

文章编号:1671-251X(2020)10-0009-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17662

煤矿坑道智能化钻探技术发展框架分析

李泉新, 刘飞, 方俊

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)



扫码移动阅读

摘要:坑道智能化钻探的显著特征在于智能钻具的研发与应用和钻探数据的获取与分析,但现阶段我国煤矿坑道智能化钻探的研究基础较为薄弱,坑道智能化钻探缺乏科学化、精细化的技术手段,且缺乏系统性发展框架。针对该问题,阐述了我国煤矿坑道智能化钻探技术研究现状,从自动化钻机、导向钻进技术、孔内多参数获取、智能分析决策等方面总结了煤矿坑道智能化钻探发展成果与不足;在此基础上提出了煤矿坑道智能化钻探技术发展框架,指出应围绕精准导向系统、数据测量系统、数据传输系统、智能决策系统和自动控制系统,打造从孔底到孔口、从井下到地面的一体化坑道智能化钻探平台,构建“参数测量-智能决策-控制执行”坑道钻进过程闭环控制系统;通过数据传输系统将孔底随钻测量参数实时传输至地面远程数据支持中心,采用人工智能算法对地质参数、几何参数和工程参数进行协同分析,并实时更新三维可视化地质模型,制定钻进工艺参数和钻孔轨迹智能调控策略,控制井下智能钻机工作。

关键词:煤矿坑道钻探;智能化钻探;发展框架;智能钻机;精准导向系统;孔内多参数获取;钻孔轨迹智能调控;坑道钻进闭环控制

中图分类号:TD712 文献标志码:A

Analysis of development framework of intelligent coal mine underground drilling technology

LI Quanxin, LIU Fei, FANG Jun

(Xi'an Research Institute of China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an 710077, China)

Abstract:Development and application of intelligent drilling tool and acquisition and analysis of drilling data are outstanding characteristics of intelligent underground drilling. However, research foundation of intelligent underground drilling in China's coal mine is weaker at the present stage, and scientific and elaborate technical means of intelligent underground drilling is lacked as well as systematic development framework. For the above problems, the research status of intelligent underground drilling technology in China's coal mine is expounded, and development achievements and shortcomings of intelligent coal mine underground drilling are summarized from the aspects of automatic drilling rig, guided drilling technology, multi-parameter acquisition in hole, intelligent analysis and decision-making, etc. On this basis, the development framework of intelligent coal mine underground drilling technology is proposed, and it is pointed out that the development framework should be focused on accurate guidance system, data measurement system, data transmission system, intelligent decision-making system and automatic control system, so as to create an integrated and intelligent underground drilling platform from hole bottom to hole ostiole and from underground to ground. Meanwhile, a closed-loop control system of parameter measurement, intelligent decision-making and controlling execution for underground drilling process

收稿日期:2020-09-09;修回日期:2020-09-26;责任编辑:李明。

基金项目:“十三五”国家科技重大专项资助项目(2016ZX05067-001-003)。

作者简介:李泉新(1980—),男,黑龙江齐齐哈尔人,副研究员,博士,主要从事煤矿坑道钻探技术与装备研究工作,E-mail:liquanxin@cctegxian.com。

引用格式:李泉新,刘飞,方俊.煤矿坑道智能化钻探技术发展框架分析[J].工矿自动化,2020,46(10):9-13.

LI Quanxin, LIU Fei, FANG Jun. Analysis of development framework of intelligent coal mine underground drilling technology[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(10): 9-13.

should be constructed, which real-timely transmits measurement parameters while drilling in hole bottom to remote ground data support center through data transmission system, cooperatively analyzes geological parameters, geometrical parameters and engineering parameters by use of artificial intelligence algorithms, and updates 3D visual geological model real-timely, so as to draw up intelligent adjustment and control strategies of drilling technology parameters and borehole trajectory for controlling intelligent underground drilling rig to run.

Key words: coal mine underground drilling; intelligent drilling; development framework; intelligent drilling rig; accurate guidance system; multi-parameter acquisition in hole; intelligent adjustment and control of borehole trajectory; closed-loop control of underground drilling

0 引言

我国煤炭资源开采深度、开采强度逐步增加,矿井灾害更趋多样化和复杂化,井下坑道钻探作为深部煤炭资源开采防灾、减灾、治灾技术体系的重要环节不可或缺,广泛应用于瓦斯、水害和冲击地压防治等方面。

经过 40 余年的发展,我国煤矿坑道钻探技术装备经历了从无到有、由弱向强的历史性跨越,整体达到国际领先水平^[1]。现阶段,我国大力推进煤矿智能化建设,八部委联合下发《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》,为煤矿坑道智能化钻探的创新发展指明了方向。作为煤炭地质保障系统的重要组成部分,煤矿坑道智能化钻探在矿井灾害防治、智能开采透明工作面构建等方面将发挥关键作用。我国专家学者在煤矿坑道智能化钻探方面进行了长期探索,取得了一定成就。石智军等^[2]在总结我国煤矿坑道钻探技术发展现状的基础上,提出了坑道智能化钻探发展路径,强调在实现自动化钻探的基础上进行智能化钻探发展探索,并提出了智能化钻探亟待攻克的技术瓶颈。王清峰等^[3]针对瓦斯抽采智能化钻探技术装备发展的迫切需求,总结了我国瓦斯抽采智能化钻探技术装备的研究成果与存在的不足,提出了从自主感知、智能控制、自主导航等方面发展智能化钻探技术装备。张锐等^[4]、方鹏等^[5]开发了具备远程遥控、自主钻进和自动装卸钻杆等功能的自动化钻机,并针对钻机参数监测系统和多功能电液控制系统进行了创新设计。董洪波等^[6]研制了一套适用于煤矿井下坑道钻机的电控系统,提高了钻机自动化程度。但目前我国煤矿坑道钻探装备的智能化水平仍然较低,自动化钻机在我国煤矿井下未得到大范围推广应用。

坑道智能化钻探与常规钻探方法的重要区别在于智能钻具的研发与应用和钻探数据的获取与分析^[7-8]。智能钻具主要包括智能钻杆、智能钻头和旋转导向装置,其使得孔底与孔口的信息稳定、高速传

输成为可能,同时能大幅提高钻进效率和精度,已成为坑道智能化钻探的重要组成部分。然而现阶段我国煤矿坑道智能化钻探的研究基础较为薄弱,坑道智能化钻探缺乏科学化、精细化的技术手段。传统的数据传输方式传输容量小、速率低,难以满足钻探数据实时上传和指令下达的需要,导致煤矿坑道钻探智能分析、智能决策缺乏数据支撑。另外,精准导向系统的研究还处于起步阶段,有待进一步突破。鉴此,笔者提出了煤矿坑道智能化钻探的发展框架,探讨了实现煤矿坑道智能化钻探的重点攻关方向。

1 煤矿坑道智能化钻探技术研究现状

我国煤矿坑道钻探经历了从回转钻进、稳定组合定向钻进、随钻测量定向钻进到自动化钻进的发展阶段^[9]。

2005 年起,中煤科工集团重庆研究院有限公司率先开展了煤矿坑道自动化钻进技术的研究,开发出具备自动装卸钻杆、全自动钻进、远程遥控、智能防卡钻等功能的 ZKYL 系列坑道自动化钻探装备^[10],并采用遥控自动化钻机在淮南矿业(集团)有限责任公司谢桥煤矿和平顶山天安煤业股份有限公司八矿进行了工业性试验,显著降低了工人劳动强度,减少了施工作业人数。2008 年起,中煤科工集团西安研究院有限公司开展了自动化钻机研发工作,解决了钻杆机械化自动抓取、程序控制自动钻进、钻进参数监测、数据远程传输、系统故障诊断等难题,研究形成了 ZDY 系列机电液一体化自动化钻机^[4],并开发了基于光纤陀螺的开孔定向仪,实现了对钻机姿态参数的精确测量^[11]。2020 年,该公司采用自主研发的 ZDY4300LK 自动化钻机在陕西彬长大佛寺矿业有限公司进行工业性试验,取得了良好的应用效果,对促进煤矿“机械化换人,自动化减人”起到了积极推动作用。但目前自动化钻机主要用于施工顺煤层钻孔和底板穿层钻孔,钻机的自主化程度、智能化控制水平仍然较低,主要体现在以下 4 个方面。

数据测量系统主要用于孔底地质参数、几何参数和工程参数测量^[8]:通过地质参数测量获取地层岩性、地层界面和地层富水特征等参数,实现煤岩层精确辨识,大幅提升目标地层钻遇率,满足薄煤层瓦斯抽采、富水层疏放和煤系地层精确探测等定向钻孔施工需要;通过几何参数测量获取钻孔轨迹参数和导向工具姿态参数,为钻头钻进方向调整提供依据,使钻孔尽可能按照设计轨迹延伸;通过工程参数

测量实时获取孔底钻压、转矩、横向振动、轴向振动、环空压力、温度及转速等参数,综合评估孔内工况环境和钻具状态,为钻进工艺参数调整提供重要数据支撑。同时依托高可靠性数据解释软件对随钻测量数据进行集中处理,提取关键有效信息,建立基于多维多参数联合反演的模型,实现钻进过程的动态预测与评价。

利用数据测量系统还可获取目标区域内点、线等关键空间信息和断层、陷落柱等重要地质信息,指导建立三维可视化地质模型,并综合运用实时传输的随钻测量信息对该地质模型进行动态修正,以更好地指导钻孔施工,服务于矿井透明工作面构建和智能化开采。

2.3 数据传输系统

孔底测量数据的高速上传和孔口指令的快速下达是实现坑道智能化钻探的保障。目前煤矿井下数据传输方式包括有线传输和无线传输 2 种。有线传输方式传输速率快、稳定性高,但依赖于专用通缆钻杆,信号传输容量小;泥浆脉冲无线随钻传输方式利用正脉冲进行信号传输,传输速率低;电磁波无线随钻传输方式易受地层电阻率影响。为实现信息的高速稳定双向传输,需在进一步完善现有数据传输系统的基础上,开发新的数据传输系统,具体如图 2 所示。开发矿用连续脉冲无线传输系统,解决现有泥浆脉冲无线随钻传输方式速率低的问题。开发抗高阻电磁波无线传输系统,解决现有电磁波无线随钻传输方式受强噪声干扰难题。开发智能钻杆高速传输系统^[13],其由过线钻杆和磁耦合接头组合而成,采用磁耦合无线方式实现过线钻杆间数据传输,具有传输容量大、速率高、密封性好等特点,可保证多参数随钻测量数据实时上传和控制指令快速下达。国外智能钻杆高速传输技术研究起步早、发展快,实测传输速率达到 Mbit/s 级别,目前已初步实现商业化应用,国内在该领域也取得一定进展和成绩。

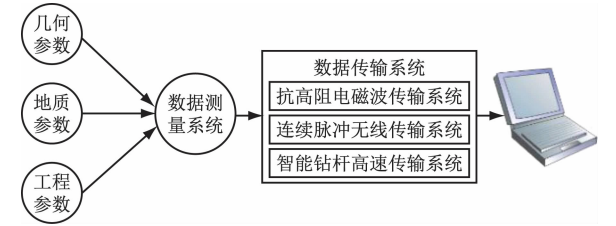


图 2 智能化钻探数据传输系统

Fig. 2 Intelligent drilling data transmission system

井下钻探设备群、井下钻探设备与地面子系统、地面子系统之间的数据传输也是智能化钻探数据传输系统的重要组成部分,要求数据传输系统满足对大容量数据传输和钻探设备低时延控制需求。5G

技术为钻探设备互联互通、地面远程控制和数据共享提供基础支撑^[14-15]。当前我国全面推进 5G 技术在煤矿井下的工业化应用,其应用场景不断得到拓展,为坑道智能化钻探的发展提供了机遇。

2.4 智能决策系统

智能决策系统是实现坑道智能化钻探的核心。目前坑道智能化钻探过程控制方法比较单一,自动化钻进方法依赖于程序自动化控制,缺乏对坑道环境、钻进工况的智能感知,因而无法实现钻探过程智能决策控制。需要从钻进过程智能模拟、智能协同分析、钻进过程人机交互、远程决策控制等方面开展技术攻关,构建“人-机-环境”于一体的坑道钻探智能决策系统,如图 3 所示。

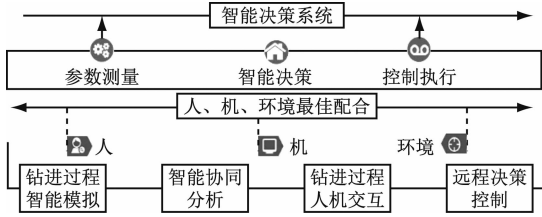


图 3 坑道钻探智能决策系统

Fig. 3 Intelligent underground drilling decision-making system

(1) 钻进过程智能模拟。建立坑道钻机-钻具与地层的耦合模型,开展钻头破岩机理、钻柱动力学及孔壁失稳机理模拟研究;建立煤系地层内测量信号传输模型,开展有线及无线随钻测量信号衰减机制模拟研究。

(2) 智能协同分析。采用人工智能、大数据等技术对随钻测量信息进行协同分析,获取有价值的信息,实现钻探数据的深度挖掘和多源融合分析,为智能诊断、风险预判和智能决策提供数据支撑。

(3) 钻进过程人机交互。面对复杂多变的地质体,人在坑道智能化钻探作业中所起的作用不可或缺。以人为中心,采用人机交互技术实现地面远程数据支持中心-智能钻机-精准导向系统之间的有效互动,提高坑道钻探的可靠性和安全性。

(4) 远程决策控制。建立远程数据支持中心,在地面依托大数据分析处理平台进行数据处理,然后进行信息快速反馈,进一步提高坑道钻探精确控制能力。

2.5 自动控制系统

自动控制系统主要用于控制智能钻机,可实现钻机自主导航定位、钻杆自动装卸、自动钻进施工和智能检测与诊断等功能。

(1) 钻机自主导航定位。针对煤矿井下非结构化地形、狭窄巷道空间限制^[16],开发基于激光制导、惯性导航、激光雷达、传感器、热成像等技术联合的

钻机自主导航系统,结合钻机姿态自动调控技术,实现钻机自行走、自定位、自平衡等功能。

(2) 钻杆自动装卸。开发连续自动装卸系统,优化钻杆输送路径,进一步提高装卸钻杆的精度和效率。

(3) 自动钻进施工。开发大功率防爆电力直驱技术、智能传感技术和钻进参数智能决策协调控制技术,实现井下钻进过程人工智能控制、钻进动作精准自执行、钻进操作自主设定与自适应决策。

(4) 智能检测与诊断。建立智能钻机检修管理平台,通过对智能钻机进行实时监测、在线诊断、风险管理、检修决策等,实现智能钻机全寿命周期管理,如图4所示。

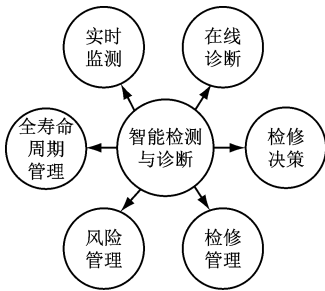


图4 智能检测与诊断

Fig.4 Intelligent detection and diagnosis

3 结论

(1) 坑道智能化钻探的显著特征在于智能钻具的研发与应用和钻探数据的获取与分析,矿用高可靠性传感器、液压元器件等基础零部件及测量仪器的缺乏是制约坑道智能化钻探发展的重要瓶颈。

(2) 煤矿坑道智能化钻探技术发展框架应围绕精准导向系统、数据测量系统、数据传输系统、智能决策系统和自动控制系统开展攻关,打造从孔底到孔口、从井下到地面的智能化钻探平台及技术体系。

(3) 人工智能、大数据、5G等先进技术在井下应用领域的不断拓展,必将推动实现煤矿坑道智能化钻探,这依赖于基础理论研究的深入和核心技术装备的突破。

参考文献(References):

[1] 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.
SHI Zhijun, YAO Ke, YAO Ningping, et al. 40 years of development and prospect on underground coal mine tunnel drilling technology and equipment in China[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 1-34.

[2] 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.

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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 董洪波,姚宁平,马斌,等.煤矿井下坑道钻机电控自动化技术研究[J].煤田地质与勘探,2020,48(3):219-224.
DONG Hongbo, YAO Ningping, MA Bin, et al. Research on electronically controlled automation technology of underground drilling rig for coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(3): 219-224.

[7] 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.
ZHANG Shaohuai. Smart drilling technologies and their development[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(11): 3-7.

[8] 王敏生,光新军.智能钻井技术现状与发展方向[J].石油学报,2020,41(4):505-512.
WANG Minsheng, GUANG Xinjun. Status and development trends of intelligent drilling technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(4): 505-512.

[9] 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.
SHI Zhijun, LI Quanxin, YAO Ke, et al. Technology and equipment of measuring directional drilling in underground coal mine[M]. Beijing: Science Press, 2019.

[10] 王清峰,陈航.基于路径规划的大容量钻杆自动输送

- 系统研究[J]. 矿业安全与环保,2020,47(1):1-6.
- WANG Qingfeng, CHEN Hang. Research on automatic conveying system of large-capacity drill pipe based on path planning [J]. Mining Safety & Environmental Protection,2020,47(1):1-6.
- [11] 雷晓荣.“孔-井-地”一体化智能钻进系统及关键技术[J]. 煤炭科学技术,2020,48(7):274-281.
- LEI Xiaorong. "Hole-well-ground" integrated intelligent drilling system and key technologies [J]. Coal Science and Technology,2020,48(7):274-281.
- [12] 张建明,曹明,陈晓明. 煤矿井下数字化钻进技术发展现状与趋势[J]. 煤炭科学技术,2017,45(5):47-51.
- ZHANG Jianming, CAO Ming, CHEN Xiaoming. Development status and tendency on digitalized drilling technology in underground coal mine[J]. Coal Science and Technology,2017,45(5):47-51.
- [13] 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.
- [14] 孙继平. 煤矿智能化与矿用 5G[J]. 工矿自动化,2020,46(8):1-7.
- SUN Jiping. Coal mine intelligence and mine-used 5G [J]. Industry and Mine Automation,2020,46(8):1-7.
- [15] 孟庆勇. 5G 技术在煤矿井下应用架构探讨[J]. 工矿自动化,2020,46(7):28-33.
- MENG Qingyong. Probe on 5G architecture applied in coal mine underground [J]. Industry and Mine Automation,2020,46(7):28-33.
- [16] 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.