



张平松, 李圣林, 时元玲. 2026. 地面浅层智能型钻探物探一体化技术与装备分析. 地球物理学进展, 41 (1): 0453-0467, doi: 10. 6038/ pg2026I10567.

ZHANG PingSong, LI ShengLin, SHI YuanLing. 2026. Analysis of intelligent drilling and geophysical exploration integration technology and equipment for shallow surface. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41 (1): 0453-0467, doi: 10. 6038/ pg2026I10567.

地面浅层智能型钻探物探一体化技术与装备分析

Analysis of intelligent drilling and geophysical exploration integration technology and equipment for shallow surface

张平松^{1,2,3}, 李圣林^{2,3*}, 时元玲^{1,3}

ZHANG PingSong^{1,2,3}, LI ShengLin^{2,3*}, SHI YuanLing^{1,3}

1. 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 淮南 232001

2. 煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室, 淮南 232001

3. 安徽理工大学地球与环境学院, 淮南 232001

1. *State Key Laboratory for Safe Mining of Deep Coal and Environment Protection, Huainan 232001, China*

2. *State Key Laboratory of Digital Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Huainan 232001, China*

3. *School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China*

摘要 浅层地质勘探中钻探和物探是两种不同的技术手段, 其在地质地球物理数据获取中发挥着不同作用. 随着现代科学技术不断发展, 绿色智能精准勘探是方向, 将钻探和物探技术进行一体化融合可实现一次成孔即可获取岩土层结构及物理性质等多种信息参数, 能够为构建透明地质模型及地下空间信息精细判识提供基础. 文章结合钻探物探一体化技术与装备研发现状, 构思浅层智能型钻探物探一体化技术与装备未来发展趋势. 认为当前正是传统勘探向绿色智能化勘探转型的重要时期, 结合人工智能、大数据、智能传输等技术一体化推进, 改进传统钻探工艺, 可有效发挥钻探物探共融技术优势, 提升对浅层地质条件的自动智能探查水平, 为地质灾害防控、复杂条件工程勘探及施工提供新技术支撑, 其技术研发及工程实践意义重大. 此外文章结合随钻探测方法、技术、装备及工程实践所提出的思考和认识可为未来精细智能地质勘探发展提供参考.

关键词 钻探物探一体化; 绿色智能勘探; 地质地球物理参数; 浅层地质条件

Abstract In shallow geological exploration, drilling and geophysical prospecting are two distinct technical methods that play different roles in the acquisition of geological and geophysical data. With the continuous advancement of modern science and technology, the direction is towards green, intelligent, and precise exploration. Integrating drilling and geophysical prospecting technologies can achieve the acquisition of multiple information parameters, such as the structure and physical properties of rock and soil layers, in a single borehole. This integration provides a foundation for the construction of transparent geological models and the precise identification of underground space information. This paper combines the current state of research and development on integrated drilling and geophysical prospecting technologies and equipment to analyze future development trends of intelligent integrated drilling and geophysical prospecting technologies and equipment for shallow layers. It posits that the current period is crucial for the transition from traditional exploration to green and intelligent exploration. By integrating artificial intelligence, big data, and intelligent transmission technologies, and improving traditional drilling processes, the advantages of combined drilling and geophysical prospecting technologies can be effectively leveraged. This can enhance the level of automated and intelligent exploration of shallow geological conditions, providing new technical support for geological disaster prevention, complex condition engineering exploration, and construction. The technical research and engineering practice significance are substantial. Additionally, the

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10. 6038/pg2026H0567

CSTR:32085.14.pg2026H0567

paper offers insights and understandings based on drilling-while-prospecting methods, technologies, equipment, and engineering practices to provide a reference for the future development of precise and intelligent geological exploration.

Keywords Integrated drilling and geophysical exploration; Green intelligent exploration; Geological and geophysical parameters; Shallow geological conditions

0 引言

浅层地质勘探是认识地下地质结构、寻找矿产资源、评价地质灾害风险的一项十分重要的工作. 伴随交通强国、国家水网、“一带一路”倡议等国家战略持续推进,我国重大基础设施发展仍将处于“黄金时期”(李术才等,2023).《“十四五”现代能源体系规划》明确强调要坚持常规与非常规资源并重的发展策略,加强关键区域基础地质调查和勘探工作(孙平贺等,2023;陆承达等,2023).而且,在当今世界科技走向数字化的大背景下,精准、实时、全面获取地质资料是地质环境勘探的重要目标(李超岭等,2015;许振浩等,2023).钻探和物探是地质勘探中两种不同的技术手段,其在地质地球物理数据获取中发挥着不同的作用,也是实现资源勘探开发的必要手段.根据《新一代人工智能发展规划》(国发[2017]35号)指示,“智能制造”为我国的重要发展战略之一.因此,亟需加速智能钻、物探技术与装备的研发,这对于无人则安、资源开发与利用效率提升具有重要的现实意义.

当前,国内外深井/大斜度井/水平井等自动化、智能化钻井技术发展迅速,以斯伦贝谢(Schlumberger)、贝克休斯(Baker Hughes)、哈里伯顿(Halliburton)为代表的油田服务公司在国际市场上处于领先地位,不同程度的开展了基于大数据和人工智能的建设研究(刘清友,2009;底青云等,2021;张鑫鑫等,2023).我国由于研究起步较晚,与发达国家尚存在一定的差距,尤其是浅层地质勘探中,钻探智能化装备和技术进展缓慢;而且,单一型钻探方法仍在延续,钻探与物探一般独立作业,不具备实时钻进下的多地质参数采集与传输、远程监控、智能运维等功能,难以满足复杂浅层地质条件下地质资料精准、实时、全面获取的技术需求.

钻探具有实揭性、精度高等优点,物探具有异常指示明显、探测范围大、运用灵活等优点,但受方法本身所限,两者都存在技术不足,单一勘探方法会存在一定的局限性.因此,研制集成智能钻进和多参数

物探的一体化装备,攻克钻探物探一体化装备灵活便携、钻测过程精准控制关键技术,开发多地质参数实时自动采集、存储、传输、处理和远程监控的智能钻测系统,构建浅层地质三维数据解释和信息共享的智慧平台迫在眉睫.文章通过总结浅层钻探技术与装备、钻探物探一体化技术的研究现状,构思发展方向,力求为当前浅层绿色智能化勘探技术转型发展提供参考.

1 我国浅层钻探技术与装备现状

如今,自动化钻井技术日益成熟,并与数字化技术深度融合,钻井技术正经历从自动化向智能化的重大转型.目前,我国在智能化钻井方面的研究刚刚起步,主要是针对大深度、长距离钻井研发,对于浅层智能钻探的研究相对较少(冉恒谦等,2011;王达等,2016;闫铁等,2020).

浅层钻井是指深度在300 m以内的地质钻探,也称为浅钻井.我国浅层钻探技术以自动化发展为主,普遍配备了先进的自动控制系统,能够根据钻进参数自动调整钻压、转速和钻进速度,以优化钻探效率和质量;通过集成传感器和通信技术,可以远程监控钻探作业实时数据,如钻头磨损、钻杆扭矩、钻进深度、地质信息等,并进行远程操作,提高作业的安全性和灵活性;自动化系统不仅能够实时监测设备的健康状态,还能利用深度学习算法预测和识别零部件的故障,实现提前预警,有效降低停机时间和减少维修成本.另外,我国浅层钻探设备还趋向于多功能集成化,具有更好的环境适应性以及更低的环境影响.

在智能化发展方面,我国浅层钻探在智能控制系统和数据处理技术方面取得了一定的进展,重点在于机器学习等智能算法与物联网技术的尝试,但在某些关键技术如智能钻杆、智能钻头、以及高精度定位、复杂环境下的稳定控制等方面仍存在瓶颈;部分高端钻探设备已经实现了较高程度的智能化,但整体行业内智能化水平参差不齐,中小型企业及项目中智能化应用相对较少,标准化和规范化工作相

对滞后;以及对海量数据的处理、分析与利用中,数据价值没有得到很好的体现。

总体而言,我国浅层钻探技术与装备在智能化方面正处于发展阶段,亟需在技术创新、标准化建设等方面持续努力,以实现技术的全面升级和行业的长远发展。

2 钻探物探一体化技术与装备及其智能化研究进展

地面智能控制、智能导向钻进、数据采集与通讯、远距离实时控制等是钻井技术的重要组成部分。智能导向钻进系统是将智能钻杆、智能钻头 etc 先进设备与随钻探测、地质导向钻进、回转导向钻进等技术相融合,实现对井下地质参数、钻进参数及钻头工作状态的实时采集,并将采集到的数据经有效的通讯网络传送到地面上的智能控制平台进行分析、处理。

本文研究的钻探物探一体化技术正是传统意义上的随钻探测技术及其延伸发展,随钻探测技术目前主要分为 3 类,分别是随钻测量 (Measurement While Drilling, MWD)、随钻测井 (Logging While Drilling, LWD) 以及随钻地震 (Seismic While Drilling, SWD) 等,在导向钻井技术中发挥了极其重要的作用,被誉为井下设备的“千里眼”(汪海阁等, 2021;高晓亮, 2023)。另外,MWD 与 LWD 还可以分为常规随钻探测技术与近钻头随钻探测技术(林昕等,2021)。对于常规随钻探测技术,传感器的测量位置通常位于钻头后方 15 ~ 20 m 处;而近钻头随钻探测技术(图 1)将传感器测量位置大幅前移,使其距离钻头仅约 1 ~ 2 m,这一改进显著提升了地质导向钻井的成功率和精度。

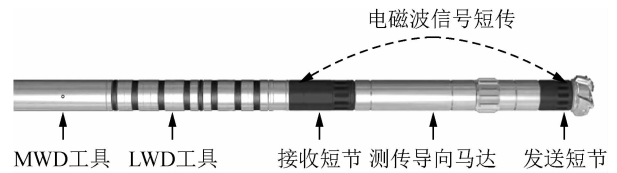


图 1 近钻头随钻探测技术结构示意图

Fig. 1 The structure diagram of near-bit pre-prospecting technology

MWD、LWD 以及 SWD 不是单一存在的,他们或交叉或同时服务于导向钻井系统。地质导向钻井系统的关键组件包括钻头、测传导向马达(含近钻头测量短节)、无线传输(图 2)(陈泽平等,2022;高

晓亮,2023)、MWD、LWD、SWD 以及井场信息接收和处理系统,这些组件协同工作,显著提高了对地层、构造和储集层特征的判断能力,并增强了对钻头在储集层内轨迹的精准控制。

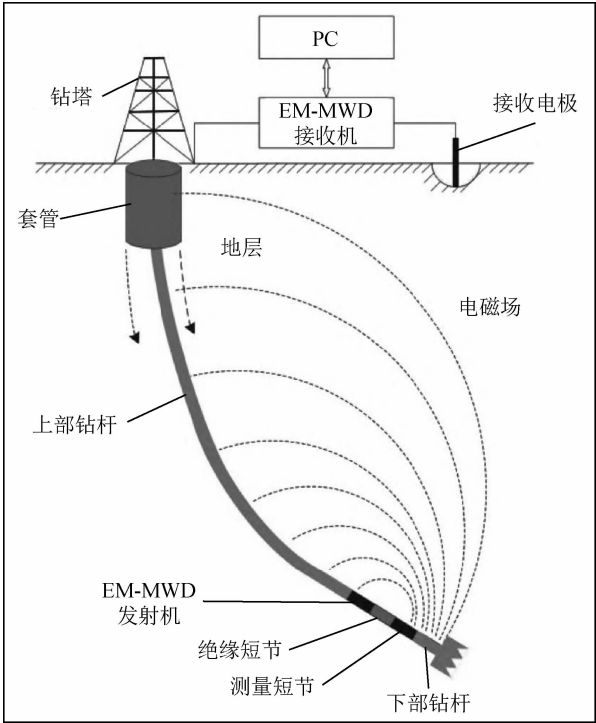


图 2 电磁波传输

Fig. 2 Schematic diagram of EM-MWD transmission

综合钻井评价和测井系统 (Integrated Drilling Excellence and Advanced Logistics, IDEAL) 是由 Schlumberger 公司于 1993 年首次提出的被国际钻探界公誉为最具潜力的钻探技术,可测量地层电阻率、方位电阻率、自然伽马、井斜、钻头旋转速度等多项重要指标。中国石油勘探开发研究院钻井工艺研究所自 1999 年起,开展了地质导向钻进技术的研究,并研制出了“CGDS-1”地质引导钻进系统,此系统与 20 世纪 90 年代的国外先进水平相当,可完成近钻头井斜、伽马、电阻率等数据的测试(苏义脑, 2005)。

测传导向马达因旋转导向 (Rotary Steerable System, RSS) 工具的逐渐成功应用而逐步被替代(林昕等, 2021)。旋转导向系统(张炜和王小宁, 2021;朱日祥等,2023)可实现钻具在全旋转状态下井眼轨迹精准调整。20 世纪 90 年代以来,世界上先后出现了推靠式、指向式和混合式三种旋转导向器,其核心技术被国外大型石油企业所垄断。在国内,多

家石油和煤炭勘探企业积极开展旋转导向工具的研发工作. 目前,我国在这方面的研究与应用多以推动式技术方案为主,针对定向、混合技术的报道很少,总体技术与国外相比还有很大差距.

目前,智能导向钻井过程中,地质导向钻井技术与旋转导向钻井技术相结合,并由地质导向技术引导旋转导向系统进行钻进.

2.1 随钻探测技术

2.1.1 随钻测量技术

从 20 世纪 70 年代开始,石油钻井广泛采用随钻测量技术,一般以工程参数(钻速、转速、扭矩、推进力、环空压力等)与钻具姿态参数(井斜、方位角等)测量为主. 对于工程参数测量,我国多采用地面扭矩仪等仪器进行,国外则主要通过近钻头测量工具和分布式测量短节来实现参数的获取与传输(李中等,2025). 另外,王旭东等(2010)通过压力传感器测量环空压力,使用 4 个应变电桥测量钻压、扭矩和侧向力,研发了一种近钻头测量系统. 葛亮等(2013)以 XC886 单片机为核心,利用热设计、抗震设计、双系统设计等可靠性技术,研发了井下工程参数随钻测试双系统. 针对钻进参数驱动系统具有非线性、大延时的特点,常江华(2020)提出了基于 BP 神经网络的钻压和转速自动控制方法. 中国石化公司研制了耐温 175 °C 随钻井下动态工程参数测量仪,基于井下应变片形变受温度、压力影响的规律,提出了钻压扭矩实时校准方法,解决了井底钻压、扭矩测不准的难题(曾义金等,2024).

其次,在方位测量中,主要利用磁敏传感器检测地磁场,对探管进行方向姿态的确定;在井斜测量时,则主要通过加速度传感器感应重力加速度,以求出探管俯仰角. 三轴磁通门磁力计(Triaxial Fluxgate Magnetometer, TFM)以低成本、简单结构和高精度被广泛应用于方位测量,然而系统误差是 TFM 性能的主要障碍. Liu 等(2021)为有效补偿磁强计误差,设计了一种新型线性误差校准模型. 为适应小口径钻进过程中对近钻头测量技术提出的高要求,韦海瑞等(2022)对电磁波无线传输技术、井下自发电技术和微机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)传感器技术进行了深入研究. 为解决回转钻进的振动和旋转对工具面向角数据的影响,陈龙等(2022)提出了互补滤波的动态测量方法. 孙平贺等(2023)为解决由于钻井轨迹精度不高而造成的污染调查结果准确性和可靠性较低的问题,以高强度非磁性材料为核心,采用内置传感器和电缆传输的

方式,对钻进顶角、方位角和工具面角进行精度至 0.01° 的监控,充分满足了直推钻进导向要求,并大大减少了对场地的扰动.

MEMS 技术凭借其小体积、低成本和低功耗等优势,在随钻测量领域得到广泛的应用. 然而,低成本的 MEMS 磁强计存在测量精度较低且极易受外界磁场干扰等问题,造成钻具方位姿态角的计算结果严重畸变. 为此,杨金显和蔡纪鹏(2023)基于随钻测量环境下磁-惯性传感器的输出特性,提出了一种在线补偿随钻地磁误差的方法,解决了黏菌算法(图 3)在随钻环境下易陷入局部最优问题,提高了钻具地磁测量精度.

为适应钻井过程中遇到的高温高压环境,朱日祥等(2023)对高温高压传感器技术进行攻关,自主研发了一系列关键核心器件;开发的智能柔性旋转导向系统(CAS-RSS),使近钻头位置的井斜测量精确度提升到 $\pm 0.1^\circ$,并且使工具面角与方位角的精确度均达到了 $\pm 1.0^\circ$ 的标准. 针对矿井钻具姿态精确感知难题,王忠宾等(2024)设计了一套先进的钻具姿态感知系统架构(图 4),并基于改进梯度下降算法与 BP 神经网络提出了一系列创新技术,显著提升了钻具姿态解算的精度和可靠性,实现了对钻孔的精确卸压.

2.1.2 随钻测井技术

在钻进过程中随钻测井系统能够及时将井下地质数据传输到地面信息终端,为优化钻井作业和地层评价提供了重要保障,这一技术与智能导向钻井系统的结合,极大地提升了钻井工作效率(底青云等,2021). 随钻测井技术自问世以来,经历了显著的发展,从初始的无方向性探测,逐步升级为具有大探测半径的方向性探边测量. 这一进步使得该技术能够更有效地解决边界响应特征等问题,能够在导向作业中,预先准确划分储层边界或油水、气水边界的位置,对于提供可靠的随钻实时决策支持至关重要(何胜林等,2021;高永德等,2022). 目前,随钻测井系统可以提供多种类型的测量数据,包括但不限于电阻率、电磁波电阻率、伽马以及声波等测量.

(1) 电学参数测量

国外随钻地质导向服务公司相继推出了各具特色的电阻率测井工具,经过多年发展,大庆油田有限责任公司开发研制了一种集电阻率和近钻头电阻率测试为一体的 DQNBMS-1 型近钻头随钻测试系统(图 5)(杨志坚等,2013). 针对 149 ~ 200 mm 的井眼尺寸,北京石油机械厂开发了一套小型化近钻头

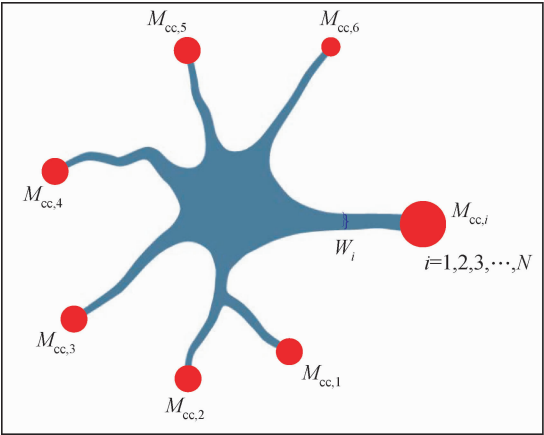


图3 基于黏菌觅食原理的误差参数寻优

Fig.3 Optimization of error parameters based on the principle of slime mold foraging

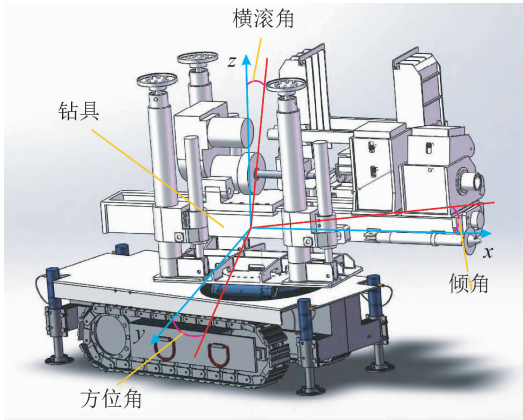


图4 钻具姿态感知

Fig.4 Drilling tool attitude perception

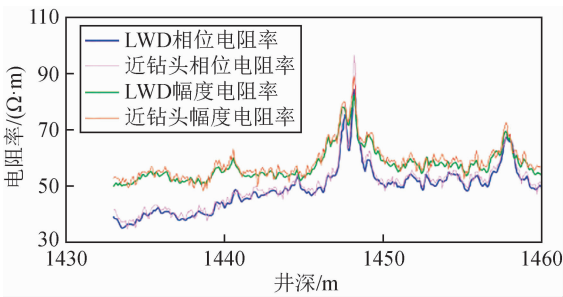


图5 随钻电阻率测井曲线

Fig.5 Resistivity logging while drilling curve

随钻测量系统,集成了近钻头电阻率与方位电阻率测量功能,近钻头电阻率测点可有效探测钻头下方0.5 m 范围内的地层电阻率特性,而方位电阻率测点则具备辨识储层及其边界的能力,确保始终沿着

最优路径钻进,最大限度地提高储层钻遇率(潘兴明等,2018).倪卫宁等(倪卫宁等,2019)提出沿周向排布8个圆形钮扣电极,纵向分为2排,且每排钮扣电极具有不同的直径,新增了侧向电阻率与钻头电阻率测量的功能,实现了复合钻进和滑动钻进均可进行全井眼覆盖扫描成像.

随钻方位电磁波测井则是根据岩土体的电磁学特性差异,通过向地层发射多种频率的电磁波,并由接收天线接收从地层反射回来的波场信号,从而提供详尽的地层信息与储层定位,具有探测范围大、对地层界面方位敏感性强等优势,可进行地层边界方位识别、地层边界测距以及地层电阻率成像.对比传统随钻电阻率测井仪器,随钻方位电磁波测井仪器(图6)最显著的区别在于引入了正交线圈或者倾斜线圈的设计,使其测量磁场的正交分量信号,大大提高了对邻近地层界面的方位敏感性.

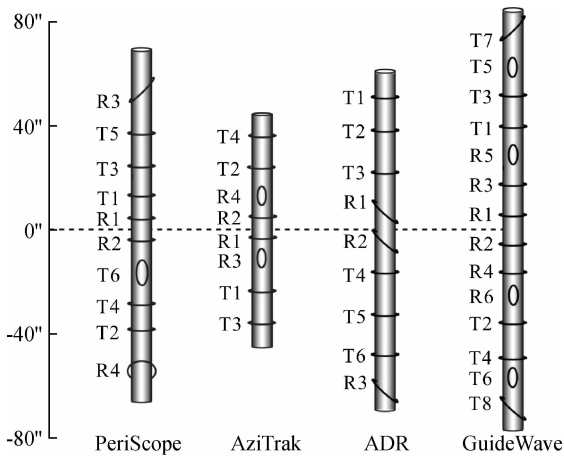


图6 几种商业化随钻方位电磁波测井仪器

Fig.6 Configurations of commercial azimuthal electromagnetic tool

为突破国外对随钻方位电磁波测井技术的垄断,刘乃震等(2015)开发了一种新的随钻电磁波传播方位电阻率仪器,该仪器采用了独特的“交联天线”设计.这种交联天线由极化方向相互垂直的线圈串绕组成(图7),具备同时执行方位探测和地层背景电阻率测量的能力.

朱日祥等(2023)自主研发的随钻方位电磁波成像测井仪 AziRes,将接收信号强度增强了16倍,提高了远地层边界的探测能力.为了进一步优化仪器的性能和可靠性,朱日祥团队进一步改良了天线仓切割深度以及超深过线孔的布设.另外,陈刚等(2019)通过正演模拟研究,深入分析了源距、发射

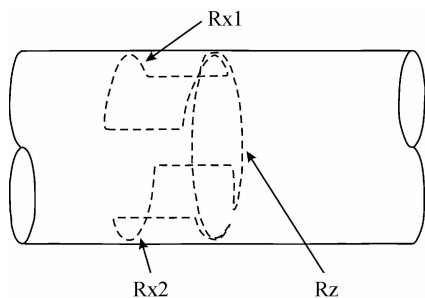


图7 C形交联天线结构示意图

Fig. 7 Schematic drawing of the C-shaped joint coil antenna

频率、线圈安装角度等仪器参数对信号响应影响的变化规律。

随钻方位电磁波测井测量信息通常是幅度比或相位差等地质信号,而非地层电阻率及地层界面位置等信息,测量信息不直观。为此,胡旭飞等(2018)结合高斯滤波和汉克儿滤波的混合数值积分方法,开发了一种快速求解各电磁场分量的正演算法,以及基于L2范数的多参数联合反演流程。杨震等(2020)针对其自主研发的AMR型随钻方位电磁波电阻率仪器,建立了专用于地质导向的应用模型,并对该模型的响应特性进行了详细的模拟分析,深入研究了拟牛顿反演算法和流程,大大提高了反演速度。王磊等(2020)采用了一种滑动开窗策略,将复杂的高维随钻方位电磁波测井资料反演问题,分解为了多个连续窗口的一维反演问题。岳喜洲等(2022)开发了一种水平层状各向异性介质电磁场求解算法,成功消除了势函数系数递推法中的数值溢出现象。

(2) 伽马测量

随钻伽马测井技术是一种在钻进过程中实时进行的地层放射性强度扫描探测方法。放射性强度主要依据地层岩石中铀系、钍系元素以及钾等放射性核素的自然存在来确定其放射性水平。自然伽马测井测量地层的总放射性强度,但无法满足方向上的分辨需求。相比之下,近钻头随钻伽马成像测井代表了一种更为先进的技术。通过将伽马探测器和定向探管同时集成到近钻头位置的钻铤侧壁内,实现对特定方位角范围内地层放射性强度的定向测量。为了优化测量效果,在设备背部添加了屏蔽层,并且在侧向开设窗口以确保测量的准确性。随着井下钻具的旋转,这项技术能够连续扫描并记录整个井眼周围不同方位的地层放射性特征,最终生成详细的扇

区伽马成像图(图8)(郑奕挺等,2020)。

近年来,我国在随钻伽马测井技术方面也取得了较大进展。大庆油田有限责任公司研发的DQNBMS-1型近钻头随钻测量系统以及中石化胜利石油工程有限公司等公司研制的系统都可实现方向性伽马测量(林昕等,2021)。其中,渤海钻探定向井公司自主研发BH-NWD近钻头方位伽马测量系统具有上伽马和下伽马两条伽马曲线(图9),有利于技术人员进行精确的地质导向(胡斌等,2021)。在实际作业环境下,近钻头伽马成像仪在井筒中难以保持居中位置,这可能导致不同方向上的伽马扇区原始测量数值出现偏差。为此,李洪强和王瑞和(2021)针对不同工况下近钻头伽马成像仪的偏心影响特征进行了深入分析,并开发了一套系统化的校正方法和修正图版,用以应对由偏心引起的测量误差。

另外,自然伽马是进行含煤地层识别的常用判识依据,但是在煤矿井下环境中应用这一技术时,必须考虑到特殊的防爆要求及其他施工条件的限制。中煤科工集团西安研究院有限公司在静态伽马测量领域已取得显著成果,成功研发出国内首套基于方位伽马测量的矿用地质导向钻进系统,不仅将地层识别的精度提升至0.3 m,还扩展了测量范围至0~350 API(石智军等,2020;陈龙等,2022)。

(3) 声波测量

随钻声波测井通过将声波发射器和声波接收器阵列安装在钻铤上,在钻井过程中,声波发射器向周围地层辐射声波信号,而声波接收器阵列则捕捉来自地层的反射波。基于接收到的声波信号,能够精确测量地层的纵波和横波速度等关键参数,为地质分析和油藏评估提供重要数据。如今,随钻声波测井技术从早期的单极测量方式逐步演进到如今的多极测量模式。现代系统不仅支持传统的单极测量,还涵盖了偶极、四极以及正交偶极等多种测量方式。

由于旋转的钻铤占用了大部分井眼空间以及严重的钻井环境噪声等特殊井孔环境问题,导致近钻头伽马成像仪在特殊井孔环境中的实现难度远大于随钻电阻率测井等技术,开展必要的理论模拟与实验研究变得尤为紧迫和关键。王华等(2009)、Wang和Tao(2011)利用三维非均匀交错网格有限差分算法,模拟获得了多极子随钻声波测井波场响应特征。王瑞甲等(2012)开展了地层的声学各向异性对随钻正交偶极子声波测井响应特征的影响研究。李希强等(2013)探讨了在快速地层和慢速地层井孔环

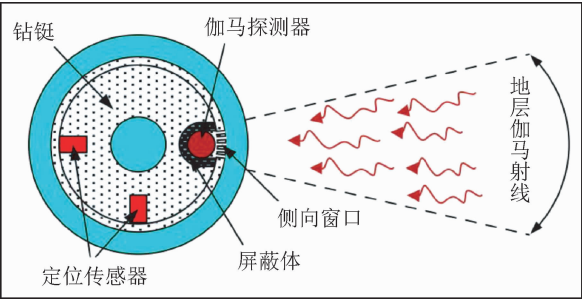


图 8 近钻头方位伽马成像测井
Fig. 8 Principle of near-bit azimuthal gamma ray imaging logging

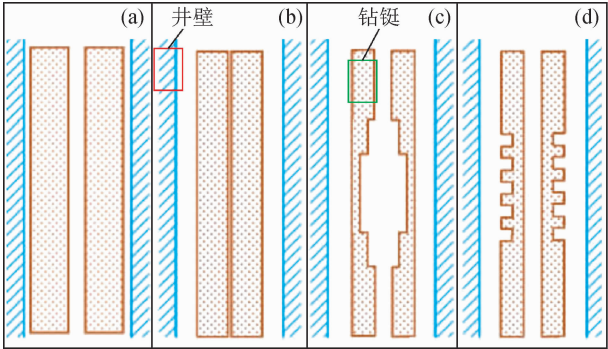


图 10 不同钻铤结构设计
Fig. 10 Different drill string structure designs

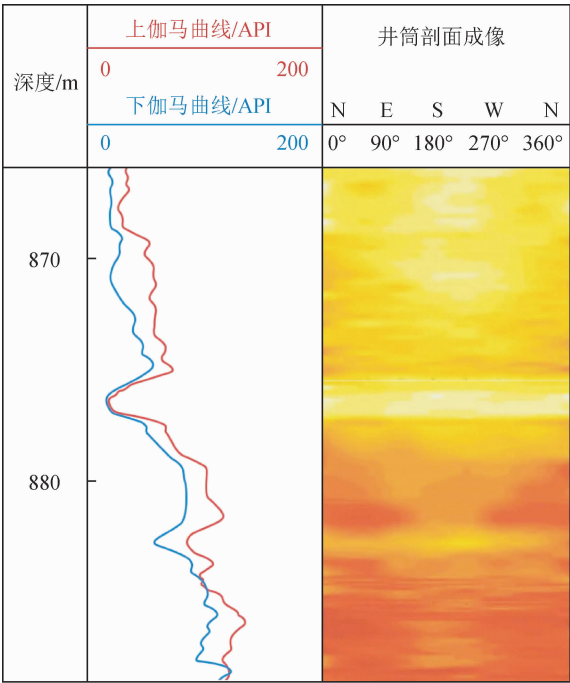


图 9 方位伽马曲线与井筒剖面成像图
Fig. 9 Azimuth gamma curve and borehole lithological image

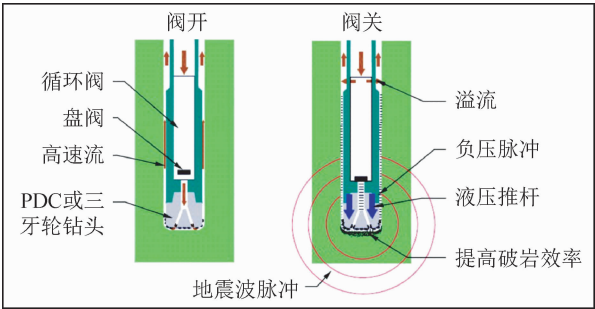


图 11 水力脉冲钻井工具原理
Fig. 11 Principle of swept impulse tool

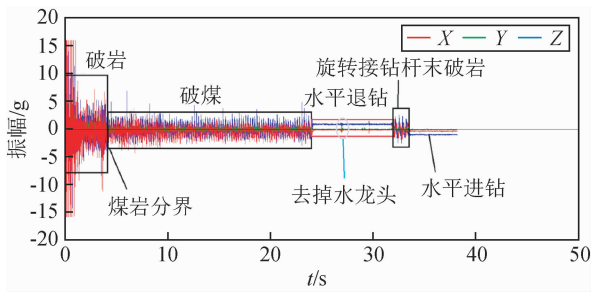


图 12 三分量随钻地震时域信号分析
Fig. 12 Three component seismic while drilling time-domain signal analysis

境中,由随钻单极子、偶极子和四极子声源激发的斯通利波、弯曲波和螺旋波的相速度频散和激发强度特征.朱祖扬等(2016)深入研究了钻铤外径、钻铤内径、钻铤内部变径和钻铤外壁刻槽等因素(图 10)对钻铤波传播的影响.许连明(2018)提出了一种硬阈值函数处理方法,专门针对小波的低频分解系数进行优化处理,从而提升了数据分析的效果.杨书博等(2021)采用相控线阵声波辐射器和相控圆弧阵声波接收站,分别实现了声波能量的定向辐射和扫描接收.

另外,我国在随钻声波测井仪器研发方面,中国

石化石油工程技术研究院自 2014 年启动了随钻声波测井换能器的研究工作,标志着我国在这一领域迈出了重要的一步.经过一年多的刻苦攻关,研究院于 2015 年 3 月成功研制出首台随钻声波测井声系短节模拟样机,并在室内环境下对其进行了全面的测试和分析,通过对声系短节各组成部分及整机性能的细致评估,不仅验证了样机的设计合理性,还为进一步优化提供了宝贵的数据支持(朱祖扬等,

2015; 吴金平等, 2016). 苏远大等(2016)研究了钻铤波在传播过程中隔声阻带的形成、拓宽及稳定化的物理机制. 刘西恩等(2022)采用低频大功率的随钻四极子发射换能器、高性能的隔声体和高灵敏度的随钻声波接收声系, 研制出了随钻四极子声波测井仪(QUAST). 朱日祥等(2023)自主研发的随钻方位声波成像测井仪(IGG-AziAc)突破了高聚焦声场激励、高可靠隔声体、数字一体化接收换能器条带灌封三项关键技术, 提高了声波接收信号灵敏度和一致性, 实现纵波、横波、斯通利波等全波列测量和井周16扇区方位声波成像测量.

2.1.3 随钻地震技术

随钻地震的思想可以追溯到20世纪30年代, 广义上的随钻地震涵盖了两种主要形式: 钻头随钻地震(Drill-Bit Seismic While Drilling, DB-SWD)和随钻垂直地震剖面(Vertical Seismic Profiling While Drilling, VSP-WD). DB-SWD利用钻头破岩过程中产生的振动作为被动震源, 在地面布置经过特殊改造的地震检波器进行记录, 这种技术在大多数文献中被简称为SWD, 由于其观测系统的几何形式与常规VSP互逆, 基于互等原理, DB-SWD也被称为反向垂直地震剖面(Reverse Vertical Seismic Profiling, R-VSP). 通过这种方式, DB-SWD能够实时监测钻头下方的地层特性, 提供连续的地下结构信息, 从而优化钻井路径并提高勘探效率. 相比之下, VSP-WD采用的是传统的垂直地震剖面观测系统, 使用地面常规震源, 如炸药或气枪, 产生地震波信号, 并通过集成于井下随钻工具上的地震波传感器进行记录, 以获取VSP数据, 这一技术也被称作随钻地震测量(Seismic Measurement While Drilling, SMWD). 另外, 还发展出扫频脉冲震击器随钻地震技术, 该技术利用扫频水力脉冲震击器(图11)在钻头处产生的强大负压脉冲来替代钻头作为震源用于随钻地震.

我国对于随钻地震技术的研究主要集中在钻头随钻地震, 其他两种方法涉及较少(苏义脑等, 2010; 周小慧等, 2016; 张梦柯等, 2022). 钻头随钻地震的数据采集仪器与地面地震类似, 其主要挑战在于数据处理. 吴何珍等(2010)利用倒谱方法的非线性滤波原理, 对信号进行结构混响的去除, 增强了钻头信号的特征. 陆斌等(2010)使用独立成分分析方法, 对安装在钻柱顶端的两个加速度传感器采集到的6个分量数据进行了处理, 并结合相关分析技术, 提高了处理结果的信噪比. 金朝娣等(2012)提出了小波变换域多次互相关方法, 得到了接收道相对于

参考道的时延, 提取了直达波和反射波信息. 黄伟传等(2012)利用频率波数域滤波、干涉和垂直叠加等处理, 从强噪声背景下提取出了钻头激发的有效信号. 李彪等(2021)首先对线性排列上采集的每道信号进行预处理, 包括去均值、去趋势、时间域归一化和谱白化等步骤, 随后使用距离钻机最近的一道信号作为参考, 与其余各道信号逐一进行互相关分析, 获得由钻机振动产生地震波场的经验格林函数, 最后采用多道分析方法, 从中提取了面波频散曲线并反演出近地表速度结构.

随着钻井技术的进步, 聚晶金刚石复合片(Polycrystalline Diamond Compact, PDC)钻头逐渐替代了牙轮钻头, 在钻井作业中得到广泛应用. 然而, 先前的研究发现, 使用PDC钻头进行随钻地震往往无法获得良好的效果. 为此, 童思友等(2023)通过对三分量PDC钻头随钻地震数据进行预处理后, 成功分离获得高信噪比横波信息, 得到了精度较高的横波层速度.

另外, 针对隧道施工中以凿岩台车破岩振动为震源的随钻地震超前探测技术, 石少帅等(2021)基于最小平方反褶积与长时互相关叠加方法, 提出了一套专门适用于凿岩台车的地震记录重构技术. 李术才等(2024)提出了VMD-SVD-RobustICA三臂混合先导信号分离方法与脉冲反褶积-小波域互相关地震记录重构方法, 实现了三臂混合先导信号的分离与有效反射信号的提取.

针对煤矿井下钻探施工, 刘金锁等(2019)通过在钻头后方安装三分量加速度传感器, 对比不同时间频分析方法的基础上, 选择短时傅里叶变换对某矿实测数据进行处理分析(图12), 不仅提高了数据分析的精度, 还为确定钻进过程中岩性变化的位置以及钻机不同工作状态的改变提供了可靠的依据.

2.2 数据智能化处理方法

物联网、大数据、云平台和人工智能等前沿技术正在深刻改变各行各业的运营模式, 成为推动各领域数字化转型的关键力量. 在钻探行业, 这些技术的应用不仅提升了作业效率和安全性, 还有力地支持了实现高质量发展.

对于多源随钻探测数据精细反演, Sun等(2021)采用监督学习的机器学习方法、传统测井解释技术和现代计算机科学中的大数据思想, 通过跨学科理论和方法研究了水平井储层钻头的岩性预测. 根据不同的步长类别建立了测量点和垂直储层边界距离(D-MP-VRB)数据库; 基于D-MP-VRB数

数据库,利用一对一支持向量机、随机森林、神经网络和极限梯度提升树算法建立了 D-MP-VRB 预测模型;并基于 D-MP-VRB 预测模型建立了钻头和垂直储层边界距离的预测公式。

为促进井下自主智能钻进技术发展,吴思源等(2021)提出了一种基于大闭环伺服控制的随钻智能导向钻井方法(图 13)。底青云等(2021)构建了云端大数据智能导向钻井方法架构,具体涉及三个核心层级,分别为物联网感知层、大数据存储层和云平台决策层。姜杰等(2023)构建了基于时序数据驱动的地质钻探数字孪生模型体系,通过物联网技术将随钻探测等多源异构数据进行特征提取和分析,建立了数字孪生智能钻进周期服务平台,实现了从钻前规划、钻中监控到钻后评估的全生命周期数据集成与融合。

3 浅层钻探物探一体化技术发展分析

3.1 现状分析

浅层地质勘探在工程施工及社会经济建设中发挥着重要作用,钻探、物探技术的综合利用是当前重要的勘探手段,其中多种探测方式的有机结合、数据融合分析及装备更新是关键。通过梳理浅层钻探技术与装备以及随钻探测技术发展现状,认为浅层地质勘探中轻便型自动化钻进装置与多参数探测仪器集成技术,钻进和探测一体化多参数采集智能精准控制技术,多地质参数自动采集和解释技术是重点。总的来说,浅层地质勘探中钻探物探技术一体化发展仍有待提升,其具体现状分析如下:

(1)钻探物探一体化勘探技术的融合研究存在不足。国内近几十年来,随钻探测技术主要聚焦在深部油气资源勘探与煤矿长距离定向钻进领域发展,浅层钻探领域涉及较少,且多以随钻测量与工艺参数监测为主。该技术涉及多学科交叉,技术集成度高,浅层地质勘探中钻探物探各自单一的技术水平得到了很大程度的提升,但多方法多数据融合能力差,技术集成度低,且短期内无法引进消化吸收现有的随钻探测技术。从钻孔数据到透明化地下空间模型构建能力有限,特别是在复杂地质条件下多地质地球物理参数收集、多源数据融合反演方法、三维成像以及目标地质体的精确定位等研究程度不足,亟待系统深入研究和完善。

(2)绿色智能化钻探物探一体协同装备及工艺研发相对滞后。钻探物探一体化智能勘探对自动化钻机、地质与旋转导向系统以及入孔物探仪器装备

的安全性、稳定性要求高,现有油气与定向钻进领域随钻设备由于规格尺寸等限制不能通用,浅层钻探设备在智能钻杆、智能钻头等方面对随钻测井类、随钻地震类探头类型、信息智能感知、多源数据信息融合采集等的研究还需加深,亟需夯实多源数据一体化智能协同监测基础。另外,物探传感器布设方式、与介质耦合效果以及装备性能参数设置等与勘探条件匹配度差,智能化程度低,难以获取地下空间地质大数据信息。

(3)钻探物探一体化工程实践与应用有限,所取得的成果不多。浅层地质勘探中提高钻探成果的利用率及钻探效率是重点,随钻探测等是钻探物探一体化探测的重要形式。但目前浅层钻探设备以取芯钻进为主,无岩芯随钻探测技术应用较少。工程勘探中获取和利用的数据多是单一的地层结构数据、测井数据及环境信息等,难以形成地下空间多源数据体,其综合利用价值有待提升。同时,当前单一钻孔资料的孤立应用及物探数据的分散处理方式,难以实现多源地质数据的有效整合,导致空间地质信息解译精度不足,制约了区域构造特征识别和水文地质条件综合分析的准确性。

3.2 发展思考

精细、智能、绿色、高效是浅层地质勘探重要的发展方向,其目标是在地质条件精细化探测数据的基础上构建浅层地下空间透明地质模型,为地下空间高质量利用提供可靠的地质保障。当前,在新一轮能源革命和产业变革的背景下,在智能化、大数据、云计算、AI 等高新技术辅助下,要让绿色智能勘探方向有更好发展,需要构建好智能精准绿色勘探模式。为此,针对上述存在的瓶颈问题提出相应的解决方案(图 14)。

(1)加强地面浅层智能勘探多场多源信息融合利用研究。地面浅层勘探中的地层岩性、结构、构造以及地下水、空洞、破碎带等地质信息,其勘探精准度需要多场多源信息综合判断。重点是突破多场随钻环境下响应特征理论模拟、各场各参数全方位精细反演、噪声去除、误差实时补偿、自适应与普适性等关键基础研究;开展多场、多源随钻探测参数的多类型、多层级数据级融合与相互约束方法研究,基于相关神经网络模型与深度学习算法,构建地质信息与多源随钻探测参数间的映射关系,建立基于多随钻探测参数的地质信息联合反演模型;围绕大数据、物联网、数字孪生技术的创新应用,构建地质虚拟实体,挖掘地质信息的时空演化特性与映射重构特征,

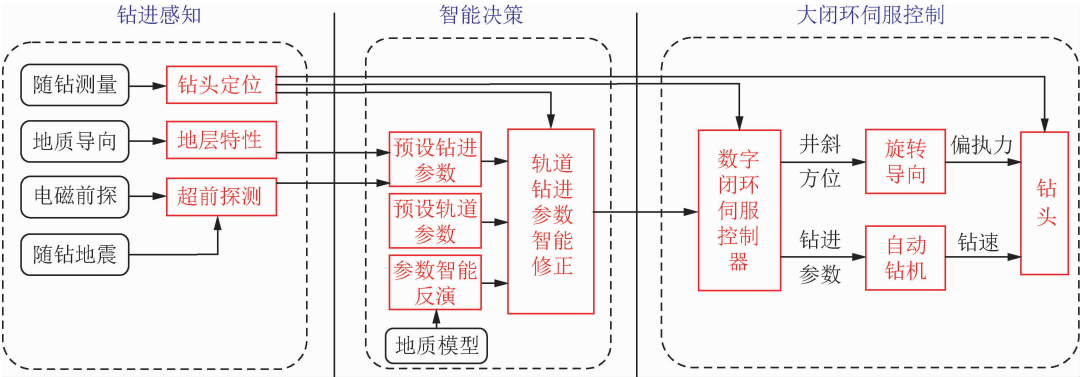


图 13 大闭环伺服控制随钻智能导向钻井

Fig. 13 Global closed-loop servo control of intelligent-while-drilling steering

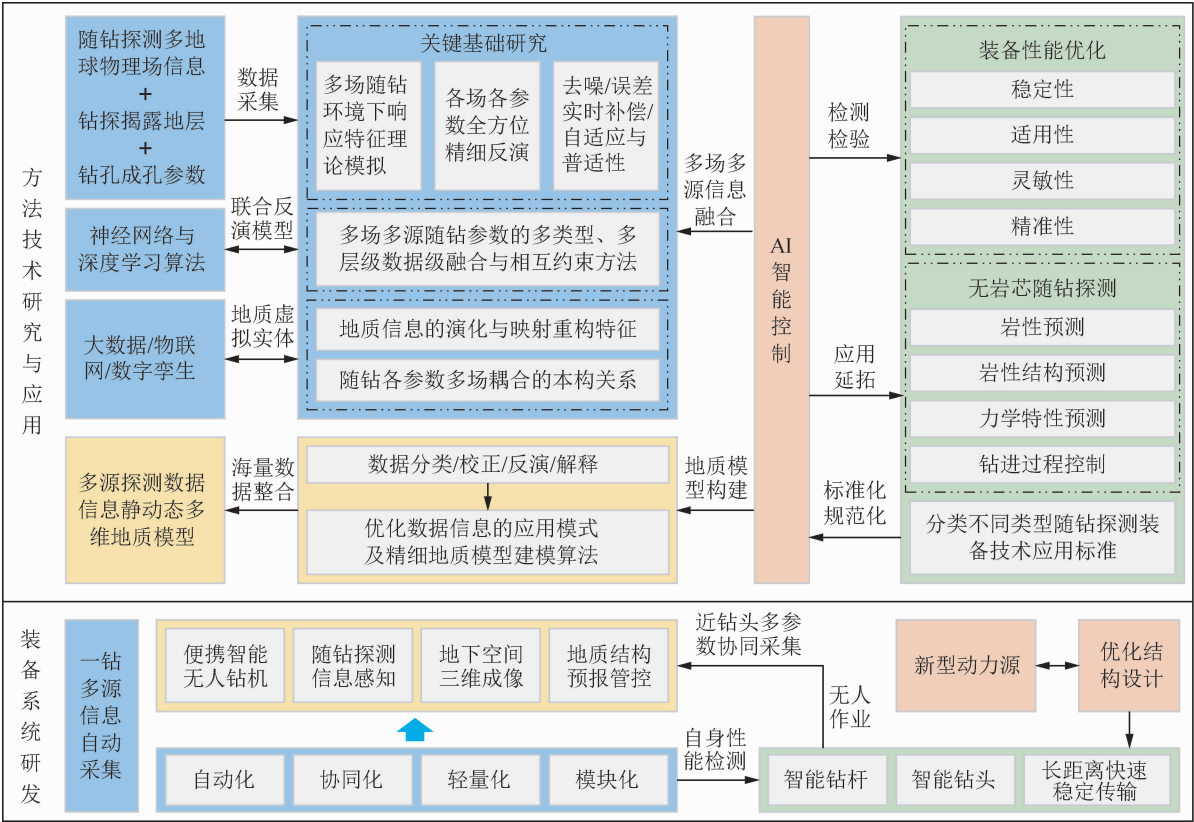


图 14 浅层智能型钻探物探一体化技术与装备发展架构

Fig. 14 Development Framework of intelligent drilling and geophysical exploration integration technology and equipment for shallow surface

进一步揭示目标区域地质体的工程性质和地质构造特征问题,明确随钻探测各参数多场耦合的本构关系,形成综合勘探成果。

(2)加强浅层智能型钻探物探一体化装备及系统研发.浅层勘探中一钻多源信息自动采集是发展重点,钻探物探一体化装备是辅助勘探施工的重要工具,其智能化的应用与发展需要深度融合现代人工智能技术成果,亟需在智能控制、自动化、轻量化与模块化等方面取得突破.系统研发包括便携智能无人钻机、随钻探测信息感知、地下空间三维地质成像、地层结构构造预报管控等内容.其次,智能化钻探物探一体化装备是涵盖具备自身性能监测的智能

钻杆、智能钻头等智能钻进设备及长距离快速稳定传输系统的高效钻具组合,基于结构组成、新材料和弱扰动提出结构设计,攻克结构小型化、仪器单元化、测量协同化与控制整体化的研发挑战;并可利用充电电池动力源、无人钻探作业等进行孔内近钻头多参数采集传输。

(3)加强基于钻探物探一体化大数据透明地质模型构建.浅层勘探获得的地质大数据信息分散,对海量的多源数据信息系统整合研究至关重要.需要对当前相对分散的钻探物探数据进行分类、整合、校正、反演、成像、解释与表达,构建目标区域的地质信息透明数据体.优化数据信息的应用模式及精细地质模型建模算法,建立多源探测数据静-动态三维地质模型,综合分析研判及诊断预警,获取地层信息,预测典型地质灾害。

(4)加强浅层智能钻探物探一体化技术应用延拓.我国地域辽阔,根据地面浅层勘探类型及需求不同,勘探目的存在较大差异,特别是复杂地质条件勘探,更需要智能型钻探物探一体化装备的加入,利用无岩芯随钻探测技术可以获得地下多点位钻孔数据信息,为地层及结构分析提供支撑.因此,针对不同地质条件类型、不同地质灾害勘探目的,融合相互约束下的不同映射关系多场随钻探测参数,开展岩性预测、岩性结构预测、力学特性预测、钻进过程控制、震源孔钻装封等应用研究;进行探测仪器装备的稳定性、适用性、灵敏性以及精准性等方面的信号检测检验分析,开展装备性能优化和智能探测科学基础理论及应用研究.另外,系统分类不同类型随钻探测装备技术应用标准及其现场测试、数据解译和评价等,进一步完善浅层智能化精准钻探物探一体化装备的研发与应用水平。

4 结束语

围绕透明地下空间及典型地质灾害快速勘探需求,本文提出构建浅层钻探物探一体化智能型勘探技术体系.该技术体系构建需重点加强三个维度支撑,首先,深化智能勘探技术及多源信息融合相关理论研究;其次,突破智能型钻探物探一体化多参数勘探装备研发,其中一钻多源信息自动采集发展是关键;然后,基于多源地质信息,以构建三维透明地质模型为中心,结合现代物联网、大数据、AI 等技术进行地下空间勘探应用领域系统集成,为未来精细智能地质勘探提供理论与实践。

同时,加大高校及科研院所在浅层地质勘探技

术装备等方面的研发投入,加强交叉学科人才培养,大力发展浅层地质勘探信息化利用,不断提升我国精准地质勘探的智能化发展水平。

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

- Chang J H. 2020. Application of BP neural network algorithm in intelligent drilling control system. *Coal Mine Machinery* (in Chinese), 41(5): 188-191, doi: 10.13436/j.mkjx.202005060.
- Chen G, Fan Y R, Li Q X. 2019. Influencing factors of azimuth electromagnetic wave roof and floor detection while drilling along coal seam. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 47(6): 201-206, doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.06.030.
- Chen L, Chen G, Zhang J G. 2022. Development and application of a mine-used dynamic azimuth gamma instrument while drilling. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 50(1): 86-91, doi: 10.12363/issn.1001-1986.21.10.0599.
- Chen Z P, Yan B Y, Wang G Z, *et al.* 2022. Research status and prospect of MWD technology in coal mine. *Mining Safety & Environmental Protection* (in Chinese), 49(6): 130-134, doi: 10.19835/j.issn.1008-4495.2022.06.023.
- Di Q Y, Li S D, Fu C M, *et al.* 2021. Intelligent steering drilling technology method based on cloud big data. *Journal of Engineering Geology* (in Chinese), 29(1): 162-170, doi: 10.13544/j.cnki.Jeg.2021-0055.
- Gao X L. 2023. Status and development of intelligent drilling tools for coal mine. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 51(10): 156-166, doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.04.0214.
- Gao Y D, Wang S Y, Chang B T, *et al.* 2022. An integrated identification approach of abnormally high-pressure gas zones based on the look-ahead while drilling technology. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 42(10): 98-106, doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.10.009.
- Ge L, Hu Z, Chen P. 2013. Design of down-hole engineering parameters measurement while drilling system. *Transducer and Microsystem Technologies* (in Chinese), 32(8): 105-107, doi: 10.13873/j.1000-97872013.08.002.
- He S L, Li M, Wang G, *et al.* 2021. Application of GeoSphere geosteering tool to the drilling of horizontal wells in deepwater gas fields. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 41(4): 91-96, doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.04.010.
- Hu B, Ma H Y, Huang B Y, *et al.* 2021. Development and application of near-bit azimuth gamma MWD system. *Oil Drilling & Production Technology* (in Chinese), 43(5): 613-618, doi: 10.13639/j.odpt.2021.05.009.
- Hu X F, Fan Y R, Wu F, *et al.* 2018. Fast multiple parameter inversion of azimuthal LWD electromagnetic measurement. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 61(11): 4690-4701, doi: 10.6038/cjg2018L0746.
- Huang W C, Ge H K, Wu H Z, *et al.* 2012. Seismic interferometry in seismic whiling drilling data processing. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 47(1): 32-36, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2012.01.012.
- Jiang J, Huo Y X, Zhang H X, *et al.* 2023. Architecture of intelligent service platform for drilling based on digital twin. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 51(9): 129-137, doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.04.0179.
- Jin Z D, Neng C X, Liu Y Q, *et al.* 2012. SWD signal processing based on wavelet domain correlation algorithm. *Journal of China Coal Society* (in Chinese), 37(4): 621-626, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2012.04.002.

- Li B, Li Z X, Peng W, *et al.* 2021. Near-surface structure inversion using vibration signals while drilling shot holes in seismic exploration. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 56(6): 1214-1219, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2021.06.002.
- Li C L, Li F D, Lü X, *et al.* 2015. The architecture of geological survey intelligent space. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 44(S1): 143-151, 159, doi: 10.11947/j. AGCS.2015.F074.
- Li H Q, Wang R H. 2021. Research on environmental correction method of measurement results from near-bit gamma imagers. *Petroleum Drilling Techniques* (in Chinese), 49(3): 142-150, doi: 10.11911/syztjs.2021024.
- Li S C, Li L P, Sun Z Z, *et al.* 2023. Key technology analysis and development trend of the equipment for ultra-long directional drilling and grouting. *Rock and Soil Mechanics* (in Chinese), 44(1): 1-30, doi: 10.16285/j.rsm.2022.2027.
- Li S C, Wang X, Guo W D, *et al.* 2024. An advance geological detection technology of seismic wave while drilling in mechanized tunnel construction by drilling and blasting method. *Tunnel Construction* (in Chinese), 44(4): 617-632, doi: 10.3973/j.issn.2096-4498.2024.04.001.
- Li X Q, Chen H, He X, *et al.* 2013. Analyses on mode waves of acoustic logging while drilling in transversely isotropic formations. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(9): 3212-3222, doi: 10.6038/cjg20130933.
- Li Z, Wu Y, Li H, *et al.* 2025. Research and development of real-time measurement technology and tools for downhole engineering parameters in intelligent offshore drilling. *Drilling and Production Technology* (in Chinese), 48(1): 63-69, doi: 10.3969/J. ISSN.1006-768X.2025.01.08.
- Lin X, Fan R G, Qin L, *et al.* 2021. Present situation and progress of geosteering drilling pre-prospecting technology. *Special Oil & Gas Reservoirs* (in Chinese), 28(2): 1-10, doi: 10.3969/j.issn.1006-6535.2021.02.001.
- Liu J G, Li X G, Yan S G, *et al.* 2021. A novel linear calibration model for three-axis fluxgate magnetometer. *IEEE Sensors Journal*, 21(21): 23917-23925, doi: 10.1109/JSEN.2021.3103992.
- Liu J S, Liu S D, Zhang W X, *et al.* 2019. Research on time-frequency analysis method of drill string vibration logging technology. *Coal Science and Technology* (in Chinese), 47(7): 183-188, doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.07.023.
- Liu N Z, Wang Z, Liu C. 2015. Theories and key techniques of directional electromagnetic propagation resistivity tool for geosteering applications while drilling. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(5): 1767-1775, doi: 10.6038/cjg20150526.
- Liu Q Y. 2009. Future intelligent drilling technology. *CAAI Transactions on Intelligent Systems* (in Chinese), 4(1): 16-20, doi: 10.3969/j.issn.1673-4785.2009.01.004.
- Liu X E, Sun Z F, Qiu A, *et al.* 2022. Design and experiment for a quadrupole acoustic LWD tool. *Petroleum Drilling Techniques* (in Chinese), 50(3): 125-131, doi: 10.11911/syztjs.2022058.
- Lu B, Ge H K, Wu H Z, *et al.* 2010. Application of independent component analysis in seismic while drilling signal processing. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 45(1): 15-22, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2010.01.005.
- Lu C D, Gan C, Chen L F, *et al.* 2023. Development and prospect of intelligent control of geological drilling process. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 51(9): 31-43, doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.06.0338.
- Ni W N, Kang Z M, Lu B P, *et al.* 2019. The detection characteristics of a high resolution resistivity imaging instrument while drilling. *Petroleum Drilling Techniques* (in Chinese), 47(2): 114-119, doi: 10.11911/syztjs.2019005.
- Pan X M, Shi Q, Lu S J, *et al.* 2018. Development and application of slim-hole near-bit geosteering tool. *Drilling & Production Technology* (in Chinese), 41(1): 69-71, 87, doi: 10.3969/J. ISSN.1006-768X.2018.01.21.
- Ran H Q, Zhang J C, Xie W W, *et al.* 2011. Applications study of geo-drilling technology. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 85(11): 1806-1822, doi: 11-1951/P.20111025.0834.007.
- Shi S S, Sun H Z, Li S C, *et al.* 2021. Reconstruction method of seismic record of drilling jumbo rock-breaking seismic source. *Journal of Central South University (Science and Technology)* (in Chinese), 52(12): 4405-4414, doi: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.12.020.
- Shi Z J, Li Q X, Yao K. 2020. Development path and key technology analysis of intelligent directional drilling in underground coal mine. *Journal of China Coal Society* (in Chinese), 45(6): 2217-2224, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0336.
- Su Y D, Zhuang C X, Tang X M, *et al.* 2016. Theoretical and experimentation of a carved collar isolator for logging-while-drilling acoustic tool. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(12): 4521-4528, doi: 10.6038/cjg20161215.
- Su Y N. 2005. Geosteering drilling technology and its development in China. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 32(1): 92-95, doi: 10.3321/j.issn:1000-0747.2005.01.025.
- Su Y N, Xu Y, Sheng L M, *et al.* 2010. Review on study progress of seismic while drilling technology. *Oil Drilling & Production Technology* (in Chinese), 32(5): 1-7, doi: 10.13639/j.odpt.2010.05.033.
- Sun J, Chen M Q, Li Q, *et al.* 2021. A new method for predicting formation lithology while drilling at horizontal well bit. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196: 107955, doi: 10.1016/j.petrol.2020.107955.
- Sun P H, Zhou S W, Cao H, *et al.* 2023. Application of intelligent direct push measurement while drilling device for environmental geological surveys. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 51(9): 156-163, doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.06.0315.
- Tong S Y, Shi H, Xu X G, *et al.* 2023. Application of PDC bit SWD technology in a well area of Shengli Oilfield. *Periodical of Ocean University of China* (in Chinese), 53(11): 152-161, doi: 10.16441/j.cnki.hdxh.20220274.
- Wang D, Sun J H, Liu X M. 2016. The progress of the revision of geological drilling technology standard system in recent years in China. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 35(11): 1900-1905, doi: 10.3969/j.issn.1671-2552.2016.11.012.
- Wang H, Tao G, Wang B, *et al.* 2009. Wave field simulation and data acquisition scheme analysis for LWD acoustic tool. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52(9): 2402-2409, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.09.027.
- Wang H, Tao G. 2011. Wavefield simulation and data-acquisition-scheme analysis for LWD acoustic tools in very slow formations. *Geophysics*, 76(3): E59-E68, doi: 10.1190/1.3552929.
- Wang H G, Huang H C, Bi W X, *et al.* 2021. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies: Progress and prospect. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 41(8): 163-177, doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.08.015.
- Wang L, Fan Y R, Cao Y C, *et al.* 2020. Real-time inversion of logging-while-drilling azimuthal electromagnetic measurements acquired in high-angle and horizontal wells. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 63(4): 1715-1724, doi: 10.6038/cjg2020M0617.
- Wang R J, Qiao W X, Ju X D. 2012. Numerical study of formation anisotropy evaluation using cross dipole acoustic LWD. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55(11): 3870-3882, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.035.
- Wang X D, Chen P, Zhang J. 2010. The design of drilling parameter measurement system. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)* (in Chinese), 32(5): 155-160, doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.2010.05.030.
- Wang Z B, Si L, Wei D, *et al.* 2024. Key technologies of fully autonomous drilling system for coal mine anti-impact drilling robot. *Journal of China Coal Society* (in Chinese), 49(2): 1240-1258, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1379.
- Wei H R, Zhu Z T, Wu C, *et al.* 2022. Analysis on current status and key technology of miniaturization design of near-bit MWD systems. *Drilling Engineering* (in Chinese), 49(5): 156-162, doi: 10.12143/j.ztgc.2022.05.021.

Wu H Z, Ge H K, Yang D H, *et al.* 2010. A research of cepstrum analysis of drill string vibration and extracting the bit source signals. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 53(8): 1968-1975, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.08.023.

Wu J P, Lu H S, Zhu Z Y, *et al.* 2016. Experimental study on the simulation prototype of acoustic nipples for Logging-While-Drilling (LWD). Petroleum Drilling Techniques (in Chinese), 44(2): 106-111, doi: 10.11911/syztjs.201602018.

Wu S Y, Li S D, Chen D, *et al.* 2021. An intelligent-while-drilling steering method of global closed-loop servo control. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 64(11): 4215-4226, doi: 10.6038/cjg202100449.

Xu L M. 2018. Application of full frequency wavelet denoising method in quadrupole logging while drilling. Progress in Geophysics (in Chinese), 33(5): 2034-2040, doi: 10.6038/pg2018BB0425.

Xu Z H, Wang Z Y, Zhang J Y, *et al.* 2023. Geological perception and digital twin of rock and machine for TBM tunnelling: methods, research status, digital and intelligent development direction. Journal of Basic Science and Engineering (in Chinese), 31(6): 1361-1381, doi: 10.16058/j.issn.1005-0930.2023.06.002.

Yan T, Xu R, Liu W K, *et al.* 2020. Research and development of intelligent drilling technology in China. Journal of Northeast Petroleum University (in Chinese), 44(4): 15-21, doi: 10.3969/j.issn.2095-4107.2020.04.003.

Yang J X, Cai J P. 2023. On-line compensation for geomagnetic error while drilling based on magnetic inertial slime mould algorithm. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 51(11): 169-178, doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.05.0301.

Yang S B, Qiao W X, Zhao Q Q, *et al.* 2021. The characteristics of the acoustic field ahead of the bit in "look-ahead" acoustic logging while drilling. Petroleum Drilling Techniques (in Chinese), 49(2): 113-120, doi: 10.11911/syztjs.2021020.

Yang Z, Yu Q J, Ma Q M. 2020. Real time inversion and field test of LWD azimuthal electromagnetic waves based on Quasi-Newton method. Petroleum Drilling Techniques (in Chinese), 48(3): 120-126, doi: 10.11911/syztjs.2020025.

Yang Z J, Qi Y, Wu D H, *et al.* 2013. Development and field application of DQNBMS-1 near-bit measurement while drilling. Oil Drilling & Production Technology (in Chinese), 35(1): 48-50, doi: 10.13639/j.odpt.2013.01.014.

Yue X Z, Liu T L, Li G Y, *et al.* 2022. An analytically fast forward method of LWD azimuthal electromagnetic measurement and its geo-steering application. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 65(5): 1909-1920, doi: 10.6038/cjg2022P0233.

Zeng Y J, Wang M S, Guang X J, *et al.* 2024. Progress and prospects of Sinopec's intelligent drilling technologies. Petroleum Drilling Techniques (in Chinese), 52(5): 1-9, doi: 10.11911/syztjs.2024081.

Zhang M K, Zhao Q H, Luo B, *et al.* 2022. Review of the drill bit seismic while drilling technology. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(4): 1677-1688, doi: 10.6038/pg2022FF0514.

Zhang W, Wang X N. 2021. Schlumberger NeoSteer near drill rotary guidance system. Well Logging Technology (in Chinese), 45(5): 463.

Zhang X X, Liang B W, Zhang X L, *et al.* 2023. Research progress of intelligent drilling equipment and technology. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 51(9): 20-30, doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.06.0324.

Zheng Y T, Fang F, Wu J P, *et al.* 2020. Development and application of near-bit gamma-ray imaging system during drilling. Journal of Northeast Petroleum University (in Chinese), 44(3): 70-76, 126, doi: 10.3969/j.issn.2095-4107.2020.03.007.

Zhou X H, Song G Q, Zhang W H, *et al.* 2016. Current research progress of seismic while drilling technology. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 55(6): 913-923, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2016.06.017.

Zhu R X, Jin Z J, Di Q Y, *et al.* 2023. Research and progress of intelligent drilling technology system and related theories. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 66(1): 1-15, doi: 10.6038/

cjg2022Q0730.

Zhu Z Y, Lu H S, Zhang W, *et al.* 2015. Development and testing of acoustic nipples while drilling. Petroleum Drilling Techniques (in Chinese), 43(5): 83-87, doi: 10.11911/syztjs.201505014.

Zhu Z Y, Wu H Y, Li Y J, *et al.* 2016. The effect of collar structure on acoustic logging response while drilling. Petroleum Drilling Techniques (in Chinese), 44(6): 117-122, doi: 10.11911/syztjs.201606020.

附中文参考文献

常江华. 2020. BP神经网络算法在智能钻进控制系统中的应用. 煤矿机械, 41(5): 188-191, doi: 10.13436/j.mkjx.202005060.

陈刚, 范宜仁, 李泉新. 2019. 顺煤层钻进随钻方位电磁波顶底板探测影响因素. 煤田地质与勘探, 47(6): 201-206, doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.06.030.

陈龙, 陈刚, 张冀冠. 2022. 矿用随钻动态方位伽马仪器的研制与应用. 煤田地质与勘探, 50(1): 86-91, doi: 10.12363/issn.1001-1986.21.10.0599.

陈泽平, 闫保永, 王国震, 等. 2022. 煤矿井下随钻测量技术研究现状 & 展望. 矿业安全与环保, 49(6): 130-134, doi: 10.19835/j.issn.1008-4495.2022.06.023.

底青云, 李守定, 付长民, 等. 2021. 基于云端大数据的智能导向钻井技术方法. 工程地质学报, 29(1): 162-170, doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0055.

高晓亮. 2023. 煤矿井下智能化钻探配套钻具研究进展. 煤田地质与勘探, 51(10): 156-166, doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.04.0214.

高永德, 王世越, 常波涛, 等. 2022. 基于随钻前视探测技术的异常高压气层综合识别方法. 天然气工业, 42(10): 98-106, doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.10.009.

葛亮, 胡泽, 陈平. 2013. 井下工程参数随钻测试系统设计. 传感器与微系统, 32(8): 105-107, doi: 10.13873/j.1000-97872013.08.002.

何胜林, 李明, 王光, 等. 2021. GeoSphere地质导向工具在深水气田水平井钻井中的应用. 天然气工业, 41(4): 91-96, doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.04.010.

胡斌, 马鸿彦, 黄秉亚, 等. 2021. 近钻头方位伽马随钻测量系统的研制与应用. 石油钻采工艺, 43(5): 613-618, doi: 10.13639/j.odpt.2021.05.009.

胡旭飞, 范宜仁, 吴非, 等. 2018. 随钻方位电磁波测井多参数快速反演. 地球物理学报, 61(11): 4690-4701, doi: 10.6038/cjg2018L0746.

黄伟传, 葛洪魁, 吴何珍, 等. 2012. 地震干涉处理方法在随钻地震资料处理中的应用. 石油地球物理勘探, 47(1): 32-36, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2012.01.012.

姜杰, 霍宇翔, 张颢曦, 等. 2023. 基于数字孪生的智能钻探服务平台架构. 煤田地质与勘探, 51(9): 129-137, doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.04.0179.

金朝娣, 能昌信, 刘玉强, 等. 2012. 小波域相关算法在随钻地震信号处理中的应用. 煤炭学报, 37(4): 621-626, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2012.04.002.

李彪, 李子轩, 彭文, 等. 2021. 利用地震勘探炮井随钻振动信号反

演近地表结构. 石油地球物理勘探, 56(6): 1214-1219, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2021.06.002.

李超岭, 李丰丹, 吕霞, 等. 2015. 地质调查智能空间体系与架构. 测绘学报, 44(S1): 143-151, 159, doi: 10.11947/j. AGCS. 2015. F074.

李洪强, 王瑞和. 2021. 近钻头伽马成像仪测量结果环境校正方法研究. 石油钻探技术, 49(3): 142-150, doi: 10.11911/syztjs. 2021024.

李术才, 李利平, 孙子正, 等. 2023. 超长定向钻注装备关键技术分析及发展趋势. 岩土力学, 44(1): 1-30, doi: 10.16285/j. rsm. 2022. 2027.

李术才, 王鑫, 郭伟东, 等. 2024. 钻爆法机械化施工隧道随钻地震波超前地质探测技术研究. 隧道建设(中英文), 44(4): 617-632, doi: 10.3973/j. issn. 2096-4498. 2024. 04. 001.

李希强, 陈浩, 何晓, 等. 2013. 横向各向同性地层中随钻声波测井模式波分析. 地球物理学报, 56(9): 3212-3222, doi: 10.6038/cjg20130933.

李中, 吴怡, 李辉, 等. 2025. 海洋智能钻井井下工程参数实时测量技术及工具研发. 钻采工艺, 48(1): 63-69, doi: 10.3969/J. ISSN. 1006-768X. 2025. 01. 08.

林昕, 苑仁国, 秦磊, 等. 2021. 地质导向钻井前探技术现状及进展. 特种油气藏, 28(2): 1-10, doi: 10.3969/j. issn. 1006-6535. 2021. 02. 001.

刘金锁, 刘盛东, 张维鑫, 等. 2019. 钻柱振动录井技术的时频分析方法研究. 煤炭科学技术, 47(7): 183-188, doi: 10.13199/j.cnki. cst. 2019. 07. 023.

刘乃震, 王忠, 刘策. 2015. 随钻电磁波传播方位电阻率仪地质导向关键技术. 地球物理学报, 58(5): 1767-1775, doi: 10.6038/cjg20150526.

刘清友. 2009. 未来智能钻井系统. 智能系统学报, 4(1): 16-20, doi: 10.3969/j. issn. 1673-4785. 2009. 01. 004.

刘西恩, 孙志峰, 仇傲, 等. 2022. 随钻四极子声波测井仪的设计及试验. 石油钻探技术, 50(3): 125-131, doi: 10.11911/syztjs. 2022058.

陆斌, 葛洪魁, 吴何珍, 等. 2010. 独立成分分析在随钻地震信号处理中的应用. 石油地球物理勘探, 45(1): 15-22, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2010.01.005.

陆承达, 甘超, 陈略峰, 等. 2023. 地质钻进过程智能控制研究进展与发展前景. 煤田地质与勘探, 51(9): 31-43, doi: 10.12363/issn. 1001-1986. 23. 06. 0338.

倪卫宁, 康正明, 路保平, 等. 2019. 随钻高分辨率电阻率成像仪器探测特性研究. 石油钻探技术, 47(2): 114-119, doi: 10.11911/syztjs. 2019005.

潘兴明, 石倩, 路胜杰, 等. 2018. 小井眼近钻头地质导向仪器的研制及应用. 钻采工艺, 41(1): 69-71, 87, doi: 10.3969/J. ISSN. 1006-768X. 2018. 01. 21.

冉恒谦, 张金昌, 谢文卫, 等. 2011. 地质钻探技术与应用研究. 地质学报, 85(11): 1806-1822, doi: 11-1951/P. 20111025. 0834. 007.

石少帅, 孙昊政, 李术才, 等. 2021. 页岩台车钻头破岩震源地震记录重构方法. 中南大学学报(自然科学版), 52(12): 4405-4414, doi: 10.11817/j. issn. 1672-7207. 2021. 12. 020.

石智军, 李泉新, 姚克. 2020. 煤矿井下智能化定向钻探发展路径与关键技术分析. 煤炭学报, 45(6): 2217-2224, doi: 10.13225/j.cnki. jecs. ZN20. 0336.

苏远大, 庄春喜, 唐晓明, 等. 2016. 一种刻槽式随钻声波测井隔声体的理论与实验研究. 地球物理学报, 59(12): 4521-4528, doi: 10.6038/cjg20161215.

苏义脑, 徐义, 盛利民, 等. 2010. 随钻地震技术研究进展. 石油钻采工艺, 32(5): 1-7, doi: 10.13639/j. odpt. 2010. 05. 033.

苏义脑. 2005. 地质导向钻井技术概况及其在我国的研究进展. 石油勘探与开发, 32(1): 92-95, doi: 10.3321/j. issn: 1000-0747. 2005. 01. 025.

孙平贺, 周生伟, 曹函, 等. 2023. 环境地质调查中智能直推随钻测量装置的应用研究. 煤田地质与勘探, 51(9): 156-163, doi: 10.12363/issn. 1001-1986. 23. 06. 0315.

童思友, 石辉, 徐秀刚, 等. 2023. PDC 钻头随钻地震技术在胜利油田某井区的应用探索. 中国海洋大学学报(自然科学版), 53(11): 152-161, doi: 10.16441/j.cnki. hdx. 20220274.

王达, 孙建华, 刘秀美. 2016. 近年来中国地质钻探技术标准制修订工作进展. 地质通报, 35(11): 1900-1905, doi: 10.3969/j. issn. 1671-2552. 2016. 11. 012.

王华, 陶果, 王兵, 等. 2009. 多极子随钻声波测井波场模拟与采集模式分析. 地球物理学报, 52(9): 2402-2409, doi: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2009. 09. 027.

汪海阁, 黄洪春, 毕文欣, 等. 2021. 深井超深井油气钻井技术进展与展望. 天然气工业, 41(8): 163-177, doi: 10.3787/j. issn. 1000-0976. 2021. 08. 015.

王磊, 范宜仁, 操应长, 等. 2020. 大斜度井/水平井随钻方位电磁波测井资料实时反演方法. 地球物理学报, 63(4): 1715-1724, doi: 10.6038/cjg2020M0617.

王瑞甲, 乔文孝, 鞠晓东. 2012. 利用随钻正交偶极子声波测井评价地层各向异性的数值研究. 地球物理学报, 55(11): 3870-3882, doi: 10.6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 11. 035.

王旭东, 陈平, 张杰. 2010. 井下钻井工程参数测量系统设计. 西南石油大学学报(自然科学版), 32(5): 155-160, doi: 10.3863/j. issn. 1674-5086. 2010. 05. 030.

王忠宾, 司垒, 魏东, 等. 2024. 煤矿防冲钻孔机器人全自主钻进系统关键技术. 煤炭学报, 49(2): 1240-1258, doi: 10.13225/j.cnki. jecs. 2023. 1379.

韦海瑞, 朱芝同, 吴川, 等. 2022. 近钻头随钻测量系统及其小型化设计关键技术分析. 钻探工程, 49(5): 156-162, doi: 10.12143/j. ztgc. 2022. 05. 021.

吴何珍, 葛洪魁, 杨顶辉, 等. 2010. 钻柱振动倒谱分析及其钻头源信号提取方法研究. 地球物理学报, 53(8): 1968-1975, doi: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2010. 08. 023.

吴金平, 陆黄生, 朱祖扬, 等. 2016. 随钻声波测井声系短节模拟样机试验研究. 石油钻探技术, 44(2): 106-111, doi: 10.11911/syztjs. 201602018.

吴思源, 李守定, 陈冬, 等. 2021. 大闭环伺服控制随钻智能导向钻井方法. 地球物理学报, 64(11): 4215-4226, doi: 10.6038/cjg202100449.

许连明. 2018. 全频率小波去噪方法在随钻四极横波测井中的应用. 地球物理学进展, 33(5): 2034-2040, doi: 10.6038/

pg2018BB0425.

许振浩,王朝阳,张津源,等. 2023. TBM 隧道掘进地质感知与岩-机数字孪生:方法、现状与数智化发展方向. 应用基础与工程科学学报, 31(6): 1361-1381, doi: 10.16058/j.issn.1005-0930.2023.06.002.

闫铁,许瑞,刘维凯,等. 2020. 中国智能化钻井技术研究发展. 东北石油大学学报, 44(4): 15-21, doi: 10.3969/j.issn.2095-4107.2020.04.003.

杨金显,蔡纪鹏. 2023. 基于磁-惯性黏菌算法的随钻地磁误差在线补偿. 煤田地质与勘探, 51(11): 169-178, doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.05.0301.

杨书博,乔文孝,赵琪琪,等. 2021. 随钻前视声波测井钻头前方声场特征研究. 石油钻探技术, 49(2): 113-120, doi: 10.11911/syztjs.2021020.

杨震,于其蛟,马清明. 2020. 基于拟牛顿法的随钻方位电磁波电阻率仪器响应实时反演与现场试验. 石油钻探技术, 48(3): 120-126, doi: 10.11911/syztjs.2020025.

杨志坚,齐悦,吴党辉,等. 2013. DQNBMS-1 型近钻头随钻测量系统的研制与应用. 石油钻采工艺, 35(1): 48-50, doi: 10.13639/j.odpt.2013.01.014.

岳喜洲,刘天淋,李国玉,等. 2022. 随钻方位电磁波测井响应快速正演方法与地质导向应用. 地球物理学报, 65(5): 1909-1920, doi: 10.6038/cjg2022P0233.

曾义金,王敏生,光新军,等. 2024. 中国石化智能钻井技术进展与展望. 石油钻探技术, 52(5): 1-9, doi: 10.11911/syztjs.2024081.

张梦柯,赵前华,罗斌,等. 2022. 钻头随钻地震技术综述. 地球物理学进展, 37(4): 1677-1688, doi: 10.6038/pg2022FF0514.

张炜,王小宁. 2021. 斯伦贝谢公司 NeoSteer 近钻头旋转导向系统. 测井技术, 45(5): 463.

张鑫鑫,梁博文,张晓龙,等. 2023. 智能钻井装备与技术研究进展. 煤田地质与勘探, 51(9): 20-30, doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.06.0324.

郑奕挺,方方,吴金平,等. 2020. 近钻头随钻伽马成像系统研制及应用. 东北石油大学学报, 44(3): 70-76, 126, doi: 10.3969/j.issn.2095-4107.2020.03.007.

周小慧,宋桂桥,张卫华,等. 2016. 随钻地震技术及其新进展. 石油物探, 55(6): 913-923, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2016.06.017.

朱日祥,金之钧,底青云,等. 2023. 智能导钻技术体系与相关理论研究进展. 地球物理学报, 66(1): 1-15, doi: 10.6038/cjg2022Q0730.

朱祖扬,陆黄生,张卫,等. 2015. 随钻声波测井声系短节的研制与测试. 石油钻探技术, 43(5): 83-87, doi: 10.11911/syztjs.201505014.

朱祖扬,吴海燕,李永杰,等. 2016. 钻铤结构对随钻声波测井响应的影响. 石油钻探技术, 44(6): 117-122, doi: 10.11911/syztjs.201606020.