

# 煤矿井下掘进工作面超前物探技术分析

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：**随着煤矿开采深度持续增加，掘进工作面地质条件愈发复杂，水害、瓦斯突出等灾害风险显著提升。本文聚焦煤矿井下掘进工作面超前物探技术展开分析。首先概述了该技术的原理、特点，接着详细剖析地震波法、直流电法、瞬变电磁法、地质雷达法等具体技术。随后，针对超前物探技术存在的探测精度和分辨率不足、抗干扰能力弱、数据处理与解释难度大、适用范围受限等问题，提出优化探测方法与设备、增强抗干扰能力、完善数据处理与解释技术、拓展适用范围等改进措施，为煤矿安全生产提供技术支持。

**关键词：**煤矿井下；掘进工作面；超前物探技术；分析

**引言：**煤矿井下掘进作业环境复杂，地质条件多变，掘进过程中常面临诸多地质灾害隐患，严重威胁着矿工生命安全和煤矿生产安全。超前物探技术作为煤矿井下掘进工作面的重要探测手段，能够在掘进前获取前方地质信息，提前发现潜在危险，为安全生产提供科学依据。然而，当前超前物探技术在实际应用中仍存在一些问题，制约着其效能的充分发挥。因此，深入分析煤矿井下掘进工作面超前物探技术，探讨其存在的问题与改进措施，具有重要的现实意义。

## 1 煤矿井下掘进工作面超前物探技术概述

### 1.1 技术原理

煤矿井下掘进工作面超前物探技术基于地球物理学原理，通过测量地下介质的电磁、地震、重力、磁场等特征，利用数学模型分析这些特征，最终实现地下构造成像。例如，瞬变电磁法利用不接地回线发射脉冲电磁场，通过观测二次涡流场衰减特性推断地质体导电性；直流电法则通过供电电极向地下注入电流，测量电位差变化反演电阻率分布。这些技术通过捕捉岩层波阻抗差异、电性差异等物理特征，为巷道掘进提供地质构造、水文条件及瓦斯分布等关键信息。

### 1.2 技术特点

该技术具有非破坏性、高效性和经济性三大核心特点。非破坏性体现在无需钻孔取芯即可获取地质数据，避免传统钻探法对煤体的破坏及瓦斯泄漏风险；高效性表现为单次探测范围可达100米以上，且探测周期较钻探缩短70%以上；经济性则源于设备轻便、操作灵活，单次探测成本仅为钻探的1/3。此外，其全空间探测能力可覆盖巷道顶底板及侧帮，结合多技术组合使用可显著提升探测精度，例如瞬变电磁法与直流电法联用可将低阻异常体识别准确率提升至90%以上<sup>[1]</sup>。

## 2 煤矿井下掘进工作超前物探技术分析

### 2.1 地震波法

#### 2.1.1 反射波法

反射波法通过人工激发地震波，利用波阻抗差异界面反射特性进行超前探测。其技术关键在于高精度时距曲线反演，通过分析反射波旅行时间、振幅、频率等参数，可精确测定地层界面深度与构造形态。例如，在鹤岗矿区15层溜子道探测中，采用垂直探测模式，通过反射波频散分析成功定位18层煤位置，探测结果与钻探验证误差仅0.8米。该技术对煤层与岩层界面反射系数敏感，在煤层密度1.3-1.5g/cm<sup>3</sup>、波速0.8-1.5km/s条件下，反射系数达0.6以上，形成强反射界面，显著提升探测可靠性。实际应用中，常采用小偏移距单点反射法与隧道地震波超前预报（MSP）技术组合，实现200米级超前预报。

#### 2.1.2 瑞利波法

瑞利波法利用面波频散特性进行短距离超前探测，其核心原理在于不同频率瑞利波对应不同勘探深度，通过分析频散曲线反演地层结构。该技术具有轻便快捷优势，单次探测耗时不足2小时，且对煤层破碎带、节理裂隙等小构造分辨率高。例如，在乌苏四棵树煤矿皮带大巷探测中，采用等距观测系统（ $\Delta x = 0.5\text{m}$ ），通过频散曲线分析成功识别1米处煤层破碎带与95米处应力集中区，探测结果与掘进揭露资料吻合度达92%。技术局限性在于探测距离偏小，有效探测范围30-50米，且受巷道表面平整度影响较大，需通过数字滤波与反演计算提升数据质量。

#### 2.1.3 槽波法

槽波法专用于煤层内部不连续体探测，其技术本质是利用煤层与围岩波阻抗差异产生的反射槽波信号进行成像。该技术可穿透煤层顶底板岩层，实现煤层内断

层、陷落柱、采空区等地质异常的精准定位。例如，在某矿区1900米超长工作面探测中，通过透视槽波地震勘探技术，成功识别14条断层（含7条落差>1米断层），探测精度达煤层厚度分级标准。技术优势在于抗干扰能力强，可有效区分煤层与岩层界面，且探测深度达煤层厚度2倍以上。实际应用中，常采用共偏移距联合反射剖面技术，通过多测点数据叠加提升信噪比，实现煤层内部构造的三维可视化成像。

## 2.2 直流电法

直流电法通过向地下注入直流电，测量电位差分布反演地层电阻率，其核心原理基于煤层与围岩的电性差异。该方法采用对称四极、三极或温纳装置，通过改变供电极距实现不同深度探测，具有设备轻便、成本低廉、操作简单等优势。其探测深度受电极距和供电电流控制，一般可达150米，对低阻异常体（如含水层、导水断层）响应明显，尤其适用于煤层底板突水危险性评价。技术局限性在于：一是探测深度与分辨率存在矛盾，大极距虽能增加深度但降低分辨率；二是易受巷道金属支护、电缆等导电体干扰，导致数据畸变；三是受地形起伏影响较大，需进行地形校正。改进方向包括：采用高密度电法阵列式勘探，通过密集布设电极提升数据密度；开发智能抗干扰算法，滤除工业电噪声；结合地质建模进行三维反演，提高解释精度。此外，多装置组合探测（如联合温纳与偶极装置）可增强对复杂地质体的识别能力。

## 2.3 瞬变电磁法

瞬变电磁法（TEM）利用不接地回线发射脉冲电磁场，通过观测二次涡流场衰减特性推断地质体导电性。其核心优势在于对低阻体（如含水层、岩溶）响应强烈，探测深度可达200米以上，且采用时间域测量，可有效压制高频干扰。该方法通过改变发射回线尺寸和接收窗口时间，实现浅部至深部的分层探测，尤其适用于深部资源勘探与灾害水源预测。技术瓶颈包括：一是浅部存在探测盲区（前20米数据质量差），因早期信号受发射线圈瞬态过程干扰；二是晚期信号衰减快，信噪比低，需大功率发射和低噪声接收设备；三是多解性问题突出，同一衰减曲线可能对应不同地质模型。改进措施包括：开发浅层补偿算法，通过数值模拟修正早期信号畸变；采用中心回线装置增强近区信号；结合地震波法进行多物理场约束反演，降低解释多解性。此外，分布式瞬变电磁系统可提升探测效率，实现动态监测。

## 2.4 地质雷达法

地质雷达法利用高频电磁波（10MHz-1GHz）在地

下介质中的反射特性进行超前探测，其核心优势在于分辨率高（可达厘米级），可清晰识别煤层中的夹矸、裂隙、小断层等微构造。该方法采用宽频带天线，通过发射短脉冲电磁波并接收反射信号，经数据处理生成雷达剖面图，直观反映地下结构。其探测深度受电磁波衰减限制，一般不超过50米，但可通过降低频率扩展至100米（分辨率相应降低）。技术局限性包括：一是对高阻体（如砂岩、石灰岩）响应弱，难以识别；二是易受巷道积水、金属设备等介质不均匀性干扰，导致信号散射；三是数据解释依赖经验，需结合地质资料综合判断。改进方向包括：开发屏蔽天线减少环境噪声；采用步进频率雷达技术，通过合成宽带信号提升分辨率；引入深度学习算法，自动提取雷达图像中的地质特征；结合全波形反演技术，提高复杂地质体成像精度。此外，三维地质雷达系统可实现空间立体探测，提升对不规则地质体的识别能力<sup>[2]</sup>。

## 3 超前物探技术存在的问题与改进措施

### 3.1 存在的问题

#### 3.1.1 探测精度和分辨率有待提高

当前超前物探技术受设备性能与地质条件双重限制，探测精度难以满足复杂地质需求。例如，地震波法在煤层与围岩波阻抗差异较小时，反射信号微弱，导致断层定位误差可达±5米以上；直流电法因电极距限制，对薄层（如厚度小于1米的夹矸）识别能力不足；地质雷达法虽分辨率高，但探测深度较浅（一般<50米），且高频信号在潮湿煤层中衰减剧烈，进一步降低有效探测范围。此外，多技术组合探测时，不同方法的数据融合存在尺度不匹配问题，影响综合解释精度。

#### 3.1.2 抗干扰能力弱

井下环境复杂，物探数据易受多重干扰。电磁类方法（如瞬变电磁法、直流电法）受巷道内金属支护、电缆、机车等导电体影响显著，产生虚假异常信号，导致含水体定位偏差可达30%以上；地震波法易受掘进爆破震动、机械振动干扰，反射波同相轴连续性变差，影响构造识别；地质雷达法在巷道积水或煤层含水率较高时，电磁波能量被强烈吸收，信噪比骤降，有效探测距离缩短至原设计的50%以下。

#### 3.1.3 数据处理与解释难度大

超前物探数据具有多解性，同一异常可能对应多种地质解释。例如，瞬变电磁法低阻异常可能由含水层、破碎带或金属硫化物富集体引起，仅凭单一方法难以准确区分；地震波法反射波同相轴畸变可能源于断层、褶皱或岩性变化，需结合钻探验证；地质雷达图像中裂隙

与层理面反射特征相似，易造成误判。此外，数据处理流程复杂，需人工筛选有效信号、校正地形影响、反演地质模型，对技术人员经验依赖度高，且处理周期长，难以满足实时探测需求。

### 3.1.4 适用范围受限

不同物探技术对地质条件的适应性差异显著。地震波法在煤层厚度不稳定、构造破碎带发育区域反射信号杂乱，探测效果大幅下降；直流电法在高阻围岩（如砂岩、石灰岩）中电阻率差异不显著，难以识别隐伏导水通道；瞬变电磁法在浅部存在探测盲区（前20米数据质量差），对近巷道前方小构造漏报率高；地质雷达法对高阻体（如干燥砂岩）响应弱，且穿透能力受煤层瓦斯含量影响，在突出煤层中应用受限。此外，现有技术多针对特定地质目标设计，缺乏通用性解决方案。

## 3.2 改进措施

### 3.2.1 优化探测方法与设备

针对探测精度不足问题，需研发高精度、多参数一体化探测设备。例如，开发分布式光纤地震传感器，通过密集布设光纤节点实现毫米级波场采样，提升薄层与微构造识别能力；改进瞬变电磁发射机，采用脉冲压缩技术提高发射功率密度，增强浅部信号强度，缩小盲区至10米以内；优化地质雷达天线设计，采用超宽带（UWB）技术扩展频带至3GHz，结合时域聚焦算法提升分辨率至5厘米级。同时，推进多方法协同探测，如将地震波法与瞬变电磁法耦合，利用前者定位构造、后者圈定含水范围，通过数据融合降低单一方法的多解性。

### 3.2.2 增强抗干扰能力

提升抗干扰能力需从硬件与算法两方面协同改进。硬件层面，设计电磁屏蔽一体化探头，采用纳米涂层技术隔离巷道金属支护的电磁干扰；开发低噪声接收机，将等效输入噪声控制在 $0.1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下，提升微弱信号检测能力。算法层面，针对电磁类方法，引入小波阈值去噪与独立分量分析（ICA），分离有效信号与工业电噪声；对于地震波法，采用自适应滤波与盲源分离技术，消除爆破震动与机械振动干扰；地质雷达数据处理中，应用稀疏反演算法抑制巷道积水导致的多次波干扰。

### 3.2.3 完善数据处理与解释技术

数据处理需向智能化、自动化方向发展。引入深度学习框架，构建卷积神经网络（CNN）自动识别地震波反射同相轴、地质雷达图像中的裂隙与层理面，减少人工解释的主观性；开发瞬变电磁反演软件，集成粒子群优化算法，实现电阻率模型的高精度快速反演，将解释周期从数天缩短至小时级。同时多源数据融合平台，将物探数据与地质钻孔、巷道素描等资料进行空间配准，通过贝叶斯框架实现多证据联合反演，降低解释多解性。

### 3.2.4 拓展适用范围

拓展技术适用性需突破地质条件限制。针对高阻围岩区域，研发高频电磁探测技术（如电容耦合电阻率法），通过提高发射频率（ $>100\text{kHz}$ ）增强对薄层高阻体的响应；对于瓦斯突出煤层，开发低频地质雷达（中心频率 $<50\text{MHz}$ ），利用低频信号穿透性强、衰减慢的特点，实现安全探测；在构造破碎带，采用跨孔地震波层析成像，通过多角度观测提升数据冗余度，解决单一巷道探测的盲区问题。此外，开发模块化探测装备，支持快速组装与参数调整，以适应不同矿井的巷道断面与探测需求<sup>[3]</sup>。

## 结束语

煤矿井下掘进工作面超前物探技术作为保障安全生产的核心手段，已在探测精度、抗干扰能力及智能化水平上取得显著进展，但复杂地质条件下的多解性、浅部盲区及多源干扰等问题仍制约其可靠性。未来需聚焦多物理场融合探测、AI驱动的智能反演、装备轻量化与适应性优化等方向，推动技术向“精准化、实时化、通用化”演进。同时，强化物探-地质-工程数据闭环联动，构建“探测-分析-决策”一体化体系，方能全面提升超前探测效能，为煤矿深部开采与灾害防控提供坚实技术支撑。

## 参考文献

- [1]马伯华.煤矿井下掘进工作面超前物探技术分析[J].能源与节能, 2023(03):158-160.
- [2]杨菲.煤矿井下掘进工作面超前物探技术分析[J].当代化工研究, 2021(01):55-56.
- [3]黄治富.煤矿井下掘进工作面超前物探技术分析[J].江西化工, 2020(01):144-146.