

煤矿井下智能化钻机及问题探讨

姚克

(中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西西安 710077)

摘要: 煤矿井下智能化钻探技术及装备是煤炭生产企业急需的先进技术装备。文章介绍了相关科研院所及企业在研制自动化钻机方面取得的一些阶段性成果。由于钻探施工环节多、工艺复杂、现场条件多变,许多关键技术仍未解决,智能化程度、可靠性、适应性和实用性还需进一步提高。文章分析了钻机装备适应性、工艺复杂性及需求的多样性问题、防爆问题和钻杆连接及钻杆补充问题。指出需要开展导航与定位、程序控制自动钻进、自动装卸钻杆、参数实时监测及传输等技术攻关,从而达到智能钻机功能实用、施工高效及性能稳定的目标。同时指出真正意义上的智能化钻机大量应用还需要持续的研发投入和数年的时间过程,并提出逐步按全自动钻机阶段、智能化钻机阶段和钻孔机器人 3 个阶段分级实现井下智能化钻探较为适宜。

关键词: 全自动钻机;智能化钻机;钻孔机器人;煤矿井下钻探

中图分类号: P634.3⁺¹ **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-7428(2020)10-0048-05

Intelligent drilling rig for coal mines and discussion on problems

YAO Ke

(Xi'an Research Institute Co., Ltd., CCTEG, Xi'an Shaanxi 710077, China)

Abstract: The intelligent drilling technology and equipment for coal mine is the advanced technology and equipment that is badly needed by coal enterprises. This paper introduces some milestone achievements in drilling automation made by research institutes and enterprises. However, many key technologies are still unsolved due to the multitude of drilling steps, the complicated drilling process and the changing site conditions, and the intelligent degree, reliability, adaptability and practicability need to be further improved. The adaptability of drilling rig equipment, the complexity of drilling processes and the diversity of demand, explosion-proof and drill pipe make-up and supply are analyzed. It is pointed out that research efforts should be put on navigation and positioning, program control, automatic drilling, automatic loading and unloading of drill pipes, real-time monitoring and transmission of parameters to achieve the goal of practical function, high efficiency and stable performance of intelligent drilling rig. At the same time, it is pointed out that it takes continuous research and development investment and years of time to make intelligent drilling rig commercially available, and that it is proposed to realize intelligent drilling step by step in three stages: automatic drilling stage, intelligent drilling stage and drilling robot.

Key words: automatic drilling rig; intelligent drilling rig; drilling rig; drilling for coal mines

0 引言

煤矿井下钻探装备作为煤矿安全高效生产的重要保障,始终发挥着不可或缺的作用。井下钻探对钻机、配套钻具、仪器、泥浆泵、钻探工艺技术和经验有比较高的要求,具有很强的专业性^[1-2]。目前钻孔施工的设备以全液压钻机进行机械化作业,由于

钻孔施工量带来的大量钻杆装卸成为首要迫切解决的问题,通常操作人员 3~5 人,劳动强度大,而且大量的常规钻孔钻进状态和效果全凭操作施工人员经验判断,自动化和智能化程度极低,而且在易突煤层和具有冲击地压煤层钻孔施工过程中存在着较大的安全隐患^[3-5]。

收稿日期:2020-01-07;修回日期:2020-06-30 DOI:10.12143/j.tkge.2020.10.009

基金项目:“十三五”国家科技重大专项(编号:2016ZX05045-003-001)

作者简介:姚克,男,汉族,1973 年生,研究员,从事煤矿井下钻探技术与装备的研发和研究管理工作,陕西省西安市锦业一路 82 号,yaoke@cctegxian.com。

引用格式: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.

井下智能化钻探的概念多年前就被国内外专家学者及从业者提出,但受限于当时的技术水平,未能形成科学的理论体系和有效的解决方案。当前,国家安全生产监督管理总局主导的“科技强安”行动要求以自动化控制减少人为操作,大力提高煤矿安全生产科技保障能力。其实,井下智能化钻机要实现的自动化动作功能主要包括自动行走、自动定位、自动调平、自动接杆、自动卸杆、自动开孔和自动钻进等,还需要根据钻机运行状态的监测数据,如环境温度和湿度、油路压力流量、电流、电压、距离、图像、传感器参数、故障代码等,通过控制程序设定的智能控制算法执行或取消相应智能动作^[6-9]。利用传感器感知井下钻机工作所需的各种数据来完成信息采集处理工作,大量的环境信息通过导航决策来接收和处理,通过运动控制来进行处理基于传感器采集的信息,从而得到井下钻机实时的运动状态,实现智能化动作。在当前智能化技术飞速发展的时代背景下,多项关键技术的实现已成为可能。

1 相关研究

国内开展煤矿井下用智能化钻机的厂家不多,而且时间相对较晚,主要有中煤科工集团重庆研究院有限公司(简称“重庆研究院”)、中煤科工集团西安研究院有限公司(简称“西安研究院”)和冀凯河北机电科技有限公司等几家依托国家部委资金支持及企业立项进行相关研究,取得了一定成效,目前形成的样机正在试验推广阶段。

重庆研究院在自动化钻机方面开展的研究较早,2007年立项“防突远距离控制钻机研制及配套工艺开发”,开发了远距离电液控制系统和远程视频监控监视系统,实现了在150 m外操作钻机,研制的钻杆装卸系统实现了近水平工况下机械化装置替代人工上下钻杆;2010年研制了地面控制井下瓦斯抽采钻机,将钻机的地面控制站与煤矿综合监控系统联网实现了地面控制煤矿井下钻机;2013年研制了地面远距离自动控制钻机,结合云台摄像机、超声测距仪、压力传感器等多种传感器信号采集与传输技术,实现了在地面操作井下钻机移机、锚固和调节钻孔姿态;2014—2016年开发了遥控自动钻机,既可在地面控制站控制钻机施工,也可通过便携式无线遥控系统在钻机50 m范围内操作钻机(参见图1)^[10-12]。

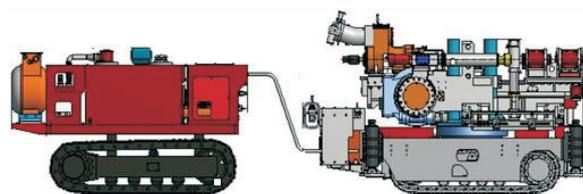


图1 重庆研究院防突远距离控制钻机示意

Fig.1 The remote control drill for penetration control by CCTEG Chongqing

西安研究院从2008年开始研发防突远距离控制钻机,开发了远距离电液控制系统、远程视频监控系统和钻杆装卸系统,实现了在150 m外操作钻机,通过视频、温度传感器、位移传感器和压力传感器等对钻机状态进行实时监控,近水平工况下机械化装置替代人工上下钻杆;2015—2018年研发了可大倾角全自动上下钻杆和程序控制自动钻进的电液控制自动化钻机,既可通过便携式无线遥控器在钻机50 m范围内操控,也可在冗余液控操纵台操控钻机施工,钻机采用整体式布局,集主机、泵站、操纵台、遥控器、防爆控制系统、数据采集与检测系统等于一体,电液比例控制系统配合接近开关、位移传感器、压力传感器等多种传感器信号采集与传输技术,实现了程序控制自动钻进、自动调节钻进参数与智能防卡钻,自动钻进程序工作时,单根钻杆从加杆到钻进完成用时55 s,自动卸钻时,单根钻杆用时50 s,钻机具有故障预警和智能诊断功能;2018年西安研究院和多个院所企业依托国家重点研发计划针对煤矿井下智能化钻探多项难题进行攻关,开发了具有钻进工况智能感知、钻进过程智能控制、钻探装备自主导航与定位、自动加卸杆多关节机器人等功能的智能化钻机(参见图2)^[13-14]。

2 难题和关键技术

上述研究在钻机自动化方面取得了一些阶段性成果,实现了自动装卸钻杆、自动化钻进、无线遥控操作等自动化的功能,为施工现场减人提效带来了一定的帮助。

为贯彻落实党中央、国务院关于推动工业机器人、智能装备在危险工序和环节广泛应用的重大决策部署,2019年国家煤矿安监局通过向各大科研院所征集意见,研究制定公布了《煤矿机器人重点研发目录》,聚焦关键岗位、危险岗位,重点研发应用掘进、采煤、运输、安控和救援5类、38种煤矿机器人,

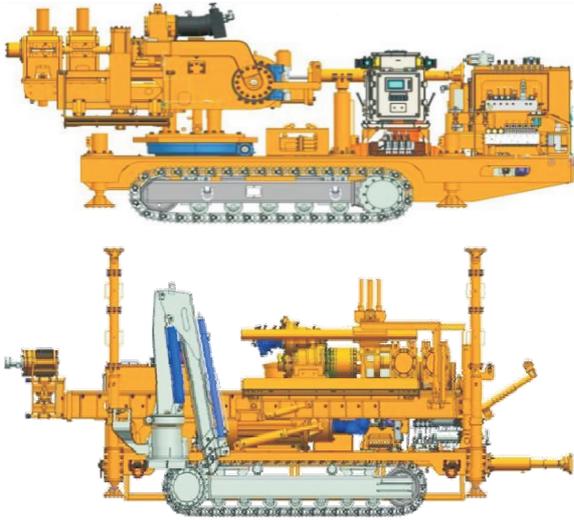


图2 西安研究院电液控制自动化钻机示意

Fig.2 The electro-hydraulic control automatic drill by CCTEG Xi'an

对每种机器人的功能提出了具体要求。涉及到钻机类机器人的功能要求主要有:自主或遥控移机、精确定位及自动装卸钻杆、自动调整钻姿、智能钻孔规划、钻孔定位、自动纠偏、自适应钻进、轨迹和参数实时监测^[15]。

但是,由于煤矿井下钻探施工环节多、工艺复杂、现场条件多变,井下各类钻孔施工钻场可以说遍布井下巷道的大多数地方,巷道掘进面迎头、运输大巷、顺槽和切眼,施工的钻孔有近水平孔、大角度上仰孔和下斜孔,钻孔的深度从几米到2000 m以上不等,钻孔的直径也大小不一。而且受不同巷道条件和不同钻孔类型限制,想通过有限的几种机型就能解决所有问题几乎是不可能的。目前的成果距离真正意义上的智能化还有相当大的差距,许多实际应用层面的自动化和智能化关键技术仍未解决,智能化程度、可靠性、适应性和实用性还需进一步提高,所以要全面实现智能化钻探还有多项难题有待攻克。

2.1 适应性、工艺复杂性及需求的多样性问题

煤矿区煤岩地层复杂多,呈非线性变化,软硬交互、局部松软破碎、局部地应力大、孔壁支撑性不好易塌孔卡钻,这些都给程序控制自动钻进带来较大的困扰。井下巷道和钻场施工空间受限,而且巷道内还布置有瓦斯管道、风筒、电缆、供水管道、风门等,井下智能钻机需要人工智能协助感知工作空间,需要对钻进工况智能感知,通过自主导航与定位适应不同巷道及钻场条件,其智能动作离不开对井下

环境信息的仿真模拟、传感器的信息采集处理、钻机车体的导航及运动控制等。钻机通过建立典型工况识别判据钻进专家系统数据库,为钻进过程智能控制提供必要的数据库,为钻进过程智能控制提供必要的数据库,地层变化导致的钻进多参数变化在超过系统软件设置的阈值或根据算法及时地决策调整操作。

钻探施工工序复杂,对孔位、孔口管扩孔钻具更换、下孔口管、换钻头、起下钻检查钻具、配套附属装置及附件的连接拆卸、移孔位电缆和设备、拆解油管水管等等,这些工作还比较繁琐,目前看来机器人暂时还达不到人的聪明智慧和轻便灵活的程度,短期内施工工序涉及到的辅助工作还必须人去完成。

因此,最初开展的项目研究工作大多从钻孔类型及方法相对单一的浅孔装备进行,而且显而易见短期内即使实现了一定自动化和智能化的钻机也还是使用范围和功能受限的某一类钻机,短时间内很难达到满足井下普遍适用的局面。不同钻孔类型需要配套不同的工艺方法和不同钻具种类规格,这些都给井下智能钻机的实用性要求提出了挑战。

2.2 防爆问题

煤矿井下施工条件不同于地面和其它非煤矿井,对于安全防爆性能要求是首要的也是必须的,对于一切可能引起瓦斯爆炸的条件因素如明火、电火花、高温等是绝对禁止的,所以涉及到隔爆产品的设计、生产、检验、使用及维修等必须严格执行规范。

可供选型的高性能和可靠性防爆类元器件还非常有限,防爆结构导致部件体积较大,成本增加,加之煤矿井下用量有限和安标门槛的要求,许多生产厂家不愿做过多的投入去研发防爆类新品,缺乏创新的动力,导致防爆元器件的品种和规格单一、性能参差不齐,新技术应用难度大,如大功率的关节机器人用防爆伺服电机、大流量的电液比例多路换向阀、高性能高可靠性的各类传感器等。

2.3 钻杆连接及补杆问题

不同于施工深度较浅的钻爆孔和锚杆孔,可以用一根长钻杆或利用左轮手枪转盘式装卸杆装置循环装卸定长的6~10根钻杆即可满足要求,而瓦斯抽放钻孔和探放水钻孔等往往有几十米到几百米深不等,甚至超过千米,在狭窄巷道空间内、运输吊装不具备条件的情况下,补充后续大量的钻杆是非常实际而又棘手的难题,这还受井下钻场布置及工序流程的限制。区别于可以采用类似于AGV小车和

无线定位移动等方式的地面工厂化物流运输方式,井下的场地空间条件和动力电缆拖移就对操作施工造成直接的影响,虽然防爆柴油机动力驱动或防爆电池电力驱动一定程度上能解决移动拖拽电缆的问题,但目前大多数煤矿不具备这种思路使用的条件。

井下钻机常配套的钻杆有外平、三棱和螺旋式。连接方式主要为螺纹式和六方插接式连接,结构示意图见图 3。外平钻杆一般为外径 42~127 mm 的定长地质钻杆,通常螺纹式连接的外平 $\varnothing 73$ mm 钻杆最为常用。钻机自动加卸杆多首选该种规格型式的钻杆,加卸杆的程序动作设计及执行相对简单。而其它型式的钻杆就比较麻烦些,尤其是插接式螺旋钻杆和定向钻进用中心通缆式钻杆,自动加卸杆的动作难度就大,要求钻机执行回转和夹持动作部件的同轴度及相位角偏差要小,甚至为了加卸杆动作可靠还要加相应的位置检测传感器和角度测量传感器。

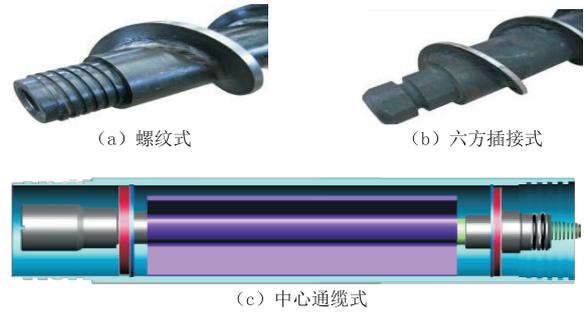


图 3 钻杆连接型式结构示意图

Fig.3 The typical drill pipe connections

通常自动加卸钻杆方法主要有钻杆抓手翻转式、多组油缸坐标平移式、机械臂吊装式和关节机器人手臂式等型式,结构示意图见图 4。补充钻杆的方式主要有弹夹式和杆箱式等。钻杆质量因长度、直径和壁厚而定,钻杆越长或越重相应的执行部件结构体积就会增加。



图 4 加卸钻杆装置结构示意图

Fig.4 The typical drill pipe loading and unloading device

3 思考及探讨

井下智能钻机控制系统通过利用现代计算机及网络通讯技术,解决了地面与井下钻机通讯设备的远程通讯及控制,通过井下钻机电液控制智能化操控系统平台,能够实现在没有工作人员现场操作的情况下,在地面远程控制钻机就可实现自动钻进。通过井下智能钻机取代人工劳动,大批钻机操作工将远离煤与瓦斯突出、水害、冲击地压、深井高温,实现“少人则安、无人则安”的安全理念,能极大地改善作业条件,从根本上解决矿山生产安全问题。

(1)应清醒地认识到井下钻探装备的智能化不会一蹴而就,从以传统钻机为主的应用现状发展到智能化钻机大量使用,甚至全部替代传统钻机,还需要数年的时间过程,因此,逐步分级实现智能化钻探是较为适宜的方法,本文认可行业内部分专家的观点认识,目前的研究成果称为自动化钻机更为准确,

智能化程度和水平的实质性提高还需要长时间大量的研究攻关,还需经过全自动钻机阶段、智能化钻机阶段和钻孔机器人 3 个阶段。实现主要动作的自动化是实现智能化的前提,在自动化的基础上再逐步提高人工智能化水平才是正确的途径。

(2)智能钻机功能实用、施工高效及性能稳定是设计研发的目标。需要简化液压管路,减小现场安装与维修难度;需要简化并优化电路及控制系统,选型性能优良、可靠性高的传感器及电液元器件;需要提高自动装卸钻杆的准确性、稳定性与效率,增加适用倾角范围;需要强化模块化设计理念,便于在井下钻场确保安全的前提下拆更换修,提高可靠性和可维护性。

(3)目前的智能钻机功能尚不完善,但成本已大幅上升,维护使用也需要较高的技术水平和经验,这些都在短期内会制约智能化钻机发展和应用,即使

政策性鼓励引导,煤矿生产企业还会在成本和效益两者之间权衡,但前提是解决生产所需钻孔施工问题,不能因为钻孔进尺影响掘进和采煤。只有智能化钻机的水平发展到相当的高度,即钻进效率接近或高于现在,其智能化、可靠性和可维护性得到市场用户的认可,才会是被市场用户接受的真正意义上的智能化钻机。

(4)随着“以人为本”的安全理念逐渐深入人心,国家和行业对煤矿防爆电气设备安全问题的重视度逐渐加强,特别是煤矿安全事故易造成群死群伤,使得国家更加重视煤矿的安全问题。但由于自动化和智能化使用了数量不少的防爆电气设备,数量和种类的增加势必给煤矿的安全生产增加相应风险。我国在煤矿电气设备使用及生产方面的相关标准虽然较为严格,但在实际的落实与煤矿生产使用过程中风险控制难以做到百分之百。因此,必须重视矿用电气设备的防爆管理工作。另外从产品安全角度考虑,摒弃有些华而不实或作用不大的功能,产品设计时尽量减少防爆电气设备的使用数量应该是明智之举。

(5)传统煤矿向数字化“智慧矿山”发展,信息化、自动化、集控化、智能化是煤矿井下钻探技术及装备发展的主要方向。加大井下智能化钻探方面的研究投入,从引进吸收、自主创新、成果转化、推广应用等环节入手,全面推动技术创新、转化与应用,有助于尽快实现钻探装备的智能化,综合利用“互联网+大数据”信息处理、灾害智能预警与防控、井下人工智能机器人、集群控制、定位与导航等先进技术,这些举措是实现煤矿减人增效和数字化“智慧矿山”的必由之路,可望实现对煤炭资源的精准开采。

4 结语

煤矿井下智能化钻探技术及装备是煤炭生产企业急需的先进技术装备,是促进煤炭产业升级的重要手段,传统煤矿向数字化“智慧矿山”发展,信息化、自动化、集控化、智能化是煤矿井下钻探技术及装备发展的主要方向。相关科研院所近几年在自动化钻机和智能化钻探装备研制方面取得了阶段性的成果,研发团队也在技术攻关中得到了锻炼,这些基础性研究工作和人才队伍必将为智能化钻探技术装备的创新发挥积极的作用,认真分析解决钻机装备适应性、工艺复杂性及需求的多样性问题、防爆

问题和钻杆连接及钻杆补充问题,开展自主导航与定位、程序控制自适应自动钻进、自动装卸钻杆、参数实时监测及传输等技术攻关,假以时日最终达到智能钻机功能实用化、施工高效化及性能稳定性的目标。

参考文献(References):

- [1] 石智军,胡少韵,姚宁平,等.煤矿井下瓦斯抽采(放)钻孔施工新技术[M].北京:煤炭工业出版社,2008:1-7.
SHI Zhijun, HU Shaoyun, YAO Ningping, et al. New technology for gas drainage hole drilling in coal mines[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2008:1-7.
- [2] 申宝宏,刘见中,雷毅.我国煤矿区煤层气开发利用技术现状及展望[J].煤炭科学技术,2015,43(2):1-4.
SHEN Baohong, LIU Jianzhong, LEI Yi. Present status and prospects of coalbed methane development and utilization technology of coal mine area in China[J]. Coal Science and Technology, 2015,43(2):1-4.
- [3] 宁德义.我国煤矿瓦斯防治技术的研究进展及发展方向[J].煤矿安全,2016,47(2):161-165.
NING Deyi. Research progress and development trend of coal mine gas prevention technology in China[J]. Safety in Coal Mines, 2016,47(2):161-165.
- [4] 申宝宏,郑行周,弯效杰.煤矿隐蔽致灾因素普查技术指南[M].北京:煤炭工业出版社,2015.
SHEN Baohong, ZHENG Xingzhou, WAN Xiaojie. Technical guide for general survey of hidden disaster causing factors in coal mines [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2015.
- [5] 石智军,刘建林,李泉新.我国煤矿区钻进技术装备发展与应用[J].煤炭科学技术,2018,46(4):1-6.
SHI Zhijun, LIU Jianlin, LI Quanxin. Development and application of drilling technique and equipment in coal mining area of China[J]. Coal Science and Technology, 2018,46(4):1-6.
- [6] 刘金琨.智能控制(第2版)[M].北京:电子工业出版社,2009.
LIU Jinkun. Intelligent control (Second Edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [7] 刘吉臻,李露,房方.多模式控制的研究与应用综述[J].控制工程,2015,22(5):869-874.
LIU Jizhen, LI Lu, FANG Fang. A Survey on the study and application of multi-mode control[J]. Control Engineering of China, 2015,22(5):869-874.
- [8] 唐文玲,盛宇.地下潜孔钻机智能控制系统的研究与实现[J].绿色科技,2017(18):174-177.
TANG Wenling, SHENG Yu. Research and implement on intelligent control system for underground DTH rig[J]. Journal of Green Science and Technology, 2017(18):174-177.
- [9] 陈松林,吕晋军.煤矿井下用智能遥控自动钻机的研制与应用[C]//川、渝、滇、黔、桂煤炭学会2018年度学术年会(重庆部分)论文集.2018.
CHEN Songlin, LÜ Jinjun. Development and application of intelligent remote control underground automatic drills for coal mines[C] //Annual academic meeting of the Coal Society of Sichuan, Chongqing, Yunnan, Guizhou and Guangxi (Chongqing Chapter). 2018.

(下转第71页)

- LI Zheng. Research on technique and application of mini steel-tube piles in landslide treatment[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [5] 何文君,杨朝发,胡杰.钢管桩嫁接大直径桩在边坡支护中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(9):59-62.
HE Wenjun, YANG Chaofa, HU Jie. Application of steel pipe pile joined with large diameter pile in slope support[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(9):59-62.
- [6] 刘敬.微型集群钢管桩在滑坡体基坑支护工程中的应用[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015,31(6):1031-1040.
LIU Jing. Application of micro-cluster steel pipe piles for foundation pit support of landslide mass engineering[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2015,31(6):1031-1040.
- [7] 秦宿钧,付传飞.钢管桩加固非均质边坡稳定性有限元强度折减法分析[J].公路与汽运,2015,170:107-109.
QIN Sujun, FU Chuanfei. Finite element strength reduction analysis of heterogeneous slope stability strengthened by steel pipe piles[J]. Highways & Automotive Applications, 2015,170:107-109.
- [8] Tan Y C, Chow C M. Foundation design and construction practice in limestone areas in Malaysia[C]. Proceedings of Seminar on Geotechnical Works in Karst in South-East Asia, 2006:21-43.
- [9] 何世鸣,赵振国,吴盛斌.长螺旋搅拌桩钢管桩复合支护技术在基坑工程中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(1):55-57.
- HE Shiming, ZHAO Zhenguo, WU Shengbin. Application of long spiral rotating pile with steel pipe combined support technology in foundation pit project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009,36(1):55-57.
- [10] 吴学锋,寇海磊.土岩复合地层注浆微型钢管桩-锚杆联合支护研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(4):836-841.
WU Xuefeng, KOU Hailei. Research on support combined with grouting micro-steel piles and bolt in soil-rock formation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012,8(4):836-841.
- [11] 张宗强,张明义,贺晓明.微型钢管桩在青岛地区基坑支护中的应用研究[J].青岛理工大学学报,2012,33(3):22-25.
ZHANG Zongqiang, ZHANG Mingyi, HE Xiaoming. Application and research of the micro-steel-pipe pile in pit support in Qingdao[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2012,33(3):22-25.
- [12] 李贤军,张晓明,曾海柏.微型钢管桩在二次开挖厚层填土基坑中的应用[J].中国煤炭地质,2016,28(6):65-82.
LI Xianjun, ZHANG Xiaoming, ZENG Haibai. Application of miniature steel pipe pile in secondary excavated thick filling foundation pit[J]. Coal Geology of China, 2016,28(6):65-82.
- [13] 李轶.桩-锚支护结构在深基坑工程中的应用研究[D].南宁:广西大学,2008.
LI Yi. Application of pile-anchor support system in deep pits [D]. Nanning: Guangxi University, 2008.

(编辑 周红军)

(上接第 52 页)

- [10] 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.
- [11] 吕晋军.煤矿用智能遥控自动钻机 ZYWL-4000SY 的研制[J].煤矿机械,2017,38(2):110-112.
LÜ Jinjun. Development of intelligent remote control ZYWL-4000SY drill used in coal mine[J]. Coal Mine Machinery, 2017,38(2):110-112.
- [12] 胡金亮,靳宣强,王永,等.全液压系列智能钻机[J].现代制造技术与装备,2018(4):84-85.
HU Jinliang, JIN Xuanqiang, WANG Yong, et al. Full hydraulic series intelligent drill [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2018(4):84-85.
- [13] 陶照园,刘晖,王福坚.智能钻机软特性自动防卡技术研究与设计[J].矿业研究与开发,2011,31(5):71-73,77.
TAO Zhaoyuan, LIU Hui, WANG Fujian. Research and design of automatic anti-jamming technology with soft performance for drilling jumbo[J]. Mining Research and Development, 2011,31(5):71-73,77.
- [14] 程迎松,张立祥.智能钻机自动上下杆机构设计与分析[J].煤炭技术,2018,37(4):222-225.
CHENG Yingsong, ZHANG Lixiang. Design and analysis of automatic install and pull rods mechanism of drilling rig[J]. Coal Technology, 2018,37(4):222-225.
- [15] 国家煤矿安全监察局[公告 2019 第 1 号].煤矿机器人重点研发目录.
National Coal Mine Safety Administration [Bulletin No. 1, 2019]. Key R & D catalogue of coal mine robots.

(编辑 王建华)