



煤炭学报

Journal of China Coal Society

ISSN 0253-9993, CN 11-2190/TD

《煤炭学报》网络首发论文

题目： 煤矿掘进机的机器人化研究现状与发展
作者： 杨健健，张强，王超，常博深，王晓林，葛世荣，吴淼
网络首发日期： 2020-02-17
引用格式： 杨健健，张强，王超，常博深，王晓林，葛世荣，吴淼. 煤矿掘进机的机器人化研究现状与发展. 煤炭学报.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.TD.20200215.0149.003.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

煤矿掘进机的机器人化研究现状与发展

杨健健^{1,2}, 张强¹, 王超¹, 常博深¹, 王晓林¹, 葛世荣^{1,2}, 吴淼^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 机器人化采矿装备研究所, 北京 100083)

摘要: 基于煤矿巷道掘进智能化、无人化的发展要求, 综述了悬臂式掘进机综掘技术、连续采煤机掘进技术和掘锚一体化掘进技术三条掘进作业线的国内外发展现状, 依据国家煤炭安全监察局发布的《煤矿机器人重点研发目录》中对煤矿掘进机器人的规划, 从感知、决策、执行三个层面分析了煤矿掘进机的机器人化应具备的特征, 感知层通过多类传感器对煤矿井下巷道环境信息进行采集感知, 决策层分析和求解作业任务, 并融合感知层传输的环境信息, 制定规划出最适合的控制策略, 执行层接收决策层的指令, 对机器人化掘进机组的位姿和运动进行控制。系统阐述了机器人化掘进机组关键技术: 掘进机器人的自主定位、煤岩识别与自动截割、远程监控与故障检测等技术; 临时支护机器人的自动支护技术; 钻锚机器人的平行钻锚技术; 辅助装载运输机器人的同步运输技术等。对比分析国际先进机器人化掘进装备和机组, 结合我国煤矿巷道掘进技术与装备的现状, 提出了煤矿掘进机的机器人化技术与装备发展思路和研究方向: 冲击致裂-快速掘进新技术; 远程前探-精准惯导新技术; 协同掘支-自适应顶新装备; 钻锚一体-智能锚固新装备, 实现钻探-掘进-支护-锚固-运输协同作业的机器人化掘进机组快速掘进技术, 最终达到煤矿巷道掘进作业少人化、无人化的目标。

关键词: 智能掘进机; 机器人化作业; 掘进机器人机组; 无人化开采

中图分类号: TD421.5

文献标识码: A

Status quo and development of robotization research of coal mine roadheader

YANG Jianjian^{1,2}, ZHANG Qiang¹, WANG Chao¹, CHANG Boshen¹,

WANG Xiaolin¹, GE Shirong^{1,2}, WU Miao^{1,2}

(1. Department of Mechanical, Electrical and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083; 2. Robotic Mining Equipment Institute, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083)

Abstract: Based on the development requirements of intelligent and unmanned development of coal mine roadway, the domestic and foreign development status of the three heading operation

基金项目: 煤矿综掘悬臂式掘进机行走、纠偏及截割精准智能测控原理与方法/国家自然科学基金面上项目(编号: 2018101060080);

基于时变疲劳特性的悬臂式掘进机关键结构工作可靠性研究/国家自然科学基金青年项目(编号: 2018101030061); 数字化

综合掘进系统集成及示范(课题 2-综掘面掘进装备精准导控技术)/2019 山西省科技重大专项(编号: 20181102027)

作者简介: 杨健健(1988-), 男, 汉族, 山东济宁人, 博士, 硕士生导师, 从事智能掘进装备相关研究工作。电子信箱:

yangjiannedved@163.com

lines of cantilever roadheader comprehensive mining technology, continuous coal mining machine heading technology and roadhead anchor integrated heading technology are summarized. According to the national coal The planning of coal mining robots in the “Key Catalogue of Coal Mine Robots R & D” issued by the Safety Supervision Bureau analyzes the characteristics of robotization of coal mining machines from three levels of perception, decision making, and execution. Collect and sense the environmental information of underground roadways, analyze and solve the task at the decision-making level, and integrate the environmental information transmitted by the perception level to formulate and plan the most suitable control strategy. The execution level receives instructions from the decision-level level, and positions the robotized tunneling group. Posture and movement are controlled. The key technologies of the robotized tunneling group are systematically explained: autonomous positioning of the tunnelling robot, coal and rock identification and automatic cutting, remote monitoring and fault detection, etc; automatic support technology for temporary support robots; parallel drilling anchors for drilling and anchoring robots Technology; synchronous transportation technology for auxiliary loading and transportation robots, etc. Contrast and analysis of international advanced robotized tunneling equipment and groups, combined with the current status of mining technology and equipment in China's coal mine roadways, put forward the development ideas and research directions of the robotization technology and equipment of coal mining tunneling machines: impact cracking-new technology of rapid tunneling; remote New technology of forward exploration-accurate inertial navigation; new equipment for coordinated excavation support-adapted roof protection; new equipment for drilling and anchoring-intelligent anchoring to realize the rapid advancement of the robotized excavation group for drilling-drilling-support-anchor-transport cooperative operation Technology, and finally reached the goal of less and unmanned mine tunneling operations.

Key words: intelligent roadheader; robotic work; tunneling robot group; unmanned mining

国际能源署 (IEA) 发布的一份报告预测, 到 2040 年, 中国对煤炭的需求将占全球煤炭需求的 50%, 全球煤炭需求将增加 15%。在未来的一段时间里, 煤炭仍占据我国能源主要组成部分。我国约有 90% 的煤炭资源以井工方式开采, 并且遵循“采掘并重, 掘进先行”的开采原则。随着煤矿行业走向自动化、智能化, 井下开采工作面装备水平得到提升, 因掘进效率低下导致的“采掘失衡”问题成为了现如今大型煤矿井巷面对的主要难题^[1-3]。掘进装备发展水平滞后, 直接制约了快速、精准掘进, 也制约了煤矿高效生产。

机器人是具有智力或感觉与识别能力的人造机器装置^[4], 煤矿掘进机器人是指能够通过自动控制自主完成煤矿掘进任务的机器群组, 属于工业特种机器人。掘进机器人装备有齐全传感器来获取环境信息 (定位、姿态和超前探测等), 根据制定的任务

选择最优的规划和决策, 具备钻探-掘进-支护-锚固的机器人机构并协同工作。由此, 构成掘进机器人的基本要素应包括感知要素、决策要素和执行要素^[5]。

为达到国家安监总局提出的“机械化换人、自动化减人”的目标, 煤矿掘进机需要完成自动化、机器人化, 并逐渐研发集“人工智能”于一体的智能化掘进机器人, 使煤矿行业最终实现掘进工作面少人化、无人化的目标。

1 国内外掘进机群组的研究现状

煤矿井巷所采用的掘进机装备总体归为三类: 欧洲和我国采用悬臂式掘进机进行综掘开采, 能适用于各种复杂的巷道环境, 但是掘进和支护工作不能同步执行; 美国采用连续采煤机掘进作业线, 锚杆机锚固, 交替作业; 澳大利亚采用掘锚一体化机组, 实现了掘锚平行作业, 连续采煤机和掘锚机作

业线都可以实现煤矿巷道的快速掘进^[6-7]。 表 1, 图 1 所示^[8]。
煤巷用掘进机设备配置和掘进工艺流程如

表 1 煤巷用掘进机设备配置表

Table 1 Equipment layout table for coal roadway boring machine

作业线	掘进、支护设备	配套设备	特点及适用范围
一	悬臂式掘进机、 单体锚杆钻机	桥式转载机、带式输送机	适用于单巷掘进, 适用范围广; 掘锚不能 平行作业。
	悬臂式掘进机、 机载锚杆机		适用于单巷掘进, 适应范围广, 有利于提 高支护效率; 机载锚杆钻机与掘进设备不配套, 相互影响。
二	连续采煤机、 锚杆钻车	梭车、给料破碎机、 带式输送机	适用于双巷或多巷掘进, 掘进与支护平行 作业, 掘进速度快; 要求顶板稳定。
		连续运输系统、带式输送机	适用近水平煤层掘进, 中等稳定顶板。
三	掘锚一体机	行走给料破碎转载机、桥式胶 带转载机、可伸缩胶带输送机	适用于巷道断面大的单巷掘进, 掘锚平行 作业, 适应顶、底板中等稳定的近水平煤层。

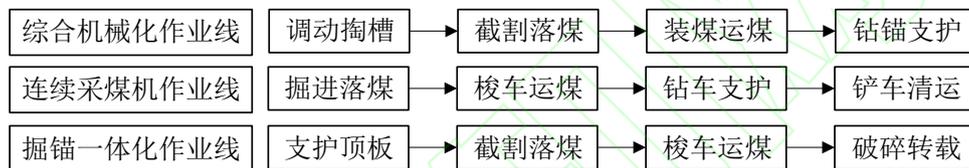


图 1 煤矿巷道掘进工艺流程图

Fig.1 Flow chart of coal mine roadway excavation

1.1 综合机械化掘进技术

综掘开采作业线整体装备由悬臂式掘进机、锚杆钻机、带式运输机、桥式转载机、综机载除尘器等设备组成, 具体如图 2 所示。近几年国外综掘技术的主要研究方向有^[9-12]: 1) 提高掘进机切割功率以及可靠性; 2) 配套设备多样化; 3) 采用机电一体化技术; 4) 研究探索新型的截割技术。国内综掘技术的发展趋势为^[13-16]: 悬臂式掘进机上加装临时支护装置的掘支机, 加装锚杆钻机形成掘锚一体机, 研发自移式临时支架, 以及具有自动截割功能的掘进机等。综合机械化掘进技术仅适用于单巷掘进, 掘进与支护不能平行作业, 且截割效率不高, 后续配套运输方式落后, 智能化和无人化程度低。目前应用效果较为良好的解决方案是: 在顶板稳定的状况下, 采用机载锚杆钻机进行支护用以缩短支护所需时间, 通过超前液压支架或自带盾牌掩护支架完成掘进机和支护同时作业等。



图 2 综掘作业线设备

Fig.2 Comprehensive excavation line equipment

1.2 连续采煤机掘进技术

连续采煤机结合锚杆钻车、履带行走支架、梭车、多功能铲运车等可形成快速掘进工艺线, 如图 3 所示。美国、德国以及英国等国家在连续

采煤机进行综掘开采方面上，技术处于领先，其中绝大部分的机器设备已经实现全遥控控制^[17-18]。我国对连续采煤机的研发工作起步较晚，08年自主研发了国内首台连采机ML340，实现了掘进、除尘、调动、运输等功能，月掘进可达1500m，满足实际生产要求^[19-20]。目前，有关连续采煤机的研究技术朝掘锚一体机方向发展，连续采煤机通过加载锚杆钻机虽然可以实现掘锚同步作业，但是在顶板条件差的煤矿巷道中无法得到使用，使其适用范围受限。



图3 连续采煤机作业线设备

Fig.3 Continuous coal miner line equipment

1.3 掘锚一体化掘进技术

以掘锚机为核心，配套行走给料破碎转载机、带式转载机、带式输送机运输设备，形成煤矿巷道的快速掘进、支护、运输的同步作业线，极大提高了掘进效率，如图4所示。国外掘锚机具备智能掘进、同步锚固和自动截割技术，可进行远距离控制和工作面实时监控，但仍处于半自动化水平，尚无智能快速掘进成套技术与装备^[21-23]。我国近几年才开展掘锚一体化研究，与国外产品还有差距，目前我国掘锚一体化掘进技术的研究方向为：基于悬臂式掘进机的掘支护一体机和基于连续采煤机的掘锚一体机^[24]。



EJM340/4-2 掘锚一体机



SZB 型桥式刮板转载机 DSJ 型可伸缩带式输送机

图4 掘锚一体化作业线设备

Fig.4 Integrated anchor line equipment

2 机器人化掘进群组关键技术

2019年1月，国家煤炭安全监察局发布了《煤矿机器人重点研发目录》公告，规划了煤炭开采中掘进、采煤、运输、安控和救援5类、38种煤矿机器人，其中掘进类机器人就有掘进工作面机器人、掘进机器人、临时支护机器人和锚杆机器人等^[25]。

智能掘进机器人群组系统联合以上掘进类机器人协同工作，需要具备以下特征：（1）状态感知：掘进机器人依托自主定位和自动驾驶技术，完成对煤矿巷道环境地图的构建，并进行实时掘进位姿、临时护顶、钻锚姿态的精准感知；通过煤岩识别和自动截割技术，实现截割臂自适应截割和断面自动成形；利用数字孪生技术，在远程可视化监控平台中完成对掘进机器人的行为映射。（2）自主决策：根据感知环节反馈回来的信息，建立相应的掘进机器人作业模型，利用智能技术进行识别、理解并对模型的改变做出相应的决策，具有学习能力和自适应性，分析和求解任务目标，制定规划出最适合的控制策略。（3）精准执行：通过构建机器人化掘进群组位姿和运动关联模型，提高掘进机器人群组执行工作的可靠性和控制的准确性，实现掘进、支护、锚固、运输的协同作业。

2.1 掘进机器人技术

2.1.1 自主定位与自动驾驶技术

掘进机自主定位技术是指掘进机器人通过传感器检测其在巷道中的位置和姿态。目前，主流的自主定位技术研究方法有激光指向器、机器视觉、iGPS（indoor Global Positioning System，室内定位系统）技术、超宽带测距技术、惯性导航等^[26-27]。中国矿业大学杜雨馨等^[28]研究了基于机器视觉的掘进机机身位姿测量方法，对固定摄像头拍摄的图像进行特征点提取，如图5a所示，系统测量角度误差在0.5°以内，位移误差可以控制在20mm范围内。中国矿业大学（北京）陶云飞^[29]利用iGPS测量原理方法检测掘进机机身位姿变化，其定位原理如图5b所示，实验结果表明当测距为40m，测量次数为200时，最大测量误差为

0.070 m。中国矿业大学（北京）符世琛^[30]采用超宽带（Ultra Wide Band, UWB）测距技术对掘进机进行定位，如图 5c 所示，采用 Caffery 算法的掘进机位姿检测系统在 10 m 处的航向角、俯仰角、横滚角精度可达到 0.2°以下。中国矿业大学（北京）陶云飞^[31]提出了利用惯性导航技术进行掘进机空间位姿参数测量，通过仿真分析得出航向角、俯仰角、横滚角均存在 1.86°-3.01°的测量误差，偏向位移误差较大。

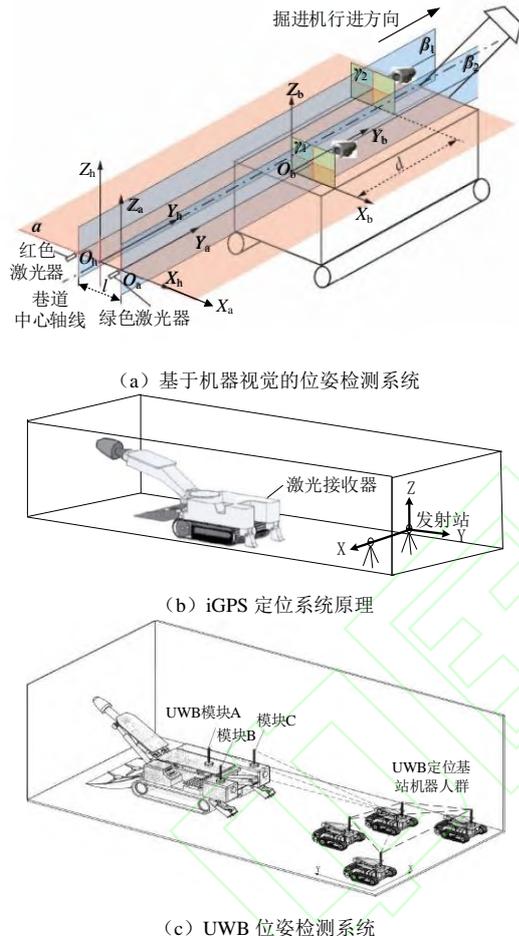


图 5 自主定位相关技术

Fig.5 Autonomous positioning related technology

基于自动驾驶技术、无人路径规划，实现整机全功能遥控。西安科技大学马宏伟^[32]针对煤矿井下无 GPS 环境，提出了通过激光雷达的 SLAM（Simultaneous Localization and Mapping，即时定位与地图构建）技术实现机器人的位姿估计和环境地图构建，如图 6 所示。在高精地图和自主定位技术支持下，基于自动驾驶技术的掘进机将实现从驾驶操作工位少人到无人的跳跃。

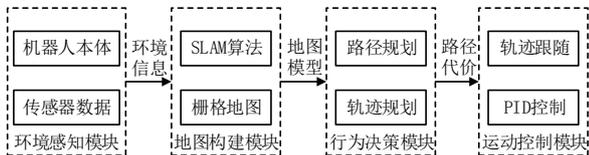
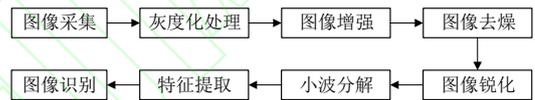


图 6 自动驾驶控制系统

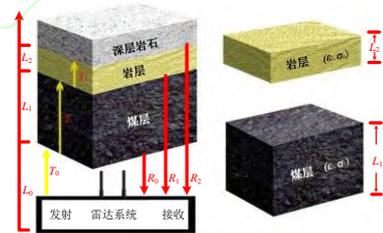
Fig.6 Automatic driving control system

2.1.2 煤岩识别与自动截割技术

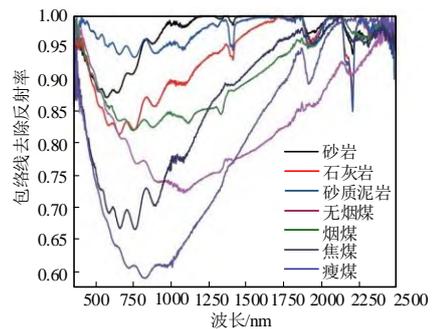
煤岩识别是掘进机器人截割头高度自适应调节的基础，可降低截割头滚齿的更换频率，提高其使用寿命。中国矿业大学（北京）杨健健^[33]通过采集的不同工况下采煤机不同测点的振动信号进行时频域分析，提出了基于振动检测的煤岩界面识别方法理论基础和技术体系。西安工程大学的田慧卿^[34]根据煤岩灰度值和纹理的不同进行煤岩识别，煤岩图像识别流程图如图 7a 所示。中国矿业大学王昕^[35]提出了微波频段的煤岩界面识别方法，其煤岩识别原理如图 7b 所示。中国矿业大学杨恩^[36]对煤岩试样进行了反射光谱的采集，煤岩样品包络线去除反射率如图 7c 所示，提出 SAM（Spectral Angle Matching，光谱角度匹配）比较算法识别速度达到毫秒级，总体识别精度达到 92%。



(a) 煤岩图像识别流程图



(b) 雷达煤岩识别模型图



(c) 煤岩包络线去除反射率曲线

图 7 煤岩识别技术

Fig.7 Coal rock identification technology

为保证巷道掘进前进工作面的延续性完整，每次进刀切割工作面的形状需要保持一致，控制掘进机器人截割轨迹的自动截割技术至关重要。中国矿业大学（北京）王苏或^[37]提出了一种有关纵轴式掘进机记忆截割的控制方法，通常人工示范采用自下向上：A-B-C-D-E-F-G-K 或者自上至

下类 S 形截割路径，具体如图 8 所示，信息储存后记忆截割系统控制截割误差可在 6 cm 以内。中国矿业大学（北京）田劼^[38]介绍了掘进机记忆截割控制方法，实现了掘进机按照人工示范截割路径进行自动截割，自动截割控制流程图如图 9 所示。

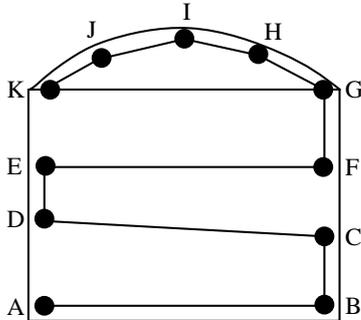


图 8 掘进机截割路径示意图

Fig.8 Schematic diagram of the cutting path of the roadheader

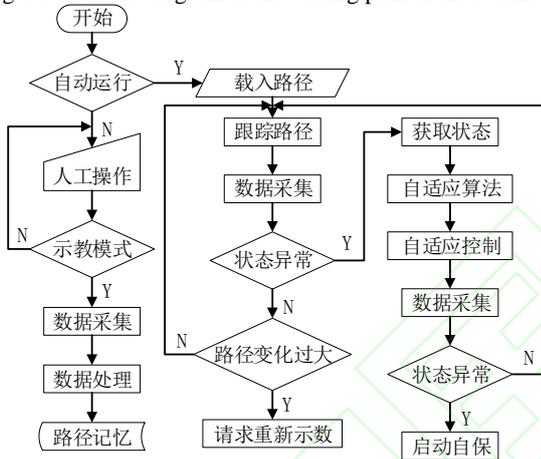


图 9 自动截割控制流程图

Fig.9 Automatic cutting control flow chart

2.1.3 远程监控与故障诊断技术

掘进机器人工作面环境复杂，稍有不慎，容易产生安全隐患。煤矿巷道掘进施工的无人化离不开远程监控技术，煤矿工人只需通过远程可视化监控平台，对掘进机器人组的工作进行实时视频监控，远离危险的工作面作业环境。中国矿业大学（北京）张敏骏^[39]设计的掘进机远程监控与位姿检测精度验证系统，包括传感器、工控机、视频监控系统等，相比其它位姿检测系统测量角度误差在 1°以内，偏向距离误差在 0.01 m 以内。中国矿业大学伍小杰^[40]提出了一种基于 Linux 操作系统、机载控制器与矿井环网交换机的掘进机远程监控系统，如图 10 所示，其紧急故障自动保护响应时间为 20.6 ms，小于要求自动保护响应时间 (<0.1 s)。上海创力集团股份有限公司徐桂军^[41]设计远程无线视频监控控制系统主要由视频监控模块、无线传输模块、遥控器模块等组成，如图

11 所示，可实现掘进机左前方、右前方、掘进机器整体、掘进机后方 4 个位置的画面监控。

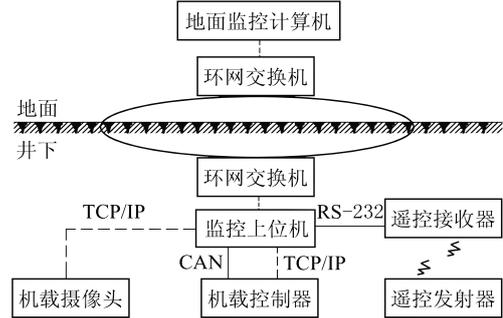


图 10 掘进机远程监控系统

Fig.10 Roadheader remote monitoring system

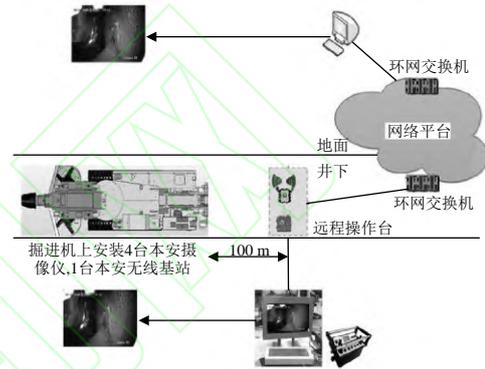


图 11 掘进机无线监控系统

Fig.11 Roadheader wireless monitoring system

掘进机一般处于恶劣的工作环境中，因此很容易在工作过程中发生故障。中国矿业大学（北京）杨健健^[42]对 EBZ-160 型掘进机截割部进行故障诊断，采用 PSO-BP（Particle Swarm Optimization-back propagation，粒子群优化神经网络）诊断算法能准确有效地诊断掘进机截割部故障，在迭代步数为 1000 步时，PSO-BP 网络精度达到 4.74×10^{-15} 。三一重工杨洁^[43]提出了利用主成分分析方法对掘进机实时数据进行特征信息提取，采用 SPE（Squared Prediction Error，平方预测误差）贡献率进行故障变量诊断能够快速诊断出故障，如图 12 所示。中国矿业大学（北京）刘强^[44]在掘进机截割系统故障问题上研究，通过故障树与层次分析法结合法，得出掘进机最易出现的系统故障问题为电动机超负荷工作。

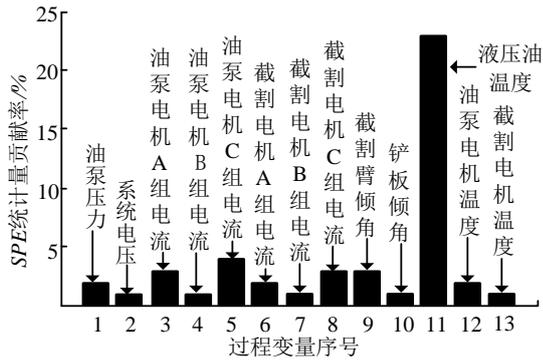
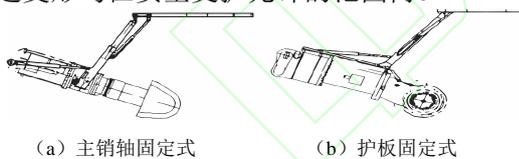


图 12 液压油温度故障 SPE 贡献率图

Fig.12 Hydraulic oil temperature failure SPE contribution rate chart

2.2 临时支护机器人技术

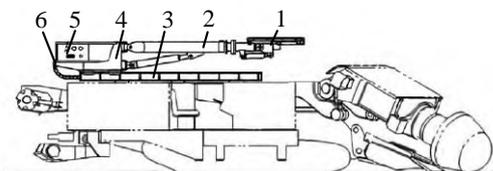
为保证煤矿巷道的掘进安全，巷道的临时支护机器人必须具备可靠性高、自适应力强、临时支护机器人群组协同工作等特点。山西天地煤机装备有限公司王本林^[45]分析了两种掘进机机载临时支护形式：(1)主销轴固定式临时支护；(2)护板固定式临时支护，如图 13 所示。中国煤炭科工集团太原研究院王帅^[46]提出一种适合悬臂式掘进机的机载临时支护，如图 14 所示，由遥控器操作实现无线遥控，可与 EBZ120TP、EBZ160TY 等多种型号的掘进机集成配套。中国矿业大学（北京）薛光辉^[47]基于自主设计的机器人化自移式支锚联合机组，并对旗山矿围岩-超前支架进行数值仿真和应力分析，如图 15 所示，平衡后的超前支架支护巷道顶板最大下沉量为 29.64 mm，巷道最大底鼓量为 33.58 mm，超前支架顶部受力为 0.13 MPa，巷道变形均在安全支护允许的范围内。



(a) 主销轴固定式 (b) 护板固定式

图 13 两种形式的临时支护

Fig.13 Two forms of temporary support



1. 支护架 2. 伸缩臂 3. 轨道 4. 基座 5. 操作台 6. 托链

图 14 悬臂式掘进机机载临时支护

Fig.14 Cantilever roadheader airborne temporary support

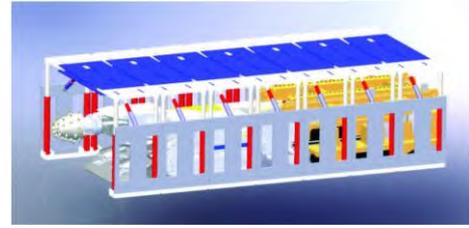
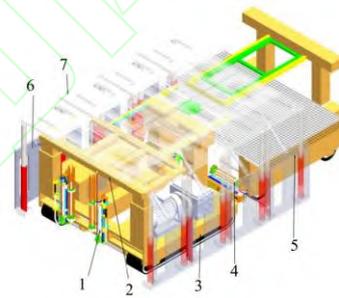


图 15 机器人化自移式支锚联合机组

Fig.15 Robotic self-propelled anchor combined unit

2.3 钻锚机器人技术

目前的气压、液压钻锚技术已经趋于成熟，但是不能和掘进工作同时进行，自动化程度不高。钻锚机器人需实现钻孔、自动装载卸下锚杆、锚杆间距定位、各单元协同工作互不干扰等功能，达到巷道快速掘进钻锚要求。中国矿业大学（北京）郝雪第^[48]设计出一种可以与掘进设备协同作业的机器人化钻锚车，如图 16 所示。西安科技大学马宏伟^[49-50]设计了一款集合布网和钻锚功能的履带式钻锚机器人，如图 17 所示，实现了巷道高效快速钻锚。



1. 顶板钻臂 2. 临时支护机构 3. 车体 4. 侧帮钻臂 5. 锚网存储及输送机构 6. 临时支护支架护帮板 7. 临时支护支架顶梁

图 16 机器人化钻锚车原理示意图

Fig.16 Schematic diagram of robotized drilling anchor car

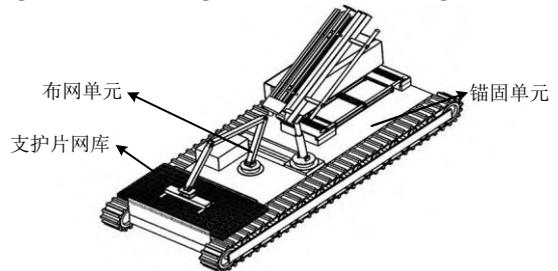


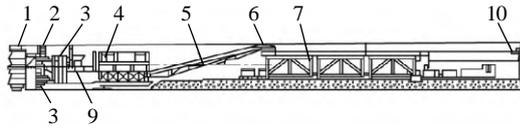
图 17 钻锚机器人

Fig.17 Drill anchor robot

2.4 全断面掘进机器人技术

煤矿井下岩石巷道掘进长期存在掘进成形进度慢、工人掘进工作面环境差等难题。开展全断面智能化掘进技术，主要研发集掘进、锚固、除尘、导向、排水、故障检测于一体的全断面掘进机器人，实现安全、高效、智能、环保的全断面掘进机器人化掘进。中煤科工集团杨生华^[51]介绍了 $\phi 5\text{ m}$ 全断面岩巷掘进机包括主机及后配套系

统,如图 18 所示, EJ50 全断面岩巷掘进机完成了山西东曲煤矿主平硐及大巷共 3 600 m 掘进任务。中国科学院武汉岩土力学研究所刘泉声^[52]在超千米深的井巷建设中引入了 TBM (Tunnel Boring Machine, 全断面掘进机), 将建设方案中涉及的关键岩石力学和机械制造问题解决并在此基础上将其改进为全断面岩石巷道掘进机 (Full Face Roadway Boring Machine,RBM), 其工作机理如图 19 所示。



1.刀盘 2.机头架 3.水平支撑板 4.司机房 5.带式输送机
6.转载机 7.龙门架车 8.环形支架机 9.锚杆钻机 10.激光导向仪
图 18 φ5 m 全断面岩巷掘进机总体示意图

Fig.18 Overall representation of the φ5 m full-section rock

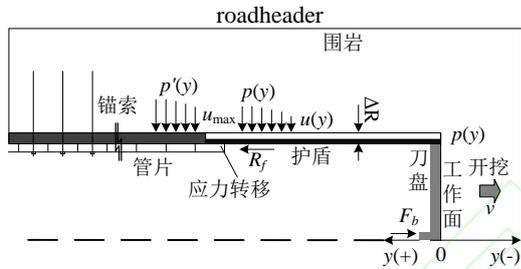


图 19 RBM 巷道开挖力学简图

Fig.19 Schematic diagram of RBM roadway excavation

2.5 辅助装载运输机器人技术

研发新型履带自驱动辅助运输车, 智能化完成掘进巷道辅助运输任务。以自动装载、运输车遥控、人员感知和避障系统为目标, 开发辅助运输车的履带行走机构、举升机构、机架、液压系统、智能遥控系统。最终完成辅助运输车的智能远程控制、自动装载和无人驾驶等功能。

3 机器人化掘进装备与群组

3.1 机器人化掘进装备

国内外较为先进的机器人化掘进装备如图 20 所示, 主要代表如下:

山特维克 MB670-1 型掘锚机, 适用于有色金属矿井的连采, 在巷道成型、钻锚质量和永久锚固等性能上, 可适应煤矿巷道开采需求。久益 12CM30 型掘锚机, 采用集成锚固系统, 可实现同时截割和锚固功能, 有效提高了掘进效率。

“蛟龙号”世界首套全断面高效快速掘进机, 具有全断面连续切割技术、远程控制、智能导向、同步锚固、调车、运输、除尘等功能。中铁重工 ZJM4200 掘锚机, 具备掘进、防护、钻探、同步

锚护、自主定位、除尘、故障检测等功能的煤矿巷道快速掘进装备。



(a) MB670-1 型掘锚机



(b) 12CM30 型掘锚机



(c) 全断面高效快速掘进系统



(d) ZJM4200 掘进机

图 20 掘进机器人装备

Fig.20 Tunneling robot equipment

3.2 机器人化掘进群组协同系统

中国矿业大学(北京)依托国家 973 项目*, 开展机器人化掘支锚联合机组研究工作, 研发恶劣环境下无人采掘装备的截割-支护-运载集成系统的多功能集合装备, 揭示集成系统的协同性机理, 提出多机协同并行作业的冲突消解与避让策略, 为构建可靠、实时、安全的机器人化掘进群组控制系统提供前提。实现快速掘进、支护锚固、自主定位等功能的无人化掘支锚联合机组虚拟样机如图 21 所示。

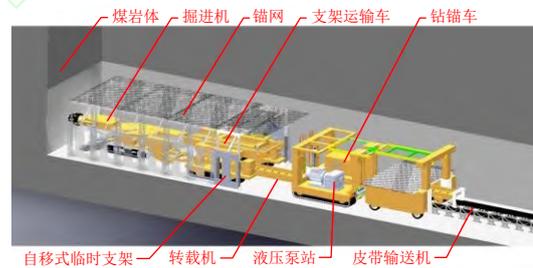


图 21 掘支锚联合机组虚拟样机

Fig.21 Virtual prototype of the joint anchor and unit

煤炭科学研究总院太原研究院研发的机器人化掘进群组协同系统将掘装功能与锚杆钻机有机的结合, 实现截割、装运、锚杆支护三位一体, 其适用范围更广, 掘进效率更高, 如图 22 所示。



* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)一机器人化无人综掘装备自主主导原理及实现方法; 项目编号: 2014CB046306

图 22 综掘运锚一体机

Fig.22 Comprehensive drilling and anchoring machine

中铁重工提出实现机器人化掘进群组快速掘进的方法^[53]: 1) 掘的快: 研发新型设备, 提高装备水平; 2) 支的快: 提出支护新理念, 加大排距, 简化支护工艺; 3) 省时间: 实现掘支平行作业。研发快速掘锚成套装备如图 23 所示, 实现了设备能力提升, 装机功率大, 破岩能力强, 单进速度快。完成了顺序作业向平行作业转变, 时空同步, 节省时间。



图 23 快速掘锚成套装备

Fig.23 Fast anchoring equipment

4 展望

未来, 煤矿掘进要实现无人化, 掘进机器人融合云计算、大数据、5G 传输和人工智能等技术, 让每个设备都具有自主感知和智能控制能力, 通过搭建工业互联网平台, 让掘进机器人群组协同工作, 完成探—掘—支—锚—运等环节的一体化, 最终实现无人化巷道开拓。目前, 我国正在积极开展智能化煤矿建设, 通过分析国内外掘进机群组的发展现状, 提出仍需攻克的关键技术以及智能化掘进机器人的研发方向。

(1) 冲击致裂-快速掘进新技术。将可控冲击波技术^[54]应用于煤矿井下巷道掘进作业中, 有效增加掘进工作面煤岩层的裂隙, 提高掘进机器人的掘进效率。

(2) 远程前探-精准惯导新技术。矿井突水多发生于巷道掘进工作面, 采用钻孔激发极化法进行超前探水预报^[55], 排除煤矿巷道掘进隐伏水患; 现有的导航技术受井下复杂的基站布局、电磁环境干扰影响, 研发高精度的捷联惯性导航系统, 实现掘进机器人精准定位导航。

(3) 协同掘支-自适应顶新装备。在掘进机器人巷道掘进过程中, 同步完成顶板和两帮的支护, 针对煤矿巷道复杂的围岩条件, 研究支架-围岩耦合监测控制系统^[56-57], 对围岩压力和支架支撑力的状态进行实时监测感知, 自适应调节支护姿态。

(4) 钻锚一体-智能锚固新装备。钻锚机器人应具备自主移动和远程交互控制、钻孔自动定位、钻进方位导航、钻具全自主钻进控制与运行状况监测、孔区压力分布状态智能感知等关键技

术。

参考文献 (References) :

- [1] 葛世荣,王忠宾,王世博. 互联网+采煤机智能化关键技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(07):1-9.
GE Shirong, WANG Zhongbin, WANG Shipo. Study on key technology of internet plus intelligent coal shearer[J].Coal Science and Technology,2016,44(07):1-9.
- [2] 王国法,王虹,任怀伟,等.智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径[J].煤炭学报,2018,43(02):295-305.
WANG Guofa, WANG Hong, REN Huaiwei, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine[J].Journal of China Coal Society,2018,43(02):295-305.
- [3] WANG Jinhua, YU Bin, KANG Hongpu, et al. Key technologies and equipment for a fully mechanized top-coal caving operation with a large mining height at ultra-thick coal seams.[J]International Journal of Coal Science & Technology 2015,2(2):97-161.
- [4] 蔡自兴,谢斌. 机器人学[M].2015.
CAI Zixing, XIE Bin. Robotics[M].2015.
- [5] 葛世荣. 煤矿机器人现状及发展方向 [J]. 中国煤炭,2019,45(07):18-27.
GE Shirong. Present situation and development direction of coal mine robots[J].China Coal,2019,45(07):18-27.
- [6] WANG D , CHAI Y , LING R , et al. Research on automatic boom-type roadheader profiling[C]// World Congress on Intelligent Control & Automation. IEEE, 2008.
- [7] Corkum A G , Board M P . Numerical analysis of longwall mining layout for a Wyoming Trona mine[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 89(Complete):94-108.
- [8] 王虹. 我国综合机械化掘进技术发展 40a[J]. 煤炭学报,2010,35(11):1815-1820.
WANG Hong.The 40 years developmental review of the fully mechanized mine roadway heading technology in China[J].Journal of China Coal Society,2010,35(11):1815-1820.
- [9] OSMAN Z, HEKIMOGLU, M. AYHAN. Effects of cutting head motion on the boom length of rock and coal cutting machines[J].Mineral Resources Engineering,1999(4).
- [10] Wyrobek, E, Pieczora, E. The development of polish roadheaders for coal mining applications[J].Coal international,1999,5(7):97-99.
- [11] Eyyuboglu E M , Bolukbasi N . Effects of circumferential pick spacing on boom type roadheader cutting head performance[J].Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research,2005,20(5):418-425.
- [12] Hargrave Chad O., James Craig A., Ralston Jonathon C.. Infrastructure-based localisation of automated coal mining equipment. [J]International Journal of Coal Science & Technology 2017, 4(3):252-261.
- [13] 汪胜陆,孟国营,田劫,等.悬臂式掘进机的发展状况及趋势[J].煤矿机械,2007.6,28(6).

- WANG Shenglu, MENG Guoying, TIAN Jie, et al. Development status and trend of boom-type roadheader[J]. Coal mining machinery,2007,6,28 (6).
- [14] 毛君,吴常田,谢苗.浅谈悬臂式掘进机的发展及趋势[J].中国工程机械学报,2007,5(2):240-242.
- MAO Jun, WU Changtian, XIE Miao. Advances and trends on boom-type excavators[J].Chinese Journal of Construction Machinery,2007,5(2):240-242.
- [15] 李恩龙,温保岗.我国悬臂式掘进机的发展趋势[J].煤矿机械,2013,34(5):4-7.
- LI Enlong, WEN Baogang. Development trend of china roadheader[J].Coal Mine Machinery,2013,34(5):4-7.
- [16] 张建广.悬臂式掘进机智能截割控制技术发展现状及关键技术探讨[J].煤炭工程,2015,47(2): 89-91.
- ZHANG Jianguang. Discussion on development status and key technology of boom-type roadheader intelligent cutting control[J].Coal Engineering,2015,47(2): 89-91.
- [17] Schumacher F P, Kim E. Modeling the pipe umbrella roof support system in a Western US underground coal mine[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2013,60:114-124.
- [18] Hekimoglu O Z, Ozdemir L. Effect of angle of wrap on cutting performance of drum shearers and continuous miners[J].Mining Technology,2004,113(2):118-122.
- [19] 李晓豁.我国发展连续采煤机的前景[J].矿山机械,2007(12):10-12+4.
- LI Xiaohuo. Development prospect of domestic continuous shearer[J].Mine Machinery,2007(12):10-12+4.
- [20] 曹艳丽.连续采煤机动态特性及结构优化设计的研究[D].辽宁工程技术大学,2012.
- CAO Yanli. Research on dynamic characteristics of continuous miners and optimization design of continuous miners's structure [D].Liaoning University of Engineering and Technology,2012.
- [21] Joy Global Inc. Joy advanced shearer automation[J].Coal International,2013,261(1):61-64.
- [22] Ralston J, Reid D, Hargrave C, et al. Sensing for advancing mining automation capability: A review of underground automation technology development[J].International Journal of Mining Science and Technology,2014,24(3):305-310.
- [23] Catpillar Inc. CAT detect personnel for longwall mining[J].Coal International,2012,260(6): 63-67.
- [24] WANG Jinhua. Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines.[J].International Journal of Coal Science & Technology 2014, 1(3):253-260.
- [25] 国家煤矿安全监察局.煤矿机器人重点研发目录[EB/OL].(2019-01-10)[20191120].http://www.chinacoal-safety.gov.cn/gk/tzgg/201901/t20190109_223745.shtml.
- National Coal Mine Safety Administration. Coal mine robot key research and development catalogue [EB/OL].(2019-01-10)[20191120].http://www.chinacoal-safety.gov.cn/gk/tzgg/201901/t20190109_223745.shtml.
- [26] Habacher M, O'Leary P, Harker M, et al. Machine vision system for the control of tunnel boring machines[C]// Is&t/spie Electronic Imaging.2013.
- [27] 李睿. 悬臂掘进机机身位姿参数检测系统研究[D].中国矿业大学(北京),2012.
- LI Rui. Research on an automatic detection system for the position and orientation parameters of boom-type roadheader body[D].China University of Mining and Technology (Beijing),2012.
- [28] 杜雨馨,刘停,童敏明,等.基于机器视觉的悬臂式掘进机机身位姿检测系统[J].煤炭学报,2016,41(11):2897-2906.
- DU Yuxin, LIU Ting, TONG Minming, et al. Pose measurement system of boom-type roadheader based on machine vision[J].Journal of China Coal Society,2016,41(11):2897-2906.
- [29] 陶云飞,李瑞,李嘉庚,等.iGPS的单站多点分时测量系统对掘进机偏向位移精度研究[J].煤炭技术,2017,36(02):246-247.
- TAO Yunfei, LI Rui, LI Jiageng, et al. Research on positioning accuracy of roadheader based on singlestation, multipoint and time-shared of iGPS measurement system[J].Coal Technology,2017,36(02):246-247.
- [30] 符世琛,成龙,陈慎金,等.面向掘进机的超宽带位姿协同检测方法[J].煤炭学报,2018,43(10):2918-2925.
- FU Shichen, CHENG Long, CHEN Shenjin, et al. Ultra-wideband pose collaborative detection method of roadheader [J].Journal of China Coal Society,2018,43(10):2918-2925.
- [31] 陶云飞,杨健健,李嘉庚,等.基于惯性导航技术的掘进机位姿测量系统研究[J].煤炭技术,2017,36(01):235-237.
- TAO Yunfei, YANG Jianjian, LI Jiazhen, et al. Research on position and orientation measurement system of heading machine based on inertial navigation technology[J].Coal Technology,2017,36(01):235-237.
- [32] 杨林,马宏伟,王岩,等.煤矿巡检机器人同步定位与地图构建方法研究[J].工矿自动化,2019,45(09):18-24.
- YANG Lin, MA Hongwei, WANG Yan, et al. Research on method of simultaneous localization and mapping of coal mine inspection robot[J].Industrial Mining Automation,2019,45(09):18-24.
- [33] 杨健健. 采煤机工作状态参数与煤岩硬度影响关系研究[D].中国矿业大学(北京),2013.
- YANG Jianjian. Research on the affect relationship between shearer working condition parameters and coal-rock hardness[D].China University of Mining and Technology (Beijing), 2013.
- [34] 田慧卿,魏忠义.基于图像识别技术的煤岩识别研究与实现[J].西安工程大学学报,2012,26(05):657-660.
- TIAN Huiqing, WEI Zhongyi. The research and implementation of coal and rock identification based on image recognition technology[J].Journal of Xi'an University of Technology,2012,26(05):657-660.
- [35] 王昕. 基于电磁波技术的煤岩识别方法研究[D].中国矿业大学,2017.
- WANG Xin. Study of coal rock identification method based on electromagnetic wave technology[D].China University of Mining and Technology,2017.
- [36] 杨恩,王世博,葛世荣,等.煤岩界面的高光谱识别原理[J].煤炭学报,2018,43(S2):646-653.

- YANG En, WANG Shibo, GE Shirong, et al. Study on the principle of hyperspectral recognition of coal-rock interface[J].Journal of China Coal Society,2018,43(S2):646-653.
- [37] 王苏彧,田劼,吴淼.纵轴式掘进机截割轨迹规划及边界控制方法研究[J].煤炭科学技术,2016,44(04):89-94+118.
- WANG Suyu, TIAN Jie, WU Miao. Study on cutting trace planning of longitudinal roadheader and boundary control method[J].Coal Science and Technology,2016,44(04):89-94+118.
- [38] 田劼,杨阳,陈国强,等.纵轴式掘进机巷道断面自动截割成形控制方法[J].煤炭学报,2009,34(01):111-115.
- TIAN Jie, YANG Yang, CHEN Guoqiang, et al. Automatic section cutting and forming control of longitudinal-axial-roadheaders[J].Journal of China Coal Society,2009,34(01):111-115.
- [39] 张敏骏,臧富雨,吉晓冬,等.掘进机远程监控系统设计与位姿检测精度验证[J].煤炭科学技术,2018,46(12):48-53.
- ZHANG Minjun, ZANG Fuyun, JI Xiaodong, et al. Design of remote monitoring system for roadheader and accuracy verification of position and posture detection[J].Coal Science and Technology,2018,46(12):48-53.
- [40] 伍小杰,孙新贺,刘贺,等.悬臂式掘进机远程监控系统设计[J].煤炭科学技术,2011,39(03):87-90.
- WU Xiaojie, SUN Xinhe, LIU He, et al. Design on remote monitoring and control system of boom type mine roadheader[J].Coal Science and Technology,2011,39(03):87-90.
- [41] 徐桂军.煤矿掘进工作面远程无线视频监控控制系统设计[J].煤矿机械,2019,40(04):22-23.
- XU Guijun. Design of remote wireless video surveillance control system for coal mine tunneling face[J].Coal Mine Machinery,2019,40(04):22-23.
- [42] 杨健健,唐至威,王子瑞,等.基于 PSO-BP 神经网络的掘进机截割部故障诊断[J].煤炭科学技术,2017,45(10):129-134.
- YANG Jianjian, TANG Zhiwei, WANG Zirui, et al. Fault diagnosis on cutting unit of mine roadheader based on PSO-BP neural network[J].Coal Science and Technology,2017,45(10):129-134.
- [43] 杨洁,侯宝革,付晓,等.基于主成分分析的掘进机故障诊断方法[J].煤矿机械,2014,35(08):276-278.
- YANG Jie, HOU Baoge, FU Xiao, et al. Fault diagnosis method of roadheader based on principal component analysis[J].Coal Mine Machinery,2014,35(08):276-278.
- [44] 刘强,尹同舟,唐秀山,等.掘进机截割系统的故障树-层次分析法诊断分析[J].煤炭科学技术,2017,45(03):123-127.
- LIU Qiang, YIN Tongzhou, TANG Xiushan, et al. Diagnosis analysis on fault tree-analytic hierarchy process of roadheader cutting system[J].Coal Science and Technology,2017,45(03):123-127.
- [45] 王本林.掘进工作面机载临时支护设计 and 应用[J].煤矿机械,2019,40(09):133-134.
- WANG Benlin. Design and application of temporary support on roadheader for tunneling face[J].Coal Mine Machinery,2019,40(09):133-134.
- [46] 王帅.悬臂式掘进机机载临时支护研究[J].煤矿机械,2014,35(01):122-124.
- WANG Shuai. Research of temporary support on boom-type roadheader[J].Coal Mine Machinery,2014,35(01):122-124.
- [47] 薛光辉,程继杰,管健,等.深部综掘巷道机器人化超前支护方案与最佳支护时机研究[J].矿业科学学报,2019,4(04):349-356.
- XUE Guanghui, CHENG Jijie, GUAN Jian, et al. Robotized advance support scheme and optimum support opportunity for deep fully mechanized roadway[J].Journal of Mining Science,2019,4(04):349-356.
- [48] 郝雪弟,景新平,张中平,等.机器人化钻锚车钻臂工作空间分析及轨迹规划[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(09):2128-2137.
- HAO Xuedi, JING Xinping, ZHANG Zhongping, et al. Workspace analysis and trajectory planning of drill arm of roboticized bolting truck[J].Journal of Central South University(Science and Technology),2019,50(09):2128-2137.
- [49] 马宏伟,尚东森,杨宇婷.煤矿钻锚机器人自动钻锚单元的设计与仿真分析[J].煤矿机械,2018,39(10):3-6.
- MA Hongwei, SHANG Dongsen, YANG Yuting. Design and simulation analysis of drilling and anchoring robot of coal mine automatic drilling and anchoring unit[J].Coal Mine Machinery,2018,39(10):3-6.
- [50] 马宏伟,王成龙,尚东森,等.煤矿井下钻锚机器人布网单元设计与仿真[J].煤炭工程,2019(06):160-164.
- MA Hongwei, WANG Chenglong, SHANG Dongsen, et al. Design and simulation of layout net unit for drill-anchor robot in underground coal mine[J].Coal Engineering,2019(06):160-164.
- [51] 杨生华,芮丰,蒋卫良,等.煤矿全断面岩巷掘进机开发应用与发展[J].煤炭科学技术,2019,47(06):1-10.
- YANG Shenghua, YU Feng, JIANG Weiliang, et al. Development and application of full-section rock tunneling boring machine in coal mine [J].Coal Science and Technology,2019,47(06):1-10.
- [52] 刘泉声,黄兴,时凯,等.煤矿超千米深部全断面岩石巷道掘进机的提出及关键岩石力学问题[J].煤炭学报,2012,37(12):2006-2013.
- LIU Quansheng, HUANG Xing, SHI Ka, et al. Utilization of full face roadway boring machine in coal mines deeper than 1000 km and the key rock mechanics problems [J].Journal of China Coal Society,2012,37(12):2006-2013.
- [53] 央视网.我国首台煤矿大断面快速掘锚成套装备在长沙下线.[EB/OL].(2019-04-29)[20191120]. <http://news.cctv.com/2019/04/29/VIDENo5x2h5gqwUriN21F19F190429.shtml>.
- CCTV. China's first coal mine large-section rapid excavation and anchoring complete set is off the assembly line in Changsha. [EB/OL].(2019-05-15)[20191120]. <http://news.cctv.com/2019/04/29/VIDENo5x2h5gqwUriN21F19F190429.shtml>.
- [54] 张永民,蒙祖智,秦勇,等.松软煤层可控冲击波透瓦抽采创新实践——以贵州水城矿区中井煤矿为例[J].煤炭学报,2019,44(08):2388-2400.
- ZHANG Yongmin, MENG Zuzhi, QIN Yong, et al. Innovative engineering practice of soft coal seam permeability enhancement by controllable shock wave for mine gas extraction: A case of Zhongjing Mine, Shuicheng, Guizhou Province, China [J].Journal of China Coal Society,2019,44(08):2388-2400.
- [55] 刘春生,武强,曾一凡.基于钻孔激发极化法的井下超前探水技术研究[J].煤炭工程,2018,50(03):99-103+107.

LIU Chunsheng, WU Qiang, ZENG Yifan. Study on advance underground water forecasting based on borehole induced polarization method [J].Coal Engineering,2018,50(03):99-103+107.

[56] WANG Guofa, PANG Yihui. Surrounding rock control theory and longwall mining technology innovation. [J]International Journal of Coal Science & Technology 2017, 4(4): 301-309.

[57] KANG Hongpu. Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: a review. [J]International Journal of Coal Science & Technology 2014, 1(3):261-277.

