

基于瞬变电磁的物探技术在矿井探水中的应用分析

卫景华

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：随着我国煤炭行业向智能化、深部开采方向加速迈进，矿井水害防治已成为制约安全生产的核心难题。本文围绕瞬变电磁物探技术在矿井探水领域的应用展开深入分析。详述其基本原理及在矿井探水中的独特优势，如对低阻体敏感性强、探测深度大、分辨率高、施工灵活且受干扰小等。重点探讨该技术在井田水文地质勘探、开拓掘进、回采工作面探水、水害治理、老空区探测及防治水工程效果评价等各环节的具体应用。研究表明，瞬变电磁物探技术能有效提升矿井探水的精准度与效率，为矿井安全生产提供有力保障，具有显著的应用价值与推广前景。

关键词：基于瞬变电磁；物探技术；矿井探水；应用分析

引言：矿井水害严重威胁煤矿安全生产，精准高效的探水技术至关重要。瞬变电磁物探技术作为一种先进的地球物理探测方法，凭借自身特性在矿井探水领域崭露头角。它突破传统探水技术的局限，以独特的工作原理实现对矿井水体及相关地质构造的有效探测。随着矿业生产对安全要求的不断提高，深入研究该技术在矿井探水各环节的应用，对于预防水害事故、保障矿工生命安全、促进煤炭资源安全高效开采具有极为重要的现实意义，成为当前矿井防治水工作的研究热点与关键方向。

1 瞬变电磁物探技术基本原理

瞬变电磁物探技术（Time Domain Electromagnetic Method, TDEM）是一种基于电磁感应原理的地球物理探测方法，其核心原理可概括为“一次场激发、二次场响应”。该技术通过不接地回线或接地线源向地下发射脉冲式一次电磁场，当发射电流瞬间关断后，地下导电介质（如含水层、金属矿体等）中会感应产生随时间衰减的二次涡流场。由于不同介质的导电性存在差异，低阻体（如富水区、金属矿）产生的二次场衰减缓慢且强度大，而高阻体（如完整岩层）的二次场则衰减迅速且强度弱。通过观测二次场随时间变化的衰减曲线，可反演地下介质的电阻率分布特征。技术实现上，发射系统通常采用大功率脉冲电流源，形成瞬变电磁场向地下传播。接收系统则利用高灵敏度线圈或电极，在断电间歇期捕获二次场信号。其探测深度与发射电流强度、回线尺寸及匝数密切相关，例如大定源回线装置通过边长达数百米的发射框，可实现800米级深部探测。数据反演过程中，早期衰变曲线反映浅部地质信息，晚期曲线则对应深部构造，结合一维或三维数值模拟算法，可构建地下电性结构模型。该技术具有抗干扰能力强、对低阻体敏感、施工效率高等优势，广泛应用于煤矿水害防治、

金属矿产勘查、工程地质调查等领域^[1]。

2 瞬变电磁物探技术在矿井探水中的优势

2.1 对低阻体敏感性强

瞬变电磁法通过观测地下介质中二次涡流场的衰减特性，对低阻体（如含水层、断层破碎带、采空区积水等）具有天然的敏感性。当发射电流关断后，低阻体中感应的涡流衰减缓慢，产生的二次场强度大且持续时间长，与周围高阻岩层的快速衰减特征形成显著差异。这种特性使瞬变电磁法在矿井探水中能够精准识别水体赋存位置。例如，在煤矿巷道掘进前方，即使含水层厚度仅数米，其低阻响应仍可被接收线圈清晰捕捉，结合多测道数据反演，可圈定水体边界并估算富水性。此外，该技术对低阻体的探测不受其埋深限制，仅需通过调整发射回线尺寸和观测时窗范围，即可实现从浅部几十米到深部千米级的水文地质异常体识别，为矿井水害防治提供了高灵敏度的技术手段。

2.2 探测深度较大

瞬变电磁法的探测深度与发射电流强度、回线尺寸及观测时窗长度密切相关。在矿井探水中，通过采用大功率发射系统（如峰值电流达数百安培）和大尺寸回线装置（如边长50-200米的矩形框），结合晚期时窗观测，可实现800-1500米的深部探测。例如，在金属矿山深部找矿中，该方法成功揭示了千米级深度的隐伏矿体与含水构造的关联性；在煤矿突水通道探测中，可穿透厚煤层及上覆岩层，追踪深部奥灰水导升通道。相较于直流电法受电极距限制，瞬变电磁法无需接地，避免了深部探测时接地电阻过大导致的信号衰减问题，其“体积效应”特性更有利于获取深部大范围地质体的综合电性信息，为矿井深部开采安全提供了关键技术支撑。

2.3 分辨率较高

瞬变电磁法通过多测道时间序列分析,可实现垂向分辨率达10-30米、平面分辨率与发射回线尺寸相当的高精度探测。在矿井巷道掘进前方探水中,采用小回线装置(如边长5-10米)结合密集测点布置,可清晰识别距工作面50-200米范围内的断层、溶洞等小型地质异常体。例如,在某煤矿巷道超前探测中,通过0.5米间距的测线布置,结合三维反演技术,成功分辨出宽度仅3米的导水断层,并准确预测其与含水层的连通性。此外,该方法的时间分辨率优势使其能区分不同深度层的电性变化,如通过分析早期时窗数据可识别浅部巷道顶板裂隙水,晚期时窗数据则反映深部基岩风化带富水性,为矿井水害的分层防控提供了精细化依据。

2.4 施工方便灵活

瞬变电磁法采用非接触式探测,无需向地下打钻或埋设电极,施工效率显著高于直流电法、地震勘探等传统方法。在矿井复杂环境下,其设备轻便(单套仪器重量不足50kg)、布设快速(单点测量时间仅需3-5分钟),可适应巷道顶板淋水、底板起伏等恶劣条件。例如,在煤矿综采工作面,可采用重叠回线装置沿巷道快速移动测量,单日可完成2000米以上的探测任务;在金属矿山斜坡道中,通过便携式发射接收系统,可实现边掘进边探测的动态跟踪。此外,该方法支持多装置组合探测,如中心回线装置适用于巷道掘进前方探水,大定源回线装置则可用于井田范围的水文地质填图,其施工灵活性为矿井高效探水提供了技术保障。

2.5 受干扰影响小

瞬变电磁法通过观测断电后的纯二次场信号,有效避开了发射电流直接产生的电磁噪声干扰。在矿井环境中,其抗干扰能力显著优于直流电法(易受金属支护、电缆漏电影响)和地震勘探(易受机械振动干扰)。例如,在煤矿综采工作面,即使存在大量机电设备,通过采用同步触发技术控制发射与接收时序,仍可获取高质量的二次场数据;在金属矿山井下,通过频谱分析滤除50Hz工频干扰后,探测信号信噪比可达30dB以上。此外,该方法对地表人文噪声(如车辆、电力线)不敏感,在城市地下空间探测中,可通过选择合适的观测时窗(如晚期道)进一步压制浅部干扰,其稳定性为矿井水害探测提供了可靠的技术支撑^[2]。

3 瞬变电磁物探技术在矿井探水各环节的具体应用

3.1 井田水文地质勘探阶段

在井田水文地质勘探阶段,瞬变电磁物探技术通过非接触式探测方式,快速获取地下介质的电性分布特征,为矿井水害防治提供基础数据支撑。其具体应用包

括:首先,通过大定源回线装置(如边长500-800米的矩形框)向地下发射脉冲磁场,利用断电后二次涡流场的衰减特性,精准探测深部奥灰水、砂岩裂隙水等含水层的赋存位置及富水性。例如,在山西某煤矿勘探中,采用800m×800m发射线框覆盖12km²区域,结合晚期时窗观测技术,成功识别出K₂含水层3处顶板富水区,为矿井疏水降压设计提供了关键参数。其次,针对断层、裂隙等导水构造,瞬变电磁法通过分析二次场衰减曲线的异常特征,可圈定构造带宽度及导水性。如山东某矿勘探中,通过多测道电压剖面图发现低阻异常带,结合地质钻孔验证,确认断层破碎带宽度达15米且含水,指导矿井优化开采布局。

3.2 矿井开拓掘进阶段

在矿井开拓掘进阶段,瞬变电磁物探技术凭借其高效、精准的探测能力,成为超前预报巷道前方水文地质条件的核心手段。其具体应用表现为:首先,采用小回线装置(如边长5-10米的重叠回线)沿掘进方向密集布置测点,通过发射瞬变电磁场并接收二次涡流场衰减信号,可实时探测前方50-200米范围内的含水层、断层及采空区积水等隐患。例如,在淮南某煤矿巷道掘进中,通过每30米布置一条测线,结合三维反演技术,提前20天发现前方85米处存在宽度4米的导水断层,避免突水事故发生。其次,针对巷道顶底板裂隙水,瞬变电磁法通过分析早期时窗数据,可识别浅部10-30米范围内的低阻异常区,结合钻孔验证实现精准疏放。此外,该技术施工灵活性强,单点测量仅需3-5分钟,且无需停产或打钻,可与掘进作业同步进行,显著提升施工效率。在复杂地质条件下,通过与地质雷达、瞬态瑞利波法联合解释,可进一步提高探测分辨率,为巷道安全掘进提供可靠保障。

3.3 回采工作面探水阶段

在回采工作面探水阶段,瞬变电磁物探技术通过动态监测顶底板含水层富水性变化,为工作面安全回采提供实时预警。其具体应用包括:首先,采用移动式小回线装置(如边长3-5米的矩形框)沿工作面推进方向连续布置测线,通过发射瞬变电磁场并接收二次场衰减信号,可实时探测顶板砂岩裂隙水、底板灰岩承压水等含水层的富水分布。例如,在神东某矿工作面回采中,通过每日移动测量100米测线,结合多测道时间序列分析,提前15天发现顶板含水层厚度增加3米的异常区,指导矿方及时调整排水系统。其次,针对工作面内隐伏导水构造,瞬变电磁法通过分析二次场衰减曲线的低阻异常特征,可识别宽度0.5米以上的断层或裂隙带,结合钻孔验证实现精准治理。

3.4 矿井水害治理阶段

在矿井水害治理阶段,瞬变电磁物探技术通过动态监测治理效果与追踪剩余水体,为水害根治提供关键技术支撑。其具体应用包括:首先,在疏水降压工程中,采用瞬变电磁法定期探测目标含水层厚度与富水性变化。例如,在华北某矿奥灰水治理中,通过每月一次的重复探测,结合二次场衰减曲线对比分析,实时评估疏水钻孔影响半径,动态调整排水方案,使含水层水位在6个月内下降35米,有效降低突水风险。其次,针对注浆堵水工程,瞬变电磁技术可追踪浆液扩散范围与凝固状态。通过分析治理前后电性参数变化,识别未充填裂隙或渗漏通道。如山东某矿断层治理中,利用该方法发现注浆区外围仍存在3处低阻异常,指导补充注浆后成功封堵导水通道。此外,该技术还可结合水文地质模型,对治理后区域进行长期稳定性监测,预警潜在水害复发风险。

3.5 矿井老空区探测阶段

在矿井老空区探测阶段,瞬变电磁物探技术凭借对低阻体的敏感响应特性,成为精准识别采空区边界、积水范围及导水通道的关键手段。其具体应用表现为:首先,采用大功率发射装置(峰值电流 $\geq 200\text{A}$)与多匝重叠回线组合,通过发射瞬变电磁场并分析二次场衰减曲线,可有效区分充水老空区(低阻异常)与未充水老空区(高阻异常)。例如,在山西某整合矿井探测中,通过 $50\text{m}\times 50\text{m}$ 网格化测线布置,结合三维反演技术,成功圈定3处隐伏老空区,其中2处存在积水,积水范围误差控制在5%以内。其次,针对老空区与断层、裂隙的连通性分析,瞬变电磁法可联合地质雷达、地震勘探数据,构建老空区水文地质模型,精准评估突水风险。

3.6 矿井防治水工程效果评价阶段

在矿井防治水工程效果评价阶段,瞬变电磁物探技术通过动态监测地下介质电性参数变化,为工程成效提

供量化评估依据。其核心应用包括:首先,通过对比治理前后瞬变电磁探测成果(如视电阻率等值线图、衰减时域特征),定量分析疏水降压、注浆堵水等工程对含水层富水性、导水通道连通性的影响程度。例如,注浆治理后,目标区域低阻异常范围缩小率可直接反映堵水效果;疏水工程后含水层视电阻率升高幅度可表征水位下降情况。其次,该技术可结合水文地质模型,建立电性参数与含水量、渗透系数等关键指标的对应关系,实现治理效果的三维可视化评价。此外,瞬变电磁法具有非破坏性、高效率的优势,可快速完成大面积复测,动态追踪工程长期效应,为防治水方案的优化调整提供实时数据支持^[3]。

结束语

基于瞬变电磁的物探技术凭借其探测深度大、分辨率高、抗干扰能力强及施工灵活等优势,已成为矿井排水全流程中的核心手段。从井田勘探阶段的水文地质建模,到掘进与回采阶段的动态预警,再到水害治理与防治工程效果评价,该技术通过精准识别含水层、导水构造及老空区积水等隐患,为矿井安全生产提供了可靠保障。未来,随着三维反演、多参数融合及智能化解释技术的突破,瞬变电磁法将进一步提升探测精度与效率,推动矿井水害防治向“主动预警-精准治理-动态评估”的智能化方向迈进,为煤炭资源安全高效开发提供更强技术支撑。

参考文献

- [1]石坤,苏刚,王钊.瞬变电磁在矿井水文地质探放水中的应用.建筑技术科学,2024.101-103
- [2]王明柱.浅谈瞬变电磁技术在隧道超前探水中的应用.建筑技术科学,2021.206-208
- [3]李国勋.扇形探测技术在矿井瞬变电磁物探工作中的应用.建筑技术科学,2022.189-196