

复杂构造工作面超前地质预测预报成套技术

陈旭辉

甘肃万胜矿业有限公司 甘肃 庆阳 745000

摘要：针对深部矿井复杂构造工作面断层、陷落柱、裂隙导水通道等隐蔽地质体识别精度不足、探测体系割裂、数据无法联动更新等行业短板，构建多尺度立体化超前探测成套技术体系。整合井地协同物探、定向长钻孔一体化探测、随掘随采动态感知三类感知手段，搭建多源异构数据融合处理底座，配套透明地质动态建模与风险分级预警模块，形成全域覆盖、实时迭代、采掘同步的地质预测新模式，适配智能矿山透明地质建设发展需求。

关键词：复杂；构造工作面；超前；地质预测预报；成套技术

引言

煤炭开采逐步转向深部复杂构造区域，地层褶皱、小型断裂、老空水体等地质要素大幅提升采掘扰动致灾概率。传统单一探测手段存在探测距离受限、信号抗干扰能力弱、成果静态滞后等局限，各探测设备数据链路独立，无法实现构造信息连续追踪。立足智能矿山数字化转型方向，整合多类型超前探测工艺与智能数据处理架构，搭建一体化成套技术框架，解决复杂构造工作面地质信息精准预判的现实技术缺口。

1 复杂构造工作面超前探测体系整体架构

成套技术采用分层分级、全域联动的搭建逻辑，划分全域基础探测、工作面精细探测、采掘动态跟踪三个层级，形成从地面到井下、从巷道到钻孔、从静态勘探到实时随掘监测的完整感知网络。全域基础探测依托地面高密度三维地震完成采区宏观构造轮廓刻画，锁定构造集中发育区块，划定工作面重点探查范围，为井下精细化探测划定作业边界。工作面精细探测作为核心层级，集成巷道瞬变电磁、孔中多参数综合探测、井下地震CT三类工艺，实现工作面前方数百米范围内小尺度构造空间定位与属性识别^[1]。采掘动态跟踪层级依托随掘地震、机载传感阵列完成采掘推进过程中地质信息滚动更新，消除静态勘探存在的信息滞后问题。三层探测体系设置统一时空坐标基准，实现不同尺度探测成果坐标自动配准，规避多源数据空间错位问题。架构配套边缘端现场处理单元与井上调度中心两级数据传输链路，井下原始探测信号完成初步降噪解析后向上流转，井上平台完成多源数据融合建模与风险研判。体系设置数据校验机制，不同探测手段获取的同一区域地质信息开展交叉比对，修正单一探测手段信号失真带来的构造误判问

题。整套架构摒弃传统分阶段独立探查模式，实现宏观筛查、精细定位、动态追踪同步推进，压缩地质探查总工期，适配连续化采掘生产节奏。架构预留多类型传感设备接入接口，可兼容新一代矿用智能探测装备迭代升级，适配透明地质长期建设的拓展需求。各层级探测数据统一汇入地质数据库，形成工作面构造时空演化数据集，为后续动态预测模型持续迭代提供稳定数据支撑。

2 多尺度超前探测核心工艺模块

2.1 井地协同一体化静态探测工艺

井地协同探测以地面三维地震成果为约束基准，井下布设检波器阵列开展巷道地震补充勘探，构建地面大尺度、井下高精度的联合勘探模式。地面勘探阶段优化观测系统布设密度，强化褶皱、断裂构造反射信号采集，完成采区整体构造格局划分，提取地层波速基础参数传递至井下处理单元。井下勘探依托巷道侧壁固定传感阵列，采集地层反射波、透射波信号，结合地面波速参数开展联合反演，缩小构造空间定位误差。工艺配套定向长钻孔综合探查工序，钻孔内置集成式探管同步采集电阻率、伽马、钻孔轨迹数据，同步获取地层岩性、富水性两类属性信息，弥补地震手段无法区分含水构造的短板。所有探测成果统一转换至工作面统一坐标体系，完成宏观构造轮廓与局部精细异常体信息拼接。工艺设置分层探查流程，先地面全域筛查，再井下巷道补充，最后定向钻孔定点验证，逐级缩小构造异常范围，降低复杂构造环境下单一勘探手段的识别盲区。整套工艺无需占用采掘作业长时间窗口，可与工作面准备阶段同步施工，实现静态地质基础信息快速获取。

2.2 随掘随采动态连续感知工艺

随掘随采动态感知依托采掘设备作业振动作为天然

震源,取消专用人工震源布设工序,实现掘进、回采全过程不间断地质信号采集。巷道掘进阶段在掘进机后方布设无线传感阵列,持续采集前方地层振动信号,实时解析煤岩界面起伏、小型断裂分布信息。回采阶段依托工作面支架内置微震传感器,捕捉采动扰动下地层破裂信号,识别隐伏导水裂隙、构造活化区域。感知系统搭载井下边缘计算单元,现场完成信号滤波、干扰分离处理,过滤采掘设备机电运转产生的杂波信号,输出标准化地质剖面数据。数据沿井下工业环网实时上传至地质平台,同步更新三维地质模型局部区块^[2]。工艺设置滚动探测机制,每推进固定距离自动完成一轮数据更新,实现构造信息动态迭代,解决传统静态探测成果滞后于采掘进度的问题。传感设备采用无缆布设结构,减少巷道管线铺设工作量,适配复杂构造破碎围岩巷道的施工条件,维持采掘连续作业不受探查工序干扰。

2.3 定向钻孔多参数一体化精细探测工艺

定向钻孔探测依托旋转导向钻机控制钻孔轨迹,沿工作面推进方向布设长距离探查钻孔,孔内下放集成式复合探管,同步采集瞬变电磁、自然伽马、钻孔测斜多类参数。探管采用耐压抗冲击密封结构,适配深部高地压、高水压破碎构造地层作业环境,单孔可完成上百米范围径向地层扫描。钻孔轨迹数据与物探参数同步存储,依托轨迹坐标约束开展立体成像处理,将一维钻孔参数转化为三维空间地层属性场,精准识别孔周断层破碎带、富水构造范围。多钻孔探测成果开展空间插值拼接,形成钻孔控制区连续地质属性剖面,填补巷道物探远距离探测分辨率不足的短板。工艺配套一孔多用施工模式,探查钻孔完成地质信息采集后可复用为瓦斯抽采、疏水通道,减少井下钻孔总施工量。探测数据完成井下预处理后同步上传,与井地协同、随掘感知数据完成融合匹配,提升复杂构造隐蔽致灾体识别完整度。

3 成套技术数字化智能处理与预警体系

3.1 多源异构探测数据标准化处理模块

多源探测数据包含地震波形、电磁响应、钻孔多参数、随掘振动信号四类异构信息,数据格式、量纲、空间尺度存在明显差异,模块建立统一标准化处理流程实现数据归一化。第一步开展时空对齐处理,依托矿井统一坐标系统,对不同设备、不同时段采集的数据完成坐标转换与时间戳标记,消除设备定位偏差带来的空间错位问题。第二步实施分层去噪处理,针对地震数据分离机械振动、巷道电磁干扰杂波,针对电磁数据剔除巷道金属支护产生的畸变信号,针对钻孔数据修正探管推送过程中产生的参数漂移误差。第三步开展数据交叉校

验,提取不同探测手段对同一构造区域的响应特征,对比特征参数匹配度,剔除存在明显偏差的失真数据,保留可信度更高的有效信息^[3]。模块内置标准化数据存储格式,统一存储构造空间坐标、地层属性、探测可信度三类核心信息,搭建结构化地质数据库。数据库设置分层存储分区,静态井地勘探数据长期归档,随掘动态感知数据滚动更新,兼顾数据存储效率与调取速度。模块搭载轻量化井下处理单元,基础降噪、坐标转换工序在井下完成,仅上传标准化有效数据,缩减井下井上数据传输带宽占用。处理完成的标准化数据开放统一数据接口,直接对接三维地质建模平台,省去人工数据转换环节,缩短构造信息更新周期,适配复杂构造工作面高频次地质预判需求。

3.2 多物理场数据联合融合反演模块

模块依托不同探测手段物理响应机理建立联合反演逻辑,整合地震波场、电磁场、钻孔岩性参数构建多维度约束条件,提升复杂构造空间形态与属性识别精度。地震数据提供地层整体构造轮廓约束,划定断裂、褶皱空间分布范围;电磁数据提供地层富水性属性约束,区分干燥破碎带与充水构造;钻孔多参数提供局部岩性精准约束,修正反演模型局部偏差。反演流程采用分步迭代模式,先以大尺度井地地震数据搭建基础地层框架,再导入钻孔实测参数校正地层层界面,最后叠加电磁响应数据完成含水属性赋值,逐层收敛降低模型误差。模块摒弃单一物理场独立反演模式,通过多场相互约束消除单一手段存在的多解性问题,减少小型隐伏构造漏判概率。反演计算拆分井下局部快速计算与井上全域精细计算,采掘推进过程中局部区块更新任务在井下边缘单元完成,全域整体模型重构任务调度井上算力执行,平衡处理时效与计算精度。输出成果包含构造空间矢量轮廓、地层电阻率分布、岩性分层三类一体化数据,直接支撑三维地质模型局部更新。模块支持多批次探测数据增量融合,新增随掘、钻孔探测数据无需重构全域模型,仅更新对应采掘区段,大幅降低复杂构造区域模型迭代算力消耗。

3.3 复杂构造透明地质动态建模模块

模块以标准化融合数据为基础,构建可实时迭代的工作面三维透明地质模型,完整承载断层、陷落柱、裂隙带、富水区等全部构造要素信息。建模采用分区块递进构建逻辑,先基于全域静态勘探数据生成基础地层模型,划分工作面完整地层层与大型构造边界;再导入定向钻孔精细探测数据,细化模型局部小型断裂、破碎带几何形态;最后接入随掘动态感知数据流,同步更新

采掘前方未揭露区域模型信息。模型设置局部动态更新机制,采掘每向前推进一段距离,调取对应区段新增探测数据,仅对模型采掘前端区块重新网格化渲染,无需整体重建模型,保障地质信息更新时效性。模型同步搭载多属性分层存储结构,同一空间单元同步存储岩性、富水性、构造破碎程度多类参数,实现构造形态与致灾属性一体化表达^[4]。模块配套空间检索功能,可快速调取任意采掘剖面、任意钻孔轨迹对应的地质属性剖面,支撑现场地质研判工作。模型统一适配井下调度大屏、地面管控终端多终端可视化展示,采用分层渲染机制,简化终端加载压力,保障复杂构造密集区域模型流畅调取。建模成果同步写入地质数据库,形成工作面构造演化时序档案,记录采掘全过程构造信息更新轨迹,为长期构造发育规律分析提供完整数据载体。

3.4 构造致灾风险分级研判模块

模块依托透明地质模型输出的构造空间与属性数据,建立分层风险研判逻辑,量化复杂构造对采掘作业的扰动影响程度。研判流程第一步提取模型内构造关键参数,包含断裂落差、破碎带宽度、地层富水指标、构造与采掘巷道空间距离四类基础指标;第二步划分三级风险区间,依据构造规模、含水特征、采掘扰动叠加效应完成风险等级划分,区分无风险、中等风险、高风险构造区段。模块设置动态研判机制,随采掘推进同步调取更新后的地质模型,实时刷新前方区段风险等级,替代传统固定周期人工研判模式。针对高风险构造区段自动标记空间范围,同步推送对应构造基础探测原始数据,支撑现场人员核对构造识别依据。模块划分多灾种研判分支,分别针对水害、瓦斯突出、顶板失稳三类构造衍生风险开展独立判别,输出分灾种风险分区成果。研判结果不单独输出文字结论,直接映射至三维透明地质模型对应

区块,以空间分区形式直观呈现风险分布范围。模块配套风险更新日志,记录每一轮研判参数、风险等级变更记录,形成完整风险追溯链条,便于后续复盘构造预判与采掘扰动的对应关系^[5]。通过研判数据同步接入采掘调度系统,整合各类井下实时监测信息,形成标准化统一数据底座。依托精准全域数据支撑工作面采掘动态研判,科学优化采掘推进节奏,统筹规划超前支护加固工序排布,保障采掘作业有序、安全高效开展。

结语

该复杂构造工作面超前地质预测预报成套技术,整合多尺度探测工艺与数字化智能处理体系,打通静态勘探、动态感知、数据融合、风险预警全业务链路。该技术解决了传统探测方式单一、数据割裂、预判滞后、精度不足的行业问题,实现复杂地质条件下采掘同步地质预判。技术体系适配智能矿山透明地质建设需求,可有效提升矿井地质保障能力,后续可通过设备协同优化、算法轻量化迭代,拓展深部矿井复杂构造开采应用场景。

参考文献

- [1] 梁文彬,范凯,卓军.复杂地质条件工作面构造探测及智能化开采技术[J].煤矿安全,2020,51(12):188-191.
- [2] 李萍,卫蓉,范涛,赵睿,蒋必群,田小超.快掘工作面定向长钻孔孔中综合物探超前探测关键技术[J].煤炭科学技术,2025,53(12):208-225.
- [3] 赵云峰.煤矿井下掘进工作面构造超前探测技术应用[J].山东煤炭科技,2021,39(9):151-154.
- [4] 侯俊伟,左利兵,徐文腾.综合超前地质预报技术在下穿水库隧道中的应用[J].工程地球物理学报,2023,20(5):581-589.
- [5] 徐长久.高瓦斯矿井地质构造超前探测技术研究[J].煤矿现代化,2021,30(6):117-119.