

基于综合物探的煤矿采空区构造识别与注浆效果评价研究

杨建强 刘旭 陈前苗

陕西省煤层气开发利用有限公司钻井分公司

DOI:10.32629/gmsm.v9i3.2478

[摘要] 煤矿采空区受长期采动扰动影响,内部往往伴随裂隙扩展、空洞连通及岩层松动等问题,并且传统钻孔探测在空间覆盖与动态监测层面存在一定局限,复杂区域异常结构难以及时判定。基于此,本文结合电阻率法、地震波法及地质雷达等物探技术,对采空区构造特征识别与矸石充填注浆效果评价展开研究,借助多源数据反演分析裂隙发育状态、空洞分布特征及浆体扩散情况,并构建注浆效果综合评价体系。多种物探方法协同应用后,采空区异常体识别精度与充填治理判定可靠性均得到增强,对矿井灾害防控与地层稳定性管理具有较高工程价值。

[关键词] 煤矿采空区; 物探方法; 构造特征识别; 矸石充填; 注浆效果评价

中图分类号: TD82 **文献标识码:** A

Research on Structural Identification and Grouting Effect Evaluation of Coal Mine Goaf Based on Integrated Geophysical Prospecting Methods

Jianqiang Yang Xu Liu Qianmiao Chen

Drilling Branch of Shaanxi Coalbed Methane Development and Utilization Co., Ltd.

[Abstract] Affected by long-term mining disturbances, coal mine goafs are often accompanied by fracture propagation, cavity connectivity, and rock mass loosening. Traditional drilling detection methods have certain limitations in spatial coverage and dynamic monitoring, making it difficult to accurately identify abnormal structures in complex areas. In this study, geophysical prospecting technologies including resistivity methods, seismic wave methods, and ground-penetrating radar were employed to investigate the structural identification of goafs and the evaluation of gangue filling grouting effects. Through multi-source data inversion, the fracture development status, cavity distribution characteristics, and slurry diffusion conditions were analyzed, and a comprehensive evaluation system for grouting effects was established. The collaborative application of multiple geophysical methods improved the identification accuracy of anomalous bodies in goafs and enhanced the reliability of filling treatment assessment, providing significant engineering value for mine disaster prevention and strata stability management.

[Key words] coal mine goaf; geophysical prospecting methods; structural feature identification; gangue filling; grouting effect evaluation

前言

煤矿深部开采持续推进过程中,采空区规模不断扩大,顶板垮落、围岩应力迁移及地下水活动相互叠加,容易诱发巷道变形、地层塌陷及突水等问题,部分矿区裂隙隐伏性较强,空洞分布离散,传统钻孔探测难以准确反映地下结构连续变化。近年来,电阻率法、地震波法及瞬变电磁法逐渐应用于采空区治理领域,借助介质物性差异识别异常结构,在裂隙探测、空洞判定及注浆监测方面形成较强适用性,但复杂区域多源数据联合解释与治理效果量化分析仍有进一步研究空间。

1 煤矿采空区构造特征及矸石充填注浆的技术原理

1.1 煤矿采空区构造特征基础

煤层回采结束后,覆岩原有应力平衡被重新分配,顶板荷载逐渐向煤柱及深部围岩转移,局部区域容易形成离层裂隙与冒落空洞,依据覆岩移动规律,采空区通常划分为冒落带、裂隙带及弯曲下沉带,其中冒落带岩块排列松散,孔隙率较高,裂隙带则表现出纵向贯通与横向扩展并存特征,部分区域还会形成导水裂隙通道^[1]。深埋厚煤层工作面受高地应力影响,顶板周期来压更加明显,裂隙网络会由离散状态逐渐转变为连通结构,断层附近还容易出现非均匀塌陷与局部应力集中问题。采空区稳定状态与埋深、煤层厚度、顶板岩性及采动强度存在直接联系,

多煤层重复开采区域，覆岩破坏范围往往超出原始工作面边界，局部沉降量可达到数百毫米，部分老空区还可能伴随积水、瓦斯聚集及围岩软化现象，对后续采掘活动形成安全威胁。

1. 2 矽石充填注浆技术原理

矽石充填注浆主要依托浆体扩散与固结作用增强采空区承载能力，煤矽石经破碎与级配处理后，通常会与粉煤灰、水泥及外加剂形成复合浆液体系，现场施工阶段较多采用1.5~3.0MPa注浆压力控制浆体扩散范围，使浆液沿裂隙与空洞逐步渗流填充。裂隙宽度较大的区域，浆液以快速扩散为主；微裂隙区域则更多依赖压力渗透形成填充结构；浆液凝结后，原有松散岩块间隙逐渐压密，裂隙连通性明显减弱，围岩波速与整体稳定性随之增强；对于含水采空区，固结浆体还能够削弱地下水渗流通道，降低突水风险，现场治理过程中，注浆压力过低容易形成残余空洞，压力过高则可能诱发围岩二次扰动，因而矿区通常会结合实时物探结果动态调整注浆参数，并采用分段注浆与多孔协同工艺增强浆液覆盖均匀性。

2 基于物探方法的煤矿采空区构造特征识别

2.1 测点布设与勘探方案设计

采空区物探识别通常需要结合工作面推进方向、煤层埋深及历史采掘资料开展测线设计，电阻率法测线大多沿煤层走向或裂隙延展方向布设，极距一般控制在5~20m范围，浅部采空区较多采用高密度小极距布设方式，以增强空洞边界识别精度；深埋区域则适当扩大测线跨度，提高电流场覆盖范围^[2]。地震波法更关注波场连续性，检波点间距通常控制在2~5m，复杂区域往往采用纵横交叉网格布设，以减轻异常体漏判问题，不同物探方法在探测深度、分辨率及适用对象层面存在差异，现场通常会结合采空区结构特征进行针对性选择，具体参数见表1所示：

表1 常用物探方法技术参数与适用条件

物探方法	探测深度	分辨率	适用对象
高密度电阻率法	20~150m	中等	含水裂隙、采空空洞
地震波 CT	50~300m	较高	围岩完整性、裂隙带
地质雷达	0~15m	高	浅层空洞、注浆边界
瞬变电磁法	50~200m	中等	富水异常区

矿区井下环境容易受到轨道、电缆及金属支护结构干扰，现场勘探阶段通常会避开大型机电设备集中区域，并结合巷道断面调整设备排列方式，对于断层、陷落柱及老空积水区，现场较多采用电阻率法与地震波法联合探测模式，局部浅层区域则辅以地质雷达进行精细识别，部分矿区还会借助三维地质建模技术，将钻孔资料、采矿图与物探测线同步导入模型，使异常区定位更加直观。

2.2 数据采集与预处理

原始数据质量直接影响采空区结构解释结果，电阻率法采集阶段，需要实时监测供电稳定性与接地电阻变化，避免导电积水或接触不良造成异常数据漂移，视电阻率计算通常采用下式：

$$\rho_s = K \times \frac{\Delta U}{I}$$

式中， ρ_s 为视电阻率， K 为装置系数， ΔU 为电位差， I 为供电电流，技术人员依托视电阻率变化分析低阻异常范围，裂隙含水区及采空空洞通常表现为低阻响应，地震波法采集过程中运输振动及巷道回声容易形成波场干扰，现场往往采用多次叠加方式增强有效信号，弹性波传播速度可表示为：

$$V = \frac{L}{t}$$

式中， V 为波速， L 为传播距离， t 为传播时间，完整围岩波速相对稳定，裂隙密集区则会形成低速异常带，深部采空区探测阶段，现场较多采用低频震源增强穿透能力，以减轻高频波衰减影响。原始数据形成后，需要完成坏点剔除、频率滤波及背景场校正等处理，电阻率数据通常采用反演算法消除地形起伏干扰，地震波数据则依托静校正与速度分析增强反射波连续性，地质雷达数据处理中，时间零点校正与增益处理属于常见步骤，可增强深部弱反射信号识别能力，不同物探数据完成统一坐标转换后，再借助三维插值算法构建地下结构模型，使采空区空间形态更加清晰。

2.3 构造特征提取与识别

采空区结构识别阶段，技术人员通常会结合低阻异常、低速波场及强反射界面共同分析地下异常区域，电阻率剖面中，低阻异常区往往对应裂隙发育带、积水空洞或松散破碎区，高阻区域则多与压实矽石或完整围岩有关，部分长期采动区域会形成明显电阻率等值线扭曲现象，此类区域通常伴随裂隙连通程度增强。

地震波数据对围岩完整性变化响应较强，完整岩层波速相对稳定，裂隙区则表现为波速下降与波幅衰减，技术人员借助地震层析成像技术建立三维波速模型后，可分析采空区顶板稳定状态及裂隙扩展方向，地质雷达更适用于局部精细识别，雷达图像中的连续强反射界面多对应裂隙边界或空洞顶部，局部波形紊乱区则可能与塌陷体有关^[3]。复杂采空区识别阶段，多源数据联合解释已成为常见方式，技术人员通常会将低阻异常区、低速异常区及雷达强反射区进行空间叠加，再结合钻孔资料分析异常体真实性，联合解释完成后采空区裂隙范围、塌陷边界及空洞分布能够形成较完整的三维结构模型，为后续注浆治理提供依据。

2.4 识别结果验证与精度评估

物探识别完成后，现场通常会结合钻孔揭露资料开展验证分析，钻孔漏浆、掉钻及返水情况能够直接反映地下空洞与裂隙发育状态，低阻异常区与钻孔揭露结果保持一致时，说明异常体判定可靠性较高，部分矿区还会将物探边界与历史工作面范围进行叠合分析，判断采空区扩展范围是否超出原始采掘边界。误差分析阶段，技术人员重点关注地层非均质性、设备噪声及反演算法对结果的影响，电阻率法容易受地下水导电特性干扰，地震波法则可能受到复杂构造与空腔反射影响，实践中较多采用重复勘探与联合验证方式降低误判风险，近年来，部分矿井开始引

入动态监测与智能反演技术,依托周期性物探复测分析裂隙扩展与围岩稳定变化,使采空区识别逐渐向实时预警方向发展。

3 矽石充填注浆效果评价体系构建

3.1 评价指标筛选与确定

矽石充填注浆评价需紧扣“填充是否到位、裂隙是否封堵、围岩是否稳定”三个技术问题展开,指标筛选宜以物探响应和工程监测数据为基础,重点选取注浆密实度、空洞残余率、裂隙封闭率、围岩波速变化及顶板沉降量等参数,注浆密实度反映浆体对采空区空腔的填充程度,裂隙封闭率用于判断导水通道阻断效果,空洞残余率则直接关系到后期二次塌陷风险^[4]。高含水采空区还需关注低阻异常范围变化,低阻区收缩通常说明浆体对含水裂隙产生封堵作用,深埋高应力区域更重视波速恢复与顶板变形控制,浅埋区域则需结合地表沉降监测判断覆岩移动状态,此类指标组合能够避免单一参数误判,使注浆效果评价更贴近现场治理需求。

3.2 评价指标量化与分级标准

评价指标量化宜采用注浆前后对比方式开展,电阻率指标可采用变化率表达:

$$\eta_p = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \times 100\%$$

其中, η_p 为电阻率变化率, ρ_1 为注浆前视电阻率, ρ_2 为注浆后视电阻率,低阻异常区电阻率回升,通常说明浆液填充后介质连续性增强,含水裂隙或空洞范围缩小,地震波指标可采用波速恢复率表示:

$$\eta_v = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100\%$$

式中, η_v 为波速恢复率, V_1 为注浆前波速, V_2 为注浆后波速,波速升高、波幅衰减减弱、反射界面趋于连续,通常对应裂隙压密和岩体完整性增强,分级时可将低阻异常残留范围、波速恢复幅度、雷达强反射异常数量及沉降速率纳入综合判定,划分为稳定区、复查区和补浆区。

3.3 评价方法选择与应用

注浆效果评价不宜依赖单一物探结果,工程现场较多采用“电阻率法判定浆液扩散范围、地震波法分析岩体完整性、地质雷达识别局部残余空洞”的组合方式,电阻率法对含水裂隙和低阻异常反应敏感,适合判断采空区整体治理范围;地震波法对裂隙压密和围岩连续性变化响应明确,适合评价顶板稳定状态;地质雷达分辨率较高,适宜用于巷道底板、浅层空洞及注浆边界复核^[5]。多指标综合评价可采用加权评分法,结合采空区埋深、裂隙发育程度及治理目标确定权重,深部采空区宜提高波速恢复率和顶板沉降量权重,含水老空区则需强化电阻率变化率和

低阻异常范围指标,三维可视化评价可将低阻区、低速区和雷达异常区叠置到统一空间模型中,直观呈现浆液扩散不足、局部离析及残余空洞位置,为补浆孔布置提供依据^[6]。

3.4 评价流程制定

注浆前需完成基础探测,依托采矿图、钻孔资料和物探剖面确定空洞边界、裂隙带范围及含水异常区,注浆施工阶段同步记录注浆压力、流量、浆液水灰比、单孔注入量及终压稳定时间,出现压力突降、流量异常增大或长时间不升压时,通常提示存在大尺度裂隙或隐伏空洞,现场宜调整孔序、浆液浓度及分段注浆参数。注浆结束后开展复测,将电阻率、波速、雷达反射及沉降监测结果与治理前数据对比,判断稳定区、复查区和补浆区,局部低阻异常未明显收缩、波速恢复不足或雷达强反射仍集中分布时,往往说明浆液扩散受限或空洞未填实,需结合钻孔验证进一步处理,长期阶段可采用周期性物探复测和地表沉降观测,形成“探测—注浆—复测—补强”的闭环评价流程^[7]。

4 总结

煤矿采空区治理逐渐由局部修复转向动态稳定控制,地下结构识别精度与注浆质量判定能力直接影响矿井长期安全状态,多源物探技术联合应用后,裂隙扩展、空洞分布及浆体扩散特征能够形成连续响应,采空区异常结构判定也由单一经验分析逐步转向数据耦合分析,伴随智能反演与动态监测技术持续发展,采空区治理过程将进一步强化实时感知与风险预警能力,进而增强复杂地质条件下的灾害防控水平,为煤矿绿色开采与安全生产提供更稳定的技术支撑。

[参考文献]

- [1]刘启民,潘继明,刘长庆.基于物探方法在煤矿采空区建设工程中的应用分析[J].能源与节能,2025,(09):59-62+258.
- [2]郭团结,田军利,刘艳,等.采空区垮落裂隙充填注浆扩散规律研究[J].煤炭技术,2024,43(12):136-142.
- [3]张利军,张瑞杰.基于综合物探技术的煤矿采空区探测实践应用[J].矿业装备,2024,(12):73-75.
- [4]李飞.煤矿采空区管理中物探技术的应用[J].能源与节能,2024,(09):317-320.
- [5]代玲玲,江勇.综合物探技术在煤矿采空区探测应用实践分析[J].煤炭技术,2024,43(03):115-119.
- [6]罗霄,许智海,李正胜,等.多参数综合物探方法在煤矿采空区勘探中的应用研究[J].煤炭工程,2020,52(02):32-37.
- [7]杨洪岩.综合物探方法在煤矿采空区勘察中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2026,(02):184-186.

作者简介:

杨建强(1990--),男,汉族,内蒙古土默特左旗人,本科中级工程师,研究方向:煤田测井与多方法综合物探(地面三维地震、地面及孔内瞬变电磁、井下超前探测)技术应用。