

煤矿采空区地球物理探测难点及对策浅析

梁 鹏

宁夏煤炭勘察工程有限公司 宁夏 银川 750011

摘 要：煤矿采空区地球物理探测是保障矿山安全生产与地质灾害防治的关键技术。本文分析了该领域面临的核心难点：地质条件复杂、干扰因素多、单一探测方法存在多解性及深度、分辨率限制等。针对这些问题，提出综合物探方法组合、新技术研发、数据处理与解释优化等对策，为提升采空区探测精度、降低安全风险提供理论与实践参考。

关键词：煤矿采空区；地球物理；探测难点；对策

引言：煤矿采空区作为矿产开采后的遗留隐患，易引发地表塌陷、瓦斯突出等灾害，严重威胁生产安全与生态环境。地球物理探测凭借非接触性、高效率等优势，成为识别采空区的主要手段。然而，实际探测中，复杂的地质条件导致异常响应模糊，自然与人文干扰加剧数据解读难度，单一方法的技术局限进一步降低探测可靠性。文章聚焦煤矿采空区地球物理探测的突出难点，系统梳理地质、干扰及方法层面的制约因素，结合现有技术进展提出针对性解决路径，旨在为完善采空区探测体系、推动矿山安全治理提供支撑。

1 煤矿采空区地球物理探测的重要性

煤矿采空区地球物理探测对矿山安全生产、资源利用及生态保护具有不可替代的重要意义。从安全层面看，采空区长期存在易引发地表塌陷、巷道垮塌等事故，历史上因采空区未被及时发现导致的人员伤亡和设备损毁案例频发。通过地球物理探测可精准定位采空区的空间分布、规模及稳定性，为制定防治方案提供数据支撑，从源头规避安全风险。在资源开发方面，老旧矿区遗留的采空区常伴随未回收资源，探测技术能识别可利用资源边界，提高资源回收率，延长矿山服务年限。同时，对于新建矿井，提前探明采空区分布可优化开采设计，避免重复建设与资源浪费^[1]。

2 煤矿采空区地球物理探测的主要难点

2.1 地质条件复杂

2.1.1 地层岩性变化大

煤矿开采区域地层岩性非均质性显著，同一探测区砂岩、泥岩、煤层等交替出现，物理性质差异大，导致地球物理场响应复杂，采空区异常信号易被掩盖干扰，增加识别难度。通过对断面图异常反映程度、异常点个数、平面对应关系结合地质情况确定异常区范围并圈定平面位置，如图2-1大井沟煤矿老窑采空区推断成果图，为应对岩性变化带来的干扰提供了基础。

2.1.2 采空区形态多样

采空区形态受多种因素影响极多样，不同形态异常特征差异明显，难以建立统一识别模式，给判断边界和范围带来挑战。例如图2-1大井沟煤矿老窑采空区推断成果图，通过断面异常结合老窑口位置图、煤层露头等地质情况对异常区去伪存真，有助于更清晰地识别不同形态采空区，图中划分的12个异常区为研究形态多样的采空区提供了具体对象。

2.1.3 采空区充填情况复杂

采空区充填物类型和程度差异大，同一采空区不同部位也有较大变化，使地球物理场响应复杂，增加判断不确定性。据地面调查和开采条件，勘查区老窑采空区挖煤深度浅，一般20m左右，个别达50m。本次推断解释高阻异常为不含水老窑采空区，低阻为积水采空区。图2-1中A1~A4洋红色网格区为高阻采空区，B1~B8蓝色网格区为低阻采空区，清晰呈现了不同充填情况的采空区。

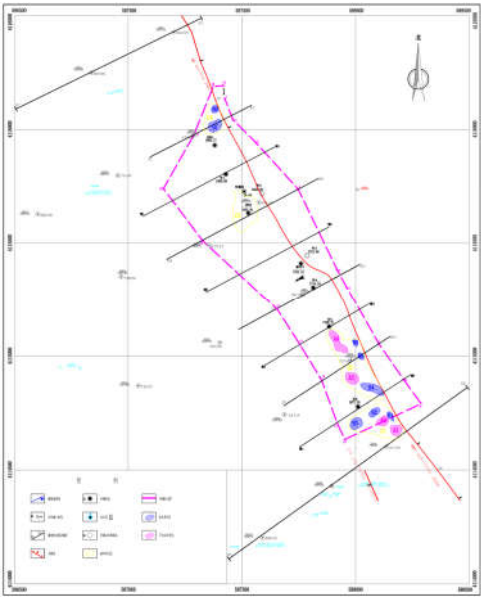


图2-1 大井沟煤矿老窑采空区推断成果图

2.2 干扰因素多

2.2.1 人文干扰

煤矿及周边区域的人文活动会产生强烈干扰。矿区的工业设施,如输电线路、金属设备,会形成电磁异常,干扰电磁类探测方法的信号。过往采矿留下的废弃巷道、钻孔,其物理性质与采空区存在相似性,易产生假异常。

2.2.2 自然干扰

自然环境中的多种因素会对探测造成干扰。地下水的分布不均会改变地层电阻率,尤其当采空区积水与周边含水层连通时,会模糊采空区的电性异常。地表植被覆盖厚度、土壤湿度的变化,会使地震波在地表传播时能量衰减不一致,导致深部信号减弱。

2.3 探测方法局限性

2.3.1 单一方法的多解性

单一地球物理探测方法对采空区的识别依赖特定物理参数,而不同地质体可能产生相似异常响应。例如,电阻率法中,采空区积水与富水地层均表现为低阻异常,难以区分;地震反射法中,采空区的反射信号可能与断层、煤层分叉等构造异常混淆。

2.3.2 探测深度和分辨率的限制

各类探测方法存在深度与分辨率的固有矛盾。浅部探测(如地质雷达)分辨率高但有效深度通常小于30米,难以识别深部采空区;深部探测方法(如重力勘探)虽能覆盖较大范围,但分辨率低,无法精准刻画采空区细节。当采空区埋深超过方法有效探测范围或规模较小时,其异常信号易被背景噪声掩盖,导致探测失效。

2.3.3 设备性能和技术限制

现有探测设备的性能制约着探测效果。部分便携式设备信号采集精度不足,在复杂地质条件下易产生数据失真;大型设备虽精度较高,但受地形限制难以在山区、建筑群等区域部署。同时,数据采集技术的标准化程度低,不同操作人员的参数设置差异可能导致同一区域探测结果不一致,影响数据的可靠性与可比性^[2]。

3 煤矿采空区地球物理探测的对策

3.1 综合物探方法的应用

3.1.1 综合物探的原理和优势

综合物探方法基于不同地球物理技术对地质体物理属性的差异化敏感性,通过多方法数据协同分析构建地下地质完整图像。不同技术针对电阻率、密度、弹性波速等参数,单一方法仅反映局部特征,综合方法通过多维度数据交叉验证剔除无效异常。在工程实践中成果显著:如山西大同某焦煤矿区采用地震反射法与高密度电

阻率法组合,将采空区识别准确率从单一方法的62%提升至93%,成功圈定27处隐伏采空区,避免了后续掘进工程中的3次重大突水风险;陕西榆林某矿区通过重力勘探与瞬变电磁法联用,使500米以深采空区的探测效率提升4倍,单平方公里探测成本降低35%;

3.1.2 常用综合物探方法组合

常用综合物探方法组合需依探测目标深度、规模及地质条件灵活选择。浅部采空区探测中,地质雷达与高密度电阻率法组合应用广泛,在江苏徐州某矿区的实践中,该组合对埋深0-30米的12处采空区实现边界识别误差 ≤ 0.5 米,其中积水采空区与干燥采空区的区分准确率达91%,为针对性充填方案提供了数据支撑。中深部探测多采用地震反射法与瞬变电磁法联用,山西晋城某井田应用该组合,成功圈定埋深300-800米的采空区17处,三维定位误差 $\leq 2\%$,与钻探验证的吻合度达89%,较单一地震法减少23处假异常;复杂地形区域搭配微动探测与重力勘探,贵州六盘水山区矿区通过该组合,在地表干扰强烈的条件下,将采空区探测覆盖率达58%提升至100%,圈定的大范围采空区边界与实际开挖范围偏差 ≤ 10 米。

3.1.3 综合物探的实例分析

某老矿区(河北唐山某矿)采空区探测中,初期单一地震反射法因断层与采空区异常信号相似,误将3处断层判定为采空区,误判率达35%。引入高密度电阻率法后,发现低阻异常区与地震反射空白区重合度达92%,结合该区域1980-2000年采矿台账,最终精准圈定5处富水采空区,经钻探验证,采空区边界误差 ≤ 3 米,为后续注浆堵水工程节省成本1200万元。另一浅部矿区(山东兖州某矿)采用地质雷达与瞬变电磁法组合,地质雷达清晰勾勒出埋深5-20米的8处空洞边界,形态刻画误差 ≤ 1 米;瞬变电磁法数据揭示了埋深15-35米的3处充水异常区,与钻孔抽水试验结果对比,积水范围吻合度达90%。

3.2 新技术研发与应用

3.2.1 槽波地震探测技术

槽波地震探测技术是专门针对煤层内部采空区探测的特色技术,其核心原理是利用煤层作为波导层,使地震波在煤层中形成沿层传播的导波(即槽波)。当煤层中存在采空区时,槽波的传播特性会发生明显变化,通过分析槽波的传播速度、振幅衰减及波形畸变等特征,可实现对采空区的精准定位。该技术对煤层内部的不连续性极为敏感,能够有效识别小尺度采空区及煤层变薄区。与传统地震方法相比,槽波地震探测受地表干扰影响小,可在复杂地形或井下环境中稳定工作,尤其适用

于高瓦斯、高水压等复杂条件下的煤层采空区探测。其突出优势在于能聚焦煤层内部结构，不受上下岩层的强烈干扰，可穿透高阻地层，为煤层内采空区的精细探测提供可靠数据，图3-1老石旦煤矿16402、16403工作面槽波地震勘探成果图，为目前老矿区面临复采及深部煤层开采安全评估提供了重要依据。

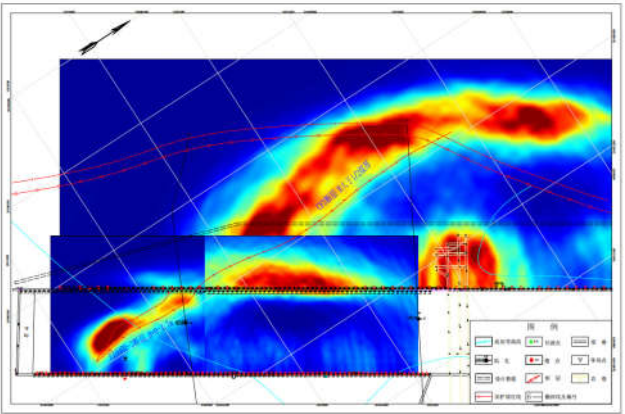


图3-1 老石旦煤矿16402、16403工作面槽波地震勘探成果图

3.2.2 微动探测技术

微动探测技术是一种基于地表天然微振动信号的被动源探测方法，通过采集地表自然状态下的微弱振动（如地壳微小运动、大气扰动等引起的振动），利用不同频率成分面波的传播特性反演地下介质结构。该技术无需人工激发震源，具有非侵入性、高效率的特点，适用于城市周边、建筑群密集区等不宜进行主动源探测的区域。在采空区探测中，微动探测通过分析不同深度对应的面波频散曲线，可识别地下介质的波速异常区，进而判断采空区的分布范围。

3.2.3 其他新技术

除槽波地震和微动探测技术外，多项新兴技术在煤矿采空区探测中展现出良好的应用前景。分布式光纤传感技术通过将光纤埋入地下或附着于巷道壁，利用光纤的应变传感特性，可实时监测采空区引起的地层微小变形，实现对采空区动态变化的长期连续监测，为采空区稳定性评估提供动态数据支持。三维电阻率成像技术通过多方位、多电极排列方式采集数据，结合先进的三维反演算法，能构建地下三维电性结构模型，清晰呈现采空区的空间形态及与周围介质的接触关系。

3.3 数据处理与解释优化

3.3.1 数据处理方法的改进

数据处理方法的改进是提升采空区探测数据质量的核心环节。针对传统处理中噪声过滤不彻底的问题，引入自适应噪声压制算法，可根据信号频率特征动态调整滤波参数，精准剔除输电线路干扰、机械振动等人文噪声，同时保留采空区的微弱异常信号。在信号增强方面，采用小波多尺度分解技术，对不同深度的信号进行分层处理，突出采空区与周围介质的物性差异。

3.3.2 地质模型与地球物理模型的结合

地质模型与地球物理模型的深度结合，能够显著提升解释结果的可靠性。以区域地质调查数据为基础，构建包含地层序列、构造走向、煤层厚度变化的三维地质框架，明确不同地质体的空间分布规律。将地球物理探测获得的电阻率、波速等物性参数嵌入该地质框架，形成耦合模型，通过反复迭代验证，使地球物理异常与地质体的空间位置相互匹配。

3.3.3 多学科知识的融合

多学科知识的融合为数据解释提供了更全面的视角，有效提升了解释的准确性。地球物理学提供物性差异分析的技术手段，通过不同参数的变化识别异常区域；地质学支撑地下构造的演化逻辑，明确采空区形成的地质背景；采矿工程学补充开采工艺对采空区形态的影响，推断不同开采方式下采空区的可能分布特征。同时，引入计算机科学的人工智能算法，对多源数据进行智能分类与模式识别，实现定性解释向定量评估的转化^[3]。

结束语

综上所述，煤矿采空区地球物理探测面临地质条件复杂、干扰因素多、方法有局限等难题。但通过综合物探方法应用、新技术研发及数据处理优化等对策，可有效提升探测精度。未来需持续推动多学科融合与技术创新，完善探测体系，为矿山安全生产、地质灾害防治及生态保护提供坚实技术支撑，助力煤矿行业可持续发展。

参考文献

[1]刘博文,王振伟,李伟等.露天矿地下采空区探测与治理技术应用与实践[J].中国煤炭,2021(11):47-51+64.
[2]薛国强,潘冬明,于景邨.煤矿采空区地球物理探测应用综述[J].地球物理学进展,2022,33(05):427-432.
[3]章林,孙国权,李同鹏,地下矿山采空区探测及综合治理研究与应用[J].金属矿山,2023(11):321-322