

煤矿井下瓦斯抽采钻孔全流程 自动钻进工艺技术

姚克, 宋海涛, 张幼振, 韩健, 方鹏,
彭光宇, 沙翠翠, 刘祺, 王松, 邢望
(中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要:煤矿井下瓦斯抽采钻孔施工目前存在自动化程度低、工序可控性差、安全风险高、劳动强度大、生产效率低等问题,自动化、智能化是煤矿安全生产的核心发展方向。基于煤矿安全生产对井下瓦斯抽采钻孔减人、增效、强安、降本的要求,开展了煤矿井下瓦斯抽采常规钻孔的全流程多机协同自动化钻进技术研究。研究团队深入分析了钻孔施工、钻渣清运、筛管下放及带压注浆等核心工序的功能需求,在此基础上提出了一套完整的自动化施工模式与技术方案。该方案旨在指导现场作业,实现各工序在有限人员配置下的时序化、线性化自动执行,从而显著减少作业人员、降低劳动强度,并升级全过程的智能监测系统。通过制定并实施标准化的作业工艺与规范,该技术成功替代了传统作业模式。现场试验初步验证了其有效性,在减员和降低劳动强度方面成效显著。然而,为全面推广应用,仍需持续改进,以进一步提升成套装备的可靠性、稳定性及钻进效率等关键性能指标。

关键词:瓦斯抽采钻孔;自动化钻进;全流程;坑道钻机;煤矿井下

中图分类号:TD712⁺.6;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)06-0091-06

Full-process automated drilling technology for gas drainage boreholes in underground coal mines

YAO Ke, SONG Haitao, ZHANG Youzhen, HAN Jian, FANG Peng,
PENG Guangyu, SHA Cuicui, LIU Qi, WANG Song, XING Wang
(CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710077, China)

Abstract: The construction of gas drainage boreholes in underground coal mines currently faces challenges such as low automation, poor process controllability, high safety risks, high labor intensity, and low production efficiency. Automation and intelligence represent the core development direction for safety in coal mine production. Driven by the industry's requirements for reducing personnel, increasing efficiency, enhancing safety, and lowering costs in gas drainage operations, this study investigates the technology of full-process, multi-machine collaborative automated drilling for conventional boreholes. The research team conducted an in-depth analysis of the functional requirements of core processes, including drilling construction, cuttings removal, screen pipe installation, and pressurized grouting. Based on this analysis, a complete automated construction model and technical solution were proposed. This solution aims to guide on-site operations, enabling the sequential and linear automated execution of each process with a limited personnel configuration, thereby significantly reducing the number of operators, lowering labor intensity, and upgrading the intelligent monitoring system for the entire process. By establishing and implementing standardized

收稿日期:2025-05-21; **修回日期:**2025-07-31 **DOI:**10.12143/j.ztgc.2025.06.011

基金项目:中煤科工西安研究院(集团)有限公司自筹资金项目“井下瓦斯抽采钻孔施工作业全流程多机协同成套技术装备研究”(编号:2020XAYJS02)

第一作者:姚克,男,汉族,1973年生,研究员,探矿工程专业,长期从事钻探技术与装备研发和工程管理工作,陕西省西安市高新区西部大道199号,yaoke@cctegxian.com。

引用格式:姚克,宋海涛,张幼振,等.煤矿井下瓦斯抽采钻孔全流程自动钻进工艺技术[J].钻探工程,2025,52(6):91-96.

YAO Ke, SONG Haitao, ZHANG Youzhen, et al. Full-process automated drilling technology for gas drainage boreholes in underground coal mines[J]. Drilling Engineering, 2025,52(6):91-96.

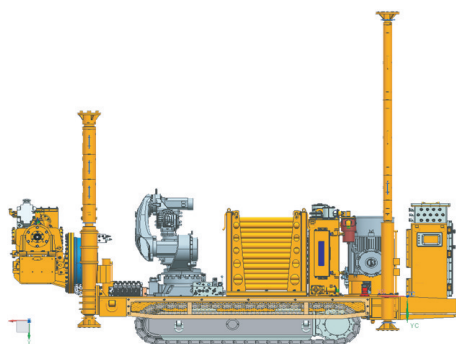


图3 主机及结构布局示意

Fig.3 Main machine and structure

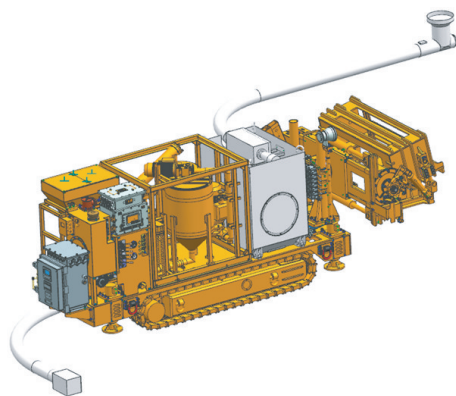


图4 辅机及结构布局示意

Fig.4 Auxiliary equipment and structure

孔位,通过遥控或程序控制自主动作,实现钻机自动稳固,开孔高度、钻孔倾角和方位角的自动调节,快速确定钻孔施工孔位,一定程度上可以缩短辅助工作时间,节省人工和时间成本。

实现自动开孔定位需要多传感器协同运行,而煤矿井下坑道钻机工作环境及施工工况相对复杂,粉尘、运行振动、孔内交变冲击等都对自动控制技术的可靠性提出了新的要求,现有传感器普遍存在尺寸大、规格少、种类不齐等问题^[5]。为此,通过对传感器、电控元件优选,合理布局及防护,以及结构和算法的不断优化,进一步提升传感器与钻机的适配性,提高系统运行的稳定性和可靠性。

为实现自动开孔,开展煤矿井下高精度导航定位系统研究,重点解决环境建模与导航定位、路径规划与决策控制以及导航定位硬件系统平台搭建等问题;通过变幅装置和稳固装置电控元件与机械元件的结构融合设计,实现方位角、主轴倾角 $\pm 90^\circ$ 范围内调节;通过研究多传感器融合的钻具姿态监测技术以及位姿自动补偿技术,解决钻进过程中扰

动导致的姿态偏差和自动补偿问题;开发基于多传感器的控制算法,优化控制功能对传感器精度要求的同时实现高精度自动控制,实现执行机构的精准反馈闭环控制,提高自动控制的时效性,确保寻位时间短、开孔偏差小、方位和倾角精度高。

2.2 自动加卸钻杆

自动加卸钻杆是自动化钻机首要的也是最基本的功能。钻机用途和工艺配套不同,导致钻机的结构布局和加杆方式有着明显的差别。100 m左右孔深的顺层钻孔和穿层钻孔普遍采用短钻杆,易实现自动化加杆,巷道钻场的适应性也更强,且自动化钻机施工角度及方位全覆盖,调节范围达 $\pm 90^\circ$,钻杆仓容量大于120 m等。相比目前机械臂翻转式加杆,采用基于防爆伺服电机的六自由度机械手加杆是更为先进的加杆方式,能更好地简化加杆步骤,提高效率。同时,进一步优化机械结构、目标识别方式、运行精度,降低综合成本,提高适用性和钻杆加卸效率。

在不同方位和倾角下,钻机位置差异较大,要求机械手覆盖面足够广,井下空间有限,在快速运行过程中合理避开上顶立柱、转盘、举升机构等障碍是机械手设计的重点。通过优化设计和模型仿真,确定钻进机构与相关部件合理布局,制定机械手加杆最优路径,避免干涉,一方面缩小机械手运行占用空间,另一方面通过机械机构优化为机械手留出工作核心区域空间,进一步提高加杆效率,加杆时长和卸杆时长不超过40 s。

2.3 自适应钻进

在对钻进设备参数采集和监测的基础上,研究钻进过程中工况与地层判别方法。针对常规钻进工艺特点,进行基于钻进过程中钻孔供水压力、供风压力以及钻压、钻速、扭矩、转速等参数变化与钻进工况关系的算法研究,准确识别钻进过程中出现地层变化时的钻进状态,实现煤岩识别,以及卡钻、断钻具事故等工况识别,建立钻进过程中异常工况与响应策略间的映射关系,实现对钻进地质异常带、构造带自动报警、自动处理,为进一步制定钻进控制策略奠定基础。根据钻进过程中地层变化信息和钻进数据的反馈,研究融合钻机控制参数、钻进速度与钻进施工目标的动态自适应控制方法,制定钻压、转速等参数控制策略,实现自适应钻进。

鉴于含煤地层的复杂性和监测数据的离散性

与模糊性,分析钻进过程中钻压、钻速、扭矩、转速、泵压、泵量等参数变化特征,结合钻进工艺的特点,分析钻进参数在时间和空间上的变化规律,通过特征提取与模式识别技术,提高监测数据的可靠性和可用性^[10-11]。

2.4 自动排渣

按照施工地层,井下钻孔方式主要分为顺层钻孔和穿层钻孔,通常都用清水排渣,但在孔壁容易坍塌失稳且排渣不畅的松软煤层,采用空气钻进可获得较高的成孔率和成孔效果^[12-13]。针对顺层钻孔,钻渣通过自动排渣系统运至皮带机、矿车或岩粉池等,实现钻渣不落地;针对穿层孔,钻渣通过自动排渣系统进行水渣分离,再运至皮带机、矿车或岩粉池等,实现钻渣不落地。自动排渣系统要有一定的钻渣转运能力和中转临时存储能力。

自动排渣系统由孔口收集装置、管路输送装置、煤水分离装置、中转箱组成。

(1)孔口收集装置具有负压抽吸瓦斯、转排煤水混合物和防止瓦斯喷孔等功能,可在孔口快速拆装。孔口收集装置集成安装在钻机前端,钻机搬迁移位或钻孔倾角调节时均与钻机同时动作,免去安拆孔口收集装置的工序。根据钻进需求设计煤水分离装置,能够将孔内返出的煤水混合物快速分离,集成在辅机部分。钻进时孔口收集装置始终与孔壁紧密贴合,确保钻渣全部进入其中。

(2)收集后的钻渣通过管路输送装置,该装置转运距离 ≥ 10 m。装置具备输送煤水混合物和松散固料的功能,通过电力驱动挠性螺旋排渣装置,解决长距离输送的技术难题,同时具有固体通过能力强、占用空间小、现场布置灵活、运行高效稳定等特点,不会因钻渣输送不畅影响钻进施工。

(3)中转箱具有不小于单孔排渣量的储存能力,同时具有将其内部储存的钻渣自动转运至矿车或皮带的能力。中转箱内部结构需特殊设计,具备配合管路输送装置自动转运内部钻渣的功能。煤水分离装置可将孔内返出的携带钻渣的冲洗液进行快速的固液分离,分离出的钻渣进一步转运,实现钻进现场“渣水不落地”。

2.5 自动下管

近些年开展的干式螺旋钻进、中风压螺旋钻进、气动定向钻进等研究证明,在钻完孔后下入带孔眼的PVC筛管是透气性差、易塌孔的松软煤层中

保证抽采效果的实用工艺方法,在两淮矿区等软煤地层应用较为普遍^[14]。

现阶段钻孔施工过程中筛管下放及封孔全部依靠人工进行,效率低且存在安全隐患,能够实现筛管连续自动下放及自动封孔的现场自动化施工需求迫切。开发具有杆仓、分度、推送、传送、夹持及封孔功能的筛管连续下放及新型封孔装置系统,实现从筛管的连续自动化下放,到钻孔的自动化高效封堵的一体化运行,提高下管安全性。

自动下筛管装置包括筛管存储及加管单元、下放单元及夹持单元,筛管存储及加管单元将筛管从存储单元自动进入下放状态,经由送管单元下入钻孔内,通过夹持单元保证前后两根筛管插接的可靠性。

封孔装置采用多通道结构,外形规则,规格统一,无需人工安装囊袋,提高了辅助工序的自动化程度,能完成座封、注浆、排气等多个动作,实现带压封孔的同时满足自动封孔要求。

2.6 自动封孔注浆

当前注浆作业以人工操作为主,浆液质量无法保证,压力流量由人工调节,存在注浆质量不可控、注浆参数及成本控制无法量化和记录等诸多问题。煤矿井下移动式自动化制浆注浆系统可完成注浆材料从粉灰到浆的破、制、注、控集成化运行,实现制浆注浆控压控量、一机多孔作业,提高注浆封孔效率,高效利用注浆材料,保证封孔质量。研究基于煤矿井下潮湿环境应用的粉体材料精准计量和输送技术,满足井下制浆要求的可调配射流混浆技术,综合多相流可变工况注浆泵送系统等关键技术,开发集粉料输送、连续制浆与精准注浆一体化集成装备。系统包括上料系统、制浆系统、注浆系统、计量控制系统及相应的管道系统等,通过对注浆压力和流量的监控,及时感知封孔区域的变化情况,对浆液动力指标和密度连续自主调整,实施分区域注浆,最终实现浆液在裂隙中流动性和凝固性的动态平衡,得到最优的封孔质量。

2.7 智能化协同控制与故障诊断系统

针对全流程瓦斯抽采钻孔中钻进成孔、钻渣清运、筛管下放和注浆封孔等工序,研发智能化协同控制与故障诊断系统,如图5所示。建立总线网络实现数据传输与共享,包括有线通讯和无线通讯,以协同控制器为核心,以各装备的子控制系统的

CAN总线为基础,实现子控制系统间的数据上传及指令下发,最终实现整套装备各工序控制系统的信

息融合、智能协同运行、故障诊断和健康管理。

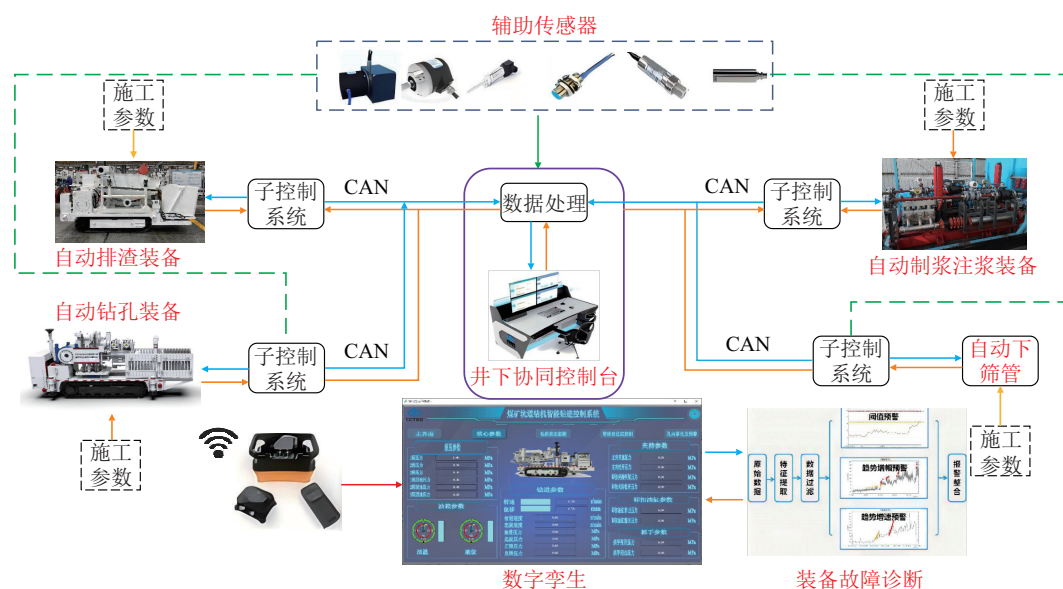


图5 智能协同控制与故障诊断系统示意

Fig.5 Schematic diagram of intelligent collaborative control and fault diagnosis system

(1)协同控制系统主要包括多机协同流程控制台、数字孪生集控显示系统以及施工全流程化辅助传感器等,通过对全流程作业的施工逻辑处理和施工作业中的分级故障处理算法,最终实现装备智能化自主工序切换。系统预留以太网总线为转换媒介,利用数字化技术,将各成套装备系统的施工信息数据发送至协同控制管理监控中心,以满足地面对全流程施工的数据共享及协同控制需求。

(2)故障诊断系统通过特征量提取和数据处理算法,建立典型故障诊断模型和算法,实现基本故障和典型故障预警及处理方法指引^[15]。进一步完善整体装备故障诊断信息库,提供多装备的故障诊断与自主处理,最终实现全流程钻进装备运行状态监测与智能维护。

3 示范应用

成套技术装备在某矿21136底抽巷开展现场试验应用,如图6所示,初步验证了各组成部分及工艺的性能和整体适配性,取得了一定的效果,整体技术较传统施工设备和工艺有很大程度提高,但也需要在装置的可靠性、运行的稳定性和效率的提升上进一步改进完善。

(1)累计施工穿层卸压钻孔超过100个,总进尺



图6 井下钻场施工照片

Fig.6 Photos of underground drilling site construction

超过9000 m,最大钻孔深度115 m,最大单班进尺106 m,钻机台月效率超过2500 m/台月。

(2)试验了自动开孔、自动加卸杆、自适应钻进功能,钻机能够实现倾角自动调节、遥控操作稳固钻机、机械手自动加卸钻杆、钻进参数自动调节和自动扫孔。

(3)主机与辅机配合开展联合试验,现场验证了自动下筛管、自动制注浆、自动排渣三部分的功能结构和系统适应性。

4 结论

(1)根据现场钻孔施工作业工序与自动化目标形成的全流程自动钻进工艺体系,可以实现钻机自动开孔、自动加卸钻杆、自适应钻进、自动排渣、自

动下筛管和自动封孔注浆,减少了作业人员,降低了劳动强度,钻进成孔效率、成孔率和封孔质量进一步提升,提高煤矿瓦斯抽采效率的同时保障了作业安全。

(2)通过施工中的多机协同一键自动作业、点动单机作业以及人工中断操作,可以实现完整的钻孔施工自动化连续作业,智能化协同控制与故障诊断系统具备相关施工装备运行状态及节点监测、远程操作、故障报警等多种功能。

(3)煤矿井下钻孔施工是个复杂的过程,全流程多机协同自动钻进需要长期持续迭代升级,目前减少作业人员和降低劳动强度的成效明显,但还需不断提升成套技术装备的可靠性、稳定性、钻进效率等关键性能指标。

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] 姚宁平,姚亚峰,方鹏,等.我国煤矿坑道钻探装备技术进展与展望[J].钻探工程,2021,48(1):81-87.
YAO Ningping, YAO Yafeng, FANG Peng, et al. Advances and outlook of coal mine tunnel drilling equipment and technology[J]. Drilling Engineering, 2021,48(1):81-87.
- [3] 张幼振,范涛,阚志涛,等.煤矿巷道掘进超前钻探技术应用与发展[J].煤田地质与勘探,2021,49(5):286-293.
ZHANG Youzhen, FAN Tao, KAN Zhitao, et al. Application and development of advanced drilling technology for coal mine roadway heading[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5):286-293.
- [4] 姚宁平,吴敏,陈略峰,等.煤矿坑道钻进过程智能优化与控制技术[J].煤田地质与勘探,2023,51(9):1-9.
YAO Ningping, WU Min, CHEN Luefeng, et al. Intelligent optimization and control technology for drilling process of coal mine tunnels[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(9):1-9.
- [5] 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.
- [6] 姚克.煤矿井下智能化钻机及问题探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(10):48-52,71.
YAO Ke. Intelligent drilling rig for coal mines and discussion on problems[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and

- Tunneling), 2020,47(10):48-52,71.
- [7] 王清峰,陈航,周涛.煤矿井下自动化钻进技术及装备的发展历程与展望[J].矿业安全与环保,2022,49(4):45-50.
WANG Qingfeng, CHEN Hang, ZHOU Tao. Development history and prospect of automatic drilling technology and equipment in coal mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022,49(4):45-50.
- [8] 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.
- [9] 王力,姚宁平,姚亚峰,等.煤矿井下碎软煤层顺层钻完孔技术研究进展[J].煤田地质与勘探,2021,49(1):285-296.
WANG Li, YAO Ningping, YAO Yafeng, et al. Research progress of drilling and borehole completion technologies in broken soft coal seam in underground coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2021,49(1):285-296.
- [10] 张先韬,秦怡.自动钻进在线监测与数据采集软件开发[J].煤矿机械,2019,40(1):169-171.
ZHANG Xiantao, QIN Yi. Development of online monitoring and data collecting software for automatic drilling[J]. Coal Mine Machinery, 2019,40(1):169-171.
- [11] 叶嗣喧.基于神经网络的坑道近水平定向孔轨迹预测研究[J].钻探工程,2024,51(3):104-110.
YE Sixuan. Study of the predicting model for directional drilling trajectory controlling based on neural network in tunnel[J]. Drilling Engineering, 2024,51(3):104-110.
- [12] 张宏钧,姚克,张幼振.松软煤层螺旋钻杆与压风复合排渣钻进技术装备[J].煤矿安全,2017,48(7):99-102.
ZHANG Hongjun, YAO Ke, ZHANG Youzhen. Spiral drill pipe and composite slag discharge drilling technology and equipment in soft coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2017,48(7):99-102.
- [13] 张永将,季飞.顺层钻孔水力割缝煤渣运移及排渣工艺技术研究[J].矿业安全与环保,2022,49(4):106-111.
ZHANG Yongjiang, JI Fei. Study on coal slag transport and discharge technology of hydraulic slotting in drilling along coal seam[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022,49(4):106-111.
- [14] 金新.两淮矿区复杂煤矿瓦斯抽采PVC筛管完孔技术研究[D].成都:成都理工大学,2017.
JIN Xin. Study on the technology of gas drainage PVC sieve pipe hole in complex coal mine in two Huai Mining Area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [15] 张幼振,刘若君,姚克,等.煤矿坑道钻机状态监测与故障诊断技术研究现状及展望[J].科学技术与工程,2023,23(7):2683-2693.
ZHANG Youzhen, LIU Ruojun, YAO Ke, et al. Research status and development of condition monitoring and fault diagnosis of coal mine tunnel drilling rig[J]. Science Technology and Engineering, 2023,23(7):2683-2693.

(编辑 王跃伟)