

# 我国煤矿快速掘进 20 a 发展与展望

王 虹<sup>1,2</sup>, 陈明军<sup>1,3</sup>, 张小峰<sup>1,3</sup>

(1. 中国煤炭科工集团 太原研究院有限公司, 山西 太原 030006; 2. 煤炭科学研究总院有限公司, 北京 100013; 3. 煤矿采掘机械装备国家工程实验室, 山西 太原 030006)

**摘 要:** 针对煤矿智能化快速发展, 煤矿掘进面临新的机遇和挑战, 笔者对我国煤矿快速掘进 20 a 的发展进行全面综述, 以期理清掘进工艺、关键工序的技术及装备、成套装备的发展脉络及趋势, 以便更好地推动掘进智能化的高速健康发展。在掘进工艺方面, 双巷掘进开辟了截割、支护在不同巷道同时作业的新途径; 掘锚同步工艺, 时间-空间多维同步快速掘进工艺打破了先掘后支、及时全部支护的传统, 创立了掘锚同步、迎头必要支护与多维空间永久支护动态匹配的分区支护方法。在掘进装备方面, 形成了以纵轴、全宽横轴截割滚筒为主, 全断面截割滚筒为辅的截割滚筒结构形式, 并且在高功率密度减速器及整机设计理念不断突破的基础上, 成功研制纵轴截割功率达 315 kW、全宽横轴截割功率达 560 kW 的系列高效截割系统。在锚护装备方面, 由传统的单体锚杆钻机发展出锚杆钻机、一键操作流程化钻机、钻机集群等, 在有限空间内钻机的数量和作业安全性得到大幅提升, 作业流程得到大幅简化, 锚孔识别、锚护路径自动规划等智能化技术已进入工业性试验阶段。柔性运输系统的发明解决了掘进面短距离高效转载难题。在成套装备配置上, 形成了以连续采煤机、掘锚一体机、掘锚机(掘进机+机载锚杆钻机)、煤矿全断面掘进机为龙头的四大类快速掘进系统, 在四大快速掘进系统下, 又分别形成了不同的作业线, 实现了对不同地质条件巷道快速掘进的全覆盖。掘进工程系统层级上实现了具有成套装备的远程控制、集中控制、视频监控、闭锁联动、人员接近预警等智能化功能。回顾快速掘进的发展历程, 提出完善时间-空间多维同步快速掘进理论、以智能掘进搜集透明地质的基础大数据、加强掘进巷道辅助作业工艺及设备研究、加强装备的智能化核心技术研发等智能掘进的发展方向。

**关键词:** 快速掘进; 智能掘进; 截割; 锚护; 掘进成套装备

中图分类号: TD421 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)02-1199-15

## Twenty years development and prospect of rapid coal mine roadway excavation in China

WANG Hong<sup>1,2</sup>, CHEN Mingjun<sup>1,3</sup>, ZHANG Xiaofeng<sup>1,3</sup>

(1. Taiyuan Research Institute Co., Ltd., China Coal Science and Engineering Group, Taiyuan 030006, China; 2. China Coal Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. National Engineering Laboratory for Coal Mining Machinery, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Coal mine excavation faces some new opportunities and challenges under the rapid development of intelligent coal mines. In order to promote intelligent tunneling rapidly and healthily, a comprehensive review about the 20 years development of rapid coal mine tunneling in China was conducted, with a view to clarify the development context and trends

收稿日期: 2023-10-17 修回日期: 2023-12-15 责任编辑: 王 凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1310

基金项目: 山西省青年基金自由探索资助项目(202103021223462); 山西省基础研究计划自然科学基金面上资助项目(202303021211260)

作者简介: 王 虹(1959—), 男, 江苏江阴人, 研究员, 博士生导师。E-mail: wanghong@ccteg.cn

通讯作者: 张小峰(1983—) 男, 江苏东台人, 研究员。E-mail: 13453130510@163.com

引用格式: 王虹, 陈明军, 张小峰. 我国煤矿快速掘进 20 a 发展与展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 1199-1213.

WANG Hong, CHEN Mingjun, ZHANG Xiaofeng. Twenty years development and prospect of rapid coal mine roadway excavation in China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 1199-1213.



移动阅读

of tunneling technology, key process technologies and equipment, and integrated equipment in tunneling system. In terms of tunneling technology, the double-roadway excavation has opened up a new way for excavation and anchor in adjacent roadways at the same time. The excavation and anchor synchronization process, and the time-space multi-dimensional synchronous rapid tunneling process break the tradition which contains cutting first, then supporting, and in-time fully supporting, and thus establishes a new excavation process based on cutting and supporting at the same time, the dynamic matching of head face necessary support and permanent support in multi-dimensional space. In terms of key core technologies, the cutting head has gone through three styles: longitudinal axis style, horizontal axis style with full width and full-face style. On the basis of continuous breakthroughs in the high-power density reducer and design concept of whole machine, a series of high-efficiency cutting systems with longitudinal cutting power up to 315 kW and full-width transverse cutting power up to 560 kW has been successfully developed. Supporting operation is developed from the traditional single anchor drilling rig to machine-arm mounted, machine mounted anchor drilling rig, anchor drilling rig with one-key operation, and anchor drilling rig cluster, etc. The number of drilling rigs and operation safety in limited space have been greatly improved, and the operation process has been greatly simplified. Intelligent technologies such as anchor hole identification and automatic planning of anchor path have entered the industrial test stage. The invention of the flexible transport system solves the efficient transfer problem of coal in short distances in tunnel. In terms of integrated equipment configuration, four types of fast excavation modes led by continuous mining machine, bolter miner, roadheader and TBM have been formed. Many different operation lines have been formed under the four rapid excavation modes, that form a full coverage of rapid excavation under various geological conditions. At the system level, intelligent functions such as remote control, centralized control, video monitoring, locking linkage, and personnel approach warning have been realized. Based on the development process of rapid tunneling, the development directions of intelligent tunneling are finally proposed, which contains the theory improvement of multi-dimensional synchronous rapid tunneling in time and space, the data collection for transparent geology based on intelligent excavation, the research of auxiliary operation technology and equipment of tunneling roadway, and the research and development of equipment intelligent technology.

**Key words:** rapid tunneling; intelligent tunneling; cut; anchoring; equipment sets for excavation

巷道掘进是煤炭地下开采的先行基础工程,我国每年需掘出约 1.3 万 km 的巷道,才能保证约 40 亿 t 的煤炭产量,工程量巨大<sup>[1]</sup>。从 20 世纪 80 年代起,随着我国回采工作面机械化开采的大面积推广,回采工作面的推进速度和产量不断提高;然而受地质条件、生产条件、掘进工艺及设备能力等因素的限制,全国掘进工作面的平均掘进速度仅为约 200 m/月,掘进安全事故频发,掘进作业人员是回采作业人员的 3 倍才能满足采掘接续的要求<sup>[2]</sup>。保证掘进安全,提高掘进速度和效率,解决“采掘失衡”的难题一直是煤矿掘进工程的研究热点与难点<sup>[3-6]</sup>。

我国煤矿分布广泛,煤矿巷道所属的地质条件差别巨大。从空顶距和空顶时间上分类,有空顶距离大于 10 m 且长期稳定的鄂尔多斯、陕蒙矿区,也有开挖即破碎,需要提前注浆的两淮地区。从巷道所处深度分类,有埋深小于 250 m 的浅层巷道,有埋深在 250~600 m 的中深部巷道,还有深达 1 500 m 的千米深井高地应力巷道<sup>[7]</sup>。从围岩性质上分类,有顶、底板及主煤层均较软的三软巷道,有夹矸、煤岩分界面变化剧烈的半煤岩巷道,也有岩石坚固性系数高达

$f_{10}$  以上的全岩巷道。巷道地质条件的多样性决定了巷道快速掘进工艺、装备以及系统设备配套的多样性。

掘进机械化和掘进设备的多样化是我国煤矿掘进速度提高的基础保障。从 20 世纪 70 年代开始,我国掘进装备经历了引入、仿制消化吸收阶段和自主创新阶段。21 世纪初,我国才具有了掘进装备完全自主研发、设计和生产制造能力,奠定了煤矿掘进机械化大力推广和快速掘进发展的基础。经过 20 a 的发展,全国巷道平均掘进速度提高了约 2 倍,安全事故数降低了约 1/3,掘进从业人员降低了约百万。

2020 年 2 月国家发改委、国家能源局等八部委联合印发了《关于加快煤智能化发展的指导意见》,要求大力推进煤矿智能化建设,到 2025 年实现采掘、运输等各系统的智能化决策和自动化协同运行<sup>[8]</sup>。巷道掘进是煤矿智能化建设的主战场之一,经过 3 a 多的建设,掘进工作面智能化水平得到大幅提高,但是关键设备和环节的智能化技术还未突破,距常态智能化运行还有较大的差距。

笔者立足于煤矿巷道掘进处于机械化快速掘进向智能化快速掘进转型的关键时间节点,对 20 a 来煤

矿巷道掘进为解决安全、高效两大问题所取得的成果和工程实践进行了全面综述,以期理清掘进工艺、重大装备及其核心技术、成套系统的发展脉络趋势,进而更好地推动快速掘进智能化的发展。

## 1 快速掘进工艺的发展

巷道掘进包含截割落煤、装煤运煤、锚杆支护、通风除尘等工序,受作业空间限制,截割落煤、锚杆支护严格按照串行作业进行,其中锚杆支护作业时间占到 60%。因此,将截割落煤、锚杆支护的串行工序变为并行工序,并尽量提高并行工序的同步率是提高掘进速度的主要途径。以此为目标,形成了截割、支护在相邻巷道交叉作业的双巷掘进工艺;截割、支护并行作业的掘锚同步工艺;以顶板失效时间为基础的截割、支护空间错开布置的时间-空间多维同步快速掘进工艺。

### 1.1 双巷快速掘进工艺

双巷掘进最初是为了解决高瓦斯、长距离掘进的通风难题而提出的,通过将相邻回采工作面的相邻巷道打通,实现掘进过程中的全负压通风,从而提高通风的安全性。由于受限于小转弯半径煤岩高效转载设备的缺乏和空顶距的要求,两条巷道中分别布置有独立的掘进设备、锚杆设备以及操作人员<sup>[9]</sup>,没有达到快速掘进的目的。

20 世纪 90 年代,神东煤炭集团引进了以连续采煤机、梭车、锚杆钻车为核心的双巷掘进成套装备,其机动灵活的调机特点使双巷共用一套掘进设备,奠定了双巷快速掘进的基础,其工艺布置如图 1 所示。在一条巷道中,连续采煤机在一条巷道中进行截割、装运作业,后方的梭车将煤炭转载到破碎机及带式输送机上;与此同时,锚杆钻车在另一条巷道中进行锚杆支护作业。当连续采煤机完成截割循环、锚杆钻车完成支护后,连续采煤机和锚杆钻车在联络巷处互换工作面,进行下一循环的掘进作业<sup>[10]</sup>。

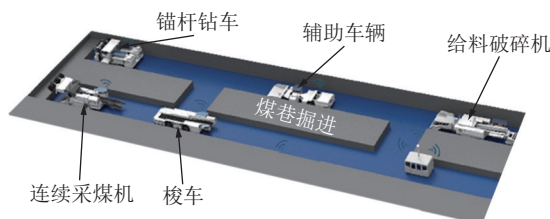


图 1 双巷掘进设备布置示意

Fig.1 Schematic diagram of equipment layout in double tunnel excavation

经过长期的工程探索,在陕蒙千万吨高效矿井中,

已形成了联络巷相距 50 m,双巷中心相距约 20 m,巷道宽度约 5 m,一个作业循环内连续采煤机进尺 6~10 m 的双巷掘进典型工艺参数<sup>[11]</sup>。成套设备方面,通过消化吸收,国内煤机研发企业已实现了连续采煤机、梭车、锚杆钻车全系列设备的研发与制造,并结合智能化发展要求,形成了具有我国特色的智能双巷掘进成套装备<sup>[10]</sup>,在陕蒙地区实现了双巷掘进月进尺 1 000~1 500 m 的常态化作业。

### 1.2 掘锚同步快速掘进工艺

掘锚同步是指截割作业和锚杆支护同时进行的掘进工艺,该工艺的实现更多地依赖于掘进设备的创新。20 世纪 90 年代初,山特维克煤机事业部突破了掘进装备需要依靠履带向前推进截割的传统思想,发明了由油缸推进截割的截割系统及掘锚一体机,实现了截割系统工作同时,整机平台保持相对静止的状态,为同步进行锚杆支护作业创造了条件。通过对整机进行结构优化,掘锚一体机集成了大支撑力的临时支护系统,保障了锚杆支护人员在临时支护下作业。掘锚一体机的发明不仅提高了掘进速度,而且提高了作业人员的安全性。

笔者所在团队率先攻克了高精度重载圆柱导向机构、双驱合流高功率密度减速器等关键部件,实现了掘锚一体机的国产化。通过对整体平台布局进行优化,国产掘锚一体机满足 4~6 根锚杆同时支护的要求,使掘进面锚杆支护作业由原来的 2~3 人锚杆 1 根锚杆提高到 1 人同时支护 2~3 根锚杆<sup>[6]</sup>,极大地缩减了锚杆支护时间,减少了用工量。根据我国煤矿地质条件的多样性,研发团队进一步降低了掘锚一体机的接地比压,研发了小空顶距掘锚一体机和大功率半煤岩掘锚一体机,将掘锚同步作业工艺从稳定围岩地质条件,推广到一般稳定围岩、不稳定围岩以及半煤岩的地质条件。

### 1.3 时间-空间多维同步快速掘进工艺

虽然掘锚同步快速掘进工艺缩短了支护时间,提高了掘进效率,但是支护速度仍然小于截割速度,需要进一步优化支护工艺。在综合考虑地质力学参数、空顶距、围岩变形与时间关系的基础上,康虹普等<sup>[4]</sup>以空顶时间和空顶距离为指标,将我国煤矿巷道围岩按照稳定性划分成 5 类。根据围岩稳定性的类别,笔者提出以空间换时间的多维同步快速掘进工艺<sup>[12]</sup>,打破了“先掘后支、顺序支护”固有传统,创新提出“掘支同步、前疏后密”的分区支护新方法(图 2)。分区支护方式包括锚杆先打、锚索后打,顶板锚杆先打、帮

锚杆滞后,部分顶、帮锚杆先打、其余锚杆滞后补打等多种形式。

以软弱围岩条件为例,形成了空顶区、临时支护区、部分支护区以及全部支护区的4个分区。各区的顶板,侧帮的支护位置和支护数量如图2所示<sup>[1]</sup>,在满足支护安全的前提下,将部分锚杆和全部锚索进行相应的滞后<sup>[11]</sup>。在地质条件多变和不明的环境中,采用激光扫描或红外相机技术,对围岩变形进行实时监测,通过锚杆锚索测力计等对围岩的应力状态、离层位移和速度、锚杆锚索的应力状态进行实时监测,根据监测结果,动态调整分区形式、各分区内支护锚杆的数量,各锚杆预紧力等参数,在掘进安全的前提下,实现掘支完全同步。

根据提出的时间-空间多维同步快速掘进工艺,并在我国各种地质条件矿井大量的工程试验基础上,总结出时间-空间多维同步快速掘进装备配套(表1)。在非常稳定围岩条件下,创造了月进尺3 088 m的世界纪录;在稳定围岩的地质条件下实现了月进1 500 m的常态化作业;在一般围岩条件下和不稳定围岩条件下,月进尺分别达到了800和400 m,掘进速度提高了1倍以上。

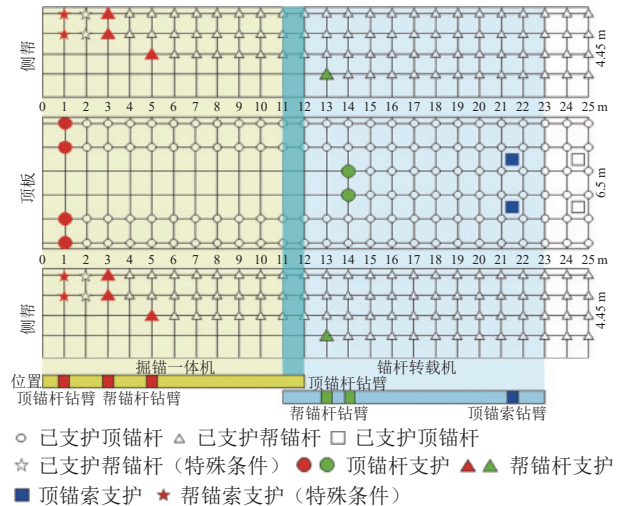
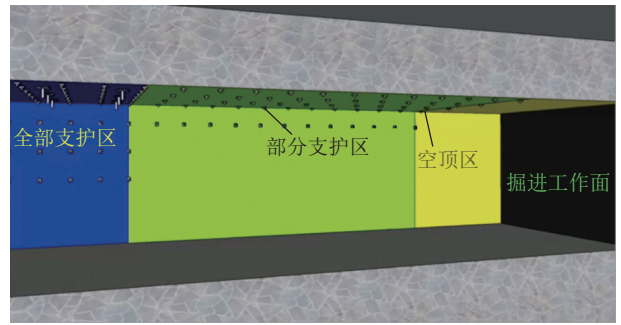


图2 时间-空间多维同步掘进示意

Fig.2 Schematic diagram of time-space multi-dimensional simultaneous tunneling

表1 围岩应力稳定性分类及相应时间-空间支护方式

Table 1 Classification of surrounding rock stress stability and corresponding time-space support methods

围岩	非常稳定I	稳定II	一般III	不稳定IV	极不稳定V
顶板	空顶距 > 10 m 且长期稳定	空顶距 2~10 m, 稳定 1 d 以上	空顶距 1~2 m, 稳定 > 1 h	空顶距限于 1 个排距, 稳定约 1 h	即破碎 无自稳
侧帮	空帮距 > 15 m 可长期稳定	空帮距 3~15 m, 稳定 7 d 以上	空帮距 2~3 m, 稳定一个班	空帮距 1~2 个支护排距, 稳定时间 > 1 h	即破碎 无自稳
推荐支护方式	先掘 后支护	掘锚同步+前部部分锚杆	掘锚同步+前部锚杆完全	锚杆立即全部支护,	超前注浆加固或 锚杆加固。
推荐成套设备配置	掘锚一体机/矩形全断面掘进机+破碎转载机+柔性输送系统+跨骑式锚杆机	掘锚一体机+锚杆转载机+柔性运输系统	掘锚一体机/掘锚一体机(小空顶)+锚杆转载机+柔性运输系统	掘锚一体机(小空顶)/掘锚一体机+锚杆转载机+带式转载机+迈步式自移机尾	掘进机+两臂锚杆机/掘锚机

## 2 快速掘进关键工序的装备及技术发展趋势

除了提高截割落煤、锚杆支护的同步率,提高截割、锚护等工序的效率,降低循环周期内各工序的耗时是掘进速度提升的保障。研究人员围绕截割、支护、运输以及辅助作业等工序进行了大量研究,形成了众多的关键技术与装备。

### 2.1 煤岩高效截割技术与装备

煤岩截割是快速掘进的第 1 道工序,截齿及相应的截割机构形式是影响截割效率的两大因素。镐型

截齿具有自旋转的能力,可以实现截齿的均匀磨损,从而提高使用寿命,是我国煤巷截割采用的主要截齿形式。随着岩巷快速掘进发展的需要,鉴于镐型截齿在煤巷截割中的杰出性能,将镐型截齿推广到岩巷截割成为一种必然。然而在岩巷机械化掘进初期,存在镐齿寿命随岩石硬度和磨蚀性增加快速降低、合金头开裂、合金头崩落、截齿折弯等现象<sup>[13]</sup>。通过研究,研发团队发现高速截割导致截齿温度升高至 600 ℃ 是合金头开裂的主要原因;合金头与齿身连接处不耐


磨, 导致合金头在使用过程中连接强度逐渐降低是崩落的主要原因; 采用破煤的细长截齿导致齿身强度不够是截齿折弯的主要原因。为此, 笔者创新性提出了低截割线速度、大单刀力的硬岩镐齿截割方法, 并发明了红外成像精确定位截齿磨损区域, 激光表面精确熔覆截齿表面微米级强化技术, 实现了镐型截齿对抗压强度为  $f_{10}$  岩石的高效截割<sup>[14]</sup>。对于抗压强度大于  $f_{12}$  硬岩截割, 镐型截齿拽曳式的截割形式决定了其磨损严重, 无法满足高效的要求。因此, 研究人员提出了水射流辅助镐齿截割、磨粒截割、振动刀盘截割以及辊压截割等多种模式<sup>[15]</sup>, 在煤矿掘进中以滚压截割为破岩机构的煤矿全断面掘进机在不同矿区进

行了试验研究<sup>[16]</sup>。

截割滚筒是截齿在空间布局的有机集合, 根据掘进时的截割轨迹分为纵轴式、全宽横轴式和全断面式。纵轴截割滚筒 (表 2) 使用历史最久的, 其可以截割出不同形状的断面, 对围岩应力条件、巷道起伏转弯适应能力强, 但其截割轨迹复杂, 包括掏槽、上下摆动截割、左右摆动截割等, 巷道成型速度慢。全宽横轴截割滚筒 (表 2), 将截割轨迹简化为掏槽和上下截割, 截割效率明显提高, 在对巷道起伏拐弯适应性方面与纵轴截割滚筒媲美, 但是由于只能掘出矩形巷道, 对围岩应力条件要求较高。全断面截割滚筒的截割轨迹进一步简化为掏槽推进<sup>[17]</sup>, 但是对断面岩性差异大的巷道适应能力弱。

表 2 不同截割滚筒参数对比

Table 2 Parameters comparison among different cutting heads

截割滚筒结构			
截割轨迹	掏槽-左右-上下摆动截割	掏槽-上下摆动截割	掏槽推进
截割功率/kW	120~315	270~560	1 580
适应地质条件	煤-半煤岩-岩	煤-半煤岩	煤
成型巷道形状	任意形状、尺寸可调	矩形, 尺寸可调	矩形, 尺寸固定
难易程度	困难(轨迹复杂)	容易	困难(断面适应能力弱)
主要应用设备	掘进机、掘锚机	掘锚一体机, 连续采煤机	全断面掘进机

从纵轴到横轴全宽, 再到全断面, 截割滚筒形式上发展的背后, 隐藏着高功率减速器等关键传动技术的进步。在井下受限空间的约束下, 提高减速器的功率密度是增加截割功率, 提高截割速度的卡脖子问题。在 20 世纪 90 年代, 我国煤矿用掘进机的最大截割功率仅为 160 kW, 为了满足单齿破岩能力的需求, 采用纵轴式截割滚筒布置方式。随着超高强度、高淬透性齿轮材料低温马氏体处理工艺, 传动副齿形和齿向修缘技术, 无轴承行星传动技术等关键技术的发明及应用<sup>[14,18]</sup>, 同等功率下减速器体积减少了 1/3, 奠定了纵轴截割功率提升至 315 kW、全宽截割功率提升至 560 kW 的基础。截割减速器故障在线监测系统, 冷却油质监测系统的应用进一步保障了截割减速器的可靠性, 奠定了截割智能化发展的设备基础。

另一方面, 掘进装备各参数的高效匹配是截割功率高效发挥的基础。研究团队在煤矿机械采掘装备国家工程实验室的平台上, 通过单截齿旋转截割试验和整机性能试验, 以煤岩截割工况为核心, 建立了截

割力-牵引力-整机附着力的三力耦合模型 (图 3), 形成了整机及核心机构参数化设计方法, 有效指导了掘进类设备的参数化高效设计<sup>[19]</sup>。

截割自动化和智能化是煤岩截割的主要发展方向, 在掘进工程应用中需要加强 3 个方面的攻关: 基于多源信息融合的煤岩识别, 自适应截割以及截割轨迹的自主规划<sup>[20-22]</sup>, 其中煤岩识别是基础。在性质变化不剧烈的全岩和全煤的掘进巷道内, 在保障机身稳定前提下, 通过预设的截割轨迹可以实现掘进工作面的自动化截割。但是在半煤岩、断层等地质特征复杂的掘进巷道内, 必须首先对煤岩性质以及分界面进行准确识别和定位, 并在此基础上对牵引速度、截割速度、截割轨迹进行重新规划, 才能达到截割断面自动成型的目的。

在全宽截割滚筒的基础上, 笔者提出了全流程控制的截割方案 (图 4)。首先将振动、电流、油缸位移、扭矩等多源信息送入神经网络深度学习, 获得全宽截割在不同工况下和位姿下的煤岩识别模型; 在截割过

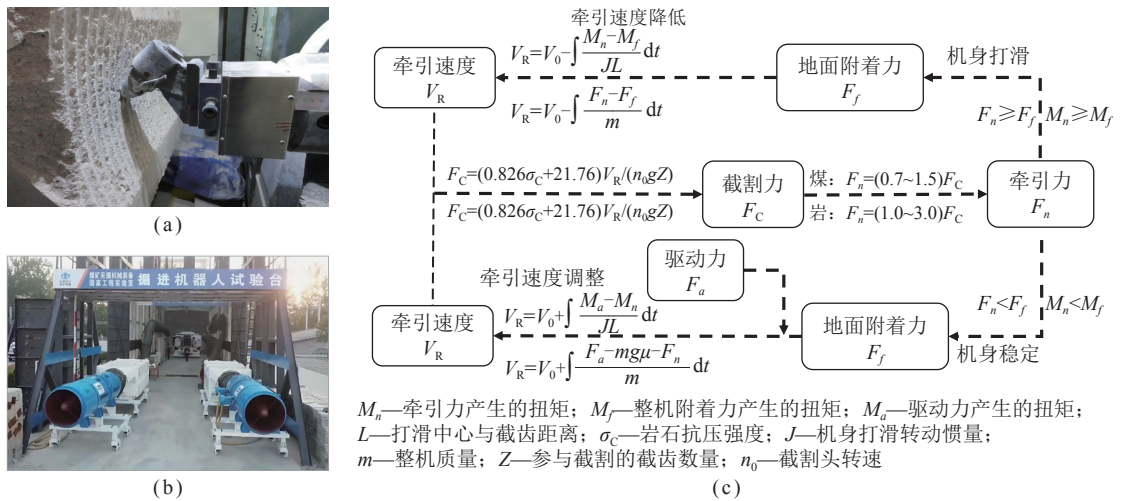


图 3 掘进装备整机设计的三力耦合模型

Fig.3 Three-force coupling model for roadheader design

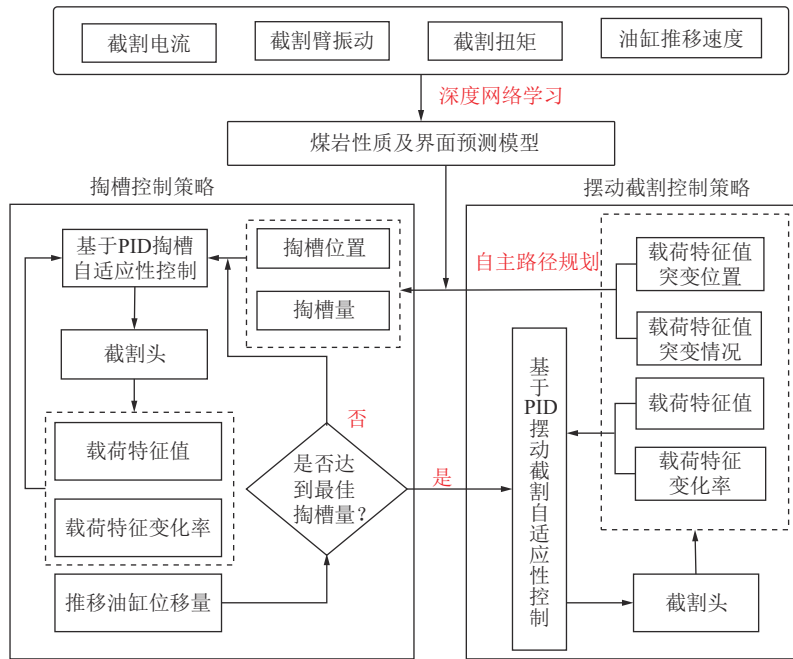


图 4 全宽截割全流程截割控制方案

Fig.4 Cutting control solution for full-width cutting in whole process

程中,采用深度学习训练的模型,对横截面上各部分的煤岩性质进行实时识别并记录,并调整截割、牵引速度,实现自适应截割。通过上一次截割循环中记录的截割面上煤岩信息及分布情况,指导下一个截割循环的截割轨迹规划,从而达到全流程优化控制的目的。

随着掘进工程的智能化水平提高,截割将不仅具有开拓出几何空间的功能,还将具有收集巷道的煤岩信息,为透明地质提供大数据基础的功能,其具体实现方法为:首先通过负载电流、扭矩、振动、截割油缸位移等多源信息融合的方法,实时识别并记录煤岩在掘进断面的二维分布信息;然后结合掘进装备上的高

精度导航技术,将煤岩分布的二维信息延伸至沿巷道长度方向的三维分布信息;最后综合利用 2 条巷道的煤岩分布三维信息,以及地测仪测量的回采块段内的地质信息形成回采区段的透明地质。

### 2.2 高效钻锚技术及装备

支护是快速掘进的安全护盾,也是长期限制快速掘进效率的主要工序。我国煤岩地质条件复杂,存在软岩大变形、冲击地压、高地应力、破碎围岩等多种地质条件<sup>[23]</sup>,相应的支护工艺、支护方法、空顶距、间排距等参数有很大的区别。国内的研究人员在支护理论、支护方法、支护参数等方面进行了大量的研究<sup>[24]</sup>,笔者在此不进行详细综述。笔者主要对保障巷

道掘进安全的锚杆支护方法和设备进行综述 (图 5)。

在我国锚杆支护技术应用初期,主要采用凿岩机进行钻孔和锚杆预紧,存在劳动强度大、安装复杂、锚孔成型质量差的问题。20 世纪 80 年代,我国逐渐引入澳大利亚的气动单体锚杆钻机,并在其基础上逐渐研制出适合我国地质条件的气动式、电动式及液压式单体锚杆钻机,并在国内大范围推广应用<sup>[7]</sup>。单体锚杆钻机需要 2~3 人配合操作,在掘进面狭小的空间内,为保证施工安全,一般只允许单台锚杆钻机进行作业,锚护效率低,锚护时间占到总掘进时间的 60% 以上;另一方面,锚杆钻机操作人员需要在空顶下作业,安全隐患大。

为了降低锚杆钻机搬运及锚钻作业中的劳动强度,基于液压油缸驱动的两臂锚杆钻车被成功研制<sup>[25]</sup>。该设备将锚杆钻机安装于机械臂的末端,操作人员在远程进行遥控操作。通过运动链上关键节点的信息

检测结合机械限位,防止了 2 台锚杆钻机作业过程中的位姿干涉,实现了掘进工作面 2 人同时操作 2 台锚杆钻机的安全作业。为了提高掘进、支护作业互换时设备的灵活通过性,两臂锚杆钻车装配有履带行走装置,且整机的宽度控制在 1.3 m 以内。在宽度较小的巷道内,将掘进机整体结构进行优化,并把锚杆钻机集成到掘进机的机身两侧,利用滑轨将锚杆钻机推至工作面内进行锚护,形成了掘进与锚护一体的掘锚机。

虽然锚杆钻车极大提高了支护效率,但钻杆、锚杆的互换,药卷填充仍需要人工操作,不能完全解决人员在空顶区下作业的安全隐患。为此,山西天地煤机装备有限公司和煤科总院开采研究院分别提出了不同的解决方案。山西天地煤机装备有限公司在两臂锚杆钻车的基础上发明了树脂药卷柔性输送技术、锚杆钻杆原位互换技术、锚护路径自动规划技术,实

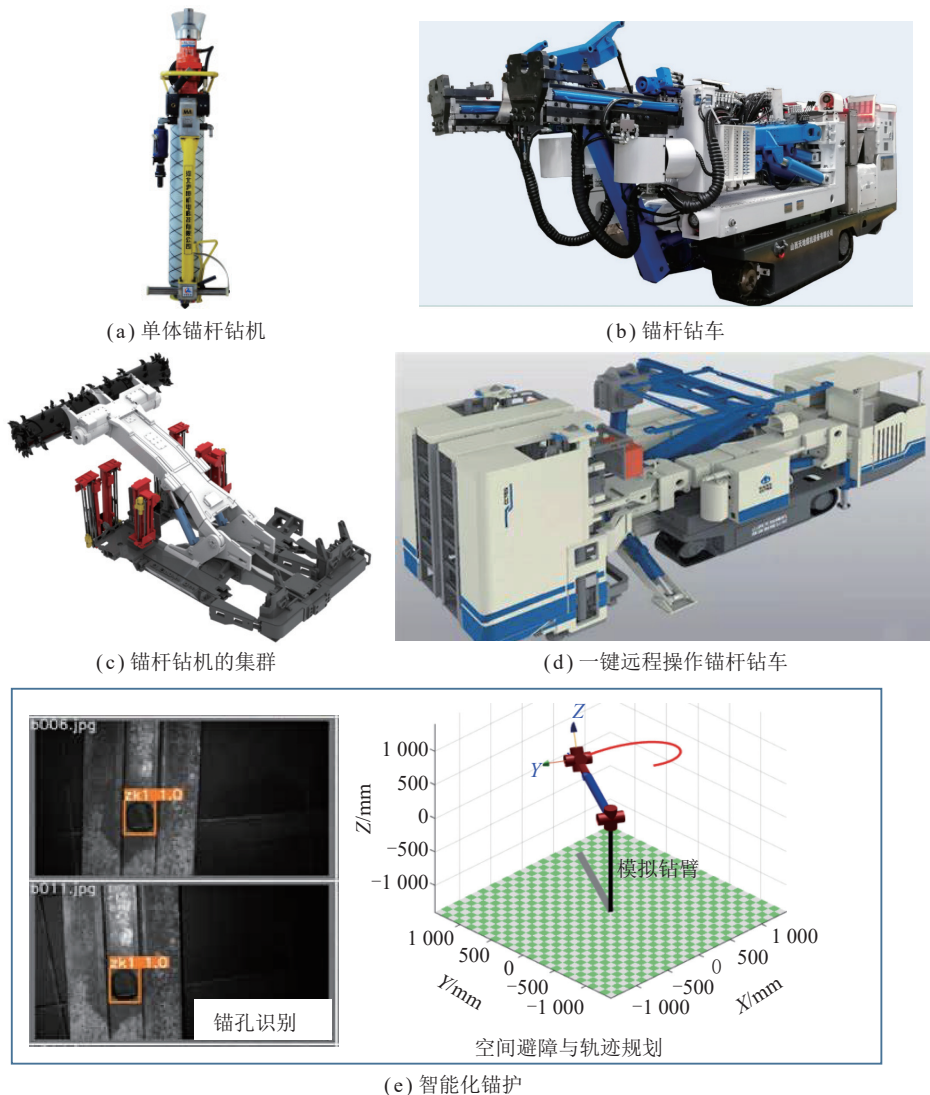


图 5 锚杆支护设备发展历程

Fig.5 Development of anchor support equipment

现了锚护作业从人工多工序向一键远程操作的转变。树脂药卷柔性输送技术采用脉冲高压喷吹气流将树脂药卷从存储室输送到锚孔中;为了防止树脂药卷从锚孔中掉落,发明了安装在树脂药卷尾部的燕尾形卡箍;优化了脉冲气流压力、脉冲时间、脉冲流量等参数,保证树脂药卷顺利进入锚孔且不破碎<sup>[26]</sup>。锚杆钻杆原位互换技术通过机械定位装置和液压驱动的机械手实现对锚杆、转杆的定位抓取和互换<sup>[27]</sup>,代替人工换杆。锚护路径自动规划技术通过预设锚孔的空间位置和支护顺序,通过采用机械臂空间运动学、动力学的逆解,自动完成一个循环的锚杆支护<sup>[28]</sup>。煤科总院开采研究院提出了锚钻一体化的解决方案,研制了由钻头、中空杆体、调心球垫和多功能螺母等组成的自钻锚杆,将锚杆钻杆的功能合二为一。当钻孔完成后,直接将 AB 锚固剂通过中空杆,泵入锚杆体与锚孔之间的空隙处形成锚固<sup>[29]</sup>。通过机械手一次抓取并定位自钻锚杆,便能实现锚护作业的一键远程操作。锚钻一体化方案在陕煤集团曹家滩煤矿首次得到了工程试验研究,验证了其在锚护操作、锚护速度及锚护质量方面的优势。

在掘进巷道有限的空间内尽可能增加锚杆钻机数量,形成锚杆钻机集群是提高锚护效率的另一种方式。前述的两臂锚杆车及掘锚机是最基础的锚杆钻机集群。CMM 系列锚杆机将 4~8 个钻架安置于一排或多排的水平横梁上,同时实现 4~8 根锚杆的支护作业<sup>[24]</sup>。在掘锚一体机上,通过空间位姿优化,实现了 6~8 台钻机的集群<sup>[15]</sup>。钻架体积较大是紧凑空间布置限制在巷道有限空间内锚杆钻机数量增加的钻机数量的主要因素。近期,山西天地煤机装备有限公司通过拓扑优化设计、新型材料应用,研发了一款紧凑型锚杆钻架,将钻架的体积降低 30% 以上,使有限空间内钻机数量的进一步提高成为可能。除了在单机上实现钻机集群的布置,根据时间-空间多维同步快速掘进理论,在不同设备不同部位布置相应数量的钻机,对于提高掘进速度至关重要。

根据锚杆支护智能化研究和应用现状,提出锚杆钻机的智能化需要突破复杂环境下运动轨迹规划、井下低光照粉尘环境的视觉锚孔识别,锚杆钻机集群的互感及避障、重载机械臂高精度定位等关键技术。井下空间狭小,巷道形状各异,为了完成全方位的自动锚护,必须依据井下特定的可用空间对传统的轨迹规划算法进行优化才能满足使用要求<sup>[30]</sup>。随着采深不断增加,高地应力环境下采用钢带+锚网+锚杆组合的支护方式不断扩大,通过双目视觉识别钢带的定位孔,必须解决井下光照程度低,粉尘质量浓度大等问题<sup>[31]</sup>。

在锚杆钻机机器人集群场景下,传统的机械限位方式无法满足复杂空间锚杆的全方位支护,必须实现集群内锚杆钻机的相互感知,相互避障功能。对于臂载式锚杆机器人,锚杆钻机位于机械臂的末端,由于钻架对刚性要求较高,其质量高达数吨;另一方面定位锚孔的位置于机械臂基座之间的距离可能达到十数米远,该种工况下定位直径约 30 mm 的锚孔,对机械臂的制造精度和控制精度提出了新的挑战。

### 2.3 掘进工作面煤岩高效转运技术及装备

将物料从掘进装备转运到主运皮带的短距离转运设备是掘进巷道煤岩运输系统中的短板。短距离运输设备需要具备及时延伸、转弯半径小、运输能力强等能力。为了满足适应快速掘进运输能力不断提高的要求,掘进面短距离转运经历了传统的桥式转载机、大跨距桥式转载机、梭车、柔性连续输送系统 4 个发展阶段,各种转运方式关键参数对比见表 3。

表 3 各种煤岩转运方式对比

Table 3 Comparison of various transport methods for coal and rock in tunnel

方式	传统桥式 转载机	大跨距桥式 转载机	梭车	柔性 运输系统
搭接 长度/m	15~20	50	—	> 100
转弯 半径/mm	—	—	7 500	8 000
地板 适应性	较强	容易碰顶	完全 自适应	完全 自适应
移动 灵活性	最差	最差	最佳	适中
经济性	最便宜	适中	较贵	较贵
劳动强度	最大	居中	较小	最小

传统掘进机配套搭接长度为 15~20 m 的桥式转载机。桥式转载机受料部位位于掘进机卸料口下方,机尾承载在掘进面主运皮带的刚性架上,与主运皮带具有一定的重合段。随着掘进面不断向前推进,桥式转载机被掘进机拉动向前,直至与主运皮带的搭接长度用完,然后进行主运皮带的延伸。随着掘进速度的提高,在传统桥式转载机的基础上增长搭接长度,一定程度上能够减少延伸主运皮带的次数<sup>[32]</sup>,但是随着连接长度的增加,桥式转载机对巷道起伏的适应能力降低,要求巷道的倾斜度 < 3°,巷道高度大于 4 m,不然容易出现与巷道顶板碰撞或卡机尾的状况。针对掘进联络巷、开切眼等小半径转弯条件的转载需求,国内外研究人员提出了基于多次转载的移动式带式输送机或刮板输送机的连续运输系统,通过在转弯处设置转载点<sup>[33]</sup>,解决小半径转弯连续运输的问题。但是



该种连续运输系统存在设备数量多,组成复杂,协同控制、联动控制困难等问题,逐渐被梭车、柔性连续运输系统替代。

梭车属于储料间断式运输设备,来回穿梭于掘进装备与给料破碎机之间,实现煤岩的高效转运。采用轮边减速器代替传统车桥结构,梭车最大限度地降低了高度,满足掘进巷道小转弯半径的煤岩高效转运需求。结合我国矿井的特点,国产梭车创新采用薄壁分体式结构<sup>[34]</sup>,满足了不同矿井的下井要求;采用高频响四象限变频牵引技术<sup>[35]</sup>,实现梭车四轮驱动的高动态响应和零转速满转矩,满足井下复杂路面的高效行走要求。历经10余年发展,国产梭车已经形成了10、15、20 t的系列产品。梭车的自动驾驶、自主卸料泊位、自主装料泊位是梭车智能化技术的核心。

柔性运输系统是最新一代满足小转弯半径、巷道底板起伏、“日进百米”的掘进工作面连续转运设备,主要包括牵引头车、柔性带式输送机、穿梭动力站、迈步式自移机尾等,其中柔性带式输送机是关键。研究团队首创了蛇形脊椎多关节密排仿生机构作为皮带架体,通过协调关节转角、单节脊柱长度以及皮带刚性,研制了在水平方向最小转弯半径为8 000 mm的大曲率柔性带式输送机(图6)。皮带架体的上方安装运输皮带,针对小转弯半径下,皮带在转弯半径内侧容易起褶、跑偏,转弯半径外侧容易撕裂的问题,研制了横截面变刚度的专用皮带<sup>[36]</sup>。皮带架体下方安装轮式行走装置,创新采用偏置式油气悬挂装置和合理设置相邻皮带架体的上下转角,实现了柔性带式输送机对复杂底板的完全自适应性,并且在行走过程中有效吸收底板的冲击载荷,保障皮带运行的平稳性。最新研制的柔性运输系统长度可达200 m,可完全满足复杂地质条件下的高效快速掘进需求,是现有快速掘进使用最广的转运设备。

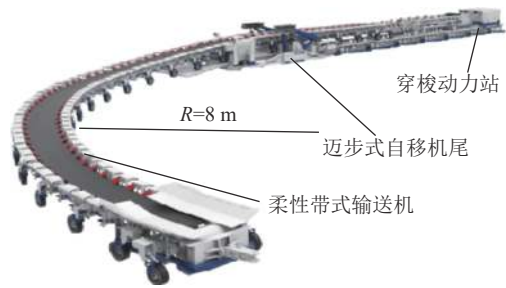


图6 柔性运输系统

Fig.6 Flexible continuous transportation system

## 2.4 快速掘进辅助作业技术及装备

通风除尘、辅助运输、进排水管路的安装等辅助作业是快速掘进的重要保障,但受到的重视程度不如截割、锚护和运输,导致研究投入较少,发展缓慢。

掘进工作面的粉尘质量浓度随着掘进强度的增大不断增加,粉尘质量浓度可高达 $1\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$ 以上,不仅影响工人的身体健康,而且对能见度造成严重影响,是掘支平行作业的最大障碍<sup>[37]</sup>。研究人员提出了通风排尘、喷雾降尘、泡沫抑尘、通风除尘等多种粉尘治理方法。笔者所在的研究团队结合快速掘进装备的配置,提出了液态幕降尘、固态幕挡尘、空气幕隔尘的三幕控尘方法<sup>[38]</sup>(图7)。液态幕降尘:研发了自润滑、浮动旋转内喷雾技术,相较于传统的橡胶浮封内喷雾,摩擦阻力降低5倍,寿命提高4倍以上,使高压内喷雾抑尘成为可能<sup>[39]</sup>,与外喷雾相结合,形成液态降尘帘,从源头上降低粉尘的浓度。固态幕挡尘:在瓦斯涌出较少的巷道,在截割滚筒后方安置固体封尘帘,防止粉尘向巷道后方运移扩散。空气幕隔尘:在供风风筒端安装附壁风筒,将直吹掘进面的供风风流改向吹向巷道侧方,并在除尘器负压抽吸的作用下,形成向掘进面推进的空气幕,为从液态降尘帘和固体挡尘帘中逃逸的粉尘设置了第3道防线。图7为三幕控尘在巷道空间的布置,使用三幕控尘系统后,掘进巷道粉尘综合除尘效率达到了95%以上。

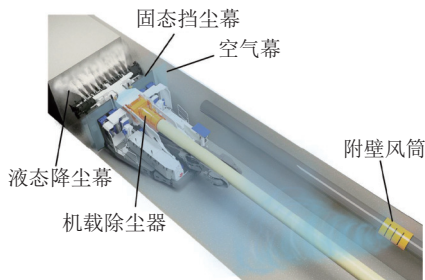


图7 三幕控尘技术原理和粉尘防治效果

Fig.7 Principles of three-curtains dust control technology and dust prevention result

通过长期对掘进工作面粉尘治理现状进行调研,发现掘进工作面粉尘高效治理亟需解决三大问题:①除尘与通风瓦斯治理的协调统一问题。在众多粉

尘治理方法中,采用附壁风筒的除尘系统除尘效率最高,具有广泛推广的前景。但是该方法需要对矿方原有掘进巷道通风系统进行改进和调整,涉及到通风

与瓦斯治理的安全问题,除尘系统实际使用效果远未达到既定目标。在此建议根据矿井和巷道所属的瓦斯等级,分类别建立基于掘进面除尘器除尘的通风规程,并以实时监控数据为支撑在保障通风安全的情况下,最大限度提高除尘效率。② 附壁风筒需要随着供风风筒向前延伸而不断移动,现有附壁风筒移动频繁且劳动强度大,需要进一步优化。③ 除尘风机噪音大,严重影响工人听觉,需要采用新型材料降低轴流风机运行时候的噪音。

矿井辅助运输普遍存在转载多、用工量大的现状。在掘进工作面内,新建的矿井主要采用胶轮车和单轨吊运输,取代了传统的电机车和绞车的方式,在运输效率和运输距离上有一定程度提高。但是到工作面的“最后 100 m”的物料运输技术及装备仍需进一步提高,且现有研究的基础薄弱,受关注的程度小,需要加强该运输段上的机械化辅助运输技术的研究<sup>[40]</sup>。

管线路(井水管、排水管、电缆、除尘风筒、正压风筒)的安装设备发展速度较慢,现在绝大多数情况下仍需人工安装。中国煤科研制了抓管机器人,在一定程度上减轻了水管安装的劳动强度<sup>[41]</sup>。针对快速掘进工作面除尘器和风筒吸风筒入口之间位置变化大,柔性负压风筒需要不断伸长与压缩的工况,发明了基于绞车拉紧钢丝绳的风筒悬挂技术,解决了除尘风筒的移动等问题<sup>[42]</sup>。正压风筒由于其本身的柔性、接头以及安装位置的特殊性、带风操作的难控性,现仍主要采用人工接、挂风筒,亟需研制新型正压风筒接头和悬挂方式。

### 3 快速掘进系统及工程示范

掘进是系统工程,需要根据地质条件的特征,在众多关键设备型号和技术中进行高效的匹配,才能达到快速掘进的目的。现有各种类型设备在各自适合的地质条件下发挥高效掘进的作用外,也在不断探索创新,以期将设备本身的优势应用于更广的地质条件下,形成了种类繁多的快速掘进作业线。笔者以掘进装备为分类依据,对各类快速掘进系统的配套情况、工程应用、发展趋势进行介绍。

#### 3.1 以连续采煤机为核心的快速掘进系统

连续采煤机为核心的快掘成套装备主要用在双巷掘进,其主要成套系统包括连续采煤机、锚杆钻车和梭车(图 8(a))。与单巷掘进相比,调机速度快是双巷掘进独有的特点。因此,连续采煤机、锚杆钻车和梭车均采用四象限交流变频控制技术,相比于液压行走,具有高动态响应和零速满转矩的优势,实现了井下复杂路面快速启动、行走和调机的功能。神东矿区

大柳塔煤矿双巷掘进中采用了 EML340 型连续采煤机+CMM4-25 型锚杆钻车+10SC/32 型梭车+UN88 型铲车的双巷掘进成套装备。连续采煤机截割功率为 340 kW,滚筒宽度为 3.3 m,通过开切眼和采垛 2 道工步完成截割落煤和巷道成型;锚杆钻车集成 4 台锚杆钻机,具备 2 人同时操作 4 台锚杆钻机的功能;每次掘进 9 m 进行连续采煤机和锚杆钻车的工作面互换;UN88 型梭车用于辅助物料的转运。工业性试验过程中,平均月进尺达到约 1 200 m,发现锚杆钻车的支护速度仍然是制约快速掘进的主要因素<sup>[43]</sup>。

针对双巷掘进受地质条件限制严重的现状,笔者所在研发团队根据时间-空间多维同步快速掘进理论,创新研制了机载钻架连续采煤机,该机型在传统连续采煤机的铲板后立板上增设了 4 台锚杆钻机,空顶距离可以缩小至 2.5 m。在现有双巷掘进工艺的基础上,对最大空顶距要求较小的应用场景,合理选择分区支护参数,先利用连续采煤机机载锚杆钻机完成必要的锚杆支护,然后采用锚杆机完成剩余锚杆的支护,形成双巷-时间空间多维同步的新型快掘系统,进一步拓宽双巷掘进工艺的应用范围。

在煤矿智能化建设的指导下,双巷快速掘进系统已经实现的智能化技术包括:连续采煤机的远程控制,基于惯导+里程计+全站仪的组合导航技术,梭车的远程控制,锚杆钻车的远程调机控制、人员接近与预警。但是由于双巷掘进各设备之间空间位置的相互独立性,需要在系统层级上加强对设备空间位置的检测、互感以及协同控制研究。

#### 3.2 以掘锚一体机为核心的快速掘进系统

传统以掘锚一体机为核心的快速掘进系统主要应用于陕蒙地质条件较好的煤巷掘进,随着对掘锚同步工艺、时间-空间多维同步快速掘进工艺的深入研究,以掘锚一体机为核心的快掘系统已经成功扩展到三软和半煤岩巷道,形成了 3 种快速掘进作业线(图 8)。

第 1 种快速掘进作业线为:掘锚一体机+转载破碎机+跨骑式锚杆钻车+迈步自移机尾的成套装备。该种作用线的主要特点是截割和锚护作业具有一定的相对独立性,掘锚一体机以截割为主,锚护作业服务于截割作业,甚至可以只掘不锚。掘锚一体机后方配转载破碎机和柔性运输系统,实现对物料的破碎和连续运输,柔性运输系统与主运皮带的长度大于 100 m,满足月进 2 500 m 的转载要求。跨骑式锚杆钻车跨骑于柔性运输系统的上方,并能根据锚护作业的需求自由移动,实现独立的锚护作业,锚杆钻机的数量一般为 8 台及以上。当柔性运输系统搭接长度用完时,迈



图 8 煤矿快速掘进系统成套装备配置方案

Fig.8 Different equipment configuration schemes in mine rapid excavation

步自移机尾驱动主运皮带进行延伸。由于该种作业线的设备配套方式仅能适应单一的地质条件,仅在神东、陕煤等矿区的非常稳定围岩巷道内小范围试用,未得到大面积推广。

第 2 种快速掘进作业线为:掘锚一体机+锚杆转载机+连续运输系统+迈步自移机尾。该种作业线的主要特点是掘锚一体机上的工作必须兼顾截割和锚护,且一般是掘锚同步作业。在稳定地质条件下,掘锚一体机以截割为主,兼顾部分锚杆支护的功能,未能支护的锚杆和锚索由锚杆转载机完成。在一般地质条件下,掘锚一体机以完成全部锚杆支护作业为主,截割作业服从于锚护作业,锚杆转载机主要进行锚索的支护。第 2 种作业线可以在设备配套相同的情况下,通过改变作业方式实现对不同地质的快速适应,是应用最广泛的作业线。

神木汇森凉水井煤矿采用 EMJ340/4-2 掘锚一体机+ MZHB5-1200/25 锚杆转载机+ DZY100/160/135 柔性运输系统+DWZY1000/1500 迈步式自移机尾的

作业线,实现了月进尺大于 1 500 m 的煤巷常态化作业<sup>[44]</sup>。在陕煤红柳林矿,采用同种作业线,实现了月进尺 800 m 的半煤岩巷常态化掘进作业。在该种作业线上,通过将掘锚一体机的截割功率由 340 kW 提升到 560 kW,在曹家滩实现了超大断面煤巷月进尺超 1 900 m 的纪录。在黄陵二号煤矿中等复杂地质条件下,该种作业线实现了远程割煤、煤岩运输、锚索支护、自动连续钻孔的一键启停、设备运行参数的远程实时监测等功能,掘进工效提高 2 倍。

第 3 种快速掘进作业线为:小空顶掘锚一体机+锚杆转载机+带式转载机+迈步式自移机尾。该种作业线最大的特点是发明了集成多部锚杆钻机且可以向前滑移的锚护平台,使掘锚一体机的支护空顶距由 2.5 m 降低到 0.5 m,提高了掘锚一体机对软弱煤层的适应性。在综合考虑支护参数间的时空协同效应、支护体与围岩的协同效应情况下,可以形成锚护平台前移完成全部锚杆支护、锚杆转载机完成锚索支护;锚护平台前移完成部分锚杆支护、掘锚平行完成全部掘

杆支护、锚杆转载机完成锚索支护的两种作业方式。该种作业线主要应用于一般及以下地质条件,一般采用带式转载机进行煤岩的转载。国家能源集团国神公司大南湖七号矿井采用EJM340/4-2E小空顶掘锚一体机+MZHB4-1200/25锚杆转载机+DZY100/160/135带式转载机+DWZY1000/1500迈步式自移机尾的作业线,实现了一般地质条件下月进尺500m的掘进速度<sup>[1]</sup>。

以掘锚一体机为核心的快速掘进系统是目前已建成智能化掘进工作面主要采用的掘进设备配套方式,其主要原因是:①掘锚一体机的截割轨迹、整机受力简单,机身位姿易控;②截割掏槽过程靠油缸推移滑架完成,受履带附着、底板性质影响小,整机定向定位容易实现;③能够实现掘锚同步作业,掘进速度快。现已实现了成套设备的无线遥控、自主操作与远程控制干预,掘支快速自动平行作业、高效健康除尘、环境危险信息实时监测与预警、多设备的集中协同控制等智能化功能。

### 3.3 以掘锚机(掘进机+机载锚杆钻机)为核心的快速掘进系统

掘进机单齿截割能力强,能够掘出任意形状的巷道断面,在全岩巷道和高应力、破碎顶板、易片帮巷道有独特的优势,已形成了不稳定围岩条件快速掘进系统和全岩巷道快速掘进系统(图8)。

在不稳定围岩条件下,以掘锚机为核心的快速掘进作业线组成为:掘锚机+带式转载机+自移机尾+除尘系统+远程集控系统。该种作业线的最大特点是在传统掘进机的两侧集成了2台可以向前滑移的锚杆钻机,通过空间轨迹的规划,能够实现空顶距小于0.5m的顶锚、帮锚及时全部支护,满足极不稳定围岩破碎前的支护要求。在淮南刘庄矿,在最大空顶距为2.2m,循环进尺为1.8m;顶板破碎时最大空顶距为1.3m,循环进尺为0.9m的恶劣施工条件下,采用EBZ220M型掘锚机+带式转载机+DWZY1000-1200(A)迈步式自移机尾的配套方式,结合顶板离层检测数据,合理调整锚护工艺,实现了月进尺500m的掘进速度<sup>[45]</sup>。

全岩快速掘进作业线的组成为:重型掘进机+皮带转载机+两臂锚杆钻车+干式除尘器。该种作业线配套了能够截割硬岩的重型掘进机和具有智能支护的两臂锚杆机;针对岩巷粉尘浓度高的问题,配置了对呼吸性粉尘浓度除率高达99%的干式除尘系统。在陕煤铜川矿业有限公司玉华煤矿,采用EBH315Q型重型掘进机对四盘区轨道大巷进行施工,在岩石硬度大于 $f_6$ ,巷道宽度为5.8m,巷道高度5.0m的施工

条件下,保障了140~160m/月的平均进尺速度。

为了提高掘进系统与围岩的适应性以及整机的智能化程度,马宏伟团队<sup>[46]</sup>研发了护盾式快速掘进系统,其包括截割机器人、临时支护机器人、钻锚机器人和铺网机器人。截割机器人在临时支护机器人的下方,钻锚机器人在掘进机器人的后方,实现了钻锚与截割同步作业。为了提高掘锚机的锚护速度,景隆重工研发了掘进机机身上能安装6部锚杆钻机的掘锚机,满足最小空顶距为0.3m,最小空帮距为2.5m的要求,且具有钻机一键展开,一键收回的功能,极大提高了掘锚机的锚护速度<sup>[47]</sup>。

### 3.4 煤矿全断面硬岩快速掘进系统

针对岩石坚固性系数大于 $f_8$ 的巷道,存在镐型截齿消耗大、整机振动大、经济效率低等问题,研发人员逐渐将工程隧道应用成熟的全断面硬岩掘进机(TBM)经过适应性改造,引入到煤矿主副斜井、运输巷和瓦斯抽放巷等硬岩巷道,形成了煤矿全断面硬岩快速掘进系统。

为了与煤矿巷道防爆环境、转弯半径小、软岩巷道变形大、地质构造复杂的条件相适应,煤矿全断面硬岩快速掘进系统通过零部件防爆及紧凑设计、机身结构优化,整机长度从TBM的约300m压缩到60m左右,采用锚杆支护代替了管片支护,并根据支护工艺辅以钢筋网片或喷射混凝土。将锚杆钻机安置于与刀盘推进独立运动的主梁上,实现了掘进、支护、排矸、辅助运输的同步作业。在淮南张集煤矿西二采区的瓦抽巷道,采用QJYC045M型煤矿全断面掘进系统(图8)进行全岩掘进,平均月进尺达404m,最高月进尺达560m<sup>[17]</sup>。

目前,煤矿全断面掘进机成套快速掘进系统集成地质探测、机身电液信息检测、渣片图像数据等信息系统。由于现场施工环境复杂多变,设备对地质条件变化敏感(特别是断面上岩石性质的差异),掘进控制仍主要依赖于现场技术人员的施工经验,易造成设备异常损坏、塌方、卡机等事故发生。因此,开展煤矿全断面掘进机智能掘进关键技术的研究是硬岩全断面掘进技术发展的必然趋势<sup>[48]</sup>。

## 4 展望与建议

(1)完善时间-空间多维同步快速掘进的理论。利用巷道围岩从开挖到变形破坏需要一定时长的物理基础,将开挖巷道围岩进行分区支护的时间-空间多维同步快速掘进方法经过工程实践证明是可行的,但是由于围岩性质的多样性与复杂性,目前多采用类比法和实时监测的方法进行工程指导,亟需从理论上

分析并建立时间-空间的多维同步快掘模型,指导支护参数的优化。

(2) 加强利用智能掘进的大数据,打造透明地质基础数据库。掘进作为煤矿开采的先行基础工程,在掘进出巷道几何通道的时候,更加详细地揭露了煤层地质信息。随着智能化技术的发展,以巷道掘进中的导航信息、油缸位移信息为定位坐标,采用多源信息融合的方法对截割的煤岩性质、锚护的围岩性质进行记录,形成巷道的实测 3D 地质数字模型;利用 2 条巷道的实测地质数据模型,结合回采区段内的探测信息,反演出可靠的回采区段地质模型,从而建立高真实的透明地质模型。

(3) 加强掘进巷道辅助作业工艺及设备的研究。巷道粉尘已经成为危害工人健康、制约煤矿可持续发展的严重隐患,但由于其危害不如瓦斯、水灾等事故具有明显的突发性,未能引起足够的重视,需要在政策和技术统一协调的基础上,加强对巷道粉尘的治理。锚杆、锚网等辅助材料的运输仍未解决到掘进面最后 100 m 的运输问题,且研究基础薄弱,未见有明显改善的迹象。管网的续接还主要依靠人工完成,考虑巷道空间的受限性,建议在掘进成套系统的设备上对管网续接装置或机构进行紧凑集成。

(4) 加强装备智能化技术的研发。现有掘进面智能化建设所取得的成就主要集中在系统集成方面,包括远程监测、集中控制、系统联动、视频监控等,但是装备本身的智能化水平没有明显提高,这也是大量智能化掘进工作面无法常态化运行的根本原因。装备智能化与许多基础学科和机理密切相关,如煤岩截割、振动控制、电液复合系统动力学、煤岩识别。因此需要加强掘进工程相关基础学科的研究,利用大数据、物联网、5G 等技术助力基础机理的认识,提高装备智能化水平迫在眉睫。

## 参考文献(References):

- [1] 王虹,李发泉,张小峰. 软弱围岩掘锚一体化快速掘进关键技术与工程实践[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-9[2024-01-05]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0544>.  
WANG Hong, LI Faquan, ZHANG Xiaofeng. Key technology research and engineering practice of speedy drivage with driving and bolting integration in soft surrounding rock[J/OL]. Coal Science and Technology: 1-9[2024-01-05]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0544>.
- [2] 王虹. 我国综合机械化掘进技术发展 40 a[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.
- [3] 王琦,康红普,王步康,等. 快速掘进工作面围岩分区平行锚固技术[J/OL]. 岩石力学与工程学报: 1-14[2023-10-13]. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2022.1315>.  
WANG Qi, KANG Hongpu, WANG Bukang, et al. Research on surrounding rock partitioned parallel anchoring technology in rapid heading faces[J/OL]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering: 1-14[2023-10-13]. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2022.1315>.
- [4] 康红普,姜鹏飞,高富强,等. 掘进工作面围岩稳定性分析及快速成巷技术途径[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2023-2045.  
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, GAO Fuqiang, et al. Analysis on stability of rock surrounding heading faces and technical approaches for rapid heading[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2023-2045.
- [5] 马睿. 巷道快速掘进空顶区顶板破坏机理及稳定性控制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.  
MA Rui. Failure mechanism and stability control of empty roof in roadway rapid excavation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [6] 王虹,王建利,张小峰. 掘锚一体化高效掘进理论与技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2021-2030.  
WANG Hong, WANG Jianli, ZHANG Xiaofeng. Theory and technology of efficient roadway advance with driving and bolting integration[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2021-2030.
- [7] 康红普. 我国煤矿巷道围岩控制技术发展 70 年及展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 1-30.  
KANG Hongpu. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mineroadways in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 1-30.
- [8] 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(2): 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(2): 295-305.
- [9] 刘明明. 杜儿坪矿采用双巷掘进[J]. 山西科技, 1998, 4(1): 29-31.  
LIU Mingming. A dopting two-way tunnelling duerping mine[J]. Shanxi Technology, 1998, 4(1): 29-31.
- [10] 王步康. 煤矿巷道掘进技术与装备的现状与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 1-11.  
WANG Bukang. Current status and trend analysis of roadway driving technology and equipment in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 1-11.
- [11] 曹军,孙德宁. 连续采煤机双巷掘进工艺及参数优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(5): 9-13.  
CAO Jun, SUN Dening. Study on double gateway driving technique and parameters optimization of continuous miner[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(5): 9-13.
- [12] 王虹,王步康,张彦禄,等. 一种煤巷多维度、协同支护方法:

- CN112253192A [P]. 2021-06-29.
- [13] 谭永生, 蔡和平, 马宝钿, 等. 采煤机截齿用 WC-Co 合金的磨损、强度与断裂[J]. 稀有金属材料与工程, 1996(6): 7-13.  
TAN Yongsheng, CAI Heping, MA Baodian, et al. Failure, Strength and wear of shear picks base on WC-Co alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1996(6): 7-13.
- [14] 王虹, 王步康, 张小峰, 等. 煤矿智能快掘关键技术与工程实践[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2068-2083.  
WANG Hong, WANG Bukang, ZHANG Xiaofeng, et al. Key technology and engineering practice of intelligent rapid heading in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2068-2083.
- [15] 刘送永, 李洪盛, 江红祥, 等. 矿山煤岩破碎方法的研究进展及展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 1047-1069.  
LIU Songyong, LI Hongsheng, JIANG Hongxiang, et al. Research progress and prospect of coal-rock break-ing methods in mines[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 1047-1069.
- [16] 程桦, 唐彬, 唐永志, 等. 深井巷道全断面硬岩掘进机及其快速施工关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3314-3324.  
CHENG Hua, TANG Bin, TANG Yongzhi, et al. Full face tunnel boring machine for deep-buried roadways and its key rapid excavation technologies[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3314-3324.
- [17] 董荣宝. 首台全断面矩形快速掘进机通过验收[N]. 中国煤炭报, 2021-08-14(001). DOI: [10.28112/n.cnki.ncmtb.2021.001462](https://doi.org/10.28112/n.cnki.ncmtb.2021.001462).  
DONG Rongbao. The first full-section rectangular TBM passed acceptance (N). China Coal News: 2021-08-14(001). DOI: [10.28112/n.cnki.ncmtb.2021.001462](https://doi.org/10.28112/n.cnki.ncmtb.2021.001462).
- [18] 王虹. 掘进机重载齿轮选材及技术措施的确定 [J]. 煤炭技术, 1998, 3(3): 2-5.  
WANG Hong. Material selection and technical measures for heavy-duty gears of roadheader[J]. Coal Technology, 1998, 3(3): 2-5
- [19] 王虹, 李炳文. 综合机械化掘进成套装备[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.
- [20] 张强, 张润鑫, 刘峻铭, 等. 煤矿智能化开采煤岩识别技术综述[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 1-26.  
ZHANG Qiang, ZHANG Runxin, LIU Junming, et al. Review on coal and rock identification technology for intelligent mining in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 1-26.
- [21] 王东杰, 王鹏江, 李悦, 等. 掘进机截割臂自适应截割控制策略研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(20): 2492-2501.  
WANG Dongjie, WANG Pengjiang, LI Yue, et al. Research on adaptive cutting control strategy of roadheader cutting arms[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(20): 2492-2501.
- [22] 王苏戎, 田劫, 吴森. 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(4): 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(4): 89-94, 118.
- [23] 潘锐, 王雷, 王风云, 等. 破碎围岩下注浆锚索锚固性能及参数试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(6): 1108-1115.  
PAN Rui, WANG Lei, WANG Fengyun, et al. Experimental study on anchorage performance and parameters of grouting anchor cable under broken surrounding rock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(6): 1108-1115.
- [24] 侯朝炯. 巷道围岩控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2013: 288-390.
- [25] 张幼振. 我国煤矿锚杆钻车的应用现状与发展趋势[J]. 煤炭工程, 2010(6): 101-103.  
ZHANG Youzhen. Application status and development trend of coal mine bolt drilling truck in China[J]. Coal Engineering, 2010(6): 101-103.
- [26] 吕继双, 郭治富, 乔彦华, 等. 一种树脂锚固剂自动喷射及装填装置: 2016111453466[P]. 2017-02-22.
- [27] 吕继双, 安四远, 郭治富, 等. 基于锚杆钻车的锚箱钻箱切换方法: ZL2021109983817[P]. 2021-11-23.
- [28] 王静, 杨敬伟, 郭治富, 等. 旋转式大容量自动定位锚杆仓: ZL2015107644269[P]. 2015-11-11.
- [29] 王子越, 姜鹏飞, 康红普. 钻孔注浆锚固预紧一体化锚杆支护装置及施工方法: ZL2020110456478[P]. 2021-02-12.
- [30] 邓稼敏. 锚杆支护机器人工作臂时间最优连续路径轨迹规划技术研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2022.  
DENG Jiamin. Research on time-optimal continuous path trajectory planning for rock-bolting robot manipulator[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2022.
- [31] 乔佳伟. 基于机器视觉的煤矿井下锚护作业钢带孔识别研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2023.  
QIAO Jiawei. Research on the identification of steel belt holes for underground anchoring operations in coal mines based on machine vision[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2023.
- [32] 梁云峰, 李晓林, 郭忠强, 等. 一种矿用大跨距带式转载机机架及其调整机构: CN212952494U[P]. 2021-04-13.
- [33] 张国恩. 重叠式连续运输系统和掘锚机配套在巷道掘进中的成功应用[J]. 中国矿业, 2006(5): 51-53.  
ZHANG Guoen. Successful application of overlapping continuous transport system and windlass digging machine in roadway excavation[J]. China Mining, 2006(5): 51-53.
- [34] 马凯. SC15/182F 分体式电驱拖车的研制及应用[J]. 煤矿机械, 2020, 41(2): 143-145.  
MA Kai. Research and application of SC15/182F split electric drive shuttle car[J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41(2): 143-145.
- [35] 马凯. 矿用拖车机电复合制动控制策略研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(5): 231-233.  
MA Kai. Study on control strategy of electromechanical composite brake for mine shuttle car[J]. Coal Technology, 2018, 37(5): 231-233.
- [36] 张小峰, 王静, 曹为. 矿用移动式柔性胶带输送机: ZL2015106066844[P]. 2016-01-06.
- [37] 蒋仲安, 杨斌, 张国梁, 等. 高原矿井掘进工作面截割粉尘污染效

- 应及通风控尘参数分析[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2146–2157.
- JIANG Zhongan, YANG Bin, ZHANG Guoliang, et al. Analysis of dust pollution effect of cutting dust and ventilation control parameters at the heading face in plateau mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2146–2157.
- [38] 王虹, 王步康, 张小峰, 等. 一种快速掘进工作面综合防尘方法: ZL202110032563.9[P]. 2021-02-16.
- [39] 王虹. 掘进机内喷雾新型旋转水封的研制[J]. 煤炭科学技术, 1998(6): 10–13, 60.
- WANG Hong. Research of a new rotary hydroseal for spraying in roadheader[J]. Coal Science and Technology, 1998(6): 10–13, 60.
- [40] 鲍久圣, 章全利, 葛世荣, 等. 煤矿井下无人化辅助运输系统关键基础研究及应用实践[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 1085–1098.
- BAO Jiusheng, ZANG Quanli, GE Shirong, et al. Basic research and application practice of unmanned auxiliary transportation system in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 1085–1098.
- [41] 高永军, 谭震, 任长忠, 等. 煤矿井下管路安装机器人研发与应用[J]. 智能矿山, 2022, 3(8): 66–69.
- GAO Yongjun, TAN Zhen, REN Changzhong, et al. Research and application of underground pipeline installation robot in coal mine[J]. Journal of Intelligent Mine, 2022, 3(8): 66–69.
- [42] 黄超. 斜沟煤矿综掘工作面风筒吊挂技术研究[J]. 煤矿现代化, 2022, 31(1): 30–32, 35.
- HUANG Chao. Study on hanging technology of air duct in fully-mechanized excavation[J]. Modern Coal Mine, 2022, 31(1): 30–32, 35.
- [43] 梁大海. 双巷掘进中 EML340 型连续采煤机的工艺参数探讨[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(5): 100–103.
- LIANG Dahai. Discussion on technique parameters of EML340 continuous miner driving in two seam gateways[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(5): 100–103.
- [44] 麻晓彬, 李发泉, 刘博, 等. 凉水井快速掘进工作面建设实践[J]. 智能矿山, 2021, 2(2): 47–52.
- MA Xiaobin, LI Faquan, LI Bo, et al. Rapid tunneling practice in Liangshuijing Coal Mine[J]. Journal of Intelligent Mine, 2021, 2(2): 47–52.
- [45] 韩文元. 快速掘进技术在刘庄煤矿胶带顺槽巷中的应用[J]. 河南科技, 2021, 40(12): 55–57.
- HAN Wenyuan. Application of rapid excavation technology in Liuzhuang Coal Mine's belt roadway[J]. Henan Science and Technology, 2021, 40(12): 55–57.
- [46] 马宏伟, 王鹏, 张旭辉, 等. 煤矿巷道智能掘进机器人系统关键技术研究[J]. 西安科技大学学报, 2020, 40(5): 751–759.
- MA Hongwei, WANG Peng, ZHANG Xuhui, et al. Research on key technology of intelligent tunneling robotic system in coal mine[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(5): 751–759.
- [47] 范要辉. 六臂掘锚机的设计研究[J]. 煤炭技术, 2021, 40(8): 205–207.
- FAN Yaohui. Design and research of six-arm bolter-miner[J]. Coal Technology, 2021, 40(8): 205–207.
- [48] 王杜娟, 贺飞, 王勇, 等. 煤矿岩巷全断面掘进机 (TBM) 及智能化关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2031–2044.
- WANG Dujuan, HE Fei, WANG Yong, et al. Tunnel boring machine (TBM) in coal mine and its intelligent key technology[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2031–2044.