空间位置,通过电阻率阈值区分干燥破碎带与含水破碎带,有效规避巷道掘进过程中突发淋水、小型涌水的安全隐患。该技术适配煤矿井下浅层、精细化的隐患探测需求,数据成果直观,现场作业效率高,可快速完成井下局部采掘区域的地质安全排查,是煤矿采掘工

作面超前探测的常规核心技术手段^[3]。

3.2 地震勘探在构造及采空区灾害勘查中的应用

电法勘探是煤矿井下地质灾害勘查中应用最为广泛的物探技术之一,核心应用场景覆盖煤矿顶板岩层完整性检测、浅层富水隐患识别与小型构造破碎带精准勘查。在顶板灾害专项勘查中,作业人员通过在井下巷道顶板指定间距布设观测电极,构建全覆盖的电阻率观测阵列,连续采集顶板不同深度岩层的电阻率分布数据,若探测结果中出现局部电阻率高低交替突变、大范围电阻率数值紊乱的特征,即可判定对应深度的顶板岩层存在裂隙发育、岩体破碎、软弱夹层分布等不良地质体,可精准圈定顶板不稳定区域的平面范围与赋存深度,提前预判顶板垮落、片帮等动力灾害的发生风险,为后续顶板补强支护提供量化数据支撑。在水害隐患勘查中,该技术可针对采掘工作面浅层隐伏含水裂隙、巷道周边隐伏富水破碎带开展定向探测,快速定位浅层积水异常区域的空间位置,通过电阻率阈值区分干燥破碎带与含水破碎带,有效规避巷道掘进过程中突发淋水、小型涌水的安全隐患。该技术适配煤矿井下浅层、精细化的隐患探测需求,数据成果直观,现场作业效率高,可快速完成井下局部采掘区域的地质安全排查,是煤矿采掘工作面超前探测的常规核心技术手段。

3.3 电磁勘探在深部水害隐患勘查中的应用

电磁勘探是煤矿深部隐蔽水害隐患勘查领域的核心物探技术,其中瞬变电磁法凭借非接触式探测的技术特性,成为当前深部水害防控的主流手段,重点应用于隐伏陷落柱、深部导水断层、深层含水层、封闭老空积水区的精准探测工作。相较于常规电法勘探,该技术的有效探测深度更大,几乎不受井下巷道周边浅层金属支护体与地表杂散信号的干扰,可同时适配井下采掘工作面超前定向探测与地面大范围深部水文地质勘查两类作业场景。在水文地质条件复杂的深部开采区域,该技术可精准识别深埋地下的小型隐伏导水构造,通过二次场衰减特征的定量分析,判定目标含水层的实际厚度、富水性强弱与渗透特性,精准圈定老空积水的三维空间分布范围与静态积水规模,有效解决传统勘查技术难以覆盖的深部隐蔽水害隐患探测难题,为煤矿深部开采阶段的水害风险分级预判提供高精度的量化地质数据支撑。同时,该技术可适配巷道掘进作业的超前动态探测需求,随采掘推进同步开展连续探测,实时排查工作面前方的未知水文异常隐患,大幅提升深部采掘作业的水害防控主动性。

4 煤矿物探勘查的应用要点与技术优化

4.1 物探方法的适配性选择

煤矿物探勘查的应用要点与技术优化,核心前提是做好不同物探方法的适配性选择。不同物探技术的有效探测精度、最大探测深度、适用作业场景存在显著技术差异,需结合现场勘查目标、区域地质条件开展针对性选型,从源头规避单一技术本身固有的探测局限性。针对浅层顶板破碎带识别、采掘工作面局部浅层富水隐患排查这类浅层高分辨率需求的场景,优先选用现场操作便捷、浅部探测分辨率高的电法勘探技术;针对大中型地质构造定位、深部采空区圈定、区域岩层整体结构探测这类大深度大范围需求的场景,优先选用地震勘探技术;针对深部隐蔽水害识别、深层富水异常体定位这类深部水文探测需求的场景,优先选用瞬变电磁勘探技术。针对地质条件复杂、多类型隐患叠加的高风险区域,需采用多种物探技术组合探测的作业模式,通过多源探测数据的交叉相互印证,消除单一物探方法天然存在的成果多解性问题,最终大幅提升探测结果的准确性与工程可靠性^[4]。

4.2 野外数据采集质量控制

煤矿物探野外数据采集质量是决定后续地质灾害隐患识别精准度的核心前置条件,需对全流程野外勘查作业环节实施严格的质量管控。在设备布设阶段,技术人员需根据预设探测深度、现场作业场地的实际条件,精准调整观测点间距、电极排列方式、线圈布设参数,确保整套观测系统的规范性与参数适配性。作业实施过程中,需提前排查并规避井下金属采掘设备、动力供电线路、巷道金属支护结构等各类人工干扰源,最大限度削减电磁干扰、振动干扰对原始数据的畸变影响。同时严格执行数据采集规范,保证全测线数据采集的连续性与完整性,对初步识别出的异常观测区域开展重复加密观测,系统性剔除无效、畸变的异常数据,从源头保障原始采集数据的真实性与有效性,为后续室内专业数据处理、地质异常精准解释提供可靠的基础数据支撑。

4.3 数据处理与异常精准解释

煤矿物探采集的原始数据普遍携带一定的环境噪声

与人工干扰信号,需通过配套的专业处理软件完成针对性滤波去噪、系统误差校正、高精度反演成像等标准化处理流程,逐步剔除无效干扰分量,还原真实的地下介质物理场分布特征。在异常解释阶段,技术人员需充分结合煤矿区域已有的采掘工程图、地质钻孔台账等基础地质资料,系统区分真实地质异常、人工干扰异常与正常岩性变异异常,杜绝脱离现场地质背景的盲目隐患判定。针对各类初步圈定的物探异常区域,结合不同类型地质灾害的典型发育特征,定量分析异常体的三维空间位置、实际发育规模与介质属性,精准区分破碎带、富水带、采空空洞、构造异常等不同隐患类型,实现从地球物理异常到实际地质灾害隐患的精准转化,全面提升最终勘查成果的现场实用性^[5]。

结束语

综上,煤矿地质灾害物探勘查是一项覆盖方法选型、数据采集、成果解释的系统性工程,单一技术无法适配所有复杂地质场景的探测需求。只有结合现场地质条件针对性选择适配的物探技术组合,严格管控野外数据采集质量,依托区域地质背景开展多源数据交叉印证的异常解释,才能从根源上消除单一物探方法的多解性问题,大幅提升隐蔽灾害的识别精准度。未来随着煤矿智能化勘查技术的持续迭代,多源物探数据的融合反演将成为核心发展方向,可为煤矿深部开采的地质灾害超前防控提供更可靠的技术支撑,全面保障井下采掘作业的地质安全。

参考文献

- [1] 谢建峰,张心鑫,王明国.煤矿采矿工程技术与地质勘查方法应用[J].内蒙古煤炭经济,2026,(9):187-189.
- [2] 高素青.深部矿产勘查中综合物探方法的应用研究[J].中国金属通报,2026,(1):207-209.
- [3] 潘清.地质勘查中水文地质存在的问题与灾害防治方法[J].中国金属通报,2026,(10):216-218.
- [4] 刘立.矿山地质勘查中综合物探方法运用分析[J].世界有色金属,2026,(3):139-141.
- [5] 李冬冬,赵建,李剑.天然源面波在煤矿采空区勘查中的应用效果研究[J].西部资源,2026,(1):71-75.