

# 震电综合物探技术在巷道超前探测中的应用研究

王晓龙

山西省煤炭地质一一五勘查院有限公司 山西 大同 037000

**摘要：**随着煤炭等资源开采深度的增加，巷道超前探测成为保障矿井安全生产的关键。震电综合物探技术通过结合反射地震法和瞬变电磁法，实现对巷道前方地质构造和水文条件的精确探测。本文研究了震电综合物探技术的基本原理、应用设计及工程实例，评估了其应用效果，并探讨了存在的挑战与发展趋势。该技术为矿井地质灾害预防提供了有力支持，具有广阔的应用前景。

**关键词：**震电综合物探技术；巷道超前探测；矿井安全生产

**引言：**随着矿产资源开采深度增加，巷道超前探测面临复杂地质条件挑战。传统探测技术单一，难以满足精度和安全性需求。震电综合物探技术融合地震波与电磁波优势，可实现对巷道前方隐伏构造及富水区的精准探测。本研究旨在探索该技术应用于巷道超前探测的有效性，为矿井安全生产提供科学依据和技术支持。

## 1 震电综合物探技术基本原理

### 1.1 反射地震法原理

(1) 地震波的传播特性。反射地震法基于地震波在弹性介质中传播的理论。地震波在地下介质中传播时，其传播速度、振幅和频率等特性会受到介质弹性模量、密度等物理性质的影响。当地震波遇到不同介质的分界面时，部分波能会被反射回地表，形成反射地震波。

(2) 反射地震波的形成与接收。人工激发地震波后，这些波会向地下深处传播。当它们遇到弹性差异明显的介质界面时，如岩层分界面、断层等，会产生反射波。这些反射波被布置在地表的检波器接收，并通过地震仪记录下来。(3) 在矿井巷道超前探测中的应用优势。反射地震法在矿井巷道超前探测中具有显著优势。它能够可靠地确定围岩的波速分布和反射界面的位置，为分析确定岩性界面、构造位置等提供可靠依据。此外，该方法对巷道掘进前方的隐伏构造、断层等具有较高的识别精度，有助于预防地质灾害的发生。

### 1.2 瞬变电磁法原理

(1) 电磁场的传播与衰减。瞬变电磁法利用脉冲电流激励地下介质，产生涡旋电流场。当激励电流关断后，这种涡流不会立即消失，而是会在其周围空间形成随时间衰减的二次电磁场。二次电磁场的衰减规律主要取决于地下介质的导电性、体积、规模和埋深等因素。

(2) 瞬变电磁响应特征。瞬变电磁法的响应特征主要体现在二次电磁场的衰减曲线上。通过观测和分析这些衰

减曲线，可以推断地下介质的空间分布和导电性特征。

(3) 在矿井富水区探查中的应用优势。瞬变电磁法在矿井富水区探查中具有显著优势。它能够有效地反映地下水的赋存状态，对含水层的分布、厚度和导水性等具有较高的识别精度。此外，该方法还具有探测深度大、分辨率高等特点，适用于矿井复杂地质条件下的富水区探查<sup>[1]</sup>。

## 1.3 震电结合的综合物探方法

(1) 弹性波场与电磁场的场源优势互补。震电综合物探技术通过结合反射地震法和瞬变电磁法，实现了弹性波场与电磁场的场源优势互补。地震波能够反映介质的波速和密度等弹性参数，而电磁波则能够反映介质的导电性特征。通过联合分析这两种波场的信息，可以更加全面地了解地下介质的物理性质。(2) 综合探测技术的实现方式与数据处理流程。实现方式上，在同一探测区域，按一定顺序分别采用反射地震法和瞬变电磁法进行探测。数据处理时，先对两种方法获取的数据各自预处理，去除噪声；再通过空间配准，将两种数据融合；最后运用地质统计学等方法综合分析，建立更准确的地质模型，为工程决策提供全面、可靠的依据。

## 2 震电综合物探技术在巷道超前探测中的应用

### 2.1 探测系统设计

#### 2.1.1 反射地震波探测观测系统的设计

(1) 检波器的布置与震源的设置。在巷道超前探测中，检波器布置遵循等间距、高耦合原则。一般沿巷道两帮腰线位置，以1.5-2米的间距呈直线排列布设，检波器数量根据探测深度与精度需求而定，通常为24-48个。为保证与巷道壁紧密耦合，需对安装位置进行打磨处理，并使用耦合剂固定。震源设置方面，锤击震源适用于探测深度小于50米的情况，通过使用不同重量的铁锤（5-15kg）敲击垫板激发地震波；当探测深度需求超过50米时，可采用小型爆破震源，炸药量严格控制在安全

范围内，且震源点与检波器排列的距离不小于3米，以避免近场干扰。（2）数据采集与处理流程。数据采集采用多通道地震仪，采样率设置为0.5-1ms，记录时长根据探测深度调整，一般为1-3s。采集完成后，先进行数据预处理，包括去除直流漂移、增益恢复；再运用带通滤波技术（5-200Hz）压制环境噪声；通过速度分析确定地层平均速度，采用克希霍夫偏移或叠前深度偏移算法，将时间域数据转换为深度域图像，实现地质结构的清晰成像<sup>[2]</sup>。

### 2.1.2 瞬变电磁探测观测系统的设计

（1）测点排列与观测模式。瞬变电磁探测中，收发线圈采用重叠回线或中心回线，测点间距依据探测深度灵活调整。浅部探测（0-30米）时，测点间距设为2-5米；深部探测（30-100米）时，间距增至5-10米。（2）数据抗干扰与滤波。针对巷道内电磁干扰，采取软硬件结合策略。硬件上，使用屏蔽电缆传输信号，减少外界干扰。软件处理则运用小波变换滤波去除高频噪声，滑动平均滤波压制工频干扰，并通过时窗选取剔除干扰信号，保障数据的完整性和准确性。

## 2.2 工程实例分析

### 2.2.1 探测区域地质概况

某煤矿巷道掘进区域地层自上而下依次为第四系黏土（厚5-8米）、二叠系砂岩（厚20-30米）、泥岩（厚15-20米）互层及石炭系灰岩（厚度大于100米）。砂岩孔隙率约12%-15%，具有一定透水性；泥岩为隔水层；灰岩岩溶发育，局部存在溶洞与裂隙网络，地下水位于底板下约30米，受区域构造影响，巷道掘进面临断层突水风险。

### 2.2.2 探测过程与数据解译

（1）反射地震法探测数据处理与成像。采集的反射地震数据经处理后，在深度40-50米处发现反射波同相轴错断现象，错断距离约3米，振幅能量明显减弱，结合速度谱分析，初步判定为一条正断层。（2）瞬变电磁法探测数据反演与解释。瞬变电磁数据反演结果显示，在巷道前方35-45米区域出现低阻异常区，电阻率值低于 $10\Omega \cdot m$ ，对比周边正常地层电阻率（ $50-100\Omega \cdot m$ ），推断该区域为富水构造。

### 2.2.3 综合地质解释与钻探验证

（1）巷道前方隐伏构造的识别与特征分析。综合两种物探结果，确定巷道前方存在一条倾向NE、倾角 $70^\circ$ 的正断层，断层破碎带宽度约6米，破碎带内岩石破碎，裂隙发育。（2）断层空间位置、导水特征的预测与验证。预测该断层导通灰岩含水层，可能引发突水事故。后续钻探验证显示，断层实际位置与预测误差仅0.3米，钻孔

揭露断层时，初始涌水量达 $30m^3/h$ ，与物探预测的富水特征高度吻合。

## 2.3 应用效果评估

（1）断层识别的准确率与空间误差分析。经多组数据统计，震电综合物探技术对断层识别准确率达95%，空间定位误差平均为0.6米，较单一反射地震法提升20%，较单一瞬变电磁法提升30%。（2）富水区探查的有效性。富水区探查有效率达90%，涌水量预测误差控制在12%以内，相比传统物探方法，探测效率提升40%，成本降低30%。（3）综合物探技术相较于传统方法的优势对比。传统地质雷达探测深度有限（通常小于20米），钻探则存在效率低、成本高且具有破坏性等问题。震电综合物探技术可实现0-100米深度的连续探测，同时获取构造与水文信息，避免因信息单一导致的误判，为巷道安全掘进提供了可靠保障。

## 3 震电综合物探技术的问题与挑战

### 3.1 数据解译的多解性问题

（1）大角度探测数据的多解性排除难度。在巷道超前探测中，大角度探测时地震波传播路径复杂，不同地质体产生的反射波信号易出现相似特征。例如，倾斜地层与小型断层的反射波同相轴扭曲、错断现象相近，仅凭地震波到时、振幅等信息，难以准确区分。加之缺乏先验地质信息辅助，多解性问题更加突出，导致地质构造解释存在不确定性，增加了误判风险。（2）全空间探测环境下含水异常体的定位困难。井下全空间环境中，含水异常体的电磁响应易受周围介质干扰。巷道金属支护结构、机械设备等会改变电磁场分布，使得不同位置、规模的含水区域可能产生相似电磁信号。此外，瞬变电磁法探测深度范围内多种地质体相互作用，进一步模糊了含水异常体的特征，导致其空间定位精度难以保证。

### 3.2 井下复杂环境的干扰与应对措施

（1）掘进机或盾构机的电磁干扰与减震措施。掘进机、盾构机运行时产生强电磁干扰与震动。电磁干扰会使瞬变电磁法数据出现畸变，掩盖有效信号；震动干扰则让反射地震波数据混入大量噪声。现有屏蔽装置和减震措施虽能削弱干扰，但难以完全消除，尤其是设备持续运行时，干扰信号与有效信号叠加，严重影响数据质量<sup>[4]</sup>。（2）巷道粉尘与噪音对数据采集的影响及处理方法。巷道内粉尘会降低检波器与巷道壁耦合度，影响反射地震波接收效率；高噪音环境干扰数据采集设备的信号传输与记录。常规防尘、降噪措施效果有限，粉尘堆积和噪音持续作用，不仅降低数据准确性，还会缩短设备使用寿命，增加了数据采集的不稳定性。

### 3.3 数据处理与成像技术的局限性

(1) 随掘地震信号脉冲化处理的难点。随掘地震信号受掘进作业干扰, 信号强度弱、信噪比低。进行脉冲化处理时, 难以精准提取有效波, 易将噪声误判为有效信号或丢失真实信号, 导致成像模糊、分辨率低, 无法清晰呈现巷道前方地质结构细节。(2) 瞬变电磁数据反演成像的多解性及其解决方法。瞬变电磁数据反演时, 不同地质体组合可能产生相似电磁响应, 造成反演结果不唯一。虽采用正则化反演、联合反演等方法优化, 但多解性问题仍未彻底解决, 难以准确获取地下介质真实电性分布, 影响地质体的精确解释。

## 4 震电综合物探技术的发展趋势与展望

### 4.1 技术创新方向

(1) 高精度、高分辨率探测技术的研发。为满足复杂地质探测需求, 高精度、高分辨率探测技术成为研发重点。硬件上, 新型检波器将具备更高灵敏度与稳定性, 能捕捉微弱信号; 震源技术不断优化, 如采用可控震源, 精准调节激发参数, 增强信号穿透力与分辨率。软件层面, 改进反演算法, 利用正则化、迭代优化等方法, 降低数据多解性, 提升对薄地层、微小构造等精细结构的识别能力, 使探测结果更接近地质真实情况。

(2) 数据处理与成像技术的智能化与自动化发展。人工智能与大数据技术深度融合数据处理与成像环节。深度学习算法可自动识别地震波、电磁数据中的有效特征, 剔除噪声; 智能成像系统根据数据特性自动选择最优算法与参数, 快速生成清晰地质图像。自动化流程将贯穿数据采集、处理、成像全链条, 减少人工操作误差, 提高工作效率, 为工程决策提供及时准确的数据支持。

### 4.2 应用领域的拓展

(1) 从煤炭开采到金属矿山、隧道工程等领域的推广。震电综合物探技术将突破煤炭开采局限, 向多领域拓展。在金属矿山, 用于探测矿体边界、深部矿体分布及采空区隐患; 隧道工程中, 提前探明断层、破碎带、富水区, 优化施工方案, 保障工程安全。通过积累不同领域应用经验, 完善技术适应性, 形成标准化作业流

程。(2) 在地质灾害预警与防治中的应用前景。该技术在地质灾害预警防治领域潜力巨大。利用地震波探测滑坡体内部结构变化, 电磁法监测地下水位、含水量, 可提前识别滑坡、泥石流等灾害隐患。实时动态监测能掌握灾害体发展趋势, 为预警系统提供数据, 还可评估防治工程效果, 助力科学制定防灾减灾策略。

### 4.3 未来研究方向与建议

(1) 加强数据成果成图研究, 实现一体化的多源数据解译成果。整合地震、电磁等多源数据, 研发统一解译平台。建立标准化数据格式与处理流程, 促进数据深度融合; 开发可视化工具, 直观展示地质结构与异常体分布, 为地质人员提供全面、精准的决策依据。(2) 深化地质特征与地球物理场响应特征对应关系研究。通过大量室内实验与野外试验, 构建不同地质条件下地球物理响应模型。结合大数据与机器学习, 挖掘地质-地球物理响应内在联系, 完善理论体系, 提高物探数据解译可靠性, 推动震电综合物探技术持续发展。

### 结束语

震电综合物探技术在巷道超前探测中展现出显著优势, 不仅提高了地质构造识别的准确性, 还有效探查了富水区, 为矿井安全生产提供了重要保障。尽管面临数据解译多解性、井下环境干扰等挑战, 但通过技术创新与应用优化, 这些问题有望得到解决。未来, 震电综合物探技术将在更多领域发挥作用, 推动矿产资源开采与地质灾害防治迈向智能化、精细化。

### 参考文献

- [1] 宋百川. 综合物探手段在探测煤矿采空区的应用研究[J]. 建筑理论, 2023, (05): 51-52.
- [2] 邱实. 煤矿巷道超前探测多数据融合技术研究进展与分析[J]. 煤矿安全, 2021, (07): 75-76.
- [3] 时志浩. 矿井瞬变电磁法小线圈装置的电磁场响应特征研究[J]. 矿业科学学报, 2023, (03): 38-39.
- [4] 华相征. 综合物探技术在探测矿井隐伏含水构造中的应用[J]. 山东煤炭科技, 2022, (17): 178-179.