



推荐阅读:

[智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径](#)

[煤炭安全高效综采理论、技术与装备的创新和实践](#)

[智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析](#)

[异步测时矿井人员精确定位方法](#)

[煤矿智能化——煤炭工业高质量发展的核心技术支撑](#)

[大倾角煤层综采工作面液压支架失稳机理与控制](#)

[工作面支架液压系统仿真与稳压供液技术](#)

[采煤机惯性导航定位动态零速修正技术](#)

[采煤机概念设计生态学模型构建与实现](#)

[5G 技术在煤矿智能化中的应用展望](#)

[煤矿机器人体系及关键技术](#)

[智能工作面多参量精准感知与安全决策关键技术](#)

[智慧矿山边缘云协同计算技术架构与基础保障关键技术探讨](#)

[智慧煤矿信息逻辑模型及开采系统决策控制方法](#)

[基于残差神经网络的矿井图像重构方法](#)



移动阅读

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

SHI Zhijun, LI Quanxin, YAO Ke. Development path and key technology analysis of intelligent directional drilling in underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2217-2224. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0336

煤矿井下智能化定向钻探发展路径与关键技术分析

石智军,李泉新,姚克

(中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077)

摘要:煤矿井下智能化定向钻探是坑道钻探发展的高级阶段,是一个涉及多学科领域的系统工程,具有显著的特殊性和独立性,服务于智能化开采的全过程,为煤炭资源安全、高效、绿色、智能开采提供着技术支撑和装备保障。描述了我国煤矿井下定向钻进技术与装备发展历程,从稳定组合钻具定向钻进到有线随钻测控定向钻进,再到无线随钻测控大功率定向钻进,坑道钻探技术的创新发展与装备的升级换代推动实现顺煤层定向钻孔深度从“1 000 m”跨越到“3 000 m”。明确了现阶段我国煤矿井下坑道钻探仍处于从机械化向自动化转变的发展定位,分析了智能化定向钻探面临的突出问题,提出了在实现自动化定向钻探的基础上向智能化定向钻探迈进的发展路径,归纳分析了自动化和智能化定向钻探的技术内涵和属性特征,自动化定向钻探强调钻探动作的自动控制执行,包括自动化定向钻机集成控制、多参数随钻测量信息融合、高精度导向控制、冲洗液循环自动控制等方面;智能化定向钻探强调钻探过程的智能最优化控制,包括智能分析与决策、低延时大容量数据传输、智能钻杆、钻探装备智能检测与诊断等方面。针对我国复杂多样的煤层赋存条件和不平衡发展的开采技术条件,建议分阶段、分区域、分层次推进煤矿井下智能化定向钻探探索与发展,并提出了智能化定向钻探亟待攻克的关键技术难题,包括自动化定向钻机研制、旋转导向钻进技术、地质导向钻进技术、随钻地质信息三维动态建模技术、智能化钻探数据库建立、钻孔事故预防与处理技术,同时介绍了“十三五”期间我国煤矿井下智能化定向钻探部分阶段性发展成果。

关键词:定向钻探;自动化;智能化;随钻测量

中图分类号:P634;TD67

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2020)06-2217-08

Development path and key technology analysis of intelligent directional drilling in underground coal mine

SHI Zhijun, LI Quanxin, YAO Ke

(Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: Intelligent directional drilling is the advanced stage of underground drilling development in underground coal mine, which is a system engineering involving multi-disciplinary fields, has significant particularity and independence, and serves the whole process of intelligent mining. It provides a technical and equipment support for the safe, efficient, green and intelligent mining of coal resources. First of all, the development process of directional drilling technology and equipment in underground coal mine is described, from the stable bottom hole assembly directional drilling to the wireline measurement while drilling (MWD) and to the wireless MWD with high-power. The realization of the depth of

收稿日期:2020-03-02 修回日期:2020-04-01 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045-003)

作者简介:石智军(1955—),男,陕西富平人,研究员,博士生导师。E-mail:shizhijun@cctegxian.co

in-seam directional borehole from “1 000 m” to “3 000 m” is promoted by the innovation and development of underground drilling technology and the replacement of drilling equipment. At present, the development orientation of underground drilling is still in the transition from mechanization to automation in underground coal mine in China. In this paper, the outstanding problems faced by intelligent directional drilling are analyzed, the development path of intelligent directional drilling based on the realization of automatic directional drilling is put forward, and the technical connotation and attribute characteristics of automatic and intelligent directional drilling are summarized and analyzed. The automatic directional drilling emphasizes the automatic control and execution of drilling actions, including the integrated control of automatic directional drilling rig, the information fusion of MWD with multi parameters, high-precision steerable control, and the automatic control of flushing fluid circulation, etc. The intelligent directional drilling emphasizes the intelligent optimization control, including intelligent analysis and decision, data transmission with low delay and large capacity, intelligent drill pipe, and the intelligent detection and diagnosis of drilling equipment, etc. In view of the occurrence conditions of complex and diverse coal seams and the mining technical conditions of unbalanced development, it is suggested to promote the exploration and development of intelligent directional drilling in underground coal mine by stages, regions and levels, and the key technical problems to be solved urgently are put forward, including the development of automatic directional drilling rig, the technology of rotary steerable drilling, the technology of geological steerable drilling, the 3D dynamic modeling technology of geological information with MWD, the establishment of intelligent drilling database, and the prevention and treatment technology of drilling accidents. Also, the phased development achievements of intelligent directional drilling in underground coal mine during the 13th five year plan are introduced.

Key words: directional drilling; automation; intelligence; MWD

改革开放以来,我国煤炭工业通过不断自主创新取得了长足的发展,煤炭开采经历从人工、机械化、自动化到初级智能化的转变,矿井生产规模、生产效率显著提升,我国相继建成上百个智能化工作面^[1-3]。伴随着采煤方法与工艺的进步,高产高效矿井对地质保障程度的要求不断提高,煤矿井下坑道钻探作为保障煤矿安全高效生产的重要组成部分,在瓦斯高效抽采、顶板超前疏排水、底板隔水层注浆加固、井下隐蔽致灾地质因素探查等方面发挥了重要作用^[4-5]。

我国煤矿井下坑道钻探技术与装备经历了从引进、消化吸收和再创新的过程,从 21 世纪初开始,逐步研发形成了适用于我国煤层赋存地质条件的随钻测量定向钻进技术与装备,实现了关键核心技术自主可控,整体达到国际领先水平^[6-7]。面对以信息化、智能化为特征的新一轮能源科技革命,为实现井下“机械化减人、自动化换人、智能化无人”的目标,减人增效驱动技术创新,发展智能钻探技术装备是大势所趋^[8]。我国《煤炭工业发展“十三五”规划》明确要求突破煤炭智能钻探关键技术;国家煤矿安全监察局公布的《煤矿机器人重点研发目录》,明确提出研发探水钻孔、防突钻孔、防冲钻孔机器人;国家重点研发计划“公共安全风险防控与应急技术装备”“智能机器人”重点专项对瓦斯防治钻孔机器人、防冲钻孔机器人等予以支持。

在智能化定向钻进技术与装备方面,国外的随钻测量仪器与系统、井眼轨迹控制技术、钻井控制系统等遥遥领先于我国,以旋转导向系统、地质导向系统、连续管钻进系统、高精度数据采集与传输系统、钻井自动控制系统等为主流技术装备得到快速发展并投入到实际钻井过程中,显著提高了钻井质量、降低了钻井成本^[9]。然而,国外先进的钻探技术手段主要运用于地面油气勘探开发领域,有关煤矿井下坑道钻探方面的研究相对较少。要将地面先进的技术装备应用于煤矿井下坑道钻探施工还存在极大困难^[10],煤矿井下特殊的生产作业环境决定了不可能照搬地面成熟的钻探技术装备。我国自 2005 年就开展了自动化远程控制钻机的研制工作,到目前为止,已实现井下远距离控制钻进、地面控制钻进、地面远距离自动控制钻进、遥控自动钻进^[11-13],但自动化、智能化水平仍然较低,未得到大范围推广应用。当前,我国在大力推行煤矿智能化建设,坑道钻探作为智慧煤矿的重要组成部分不可或缺,然而实现坑道定向钻探技术装备自动化、智能化发展路径还不明确、许多技术难题还未攻克。为此,笔者基于智慧煤矿建设对地质保障的关键需求,提出了煤矿井下智能化定向钻进技术的发展路径、关键核心技术及重点攻关方向。

1 煤矿井下定向钻进技术与装备发展历程

煤矿井下定向钻进技术具有钻孔深度大、钻孔轨迹控制精度高、覆盖范围广、钻孔利用率高等优势,已成为井下灾害防治和煤层气开发的重要技术手段,其

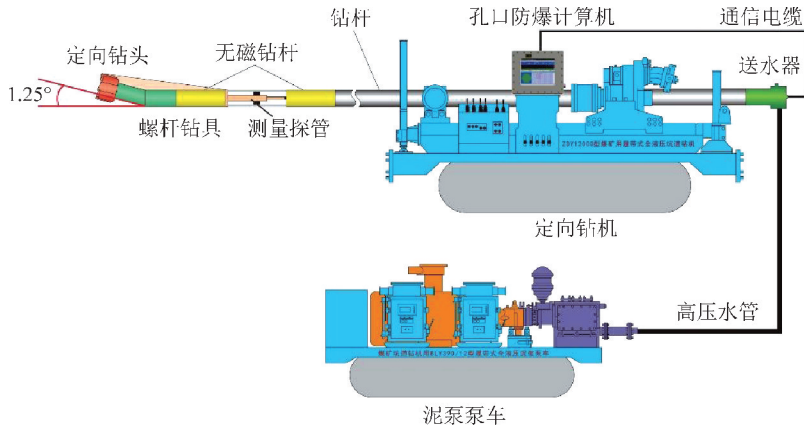


图1 随钻测量定向钻进系统连接示意

Fig. 1 Connection diagram of MWD directional drilling

我国煤矿进行随钻测量定向钻进技术与装备的研究应用最早始于20世纪90年代中期,淮南、抚顺、松藻等矿区陆续引进美国、澳大利亚的千米定向钻进技术与装备进行试验,但均未获得成功,这主要是由于当时的定向钻进技术与装备难以满足上述煤矿区复杂煤层条件下成孔需要,因此,我国暂时放弃了以孔底螺杆钻具造斜为主的定向钻进技术与装备,转向发展稳定组合钻具定向钻进技术与装备。2003年,鉴于国外定向钻进技术与装备的所取得了成功应用案例,亚美大宁煤矿在国内首先引进澳大利亚的VLD型定向钻机,在地质条件简单的煤层中成功施工了1 002 m的瓦斯抽采定向钻孔,标志着我国在煤矿井下成功应用随钻测量定向钻进技术的开端。“十一五”期间,我国开展了煤矿井下千米瓦斯抽采钻孔施工装备及工艺技术的研究工作,开发出滑动定向钻进技术和分支孔钻进工艺,研制出系列化坑道定向钻机及配套装备,在陕西彬长矿业集团有限公司大佛寺煤矿完成了最大顺煤层孔深1 212 m的定向钻孔,标志着我国自主研发的有线随钻测控千米定向钻进技术装备取得突破。“十二五”期间,在国家科技重大专项课题支持下,笔者牵头开展了煤矿井下大功率定向钻进技术与装备的研究工作,开发出复合定向钻进技术,研制出ZDY12000LD型大功率定向钻机、YHD2-1000(A)型有线随钻测量系统等装备,在晋煤集团寺河煤矿完成了最大顺煤层孔深1 881 m的定向钻孔,标志着我国自主研发的有线随钻测控大功率定向钻进技术装备站上新台阶。“十三五”期间,笔

系统连接如图1所示。我国煤矿井下随钻测量定向钻进技术与装备的发展经历了引进消化、自主研发到创新发展的阶段,逐步形成了具备自主知识产权的坑道定向钻探技术与装备体系,有力推动了井下坑道钻探技术装备的升级换代。

者提出并创建了3 000 m近水平超长孔钻进理论与技术体系,研制出ZDY15000LD型定向钻机、YHD3-3000型泥浆脉冲无线随钻测量系统等装备,在神东保德煤矿完成了最大顺煤层孔深3 353 m的贯通定向钻孔,创造了最新的顺煤层定向钻孔深度世界纪录,标志着我国自主研发的无线随钻测控大功率定向钻进技术装备实现创新引领发展。

但是我们应该清醒的认识到目前我国煤矿井下坑道钻探处于机械化向自动化转型的阶段,智能化水平和实用程度有待进一步提高,有许多关键技术仍待解决,煤矿井下智能导向工具的研发处于起步阶段、多参数随钻测量系统缺乏、井下高速稳定通讯技术仍有待攻克、智能化定向钻机可供选型的高性能和高可靠性防爆类元器件还非常有限,这都成为制约智能化定向钻探技术装备发展的瓶颈。

2 智能化定向钻探技术发展路径

由于煤矿井下受限巷道空间及高瓦斯、高粉尘、潮湿作业环境的限制,导致煤矿井下坑道钻探具有其特殊性并区别于地面钻探^[13],因此在煤矿井下实现智能化定向钻探的技术途径与地面存在显著差异。结合我国煤矿井下定向钻探施工特点及坑道钻探技术装备发展水平,笔者认为在煤矿井下自动化定向钻探的基础上进行智能化定向钻探创新探索是较为合理的发展路径,自动化定向钻探是实现智能化定向钻探的必要条件,提供重要支撑。

2.1 自动化定向钻探技术

自动化定向钻探技术是通过运用自动控制技术、传感器技术、导向钻进技术、随钻测量技术、远程监控技术、高效传输与通讯技术等,实现煤矿井下坑道自动化定向钻进和远程控制,尽量减少和降低施工人员的数量和人为干预程度,以达到降低工人劳动强度和施工安全风险、提高钻孔施工效率和质量的的目的。它高度集成了自动化定向钻机、旋转导向钻进系统、地质导向钻进系统、随钻测量工具、随钻测井工具、冲洗液循环自动控制系统等装备。由于我国煤层赋存地质条件复杂多样,各煤矿区对坑道钻探的需求也不尽相同,因此需要针对不同煤矿区煤层条件及矿井实际情况进行分层次、分阶段和分目标逐步推进自动化定向钻探技术向纵深发展,该技术应具有以下技术内涵与特征:

(1) 自动化定向钻机集成控制。

煤矿井下自动化定向钻机是实现自动化定向钻进的核心装备,通过自动化控制技术与电液比例控制技术、传感器检测技术、网络通讯技术、可视化监测技术、防爆控制设计技术的深度融合和高效集成^[14],实现井下自动装卸钻杆、自动钻进、自主调节、远程控制等功能,同时能满足爆炸性气体环境、封闭受限空间作业环境和复杂多样地质环境下作业要求。自动化定向钻机将在防突、探放水和防冲钻孔施工中发挥关键作用,可将施工人员从危险作业环境和繁重劳动中解放出来。

(2) 多参数随钻测量信息融合。

随钻测量工具、随钻测井工具主要用于实时采集钻孔轨迹参数、地质参数、工程参数,轨迹参数包括倾角、方位角和工具面向角,主要是为实现钻孔轨迹空间定位;地质参数包括自然伽马、电阻率、声波、岩性密度等,主要是为地层评价提供依据;工程参数包括孔底钻压、扭矩、钻头转速、外环空压力、温度等,主要是为反映孔底钻具的实际受力情况,然后通过数据传输通道将随钻测量信息上传至孔口防爆计算机处理分析,判断孔底钻具状态和钻遇地层特征,为钻孔轨迹精确调控提供依据,为地层快速评价提供参考,保证钻孔轨迹在煤层或目标岩层中有效延伸,提高目标地层钻遇率,同时也提升钻进的安全性能^[15]。

(3) 基于预定轨迹的高精度导向钻进技术。

结合煤矿井下旋转导向钻进与地质导向钻进的优势进行钻孔轨迹的高精度导向控制是自动化定向钻进的显著特征。旋转导向钻进可实现钻孔轨迹的随钻测量和控制,能够在钻杆柱旋转状态下连续和实时调控钻孔轨迹,确保实钻轨迹与预定轨迹在偏差范

围内,具有钻进效率高、轨迹平滑、延伸能力强、孔内清洁度高的优势^[16],可满足井下超长和超大直径定向钻孔施工需要。地质导向钻进可实现地质参数的实时测量与地层评价,它是随钻测量地质信息为基础,通过不断修正和精确控制钻孔轨迹命中目标,实现最优化导向钻进^[17]。

(4) 冲洗液循环自动处理系统。

根据钻孔施工工艺和钻遇地层的不同,实时采集钻孔返渣中的固相含量、密度、黏度等参数,然后通过自动控制系统调整和改变离心机的运行参数,确保离心机始终处于最优化工作状态,经处理后的冲洗液能满足井下正常钻进需要,从而减少冲洗液的消耗量,尤其在北方干旱缺水的煤矿区,发展冲洗液循环自动控制系统具有重要意义。此外,煤矿井下定向钻进技术在水敏性或破碎性地层中适应性差,利用冲洗液循环自动处理系统可建立控压主动护壁模式,解决近平定向钻孔无液柱压力条件下复杂地层孔壁失稳难题。

2.2 智能化定向钻探技术

智能化定向钻探是自动化钻探技术在实际应用过程中的高度体现。自动化定向钻进侧重于钻探动作的自动控制执行,而智能化定向钻探侧重于钻进过程中的智能最优化控制,它是基于大数据、人工智能、互联网、自动控制、新材料等学科发展及其与现代化煤矿生产技术的深度融合的结果,具有智能监测、闭环控制、精准导向等显著特征。具体实施过程是通过建立智能化定向钻机与孔底智能钻探工具之间双向传输通道进行随钻测量信息的实时采集和高速上传,经过智能分析决策后进行指令下达,控制孔底导向工具完成动作执行。

煤矿井下智能化定向钻探需从钻进过程智能分析与决策、信息高速稳定传输、智能钻具研制等方面开展攻关,进一步提高煤矿井下钻探技术装备的智能化程度^[12],同时需结合煤炭安全高效绿色开采对坑道钻探的需求,从提高定向钻进的地层适应性、煤岩识别精度、坚硬岩层钻进效率、高位定向钻孔成孔直径等方面入手,进一步提高煤矿井下智能化定向钻探技术装备解决煤矿实际生产问题的能力。智能化定向钻探技术应具有以下技术内涵与特征:

(1) 智能分析与决策。

智能决策相当于“大脑”,智能化定向钻探就是要构建“参数测量—智能决策—控制执行”闭环系统。根据实时获取的孔底钻探参数,在远程决策中心采用高效的人工智能算法对随钻测量轨迹参数、地质参数和工程参数进行智能分析,进而评价钻进工艺参

数、调整钻孔轨迹调控策略,实现钻探过程最优化控制^[18]。国外的大型油服公司通过建立的远程决策中心对钻井数据进行智能分析和动态评价,确定最佳的钻井方案,目前已得到推广应用。

(2) 低延时、大容量数据传输。

煤矿井下坑道钻探设备分布分散,且搬家移动频繁,同时定向钻孔施工过程中产生大量数据。长期以来,无线信号传输受井下设备和煤壁反射的干扰,导致钻探设备之间的互联互通和钻孔数据共享受到极大限制。具备低延时、大容量数据传输能力是井下智能化定向钻探的显著特征,5G 通讯及物联网技术的快速发展,使井下钻探装备群之间的互联互通及其与地面技术支持中心的信息高速传输成为可能,为井下智能化定向钻探参数实时监测、信息高效传输和地面远程决策指令下达提供有效途径^[19]。

(3) 智能钻杆技术。

孔底随钻测量仪器与井下智能化定向钻机和地面远程决策中心之间的通信效率及质量是实现智能化定向钻探的决定性因素。随着孔底随钻测量数据量的增加,传统信号传输方式的容量和速率远不能满足实际生产需要,制约着智能化定向钻探技术发展。智能钻杆技术的发明被视为钻探技术的一场革命,能实现多参数随钻测量信息上传、控制指令下达和孔底供电等功能,具有传输高速稳定、数据量大的特点^[20]。目前,地面智能钻杆传输速度已可达到 Mb/s 级别,远远高于目前煤矿井下普遍采用的中心通缆随钻测量钻杆。国外已开发出成熟的智能钻杆,并应用现场钻井过程中,而国内也已开始智能钻杆的研究探索。

(4) 钻探装备智能检测与诊断。

煤矿井下钻探装备数量庞大,且自动化定向钻机具有十分复杂的机械、液压系统和电气系统,因此设备的维护保养工作量巨大,亟需建立远程钻探装备智能检测与诊断方法与标准。在智能化定向钻机系统中集成智能监测和诊断技术是保障钻探装备可靠运行的关键,依靠传感器技术和振动测试技术等对钻机的电液控制系统、机械系统进行故障诊断分析,提高钻探设备的检测和诊断效率。井下智能机器人、VR/AR、无人机等技术的快速发展也为智能远程钻探设备故障检测和诊断创造了有利条件,保障井下智能化定向钻探装备稳定运行。

3 智能化定向钻探关键技术

智能化定向钻探是煤矿井下坑道钻探的高级阶段。目前,煤矿井下随钻测量定向钻进技术与装

备^[21]在中硬煤层、碎软煤层、复杂顶底板岩层取得了较好的应用效果。但由于煤矿井下特殊作业环境及现阶段技术发展水平的限制,距离实现智能化定向钻探还有相当长的路程要走。实现自动化定向钻探是进行智能化定向钻探的关键,目前亟需在以下核心技术方面取得突破:① 自动化定向钻机研制;② 旋转导向钻进技术;③ 地质导向钻进技术;④ 随钻地质信息三维动态建模技术;⑤ 智能化钻探数据库;⑥ 钻孔事故预防与处理技术。

3.1 自动化定向钻机研制

煤矿井下定向钻探面对复杂多变的地质体,定向钻孔施工受多方面因素制约,对自动化定向钻机的研制提出严峻挑战。我国学者在自动化定向钻机研制方面进行了长期不懈探索,在钻机整体紧凑布局与结构设计、自动装卸钻杆系统设计、电液控制系统设计、钻进参数监测与工况识别系统设计、防爆控制系统设计等方面取得了一定的研究成果。

“十三五”期间,中煤科工集团西安研究院有限公司开发出 ZDY22000LDK 自动化定向钻机,如图 2 所示,钻机最大输出扭矩 22 000 kN,最大起拔/给进力 300 kN,钻机主体部分履带车体平台上集成设计主机、操纵台、泵站、防爆电脑、钻杆上卸机械手、辅助搓杆机构、液压吊装机构等关键部件。

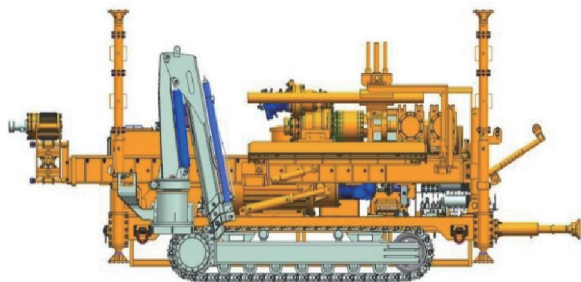


图2 ZDY22000LDK 自动化定向钻机

Fig. 2 Automatic directional drilling rig of ZDY22000LDK

钻机采用两列布局形式,分别将主机和操纵台布置与履带车体上方的两侧,符合煤矿井下现场钻进施工需要;创新采用液驱机械手装卸钻杆,实现中间装卸钻杆,采用直角坐标式轨迹控制方式,建立机械手抓取钻杆过程的轨迹控制模型,通过位移传感器和压力传感器实现钻杆装卸过程的精确、连贯控制;创新设计了液压吊装系统,具备 0~360° 内的旋转、水平伸缩、角度调节等功能,可实现钻进施工过程中钻杆连续机械化自动装卸需要,以及现场大直径钻具的机械化吊装;结合旋转导向和地质导向定向钻进施工工艺特点,进行钻机液压控制系统的方案设计和元器件性能参数的匹配计算,形成了基于电液联合控制的智能化钻机用负荷传感恒功率开式控制系统,实现系统

节能设计的目标。

为进一步提高自动化定向钻机智能化程度,亟待在以下方面进行突破:① 钻机自主巡航定位功能开发;② 钻进工况自动感知与自适应钻进;③ 钻进过程智能分析与决策;④ 高性能液压元件与传感器的研发;⑤ 钻进系统动力学分析与预测;⑥ 智能化定向钻进工厂化作业模式构建。

3.2 旋转导向钻进技术

旋转导向钻进技术自20世纪末研发成功以来,因其显著的技术优势在地面油气勘探开发中应用广泛,有效缩短了建井周期、降低了建井成本,已成为国外主流的钻井技术。国内相关专家学者在此方面也开展了研究工作,在关键技术上取得突破性进展,但与国外技术水平相比还存在较大差距。煤矿精准高效开采^[22]对井下定向钻孔的轨迹控制质量、钻进效率、成孔直径等提出更高要求,然而地面先进的旋转导向钻进系统难以直接应用于煤矿井下坑道钻探施工中,因此需要重新开发设计矿用旋转导向钻进系统。

“十三五”期间,在国家科技重大专项的支持下,中煤科工集团西安研究院有限公司开发出第1代矿用旋转导向钻进系统,攻克了小直径导向机构设计、信号双向传输、孔内发电机供电等技术难题,在导向机构、测量系统、动力系统、防爆结构进行创新设计。旋转导向钻具采用推靠式结构设计,钻进过程中,导向机构依靠孔内发电机供电,推靠巴掌在钻具旋转同时伸缩,直接给钻头提供侧向力,控制钻孔轨迹沿预定方向延伸,实现旋转钻进过程中的钻孔轨迹人工控制。设计的旋转导向工具外径133 mm,造斜率不大于 $10^\circ/30$ m,可实现井下直径200 mm定向钻孔施工。

目前,矿用旋转导向工具已完成样品的加工试制,准备进行工业性试验,其可靠性和稳定性还有待进一步检验。在以下方面还仍需开展攻关:① 近水平条件下旋转导向钻进轨迹预测与控制技术;② 导向机构连续稳定供电技术;③ 导向机构控制策略优化;④ 有线传输信号影响因素与衰减机制。

3.3 地质导向钻进技术

地质导向钻进技术是在随钻测井系统的基础上发展起来的,主要是通过钻孔地质参数的测量,实时获取钻遇地层的地质参数并进行地层评价,最后根据评价结果控制导向工具钻进,从而提高目标地层钻遇率。国外的随钻伽马测井、电阻率测井、成像测井、核磁共振测井等高端测量技术已成为地质导向钻进的主要技术手段,并且可实现多项技术的集成应用。国

内的地质导向钻进技术的发展远落后于国外水平,尤其在高精度地质信息拾取、高可靠性解释软件等方面^[23]。

煤矿井下薄煤层瓦斯抽采、顶底板含水层疏放、智能化开采等对地层识别精度和识别效率的要求不断提高。在薄煤层瓦斯抽采钻孔施工中,传统的定向钻进技术开分支作业困难,钻孔轨迹在煤层中难以长距离延伸,造成钻孔深度浅、成孔率低,可采用方位伽马测井技术识别煤层界面,提高钻孔在薄煤层中延伸长度;在顶底板砂岩含水层钻进过程中,可采用电阻率测井技术保证钻孔轨迹在砂岩含水层中延伸,提高钻孔疏放水作业的有效性;智能化开采对煤层识别精度要求越来越高,可采用地质导向钻进技术施工长距离定向钻孔进行工作面超前煤岩识别,为智能化开采煤层识别提供技术支持。然而,在煤矿井下煤系地层中实现地质导向钻进存在诸多困难,定向钻孔直径相较于地面钻井小,对仪器的防爆要求高,且煤系地层物性参数差异较小、信号辨识效果差。此外,煤矿井下随钻测量仪器一般安装在螺杆马达之后,钻头位置与随钻测量探管之间存在一定距离,随钻测量仪器盲区过长,不能及时判断出目标地层信息,钻头容易穿出目标层,导致频繁调整钻孔轨迹。因此,需要研发设计适应煤系地层的矿用地质导向钻进系统。

“十三五”期间,中煤科工集团西安研究院有限公司在煤系地层识别判据建立、地层物性参数采集技术、小直径动态方位伽马测量短节设计、煤系地层识别技术等方面开展持续攻关,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,实现了随钻动态方位伽马探边,测量短节外径42 mm、地层识别精度达到0.3 m、测量范围(0~350) API。

亟待在以下方面进行进一步突破:① 多参数随钻测井技术;② 孔内多源信息双向高速可靠传输技术;③ 近钻头数据传输技术;④ 先进的随钻测量信息解释技术;⑤ 强振动环境下测量短节可靠设计技术。

3.4 随钻地质信息三维动态建模技术

基于随钻地质信息的三维动态模型构建是实现煤矿井下智能化定向钻探的基础,由于煤矿井下地层和构造信息的模糊性和不确定性,给定向钻孔设计、施工和评价带来很大的困难。利用随钻测量系统探查沿钻孔轨迹延伸方向的地层特性、构造分布、水害和瓦斯赋存等地质信息,同时结合地面煤层勘探信息、井下采掘部署及已施工钻孔信息,建立可视化三维动态模型,并根据随钻测量信息反馈和钻孔揭露的信息对地质模型进行不断修正,以更好地指导钻孔设

计、施工、预测和评价,破解二维状态下随钻测量信息集成能力差、展示效果差的难题。然而,现阶段煤矿井下随钻地质信息三维动态建模技术研究处于初级阶段,只简单实现了对钻孔轨迹的三维可视化控制与显示,缺乏与采掘模型、地质模型、随钻测量数据之间的深度融合,导致不同来源的多类型信息之间割裂,难以有效指导钻孔施工。

亟待进一步突破的关键技术包括:①多类型、多层次数据挖掘与分析技术;②复杂地质信息智能感知与动态反馈技术;③三维动态地质模型软件平台建立;④基于随钻测量信息三维地质模型自动更新技术。

3.5 智能化钻探数据库的建立

煤矿井下坑道钻探智能化的发展离不开信息化的支撑,随着各煤矿企业信息网络的快速发展,在煤矿井下钻孔施工过程中积累了海量的钻孔施工数据。但现阶段钻孔数据信息大部分处于割裂状态,难以共享,且传统的数据处理方法效率低、集成困难,造成海量的钻孔施工数据处于“休眠”状态。随着大数据、云计算等技术的快速发展,通过建立专业的钻孔施工数据库系统,对钻具组合参数、随钻测量工程参数、随钻测量地质参数、钻孔轨迹参数等进行智能分析,找出各数据之间的关联规律,可为地质模型的建立与校正、钻孔轨迹设计与调整、钻具组合参数优化、钻进过程优化、钻孔施工评价等提供技术指导。

亟待突破的关键技术包括:①面向海量钻进信息的数据处理平台构建;②生产过程信息的数据融合技术。

3.6 钻孔事故预防与处理技术

煤矿井下定向钻孔施工过程中,由于客观地质条件或主观决策失误等因素影响,会造成复杂的钻孔事故,常规的强力起拔、套洗打捞等事故处理方法,费时费力,严重的甚至会造成孔内定向钻具无法捞出。建立基于孔口钻机和随钻测量系统联合监测预警机制是预防钻孔事故的关键,为钻孔事故的预防和处理提供可靠决策依据。

亟待突破的关键技术包括:①智能化定向钻机防卡钻监测技术;②钻孔卡钻程度智能判识与处理技术;③专用智能化解卡工具的研制。

4 结 论

(1)在创新驱动引领、行业发展需求导向、国家政策推动下,煤矿井下智能化定向钻探技术的发展势不可挡。目前我国煤矿井下坑道钻探仍处于从机械化向自动化转型的阶段,定向钻探技术装备的智能化

水平较低,但随着人工智能、大数据、云计算、5G通讯等先进技术与煤矿井下坑道钻探技术装备的深度融合,必将推动井下坑道钻探迈向智能化。

(2)由于我国煤层赋存条件差异化较大,各煤矿区开采技术条件发展不均衡,同时受行业整体智能化发展水平限制,决定了智能化定向钻探的实现不可能一蹴而就,建议分阶段、分区域、分层次进行煤矿智能化定向钻探探索与发展。基于目前我国煤矿井下坑道钻探技术发展现状,提出了智能化定向钻探的发展路径,在实现自动化定向钻探的基础上进行智能化定向钻探探索是较为合理的发展途径,自动化定向钻探强调钻探动作的控制执行,智能化定向钻探强调钻探过程的智能最优化控制。

(3)煤矿井下智能化定向钻探不是将地面已有的成熟钻探技术装备应用于井下钻探,它是一个涉及多学科领域的系统工程,具有显著的独立性和特殊性。智能化定向钻探的发展必须集多学科交叉融合,开展关键核心技术联合攻关,发展和完善煤矿井下自动化定向钻机、旋转导向钻进技术、地质导向钻进技术、随钻地质信息三维动态建模技术、智能化数据库建立和钻孔事故预防与处理技术,最终实现煤矿智能化定向钻探的目标,为推进我国煤矿高质量发展提供重要技术支撑。

参考文献(References):

- [1] 王国法,刘峰,孟祥军,等.煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J].煤炭科学技术,2019,47(8):1-36.
WANG Guofa, LIU Feng, MENG Xiangjun, et al. Research and practice on intelligent coal mine construction (primary stage) [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 1-36.
- [2] 王国法,张德生.煤炭智能化综采技术创新实践与发展展望[J].中国矿业大学学报,2018,47(3):459-467.
WANG Guofa, ZHANG Desheng. Innovation practice and development prospect of intelligent fully mechanized technology for coal mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3): 459-467.
- [3] 王国法,赵国瑞,任怀伟.智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析[J].煤炭学报,2019,44(1):34-41.
WANG Guofa, ZHAO Guorui, REN Huaiwei. Analysis on key technologies of intelligent coal mine and intelligent mining [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 34-41.
- [4] 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.
SHI Zhijun, YAO Ke, TIAN Hongliang, et al. Present situation and prospect of directional drilling technology and equipment while drilling measurement in underground coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5): 22-28.
- [5] 李泉新,石智军,史海蛟.煤矿井下定向钻进工艺技术的应用[J].煤田地质与勘探,2014,42(2):85-88,92.

- LI Quanxin, SHI Zhijun, SHI Haiqi. The application of directional drilling technology in coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(2): 85-88, 92.
- [6] 石智军, 李泉新, 姚克, 等. 煤矿井下随钻测量定向钻进技术与装备[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [7] 方俊, 谷拴成, 石智军, 等. 煤矿井下随钻测量信号泥浆脉冲传输特性研究与试验[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3604-3613.
FANG Jun, GU Shuancheng, SHI Zhijun, et al. Transmission characteristics of mud pulse measurement signal while drilling in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3604-3613.
- [8] 李泉新, 石智军, 田宏亮, 等. 我国煤矿区钻探技术装备研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(2): 1-6, 12.
LI Quanxin, SHI Zhijun, TIAN Hongliang, et al. Progress in the research on drilling technology and equipment in coal mining areas of China[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(2): 1-6, 12.
- [9] 石林, 汪海阁, 纪国栋. 中石油钻井工程技术现状、挑战及发展趋势[J]. 天然气工业, 2013, 33(10): 1-10.
SHI Lin, WANG Haige, JI Guodong. Current situation, challenges and developing trend of CNPC's oil & gas drilling[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(10): 1-10.
- [10] 葛世荣, 胡而已, 裴文良. 煤矿机器人体系及关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 455-463.
GE Shirong, HU Eryi, PEI Wenliang. Classification system and key technology of coal mine robot[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 455-463.
- [11] 辛德忠, 龚宪生, 王清峰. 基于负载自适应的煤矿用钻机卡盘动态夹紧理论[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 498-504.
XIN Dezhong, GONG Xiansheng, WANG Qingfeng. Dynamic clamping theory of chuck used in collieries drilling rig based on load self-adaptation[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 498-504.
- [12] 王清峰, 陈航. 瓦斯抽采智能化钻探技术及装备的发展与展望[J]. 工矿自动化, 2018, 44(11): 18-24.
WANG Qingfeng, CHEN Hang. Development and prospect on intelligent drilling technology and equipment for gas drainage[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(11): 18-24.
- [13] 张锐, 姚克, 方鹏, 等. 煤矿井下自动化钻机研发关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(5): 59-63.
ZHANG Rui, YAO Ke, FANG Peng, et al. Key technologies for research and development of automatic drilling rig in underground coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5): 59-63.
- [14] 方鹏, 姚克, 王松, 等. 煤矿井下定向钻机钻进参数监测系统研制[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(12): 124-130.
FANG Peng, YAO Ke, WANG Song, et al. Development of drilling parameter monitoring system for directional drilling rig in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(12): 124-130.
- [15] 蔡军, 张恒荣, 曾少军, 等. 随钻电磁波电阻率测井联合反演方法及其应用[J]. 石油学报, 2016, 37(3): 371-381.
CAI Jun, ZHANG Hengrong, ZENG Shaojun, et al. Joint inversion method of electromagnetic wave resistivity logging while drilling and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 371-381.
- [16] 张绍槐. 论智能钻井理论与技术及其发展[J]. 天然气工业, 2008, 28(11): 3-7, 131-132.
ZHANG Shaohuai. Smart drilling technologies and their development[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(11): 3-7, 131-132.
- [17] 吴雪平. 页岩气水平井地质导向钻进中的储层“甜点”评价技术[J]. 天然气工业, 2016, 36(5): 74-80.
WU Xueping. Sweet spot evaluation technology in the geosteering drilling of shale gas horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(5): 74-80.
- [18] LÜ Z, SONG X, GENG L, et al. Optimization of multilateral well configuration in fractured reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 172: 1153-1164.
- [19] 王国法, 赵国瑞, 胡亚辉. 5G技术在煤矿智能化中的应用展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 16-23.
WANG Guofa, ZHAO Guorui, HU Yahui. Application prospect of 5G technology in coal mine intelligence[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 16-23.
- [20] 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.
HU Yongjian, HUANG Yanfu, LIU Yansheng. Joint simulation design of the channel of high-frequency magnetic coupling wired drill pipe[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(4): 475-481.
- [21] 石智军, 董书宁, 杨俊哲, 等. 煤矿井下3 000 m顺煤层定向钻孔钻进关键技术[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 1-7.
SHI Zhijun, DONG Shuning, YANG Junzhe, et al. Key technology of drilling in-seam directional borehole of 3 000 m in underground coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6): 1-7.
- [22] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1-7.
YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1-7.
- [23] 杨传书, 张好林, 肖莉. 自动化钻井关键技术进展与发展趋势[J]. 石油机械, 2017, 45(5): 10-17.
YANG Chuanshu, ZHANG Haolin, XIAO Li. Key technical progress and development trend of automated drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(5): 10-17.