

引文格式:薛生,郑晓亮,陈旭,等.煤矿井下随钻测量技术的现状与展望[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2025,45(5):49-61.

DOI:10.3969/j.issn.1672-1098.2025.05.004

煤矿井下随钻测量技术的现状与展望

薛生^{1,2,3},郑晓亮^{1,2,4},陈旭³,杨志强²

(1.安徽理工大学深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室,安徽淮南 232001;2.安徽理工大学煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心,安徽淮南 232001;3.安徽理工大学安全科学与工程学院,安徽淮南 232001;4.安徽理工大学公共安全与应急管理学院,安徽合肥 230000)

摘要:目的 为满足煤矿智能化进程中井下钻探信息化、自动化与智能化的更高要求,支撑智能钻探、透明地质建模及灾害预警。**方法** 系统综述了煤矿井下随钻测量技术的发展现状与核心进展,聚焦于轨迹测量、岩性识别与随钻通讯三大关键功能。在轨迹测量方面,基于惯性测量单元(IMU)的捷联惯导系统,阐述了卡尔曼滤波、误差建模与自适应补偿优化姿态与井斜参数的动态高精度解算研究情况。在岩性识别方面,说明了传统伽马测孔与电法测孔方法在实时化方面仍存局限,结合钻头振动特征的多模态识别逐渐兴起,并引入神经网络与深度学习框架等智能算法,用于对井下复杂工况下岩性类别的高效判别。在随钻通讯方面,针对井下高导电性介质、强干扰环境与有限井径等约束,阐述了声波、电磁波、泥浆脉冲与磁耦合等技术路线的发展及应用情况。**结果** 当前研究在动态姿态解算精度提升、基于振动与智能算法的岩性实时识别技术发展、以及多种通讯技术应对复杂环境等方面取得显著进展,但仍面临传感器可靠性、算法自主性、模型普适性与通讯高速可靠性等挑战。**结论** 文章展望了随钻测量技术在煤矿智能化转型中的发展趋势,提出应重点突破高可靠传感器、自主姿态解算算法、数据驱动岩性识别模型与高速可靠通讯机制,推动构建面向透明地质与智能钻进的随钻测量新体系。

关键词:煤矿随钻测量;智能钻进;轨迹测量;岩性识别;随钻通讯

中图分类号:TD41 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2025)05-0049-13

Current Status and Prospects of Underground Measurement-While-Drilling Technology in Coal Mines

XUE Sheng^{1,2,3}, ZHENG Xiaoliang^{1,2,4}, CHEN Xu³, YANG Zhiqiang²

(1.State Key Laboratory of Safe Mining of Deep Coal and Environmental Protection, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2.National and Local Joint Engineering Research Center of Coal Safety and Precision Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 3.School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 4.School of Public Safety and Emergency Management, Anhui University of Science and Technology, Hefei Anhui 230000, China)

Abstract: **Objective** To meet the escalating demands for informatization, automation, and intelligence in underground drilling within the intelligent transformation of coal mines and to underpin smart drilling, transparent geological modeling, and hazard early-warning. **Methods** The paper presents a systematic review of measurement-while-drilling (MWD) technologies for underground coal mines centering on three key

收稿日期:2025-07-15

作者简介:薛生(1964-),男,山西祁县人,教授,博士,研究方向:安全监测与监测技术。

functions—trajectory measurement, lithology identification, and communication-while-drilling—for trajectory measurement, the strapdown inertial navigation system based on inertial measurement units (IMUs) and advances in dynamic high-precision solutions for attitude and inclination parameters via Kalman filtering, error modeling, and adaptive compensation; for lithology identification, the limitations of conventional gamma-ray and electrical logging in real-time applications, the rise of multi-modal recognition that fuses bit-vibration characteristics, and the integration of neural networks and deep-learning frameworks for efficient lithology classification under complex downhole conditions; and for drilling communication, the development and application of acoustic, electromagnetic, mud-pulse, and magnetic-coupling technologies under constraints of highly conductive media, strong interference, and limited borehole diameters. **Results** Current research has achieved notable progress in improving dynamic attitude-solution accuracy, advancing real-time lithology identification based on vibration and intelligent algorithms, and enhancing the adaptability of multiple communication techniques in complex environments, yet challenges persist in sensor reliability, algorithm autonomy, model universality, and high-speed, high-reliability communication. **Conclusion** The paper projects future trends for MWD technologies in the intelligent transformation of coal mines, advocating prioritized breakthroughs in highly reliable sensors, autonomous attitude-resolution algorithms, data-driven lithology-identification models, and high-speed, high-reliability communication mechanisms to foster a new MWD system oriented toward transparent geology and intelligent drilling.

Key words: coal mine MWD; intelligent drilling; trajectory measurement; lithology recognition; MWD communication

煤矿智能化是煤炭行业实现安全、绿色、智能、高效发展的核心技术支撑^[1]。随着煤矿开采深度不断加深和智能化建设的推进,井下钻进作业对实时、精准的地质与钻进信息需求愈加迫切^[2]。随钻测量技术是煤矿智能化钻探的关键一环,在钻具近钻头处布设高精度传感器,可以实时获取井斜、方位与地层物性信息,实现钻进轨迹可视化、精准地质导向与在线风险预警,大幅提升钻进精度、安全性和效率,可应用于煤矿井下瓦斯抽采、探放水、注浆防灭火、防突泄压、地质勘探等灾害防治领域^[3]。

国外随钻测量(Measurement While Drilling, MWD)系统主要由国际领先的油田技术服务公司研发和推广,具有高度集成化、智能化与适应复杂地质环境的能力。斯伦贝谢推出的 PowerDrive 与 NeoSteer 系列^[4-5]系统具备良好的地层导向功能,能够实时测量井斜、方位角、钻压、冲击与振动等参数,并结合地质导向技术实现精确钻进;贝克休斯的 AutoTrak 系统则在自动化轨迹控制与数据传输稳定性方面表现突出,支持高温高压工况下的深井作业;哈里伯顿公司开发的 Geo-Pilot 系统融合旋转导向与地质导向能力,可进行地层实时识别与钻头

控制优化;澳大利亚 AMT 公司的 DGS 系统,采用实时轨迹偏差监测和工具面角反馈技术,已成为澳大利亚煤矿定向钻进的标准配置,特别适用于复杂煤层导向。这些系统普遍集成了三轴陀螺仪、磁强计与高频数据传输模块^[6],配合先进的算法与地面数据处理平台,实现了钻井过程中轨迹控制与地层识别的协同优化,代表了当前国际随钻测量技术的发展前沿。

国内的随钻测量技术起步较晚,以石油行业为主引入了一批国外成熟产品并走上了自助研发的道路,依托国内产学研联合研发体系,在 21 世纪初具备了完全自主知识产权的随钻测量系统的生产能力,如中石油的“CGDS”近钻头地质导向钻井系统和中海油的“璇玑”旋转导向钻井与随钻测井系统^[7]。上述随钻测量设备在石油领域的广泛应用引发了煤炭领域对随钻测量技术的探索,2005 年中国煤炭科工集团西安研究院研制了 YHD1-1000(A)有线随钻测量系统,采用模块化设计,集成 $\pm 0.1^\circ$ 高精度姿态传感器和三轴振动传感器,通过通缆钻杆实现双向实时通信,配套三维轨迹分析软件,其创新产品 YSDC^[8]电磁波无线系统采用低频电磁波传

输技术,配备方位伽马探测器和电阻率仪,利用钻杆-地层回路传输数据,在碎软煤层中创下 556m 深孔纪录。该系统采用自适应滤波算法有效抑制井下电磁干扰,实现了复杂地质条件下的可靠数据传输。两套系统各具特色,共同构建了从数据采集到实时分析的完整技术链,为煤矿井下特殊工况提供了有效的技术解决方案。中国煤炭科工集团重庆研究院开发的 ZSZ 系列随钻测量系统代表了国内技术先进水平。ZSZ1000^[9]型采用创新的孔外供电技术,通过电流环实现信号与供电共线传输,系统集成高精度姿态传感器、三轴振动加速度计等模块,采用通缆钻杆传输,配备三维轨迹显示和自动纠偏软件,年节省电池成本 25 万元。升级版 ZSZ2000^[10]型实现 3 大突破:新增方位伽马探测器、采用自适应编码泥浆脉冲技术、升级智能决策平台,在保持 $\pm 0.2^\circ$ 测量精度的同时实现 20d 连续工作。两代系统通过模块化设计,构建了从数据采集到智能决策的完整技术链,为煤矿井下作业提供可靠解决方案。

2020 年以来,伴随政府与行业协会相继印发《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》《煤炭工业“十四五”安全高效煤矿建设指导意见》等政策文件,我国煤矿行业提出要在精准钻探、煤岩识别与透明地质建设等领域针对性研制智能化装备,其中,井下随钻测量技术与装备成为发展重点,井下钻探施工正从经验驱动向数据驱动转变。随钻测量技术作为实现透明地质和智能钻探的关键支撑,需要以随钻轨迹跟踪、随钻岩性识别和随钻高速通讯为核心综合发展。未来,随钻测量系统将形成集轨迹测量、岩性识别与高速通信于一体的智能决策平台,实现测量、感知与通讯闭环,推动煤矿井下钻进作业向精准钻进、数据驱动和无人化转变,成为煤矿智能化和绿色高效发展的核心技术支撑。

1 随钻轨迹跟踪技术

1.1 轨迹测量系统组成与基本原理

随钻轨迹测量系统是煤矿井下智能钻探作业中的核心支撑模块,其功能在于实时获取钻具运行过程中的三维空间位置与姿态信息,为定向钻进、

煤层气抽采及地质建模等作业提供关键数据支撑^[11]。相较于传统的分段测量方法,随钻轨迹测量系统具备连续性、实时性与闭环反馈的技术优势,已成为煤矿智能化开采与“透明地质”构建不可或缺的基础组件。

该系统通常由多类型传感器(如 MEMS 加速度计、陀螺仪、磁力计)、数据采集与控制单元、嵌入式处理模块及地面交互平台组成,构建了一个覆盖井下-地面、从信息获取到决策支持的闭环轨迹感知体系^[12]。其中,钻具内部布设的多源传感器负责实时采集姿态变化、加速度、角速度与地磁等关键物理量;处理模块采用数据融合算法进行姿态解算与轨迹推算,并通过无线或有线链路将结果实时回传地面,实现轨迹的动态更新与可视化管理^[13]。常用的轨迹描绘方法^[14-15]包括全角全距法、均角全距法、全角半距法、曲率半径法和最小曲率法。

在实际应用中,钻孔轨迹的进深推算需结合矿井地质条件和钻具特性进行修正^[16]。例如,钻杆自重和地层硬度可能导致钻孔轨迹向下偏移^[17]。此外,磁偏角和仪器安装误差也会影响方位角的测量精度,进而影响垂深计算的准确性^[18]。近年来,随着旋转地质导向等技术的应用,钻进深度推算^[19-20]进一步实现了自动化和高精度化。

1.2 测钻头姿态参数与误差补偿方法

在煤矿井下钻探作业中,钻头姿态(主要包括井斜角与方位角)的精准获取对于轨迹控制具有关键意义。然而,井下环境复杂多变,强烈的振动、冲击、温度波动与电磁干扰等因素极大地影响了姿态测量的稳定性与精度。传统测量手段中,加速度计易受到振动干扰而导致井斜角误差,磁力计则因地磁异常或设备磁化而产生方位角偏差,限制了其可靠性^[21]。如图 1 所示,姿态测量普遍采用基于微机电系统(MEMS)的惯性测量单元(IMU),通过加速度计确定重力矢量进而计算井斜角,陀螺仪用于角速度积分实现姿态更新,磁力计则为方位角提供地磁参考。其中,静态测量相对容易实现,而动态钻进过程中的实时测量则面临更大挑战,核心问题在于如何在强干扰条件下保证姿态解算的准确性。

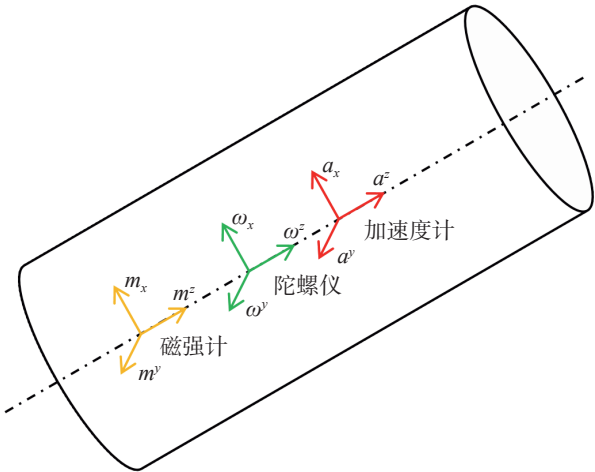


图 1 随钻测量系统传感器和坐标系

MEMS 传感器自身的性能局限(如陀螺仪的零偏稳定性差和角随机游走)与井下环境干扰的叠加,使得姿态测量误差难以避免。加速度计在高振动下无法稳定提取重力矢量,磁力计在磁异常区域几乎失效,陀螺仪则易发生误差积累^[22]。为解决这些问题,当前研究集中于通过多传感器数据融合与误差补偿策略提升系统鲁棒性与精度。融合算法如卡尔曼滤波(KF)、扩展卡尔曼滤波(EKF)、无迹卡尔曼滤波(UKF)与互补滤波(CF)等,可有效整合加速度计、陀螺仪与磁力计的数据,互补各自短板,如利用陀螺仪的短期动态响应修正加速度计与磁力计的瞬时波动,同时用后者的长期稳定性校正陀螺仪漂移^[23]。

不同的干扰源会造成不同类型的误差,为了提

升姿态解算精度,可采用多种误差补偿手段,如表 1 所示。例如,磁力计误差常通过椭球拟合进行软硬铁干扰校准;温度对传感器输出的影响则通过构建温度补偿模型(如多项式拟合)加以修正;在硬件与算法设计层面,通过机械隔振、频域滤波及运动状态识别等手段,有效提取重力加速度并抑制噪声干扰。这些技术的集成应用,为煤矿井下钻头姿态的高精度动态测量提供了坚实的技术支撑。

表 1 环境因素影响量化

干扰源	误差类型	补偿措施
振动	角速度漂移	机械隔振层
温变	零偏稳定性	多项式温补模型
电磁干扰	磁方位角偏差	椭球拟合矫正

2 随钻岩性辨识技术

2.1 伽马测孔方法及其应用进展

伽马测孔技术作为一种关键的地球物理探测手段,在矿产资源勘探、油气开发以及煤矿安全等领域发挥着日益重要的作用。近年来,随着相关研究的不断深入和技术的持续创新,伽马测孔方法及其应用取得了显著的进展煤矿井下随钻伽马测孔系统工作原理如图 2 所示。

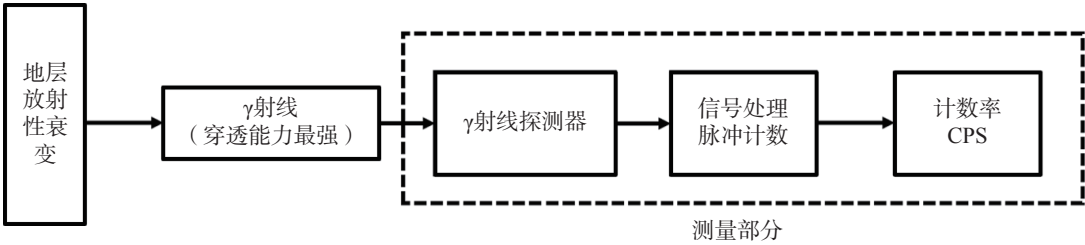


图 2 矿井下随钻伽马测孔系统工作原理示意图

近年来,随钻伽马测井技术在油气和矿产勘探开发领域的地质导向、储层识别与评价中展现出重要作用,多项研究围绕其方法优化、仪器性能提升及应用拓展取得显著进展。刘旭礼^[24]对四川盆地川南地区页岩气水平井钻井的随钻地质导向方法进行了深入研究,提出了利用随钻自然伽马测量技

术追踪高伽马页岩标志层和识别优质页岩储层低值层段特征的方法,成功应用于威远区块,显著提高了水平井的钻遇率和页岩气开发效率。王重云^[25]针对随钻方位伽马测孔仪的设计与性能验证展开了系统研究,详细阐述了井下仪器、地面系统和工具软件的设计与实现,并通过旋转试验和下井试验

验证了伽马测孔仪性能的有效性和可靠性。蒋必辞等^[26]对随钻伽马测孔系统在顺煤层钻进中的应用进行了探索,发现该系统能够有效指导钻具沿煤层钻进,提高瓦斯抽采效率。田小超等^[27]则对随钻伽马对方位角测量的影响及校正方法进行了研究,利用广义回归神经网络建立了方位角的影响校正模型,有效消除了伽马探测器对测斜传感器测量方位角的影响。于华伟等^[28]对随钻方位伽马测孔的方位灵敏特性进行了深入研究,提出了方位灵敏因子的计算方法,有效提高了方位伽马测孔的测量准确度,为提高方位伽马测孔的测量精度提供了理论支持。郑奕挺等^[29]专注于近钻头伽马成像系统的研究,分析多种因素对伽马响应速度的影响,并通过样机研制和现场试验,证明该系统能够及时准确地获取地层信息,提高油气井开发的效率。俞弼安等^[30]以鄂尔多斯盆地彭阳铀矿区为例,探索了基于自然伽马测孔数据的铀资源评价方法,建立了铀矿层识别和品位评价的经验模型,并研发了相应的计算程序,实现了对铀资源的高效评价。李飞飞等^[31]以延 113-延 133 区块为例,研究了随钻方位伽马测孔在水平井地质导向中的应用,发现其能有效判断钻头与地层的接触关系,提高储层钻遇率。孔繁龙等^[32]设计了基于单片机和无线模块的矿用伽马测孔仪,并在察哈素矿区进行了应用试验,结果表明该测孔仪能够有效识别煤岩界面变化,为煤矿智能化开采提供了技术支持。

2.2 电法测孔方法及其应用进展

电法测孔作为一种重要的地球物理探测技术,在油气勘探与开发领域发挥着关键作用。王超等^[33]通过分析岩土材料电阻率特性,利用高密度电法与瞬变电磁法对场区进行综合探测,发现采空空洞邻近区域存在电性异常过渡带,其高度与垮落断裂带高度较为一致,电阻率综合探测可以基本揭露采空区展布形态;何胜林等^[34]人研究了 GeoSphere 超深边界探测地质导向技术,该技术通过探测工具前方 20~30m 的地层电阻率变化,有效提高了水平井钻井的精度和效率。

刘结高等^[35]通过构建透明地质保障系统推动了煤矿地质条件的实时动态监测与智能分析,推动

了煤矿智能化建设的发展。这些研究共同推动了电法测孔技术的进步,拓展了其在不同地质环境下的应用潜力。朱亚林等^[36]采用声波测孔、高密度电阻率法以及超高密度电法井间 CT 等物探方法,并结合钻探等手段检测陕西某商住区下伏煤矿采空区注浆效果,结果显示注浆在含煤地层采空区聚集分布,钻孔周边区域填充量较大,注浆效果较好,向两侧逐渐减少,物探方法可以有效识别采空区注浆情况。马强^[37]在探究地球物理测孔技术在金属矿勘查中的应用时,重点分析了电法测孔技术,该技术通过利用岩层电学性质的差异来获取多个电学参数、研究地层剖面结构等,在金属矿勘查中具有显著的应用优势。

2.3 振动测孔方法及其应用进展

基于钻进振动信号的岩性识别技术是近年来地质勘探和采矿工程领域的重要研究方向。如图 3 所示,在钻进过程中,钻头与岩石相互作用会产生包含丰富岩性信息的振动信号,钻头与岩石相互作用所产生的振动信号由安装在钻柱上的振动传感器实时采集,振动响应会伴随岩性变化产生变化^[38]。

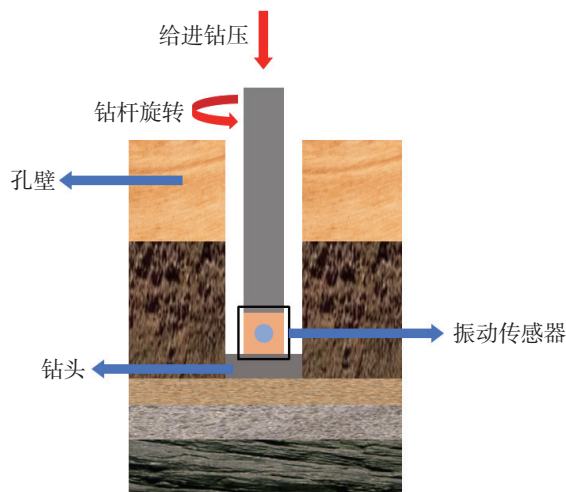


图3 井下振动信号测量装置示意图

王胜等^[39]设计微钻实验,利用三轴加速度传感器采集不同钻速和转速下 7 类岩石的随钻振动信号并利用深度学习模型完成岩性的识别;路红蕊等^[40]用小波包技术提取特征值,构建 BP 神经网络模型验证该技术可行性。刘刚等^[41]通过牙轮钻头破岩实验,采集砂岩、页岩等介质的声振信号,这些

采集的信号具有非线性、非平稳的特点^[42],为后续岩性识别提供了数据基础。武强等^[43]通过钻孔弹性波探测实验,获取煤层与岩层界面的非线性、非平稳回波信号,并利用 EWOA-VMD 算法提取有效反射分量,为煤岩界面的高精度识别提供了数据与方法基础。李占涛等^[44]对钻孔振动与声波信号进行傅里叶变换,发现不同岩性的频谱特征存在差异。

2.4 钻进参数联合识别方法

近年来,随着传感器技术和数据分析方法的进步,多参数联合分析成为提高岩性识别准确性的重要手段。在钻进参数的选择与处理方面,研究普遍采用标准化、频数分布分析和敏感性分析等方法筛选关键参数。梁栋才^[45]团队提出 3 类指标:基于能量守恒的破岩能量指标、逻辑回归概率指标和地层硬度指标,在楚大高速隧道工程中跨孔识别准确率超 80%。和郑翔^[46]等提出以钻进速度、回转扭矩、钻压及泥浆泵压力等 6 种随钻参数为基础,经 PCA 降维后输入 BP 神经网络,在相似材料模拟的“三层一体”岩样钻进试验中实现软弱层-泥岩-砂岩界面智能识别,模型识别准确率达 91.7%,识别精度与收敛速度均优于传统方法。王杰^[47]采用支持向量机(SVM)分类算法,通过线性核函数对煤岩界面进行分类,在测试集中达到了 100% 的准确率,验证了特征参数与地层信息之间的线性可分性,证明了煤岩参数线性可分性。

印度卡纳塔克国立技术研究院研发钻进参数监测装置^[48],通过分析随钻声级与岩样单轴抗压强度、抗拉强度、孔隙度的关联性,结合钻头直径、转速、钻进速度及等效声压级,构建并验证了多元回归煤岩识别模型。YASAR 等^[49]利用钻井实验装置证实,岩石、水泥材料特性与钻进速度、比能、扭矩、钻压存在显著相关性,提出可通过随钻参数辨识岩体无侧限抗压强度(UCS)。ZHANG 等^[50]监测顶板锚杆钻机的钻速、钻压、扭矩及三向振动加速度,发现不同岩样导致钻进参数差异显著。斯洛伐克科学院岩土研究所^[51]借助水平钻机监测系统,分析振动加速度、声压、扭矩等参数对岩石分类的可行性,明确振动加速度可用于岩石类型辨识。

在非声压和振动参数的探索中,文献[52]发现岩体结构变化时,钻速对界面响应最敏感,钻压次之,转速无明显变化,多参数综合分析可准确识别岩层界面。CHUAN 等^[53]通过小型岩芯钻探平台模拟砂岩、花岗岩等钻进过程,证实转矩、轴向推力与 UCS 呈正相关,钻速与 UCS 呈负相关。张幼振等^[54]利用微钻试验台获取钻速、钻压等参数样本,通过 KFCM 算法聚类处理,有效识别了含煤地层的岩性。杨程涛^[55]的系统实时监测扭矩和钻速变化,结合比功阈值动态调整,避免了抽采空白带。王亚飞等^[56]则针对金川科学钻探项目,采用 Savitzky-Golay 滤波器降噪后,融合支持向量机(SVM)、人工神经网络(ANN)和随机森林(RF)模型,通过贝叶斯平均算法加权,最终模型准确率达 96.86%,显著优于单一算法。

3 随钻杆内通讯技术

3.1 声波随钻通讯技术

声波传输方式(见图 4)根据声波传输原理,利用声波或地震波作为介质进行信号传输。其一种方式是:随着钻柱、钻头与井底的相互作用,在钻柱内产生一系列纵向弹性波,通过钻杆将其传输到地面,根据其中与岩石破碎工具的回转频率相关的牙轮振动谐波,判断工具状态和岩石力学性质。另一种方式是:利用钻柱机械振动波作为载体,实现井下测量数据的实时上传^[57]。其核心原理是通过安装在近钻头处的声波发射器,将编码后的测量数据如井斜角、地层电阻率、温度压力等调制为特定频率的应力波,通常为 0.1 ~ 2 kHz 低频段,利用钻杆的周期性结构形成导波传播通道,声波沿钻柱以纵波形式以约 5 000 m/s 速度传递至地面,地面传感器通过解调振动信号频谱特征还原数据。

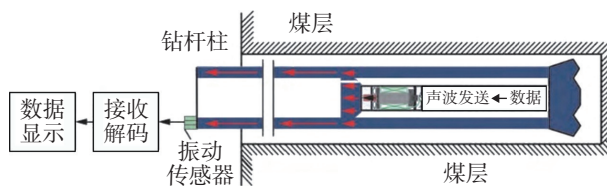


图 4 声波传输示意图

国内学者利用拉伸波在钻铤中传播时频率响

应存在固有阻带的现象,提出了一种变径隔声方法,通过拓宽阻带带宽来隔声^[58]。此外,张博等^[59]还提出了一种基于双源反激技术的随钻声波测孔隔声新方法,不需要对钻铤刻槽和变径,通过控制钻铤上两个发射器的激励相位、延迟和幅度,就可以叠加抵消接收器位置的钻铤波。马晓^[60]提出了一种利用气体钻井钻柱内声波传输井下测量数据的方法,揭示了声波在气体钻井钻柱内的传播特性,确定了影响声波传输的关键因素,并研制出适合气体钻井工况的声波信号发生器及处理方法,为气体钻井随钻测量技术的发展提供了理论依据和技术支持;高珺^[61]团队建立了钻杆柱中声波传输数学模型以及稀土超磁致伸缩换能器输出特性数学模型,并研制出了声波信号发送装置,针对接收信号波形识别问题,提出了基于 SVM 多维特征向量提取的波形识别方法,实现了复杂工况下声波信号的智能识别。

国外哈里伯顿公司研发的 XBAT 测孔仪器,工作频率为 3~15 kHz,可选择多种工作模式,其在随钻测量过程中使用交叉偶极模式,显著提高了随钻声波方位成像的分辨率;威德福公司的 CrossWave 仪器采用偏心单极子声源,随着钻铤旋转可获得方位成像信息。挪威科技大学通过时反镜技术将多径干扰降低了 30%^[62]。

3.2 电磁波随钻通讯技术

电磁波随钻通讯技术(见图 5)是一种利用电磁波信号在井下与地面之间进行数据传输的技术。井下发射机安装在无磁钻铤内,其内部的传感器测量井下参数(如温度、压力、钻具姿态角、储集层物性、自然伽马等),通过载波模块将测量结果加载到一定频率的电磁波上,从而生成载波信号,利用耦合变压器将生成的电磁波载波信号耦合到钻杆上。耦合变压器的作用是将高频信号高效地传输到钻杆,同时避免信号在耦合过程中因阻抗不匹配而损失。信号传输时,钻杆和大地构成一个导波系统,电磁波信号沿着这个系统传输到地面。钻杆的导电性能较好,能够有效地引导电磁波信号,减少信号在传输过程中的辐射损耗,从而提高数据传输的效率和可靠性。井上接收机接收到从井下传来的

电磁波信号后,通过滤波、解调等处理,将信号还原为原始的测量数据。井上接收机的接收天线通常安装在地面或井口附近。电磁波在地层中的传播受到地层电磁参数(如电导率、磁导率和介电常数)的影响。这些参数决定了电磁波的传播系数,从而影响信号的衰减和传输深度。

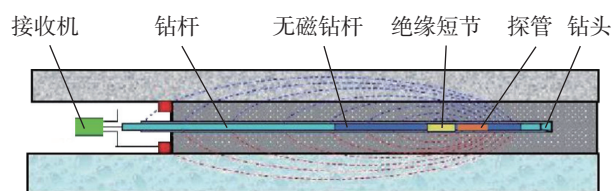


图 5 电磁波随钻传输技术示意图

国外油服企业和技术公司均已推出成熟的电磁波随钻测量仪器。斯伦贝谢的 E-Pulse XR 电磁波随钻测量仪器耐温 150℃、耐压 137 MPa,测量信号的最大传输速率 12 b/s;哈里伯顿的 EMT-MWD 耐温 150℃、耐压 125 MPa,测量信号的最大传输速率 10 b/s,适用深度 2 000~3 000 m;国民油井华高公司的 BlackStar 电磁波随钻测量仪耐温 150℃、耐压 137 MPa,能够测量井斜角、方位角、工具面角、磁倾角等定向数据,测量信号的最大传输速率 6 b/s;俄罗斯 VNIIGIS 公司的 ZTS-MWD 电磁波随钻测量仪^[63]耐温 120℃、耐压 60 MPa,能够测量井斜角、方位角、工具面角、钻头载荷、近钻头伽马和振动等参数,测量信号的最大传输速率 6 b/s。

国内学者王小波^[64]针对钻进现场电磁波精度问题设计了自校准方法和流程要求,并提出了查表补偿法和拟合函数法两种校准方式;BO 等^[65]进行了地面传输实验和井下传输测试,采用多级滤波方法抑制了自然电位和强频干扰,从接收信号中提取了弱电磁通信信号;吴柏志^[66]团队研究分析了超深随钻方位电磁波和随钻方位电磁波测孔系统的探测特性,并与小尺度随钻方位电磁波测孔联合使用,采用拟牛顿法进行多尺度测孔资料的精确快速反演,实现不了同范围内的地质预测、导向和油藏描述;岳喜洲^[67]团队研发的 Directional Wave Propagation Resistivity(DWPR)仪器,基于赫兹势函数法求解水平层状各向异性介质中的电磁场,可提供准确的实时地质导向信息;李星瀚^[68]团队基于传播矩阵算法和 Levenberg-Marquardt 算法开展了一维快速反演

研究,将随钻方位电磁波电阻率测孔数据转换为可视化的地层参数信息。

3.3 泥浆脉冲随钻通讯技术

泥浆脉冲无线传输技术(见图 6)也叫钻井液脉冲技术,包括正脉冲、负脉冲和连续脉冲,是随钻测量技术中提出最早、发展最成熟、应用最广泛的无线传输方式。其原理是仪器将测量出的数据按照特定规则编码成脉冲序列,脉冲发生器通过控制阀门的开关影响钻井液的流速,产生压力变化,形成压力脉冲并通过泥浆传递到地面,被地面压力传感器检测到,最终通过软件将脉冲信号解码还原井下测量信息。60 年代初,美国贝克休斯公司根据自主研发的随钻测量钻井液压力脉冲系统,制定了随钻测量的可靠性与性能标准。该系统很快应用到工业上,标志着泥浆脉冲技术在石油钻井领域的正式应用。1971 年,美国美孚石油公司研制了一种导向工具与井下马达相匹配的定向测量系统,这一系统的出现进一步推动了泥浆脉冲技术的发展。1978 年,TELECO 研制出了第一个商业化的随钻测量系统,这标志着泥浆脉冲技术正式进入成熟和商业化应用阶段。此后,该技术得到广泛应用并不断发展,主要产品如斯伦贝谢的 Slimpulse 随钻测量仪器、哈里伯顿的 Solar175 系列随钻测量仪器、威德福的 HeatWave 系列随钻测量仪器和贝克休斯的 NaviTrak 系列随钻测量仪器等,代表了该技术的现代应用水平。

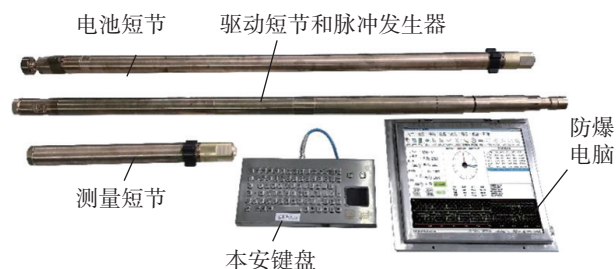


图 6 泥浆脉冲钻具组成

国内中石油勘探开发研究院、大港油田、中海油服、海蓝公司和普利门公司等均成功开发了泥浆脉冲随钻测量系统,目前已完全实现国产化。郑宏远等^[69]基于非定常流理论和 CFD 仿真技术给出了泥浆脉冲信号传输速率和传输能力计算方法;李红

涛等^[70]分析了信号传输衰减规律和影响因素,并开发了相关滤波去噪方法,相关基础理论研究和仪器开发逐渐成熟,并在地面油气钻探领域应用广泛;中煤科工集团西安研究院李泉新团队^[71]研制了基于泥浆脉冲的矿用无线随钻测量装置 YHD3-1500,并在山西晋城寺河和成庄煤矿进行了试验;针对煤矿井下定向钻进小泵量、低压力工况,该团队研制的矿用泥浆脉冲无线随钻测量装置最大信号传输深度达 2 570 m,已达到行业先进水平^[72]。

3.4 通缆随钻通讯技术

有线随钻测量系统(图 7)通过特制的中心通缆式钻杆作为信号传输通道,将孔底测量数据实时传输到孔口。具体原理是将测量探管安装在无磁钻杆内,中心通缆钻杆从孔底连接至孔口并与孔口设备相连,形成类似同轴电缆的信号传输回路,钻杆中心的信号传输装置作为信号线,钻杆体作为信号地。这种传输方式具有传输速度快、可双向传输的优点,应用广泛,典型的如基于防爆计算机的矿用系统。该系统由孔口防爆计算机供电,孔内仪器结构简单,工作时间不受限,信号传输强度高^[73]。2003 年,山西亚美大宁矿引进了澳大利亚 VLD-1000 型千米定向钻机及随钻测量系统,显著提高了钻孔效率和瓦斯抽放率。此后,西安研究院和重庆研究院分别研制了 YHD1-1000(A) 和 ZSZ1000 随钻测量系统,后者采用孔外供电技术,提高了信号稳定性和测量精度,降低了使用成本。张先韬等进一步研发了 ZSZ1500 系统^[74],将测量精度提高近 1 倍,为有线随钻测量技术的推广应用奠定了基础。

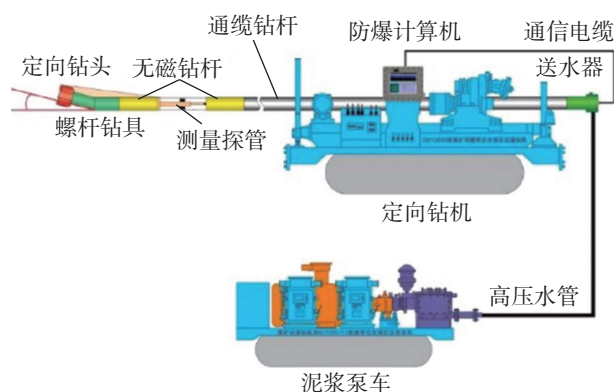


图 7 有缆定向钻具示意图

3.5 磁耦合随钻通讯技术

磁耦合有缆钻杆^[75-76]应用磁耦合原理完成有缆钻杆间的无线通信,在不改变接单根等常规钻井工艺的条件下实现地面、井下数据的双向、高速、全天候传输。如图8所示,磁耦合随钻数据传输系统利用钻杆接头处的耦合线圈来实现信号的非接触式传输,数据沿着钻杆内的信号线经过耦合器沿钻杆逐级进行传输,也称为磁感应传输系统,线圈电磁耦合技术大大提高了数据传输的实时性和准确性,成为实现智能钻井高效传输数据的重要技术方案。

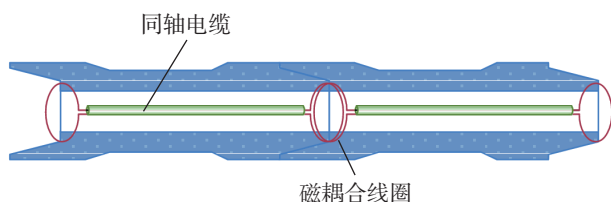


图8 磁耦合随钻传输系统示意图

挪威的eDrilling公司推出的智能化平台也具有自动化钻井控制、钻井设计与优化、虚拟钻井、自动监测与实时优化、动态井控和实时控压钻井等核心功能^[77]。美国国民油井华高(NOV)旗下的Intelli Serv公司开发的智能钻杆(Intelli Pipe)是全球首个商业化应用的磁耦合有缆钻杆系统^[78],该系统中智能钻杆作为主干,可以实现地面井下数据采集器与井下工具间的高速双向实时通讯。数据汇集至远程实时作业中心RTOC进行处理分析,驱动钻井单元闭环调控进行钻机快速多目标跟踪分析,并通过智能可钻指示仪生成优化建议,进而通过钻机控制系统自动或手动调整顶驱转速、绞车钻压和泥浆泵排量,实现自动推送钻机操作。高速数据传输、实时分析处理和闭环控制,实现了钻井参数的动态优化与自动化操作,并显著提升了钻井效率和安全性。

孙成芹^[79]通过建立高频结构仿真(HFSS)仿真模型及实验室实物模型测试,设计出一种感应磁耦合传输线圈结构,解决了井下复杂钻具感应耦合传输问题。中国石油集团工程技术研究院自主研发了127mm全系统、全功能磁耦合有缆钻杆系统。胡永建^[80]通过电磁结构仿真与线性仿真的联合仿

真技术,优化了高频磁耦合有缆钻杆信道的阻抗匹配和设计^[81],使得无中继传输距离达到300m以上,减少了中继器的使用,并对信号载波频率、不同有缆钻具间的阻抗匹配以及降低信道衰减等作了仿真分析^[82]。

4 总结与展望

随着煤矿智能化建设步伐的加快,井下钻探施工正逐步由经验驱动转向数据驱动,从手工操作过渡到智能感知、精准控制的现代钻进模式。在此背景下,随钻测量技术作为实现“透明地质”和“智能钻探”的核心支撑,其技术体系已初步具备实时感知、智能解算与三维可视化能力,在煤层气抽采、瓦斯治理、地质构造探查等多类钻孔作业中展现出广泛的应用前景。目前,随钻测量系统已从早期的电缆式倾角测量发展为集惯性导航、传感器融合、误差补偿、三维轨迹重构于一体的综合性技术平台,能够在煤矿井下高振动、高电磁干扰、有限空间的极端工况中实现较高精度的轨迹跟踪与参数感知。随着传感器性能提升、数据融合算法优化、计算平台逐步嵌入化,该技术的实时性、精度和稳定性持续增强,为煤矿智能钻探注入了坚实的技术基础。面向未来,随钻测量技术将从“功能完备”迈向“智能协同”,其发展重点可围绕轨迹精准跟踪、岩性精准辨识与信号高速传输三大关键方向展开,最终实现体系化智能随钻测量系统的构建。

4.1 轨迹精准跟踪能力持续提升

钻孔轨迹的精确获取是井下定向钻进的基础,关系到煤层穿透效果、地质目标命中率与施工安全性。未来轨迹测量系统将从单一传感器测量向多源信息融合、状态感知驱动与地质模型反馈校正方向演进。在传感器层面,将融合高精度MEMS IMU、磁力计、高温加速度计与应力波传感器等多类器件,提升轨迹感知的稳定性和环境适应性;在算法层面,需引入时间序列建模(如LSTM)、自适应滤波(如UKF+状态识别)、误差闭环修正机制等技术手段,构建针对动态钻进状态的多场景姿态解算框架。此外,结合实时钻速、钻压、扭矩等工况数据及煤层顶底板三维模型,可通过“预测-反馈-修正”的闭环

控制模式,持续优化轨迹解算结果。通过上述手段,轨迹测量将从“几何建模”走向“场景认知”,从“后验修正”迈向“前馈预测”,实现毫米级轨迹跟踪精度,为煤矿井下精准作业提供坚实保障。

4.2 岩性精准辨识迈向智能感知

当前岩性识别仍主要依赖地质人员后处理分析或基于震动特征的经验分类,存在主观性强、实时性差的问题。未来的随钻测量系统应具备实时岩性智能感知能力,通过多维信号采集与模式识别算法,实现钻进过程中的岩性动态识别与分界检测。从传感器维度看,可融合三轴振动信号、加速度变化率、钻具回转阻力、瞬时能量密度等多种岩性敏感特征;在算法层面,将逐步引入小波包分解(WPD)、经验模态分解(EMD)、GAF 编码、图神经网络(GNN)等先进数据处理与表征手段,构建深度学习驱动的岩性判别模型。此外,结合钻头姿态信息与井下地质结构建模,可实现岩性边界层识别与断层预警。通过将钻进过程中的动态响应与历史地质数据进行融合匹配,未来系统可实现岩性“标签化”建模与预测性决策支持,从而引导钻头避障绕层,提高煤层穿透率和施工效率。

4.3 井下多模式融合通信体系构建

随钻测量通讯技术是实现煤矿井下智能钻探中信息实时感知、动态决策与闭环控制的核心支撑,其发展正由单一传输机制向多模式融合、网络化协同演进。面对高温高压、强干扰、空间受限等极端井下环境,传统通信技术在带宽、稳定性与适应性方面普遍存在瓶颈。构建具备高可靠性、强环境适应性与低时延特征的通信体系,已成为智能钻进系统演化的关键方向。多模式通信机制(如声波、电磁波、泥浆脉冲、磁耦合、有线通缆等)需实现基于工况感知的智能调度与链路切换,构建冗余异构的稳健杆内通信网络;融合边缘计算的通信-计算-体化架构正成为新趋势,井下节点承担数据压缩、筛选与初判任务,可有效降低回传负载与响应延迟。此外,通信链路的智能容错机制、耐极端环境的高可靠器件,以及统一开放的通信接口标准体系亦是未来发展的关键支撑。

综上,随钻通信系统不应仅聚焦于传输性能指标的提升,更应向智能、自适应、多通道协同的系统范式转变,以全面支撑煤矿智能钻探的高效、安全与精细化发展。

4.4 体系化、智能化的随钻测量

综上所述,随钻测量技术正处于由单一模块向系统集成、由静态测量向智能感知、由孤立采集向闭环决策的深度转型阶段。未来的随钻测量系统是将不再是传统意义上的“数据获取工具”,而将进化为集轨迹精准测量、岩性智能识别、通信高速互联、数据智能闭环于一体的“智能决策中枢”。实现这一转变,需要从体系结构、感知机制、数据处理及应用场景等多维度统筹推进。一方面,应推动多传感器一体化集成设计,打破系统间的信息壁垒,构建真正意义上的“多源共感”平台;另一方面,需强化数据处理链条的智能性与自适应能力,通过深度学习、状态识别与模型推理,实现钻进参数、地质状态与控制策略的动态优化;同时,在通信层面构建覆盖全井下作业空间的低延迟、高鲁棒性链路网络,保障随钻系统的数据传输与远程协同能力。最终,随钻测量系统的发展将不再是若干功能模块的简单叠加,而应形成一个“感知-认知-控制”闭环驱动、具有场景自适应能力的体系化智能测量平台。该平台将支撑煤矿井下钻进作业实现从“粗放控制”到“精准导向”、从“经验作业”到“数据决策”、从“人工巡检”到“无人自治”的根本跃迁,成为煤矿智能化、绿色化、高效化发展的重要引擎。

参考文献:

- [1] 康红普,王国法,王双明,等.煤炭行业高质量发展研究[J].中国工程科学,2021,23(5):130-138.
- [2] 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.
- [3] 石智军,姚克,姚宁平,等.我国煤矿井下坑道钻探技术装备 40 年发展与展望[J].煤炭科学技术,2020,48(4):1-34.
- [4] PRENSKY S. Recent advances in LWD/MWD and formation evaluation[J]. World Oil, 2006, 227(3): 69.
- [5] ELDERT V J, SCHUNNESSON H, SAIANG D, et al. Improved filtering and normalizing of Measurement-

- While-Drilling (MWD) data in tunnel excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2020, 103: 756–763.
- [6] 曹阳, 张文康, 赵伟, 等. 瓦斯抽采钻孔轨迹检测技术及应用[J]. 中国矿业, 2023, 32(12): 184–191.
- [7] 苏义脑. 地质导向钻井技术概况及其在我国的研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2005(1): 92–95.
- [8] 汪凯斌. YSDC 矿用电磁波随钻测量系统及在煤矿井下空气钻进中的应用[J]. 煤矿安全, 2019, 50(7): 153–156.
- [9] 王清峰, 黄麟森. 基于外部供电的矿用随钻测量装置研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(3): 12–15.
- [10] 陈泽平, 闫保永, 王国震, 等. 煤矿井下随钻测量技术研究现状及展望[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(6): 130–134.
- [11] 江泽宇, 谢洪波, 文广超, 等. 煤矿井下电磁波无线随钻轨迹测量系统设计与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(3): 156–161.
- [12] 杨金显, 陈超, 李志鹏. 随钻测量用 MIMU 信号处理[J]. 测井技术, 2015, 39(6): 751–755.
- [13] 蔡峰, 朱美静. 基于 EKF 和 UKF 的随钻姿态解算方法研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2024, 44(1): 12–20.
- [14] 刘少兴, 吴川, 王虎. 基于捷联惯导的随钻测量轨迹解算算法的对比研究[J]. 地质装备, 2023, 24(5): 8–13.
- [15] 高杰, 秦松, 张佳乐, 等. 非定向近水平钻孔轨迹参数的解算及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(2): 341–351.
- [16] 石智军, 许超, 李泉新. 煤矿井下近水平随钻测量定向钻孔轨迹设计与计算方法[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(4): 112–116.
- [17] 李好, 胡运兵, 吴燕清, 等. 井下钻孔深度高精度测量技术研究[J]. 工程勘察, 2015, 43(12): 80–86.
- [18] 辛珂. 井上下行钻孔深度高精度测量分析[J]. 能源与节能, 2020, 41(12): 47–48.
- [19] 刁斌斌, 高德利, 刘喆, 等. 井深随钻测量误差校正与井眼位置不确定性计算方法[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2): 181–186.
- [20] 蔡振. 基于钻具姿态控制的地质定向钻进轨迹跟踪控制方法[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.
- [21] 陈三, 富立, 王医民. 基于 DSP6000 数字 IMU 信号处理板设计[J]. 测控技术, 2007, 62(8): 25–27.
- [22] 杨金显, 桂书琦, 贺紫薇, 等. 基于 MIBWO 的随钻磁力计误差参数识别[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(1): 21–28.
- [23] 杨永友, 底青云, 谢棋军, 等. 基于 MEMS 陀螺的高温随钻定向测斜仪研究[J]. 地球物理学报, 2024, 67(4): 1 669–1 677.
- [24] 刘旭礼. 页岩气水平井钻井的随钻地质导向方法[J]. 天然气工业, 2016, 36(5): 69–73.
- [25] 王重云. 随钻方位伽马测井仪的设计与性能验证[J]. 录井工程, 2021, 32(4): 94–98.
- [26] 蒋必辞, 田小超, 张鹏, 等. 随钻伽马对方位角测量的影响及校正方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 175–181.
- [27] 田小超, 蒋必辞, 汲方林, 等. 随钻伽马测井系统在顺煤层钻进中的应用[J]. 煤矿安全, 2020, 51(2): 135–138.
- [28] 于华伟, 王文定, 张丽, 等. 随钻方位伽马测井方位灵敏特性研究[J]. 核技术, 2021, 44(1): 45–50.
- [29] 郑奕挺, 宋红喜. 近钻头伽马响应特征及实验分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(10): 3 932–3 940.
- [30] 俞初安, 孙大鹏, 周小希, 等. 基于自然伽马测井数据的铀资源评价方法研究—以鄂尔多斯盆地彭阳铀矿区为例[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(5): 144–152.
- [31] 李飞飞, 冯利军, 薛杰, 等. 随钻方位伽马测井在水平井地质导向中的应用[J]. 石油地质与工程, 2024, 38(6): 92–101.
- [32] 孔繁龙, 李博凡, 肖磊, 等. 矿用伽马测井仪在察哈素矿区应用研究[J]. 煤矿机械, 2025, 46(1): 150–153.
- [33] 王超, 徐杨青, 高晓耕. 岩石电阻率特性及在煤矿采空区探查中的应用[J]. 煤炭工程, 2020, 52(11): 64.
- [34] 何胜林, 李明, 王光等. GeoSphere 地质导向工具在深水气田水平井钻井中的应用[J]. 天然气工业, 2021, 41(4): 91–96.
- [35] 刘结高, 程建远, 疏义国, 等. 唐家会煤矿透明地质保障系统构建及示范[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(1): 1–9.
- [36] 朱亚林, 张鑫, 侯淑鹏, 等. 陕北某煤矿采空区注浆效果检测[J]. 勘察科学技术, 2023, 41(3): 49–56.
- [37] 马强. 地球物理测井在金属矿勘查中的应用探究[J]. 探测, 2025, 26(1): 145–147.
- [38] WANG C, XUE Q L, HE Y M, et al. Lithological identification based on high-frequency vibration signal analysis[J]. Measurement, 2023, 221(5): 226–233.
- [39] 王胜, 赖昆, 张拯, 等. 基于随钻振动信号与深度学习的岩性智能预测方法[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(9): 51–63.

- [40] 路红蕊, 童敏明, 刘栋. 基于钻头振动特性的采煤机煤岩识别研究 [J]. 煤炭技术, 2018, 37(3): 242–245.
- [41] 刘刚, 张家林, 刘闯, 等. 钻头钻进不同介质时的振动信号特征识别研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(8): 71–78.
- [42] 刘瑞文, 陈蓓蓓, 李春山. 岩性实时识别方法研究 [J]. 钻采工艺, 2012, 35(4): 16–18.
- [43] 武强, 王显辉, 曾一凡, 等. 基于 EWOA-VMD 的钻孔弹性波处理与煤岩识别方法 [J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(5): 857–871.
- [44] 李占涛, 林小国, 宋春霞. 岩石钻孔振动与声波频谱特性实验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(4): 1 008–1 016.
- [45] 梁栋才, 汤华, 吴振君, 等. 基于多钻进参数和概率分类方法的地层识别研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1 123–1 134.
- [46] 和郑翔, 卢才武, 居培, 等. 基于 PCA-BP 神经网络的随钻参数岩性智能感知方法研究 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(7): 155–159.
- [47] 王杰. 基于钻进参数的煤岩界面识别系统研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(9): 72–80.
- [48] KUMAR R B, VARDHAN H, GOVINDARAJ M. Prediction of uniaxial compressive strength, tensile strength and porosity of sedimentary rocks using sound level produced during rotary drilling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2011, 44(5): 613–620.
- [49] YAŞAR E, RANJITH PG, VIETE DR. An experimental investigation into the drilling and physico-mechanical properties of a rock-like brittle material[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 76(3-4): 185–193.
- [50] ZHANG W L, REN J J, ZHU F, et al. Analysis and selection of measurement indexes of MWD in rock lithology identification[J]. Measurement, 2023, 208(5): 112455.
- [51] PATRIK F, JÁN K, MILAN D, et al. Evaluation of the acceleration vibration signal for aggregates of the horizontal drilling stand[J]. Applied Sciences, 2022, 12(8): 3 984–3 984.
- [52] ZHONGWEN YUE, XIAOLEI YUE, XU WANG, et al. Experimental study on identification of layered rock mass interface along the borehole while drilling[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(9): 425–433.
- [53] CHUAN L D, ZHAO X L, WENTAO X, et al. Integrated monitoring of lithology parameters while drilling in small-scale coring platform[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(11): 7 269–7 288.
- [54] 张幼振, 张宁, 邵俊杰, 等. 基于钻进参数聚类的含煤地层岩性模糊识别 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2 328–2 335.
- [55] 杨程涛, 刘伟, 武腾飞, 等. 基于钻进参数的钻孔煤岩界面识别系统开发及应用 [J]. 煤炭技术, 2023, 42(12): 182–185.
- [56] 王亚飞, 张占荣, 刘华吉, 等. 基于模型融合的钻进参数识别岩石类型研究 [J]. 钻探工程, 2023, 50(2): 17–25.
- [57] 刘海军. 随钻测量数据传输方式的现状和发展趋势 [J]. 西部探矿工程, 2014, 26(4): 67–71.
- [58] 苏远大. 随钻声波测井: 理论、方法与实验验证 [C]//中国地球物理学会, 中国地震学会, 全国岩石学与地球动力学研讨会组委会, 中国地质学会构造地质学与地球动力学专业委员会, 中国地质学会区域地质与成矿专业委员会. 2020 年中国地球科学联合学术年会论文集(三十一)—专题九十二: 地震面波、背景噪声及尾波干涉法研究地下介质结构及其变化; 中国地球物理学会傅承义青年科技奖. 青岛: 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 2020: 77–80.
- [59] 张博, 唐晓明, 苏远大, 等. 一种利用双源反激的随钻声波测井方法 [J]. 地球物理学报, 2016, 59(3): 1 151–1 160.
- [60] 马骁. 气体钻井声波波导信号传输技术基础研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- [61] 高珺, 李泉新, 陈龙, 等. 煤矿井下随钻测量数据声波传输系统 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2 507–2 512.
- [62] 朱祖扬. 随钻单极子声波测井模式优化及远探测 [J]. 应用声学, 2022, 41(2): 310–317.
- [63] 王延文, 叶海超. 随钻测控技术现状及发展趋势 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(1): 122–129.
- [64] 王小波. 无线电磁波随钻测量系统姿态精度的影响因素分析 [J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(6): 258–264.
- [65] BO Z, SHENG X, JIANGSHENG C, et al. Key technologies and applications of gas drainage in underground coal mine[J]. IOP conference series Earth and environmental science, 2018, 113: 012151.
- [66] 吴柏志, 杨震, 郭同政, 等. 多尺度随钻方位电磁波测井系统响应特征研究 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(6): 7–13.
- [67] 岳喜洲, 刘天淋, 李国玉, 等. 随钻方位电磁波测井响应快速正演方法与地质导向应用 [J]. 地球物理学报,

- 2022, 65(5): 1 909–1 920.
- [68] 李星翰, 张文秀, 陈鹏, 等. 随钻方位电磁波电阻率测井数据精度分析及实时反演成像 [J]. *地球物理学报*, 2023, 66(9): 3 990–3 998.
- [69] 郑宏远, 白锐, 律水静, 等. 基于 CFD 仿真技术的钻井液传输数据能力分析 [J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(11): 2 716–2 722.
- [70] 李红涛, 李皋, 孟英峰, 等. 充气钻井随钻测量脉冲信号衰减规律 [J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(2): 233–237.
- [71] 李泉新. 矿用泥浆脉冲无线随钻测量装置研发及应用 [J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(6): 193–197.
- [72] 李泉新, 褚志伟. 矿用泥浆脉冲无线随钻测量信号发生装置设计 [J]. *工矿自动化*, 2019, 48(8): 32–37.
- [73] 石智军, 姚克, 田宏亮, 等. 煤矿井下随钻测量定向钻进技术与装备现状及展望 [J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(5): 22–28.
- [74] 张先韬, 黄麟森. 采用加速度计和磁强计的水平测斜仪校准方法 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2014, 28(3): 103–109.
- [75] 孙浩玉. 智能钻杆磁感应传输技术及其信道特性分析 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(6): 172–176.
- [76] ZHANG X L, LI F, YUAN L, et al. Research on electromagnetic induction signal transmission technology of drilling coal sample collection system[C]//Proceedings of the 2016 International Conference on Advanced Materials Science and Environmental Engineering. Amsterdam, Netherlands: Atlantis Press, 2016: 203–207.
- [77] 张鑫鑫, 梁博文, 张晓龙, 等. 智能钻井装备与技术研究进展 [J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(9): 20–30.
- [78] 崔奕, 汪海阁, 丁燕, 等. 碳中和愿景下油气钻井的数字化、智能化转型之路 [J]. *石油钻采工艺*, 2022, 44(6): 769–776.
- [79] 孙成芹, 胡永建, 李显义, 等. 基于 HFSS 仿真的感应耦合传输装置设计 [J]. *电子测量技术*, 2021, 44(2): 32–35.
- [80] 胡永建, 黄衍福, 刘岩生. 高频磁耦合有缆钻杆信道的联合仿真设计 [J]. *石油学报*, 2019, 40(4): 475–481.
- [81] 胡永建, 黄衍福, 石林. 高频磁耦合有缆钻杆信道建模与仿真分析 [J]. *石油学报*, 2018, 39(11): 1 292–1 298.
- [82] 胡永建, 王岚. 基于线性仿真的高频磁耦合有缆钻杆信道建模 [J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(2): 120–126.
- (责任编辑: 丁 寒)