

我国煤矿坑道钻探装备技术进展与展望

姚宁平¹, 姚亚峰^{1,2}, 方 鹏¹, 田宏亮¹, 郝世俊¹, 梁春苗^{1,2}, 张幼振¹

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 煤炭科学研究总院, 北京 100013)

摘要: 煤矿坑道钻探装备技术在发展过程中受到诸多不利条件的限制, 导致新技术发展滞后, 随着我国煤矿大力推进智能化建设, 给煤矿坑道钻探装备技术带来了革命性的发展机遇。通过分析国外坑道钻探装备的技术特点和发展状况, 以及国内坑道钻探装备技术的3个阶段发展, 包括初级阶段的分体式钻机与稳定组合钻具轨迹控制方法, 蓬勃发展阶段的履带式钻机、定向钻进装备技术及松软煤层钻进技术, 新发展阶段的自动化和智能化装备技术, 提出了今后我国煤矿智能化发展阶段钻探装备技术需要解决的关键问题, 为推进钻探装备技术智能化水平的提高提供支撑。

关键词: 煤矿坑道; 钻探装备; 钻机; 定向钻进; 智能化; 钻孔机器人

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)01-0081-07

Advances and outlook of coal mine tunnel drilling equipment and technology

YAO Ningping¹, YAO Yafeng^{1,2}, FANG Peng¹, TIAN Hongliang¹,

HAO Shijun¹, LIANG Chunmiao^{1,2}, ZHANG Youzhen¹

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

2. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Coal mine tunnel drilling equipment and technology are restricted by many unfavorable conditions in the process of development, which leads to the lag of new technology development. The promotion of intelligence in China's coal mines brings a revolutionary opportunity for the development of coal mine tunnel drilling equipment and technology. The foreign technical characteristics and development of drilling equipment are analyzed. At the same time, the paper also analyzes the three development stages of domestic tunnel drilling equipment and technology: the initial stage of the split type drill rig and the trajectory control method with the stable combined drilling tools; the vigorous development stage of the crawler drill rig, the directional drilling equipment and technology, and the soft coal seam drilling technology; the new development stage of the automatic and intelligent equipment and technology. The key problems are put forward with drilling equipment and technology in the intellectualized development stage of China's coal mines in the future, which provides support for improving the intellectualized level of drilling equipment and technology.

Key words: coal mine tunnel; drilling equipment; drill rig; directional drilling; intelligence; drilling robot

0 引言

煤矿坑道钻探装备技术在煤矿瓦斯抽采、地质

勘探、探放水、防灭火等领域广泛应用, 对于煤矿安全生产起到重要的保障作用。然而受煤矿巷道的

收稿日期: 2020-12-08 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.01.011

基金项目: 国家科技重大专项项目“碎软煤层双动力头双管定向钻进技术与装备的研究”(编号: 2016ZX05045003-002)

作者简介: 姚宁平, 男, 汉族, 1970年生, 研究员, 博士生导师, 一直从事煤矿钻探新技术、矿用全液压钻机状态监测与故障诊断、以及钻探装备智能化控制技术研究工作, 陕西省西安市高新区锦业一路82号, yaoningping@cctegxian.com。

引用格式: 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.

空间尺寸、特殊的地层条件、井下防爆要求和井下湿热环境等的限制,导致装备技术发展不平衡、装备耐用性差、新技术应用滞后^[1-5]。多年来,国内相关科研院所和企业,秉承创新发展、服务行业的理念,通过不断的技术革新,为煤矿坑道钻探装备技术的发展进步做出了重要贡献。随着新技术的融合和煤矿大力推进智能化建设,给煤矿坑道钻探装备技术带来了革命性的发展机遇。

1 国外煤矿坑道钻探装备技术发展现状

国外煤矿坑道钻探装备技术的发展起步较早,其中主要以美国、瑞典、澳大利亚、德国等西方国家生产的钻机为代表^[6-7],可以满足煤矿井下多种钻探施工需要。随着西方国家逐步关闭井工煤矿,煤矿的能源开采以地面抽采煤层气和露天开采煤矿为主,坑道钻探装备技术的研究重点逐步转向金属矿山,并向远程控制、自动化和智能化钻探方向发展。目前如瑞典 Epiroc(原 Atlas Copco)公司的 Diamec 系列坑道岩心钻机、美国 Boart Longyear 公司的 LM™ 系列坑道岩心钻机、瑞典 Sandvik 公司的 DB 系列岩心钻机、澳大利亚 Valley Longwall 公司的 VLD 系列煤矿坑道定向钻机、美国 Fletcher 公司的坑道锚杆钻机等得到了广泛应用。

Epiroc 公司的 Diamec PHC 系列钻机采用分体式结构布局,各部件之间用液压胶管连接,在坑道中摆布灵活,采用全液压先导控制,具有能效高、安全性好的特点。由于 Epiroc 公司近年来在产品的自动化、智能化和信息处理方面进行了长期研究,并取得了突出成绩,形成了品种齐全、技术水平最高的坑道钻机产品。Diamec Smart 系列钻机(图1)采用先进的控制系统,具有自动加卸钻杆等功能,通过特有的钻杆加卸系统,可以使操作人员在安全距离外进行钻机操控,所有孔内钻具的下放和提升工作都可以通过钻机自动完成。该系列钻机配备的远程控制系统可以进行远程控制钻机,并可以快速设定和监测钻进参数,即使在危险区域,操作人员也可以在安全区域进行远距离操作,而且1名操作人员可同时控制3台钻机,显著提高了生产效率。

Boart Longyear 公司的 LM™ 系列钻机(图2)采用分体式布局,方便狭小空间布置。采用负载敏感液压技术,可以实现最大效率化和减小系统发热。采用电液比例控制方式,可以获得精确的钻进速度



图1 Diamec Smart 6 钻机

Fig.1 Diamec Smart 6 drill rig

和回转速度控制,还可以配备 DCI 钻进系统,能够实现无人看管的自动钻进,提高钻进效率。Sandvik 公司的 DB120 钻机(图3),具备自动调幅调角系统、自动加卸钻杆系统、经过煤安认证的电液控制系统、遥控系统等,具有远程遥控施工、连续钻进施工、安全可靠等特点。



图2 LM™110 钻机

Fig.2 LM™110 drill rig



图3 DB120 钻机

Fig.3 DB120 drill rig

2 我国煤矿坑道钻探装备技术的发展初期

我国煤矿坑道钻探自 20 世纪 70 年代末以来,

随着改革开放的步伐,经历了从与其他行业合作生产到煤炭行业自主研发、装备从无到有、技术从弱到强的发展历程^[8-12]。在发展过程中,以中煤科工集团西安研究院有限公司为主要代表的煤矿钻探装备研发生产企业,始终引领着煤矿坑道钻探装备技术的发展方向。

至2004年,形成了以多种型号全液压分体式钻机为代表的钻机产品,钻进工艺上采用回转钻进,通过稳定组合钻具配备单点测斜仪实现钻孔轨迹控制。全液压分体式钻机采用主机、泵站、操纵台分体布置,各部分通过液压胶管连接,利用操纵台上的液压手把操作钻机的动作,输出转矩范围为400~12000 N·m。稳定组合钻具钻孔轨迹控制方法是在钻头和常规钻杆之间安装不同尺寸和数量组合的稳定器和短钻杆,实现一定程度的钻孔造斜,并结合单点测斜仪对钻孔轨迹进行控制。该阶段利用分体式钻机配套稳定组合钻具轨迹控制方

法,创造了国内最大深度达865 m的顺煤层钻孔。稳定组合钻具轨迹控制无法实现随钻测量,在改变造斜方向时还需要提钻更换稳定组合钻具,因此对钻孔的轨迹控制精度差,钻孔效率也低。随着煤矿现代化建设步伐的持续迈进,目前分体式钻机的市场占比正逐年下降,主要用于现代化程度低、巷道条件较差的中小型煤矿。

3 我国煤矿坑道钻探装备技术的蓬勃发展期

从2005年开始,我国煤矿坑道钻探装备技术全面发展,逐步开发了普通履带式钻机、履带式定向钻机及随钻测量定向钻进、松软煤层回转钻进及气动螺杆马达随钻测量定向钻进等先进钻探装备与技术^[13-17]。普通履带式钻机成功解决了钻机井下行走、移位等问题,具有更大的开孔参数调节范围,已经形成了以ZDY、ZYWL、CMS系列为主的多种主流产品与系列(主要参数见表1)。

表1 常用履带式钻机主要参数

Table 1 Main parameters of common crawler drilling rigs

型号/项目	转矩/ (N·m)	转速/ (r·min ⁻¹)	功率/ kW	给进力/ 起拔力/kN	倾角/ (°)	行走速度/ (km·h ⁻¹)	外形尺寸/ mm	质量/ kg
EZDY4000LR	4000~1050	70~240	55	150/150	0~±90	1.66	4050×1250×1950	6700
ZYWL-4000	4000~1050	50~270	55	110/150	0~+45	1.08	2850×1300×2500	4580
CMS1-4000/55	4000	70	55	120/120	0~±90	1.44	3550×1040×2300	7000

随着煤矿开采效率的提升和矿井埋深的增加,为了适应巷道条件和防突要求,煤矿用户对个性化定制钻机的需求越来越大。钻机设计以个性化的用户需求为导向,通过模块化、平台化的设计思路快速适应用户的个性化改造、改型,并逐渐形成系列化产品。该设计思路是针对钻机的组成结构将履带式钻机分为履带车体、变幅装置、主机、稳固装置、泵站系统、操作装置等几部分,针对不同部分分别开发模块化部件,借助于不同结构的变幅装置和履带车体,形成具有一定扩展能力的平台化产品,通过在平台上安装主机等其他模块化部件,最终形成结构参数各异的个性化定制钻机。

履带式定向钻机方面,目前已实现完全国产化,取代了进口产品,并在钻机性能、随钻测量技术及配套钻具等方面,超过同类进口产品,成套技术与装备在全国各大矿区得到普遍应用。在定向钻

进工艺技术方面,适用于中硬煤层和稳定顶板岩层的定向钻进技术与装备日趋成熟,能力不断提升,促进了我国煤矿井下近水平随钻测量定向钻进的孔深记录不断被刷新。2019年,中煤科工集团西安研究院有限公司利用自主研制的ZDY15000LD型履带式定向钻机、超长孔定向钻进减阻工艺和复合钻进等轨迹控制技术,完成了井下顺煤层孔深3353 m的定向钻孔,再创煤矿井下钻孔深度的世界纪录。

松软煤层钻进技术则由于不同矿区的煤层差异很大,形成了中风压宽翼片螺旋钻进技术、大螺旋高转速钻进技术、三棱钻杆回转钻进技术并存的局面,其中中风压钻进在松软煤层矿区应用较广泛,最大孔深超过250 m。近年来,为了进一步提高松软煤层的瓦斯抽采钻孔深度,开发了气动螺杆马达定向钻进技术^[18](图4),针对存在较多断层、破碎带的地层,还开发了气动螺杆马达双管护孔定向钻

进技术,可实现对钻进地层的边护孔边钻进。气动螺杆马达定向钻进技术目前在淮南、淮北、贵州等地得到了广泛应用,钻孔深度也超过了400 m,实现

了煤矿复杂地质条件下钻探技术与装备的新突破。

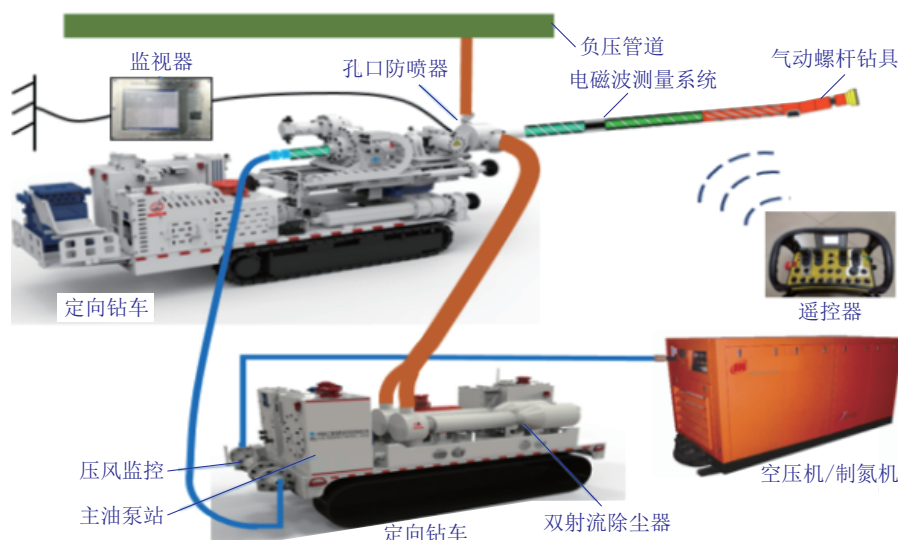


图4 气动螺杆马达定向钻进系统

Fig.4 Pneumatic PDM directional drilling system

4 我国煤矿坑道钻探装备技术的智能化发展新阶段

2015年之后,随着“机械化换人、自动化减人”和煤矿智能化发展的目标提出,越来越多的煤矿提出了减轻施工人员劳动强度、减少人员数量、提高施工效率的需求,这也使得煤矿坑道钻探装备在电液控制自动化、智能化方面加快了发展步伐,煤矿坑道钻探装备技术进入了新的发展阶段^[19-25]。

4.1 自动加杆的电液控制自动化钻机

煤矿坑道钻机施工多采用人工加卸钻杆,存在劳动强度大、安全性差等问题。履带行走时,操作人员利用操纵装置上的液压手柄操作,在一些巷道窄、坡度大、钻场空间小的场合,存在安全隐患。钻机的施工以操作人员的经验为准,操作流程标准化程度低,存在操作失误多、易掉钻、损伤钻杆丝扣等问题。钻机的钻进参数监测数据缺乏、故障判断与维修效率低。因此,针对煤矿智能化及市场需求,近几年来,国内陆续开发了具备自动加卸钻杆、一键自动钻进、远距离遥控操作、钻进参数状态监测与信息交互等功能的电液控制自动化钻机,如ZDY4300LK、ZYWL-4000SY型钻机等。该类钻机

采用电液控制技术,集成有防爆型PLC控制器、传感器、遥控器等,利用自带的机械手从钻杆仓中抓取钻杆,实现自动加卸钻杆,并可一键操作自动钻进。自动钻进功能能够实时调节钻进参数,无需人工干预进行连续钻进,钻机运行时还可通过参数监测系统监测各钻进参数运行状况并给予异常报警。

这种电液控制自动化钻机推广应用中也存在一些问题:钻杆仓中一次储存钻杆数量太少,需要经常向钻杆仓中补充钻杆;自动钻进功能遇到地层变化、负载突变时应对能力有限,需要人工干预;遥控器电池寿命低、井下环境遥控距离有限等。

4.2 顺煤层智能随钻测量定向钻进装备技术

“十三五”期间,围绕国家科技重大专项,开展了“煤矿井下智能化钻探装备及高效快速钻进技术”的研究,通过对防爆电液控制、参数实时监测、无线遥控技术开展研究,解决了大功率定向钻进装备自动化加卸钻杆问题,提升了钻机运行参数监测和事故预防处理的智能化水平。研制了输出转矩25000 N·m的智能化定向钻机,输出最大流量800 L/min、最高压力12 MPa的大流量泥浆泵车,以及矿用地质旋转导向钻进系统及配套钻具,形成了煤

矿井下防爆智能化大功率定向钻进装备(图5)与高效快速钻进技术,为国内煤矿区井下顺煤层煤层气抽采定向钻孔、采动区及采空区煤层气抽采定向钻孔钻探施工提供技术与装备支撑。



图5 智能化大功率定向钻机及随钻测量装置

Fig.5 Intelligent high-power directional drill rig and MWD tools

4.3 瓦斯抽采钻孔机器人开发

2018年开始,基于国家重点研发计划“井下瓦斯防治钻孔与封孔机器人”项目开发了瓦斯抽采钻孔机器人。为了提高钻孔效率和减少人员数量,开发了容量达150 m的固定式钻杆仓,满足穿层瓦斯抽采钻孔的连续自动钻孔需求;开发了防爆伺服电机控制的六自由度机械手,可实现不间断自动加卸钻杆;集成基于煤矿井下工作环境的视觉伺服系统,实现了自适应加卸钻杆,保障加杆过程迅速、精准。开发的瓦斯抽采钻孔机器人还具备开孔自动位姿调节功能,可实现开孔的参数化控制;具有自动钻进系统,适应智能钻探的需要;具有故障监测与信息交互系统,实现故障的及时报警和信息的及时跟踪;配套自动封孔装置,实现瓦斯抽采钻孔、完孔的自动化。

5 展望

随着我国煤矿企业创新驱动发展战略实施,智能化矿井建设将成为煤矿企业转型升级的必由之路,煤矿坑道钻探装备技术也必将向着智能化的方向快速发展。当然,受当前技术发展现状及一些尚未完全突破的技术、核心元器件的制约,煤矿坑道

钻探装备技术的发展不可能一蹴而就,应当在一些技术与装备方面重点研发,加快推进我国煤矿坑道钻探装备技术的智能化水平。

5.1 钻机智能控制水平的提升

目前自动化钻机已具备自动加卸钻杆、程序控制自动钻进、远程无线操控、状态参数监测与故障预警等功能,但仍需进一步突破核心技术来提升钻机的智能控制水平,适应煤矿智能化建设的提速。通过开发防爆电力直驱技术、智能传感技术和智能决策控制技术实现钻进动作的精准控制,通过开发巷道环境识别技术、钻探装备姿态测控技术实现装备的自主导航定位,通过开发钻进过程自适应和人机交互系统实现钻进过程的自适应与人机交互钻进,通过开发人机安全系统保障人工辅助条件下智能化钻机的安全施工。

5.2 机电液系统的故障智能诊断与预测

随着电液控制钻机功能的增加和智能化技术的推进,钻机操作、维护人员需要同时面对机械、液压、电控方面的故障问题,这对于钻机的故障诊断和预测技术提出了更高的要求,目前在这方面的技术多停留在钻进和工作参数监测,能实现故障的简单诊断。由于钻机是一个机、电、液协同工作的装备,其故障源较多。因此,要针对钻机的机、电、液系统,通过不用种类的传感器采集数据、采用多源数据融合的智能运算算法实现对状态参数及设备故障智能分析和自我诊断,并及时预测钻机可能存在的故障源,为操作、维护人员提供技术支撑。

5.3 基于5G技术的井上远程操作钻机和信息交互

煤矿坑道钻探的目标是实现井上远程遥控的无人钻探模式。但要实现井上远程操控,单靠目前的视频监控和网络传输的模式还远不够,无法实现问题快速处理,也存在视频监控不到位、辅助施工人员安全性差等问题。随着5G技术在多个行业的应用,我国煤矿近几年也加快了5G建设。通过加快煤矿5G信息化建设的速度、加速基于5G技术的井下钻探装备远程交互技术与平台研发具有重要意义。

5.4 新型智能钻具及孔底测量仪器开发

现有定向钻具测量仪器安装在钻头后面5~7 m,测量数据滞后于钻头处的实际数据,在薄煤层定向钻进过程中钻孔轨迹控制难度大,钻孔极易穿出煤层,开发矿用近钻头测量技术,突破强振动下倾

角和工具面角的高精度动态测量技术,提高钻孔轨迹测量精度;开发方位电阻率测量短节,实现对地层煤、岩性识别,为钻进过程中提供地层边界的方位及距离信息,提高目标地层钻遇率;开发智能钻杆,通过在钻杆内设置高速、低耗的耐高压高速传输电缆解决传统信息传输方式容量小、传输速度慢的问题,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。

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,王毅,姚亚峰,等.我国煤矿井下复杂地质条件下钻探技术与装备进展[J].煤田地质与勘探,2020,48(2):1-7.
YAO Ningping, WANG Yi, YAO Yafeng, et al. Progress of drilling technologies and equipment for complicated geological conditions in underground coal mines in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2020,48(2):1-7.
- [3] 王永全,周兢.钻探技术在煤矿水害防治工作中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(11):35-41.
WANG Yongquan, ZHOU Jing. Application of drilling technology in coal mine water hazard control[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(11):35-41.
- [4] 金鑫,郭辉.煤矿水害精准探查钻探技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):49-52,58.
JIN Xin, GUO Hui. Drilling technology for precise exploration of coal mine water hazards[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(3):49-52,58.
- [5] 代茂,徐书荣,梁道富,等.顶板高位定向钻孔在青龙煤矿瓦斯治理中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(10):58-61.
DAI Mao, XU Shurong, LIANG Daofu, et al. Application of roof directional borehole in gas control in Qinglong Coal Mine[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(10):58-61.
- [6] 颜纯文.国外主要钻机制造商的经营情况分析[J].地质装备,2009,10(4):20-23.
YAN Chunwen. Operation analysis for major foreign drill rig manufacturers[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2009,10(4):20-23.
- [7] 张金昌.地质钻探技术与装备21世纪新进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(4):10-17.
ZHANG Jinchang. New development of the 21st Century geological drilling technology and equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(4):10-17.
- [8] 姚亚峰,张杰,韩健,等.软硬复合煤层高效钻进装备研制及应用[J].煤炭科学技术,2018,46(4):76-81.
YAO Yafeng, ZHANG Jie, HAN Jian, et al. Development and application of high efficiency drilling equipment in hard-soft composite coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2018,46(4):76-81.
- [9] 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.
- [10] 卢宁,赵继云,张德生,等.煤矿井下全液压钻机的现状及发展趋势[J].煤矿机械,2011,32(3):1-3.
LU Ning, ZHAO Jiyun, ZHANG Desheng, et al. Present situation and developing tendency of underground coal mine hydraulic drilling machine[J]. Coal Mine Machinery, 2011,32(3):1-3.
- [11] 姚克,田宏亮,姚宁平,等.煤矿井下钻探装备技术现状及展望[J].煤田地质与勘探,2019,47(1):1-5.
YAO Ke, TIAN Hongliang, YAO Ningping, et al. Present situation and prospect of drilling equipment technology in coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2019,47(1):1-5.
- [12] 宋海涛,姚宁平,姚亚峰,等.基于ATO模式的煤矿井下多变幅履带钻机模块化平台开发[J].煤田地质与勘探,2020,48(2):8-13,19.
SONG Haitao, YAO Ningping, YAO Yafeng, et al. ATO mode-based modular platform development of variable luffing crawler drilling rig used in underground coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2020,48(2):8-13,19.
- [13] 闫保永,曹柳,张家贵.煤层顶板裂隙带瓦斯抽采技术与装备探索[J].煤炭科学技术,2020,48(10):60-66.
YAN Baoyong, CAO Liu, ZHANG Jiagui. Exploration on gas drainage technology and equipment of fracture zone in coal seam roof[J]. Coal Science and Technology, 2020,48(10):60-66.
- [14] 曹静,姚宁平,姚亚峰,等.煤矿坑道瓦斯抽采钻机变幅机构的设计及力学分析[J].煤矿机械,2013,34(5):120-122.
CAO Jing, YAO Ningping, YAO Yafeng, et al. Design and force analysis of luffing mechanism coal tunnel gas drainage rig[J]. Coal Mine Machinery, 2013,34(5):120-122.
- [15] 石智军,李泉新.煤矿区钻探技术装备新进展与展望[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):150-153,169.
SHI Zhijun, LI Quanxin. New progress and prospect of drilling technology and equipment in coal mine area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(10):150-153,169.
- [16] 徐保龙,姚宁平,王力.煤矿井下定向深孔复合钻进减阻规律研究[J].煤矿安全,2018,49(2):92-95.

- XU Baolong, YAO Ningping, WANG Li. Friction reduction law of compound drilling in directional deep hole of underground mine[J]. Safety in Coal Mines, 2018,49(2):92-95.
- [17] 姚宁平,张杰,张国亮,等.晋城矿区井下梳状钻孔瓦斯抽采技术体系[J].煤炭科学技术,2015,43(2):88-91.
- YAO Ningping, ZHANG Jie, ZHANG Guoliang, et al. System of gas drainage technology of comb-like directional drilling in Jincheng mining area [J]. Coal Science and Technology, 2015,43(2):88-91.
- [18] 张杰,王毅,黄寒静,等.空气螺杆马达软煤定向成孔技术研究[J].煤炭科学技术,2018,46(11):114-118.
- ZHANG Jie, WANG Yi, HUANG Hanjing, et al. Research on directional drilling technology of air screw motor in soft coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46 (11) : 114-118.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 彭博,胡远彪.水平定向钻进虚拟仿真培训系统研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):83-88.
- PENG Bo, HU Yuanbiao. Research on virtual simulation training system for HDD [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(1):83-88.
- [24] 姚亚峰,李晓鹏,张刚,等.煤矿坑道钻机自动加卸钻杆装置的研发[J].煤矿机械,2017,38(6):91-93.
- YAO Yafeng, LI Xiaopeng, ZHANG Gang, et al. Development of automatic loading drill rods device on coal mine tunnel drill rig[J]. Coal Mine Machinery, 2017,38(6):91-93.
- [25] 杨林.煤矿井下瓦斯抽采钻孔机器人研究现状及关键技术[J].煤矿机械,2018,39(8):60-62.
- YANG Lin. Research status and key technology of underground gas drainage drilling robot in coal mine[J]. Coal Mine Machinery, 2018,39(8):60-62.

(编辑 韩丽丽)