

基于三维物探技术的煤矿隐蔽致灾水体精准探测与防治水应用

刘学霖

宁夏煤业公司羊场湾煤矿，宁夏 银川 751410

DOI:10.61369/ETQM.2025100011

摘 要： 本文研究煤矿隐蔽致灾水体探测与防治难题，深入分析三维物探技术体系。建立三维地震勘探、电阻率成像、电磁法等技术体系，结合多源数据融合与三维可视化建模平台，实现隐蔽水体精准探测；探寻数据采集优化、信号处理、反演算法等精准探测技术方法；开发防治水决策支持系统，包含风险评估、预警、防治工程设计等功能；最后开展技术经济性与适用性分析。研究显示，三维物探技术能有效提升煤矿隐蔽致灾水体探测精度与防治水平，对保障煤矿安全生产十分重要。

关 键 词： 三维物探技术；隐蔽水体；精准探测；水害防治

Accurate Detection and Prevention of Hidden Disaster Causing Water Bodies in Coal Mines Based on 3D Geophysical Technology

Liu Xuelin

National Energy Group Ningxia Coal Industry Co., LTD. Yangchangwan Coal Mine, Yinchuan, Ningxia 751410

Abstract： This paper studies the detection and prevention of hidden disaster-causing water bodies in coal mines, and deeply analyzes the three-dimensional geophysical technology system. It establishes a technical system of three-dimensional seismic exploration, resistivity imaging, electromagnetic method, etc., and combines it with a multi-source data fusion and three-dimensional visualization modeling platform to achieve precise detection of hidden water bodies. It explores the optimization of data collection, signal processing, inversion algorithm and other precise detection technology methods. It develops water prevention and control decision support system, including risk assessment, early warning, and prevention and control engineering design functions. Finally, it carries out a technical and economic analysis and applicability. The research shows that the three-dimensional geophysical technology can effectively improve the accuracy and prevention level of the hidden disaster-causing water bodies in coal mines, which is important for ensuring the safe production of coal mines.

Keywords： three-dimensional geophysical prospecting technology; concealed water bodies; precise detection; water disaster prevention and control

引言

煤矿水害是威胁煤矿安全生产的重要因素，隐蔽致灾水体因为其隐蔽性和复杂性，常引发突水事故，造成人员伤亡和财产损失。传统物探方法在探测精度和准确性方面存在局限，难以满足煤矿安全生产需求。随着地球物理勘探技术发展，三维物探技术凭借高精度、高分辨率和全方位探测优势，逐渐成为煤矿隐蔽致灾水体探测重要手段。本文目的是研究基于三维物探技术的煤矿隐蔽致灾水体精准探测与防治水应用，为煤矿安全生产提供技术支持。

一、三维物探技术体系构建

（一）三维地震勘探技术

三维地震勘探技术以弹性波传播理论为基础，使用宽线观

测、高密度采样以及三维偏移成像技术，能够对煤矿井下断层、陷落柱等地质构造进行精细解释。在水体界面识别过程，面波抑制、初至拾取、速度建模等关键技术发挥重要作用。面波抑制技术可有效减少干扰波，提高有效信号清晰度；准确的初至拾取能

为后续速度建模提供可靠数据；合理的速度建模是实现水体界面精确成像的关键。通过研究和优化这些关键技术，可显著提升三维地震勘探技术对水体界面的识别能力，为煤矿隐蔽致灾水体探测提供重要依据。

（二）三维电阻率成像技术

三维电阻率成像技术利用岩体之间的电性差异，在煤矿井下布设高密度电极，运用三维反演算法，构建电阻率分布模型。不同电极排列方式，像温纳装置、偶极-偶极装置等，对含水层分辨率有不同影响。温纳装置适合浅层地质体探测，具有数据采集稳定、抗干扰能力强的特点；偶极-偶极装置对深部地质体探测有较高分辨率。通过研究和优化不同排列方式，可根据实际地质条件选择合适电极排列，从而提高对含水层的分辨率，准确探测隐蔽水体分布情况^[1]。

（三）三维电磁法技术

三维电磁法技术主要有瞬变电磁法（TEM）与可控源音频大地电磁法（CSAMT）。瞬变电磁法基于电磁感应原理，通过观测二次场随时间变化探测地下地质体；可控源音频大地电磁法则利用人工激发的电磁场，通过测量不同频率下的电场和磁场分量研究地下地质结构。在深部水体探测中，频率-深度转换、多频观测等技术有重要应用价值。频率-深度转换技术可将观测到的频率数据转换为深度信息，实现对深部水体的定位；多频观测能够获取不同深度地质信息，提高探测准确性和可靠性。通过研究和应用这两种电磁法技术，可有效探测煤矿深部隐蔽致灾水体（表1）。

表1 三维物探技术体系构建

技术分类	物理原理	分辨率（dB）	探测深度（m）	最佳应用场景	技术局限性
三维地震勘探	弹性波阻抗差异	≥ 25	50-1500	构造断层成像（误差 <3m）	受地表耦合条件影响显著
三维电阻率成像	岩层电性各向异性	18-22	20-500	含水层空间定位（精度 ± 5m）	高阻屏蔽效应
三维瞬变电磁法	电磁感应涡流衰减	20-24	100-2000	深部水体探测（信噪比 >15dB）	浅部盲区（<50m）

二、隐蔽水体精准探测技术路径

（一）数据采集优化设计

数据采集是三维物探技术的基础环节，其质量直接影响后续探测结果。根据矿区地质条件，比如地层结构、岩石性质等，制定合理的三维物探观测系统参数，包括道间距、偏移距、覆盖次数等。通过建立探测深度与分辨率的量化关系模型，明确不同参数设置下的探测效果，从而优化数据采集方案。例如，在探测深部水体时，适当减小道间距和偏移距，增加覆盖次数，可提高探测分辨率和准确性；在浅层探测时，则可根据实际情况调整参数，以提高数据采集效率。

（二）噪声抑制与信号增强

煤矿井下环境复杂，存在各种强干扰信号，严重影响物探数据质量。为解决这个问题，研究小波变换、经验模态分解（EMD）等信号处理技术。小波变换能够对信号进行多尺度分析，有效去除噪声，同时保留信号特征；经验模态分解则可以将复杂信号分解为多个本征模态函数，从而实现对信号的降噪和增强。通过应用这些技术，可显著提升微弱水体异常信号的识别能力，提高物探数据质量，为隐蔽水体精准探测提供可靠数据支持。

（三）反演算法迭代优化

反演算法是将物探数据转换为地质模型的关键环节。对比最小二乘法、遗传算法、深度学习等反演方法的适用性，最小二乘法计算简单，但容易陷入局部最优解；遗传算法具有全局搜索能力，但计算效率较低；深度学习方法能够处理复杂的非线性问题，但需要大量训练数据。为提高模型收敛速度与解释精度，构建基于正则化约束与先验地质信息融合的反演框架。这个框架通过引入正则化约束，防止模型过拟合；融合先验地质信息，为反演提供更多约束条件，从而提高反演结果准确性和可靠性^[2]。

（四）水体边界智能划定

利用边缘检测、区域生长等图像处理算法，结合含水层电性/弹性参数阈值，实现水体三维边界的自动提取与动态修正。边缘检测算法能够识别图像中水体与周围岩体的边界；区域生长算法则可以根据一定规则，将具有相似特征的像素点合并为一个区域，从而实现水体区域的划分。通过结合含水层的电性/弹性参数阈值，可进一步提高水体边界划定的准确性。同时，随着探测数据不断更新，能够对水体边界进行动态修正，实时反映水体变化情况。

三、防治水决策支持系统开发

（一）水害风险动态评估模型

集成水体赋存条件、导水通道发育特征、采掘工程扰动等因素，构建基于模糊综合评价与层次分析法（AHP）的风险评估矩阵。模糊综合评价方法能够处理模糊不确定性问题，将多个因素的影响程度进行综合评价；层次分析法可以确定各因素的权重，从而更科学地评估水害风险。通过这个模型，能够实时对煤矿水害风险进行动态评估，为煤矿安全生产提供风险预警，使煤矿企业能够及时采取相应防范措施，降低水害事故发生概率^[3]。

（二）突水预警阈值体系

通过实验室岩样测试与现场监测数据，确定含水层水位、水压、渗透系数等关键参数的预警阈值。实验室岩样测试能够获得岩石的物理力学性质，为确定预警阈值提供理论依据；现场监测数据则反映实际地质条件和水文情况。根据不同预警阈值，建立分级预警机制，当监测数据达到相应阈值时，及时发出不同级别的预警信号，以便煤矿企业能够根据预警级别采取相应应对措施，避免突水事故发生或降低事故造成的损失。

（三）防治工程优化设计

结合水体空间分布特征，提出疏水降压、注浆封堵、留设防

水煤柱等防治措施的三维空间布局方案。疏水降压通过降低含水层水位，减少水体对采掘工程的压力；注浆封堵能够堵塞导水通道，防止水体涌入采掘空间；留设防水煤柱则是通过保留一定厚度的煤柱，起到隔离水体的作用。利用数值模拟方法对不同防治方案进行验证，评估其治理效果，从而选择最优的防治工程设计方案，提高防治水工程的有效性和经济性。

（四）应急响应决策支持

开发基于多智能体系统（MAS）的突水事故应急决策模型，这个模型能够模拟不同抢险方案下的人员撤离路径、排水能力匹配等关键指标。多智能体系统通过模拟多个智能体之间的相互作用和决策过程，实现对应急抢险方案的优化。在突水事故发生时，这个模型能够快速评估不同抢险方案的可行性和有效性，为煤矿企业提供科学的应急决策支持，指导人员安全撤离和抢险救援工作，最大限度减少事故造成的人员伤亡和财产损失^[4]。

四、技术经济性与适用性分析

（一）成本效益对比

对比三维物探与传统物探在设备投入、施工周期、探测精度等方面的差异，量化分析单位探测成本与事故损失降低率的关联性（如表2）。三维物探技术虽然设备投入相对较高，但探测精度显著提升，能够更准确发现隐蔽致灾水体，从而降低水害事故发生概率，减少事故损失。通过建立成本效益分析模型，计算出三维物探技术在不同条件下的成本效益比，为煤矿企业选择合适的物探技术提供经济依据。

表2 成本效益对比

评估维度	三维地震勘探	三维电阻率	三维电磁法	二维地震勘探
单位成本 (万元 / km ²)	12-18	8-12	15-22	5-8
数据采集效率 (km ² / d)	0.8-1.2	1.5-2.0	1.0-1.5	2.5-3.5
垂向分辨率 (m)	2-5	3-8	5-10	8-15
解释置信度 (%)	85-92	78-85	80-88	65-75

（二）复杂地质条件适应性

研究深部矿井、厚煤层、高瓦斯等特殊环境下物探技术的适用性。在深部矿井中，由于地质条件复杂，信号衰减严重，对物探技术的探测能力提出更高要求；厚煤层地区存在煤层厚度变化大、地质结构复杂等问题；高瓦斯环境则对物探设备的安全性提

出特殊要求。针对这些特殊环境，提出抗干扰数据采集与处理的技术改进方案，比如采用特殊的天线设计、优化数据采集参数、加强设备的防爆性能等，以提高三维物探技术在复杂地质条件下的适用性。

（三）技术标准化建设

梳理三维物探从数据采集、处理到解释的全流程技术规范，制定符合煤矿行业特点的标准化操作流程。标准化建设有助于提高三维物探技术的应用水平和可靠性，确保不同地区、不同煤矿企业在使用三维物探技术时遵循统一标准，保证探测结果的可比性和准确性。同时，标准化操作流程也有助于提高技术人员的工作效率和质量，降低人为因素对探测结果的影响^[5]。

（四）人员能力培训体系

构建“理论教学+虚拟仿真+现场实操”的三维物探技术培训模式。理论教学为技术人员提供扎实的专业知识基础；虚拟仿真通过模拟实际探测场景，让技术人员在安全环境下进行操作练习，提高其操作技能和应对复杂情况的能力；现场实操则使技术人员能够将理论知识和虚拟仿真中的经验应用到实际工作中，进一步提升其对异常数据的解读能力与系统操作熟练度。通过这个培训模式，培养出一批高素质的三维物探技术人才，为三维物探技术的推广和应用提供人才保障。

（五）政策与市场环境分析

结合国家安全生产法规与煤矿智能化建设要求，探讨三维物探技术在市场推广中的政策支持需求与商业模式创新路径。国家对煤矿安全生产的重视程度不断提高，出台一系列相关法规和政策，为三维物探技术的应用提供政策支持。同时，随着煤矿智能化建设的推进，对高精度物探技术的需求也日益增加。在市场推广方面，需要进一步加强政策支持，如提供财政补贴、税收优惠等；在商业模式创新方面，可以探索合作开发、技术服务等多种模式，促进三维物探技术的广泛应用和发展。

五、结束语

文章通过研究基于三维物探技术的煤矿隐蔽致灾水体精准探测与防治水应用，构建完整的三维物探技术体系，探寻精准探测技术路径，开发防治水决策支持系统，并进行技术经济性与适用性分析。研究表明，三维物探技术能够有效提高煤矿隐蔽致灾水体的探测精度和准确性，为煤矿防治水工作提供科学的决策依据。

参考文献

[1] 刘会磊. 物探技术在煤矿地质开采方面的应用 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (14): 187-189.
[2] 武鹏. 物探技术在煤矿地质开采方面的应用探讨 [J]. 西部探矿工程, 2024, 36(07): 95-97.
[3] 赵亮. 物探技术在煤矿地质探测中的应用分析 [J]. 西部探矿工程, 2024, 36(07): 139-141+145.
[4] 王泽. 物探技术在探测煤矿地质中的应用 [J]. 矿业装备, 2022, (05): 140-142.
[5] 曹武庆. 物探技术在煤矿地质开采方面的应用 [J]. 科技创新与应用, 2020, (25): 174-175.