

文章编号:1671-251X(2021)S2-0032-07

神东矿区快速掘进装备与技术研究现状及展望

罗文, 杨俊彩

(国家能源集团神东煤炭集团有限责任公司, 陕西 神木 719315)

摘要:在总结以掘锚机快速掘进系统、全断面快速掘进系统、全断面矩形快速掘进系统为代表的快速掘进装备发展历程的基础上,分析了快速掘进设备选配中切割刀具、导航方式、支护模式、后配套方式的选择,以及自动锚支、快速掘进设备安装回撤工艺等关键技术,从设备纵向模块化组合、自适应切割、智能锚支、环境感知、设备及人员联动安全防控等方面对快速掘进技术的发展趋势进行了展望。

关键词:快速掘进;掘进装备;全断面掘进;掘进机导航;自动锚支;自适应切割
中图分类号:TD421/632 文献标志码:A

Research status and prospects on rapid tunneling equipment and technology in Shendong Mining Area

LUO Wen, YANG Juncai
(CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Shenmu 719315, China)

0 引言

随着矿井向深部开拓延伸,地质条件、开采环境变得越来越复杂,采掘接续紧张日渐成为制约矿井稳产高产的突出问题。同时,掘进队伍和人员不断增多,给煤矿安全生产造成了巨大压力。为改进现有掘进系统和工艺,提高掘进速度,实现减人提效,国家能源集团神东煤炭集团有限责任公司以实现连续运输及快速支护为突破点,开展快速掘进装备与技术研究,可基本实现掘、支、运一体化,极大地提高掘进效率。

1 快速掘进装备发展

1.1 掘锚机快速掘进系统(第一代)

第一代掘锚机快速掘进系统由掘锚机、连运头车、八臂锚杆机、胶带转载机、履带式和迈步式自移机尾等组成^[1-2],如图 1 所示。该系统主要特点为掘锚平行作业、多臂同步支护、不间断破装运输、智能远程操控,形成破、装、运、支相结合的高效掘进作业线,有效解决了掘、锚、运失衡问题,全面提升了掘进工作面施工效率和安全性。

生产作业时,切割头割下的煤经连运头车破碎后,通过可弯曲胶带转载机卸载到工作面带式输送机上,同时跨骑在胶带转载机上的八臂锚杆机跟机

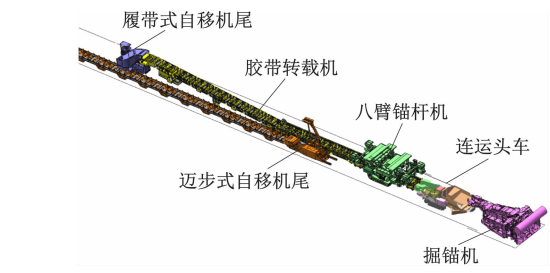


图 1 第一代掘锚机快速掘进系统构成

完成巷道顶帮锚杆支护;连运头车拖拽胶带转载机随着掘锚机同步前移,从而实现持续跟机作业^[3];工作面带式输送机通过迈步式自移机尾的前移而自行延伸,可实现煤流在可弯曲胶带转载机与工作面带式输送机上的连续运输。八臂锚杆机采用履带行走,配备 6 个顶锚钻臂和 2 个帮锚钻臂,如图 2 所示,可完成全部顶板锚杆及巷帮上方 2 根帮锚支护,帮部剩余锚杆人工补齐。

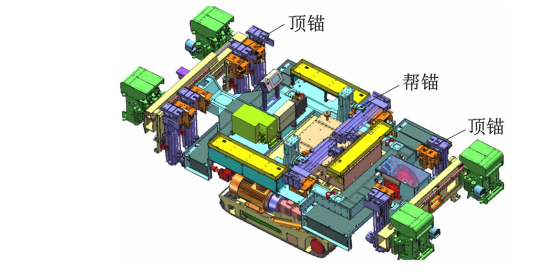


图 2 八臂锚杆机

第一代快速掘进系统主要设备参数:掘锚机,

长×宽×高为 11.2 m×5 m×3.2 m,采高为 3.2~4.5 m,截割头宽度为 6 m,采煤能力为 25 t/min;连运头车,长×宽×高为 10.098 m×3.14 m×2.187 m,破碎能力为 2 000 t/h,运输能力为 2 000 t/h,功率为 300 kW;八臂锚杆机,长×宽×高为 9.6 m×4 m×3.2 m,适应巷道高度及宽度分别为 3.9~4.7,5.4~6 m,最小支护时间 3 min/根;迈步式自移机尾,适应巷道高度为 3.5~4.5 m,移动步距为 2 m,支架顶梁对顶板比压为 0.85 MPa,底座对底板比压为 0.32 MPa;带式输送机,长×宽×高为 135 m×2.63 m×2.01 m,运输能力≥1 600 t/h,带速为 0~4 m/s,胶带宽度为 1 m。

1.2 全断面快速掘进系统(第二代)

为解决第一代快速掘进系统帮锚杆支护速度慢、设备占用巷道断面大、辅助运输受限及带式输送机延伸等难题,开发了第二代全断面快速掘进系统。

第二代全断面快速掘进系统包括全断面煤巷掘进机、十臂锚杆机、破碎转载机、可弯曲胶带转载机、迈步式自移机尾和自移供电站^[4-6],如图 3 所示。该系统采用远程操控技术,通过无线防爆网络,运用现场总线技术,建立自动化、信息化的控制系统,形成以十臂锚杆机为中心的中央控制系统,实现全套快速掘进设备集中监控和管理及各设备的联动、闭锁、保护、监测^[7]。

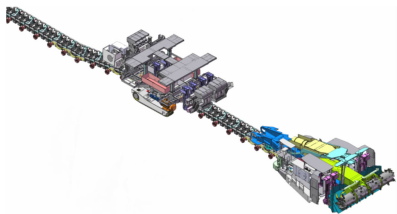


图 3 第二代全断面快速掘进系统构成

全断面煤巷掘进机(图 4)是一种掘采支一体化设备,集全断面截割、装运、支护、行走、锚固、除尘多重功能于一体,可实现巷道全断面快速掘进。该掘进机主要用于矩形断面回采巷道的快速掘进,定位截割高度为 4.2 m,截割宽度为 6 m,纵向工作坡度≤±5°。

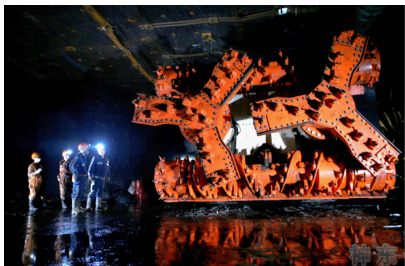


图 4 全断面煤巷掘进机

十臂锚杆机跨骑在可弯曲带式输送机上,实现掘、锚、运工序的平行作业^[8-9]。该锚杆机有 6 台顶

锚钻臂、4 台侧锚钻臂(图 5),可同时完成顶板支护和巷帮上部支护,支护 1 套锚杆平均用时 2 min。在巷道顶板、帮部稳定、完好的条件下,采用分次支护方式来提高支护效率。一次支护由 2 名支护工操作锚杆机前排 4 套钻机完成顶板第 1,2,5,6 根锚杆支护,1 名支护工操作锚杆机中部 2 套钻机完成顶板第 3,4 根锚杆支护,2 名支护工操作 4 套钻机(每人操作 2 套钻机)完成巷帮第 1,2 排帮锚杆支护。二次支护由人工操作锚杆机完成第 3,4 排帮锚杆支护。十臂锚杆机缩短了支护工序用时,提高了支护效率,实现了掘支作业时间的平衡。

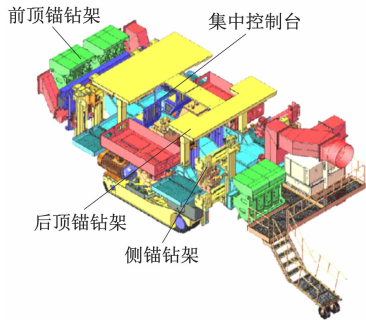


图 5 十臂锚杆机

第二代快速掘进系统主要设备参数:全断面煤巷掘进机,型号为 QMJ4260,采高为 3.5~4.5 m,截割头宽度为 5.4~6 m,采煤能力为 1 200 t/h,总装机功率为 1 809 kW;十臂锚杆机,型号为 CMM10-30,长×宽×高为 9.4 m×3.7 m×3.2 m,适应巷道高度及宽度分别为 3.9~4.7,5.4~6 m,最小支护时间 2 min/根;破碎转载机,型号为 ZPL1200/165,长×宽×高为 85 m×3.8 m×2.2 m,破碎能力为 1 200 t/h,液压系统额定压力为 28 MPa,运输能力为 1 200 t/h。

第一代快速掘进系统使用的激光指向仪当指向距离大于 80 m 后光斑扩散严重且穿透性差,在锚杆机的视屏监控系统无法捕捉激光点,司机远距离操作也无法观察激光点,无法保证工程质量。

第二代快速掘进系统利用光纤陀螺仪来解决掘进导向问题。光纤陀螺仪工作原理如图 6 所示。利用单模激光的干涉原理,在由激光器和光纤组成的闭合光路中,由同一激光源发出的 2 束光产生干涉。

若闭合光路相对空间静止,则 2 束光同时到达接收器,且具有相同的相位。若闭合光路有垂直于光纤环平面的运动角速度时,2 束光的光程变化,将引起相位变化。通过监测相位差或干涉条纹的变化,就可测出闭合光路系统的旋转角速度。

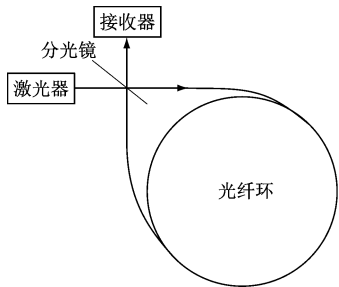


图 6 光纤陀螺仪工作原理

将光纤陀螺仪和无线通信盒安装在快速掘进机的主机架上,与快速掘进机组成一个刚体,来实时感知快速掘进机的动作。考虑到快速掘进机司机在锚杆机上操作,采用无线通信方式,避免由于线缆损坏导致设备故障。

开始掘进前,测量人员首先标定快速掘进机的绝对姿态角,并与惯导系统测得的姿态角比较,获得两者之间的变换信息。掘进时,惯导软件计算获取快速掘进机的实时绝对姿态角,并与巷道设计的掘进方位对比得到实时姿态偏差,用来指导割煤^[10]。

1.3 全断面矩形快速掘进系统(第三代)

为克服第二代全断面快速掘进系统矩形断面空顶距大、易片帮等问题,研发了第三代全断面矩形快速掘进系统^[11]。该系统由全断面矩形快速掘进机、两臂锚杆机、给料破碎机、带式转载机、工作面带式输送机构成。

全断面矩形快速掘进机集机、电、液、激光陀螺惯导系统等多种高新技术为一体,具有快速、连续、一次全断面矩形成型和采、掘、运、支一体化的功能与特点。截割部由 1 个中心前置的大刀盘和 4 个四周布置的小刀盘组成(图 7),可实现矩形全断面一次成型;截割部与支架平台主梁进行柔性连接,掘进机配备 4 臂顶锚杆(固定)、2 臂帮锚杆钻臂,可实现割煤与支护同步进行,互不干涉影响。适用于截割断面尺寸(宽×高)为 5.8 m×3.8 m、6.0 m×4.0 m 和 6.2 m×4.0 m 的 3 种不同采高掘进工作面,掘

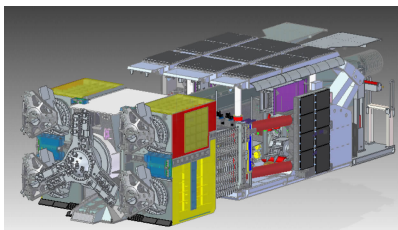


图 7 全断面矩形快速掘进机

进速度可达月进尺 3 000 m。

全断面矩形快速掘进机作业方式如下。

(1) 截割方式。全断面矩形快速掘进机截割部 5 个刀盘前后错次布置、有效组合,再配合 6 个盲区铲齿组合,就可一次形成全断面矩形巷道截割作业。其中,前置的大刀盘完成截割,提前形成自由面并起定位稳定作用;上部 2 个小刀盘完成矩形截割和向中部抛煤作业,下部 2 个小刀盘完成矩形截割和高效装煤作业。

(2) 推进方式。利用全断面矩形快速掘进机的左右撑靴、上下顶梁底座撑住左右侧帮和顶底板产生的摩擦力提供有效推进反力,完成截割部推进和掘进机前后移动作业。

(3) 装运方式。截割部通过 5 个刀盘将煤割下后,掘进机上部 2 个小刀盘在截割的同时通过刀板将煤反拨转至中部,然后沿自由面自由掉落至刮板输送机中部槽中,下部两个小刀盘在截割的同时将煤从两侧拨至刮板输送机中部槽,所有煤沿着主梁内侧的刮板输送机依次转运到移动给料破碎机、桥式转载机、带式输送机,完成装煤、运煤工序。

(4) 支护方式。机载锚杆机布置于后平台上,截割部与后平台之间柔性连接,锚杆机司机可在稳定的后平台上同步进行锚杆支护作业^[12-13]。锚杆支护排距 0~1.5 m 可调,根据行程传感器数据每朝前掘进 1 个排距支护 1 排共 4 根锚杆。掘进机后部两侧各布置 1 台帮锚杆机,通过升降机构可实现由上而下每个工位的帮锚杆支护。

(5) 导向方式。掘进机使用激光陀螺惯导系统实时精确测量掘进机的航向角、俯仰角和滚动角,以及掘进机行走轨迹。掘进机导航系统由激光陀螺惯导组、行程传感器、采集模块、上位机等组成,如图 8 所示。

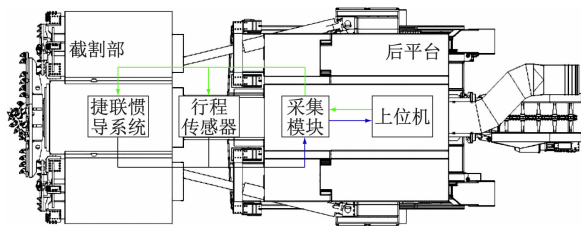


图 8 掘进机导航系统组成

(6) 纠偏方式。掘进机采用改进的鞍架方向调整机构与主梁、输送机结构一体化设计,新增截割部抬底系统,可有效、及时调整掘进机行进的轴线偏差,确保满足作业规程要求。

第三代快速掘进系统主要设备参数:全断面矩形快速掘进机,型号为 MJJ3800×5800,长×宽×高为 17.235 m×5.8 m×3.8 m,采高为 3.8~4.5 m,

截割头宽度为 5.8~6 m,采煤能力为 500 t/min;两臂锚杆机,长×宽×高为 6 m×1.4 m×2.2 m,适应巷道高度及宽度分别为 5.65,4.4 m,最小支护时间 3 min/根;给料破碎机,长×宽×高为 10.098 m×3.14 m×2.187 m,破碎能力为 2 000 t/h,运输能力为 2 000 t/h,功率为 300 kW;带式转载机,运输距离为 36.837 m,运输能力为 1 000 t/h,带速为 3.15 m/s,胶带宽度为 1 m。

2 快速掘进设备选配

2.1 截割刀具

截齿作为掘进机上破煤的刀具,在破岩过程中受摩擦力、压应力、冲击载荷、温升等多种因素综合影响^[14]。截割刀具选择是否得当直接影响掘进效率。因此,要根据顶板岩层结构、煤岩特性和巷道类型进行合理的截割刀具选型。

根据神东矿区多年生产实践,镐型截齿适用于煤巷掘进,其主要依靠剪切力,通过拉破坏来破碎煤岩。岩石抗拉强度远低于抗压强度,在煤岩强度较低时,煤巷用镐型截齿截割效率高。滚刀是利用用带刃的盘形刀具来破碎煤岩。滚刀在正压力推动下在煤岩表面滚动,使煤岩发生碾压破碎,对半煤岩巷、岩巷的破岩效率较高,且不易磨损。

2.2 掘进机导航方式

巷道是由截割断面纵向延伸构成的,而巷道截割断面则是由截割头空间运动姿态和掘进机机身位姿控制的。掘进机导航方式主要有激光指向仪、惯性导航、全站仪导航、激光引导^[15],对比见表 1。

表 1 不同导航方式对比

导航方式	优点	缺点
激光指向仪	设备简单,调整方便,成本低廉	无法实现自动化、智能化及远距离导航,主要依靠人员观测,受作业环境及人为因素影响大
惯性导航	不依赖外部信息,全时间内测量精度高;能够实时测量	时间累计误差大,长时间测量精度差,初始校准时间长,价格高不利于推广
全站仪导航	能够获得绝对坐标,没有累计误差	机身在动态运动中测量不同步、测量基准不统一,引入计算误差;掘进作业时机身剧烈振动,全站仪激光校准困难
激光引导	价格低,系统相对简单,利于推广	依赖激光仪初始定位,施工效率低;测量精度随巷道延伸逐渐降低;井下粉尘大,激光传导距离有限

惯性导航系统由陀螺仪和加速度计构成,可测量惯导系统载体在惯性参考系下各测量轴的角速度

和加速度,然后分别对时间积分获得姿态角和位置,是一种相对位置测量的方法。

全站仪导航系统由全站仪、定位棱镜和布置在掘进机上的若干棱镜或标靶构成,通过全站仪搜索定位棱镜和机载棱镜确定其空间坐标,是一种绝对位置测量的方法。

激光引导技术是通过在巷道后方安装激光发射器作为基点,在掘进机机身安装接收装置,通过记录激光入射光斑的位置变化,进行解算获得机身位置。

由表 1 可知,全站仪导航虽然精度高,误差不随时间累计,但环境适应性差、校准困难,设备构成复杂,安装、操作不方便。惯性导航体积小易于布置,但长时间定位精度差。因此,现阶段采用单一的导航技术无法满足对掘进机高精度姿态测量的要求,必须采用组合技术。例如采用全站仪+激光导航技术,配合高效除尘方案,采用冗余设计方案,相互校准,可获得较准确的导航效果。

2.3 支护模式

多臂锚杆机已经成为快速掘进系统的重要组成部分,神东矿区掘锚机一般配备 6 个钻臂,快速掘进系统则将数量增加到 8~10 个钻臂。第一代快速掘进系统采用掘锚机掘进,一般能做到短掘短支,循环进度为 1.0 m,最小空顶距 1.4 m 左右,最大空顶距不超过 2.5 m,但八臂锚杆机只能支护 2 根帮锚杆,剩余锚杆需用人工补打,帮锚杆支护效率低。第二代快速掘进系统增加了钻臂数量,为了更好的空间布置,将锚杆支护统一设置在破碎机后方,在掘进机上增设临时支护,操作人员在锚杆机上遥控作业,人员不进入空顶作业,在一定程度上解决了掘进截割和支护时间不平衡的问题,但也带来了空顶距增大的问题,空顶距达 21~30 m。为解决空顶距大的问题,第三代快速掘进系统增加了矩形壳体进行临时支护,同时对支护模块进行了优化,将最大空顶距缩小到 6.2 m。不同掘进方式空顶距及操控方式对比见表 2。

表 2 不同掘进方式空顶距及操控方式对比

掘进方式	空顶距/m	行进方式	操控方式
第一代快速掘进	1.4~2.5	履带行走	有线/无线遥控
第二代快速掘进	21~30	履带行走	有线/无线遥控
第三代快速掘进	4.7~6.2	推移油缸	操作台控制/无线遥控

2.4 后配套方式

目前神东矿区掘进队使用的桥式转载机最大跨距为 30 m,受桥式转载机跨距影响,当超过 30 m 时生产班需要延胶带,辅助作业时间占用了大量正常

生产掘进时间,严重影响掘进效率。为了解决该问题,先后研发了连运系统、可弯曲胶带转载机、大跨距桥式转载机等后配套设备以提高运输连续性。后配套设备技术对比见表 3。

表 3 不同后配套方式对比

后配套设备	主要技术参数	特点及适用范围
连运系统	运输能力 2 000 t/h;	履带行走,各装载点铰接,转向灵活,结构复杂,对底板破坏大,用人多;适用于底板坚硬、不宜泥化的情况
	有效搭接长度 106 m	
可弯曲胶带转载机	运输能力 1 600 t/h;	胶轮行走,柔性可弯曲,多点驱动;适用于底板坚硬、不宜泥化的情况
	运输距离 130 m;有效搭接长度 100 m	
大跨距桥式转载机	运输能力 1 000 t/h;	结构简单,在带式输送机刚性架轨道上行走;适用于巷道起伏不大于 6°、底板破碎、容易泥化的情况
	运输距离 60~70 m;	
	有效搭接长度 50~60 m	

采用连运系统、可弯曲胶带转载机、大跨距桥式转载机可加大一次掘进深度,使掘进工作面延伸带式输送机工作安排在检修班进行,可显著提高掘进效率。但连运系统及可弯曲胶带转载机占用巷道断面大,对巷道底板条件要求高,大跨距桥式转载机对巷道起伏适应性差,一定程度上限制了后配套设备的推广应用。

3 快速掘进关键技术

3.1 自动锚支技术

目前,神东矿区批量应用的支护设备可靠性较高,但均未实现自动化。为提高支护效率,实现与快速掘进工艺的配套,研发了自动两臂组合式锚杆机(图 9),实现了钻臂自动钻孔,锚杆自动安装、搅拌、紧固,间排距自动定位等功能,但还存在以下问题需要进一步研究解决:自动钻锚速度慢,自动排距效果差;无法自动对锚杆机行走进行纠偏;设备使用巷道高度不能低于 4.0 m。



图 9 自动两臂组合式锚杆机

3.2 安装回撤工艺

快速掘进系统因设备吨位大、体积大、掘进规格尺寸固定等问题,安装时需要 1 支掘进队配合掘进 350 m 的平行双巷(用时 15 d),施工安装硐室并打设 200 mm 厚的砼底板(用时 6 d),准备段巷道布置如图 10 所示。

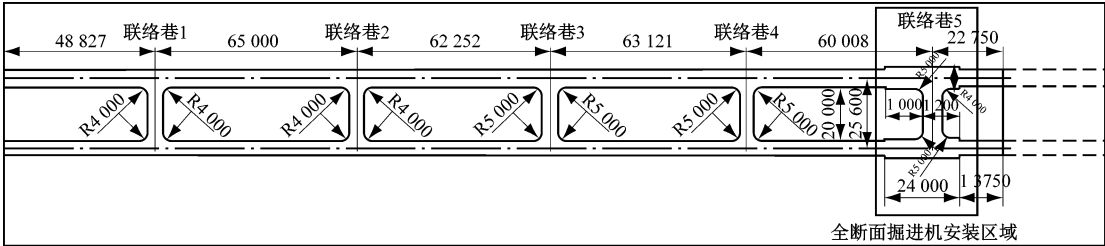
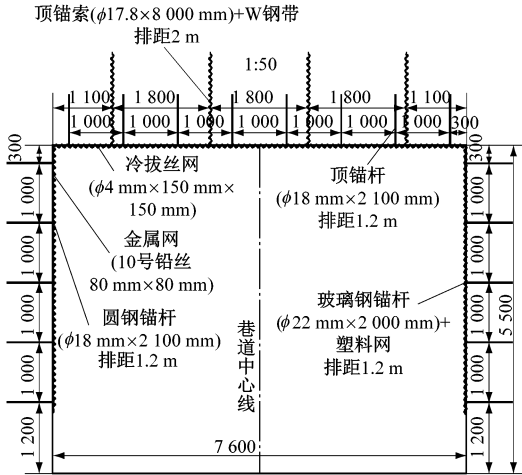
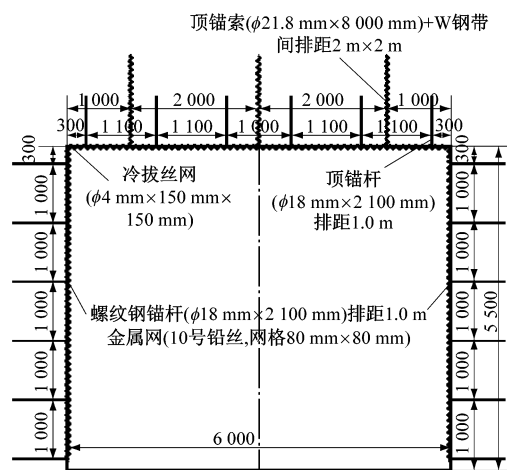


图 10 快速掘进系统准备段巷道布置

准备段巷道至少开 5 个联络巷。联络巷 1 为移变硐室;联络巷 2 为通风机硐室,要求双抹角,抹角半径为 4 000 mm;联络巷 3,4,5 为全断面掘进机、后配套设备安装运输通道,要求双抹角,抹角半径为 5 000 mm,净断面(长×宽×高)为 20 000 mm×6 000 mm×5 000 mm;联络巷 5 处沿巷道掘进方向设置全断面掘进机安装区域,区域尺寸(长×宽×高)为 24 000 mm×7 600 mm×5 500 mm,在安装区域内,根据设备安装位置打设起吊锚索。快速掘进系统准备段硐室和联络巷断面如图 11 所示。



(a) 安装硐室断面



(b) 安装联络巷断面

图 11 快速掘进系统准备段硐室和联络巷断面

快速掘进设备安装步骤:安装掘进机→安装破碎机→安装锚杆机→安装转载胶带→安装迈步式自移机尾→安装迈步式自移机尾刚性架→安装供电站→安装缆线→安装组合开关平台→安装移变→安装组合材料架,部分安装工作可平行作业。安装时间根据搬家倒面距离、是否升井检修等情况而定,一般为 7~15 d。

快速掘进设备回撤前,需由相邻巷道在巷道停掘位置前开设 2 个联络巷,打设 200 mm 厚的砼底板,末联巷要实现调车功能,头联巷为设备拆解区域,抹角半径为 5 000 mm,设备拆解区域(长×宽×高)为 24 000 mm×6 000 mm×5 500 mm。快速掘进系统回撤时需要施工回撤联络巷和拆解硐室。

下一步需要改进设备组装方式,通过预先挑高巷道或扩帮等方式,自行形成拆解硐室,减少安装拆卸的配套时间,保证正常掘进作业有效时间,进一步提高掘进效率。同时考虑到快速掘进设备的单进水平,巷道施工长度不宜低于 3 500 m。

4 快速掘进技术展望

神东矿区经过近 10 a 的研究,已经在厚煤层人工远程干预快速掘进方面取得了初步进展。展望未来,快速掘进技术需要在以下方面进行深入研究。

(1) 设备纵向模块化组合。针对目前快速掘进系统安装回撤工艺复杂、适应巷道断面小等问题,未来需要在设备模块化上进行深入研究,在纵向空间实现不同规格设备的模块化组装,以提高掘进巷道断面的可调范围^[16-17],实现停掘时自开通道,模块化回撤。同时需要在装备的小型化、大功率等方面下功夫,减小不必要缆线布置,使设备配套更加灵活、空间布置更加紧凑,以适应薄煤层不同复杂地质环境的需要。

(2) 自适应截割技术。融合惯导装置、多传感

器和视频监控,解决惯导系统累计误差大的问题,提高自主定位精度。根据原始地质三维模型,按照设计方案确定的路径自动调整掘进机行走姿态及方向,结合煤岩体硬度,自动调整截割量、转速和临时支护,实现快速掘进系统在不同生产及地质条件下远程甚至无人操作,实现智能化掘进^[18]。

(3) 智能锚支技术^[19]。针对目前支护作业用人较多、效率低、尚未实现自动操作的情况,未来需要在锚固位置岩性、自主定位、自动铺网、自动锚杆(索)支护及锚固质量无损自主监测方面进行研究,通过融合视频监控和多传感器技术,监测顶板岩性、钻机、网片和钢带网孔、钻孔位置,划定钻臂运动轨迹,确定钻孔精准位置。研发铺网机器人,通过铺网机器人完成网片的自动传送、搭接与铺设,采用全自动钻锚机器人完成锚杆孔的钻进、锚固剂填充、锚杆紧固。采用锚杆支护质量无损监测技术,通过压力、张力传感器自动监测锚杆锚固力、扭矩,并自动生成支护质量监测日志,根据支护质量监测结果动态分析评价支护方案的可行性,提出优化建议供设计人员进行支护优化,逐渐改变目前支护设计缺乏动态反馈手段,支护强度高,作业环节用人多、用时长、效率低等问题,实现支护的智能决策匹配。

(4) 环境感知^[20]。构建掘进过程环境随动自我感知模型,确定采动压力、裂隙、瓦斯、涌水等因素对掘进的影响,将工作面地质灾害防控和智能化掘进相结合,智能动态调整煤层掘进过程,促进设备效能的最大化利用和灾害防控效果的协调一致。

(5) 设备及人员联动安全防控。融合智能视频识别、设备防碰预警、人员接近预警、掘进支护联动闭锁系统,构建全方位的设备及人员联动安全防控体系,实现对掘进和支护关键工序的联动,以及对人员进入掘进工作面危险区域、环境等的风险识别与联动报警,解决现有视频监控受制于工作面粉尘浓度、效果差、盲点多、缺乏报警和联动闭锁机制等问题,全面保障设备及人员安全。

参考文献:

- [1] 罗文.快速掘进系统在大柳塔煤矿的应用[J].神华科技,2013,11(5):23-26.
- [2] 王建国,任建刚.高效快掘后配套设备的应用[J].煤矿机械,2014,35(9):149-151.
- [3] 李发泉.新型迈步式胶带输送机自移机尾的研制及应用[J].煤矿开采,2018,23(2):38-40.
- [4] 马超,代贵生,曹光明.快速掘进系统在大柳塔煤矿的应用[J].煤炭工程,2015,47(12):34-37.
- [5] 张小峰.高效快速掘进系统自动控制技术研究[J].煤炭技术,2016,35(11):292-294.

[6] 张小峰. 高效快速掘进后配套系统在大柳塔矿的应用[J]. 煤炭技术, 2016, 35(9): 262-263.

[7] 焦晓峰. 快速掘进成套装备智能化控制系统研究[J]. 煤矿开采, 2018, 23(2): 41-44.

[8] 王连生. 煤巷快掘技术及装备开发应用研究[J]. 神华科技, 2016, 14(3): 28-32.

[9] 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.

[10] 杨健健, 张强, 王超, 等. 煤矿掘进机的机器人化研究现状与发展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2995-3005.

[11] 王彬. 煤矿巷道锚杆(索)分次支护及快速掘进技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.

[12] 陈宇, 张洋, 耿继业, 等. 高应力煤巷掘锚护一体化快速掘进工序优化与支护技术[J]. 煤矿安全, 2019, 50(7): 120-123.

[13] 王佃武. 煤矿用锚杆转载机组的研制与应用[J]. 中国煤炭, 2019, 45(6): 31-34.

[14] 喻龙. 不同刀齿煤岩截割破碎性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.

[15] 刘送永, 崔玉明. 煤矿井下定位导航技术研究进展[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(7): 114-120.

[16] 马士秀. 巷道快速掘进与高效支护成套技术装备[J]. 中国安全生产, 2020, 15(6): 52-53.

[17] 苗祥云. 煤巷连采快速掘进模式的发展趋势与关键技术[J]. 工程技术研究, 2020, 5(9): 128-129.

[18] 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.

[19] 张旭辉, 周创, 张超, 等. 基于视觉测量的快速掘进机器人纠偏控制研究[J]. 工矿自动化, 2020, 46(9): 21-26.

[20] 杨健健, 张强, 吴森, 等. 巷道智能化掘进的自主感知及调控技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2045-2055.