

引文格式: 彭苏萍, 许献磊. 煤矿隐蔽致灾地质因素探测技术现状与趋势 [J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2025, 45(5): 78–86.

DOI: 10.3969/j.issn.1672-1098.2025.05.006

煤矿隐蔽致灾地质因素探测技术现状与趋势

彭苏萍, 许献磊

(中国矿业大学(北京)煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: **目的** 我国煤炭地质结构复杂多变, 煤炭安全高效智能开采受小断层、陷落柱、瓦斯富集区等矿井隐蔽致灾地质因素制约。 **方法** 结合国内外相关技术研究, 梳理矿井隐蔽致灾地质因素精细探测技术演进历程: 从 20 世纪 80 年代前煤田地质学主导的粗放式探测, 到 80~90 年代矿井工程地质学与物探技术崛起, 再到 21 世纪初高分辨三维地震技术推动精度跃迁至米级, 如今在智能化驱动下向实时动态、多场融合精细探测技术跨越; 分析了当前高精度探测技术存在探测精度与探测深度矛盾、多源数据融合壁垒、灾害预警决策不及时、装备适配性差等瓶颈问题。 **结果** 提出矿井隐蔽致灾地质因素精细探测技术未来的发展需构建基于多种尺度的综合探测技术体系, 研发煤矿高分辨率三维地震多波场协同地质要素高精度地质探测与精准识别技术、矿井随钻多场原位一体化动态测量技术与装备、采煤工作面煤岩结构及分界面智能动态融合识别技术与装备、煤矿地质与开采环境数字孪生模型及全息显示技术装备、透明矿井地质大模型及云平台。 **结论** 为我国煤炭能源绿色安全高效智能开发提供技术支撑。

关键词: 矿井隐蔽致灾; 精细探测技术; 多源数据融合; 智能开采

中图分类号: P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2025)05-0078-09

Current Status and Trends in Detection Technologies for Concealed Geological Factors Causing Disasters in Coal Mines

PENG Suping, XU Xianlei

(State Key Laboratory of Fine Coal Exploration and Intelligent Development, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: **Objective** China's coal geological structure is complex and changeable. The safe, efficient and intelligent mining of coal is restricted by hidden disaster-causing geological factors in mines such as small faults, collapse columns and gas-rich areas. **Methods** Based on relevant technical research domestically and internationally, this paper sorts out the evolution process of fine detection technology for hidden disaster-causing geological factors in mines, i.e., from the extensive exploration dominated by coalfield geology before the 1980s to the rise of mine engineering geology and geophysical exploration technology between the 1980s and 1990s, and then to the high-resolution 3D seismic technology that pushed the accuracy to the meter level in the early 21st century. Now, intelligence-driven technologies are leaping towards real-time dynamic, multi-field fusion fine detection. The bottleneck problems existing in the current high-precision detection technology were analyzed, such as the contradiction between detection accuracy and detection depth, the barriers of multi-source data fusion,

收稿日期: 2025-09-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3008902)

作者简介: 彭苏萍 (1959-), 男, 江西萍乡人, 教授, 博士, 研究方向: 工程地质与工程地球物理。

untimely disaster early warning decision-making, and poor equipment adaptability. **Results** It is proposed that the future development of fine detection technology for hidden disaster-causing geological factors in mines requires the construction of a comprehensive detection technology system based on multiple scales. Key developments include high-resolution 3D seismic multi-wave field collaborative geological element high-precision geological detection and precise identification technology for coal mines, in-situ integrated dynamic measurement technology and equipment for multiple fields while drilling in mines, intelligent dynamic fusion recognition technology and equipment for coal and rock structures and interfaces in coal mining faces, digital twin models and holographic display technology and equipment for coal mine geology and mining environment, and transparent mine geological large models and clouds Platform. **Conclusion** The research results of this paper provide technical support for the green, safe, efficient and intelligent development of coal energy in China.

Key words: hidden disasters in mines; fine detection technology; multi-source data fusion; intelligent mining

2024年,中国煤矿核定产能达47.8亿吨,产量依然很大^[1]。由于我国煤炭资源赋存条件复杂,85%以上的矿井面临“三软”煤层(软煤层、软顶、软底)、高承压水、高瓦斯等复杂地质条件^[2-4],煤层埋藏深度多超过300m,东部矿区普遍存在新生界厚盖层、奥陶系强含水层等问题^[5-7]。在煤炭开采向深部化、智能化、绿色化转型的过程中,以小断层(落差 $\geq 5\text{m}$)、陷落柱、构造软煤、瓦斯富集区、底板突水通道为代表的隐蔽致灾地质因素,已成为制约煤矿安全高效开采的核心瓶颈。据统计,我国煤矿重特大安全事故中,60%以上与隐蔽致灾地质因素探测不足相关,如20世纪80年代开滦范各庄矿因陷落柱突水导致全井淹没。

随着“双碳”目标与煤炭绿色智能开采战略的推进,传统依赖经验判断和事后治理的灾害防控模式已难以满足需求^[8-9]。一方面,智能化开采对地质信息的精度要求从“米级”迈向“厘米级”,远程无人操控的采煤机定位精度达 $\pm 1\text{cm}$ 、指令传输延迟低于10ms,亟需动态更新的“地质电子地图”支撑截割路径优化^[10];另一方面,西部矿区生态脆弱性强,煤炭开采需同步兼顾矿区水环境保护与生态修复,要求探测技术覆盖“采前-采中-采后”全生命周期,精准刻画煤炭开采过程中岩层破断与地下水运移规律^[11]。在此背景下,矿井隐蔽致灾地质因素精细探测技术作为衔接地质认知与开采实践的关键纽带,其发展水平直接决定了煤矿安全保障能力、资源回收效率与生态保护成效。从行业发展历程看,我国煤矿地质探测技术的演进始终与开采工艺升级深度耦合。20世纪80年代前,炮采与普采工艺

对地质条件要求较低,矿井地质工作局限于煤田地质学范畴,以资源量估算、煤层对比为核心,采用“钻探+肉眼描述”的传统方法,对隐蔽致灾因素的识别能力几乎为零。20世纪80~90年代,随着机械化开采(综采、综放)的推广,断层导致的工作面停产、顶板冒落等问题凸显,催生了矿井工程地质学与矿井物探技术的萌芽;槽波地震、防爆直流电法等技术从德国引进并本土化改造,实现了掘进前方50m内构造的超前探测。进入21世纪,智能化开采与“透明矿山”理念对探测技术提出了更高要求。当前,基于地面三维地震与钻探构建的地质模型仍存在“数据孤岛”问题——地震数据纵向分辨率仅数米,与钻孔测10cm级分辨率难以融合,模型如同“毛玻璃”,无法满足远程无人开采对“透明工作面”的需求;井下探测虽已形成弹性波法(地震、槽波)、电磁法(瞬变电磁、地质雷达)、随掘随采等技术体系,但仍面临全空间干扰、多场响应机制不明确、动态更新能力不足等难题。突水通道探测依赖单一物探方法,存在“地震识构造、电法判含水性”的脱节问题,导致矿区底板滞后突水事故频发。

因此,系统梳理矿井隐蔽致灾地质因素精细探测技术的发展脉络,剖析当前技术瓶颈,明确未来发展方向,对于突破“地质不清”制约、保障煤炭安全智能开采具有重要的理论与工程意义。本文结合近40年技术演进历程,从地面探测、井下探测、数据融合、智能预警四个维度,综述隐蔽致灾因素精细探测技术的研究现状,揭示“从静态描述到动态感知、从单一方法到多场融合、从人工解释到智

能决策”的发展规律,为构建适应绿色智能开采的地质保障体系提供参考。

1 隐蔽致灾地质因素探测技术现状

1.1 矿井三维地震探测技术

该技术是当前构建区域地质框架、识别宏观隐蔽致灾因素(如大型断层、区域性突水通道)的核心手段,核心优势在于覆盖范围广、能提供区域性地质构造轮廓,目前已形成相对成熟的技术体系并广泛应用,但精度与适应性仍受现有技术条件制约。

基础探测能力成型(20 世纪 90 年代~2020 年):高分辨三维地震勘探技术体系完善后,成为煤矿精细地质构造(落差 $\geq 5\text{m}$ 断层)与灾害隐患(区域性突水通道)探测的常规手段,支撑全国煤矿安全高效开采;三维 RVSP 技术突破碳酸盐裸露、厚黄土区等复杂地表限制,实现煤层底板形态及大型断层(落差 $\geq 10\text{m}$)的精准识别,解决了部分复杂地表区域的基础地质探测难题^[12-13]。

精细化与综合化探索落地(2021~2022 年)^[14-15]:通过非网格层析静校正、叠前时间偏移等精细处理技术的参数优化,地震剖面信噪比与目的层反映精度显著提升,探测成果与井下实际揭露的吻合度大幅提高;“三维地震+瞬变电磁”综合物探方法初步应用,在单一技术难以解决的复杂地质区域(如既有断层又有富水层的区域),提供了多维度地质信息,验证了综合探测的可行性^[16-17]。

针对性与系统性应用深化(2023~2025 年):基于地面三维地震数据体的多属性融合技术,解决了部分小断层(落差 3~5m)、隐蔽断层的识别难题,能精准划分断层类型及空间分布,直接为采掘工程布置提供依据;对大型复杂断层(埋深 $> 500\text{m}$ 、冲积层厚 $> 200\text{m}$),构建“定向钻孔+垂直钻孔+三维地震数据对比”的多重探测体系,弥补了单一三维地震技术在深部复杂构造探测中的不足^[18-19];在灾害防控场景中,通过三维地震反演隔水层厚度,结合突水系数法,实现煤层底板高承压水突水危险区的精准圈定^[20];在风积沙松散层勘探中,形成适配地形与激发条件的专项探测方案,可查明松散层厚度、煤层基本形态及主要断层(落差 $\geq 3\text{m}$)分布,为开

采方案制定提供基础数据^[21];同时,梳理 2005 年以来煤田高密度三维地震的发展历程(2005~2007 年探索期、2008~2014 年试点期、2015 年至今推广期),构建起构造定量评价体系,能明确断层规模、走向等核心特征,为矿井开拓布局提供有利支撑。

受现有技术原理、装备性能及数据处理水平限制,该技术存在以下不可回避的短板,且短期内难以通过现有技术优化完全解决:1)小构造与岩性参数探测能力不足:过度依赖反射波成像,对绕射波、面波等蕴含小构造与岩性信息的波场挖掘缺失,导致小尺度构造(落差 $< 5\text{m}$ 断层、直径 $< 20\text{m}$ 溶洞)识别率低于 40%,无法满足精细化开采对微小隐患的探测需求;同时,仅能对岩性进行定性描述,无法定量获取孔隙度、渗透率等与灾害风险直接相关的关键参数^[22-24]。2)数据融合与分辨率瓶颈:地面三维地震(平面精度约 3m、纵向分辨率数米)与井下物探(如钻孔测井 10cm 级分辨率)数据存在“数据孤岛”问题,两类数据分辨率差异过大,现有技术无法实现有效融合,难以形成“地面-井下”一体化的地质认知,无法满足无人化开采对“透明工作面”的高精度数据需求^[25-26]。3)复杂环境适应性差:在深部高地应力(地应力 $> 25\text{MPa}$)、高承压水(水压 $> 5\text{MPa}$)区域,数据采集易受地层扰动、流体干扰,静校正难度显著增加,导致探测结果偏差,无法准确反映真实地质情况。

1.2 掘进巷道超前精细探测技术

该技术以“实时识别掘进前方(10~200m 范围内)地质构造与灾害隐患”为核心目标,目前已形成多技术协同的探测体系,各技术针对不同场景实现了特定探测能力,但均存在与当前技术原理绑定的固有缺陷^[27]。

1)地震波超前探测技术 基于地震波传播规律,可探测掘进前方 150~200m 范围内的采空区、岩石破碎带、大型断层(落差 $\geq 5\text{m}$)等隐患,核心优势是探测距离远,是当前长距离超前探测的主要手段,但受井下环境与技术原理限制,精度与稳定性不足。先进的随掘/随采地震技术,通过优化震源与接收装置,可在掘进过程中实时探测前方 200m 内的宏观地质异常,为掘进方案调整预留充足时间,在中浅

部、地质条件相对简单的矿井应用效果显著。但是,该技术存在局限:一是被动源信号强度弱,易受井下液压支架移架、掘进机作业等设备的电磁干扰,同时受粉尘、振动等作业环境影响,信号信噪比低;二是深部高地应力、高地温(温度 $>35^{\circ}\text{C}$)环境会改变地震波传播速度与路径,导致探测精度下降,解释结果准确性难以保证;三是对小尺度构造(落差 $<2\text{m}$ 断层)识别能力不足,无法满足精细化掘进对微小隐患的探测需求。

2) 防爆地质雷达探测技术 通过电磁波反射原理实现断层、小构造识别,设备便携性强,可在掘进工作面灵活布置^[28],目前已在设备优化与方法融合方面取得阶段性成果,但探测深度与复杂地层适应性受限。2021年,KJH-D型防爆雷达在新景矿建立地质构造与雷达图谱的对应关系,实现掘进前方30m内断层(落差 $\geq 2\text{m}$)的有效预报^[29];2022年,低频雷达技术将井下断层、陷落柱探测距离拓展至50m,缓解了传统高频雷达探测范围小的问题^[30-31];2023年,“雷达+井下地震”融合技术在滇东雨汪煤矿应用,构造预测准确率提升至90%(对落差 $\geq 3\text{m}$ 断层、直径 $\geq 15\text{m}$ 陷落柱);2024年,100MHz雷达结合FDTD模拟技术,实现华阳一矿隐伏陷落柱的类型判别,进一步提升了雷达探测的解释精度。目前,该技术存在的局限:一是“精度-距离”矛盾突出,高频雷达($>200\text{MHz}$)探测精度可达1m以内,但探测距离仅10~20m;低频雷达($<100\text{MHz}$)将探测距离拓展至50以上,但精度降至3~5m,无法同时满足“远距”与“高精度”需求;二是在富水地层(含水率 $>20\%$)或高导电介质(如含矿化水岩层)中,电磁波衰减速度快,信号易失真,导致构造识别准确率下降至60%以下。

3) 孔中全方位扫描雷达探测技术 当前井下高分辨率探测的先进技术,通过向钻孔周围发射高频电磁波并接收反射信号,实现厘米级精度探测,核心优势是分辨率高、能 360° 全方位获取钻孔周边地质信息,但应用场景受地质条件与钻孔质量严格限制。煤岩界面识别误差可控制在厘米级,能精准确定钻孔周围地质体(如小断层、裂隙带)的空间位置、规模与性质,为钻孔周边隐患排查提供高精度数据,在中硬岩层、钻孔质量良好的区域应用效果显著^[32]。

目前,该技术局限:一是受围岩电性差异影响极大,在电导率较高的介质(如富黏土岩层、泥岩)中,电磁波衰减剧烈,100MHz中心频率天线的探测距离不5m,远低于中硬砂岩中的20m探测距离;二是对钻孔质量要求严苛,钻孔坍塌、井液浑浊会直接干扰信号接收,导致探测数据无效,而井下复杂条件下难以保证所有钻孔均满足探测要求。

4) 矿井瞬变电磁探测技术 矿井瞬变电磁法探测技术近年来在掘进巷道水害防治中发展迅速,由于含水体(如老空水、含水层水)电阻率远低于周围岩石,瞬变电磁法对这类低阻异常体反应灵敏,使其成为煤矿水害探查的利器。近年来,中国煤炭科工集团西安研究院利用定向长钻孔+孔中瞬变电磁技术,在陕西旬邑县旬东煤业实现了1026m的远距离水害超前探测,这种“长掘长探”模式为巷道安全、长时间掘进提供了可靠技术支撑。尽管矿井瞬变电磁技术在煤矿掘进巷道中应用广泛,成效显著,但仍受到井下全空间效应与干扰,以及掘进机、钻机等金属机械会对探测带来很大的金属体影响及电磁干扰。

5) 矿井直流电法探测技术 矿井直流电法以煤岩体电性差异(如电阻率、极化率)为物理基础。通过向地下供入直流电流建立人工电场,测量电位差,从而推断地下地质异常体。直流电法在掘进巷道中主要用于超前探测,预报工作面前方的地质异常体,如老空水、导水构造等。常与瞬变电磁法(TEM)等组合形成电磁综合超前探测技术。两种方法成果相互对比验证,可提高对含水异常体判断的准确率,为巷道安全掘进提供参数。直流电法在井下应用同样存在全空间干扰与解译的多解性。

1.3 回采工作面精准探测技术

该技术聚焦回采工作面内部及周边的煤岩结构、隐蔽构造(如层内小断层、陷落柱)及灾害隐患(如局部富水区),形成多种技术互补的探测体系,各技术在特定场景下能有效实现探测。

1) 槽波透视技术 利用煤层与顶底板岩层的波阻抗差异,使地震波在煤层中形成能量强、衰减慢的“槽波”,从而探测工作面内的地质异常,核心优势是对煤层内部构造探测针对性强,但受地质条件

与施工规范性制约明显。在地质条件相对简单(无强烈褶皱、断层数量 ≤ 2 组、煤层厚度变化率 $< 10\%$)的工作面,能精准识别落差 $\geq 2\text{m}$ 的断层、直径 $\geq 10\text{m}$ 的陷落柱,为回采过程中的隐患规避提供依据。现存局限:一是极复杂地质条件下失效,当工作面存在强烈褶皱、多组断层交错(断层数量 ≥ 3 组)、煤层剧烈分叉变薄(厚度变化率 $> 30\%$)时,槽波的形成与传播会被严重干扰,数据解释多解性极强,甚至无法形成有效探测结果;二是对施工规范性依赖度高,检波器耦合不紧密、炸药激发能量不足等施工瑕疵,会导致数据质量下降,使探测准确率降低 30% 以上。

2) 无线电波透视技术(坑道透视法)基于电磁波在煤层中传播时,遇电性差异地质体会形成“阴影区”的原理实现探测,目前主流矿用设备(如 YDT88 型、YDT88A 型)具备防爆、大发射功率(提升透视距离至 100m 以上)、多频率适配等特点,但结果多解性与小构造识别能力不足。在中厚煤层(厚度 3~5m)、地质构造相对简单的工作面,能有效识别落差 $\geq 1/3$ 煤厚的断层、直径 $\geq 20\text{m}$ 的陷落柱及大范围富水区(面积 $> 100\text{m}^2$),为工作面回采风险评估提供基础信息^[33-34]。现存局限:一是结果多解性突出,富水断层与干燥陷落柱、煤层变薄区与局部致密岩层等不同地质体,可能产生相似的电磁响应(均显示“阴影区”),需结合其他探测资料交叉验证,否则易误判;二是小尺度构造识别能力弱,对落差 $< 1/3$ 煤厚断层、近走向展布的构造(与工作面走向夹角 $< 30^\circ$)及薄煤层(厚度小于 1.5m)中的细微变化,无法精准识别。

3) 防爆地质雷达 CT 透射技术通过发射高频电磁波,利用其不同电性介质界面的反射、折射特性,推断地下目标体的空间信息,核心优势是能提供目标体的三维形态轮廓,但受介质特性与井下环境干扰明显。在低含水率(含水率 $< 10\%$)、低粉尘的工作面环境中,能识别直径 $\geq 5\text{m}$ 的地质异常体(如小型陷落柱、局部富水囊),为工作面局部隐患排查提供支持。目前该技术局限:一是介质含水率影响大,电磁波传播速度随岩层含水率变化显著(含水率每增加 10%,速度偏差可达 15% 以上),导致目标体探测位置偏差超过 2m;二是井下环境抗干扰

能力弱,回采工作面高粉尘(粉尘浓度 $> 10\text{mg}/\text{m}^3$)、高湿度(相对湿度 $> 85\%$)环境会干扰天线信号,使数据采集精度下降 20%~30%。

4) 随采地震技术 工作面随采地震技术是一种被动源地震勘探方法。其核心在于利用采煤机截割煤壁时产生的振动作为震源(取代了传统的炸药或人工震源),通过在巷道中布设的检波器阵列接收来自地下介质的反射波或散射波信号,进而利用地震成像技术(如层析成像)反演出工作面内部的煤岩界面、小断层、陷落柱、应力集中区等静态地质条件和动态灾变信息。分布式光纤声学传感(DAS)技术的应用是近年来的一个重要趋势,用预埋于巷道帮壁的光缆作为传感器,能够以极高的空间密度(如 0.5m 或 1m 间隔)和连续性采集全空间波场数据。这不仅大大提高了探测的分辨率和精度,而且光缆一旦布设可长期复用,无需人工移动,降低了维护成本和施工复杂性,实现了真正意义上的实时、常态化监测。除了 DAS,也在不断优化基于传统数字检波器的布设方案,以期在特定场景下获得更好信噪比的数据。然而,采煤工作面环境恶劣,振动噪声来源复杂(如刮板输送机、液压支架、破碎机等),如何有效压制噪声、提取有效信号仍是技术难点之一。

2 隐蔽致灾地质因素探测技术趋势

矿井灾害探测是煤矿安全生产的核心保障。面向煤矿绿色智能开采的少人化、无人化重大需求,针对当前透明矿井建设中存在的地质环境感知与探测精度不足、地质模型构建滞后以及智能决策水平低等问题,亟需建立贯穿全生命周期的探测技术体系^[35-36]。该体系涵盖区域地质框架构建、掘进过程实时感知、采煤工作面精细识别、地质与开采环境动态建模、智能化信息平台五大环节,并围绕多波场协同三维地震探测、随钻多场原位一体化动态测量、煤岩结构及分界面智能融合识别、多源异构数据智能融合与数字孪生建模、透明矿井地质大模型与云平台五大方向展开,逐步形成“整体-过程-局部-动态-智能”的多层次探测格局,以支撑透明矿井建设与智能化生产。在此框架下:煤矿高分辨率三维地震多波场协同探测与精准识别技术,重

点提升断层、陷落柱、裂隙带、岩性、含水性及含气性等关键要素的地面探测能力。相关成果不仅为随钻和工作面探测提供约束支持,还为数字孪生建模和透明矿井云平台提供高精度地质基础数据。随钻多场原位一体化动态测量技术与装备,重点突破原位条件下多物理场动态感知与巷道前方、侧方隐伏地质体的高精度识别,实现灾害超前预警,并为三维地震探测、数字孪生建模和地质大模型构建提供关键约束数据与模型参数。采煤工作面煤岩结构及分界面智能动态融合识别技术与装备,旨在形成适用于强干扰环境的高分辨煤岩结构探测与智能识别体系。其成果既可为三维地震反演提供先验约束,提高反演精度,又可为数字孪生模型提供动态更新数据,为地质大模型构建提供多源基础,并在工程示范中实现煤岩界面与隐伏异常体的智能化识别。

2.1 三维地震多波场协探测与识别技术

高分辨率三维地震探测是实现煤矿关键地质要素识别的核心手段。中国矿业大学(北京)率先建立了煤矿采区小构造高分辨率三维地震勘探技术体系;东方地球物理、CGG、斯伦贝谢等公司在“两宽一高”地震勘探及高分辨率岩性反演等技术方面取得了重要突破。多波场信息融合等技术正成为提升三维地震勘探分辨率的关键研究方向^[37]。

面临的技术瓶颈:煤矿三维地震勘探以反射波为主,未充分利用地震多波场信息,单一波场对构造、岩性、赋水性与含气性等关键地质要素的识别精度低,难以满足透明矿井地质模型架构基础数据需求。因此,亟需构建三维地震反射波、绕射波和面波等多波场协同高精度探测与精准识别技术体系。三维地震勘探是区域地质框架构建的核心手段,能提供断层、富水区等宏观地质信息,但存在明显瓶颈:过度依赖反射波成像,绕射波、面波等信息挖掘不足,导致小构造(落差 $<5\text{m}$ 断层、直径 $<20\text{m}$ 溶洞)识别率不足40%,岩性描述粗放,无法定量获取孔隙度等关键参数,易诱发安全事故。未来将向“多波场融合、定量反演、智能可视化”突破,主要围绕:

1)多波场协同成像。打破单一反射波局限,通

过反射波(识别大型构造)、绕射波(捕捉小尺度异常)、面波(反演近地表岩性参数)协同采集与融合处理,建立全深度、多尺度地质表征模型。需突破波场分离与噪声压制(提升信噪比)、多尺度数据融合建模(形成“一张图”三维模型)两大关键技术。应用后,小断层识别精度提升至落差 2m 以上,溶洞识别直径缩小至 10m 以内。

2)联合反演与定量表征。摆脱传统定性解释模式,利用多波场对地质参数的敏感性差异(纵波反映密度、孔隙度,横波体现弹性,转换波响应流体分布),构建多参数协同反演模型,同步反演地层密度、渗透率、含水性等参数。直接服务于灾害风险评估,圈定富水区、瓦斯富集区,预测涌水量与突出风险,实现数据与生产动态联动,提升预警时效性。

3)智能化处理与可视化。依托深度学习算法(CNN、RNN)实现地震数据自动化解释,效率较人工提升10倍以上,准确率超90%;结合GPU集群与并行计算,构建“实时建模-动态更新-多维展示”体系,通过WebGL、VR/AR技术实现可视化,为透明矿井数字孪生系统提供核心支撑,辅助生产决策与风险预判。

2.2 矿井随钻多场原位一体化探测技术

在随钻探测技术方面,主要采用惯性导航结合瞬变电磁、探地雷达等方法可实现钻孔径向一定范围内的地质异常体探测;在原位动态测量方面,基于井震融合的程度计算模型与多极子声波测量技术已初步实现地层参数的实时反演与动态修正;在巷道超前探测方面,瞬变电磁法、地震波法及探地雷达等技术已形成较为成熟的技术体系。

面临的技术瓶颈:随钻探测受限于钻孔尺寸约束及单一方法的多解性,其有效探测径向范围普遍不足 10m ;多场耦合建模理论尚不完善,在复杂地质环境下存在明显的多源干扰抑制不足及多模态数据融合效率低等问题。因此,亟需研究随钻多场原位一体化动态测量技术及装备,为掘进工作面透明地质数据获取提供支撑。随钻探测是连接地面与井下探测的关键,能实时获取掘进中地质信息,但存在探测半径不足 10m 、多场耦合建模不成熟、数据融合效率低等瓶颈,易因“临到眼前才发现”灾害

源引发事故。未来将围绕“扩大探测范围、提升数据利用率、增强装备适应性”升级,主要围绕:

1)多场协同与全方位探测。构建“近钻头-钻机-巷道”一体化体系:近钻头集成微型传感器实时采集岩性、压力数据;钻机搭载瞬变电磁仪、探地雷达扫描前方 10~50m 地质体;巷道部署阵列传感器监测周边岩层裂隙。通过数据标准化、特征关联、误差修正,形成“孔-机-巷”联动地质信息图谱,孔周识别精度达 0.5m 以内,前方探测范围扩展至 50m。

2)模块化与智能化装备。装备向模块化、可重构化发展,拆解为传感、数据处理等标准化模块,按需组合适配不同矿井需求;引入自适应控制算法,装备可根据地质条件自主调整探测模式;集成边缘计算单元,实现数据实时预处理与异常预警,形成“探测-决策-控制”闭环联动,提升复杂环境适应性与可靠性。

2.3 煤岩结构及分界面融合识别技术

煤岩结构及分界面智能识别是实现煤矿智能化开采的关键。彭苏萍院士等创立了矿井煤岩界面随采动态探测理论体系;王国法院士研发了工作面智能协同控制系统;葛世荣提出了采煤机自主导航截割技术;澳大利亚 CSIRO 研发了基于地质雷达的煤层厚度数字曲面建模方法。

面临的技术瓶颈:煤岩层赋存条件复杂多变,界面变化缺乏规律性。现有热红外、视频图像受粉尘影响大,声波探测抗扰动能力弱,自然 γ 法依赖煤岩放射强度差异,地面耦合雷达贴面作业易损坏;非接触式高频电磁波探测方法虽具潜力,但悬空条件下信号衰减严重;智能支架姿态调控、精准定位及多模态煤岩结构-属性信息融合识别等关键技术亟待突破。煤岩界面与结构识别是智能化开采的核心前提,直接影响截割精度、资源回收率与设备安全,但在工作面高粉尘、强振动等复杂工况下,存在信号衰减严重、识别精度不足(单一技术准确率 $<60\%$)、数据融合滞后等问题。未来将围绕“提升识别精度、增强环境适应性、实现动态反馈”升级^[38-39],主要围绕:

1)多源信息高精度融合。集成地质雷达(探测深层界面,抗粉尘)、自然 γ 射线(凭放射性差异识

别界面,抗干扰)、振动传感(通过截割频率判断岩性)、视频图像(辅助定位)等手段,构建“空-时-频”多维数据关联模型。突破数据时空配准(统一坐标系)、特征级融合建模(挖掘数据关联)、动态权重分配(适配工况)技术,界面识别准确率提升至 95% 以上,极端环境下保持 85% 以上。

2)智能化识别与动态反馈。借助 U-Net++(界面分割)、GNN(数据关联分析)、LSTM(截割预测)等深度学习模型,实现“实时采集-智能分析-动态反馈”闭环。识别系统将界面位置、硬度等信息实时传输至采煤机控制系统,后者自主调整截割参数;同时反馈运行数据优化模型,使截割精度控制在 $\pm 50\text{mm}$ 以内,资源回收率提升 3%~5%。

3)装备集成与机器人搭载。开发多传感器集成探测头,安装于采煤机摇臂,采用抗振动、耐恶劣环境设计,实现“随割随测”;通过小型化履带式或壁挂式探测机器人,扫描工作面盲区(两端、顶板),与采煤机实时交互数据,形成立体化探测网络,减少人工干预,提升极端工况下的探测稳定性。

3 透明矿井构建技术发展趋势

3.1 煤矿数字孪生模型及全息显示技术

数字孪生与全息显示技术是实现透明矿井全域动态感知与虚拟再现的核心手段。国际上,美国 Petrel 软件以及国内深探平台已在复杂地质构造快速建模与动态模拟方面形成较成熟体系;开采环境的设备动态建模和邻近空间地质环境耦合技术逐步完善,部分煤矿已开展地质环境与开采环境数字孪生的初步应用探索。然而,目前矿井真三维全息显示技术发展相对薄弱,AR/VR 在“地面-井下”协同应用中的适应性不足,尚难以支撑复杂工况下的实时可视化需求。

面临的技术瓶颈:煤矿全域数据类型多样、来源复杂,数据融合难度大,导致地质要素表征精度不足;地质模型动态更新效率低、自动化程度不高;开采环境动态建模存在定位偏差,难以实现地质-开采环境模型的高精度耦合;数字孪生模型数据驱动能力不足,全息显示技术在井下应用中存在分辨率低、延迟高、交互性差等问题,难以满足生产决策的

实时性与指导性需求。

未来亟需突破“全域融合—高精度建模—沉浸交互”三大方向,研究多源异构数据融合技术,刻画煤矿敏感地质要素高精度多尺度表征;研究煤矿地质环境动态建模技术,实现煤矿大规模复杂地质环境地质模型的高效构建与局部更新;研究误差传播模式,实现“视觉-LiDAR-IMU-导线测量”耦合的开采环境动态模型精准构建技术;研究煤矿地质与开采环境数字孪生系统构建机制,实现数字孪生体的构建、管理、虚实映射功能;研究辅助全息与裸眼全息一体化显示装备技术及煤矿井下本安型轻量穿戴式 AR/VR 终端,实现透明矿井“全域-全息”沉浸式显示。

3.2 透明矿井地质大模型及云平台

透明矿井地质大模型与云平台是煤矿智能化发展的数据与智能中枢^[40]。当前, MicroMine、龙软系统等平台已具备多源数据集成与常规地质建模功能;华为公司、中煤科工集团等开展了具备语义理解能力的大语言模型研究,初步实现了面向煤矿的知识检索与辅助分析。然而,在多模态地质数据融合建模、因果推理与智能决策等方面仍存在明显不足,尚未形成面向透明矿井的高精度、可解释、全域智能支撑体系。

面临的技术瓶颈:在数据治理层面,多源异构数据的标准化采集与处理体系不完善,冷热数据分层管理与高效检索机制缺失;在边云协同计算层面,轻量化 AI 推理优化不足,异构算力调度效率低,开放 API 标准不统一;在智能决策层面,地质大模型与专家知识融合度不足,因果推理能力与结果可解释性欠缺。

未来需从“数据治理—算力协同—智能决策”三方面实现突破。针对矿井全域感知多源异构数据类型多、数据响应慢、智能决策难等问题,研究矿井多源异构地质数据智能聚合与表达、云边端协同服务、地质大模型数据挖掘与知识演化、多智能体协同调度与智能决策以及适配国产软硬件的自主可控平台关键技术,构建全域感知智能湖仓系统、云边端协同服务架构、多模态地质大模型和数据知识驱动的矿井智能体,搭建国产化透明矿井地质云

平台,实现矿区到工作面多尺度的煤矿动态模型转化,实现全域数据和地质环境、开采环境模型的数字化、信息化、协同化管理。

4 结语

我国煤炭安全高效开采长期受小断层、陷落柱等矿井隐蔽致灾地质因素制约,相关精细探测技术历经从粗放式到智能化的演进,已形成地面三维地震、井下超前探测、回采工作面识别等多维度技术体系,在保障煤矿生产中发挥关键作用。但当前技术仍面临突出瓶颈,探测精度与范围存在矛盾,多源数据融合存在壁垒,装备适配复杂地质环境能力不足,且灾害预警难以有效落地,难以满足煤炭深部化、智能化、绿色化开采的需求。未来,需以“融合、智能、精细、透明”为核心方向,构建全尺度探测体系,推进多源数据深度融合建模,研发智能化集成装备,建立多灾害耦合预警系统,实现从静态描述到动态感知、从单一方法到多场融合、从人工解释到智能决策的跨越,为煤炭绿色智能开采提供更坚实的地质保障。

参考文献:

- [1] 《2024 煤炭行业发展年度报告》发布 [J]. 中国煤炭工业, 2025(5): 32.
- [2] 彭苏萍, 卢勇旭. 煤与瓦斯突出灾害隐患高分辨三维地震预测方法 [J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 34–38.
- [3] 鲍久圣, 李明锋, 周恒, 等. 深部煤炭流态化开采装备自主行走机构多缸推进同步控制 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 264–278.
- [4] 袁亮, 张通, 王玥晗, 等. 深部煤炭资源安全高效开采科学问题及关键技术 [J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 1–12.
- [5] 程建远, 王会林. 煤矿地质保障技术现状与智能探测前景展望 [J]. 智能矿山, 2020, 1(1): 35–45.
- [6] 许献磊, 马正, 陈令洲. 煤矿地质灾害隐患透明化探测技术进展与思考 [J]. 绿色矿山, 2023, 1(1): 56–69.
- [7] 彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2 311–2 345.
- [8] 王双明, 李识博, 孙强, 等. 论“碳、水、环”约束下的煤炭减损开采地质保障 [J]. 西安科技大学学报, 2025, 45(1): 1–11.
- [9] 袁亮, 张平松. 煤矿透明地质模型动态重构的关键技

- 术与路径思考[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 1-14.
- [10] 葛世荣, 张晞, 薛光辉, 等. 我国煤矿煤机智能技术与装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 146-56.
- [11] 彭苏萍, 毕银丽. 钱鸣高院士指导西部干旱半干旱煤矿区生态修复研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 857-860.
- [12] 邢涛, 牛云飞, 孙文斌, 等. 三维 RVSP 技术在复杂地表条件矿井中的应用[J]. 华北地震科学, 2020, 38(S1): 1-9.
- [13] 司马遥. 三维地震技术在探测煤矿地质构造中的应用分析[J]. 当代化工研究, 2020(20): 85-86.
- [14] 李博. 三维地震勘探精细处理技术在智能矿井的应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022(24): 175-177.
- [15] 郝立彬, 解洁清, 孟建盛. 三维地震勘探精细处理技术在智能矿井生产中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(9): 73-77.
- [16] 杨彪, 麻银斗, 侯晓冰. 小保当煤矿风积沙松散层三维地震地质特征研究[J]. 山东煤炭科技, 2024, 42(7): 108-113.
- [17] 杨彪, 李杰, 杨小勇, 等. 小保当煤矿首采区三维地质特征研究[J]. 煤炭与化工, 2024, 47(3): 65-69.
- [18] 阚雪冬. 区域大型物探断层多重探测技术研究与应用[J]. 煤炭技术, 2023, 42(3): 133-137.
- [19] 李雪娇. 三维地震勘探技术在煤矿构造勘探的实践分析[J]. 西部探矿工程, 2025, 37(6): 46-48.
- [20] 盛兴伟, 刘林, 孙斌. 基于水体与采空区双耦合影响的矿区三维地震勘探技术研究[J]. 山东煤炭科技, 2025, 43(8): 151-155.
- [21] 李江. 小庄矿井地质异常区地震解释与成因分析[J]. 煤炭技术, 2025, 44(4): 94-99.
- [22] 崔凡, 王然, 陈存强, 等. 滇东复杂地质条件探地雷达与井下地震综合超前预测小构造[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 222-230.
- [23] 杨乐, 韩子祥, 杨勇. 基于三维地震解释的矿井工作面小断层识别技术[J]. 煤, 2025, 34(7): 90-92.
- [24] 韩磊, 陈彦昭, 王礼, 等. 基于三维地震勘探技术对煤层底板高承压水突水危险性的研究[J]. 煤, 2024, 33(3): 69-73.
- [25] 丁耀龙. 华阳一矿西翼三维地震精细解释技术研究[J]. 煤炭与化工, 2025, 48(5): 64-69.
- [26] 朱利岗, 王安民, 宋忠亮, 等. 蒋庄煤矿北十采区构造定量评价研究[J/OL]. 煤炭科学技术. [2025-09-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20250711.1649.002>.
- [27] 侯丽兵. 利用综合物探方法解决矿井地质质量问题[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(24): 18-19.
- [28] 许献磊, 李菁淋, 郭爱军, 等. 矿井工作面透射探测信号同步传输系统设计与开发[J]. 金属矿山, 2023(5): 175-184.
- [29] 刘建伟. KJH-D 型防爆探地雷达在新景矿掘进巷道中的应用[J]. 山东煤炭科技, 2021, 39(12): 182-185.
- [30] 杨乐宇. 低频地质雷达在井下地质构造探测中的应用[J]. 当代化工研究, 2022(19): 125-127.
- [31] 孙剑, 肖斌, 孙浩, 等. 地质雷达超前探测的应用研究[J]. 当代化工研究, 2024(17): 119-121.
- [32] 许献磊, 朱小松, 李涛涛, 等. 矿井钻孔雷达定向探测技术研究[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(1): 14-23.
- [33] 王卫光, 乔旭, 杨峰. 探地雷达在华阳一矿隐伏陷落柱构造探测中的应用[J]. 煤矿现代化, 2024, 33(2): 64-67.
- [34] 张鑫辉. 探地雷达在煤矿地质预测预报工作中的应用研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(8): 163-165.
- [35] 康红普, 谢和平, 王双明, 等. 煤炭与共生矿产资源一体化绿色开发战略研究[J]. 中国工程科学, 2025, 27(2): 172-183.
- [36] 毕银丽, 彭苏萍, 杜善周. 西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1 355-1 364.
- [37] 张晓岩. 地震多属性融合技术在煤矿隐蔽断层构造识别中的应用研究[J]. 煤炭与化工, 2022, 45(6): 73-75.
- [38] 许献磊, 彭苏萍, 马正, 等. 基于空气耦合雷达的矿井煤岩界面随采动态探测原理及关键技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 2 961-2 977.
- [39] 许献磊, 陈令洲, 彭苏萍, 等. 矿井煤岩界面节点式雷达快速动态探测系统及实验研究[J]. 煤炭学报, 2024, 29(4): 1 964-1 975.
- [40] 郭一楠, 杨帆, 葛世荣, 等. 知识驱动的智采数字孪生主动管控模式[J]. 煤炭学报, 2023, 48(S1): 334-344.

(责任编辑: 李 丽)